

博 士 論 文

持続的成長を目指す中小企業における製品開発プロセスに関する研究  
(コア技術を活用した製品開発手法)

(A Study of Product Development Process in Small and Medium-sized Enterprises Aiming  
Sustainable Growth : Product Development Method Utilizing Core Technology)

2018 年 3 月

京谷 忠幸

山口大学大学院 理工学研究科

# 持続的成長を目指す中小企業における製品開発プロセスに関する研究

## (コア技術を活用した製品開発手法)

### 要 旨

現代のビジネス環境に於いて、企業を持続的に成長させていくことは非常に困難である。その背景には日本の技術力に対する評価は高いが国際競争力ランキングは徐々に低下している状況があり、競争力の向上にはイノベーションの創出が重要であるとの指摘がなされている。イノベーションの創出には、社会の様々な「こと」に対応した市場への適応のための製品やサービスを効果的に見出し提供することが必要であり、強い社会的要求がある。このような環境の中、企業を持続的に成長させるために必要となる製品を効率的に開発するための製品開発プロセスについて研究を行うことは重要であると考えた。そこで本研究では、モノづくりを行なっている中小企業が持続的に成長するために必要となるコア技術の中核とした製品開発プロセスについて検討を行う。

第1章では、本論文における研究のアウトラインを示した。

第2章では、持続的成長企業に求められる特徴を見出すために、先行研究者による文献調査から、その要因を抽出し、中小企業における持続的成長の特徴を考察した上で、モノづくり企業が持続的に成長するための基盤となる定義や主要因を示した。また、その要因を基に中小企業がその組織へ適用する際の課題やその解決方法について考察を行なった結果を示した。そして持続的成長をするためにはイノベーションとそのマネジメントが重要であることに着目した。

第3章では、市場への適応のための製品やサービスについて、効果的に製品開発を行うために、製品に提供される技術とその技術動向を分析する手法を検討し、特許検索システムのひとつであるYUPASS(Yamaguchi University Patent Search System)とパテントマッピングソフトを組み合わせた特許分析システムを用いて半導体製造装置に欠かすことのできない露光装置を例として、技術の変化とその選択が開発製品の将来の市場シェアに与える影響に関して評価を行なった。その結果、新たな特許情報に基づく技術動向分析手法として、提案した分析手法により、企業における競争優位を高めるためには効果的な製品開発を行う研究開発戦略および方向性を明らかにするための有効な情報であること、さらにその特許情報に含まれる技術情報の探索目的に適合する定量分析、定性分析、相関分析などを通じて分析結果を見

える化することで技術情報を容易に理解することができることを示した。

第4章では、コア技術の重要性について延岡[46]は日本の製造企業が苦悩している最大の問題は、「モノづくり」が上手くできても、大きな売上や利益を結びつけることができず「価値づくり」ができていないことと指摘している。製品は顧客要求に基づき新たな価値を提案するための「こと」を達成する手段であるが、その製品価値を達成するためにコアとなる技術が存在する。そこで、製品開発プロセスの実証評価から製品のコア技術を明確化するための分析手法を新たに提案し、その分析手法を用いた実製品における評価検証からその有効性を示した。さらに効果的に顧客が要求する価値を提供するためのモノづくり製品開発・設計プロセスを提案した。

第5章では、製品開発プロセスにおいて重要な役割を果たす製品のコア技術について、コア技術をより効率的に開発するための技術開発手法が必要である。そのため、実製品の市場要求に基づく課題に対して、解析主導の考え方にに基づき新たな技術開発手法を提案し、その設計手法による技術開発の検討から新たなコア技術を開発した。具体的には、顧客価値要求に応えるため、インクジェットプリンターヘッドの高品位な印刷手法であるマルチドロップ吐出技術に関する駆動波形を新たに設計するため、吐出駆動波形シミュレーションのシステムモデル技術及び液滴の吐出実態評価システムをそれぞれ開発し、開発したシステムを組み合わせた。吐出波形の開発評価手法を構築した。その吐出波形の開発評価手法を用いた研究から、従来の駆動波形では制御が困難であった。高品位のマルチドロップ吐出のための駆動波形を設計し、その技術の有効性を明らかにした。設計した駆動波形は従来技術では不可能であった吐出速度を一定にした状態で吐出重量を制御すること、さらには、粘性の異なる複数のインクに対して吐出制御を行うことができる。

第6章では、経営ビジョンに基づきコア技術を中心とした解析主導の考え方に基づく製品開発手法を示し、得られた結果を総括し、効果的且つ効率的な製品開発プロセスを示した。

本研究は、モノづくりを中心とした中小企業が持続的に成長するために必要な特徴から主要因を考察し、市場への適応を考え、その要因を実行するための方法のひとつとして重要である技術の評価手法の明確化、そして、製品開発を効果的に行うために必要不可欠なコア技術の明確化手法と、さらに具体的な製品開発におけるコア技術の効率的な開発手法を示すことで、顧客要求に基づき製品開発の競争優位性を構築するための製品開発プロセスを示したものである。

総括し、モノづくりを中心とした中小企業が持続的に成長するために、市場開発における顧客価値の探索、提案、そして、獲得するための顧客価値・競争優位を得るための設計開発手法とその開発プロセス方法について有用性を示した。

## **Abstract**

### **A Study of Product Development Process in Small and Medium-sized Enterprises Aiming Sustainable Growth: Product Development Method Utilizing Core Technology**

In the current business environment, it is exceedingly difficult for companies continue to grow sustainably. As a background, there is a situation that Japanese global competitiveness has been declined gradually even though evaluation of Japanese technology is high, and it is pointed out that the creations of innovation are essential to boost competitiveness. In order to create innovation, it is necessary to both effectively discover and provide products and services to adapt the various market all over the society regardless the style of business. Therefore, it is meaningful to study a process for effectively developing products which is required for sustainable growth of companies.

Hence, in this study, I will investigate about product development process in which core technology as a central core that is necessary for small and medium-sized manufacturer to grow sustainably.

In the 1<sup>st</sup> paragraph, the outline of study in this thesis have been shown.

In the 2<sup>nd</sup> paragraph, I extracted factors for sustainable growth from literatures written by preceding researcher in order to find out features which are required to companies that are growing sustainably. Additionally, I examined features for sustainable growth of small and middle-sized enterprises, and showed underlying definition and major factor of sustainably growth for manufacturer. Furthermore, I showed the results of consideration about issues and the way of solving when small and medium-sized enterprises adapt the factors toward inside organization. And for the above considering, I focused that innovation and its management are important for sustainable growth.

In the 3<sup>rd</sup> paragraph, I considered about a method to analyze the technology which is served to the products and its tendency in order to effectively development of products to adapt various market. Moreover, I evaluated the influence that the change of technology and its choice afford to the share of the future market of developed product with taking exposure equipment as an example which is essential for semiconductor production. For verifying, I used patent analyze system which is combined patent mapping software and YUPASS (Yamaguchi University Patent Search System) which is one of patent search system.

As a result, I found out that proposed analyze method as a new technology tendency analyze method based on patent information is effective to clarify strategy and directions of research and development for effectively product development in order to increase competitive advantage for company. Furthermore, I also showed that technology information becomes easy to understand by visualizing analyzed result through quantitative analysis, qualitative analysis and correlation analysis which is suite to a purpose of searching technology information that is included in patent information.

Kentaro Nobeoka Ph.D [46] have mentioned that the biggest issue for Japanese manufacturer is failure of value creation; they have failed to connect production and large proceeds even if production have got result. Though product is means for proposing new value to customers based on their request, there is core technology for achieving value of the product.

Therefore, in the 4<sup>th</sup> paragraph, I proposed analyzing method afresh to clarify core technology of product from demonstration and evaluation of product development process, and I showed its effectivity through verifying for evaluation to actual product by using the analyzing method. Moreover, I proposed process of product development and designing to supply values more effectively that customer requires.

Core technology of product plays an important role in product development process and technology developing method to develop core technology more efficiently is required.

Therefore, in the 5<sup>th</sup> paragraph, I proposed a new technology developing method based on analyze-led way of thinking against issues which are based on the request of the market of actual product. Moreover, I developed new core technology through verifying of technology development by using the method. Specifically, to meet request of value form customers, I developed each of system model technology of simulating ejection drive waveform and evaluation system for state of droplet ejecting in order to design drive waveform regarding multi-drop ejection technology; high-quality printing method of ink-jet printer head. Additionally, I constructed developing and evaluating method of ejection waveform by combining them together. From a study by using the method, I succeeded to design drive waveform for high-quality multi-drop ejection which had been hard to control in case of conventional drive waveform and clarified effectivity of the technology.

Designed drive waveform made it possible to control ejecting size while keeping ejecting velocity constant that had been impossible in case of conventional technology. Moreover, ejection control to multiple ink which have different viscosity also became available.

In the 6<sup>th</sup> paragraph, in accordance with management vision, I showed product development method which is based on analyze-led way of thinking with a focus on core technology, summarized obtained result and showed effective and efficient process of product development.

This study made following steps;

Firstly, examined major factor from feature which is required for small and medium-sized enterprises to grow sustainably. Secondly, considered about adaptation to a market. Thirdly, clarified evaluating method of technology which is important as one of a method to introduce the factor inside. Fourthly, showed the method to clarify core technology which is essential for effective product development and efficient core technology developing method in regards of more specifically product development.

Through above steps, showed product development process for constructing competitive advantage of product development based on customers request.

In summary, this study showed usefulness of the method of design development and its development process in order to increase competitive advantage by exploring, proposing and getting customer value in the field of market development for sustainably growth of medium-sized enterprises mainly in manufacture industry.

<b>目 次</b>	
<b>第1章</b>	<b>序論</b> ..... 1
1.1	研究の背景と目的..... 1
1.2	本論文の構成..... 2
<b>第2章</b>	<b>中小企業における持続的成長要因に関する一考察</b> ..... 14
2.1	研究内容..... 14
2.1.1	日本の中小企業の現状と課題..... 14
2.1.2	企業の倒産要因分析..... 15
2.1.3	株式会社ピーエムティーの調査..... 18
2.1.4	持続的成長に関する定義の検討..... 20
2.2	企業の <b>持続的成長の要因</b> ..... 23
2.2.1	調査方法..... 23
2.2.2	持続的な成長の要因調査結果..... 23
2.2.3	持続的な成長を達成するための基本フレームワークに 関する検討..... 25
2.2.4	持続的成長重要要因への基本フレームワークの展開..... 25
2.2.5	提案した持続的成長の重要な要因に基づく中小企業 における適応検証..... 30
2.2.6	持続的成長要因との対比..... 31
2.3	まとめ..... 34
<b>第3章</b>	<b>特許検索システムを用いた技術動向分析の一考察</b> ..... 35
3.1	はじめに..... 35
3.2	特許分析システムとその特徴..... 35
3.2.1	Fタームを用いた技術内容の解析..... 37
3.2.2	解析手順..... 39
3.3	露光装置の特許分析..... 40
3.3.1	露光装置のマーケットシェア..... 40
3.3.2	パテントマップによる分析..... 41
3.4	解析結果..... 43
3.4.1	Fターム5桁による大分類(技術分野)解析..... 43
3.4.2	Fターム7桁:中分類(観点)解析..... 44
3.4.3	Fターム9桁:小分類(技術内容)解析..... 45

	3.4.4	時系列マップ分析	46
	3.4.5	ポートフォリオマップによる分析	49
3.5		まとめ	54
<b>第4章</b>		<b>モノづくり会社に於けるコア技術の明確化とコア技術を中核とした製品開発に関する考察</b>	<b>55</b>
4.1		はじめに	55
4.2		コア技術の重要性について	55
	4.2.1	コア技術	55
	4.2.2	製品のライフサイクルについて	57
4.3		コア技術の明確化方法の検討	58
	4.3.1	ピーエムティーのコア技術の明確化手順	58
	4.3.2	品質機能展開(QFD)	60
	4.3.3	QFDの進め方	61
	4.3.4	階層分析法(AHP)	63
4.4		コア技術の明確化	69
	4.4.1	コア技術の明確化手順	69
	4.4.2	ピーエムティーのコア技術の考察	79
4.5		製品開発プロセスの検討	82
	4.5.1	製品開発における問題の整理	82
	4.5.2	主要因に対する対応案の検討	85
	4.5.3	社内標準化の検討	86
	4.5.4	製品開発プロセスの提案	88
	4.5.5	効果の予測検証	89
	4.5.6	技術資料と技術報告会の検討	90
4.6		まとめ	92
<b>第5章</b>		<b>技術開発手法に関する検討</b>	<b>93</b>
5.1		はじめに	93
5.2		解析主導設計 (Analysis-Led Design, ALD)	94
5.3		システムモデルの構築手法及び基本概念	96
	5.3.1	システムモデル構築手法	96
	5.3.2	システムモデルの基本概念と基本コンセプト	97
5.4		モノづくりの価値・機能定義におけるセミ非因果モデルの提案	99
	5.4.1	モデリング手法の現状	100
	5.4.2	モデル化手法の問題点とセミ非因果モデルの提案	101



5.4.3	セミ非因果モデルの検証	102
5.4.4	まとめ	108
<b>5.5</b>	<b>Modelica を用いた FEM アプローチによる非因果モデル 及び因果モデル構築</b>	<b>109</b>
5.5.1	ソルバオーダリングシステムを用いた単純回路モデル の解説	110
5.5.2	Modelica を用いた Fem アプローチによる因果モデルと 因果モデル構築	118
5.5.3	まとめ	125
<b>5.6</b>	<b>ピエゾ式インクジェットプリンタヘッドモデルの構築</b>	<b>126</b>
5.6.1	ピエゾ式インクジェットプリンタの吐出原理	127
5.6.2	機械系モデルの構築	128
5.6.3	ピエゾ式インクジェットプリンタヘッドモデルの シミュレーション	155
5.6.4	まとめ	163
<b>5.7</b>	<b>実験評価システムに関する検討</b>	<b>164</b>
5.7.1	ピエゾ方式インクジェットプリンタの入力電圧波形	165
5.7.2	安定した液滴の吐出	166
5.7.3	実験評価システムに関する検討, 液滴制御方法の検討	168
5.7.4	液滴吐出実験	168
5.7.5	システム同定	191
5.7.6	まとめ	196
<b>5.8</b>	<b>予備振動を抑制した駆動波形によるシングル吐出制御の 実験的研究</b>	<b>197</b>
5.8.1	実固有周期に関する研究	198
5.8.2	吐出制限数の実験標準	200
5.8.3	波形の制動効果に与える影響	201
5.8.4	まとめ	218
<b>5.9</b>	<b>シングルおよびマルチドロップ吐出方式の DoD インクジェットプリンタの新しい駆動波形設計に関する研究</b>	<b>219</b>
5.9.1	基本波形における制限	220
5.9.2	実験方法	222
5.9.3	新しい駆動波形設計のコンセプト生成	223
5.9.4	結果と考察	232
5.9.5	まとめ	240
<b>5.10</b>	<b>まとめ</b>	<b>241</b>

---

---

第6章	結論	242
6.1	本研究のまとめ	242
6.2	今後の展望	244
謝辞		245
参考文献		246

図目次

図 1.1	本研究のアウトライン	2
図 1.2	野中郁次郎 知識創造企業 SECI モデルより著者作成	4
図 1.3	差別化の源泉	6
図 2.1	帝国データバンク 2011 年度報より著者作成	15
図 2.2	帝国データバンク 2006 より著者作成	16
図 2.3	中小企業庁 2011 より著者作成	16
図 2.4	ピーエムティーの業績推移	18
図 2.5	基本フレームワークの概略図	25
図 2.6	経営理念・ビジョンの経営フレームワークの概略図	26
図 2.7	企業文化・組織風土の経営フレームワークの概略図	27
図 2.8	経営マネジメント・管理システムの経営フレームワークの概略図	28
図 2.9	イノベーションの経営フレームワークの概略図	30
図 2.10	ピーエムティーの売上高, 売上高経常利益率推移	31
図 2.11	ピーエムティーのスパイラル浸透・運用モデル	33
図 3.1	方式別のマクロ解析手法	36
図 3.2	特許情報の解析対象要素	37
図 3.3	分類系の解析要素による解析の度合いの評価	38
図 3.4	F タームの構成と解析要素としての階層桁数	38
図 3.5	解析の全体フロー	39
図 3.6	半導体露光装置メーカーシェアの推移	41
図 3.7	解析対象となる特許文献の検索式と結果	41
図 3.8	F ターム 5 桁ランキングマップ	43
図 3.9	F ターム 7 桁ランキングマップ	44
図 3.10	F ターム 9 桁ランキングマップ	45
図 3.11	F ターム 9 桁(テーマコード:5F146;観点:BA)の時系列マップ	47
図 3.12	メーカー別世界シェアと液浸露光割合変化	48
図 3.13	ニコン:F ターム 9 桁(テーマコード:5F146)のポートフォリオマップ	49
図 3.14	キヤノン:F ターム 9 桁(テーマコード:5F146)のポートフォリオマップ	50
図 3.15	ASML:F ターム 9 桁(テーマコード:5F146)のポートフォリオマップ	51

図 4.1	差別化の源泉	56
図 4.2	10 年前の製品ライフサイクルとの比較結果 (2015 年調査) より著者作成	57
図 4.3	従来のピーエムティーの製品開発プロセス	58
図 4.4	装置開発における機会損失の事例	59
図 4.5	石尾らが提案しているコア技術の明確化手順	60
図 4.6	QFD の概要	60
図 4.7	モノづくり会社におけるコア技術の明確化手順	69
図 4.8	ピーエムティーに対するコア技術評価結果の要約	80
図 4.9	ピーエムティーの製品開発工程	81
図 4.10	ミステリー分析の手順	82
図 4.11	ミステリー分析の各図形の説明	83
図 4.12	ミステリー分析の図の読み方	83
図 4.13	ピーエムティーの製品開発で機会損失が発生している主要因の整理 (ミステリー分析結果)	84
図 4.14	現状のピーエムティーの製品開発プロセス	85
図 4.15	過去の実績 (機構, 要求精度, 価格) のまとめ	86
図 4.16	社内標準化の活用イメージ	87
図 4.17	提案する製品開発プロセス	88
図 4.18	提案する製品開発プロセスの効果の予測検証結果	89
図 4.19	技術資料と技術報告会の検討内容	90
図 5.1	設計の過程	94
図 5.2	製品開発プロセス開発工数イメージ	95
図 5.3	1D-CAE の技術体系	100
図 5.4	直列・並列接続を含むスプリングモデル	102
図 5.5	FEM の解析手順概要	103
図 5.6	システムモデルの解析手順概要	103
図 5.7	スプリング 1 の境界条件	104
図 5.8	スプリング 2 の境界条件	105
図 5.9	スプリング 3 の境界条件	105
図 5.10	スプリング 1 のモデル図	106
図 5.11	スプリング 2 のモデル図	106
図 5.12	スプリング 3 のモデル図	106
図 5.13	変位の適合条件式に関するモデル	107
図 5.14	力の平衡方程式に関するモデル図	107
図 5.15	セミ非因果モデル化手法によるスプリングモデル全体図	108

図 5.16	モデル化されたモデルの変換および実行のプロセス	111
図 5.17	Modelica Concept のためのラベル付き簡易回路モデル	111
図 5.18	垂直ソート順	115
図 5.19	簡単な回路モデルの例の Block Lower Triangular (BLT) フォーム	116
図 5.20	モデルのグラフィカルモデリング (オリジナル)	119
図 5.21	Modelica におけるグラフィカルモデリング (FEM アプローチ)	120
図 5.22	Modelica オリジナルコンセプトによるテキストモデリング	122
図 5.23	Modelica オリジナルコンセプトによるシミュレーション結果	123
図 5.24	FEM アプローチのためのテキストモデリング (因果モデル構築)	123
図 5.25	FEM アプローチのシミュレーション結果 (因果モデル構築)	124
図 5.26	FEM アプローチのためのテキストモデリング (因果モデル構築)	124
図 5.27	FEM アプローチのシミュレーション結果 (因果モデル構築)	125
図 5.28	メニスカスの挙動	127
図 5.29	液滴吐出時のイメージ	127
図 5.30	ノズルおよびメニスカスをなす球の模式図	129
図 5.31	接触角とメニスカスの関係	129
図 5.32	ピエゾ式プリンタヘッドモデル	130
図 5.33	管	131
図 5.34	毛細管現象	133
図 5.35	一般的なヘルムホルツ共鳴のモデル	137
図 5.36	二つの開口を有するヘルムホルツ共鳴のモデル	138
図 5.37	4 層組み合わせ変断面梁モデル	139
図 5.38	解析モデル	144
図 5.39	荷重条件	144
図 5.40	拘束条件	144
図 5.41	2 層組み合わせ梁	146
図 5.42	Xcos モデル	150
図 5.43	Acuaor ブロックの内部	150
図 5.44	Drive Voltage ブロックの内部	151
図 5.45	Nozzle ブロックの内部	151
図 5.46	meniscus spring ブロックの内部	152
図 5.47	Inlet ブロックの内部	152
図 5.48	Droplet ブロックの内部	153
図 5.49	Ink Common Room 内部のブロック	154
図 5.50	波形変更用アプリケーション	154
図 5.51	駆動電圧波形	155

図 5.52	時間とメニスカス速度の関係	155
図 5.53	積分開始および終了時刻を示した模式図	157
図 5.54	液滴吐出計算用モデル	160
図 5.55	アニメーションの様子 1	161
図 5.56	アニメーションの様子 2	161
図 5.57	アニメーションの様子 3	162
図 5.58	アニメーションの様子 4	162
図 5.59	アニメーションの様子 5	162
図 5.60	アニメーションの様子 6	163
図 5.61	アニメーション終了時の画面	163
図 5.62	サーマル方式インク絵ジェットプリンタヘッド	164
図 5.63	ピエゾ方式インク絵ジェットプリンタヘッド	164
図 5.64	プリント基盤	165
図 5.65	入力電圧波形	166
図 5.66	入力電圧波形とヘッドの動作関係	166
図 5.67	液滴の形状(リガメント無)	167
図 5.68	液滴の形状(リガメント有)	167
図 5.69	リガメント長さ	167
図 5.70	実験装置 (IJ-DOT-R5)	169
図 5.71	実験装置の全体図	169
図 5.72	コントロール画面	170
図 5.73	液滴吐出画面	170
図 5.74	電子天秤	171
図 5.75	実験条件(波形)	174
図 5.76	ノズル間のばらつき	178
図 5.77	周期と体積の関係	178
図 5.78	周期と速度の関係	179
図 5.79	吐出周波数と速度の関係	179
図 5.80	T1 と速度の関係	180
図 5.81	波形・電圧・温度と液滴の安定・不安定判定(ダフノール) 28°C	186
図 5.82	波形・電圧・温度と液滴の安定・不安定判定(ダフノール) 24°C	186
図 5.83	波形・電圧・温度と液滴の安定・不安定判定(ダフノール) 20°C	187
図 5.84	安定と不安定の境界(ダフノール)	188
図 5.85	波形・電圧・温度と液滴の安定・不安定判定(UV インク) 35°C	189
図 5.86	波形・電圧・温度と液滴の安定・不安定判定(UV インク) 40°C	189
図 5.87	波形・電圧・温度と液滴の安定・不安定判定(UV インク) 45°C	190

図 5.88	安定と不安定の境界 (UV インク).....	190
図 5.89	UV インクとダワノールの比較.....	191
図 5.90	システム同定.....	192
図 5.91	システム同定の考え方.....	192
図 5.92	条件 1 の比較結果 (20°C).....	194
図 5.93	条件 1 の比較結果 (24°C).....	194
図 5.94	ダワノールにおける比較結果 (体積).....	195
図 5.95	UV における比較結果.....	195
図 5.96	$T_{\text{keep}}$ 関数としての液滴速度.....	199
図 5.97	吐出制限数実験の回帰結果.....	201
図 5.98	基本波形のプロファイル.....	202
図 5.99	予備振動率を決定するための事前実験.....	202
図 5.100	予備振動による波形のプロファイル.....	203
図 5.101	振動を抑制した波形のプロファイル.....	204
図 5.102	液滴形成過程と速度 (基本波形).....	206
図 5.103	U 液滴速度測定.....	207
図 5.104	基本波形の液滴形状 (1000 $\mu\text{m}$ from nozzle).....	208
図 5.105	振動波形の予備と抑制のための液滴形状.....	208
図 5.106	予備振動のための液滴形成プロセス.....	210
図 5.107	基本波形と予備振動波形の液滴速度の比.....	211
図 5.108	基本波形と予備振動波形の液滴体積の比較.....	212
図 5.109	「予備振動」波形の波の重ね合わせの概念の説明.....	213
図 5.110	ヘッド温度の関数としての液滴体積 (基本波形).....	214
図 5.111	異なるヘッド温度における電圧の関数としての液滴速度 (基本波形).....	215
図 5.112	説明「抑止 A」波形出力 (低電圧).....	215
図 5.113	説明「抑止 A」波形出力 (高電圧).....	216
図 5.114	「抑制 A」(第 2 のパルスの異なる割合)に対する実験前の結果.....	216
図 5.115	「抑制 B」波形出力の説明.....	217
図 5.116	基本波形と「抑制 B」波形との液滴速度の比較.....	218
図 5.117	基本波形プロファイル.....	221
図 5.118	基本波形からの液滴形状 (1 パルス).....	221
図 5.119	基本波形からの液滴形状 (2 つおよび 3 つのパルス).....	221
図 5.120	PDCA サイクルによる研究方法.....	223
図 5.121	波の重ね合わせ原理を用いたシミュレーションモデル.....	224
図 5.122	小さな予備振動による波形設計の実験結果.....	225
図 5.123	予備振動としての "U" 波形プロファイル.....	225

---



---

図 5.124	予備振動としての「W」波形プロファイル	226
図 5.125	「U」波形の前後傾斜概念	227
図 5.126	概念的なシステムモデルを用いた "U"と "W"波形応答	228
図 5.127	「W」と「U」の単一液滴波形	229
図 5.128	異なる $t_{wait}$ を有する「U」波形の比較	230
図 5.129	マルチドロップコンセプトの調整電圧と未調整電圧の入力応答	231
図 5.130	マルチドロップ方式の波形プロファイルの新設計	232
図 5.131	液滴形状のシングルドロップ法の比較	233
図 5.132	液滴速度の比較 (基本波形, "U", "W"波形)	233
図 5.133	シングルドロップ吐出における液滴体積の比較 (U, "W", 基本波形)	234
図 5.134	マルチドロップ噴射 (例えば 5 パルス) の概念図	236
図 5.135	速度差 (a)「U」波形と (b)「W」波形	238
図 5.136	液滴「U」の形状と「W」予備振動	239



## 表目次

表 2.1	企業共済協会 中小企業調査研究報告より著者作成	17
表 2.2	経済産業省の示す中小企業の現状と問題点に対するピーエムティーの対応	18
表 2.3	ピーエムティーの外部・内部要因の対する対応例	19
表 2.4	ピーエムティーに於ける持続力・跳躍力・リスク判定と業界大手との対比	22
表 2.5	抽出した持続的成長に重要な要因	23
表 2.6	持続的成長要因とピーエムティーの対比及び進捗指標	32
表 3.1	ASML:Fターム 5桁の割合	44
表 3.2	Fターム 7桁と観点	45
表 3.3	Fターム 9桁と技術内容	46
表 3.4	Fターム 9桁(テーマコード:5F146;観点:BA)	48
表 3.5	ニコン:Fターム番号とその説明	50
表 3.6	キヤノン:Fターム番号とその説明	51
表 3.7	ASML:Fターム番号とその説明	52
表 4.1	革新技術と積み重ね技術の競争優位性への貢献比較	55
表 4.2	評価尺度	63
表 4.3	一覧表の例	64
表 4.4	手順 2-1 の説明例	64
表 4.5	手順 2-2 の説明例	64
表 4.6	手順 2-3 の説明例	65
表 4.7	手順 2-4 の説明例	65
表 4.8	手順 3 の説明例(幾何平均法での重要度算出)	66
表 4.9	各評価基準別の代替案の一対比較結果のまとめ	67
表 4.10	総合評価の例	67
表 4.11	各製品の要求品質項目の階層別項目数	70
表 4.12	要求品質項目の 1 次階層の評価結果(マスクレス露光装置)	70
表 4.13	要求品質項目の 2 次階層の評価結果(マスクレス露光装置)	71
表 4.14	要求品質項目の 3 次階層の評価結果(マスクレス露光装置)	72
表 4.15	各階層における項目数の際による影響を解消する前後の例 (マスクレス露光装置)	73
表 4.16	各製品の品質特性項目	74

表 4.17	要求品質-品質特性の二次元表の例(マスクレス露光装置).....	74
表 4.18	品質特性重要度算出の例(マスクレス露光装置).....	75
表 4.19	品質-要素機能展開表の例(マスクレス露光装置).....	76
表 4.20	要素機能-要素機構展開表の例(マスクレス露光装置).....	77
表 4.21	要素機構-要素部品展開表の例(マスクレス露光装置).....	78
表 4.22	ピーエムティーに対する本研究の評価結果.....	79
表 4.23	各製品の要求精度と要素機構, 要素部品の関係.....	80
表 5.1	システムモデル構築手法の比較.....	97
表 5.2	代表的なソフトウェア.....	97
表 5.3	C.I の水平ソート順序の例.....	114
表 5.4	V MODELICA の単純回路モデルから抽出された変数.....	116
表 5.5	簡易回路モデルからの可変抽出テーブルの改訂版(提案).....	116
表 5.6	シンプルな回路モデルのブロック下三角の形のための改訂版(案).....	118
表 5.7	単純回路モデルから抽出された方程式に対する FEM アプローチ.....	121
表 5.8	解析モデルの幾何形状パラメータ.....	145
表 5.9	銅の材料特性.....	145
表 5.10	最大たわみ量の比較.....	145
表 5.11	材料定数.....	156
表 5.12	アクチュエータの板厚および幅.....	156
表 5.13	ノズルの幾何形状パラメータ.....	156
表 5.14	インク供給管の幾何形状パラメータ.....	156
表 5.15	圧力室の幾何形状パラメータ.....	156
表 5.16	インクの物性値.....	156
表 5.17	実験条件①.....	172
表 5.18	実験条件②.....	173
表 5.19	実験条件②(波形).....	173
表 5.20	実験条件③.....	174
表 5.21	実験条件④(速度).....	175
表 5.22	実験条件④-2(速度).....	175
表 5.23	実験条件④-3(体積).....	175
表 5.24	実験条件④(体積検証用).....	176
表 5.25	実験条件⑤.....	176
表 5.26	実験条件⑥.....	177
表 5.27	システム同定用実験データ(20~22°C).....	181
表 5.28	システム同定用実験データ(23~25°C).....	182

---

---

表 5.29	システム同定用実験データ(体積).....	183
表 5.30	波形とリガメントの関係.....	184
表 5.31	波形と速度の関係.....	185
表 5.32	比較対象.....	193
表 5.33	実際の固有周期の実験のための入力パラメータ.....	198
表 5.34	実吐出の制限数の実験のための入力パラメータ.....	200
表 5.35	ベース電圧の割合(ブレークアップ液滴まで).....	203

## 第1章 序論

### 1.1 研究の背景と目的

現代のビジネス環境に於いて、企業を持続的に成長させていくことは非常に困難である。その背景には日本の技術力に対する評価は高いが国際競争力ランキングは徐々に低下している状況があり、競争力の向上にはイノベーションの創出が重要であるとの指摘がなされている。イノベーションの創出には、社会の様々な「こと」に対応した市場への適応のための製品やサービスを効果的に見出し提供することが必要であり、強い社会的要求がある。このような環境の中、企業を持続的に成長させるために必要となる製品を効率的に開発するための製品開発プロセスについて研究を行うことは重要であると考えた。

そこで本研究では、モノづくりを行なっている中小企業が持続的に成長するために必要となるコア技術の中核とした製品開発プロセスについて検討を行う。

## 1.2 本論文の構成

本研究の全体像を図 1.1 に示す。

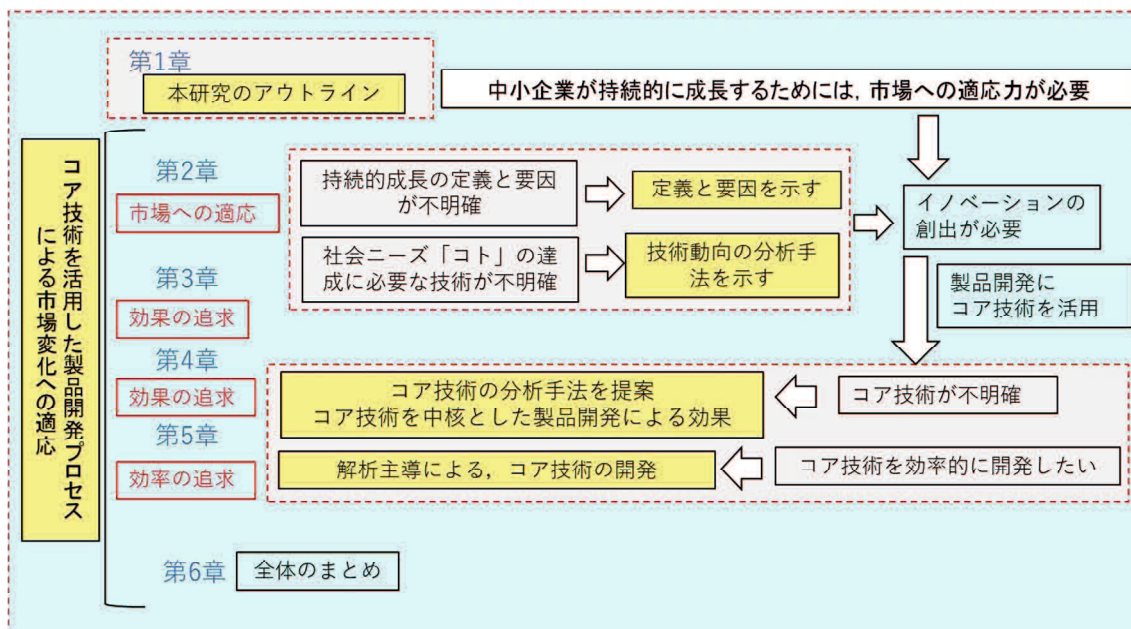


図 1.1 本研究のアウトライン

はじめに、持続的成長企業に求められる特徴から、その要因を抽出すると同時に、その組織的対応に関する考察を行う(第2章). 次に、持続的成長を達成には、イノベーションの創出が重要であることから、そのための市場に適応した社会ニーズに応えるための「こと」の達成に重要な役割を果たす技術について、その動向を分析する手法を示す(第3章). さらに、効果的な製品開発プロセスにおけるコア技術の明確化手法と、そのコア技術を用いた製品プロセス(第4章)を示した上で、コア技術を効率的に開発し製品開発を行うための設計評価システム(第5章)を示す. 最後に、得られた結果を総括し、製品開発手法とその開発プロセス方法について有用性を示す. また、各章の概要を以下に記す.

第2章では、持続成長の概念は、製造業において一般的に適用されているが、持続成長の定義について多くの定義と理解がある[1]. また、企業が改善の機会を特定し、製造プロセスにおける資源効率を最大化するための体系化された法則を提供するために、一連の新しいアプローチが企業によって開発されている[2]. さらに、ビジネスリーダーとプロフェッショナルの統合には、製造工程における価値創造を可能にする完全な約束と相互信頼が必要であり、資源の効率化と社会的責任を完全に達成する必要があることが示されている[3]. また、市場のニーズ(顧客価値)を満たし収益を回復するために製品とサービスを提供する企業の製造業務における複雑さとその課題は、多くの分野で研究され[4], 成功企業には、成果をカバーし維持する戦略的なロードマップと体系的な指標があり、企業が持つ「コア技術」に基づいて競争

力を確保するために、競争相手は QCD を用いてより良い成果を提供する製品やサービスを選択している[5]。このようなライフサイクルの変化や外部環境の変化に対応した戦略として、経営の考え方が提案されているが、これらの変化に対応して、すべての企業が高度な戦略を随時実行し対応することは困難であることも明らかにされている[6]。

次に、日本の高度経済成長期の研究調査として、成功した企業の一つ「日立」は、地域の企業城下町の代表として、小規模企業が所属して、大企業が成長するに伴い成長するモデルが示されており[7]、中小企業においてはそこに帰属して努力をしていれば大手企業と共に成長できた時代であった。さらに日本のエレクトロニクスや半導体産業は近年大きく発展し、数年前までは日立製作所・東芝・SONY・松下電器などという日本を代表する大手メーカーがグローバル市場においても高い市場シェアを獲得し、その半導体製造の主力工場は国内に多数存在する時代であった。その時に創業した中小企業の多くは、産業が国内で発展(幼年期～成長期)してきた為に、起業への強い思いと勢い、そして僅かばかりの他者以上の努力があれば継続(成熟期)ができ、何とか大手企業を下支えする中小企業として多くの会社が起業しても生き残れた時代でもあった。これらは中小企業のライフサイクルにおける依存成長モデルであり、企業を成長ビジネス領域に置くことによって安定した成長が期待できた。しかし、中小企業の競争環境は、業界の成長が減速するにつれてますます厳しくなり、日本社会の構造変化を考慮したこれまでの研究では、技術と非技術において多くの日本企業の生産性が調査され、生産性向上のための技術は主要な役割を果たしていることが示されている[8]。業界の成長が縮小することにより中小企業の競争環境もより厳しくなり、成長のドライビングフィオースが減少し依存成長が難しくなり、さらに会社を持続的に成長させることが困難となる場合がある。その実例として、中小企業の売上高・生産性の伸び悩みは顕著であり、2009年から2014年において企業数全体では421万社から384万社と39万社の企業数減少がみられ、とくに小規模企業(従業員数29人以下)は113万社が廃業している。一方、全体の従業員数は、横ばい(4,803万人から4,794万人)で推移し、中規模企業の従業員数のみ約200万人増加し、とくに500人以上の従業員を雇用している企業での雇用者増加が堅調になっている。これは、社内において安定かつ持続的に成長するために総合的な人材育成や組織的対応がより求められる状況であることに起因していると思われること、また、熟練度の高い製品を生産する国の中には、生産者と利用者の格差が縮小しており、人材が製造に与える影響と比較優位性の変化に関する研究がある[9]。次に日本の製造業の競争上の優位性を追求するための戦略的武器として品質管理にも競争力を決定する重要な役割があることが示されている[10]。また、コーポレート・ガバナンスに関するさらなる分析は、製造業における経営成績を決定すること[11]、継続戦略ビジネスを維持しながら、製造戦略に影響を与えたガバナンス政策の変更は競争相手が直面する究極の成功ではなく、高品質の製品を製造サービスによって支援されるべきであり日本の製造業における製品サービスの種類が、ライフサイクル価値創造プラットフォームを創出した[12]。さらに、中小企業の多くの企業経営者が暗黙知としてのKKD(カン・経験・度胸)により集権的な経営を行っていることが考えられ、野中ら[13]が示したSECIモデル(図1.2)に

みられるように暗黙知を形式知化する組織的知識創造プロセスがより重要であることが述べられている。日本以外での持続可能な製造業の比較研究もまたインドで調査されており、異なる社会構造とガバナンス政策が製造サイジングに限定された競争戦略的範囲をもたらしている[14].

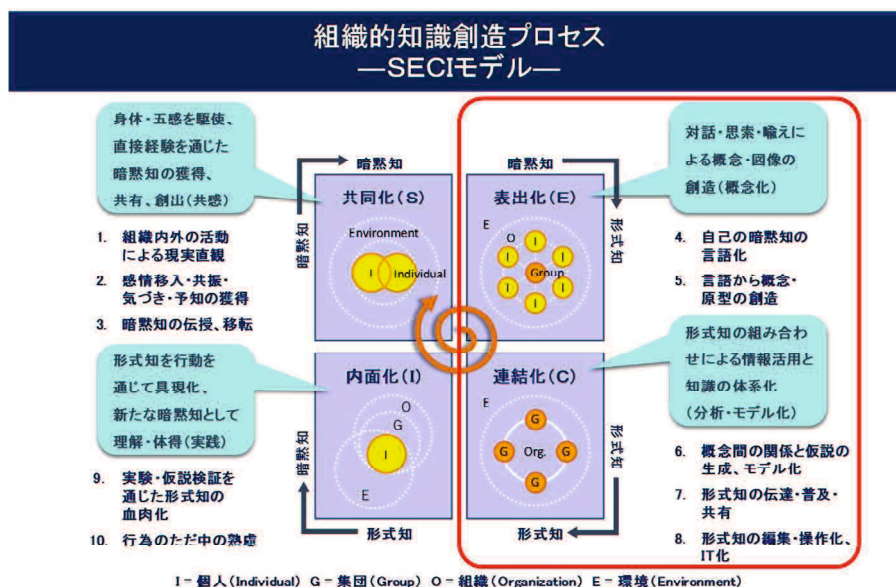


図 1.2 野中郁次郎 知識創造企業 SECI モデルより著作作成

このように、製品・サービスを提供する企業において、自社の事業を成長させるためには、市場ニーズ(顧客価値)を満たす製品・サービスを提供し、その提供物から利益を回収する。既に自社が有する「コア技術」を元に競合他社より QCD で優れた製品・サービスを提供し、その提供物から利益を回収するなど、企業においては、幼年期～成長期～成熟期と企業のライフサイクルが変化する過程で起業・創業期には市場ニーズ(顕在・潜在)を満たすためのイノベーションの源泉を獲得し、源泉となるコア技術を元に新たな製品開発や市場開発を展開、新たな事業展開を図った後に成熟し QCD の観点から競争力を高め継続的に市場ニーズを満たす商品がある一方、製品としての寿命を終え事業を撤退するものもある。このようなライフサイクルの変化や外部環境の変化に応じて様々な経営に対する考え方が戦略として提案され、実行されている。しかし、これらの変化に対応するため全ての企業がその時々先進的な戦略を実行し、対応することは困難である。また、企業において持続的に会社を成長させることは、企業経営者にとって共通的な認識課題であるが持続的成長の意味と持続的成長に対し、経営の要因として様々な研究がなされているが[13], [16]-[27], 必要となる要因の項目については十分な検討がなされていない。これらの背景からまず先行研究者による持続的成長企業に求められる要因の研究調査から、その特徴を抽出し、中小企業における持続的成長の定義を考察した上で、モノづくり企業が持続的に成長するための基盤となる主要因を示した。さらに、抽出した要因を基に中小企業がその組織へ適用する際の課題やその解決方法について考

察を行った結果を示した。

第3章では、市場への適応のための製品やサービスについて効果的な製品開発を行うために、特許情報は技術動向や技術分析から自社や競合他社との研究戦略および方向性を明らかにするための有効な情報であるが、2012年度以前の5ヶ年における日本国内の平均出願数は約35.4万件となっており、その情報量は膨大である。そのため、精度よく高速で安定した検索システムによる特許分析に対する要求があり様々な特許検索システムが提案されている[28]-[30]。また、特許情報に含まれる技術情報の探索目的に適合する定量分析、定性分析、相関分析などを通じて分析結果を見える化することで技術情報を容易に理解することができる[31]-[34]ことから特許情報のキーワードの見える化または、目に見えない事象を掴むためのテクニックとしてパテントマップと呼ばれるものがある。また、露光装置を対象とした、技術開発組織の複雑性[35]や製品ライフサイクルに関する研究[36]などもある。そこで、本研究では製品開発を行うために、製品に提供される技術とその技術動向を分析する手法を検討し、特許検索システムの一つであるYUPASS(Yamaguchi University Patent Search System)とパテントマッピングソフト[37]を組み合わせた特許分析システムを用いて半導体製造装置に欠かすことのできない露光装置[38]-[40]を例として、技術の変化とその選択が開発製品の将来の市場のシェアに与える影響[41]-[45]に関して評価を行った。その結果、新たな特許情報に基づく技術動向分析手法として、提案した分析手法により企業における競争優位を高めるための製品・研究開発戦略および方向性を明らかにするための効果的且つ有効な情報であること、さらにその特許情報に含まれる技術情報の探索目的に適合する定量分析、定性分析、相関分析などを通じて分析結果を見える化することで、技術情報を容易に理解することができることを示した。

第4章では、コア技術の重要性について延岡[46]は、日本の製造企業が苦悩している最大の問題は、「ものづくり」がうまくできても、大きな売上や利益を結びつけることができず、「価値づくり」ができていないこと、と指摘している(図1.3)。また、ものづくりを価値づくりに結びつけるためには、技術的な独自性・差別化と、高い顧客価値の二点が必要である。つまり、模倣されない技術的な強みがあり、それを意味的価値も含めた大きな顧客価値に結びつける能力が備わっていなければならない、と指摘している。ここで、延岡は技術を「特定企業内において、長年にわたり継続的に研究・開発が続けられ、その過程で進化・蓄積されていくもの」と定義した上で、他企業に模倣されない技術を大きく「革新技術」と「積み重ね技術」の二つに分類している。ここで、革新技術とは、これまでにない「新しさ」に支えられた技術と定義し、特許を取得できるような技術としている。また、積み重ね技術とは、特許を取得するような革新性はなくても、組織に長年積み重ねられてきた技術的なノウハウ・経験知や、特定の技術分野における開発・設計能力および問題解決能力に支えられた技術と定義している。



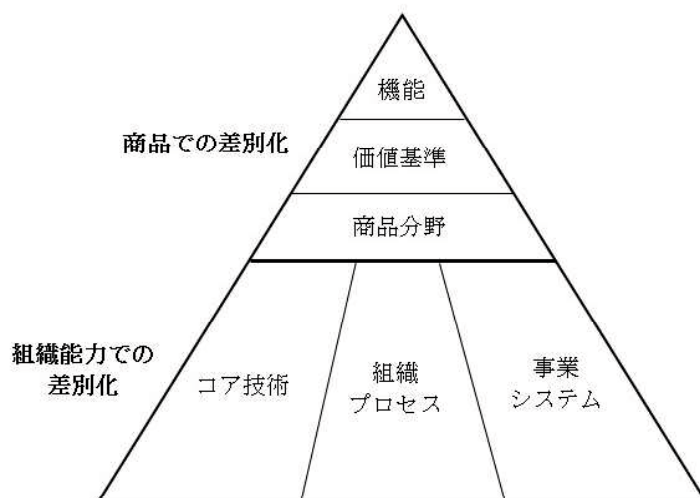


図 1.3 差別化の源泉

商品での差別化は、競合企業に模倣されることが速く、組織能力での差別化を実現することの重要性が増していると述べている。「組織能力」とは、企業が固有に持つ有形無形の資源と、それを活用する能力やプロセスである。コア技術に関する組織能力に着目すると、競合企業に模倣できない技術があれば、独自の優位性を持つことができると主張している。また、コア技術はある分野に集中しつつも、その集中のリスクを緩和するために、技術を多様な商品に応用することができるため、持続的な企業の発展に大きく貢献すると述べられている。

コア技術の定義としては会社が強みを特定し、希望する製品の顧客ニーズを満たし、競争の激しい市場で独創的な製品開発を行うための一連の製造活動を行う特別な能力であると考えられ、最新の技術を利用したコア技術としては 1.機械技術、2.構造技術、3.電気技術、4.電子技術、5.流体技術、6.熱技術、7.バイオテクノロジー、8.材料技術などが挙げられ、コア技術を利用した製品として 1.機械技術では、自動車用トランスミッションの自動ギアシステム、洗濯機のアジテーター、自転車の低摩擦ベアリングが考えられる。同様に、2.構造技術では、道路、橋、水塔、ヘッドドームロケットミサイル、3.電気技術では、電源ブランジェネレータ、電気モーター、4G 通信信号、4.電子技術では、コンピュータ、携帯電話、テレビ、5.流体技術では、油圧ジャッキ、エアブレーキシステム、飛行機の翼、光学技術では、レーザー切断工具、レーザー手術、光ファイバー通信、6.熱技術では、炉、熱交換器、冷蔵庫、温水器システム、7.バイオテクノロジーでは歯ブラシのホワイトニング酵素、食品産業のラクトバクテリア、植物ベースの防腐剤、8.材料技術では、ポリマー、複合材料、合成皮革、積層された金属フィルムなどが考えられるが、企業におけるコア技術を明確にし、かつ評価するための標準的な分析方法は明らかにされていない。多くの研究者によって、情報データベースを用いて分析し戦略を明確にすることで、様々な企業の技術を特定している次のような研究がある[47]-[55]。技術間の全体的な

相互関係を考慮して、特許共同分類情報に基づく技術的な相互影響の観点から、コア技術を識別するための新しいアプローチを提案した研究[47]、韓国の製造企業における、技術的多様化と企業成長の関係と、企業特有のコア技術力のコンディショニングの役割を調査したもの[48]、研究対象となる特許から入出力分析手法を用いて、新エネルギー分野の先端技術とコア技術を区別し引用された特許数を入力、公開された特許数を出力とする方法[49]、主要なLED技術と技術獲得の効果的なモードの識別のための、FAHP (Fuzzy Analytic Hierarchy Process)と特許分析を用いて、コア技術の取得選択のための選択手順を示し統合されたフレームワークを提案[50]、特許情報に基づいて有望な電気通信技術を特定するための枠組みを提案[51]、エネルギー安全保障と排出削減という中国のエネルギー目標を達成するためのコア技術を特定[53]、EV技術革新の最近の進展を理解するために、そのコアテクノロジー構造を特定[54]、半導体業界における企業のコア技術の能力を特定する方法[55]がある。その中で、最も信頼性の高いデータベース情報は、特許情報であり、その分析は、AHP、ファジィ、統計的方法などの定量的側面を定量化するためのいくつかの方法と組み合わせ使用されている[56]-[63]。

また、織畑は、企業が継続して存続し、成長を遂げる条件の1つとして、競争相手に真似されない、あるいは競争相手に容易に追従されない製品の競争障壁が構築されなければならないことを挙げ、その主たる役割を技術が担っていると主張している[64]。池島は、中小企業が成長していくためには、蓄積した技術力を有効に活用しながら戦略展開することの重要性を主張している。そのためには、自社の保有する技術力を整理し、競争企業と差別化する上で、どの技術が最も有効であるか、さらには競争企業になかなか真似られない技術、すなわちキーテクノロジーを見極めることが重要と述べている[65]。

以上のように、コア技術やキーテクノロジーなど、使用している単語に多少の違いはあるが、企業が持続的に成長するためには、競争優位性に貢献することができる、他社に模倣されない技術を保有することが重要であることは共通している。また、まずは自社の保有する技術の中で、どの技術が最も重要な技術(コア技術)であるのかを明確にする必要がある。

そこで、製品は顧客要求に基づき新たな価値を提案するための「こと」を達成する手段であるが、その製品価値を達成するためにコアとなる技術が存在する。そこで、製品開発プロセスの実証評価から製品のコア技術を明確化するための分析手法を新たに提案し、その分析手法を用いた実製品における評価検証からその有効性を示した。さらに顧客が要求する価値を提供するための効果的なものづくり製品開発・設計プロセスを提案した。

第5章では、製品開発プロセスにおいて重要な役割を果たす製品のコア技術について、コア技術をより効率的に開発するための技術開発手法が必要である。そのため、実製品の市場要求に基づく課題に対して、新たな技術開発手法(解析主導設計)(以下ALD: Analysis-Lead-design)[66]の考え方を基に、インクジェット印刷機の製品価値を高める印刷技術として重要な液滴の吐出を制御するためのコア技術および開発手法を確立する。

解析主導の意味は、「上流で徹底的に考える」ということである。また、ニュアンスの違いはあるが、ALDと同様の表現として、ALD (Analysis-Leads Design): ITI, ALD (Analysis-Led Design): 日立製作所社, 山口大学MOT, SBD (Simulation Based Design): Maciej A. Bossak, SDPD (Simulation Driven Product ): ANSYS社がなされているが、すべて「モノを実際に生産する前に、上流工程での徹底的な検討に解析を能動的かつ積極的に使うべきである」と提唱している。その趣旨を強調した別の言い方として“フロントローディング”という言い方もある。要は、先に経営資源を投入すべきであるということである。このようにALDは、製品開発の初期段階である概念設計段階へリソース(ほぼ70%)を集中し、アップフロントエンジニアリングを達成する考え方[66]である。概念設計段階では、製品の物理的モデルや具体的なモデルはまだ開発されておらず、ALDの概念を用いて製品が最終的にどのように機能によって実現されるかについての概念、技術的特徴、理論およびメカニズムを広範に検討し明確化する。ここで、製品の物理的(形状)な制約がなければ、製品の可能性を判断する自由度が高くなり、これまでの設計では物理的モデルの制約から検討範囲とならないあらゆる問題を検出するための幅が広がることになる。このようにALDでは、製品に物理的な設計がなされる前に、考えられる問題が検討され解決される。したがって、詳細な設計プロセスの後に設計変更の確率を低減することができ、その効果は、開発コストと時間を削減するだけでなく、製品の品質を向上することに寄与する。

次に、システムモデル構築手法としては、プログラミング言語で記述する数式モデリング [Fortran, C言語], 数値の流れを計算器(積分器微分器)で記述する信号モデリング [MATLAB®/SimulinkSCIRAB® (INRIA)/Xcos], 物理現象を抽象化した要素ブロックを使用する物理モデリング (Modelica言語によるモデリング) [67]があり、代表的なソフトウェアである Modelicaは物理モデリング用の言語であり、利用者は注目する系の方程式を立てることなく、用意された部品ブロックを接続するだけで複合分野のモデル化が可能である。そのため、物理モデルを容易に作成することが可能となっており、Modelica言語の国際標準化が進んでいる反面、一般へ普及するには時間がかかると予想される。

そこで本研究では、まず初めに、従来制御系分野で標準的に用いられてきた信号モデリングツールを用いて物理モデルの構築方法について、信号モデリングツールである、MATLAB®/SimulinkおよびSCIRAB® (INRIA)を用いてモデル構築を行う方法について検討を行った。ものづくりの分野において、価値や機能を定義する方法として用いられる1D-CAE[68]は、構造を定義し設計する3D-CAE等と比べて実用化が遅れている。しかし近年、Modelica[68]国際標準化が進展するに従って、1D-CAEモデルを容易に開発することができる汎用ツール[68], [69]が市販されるようになってきている。しかし、物理モデルや実験モデルを統合したモデルや電気や機械の物理領域を同時に取り扱う混合物理領域モデリングを行う際、その物理現象を共通して表すことは困難であることから、実用化及び一般に普及することは容易ではなく、その対策として、HLMD (High Level Model Description) やHLMT (High Level Modeling Tool) などが提案されている。このよう背景からものづくりの分野において価値や機

能を定義する方法として用いられる, モデリング手法の現状について考察すると同時に従来曖昧であった1D-CAE1の定義[70]を概念的ではなく全物理分野に渡って時間微分のみを用いた微分代数方程式の定式化(モデリング)とシミュレーション手法として定義すると同時に新たなモデリング手法としてセミ非因果モデルの概念と, その代数方程式に対する手法を提案した. また, FEM理論による計算結果と提案手法による数値解析の結果を比較検証することでその有効性を確認した結果を示す.

次に先に示したModelicaはオブジェクト指向で方程式をベースとするプログラミング言語で, モデル定義を行うことができる. その再利用可能なコンポーネントと複合体複数のアプリケーションドメインからの部品を含むアプリケーションは, 非常にモデル構築に有効である[71], [72]. また, Modelicaの多くの利点は, 次のように1)インターフェイスはユーザーフレンドリーな, シンプルかつ効率的である[73], 2)大規模のマルチドメインモデリングに適しており複雑でユニークな技術である[74], 3)数学的記述可能な宣言型があり, これによって分析が簡素になり, コードは簡潔で, デグレートの少ない変更が可能である[71], 4)特定の変数を手動で[75]変更する必要がない, といったモデル構築に有効な機能を有しており, オープンソースソフトウェアで, ツールとアルゴリズムの開発が可能である. とくに学術的なユーザに向けたソフトウェアである[76]. さらにModelicaは, 誰もが簡単に無料でダウンロードすることができる. ダウンロードを行うと, ソフトウェアとガイダンス Dr. Modelica [72]と呼ばれる資料が得られる. この資料ではModelicaについて基本的な事項が記載されており, モデリングとシミュレーションの概念を理解するのに有用な資料である. また, Modelicaの説明書は, モデリングとシミュレーションの導入部分を理解するのに便利であるが, このModelicaの説明書中にも理解が難しい部分がある. 特に, 変換プロセスの理解には難を要する, ソルバーオーダーシステムについても明確な説明がない, といった課題がある, そこで本研究ではこれらの課題を解決するModelicaのソルバーオーダーシステムを提案する.

次に, 前述で示したシステムモデル構築のためのモデリング手法を基に, ピエゾ式インクジェットプリンタヘッドモデルの構築を行う, インクジェットプリンタ装置は, 日常生活から産業用の用途として多岐にわたる場面で広く使われている. プリント方式の観点からプリンタを分類すると様々な種類が存在するが, 現在では電子写真方式とインクジェット方式の2種類が主流となっている. 電子写真方式とは一般に「レーザープリンタ」と称されるもので, その多くはオフィス用途に使われている. その理由としてインクジェットプリンタに比して高速印刷が可能な点が挙げられる. 一方でインクジェット方式は比較的低速ではあるが高画質であること, また初期導入コストが安いことから家庭用として広く普及している. さらに近年では非接触印刷が可能なこと, インクを加熱しないためにインク選択の制約が少ないこと, さらに被印刷物選択の自由度が高いために, 産業・工業分野へと用途の拡大が進んでいる[77]. 一例として紀州技研工業では鶏卵への印字にインクジェットプリンタを用いている[78]. さらにインクジェットプリンタを吐出方式の観点から大別すると, サーマル方式とピエゾ式の2種類になる. 前者の方式はノズル

内でインクを加熱して圧力を発生させ、その圧力でインクを押し出すものである。ヘッド内に取り付けられた微小なヒーターがインクを加熱することで急激に気体へと変化する。すなわち微小なヒーターを使うためノズルのサイズが小さく、一般的なピエゾ方式のノズルの1～100分の1程度の大きさである[79]。また後者のピエゾ式インクジェットプリンタは圧電素子の逆圧電効果を利用することで液滴を吐出し、印刷を行っている。一例として振動板と圧電素子とのバイメタル効果を利用したものに注目すると、駆動電圧を入力することで圧電素子が伸縮し、これが圧電素子に固定された振動板のたわみ変形を引き起こす。これによってインク室の体積が増減し、内部のインク圧力が上昇した後に液滴がノズルから吐き出される。インクジェットプリンタにおいて、ヘッドはインク吐出に直接関係するために、その設計は非常に重要である。プリンタヘッドに対する顧客の要求として、より小さい液滴を正確に長期間安定して吐出させることがある[67]。しかし、こうした要求に応えるためにはヘッド温度、ヘッド製造精度などに起因する液滴吐出方向のばらつき、液滴体積や速度のばらつきを減らすことが望ましい。そこで、ピエゾ式インクジェットプリンタヘッドモデルの構築方法を明らかにした。

次に、先に述べた通りインクジェット方式のプリンタには、吐出方式の違いから大きく分けてサーマル方式とピエゾ方式の2種類[80]-[82]がある。ピエゾ方式のインクジェットプリンタは、熱を使用しないため、様々なインクが使用できる。そのため、印刷対象が紙に限らず、有機ELディスプレイ、回路基板[83]、錠剤などへの応用が可能である。ピエゾ式インクジェットプリンタは、ピエゾに電圧を印加し、ダイヤフラムを変形させることにより液室のインクをノズルへ押し出し、液滴を吐出している。この電圧は、入力電圧波形と呼ばれ、この波形を変化させることにより、吐出速度や体積をコントロールする。印刷品質を向上させるためには、吐出される液滴の体積や速度を適切に制御できなければならないが、インクと入力電圧波形のマッチングに関する評価方法について十分な検討がなされていない。また、先行研究においても、実機における検証はまだ行われてない。そこで、精度の保障された実験装置・実験方法の確立に対する要求がある。そこで実験評価システムを構築しその有効性を示した。さらに、先に構築したプリンタヘッドモデルと実験装置のシステムの同定も行い、ピエゾ式インクジェットプリンタヘッドのシステムモデル評価システム、実験評価システムを確立した。そして、インクジェットプリンタの性能向上と印刷品質の向上を目的として、インクジェット印刷実験システムの研究開発が行われている。これらの研究は、圧電液滴型オンデマンド(DOD)インクジェット技術に焦点を当て、インクジェット印刷実験システムを進歩させるための最も重要な問題として、液滴形成プロセスの良好な理解は、インクジェットシステムの印刷品質を改善するために重要である。しかし、インクジェット微小液滴の実験的研究は、液滴のサイズが小さく、液滴の速度が速いため困難となっている[84]-[86]。そこで、これまでに構築したシステムモデル評価システム、実験評価システムを基に、予備振動を抑制した駆動波形によるシングル吐出制御方法について検討を行った。とくに最良の波形設計を見つけるために実験結果と分析を確実にするための、実験標準を構築することが重要であり実験システムの標準を決定した。同時に、インクジェットプリンタの固有周期を決定する必要があるが、固有周期が明らかにできれば、作動パルスの時

間パラメータの計算を単純化することができる[87]. さらに, 最高液滴速度を生成する波形を知ることによって, プリンタヘッドを駆動するための最も効率的なパラメータを決定することが可能となる[88]. したがって, 実験評価に基づく結果から実際の固有周期は, より高速の液滴を生成するための推奨事項として使用することができる. しかし, 液滴吐出プロセス, 形状, 体積, 速度は圧電素子の駆動波形の影響を受ける[85], [88], [89]ことから, 先行研究者により液滴の挙動を調べるための研究が行われているが [84]-[99], これまでの研究では, 正(台形)波形または正と負の(バイポーラ)波形を使用し[86], [87], [89]-[92], [100], Kwon らは, 効率的な波形を設計する方法を提案している. 本研究では, 基本波形として正(台形)波形, 正負両波形を用いた高速噴射波形, 負波形を用いた 3 種類の波形を比較検討し, 滞留時間の最適値を決定する[91]. Kim らは, バイポーラ波形のダブルピエゾアクチュエータを使用し, 液滴速度を放出させる効果を明らかにしている[93]. Shin らの液滴形成への影響を観察するためにダブルポジティブ波形を使用し, 圧電アクチュエータを駆動して液滴を生成するための最も単純な波形はユニポーラ波形であり, 負の波形を用いる研究は依然として限られている[92]. そこで, 液滴を吐出するアクチュエータとして, 圧電(PZT)プリントヘッドにユニポーラ負の波形を用いた. 液滴速度に対する印加電圧効果は, これらの研究[87], [89], [92], [98], [101]-[103]によって議論されている. Xu らは, より高い印加は液滴のサイズを減少させると述べ, より高い電圧がより大きな液滴のサイズを生成すると結論づけた. 本研究では, 駆動波形設計における印加電圧の違いによる振動の抑制効果を検討し, 最適な電圧を決定する. さらに作動波形の設計と予備波形との比較と, 基本波形に対する振動の抑制について詳細な検討を行い, 使用ヘッドの標準評価インク(Dowanol)により, 異なるノズルヘッド温度および 14V から 18V までの印加電圧によって試験し, 液滴の形状, 容積および速度を観察することにより, 各作動波形の最適基底電圧を明らかにした. これまで述べてきた結果で, 本章の目的である新たな技術開発手法のためのシステムモデル, 実験評価システムの検討から圧電液滴型オンデマンド(DOD)インクジェット技術の開発のための評価システムを構築した. そこで, 具体的な実例として, シングルおよびマルチドロップ吐出方式の DoD インクジェットプリンタの新しい駆動波形設計へ適用しその有効性を評価する.

クリアな球形の液滴を用い, サテライトやリガメントを発生させないマルチドロップ吐出法の開発は, インクジェットプリンタ技術において大きな課題となっている. そのため, これまでに示した設計システムによる設計手法をから, シングルドロップ方式とマルチドロップ方式の両方で新しい駆動波形を設計した. 設計プロセスは, 波形の重ね合わせ原理に基づく概念モデルを使用し, サテライト, リガメント, またはウィーピングの発生なしに, 5 つの主パルスに対して液滴形状に関して優れた性能が達成され, それによって同じノズルから 5 つの異なる液滴サイズを生成することができることを明らかにした. これは, とくにマルチドロップ吐出方法の根本的な改良であり, これにより印刷品質が向上することができる. インクジェット印刷の技術開発の課題は, 高信頼性で高画質を得ることである. さらにもう 1 つの課題は, 市場のカスタマイズ的能力を向上させるために, より広い範囲の液滴体積を達成する必要がある[104]. しかし, 現在

のプリントヘッド技術のカスタマイズは限定されている。さらにインク特性に耐性がある印刷ヘッド技術を開発する必要がある[105]。現在、異なるインクを使用する場合は、プリントヘッドを交換する必要があることや異なるプリントヘッドを使用した場合、良好な結果を得るために流体配合調整が必要となる。したがって、プリントヘッドの設計を変更することなく、より広い範囲のインク特性に使用できる最良の動作パラメータを見つけることは重要な課題である。ほとんどの市販のプリンタは、単一の液滴サイズを生成するためにバイナリ技術を使用しており、いくつかのインクジェットプリンタでは、複数の液滴サイズを生成することができるが、同じノズルから吐出される液滴のサイズ範囲は小さいままである[106]。同じノズルから異なる液滴サイズを生成するインクジェット印刷の技術は、グレースケール技術と呼ばれ、グレースケール技術におけるマルチドロップ方法の実施は依然として限定されている。この方法における制約は、最適な液滴形成を得るために波の重ね合わせにおいて最適な結果を得るために複数のパルス同期させることが困難なためである。最適な液滴は、サテライトを持たない液滴であり[107]-[110]、サテライトは、特定のインクジェットプリンタの用途では受け入れられず、高い印刷品質のために排除する必要がある[111], [112]。多くの研究がサテライトの形成を観測している[92], [101], [103], [108], [113]-[123]。しかしながら、サテライトを除去する研究は限定的で、ドロップオンデマンド (DoD) インクジェットプリンタを用いて最適な印刷結果を得るためには、入力波形を適切に設計する必要がある[88], [91]。したがって、サテライトまたはリガメントなしではっきりとした球形の液滴を得るために、駆動波形の最適設計を決定することが必要である。駆動波形の設計については数多くの研究が行われている[90], [91], [100], [124]。サテライトの発生原因となる残留振動の低減に関する研究も報告されている[88], [125]。さらに、異なる方法を用いて液滴体積を制御する他のいくつかの研究が行われ、他の多くの研究では、駆動波形としてプッシュプル(正の波形)またはバイポーラ法を用いている[86]-[88], [91], [92], [102], [103], [113]-[118], [121], [124], [126]-[133]。市販のインクジェットプリンタに一般的に使用されている方法はプルプッシュ方式または負の波形であり、液滴の安定性に相関する高速かつ狭い列の液滴を生成することができる[134]。これらの研究では、PZT 駆動パルスの負の波形またはプッシュプルモードを使用し、この方法を使用することで、実現化していない長いリガメントまたは液滴サテライトの形成を防ぐことが期待されている。本研究では、PZT プリントヘッドを駆動するための駆動波形において、シングルおよびマルチドロップ生成方法の両方で適用できる波形の設計を行った。設計の主な目的は、サテライト、リガメント、またはウィーピングの発生なしに良好な液滴性能を達成することであり、新たに提案した設計波形の有効性を Dowanol インクにより検証した。さらに、新たに設計した波形の有効性を粘性の異なる複数のインクを用いて評価し、粘性が異なるインク特性であっても波形形状を一部修正することで適応可能であることを明らかにした。その結果、ALD の概念に基づく新しい設計手法による技術開発プロセスを適用することで、新たなコア技術を開発することが示された。

具体的には、顧客価値要求に答えるため、インクジェットプリンタヘッドの高品位な印刷手法であるマルチドロップ吐出技術に関する駆動波形を新たに設計するため、吐出駆動波形シ

ミュレーションのためのシステムモデル技術及び液滴の吐出実態評価システムをそれぞれ開発し、開発したシステムを組み合わせた吐出波形の開発評価手法を構築した。その吐出波形の開発評価手法を用いた研究から、従来の駆動波形では制御が困難であった。高品位のマルチドロップ吐出のための駆動波形を設計し、その技術の有効性を明らかにした。設計した駆動波形は従来技術では不可能であった吐出速度を一定にした状態で吐出重量を制御すること、さらには、粘性の異なる複数のインクに対して吐出制御を行うことができ、効率的な技術開発ができることを示した。

第6章では、経営ビジョンに基づきコア技術を中心とした解析主導の考え方に基づく製品開発プロセスとして、得られた結果を総括して製品開発手法とプロセスの検討をし、ものづくりを中心とした中小企業が持続的に成長するために必要な主要因、その要因を実行するための方法の一つとして重要である技術の効果的な評価手法の明確化、そして、製品開発を効率的に行うために必要不可欠なコア技術の明確化手法を示し、さらに具体的な製品開発におけるコア技術の開発手法を示すことで、顧客要求に基づき製品開発の競争優位性を構築するための製品開発手法とプロセスを示した。市場開発における顧客価値の探索、提案、そして獲得するための顧客価値・競争優位を得るための効率的な設計開発手法とその開発プロセスについて有用性を示した。



## 第2章 中小企業における持続的成長要因に関する一考察

### 2.1 研究内容

製品・サービスを提供する企業において、自社の事業を成長させるためには、市場ニーズ(顧客価値)を満たす製品・サービスを提供し、その提供物から利益を回収する。既に自社が有する「コア技術」を元に競合他社より QCD で優れた製品・サービスを提供しその提供物から利益を回収するなど、企業においては、幼年期～成長期～成熟期と企業のライフサイクルが変化する過程で起業・創業期には市場ニーズ(顕在・潜在)を満たすためのイノベーションの源泉を獲得し、源泉となるコア技術を元に新たな製品開発や市場開発を展開、新たな事業展開を図った後に成熟し、QCD の観点から競争力を高め継続的に市場ニーズを満たす商品がある一方、製品としての寿命を終え事業を撤退するものもある。このようなライフサイクルの変化や外部環境の変化に応じて様々な経営に対する考え方が戦略として提案され、実行されている。しかしながら、これらの変化に対応するため全ての企業が、その時々先進的な戦略を実行し、対応することは困難である。また、企業において持続的に会社を成長させることは、企業経営者にとって共通的な認識課題であるが持続的成長の意味と持続的成長に対し、経営の要因として様々な研究がなされているが[13], [15]-[27], 必要となる要因の項目については十分な検討がなされていない。これらの背景から、まず先行研究者による持続的成長企業に求められる要因の研究調査から中小企業における持続的成長の定義を示した上で、モノづくり企業が持続的に成長するための基盤となる主要因を考察し抽出する。さらに、抽出した要因を基に中小企業がその組織へ適用する際の課題やその解決方法について考察を行った結果を示す。

そして、マネジメントシステムの考察に先立ち、我が国中小企業を取り巻く現状を概観する。存続し続けなければ持続的成長を目指すことなど叶わない。すなわち、中小企業の廃業・倒産原因などから、持続的な成長の前提としての存続条件を逆説的に探る。

#### 2.1.1 日本の中小企業の現状と課題

日本を代表する中小企業の集積地である東大阪、大田区、浜松市においても 1986 年を基準とした場合、2006 年度までの 20 年間に 32%~42%の事業所が消失し、企業の廃業が 1990 年代より開業を上回っている状況にある。

また、中小企業における現状と問題点について、1)「困難な地域中小企業の経営」として人口減少や公共事業の減少に加え、長引く不況により、地域経済は疲弊しており、地域中小企業の経営はより困難、2)「身動きがとれない地域中小企業」として、経営が将来悪化することが予想されても、雇用の維持や、個人保証による多額の債務が足かせとなり、そのまま事業

を継続せざるをえず、かえって状況が悪化、3)「単独では余力が無く、新事業展開が困難」として、既存事業だけでは十分な収益確保が困難担っている中、新たな事業展開が必要だが、ヒト・モノ・カネ・技術が十分でなく中小企業にとって単独では困難、という状況だと経済産業省の調査(経済産業省 2011.7 改正産業活力再生法より抜粋)で示されている。

### 2.1.2 企業の倒産要因分析

帝国データバンクの 2011 年度報では、倒産の主因の件数は、①販売不振、②業界不振、③放漫経営の順位となっている。ここで、販売不振や業界不振は、取り組み方次第で未然に防げた部分もあったのではないかと考えられるが、これらの存続できない理由の自律的要因(経営者の判断ミス)が真因であるとするならば、大手企業に帰属して KKD(カン・経験・度胸)というべき暗黙知に基づく経営を多くの中小企業が漫然とやってきたことが真の原因のように考えられる。

主因別件数					主因別構成比 (%)			
	2009年度	2010年度	2011年度	前年度比 (%)	2009年度	2010年度	2011年度	対前年度 (ポイント)
販売不振	9,728	9,138	9,172	0.4	75.6	79.5	80.2	0.7
輸出不振	14	3	13	333.3	0.1	0.0	0.1	0.1
売掛金回収難	180	126	140	11.1	1.4	1.1	1.2	0.1
不良債権の累積	94	59	54	▲ 8.5	0.7	0.5	0.5	▲ 0.0
業界不振	510	303	227	▲ 25.1	4.0	2.6	2.0	▲ 0.7
不況型合計	10,526	9,629	9,606	▲ 0.2	81.8	83.8	84.0	0.2
放漫経営	302	245	169	▲ 31.0	2.3	2.1	1.5	▲ 0.7
設備投資の失敗	101	72	61	▲ 15.3	0.8	0.6	0.5	▲ 0.1
その他の経営計画の失敗	270	189	158	▲ 16.4	2.1	1.6	1.4	▲ 0.3
その他	1,667	1,361	1,441	5.9	13.0	11.8	12.6	0.8
合計	12,866	11,496	11,435	▲ 0.5	100.0	100.0	100.0	-

図 2.1 帝国データバンク 2011 年度報より著者作成

倒産要因別推移

		90年度
不況型	倒産件数	75
	構成比 (%)	30.2
放漫経営	倒産件数	117
	構成比 (%)	47.2
設備投資・経営計画 などの失敗	倒産件数	30
	構成比 (%)	12.1
経営者の病気, 死亡	倒産件数	2
	構成比 (%)	0.8
過小資本	倒産件数	4
	構成比 (%)	1.6
その他	倒産件数	20
	構成比 (%)	8.1
合計	倒産件数	248
	構成比 (%)	100.0

図 2.2 帝国データバンク 2006 より著者作成

倒産要因	具体例
経営者のモラル	・放漫経営
マーケティング戦略の誤り	・販売不振 ・在庫状態悪化
財務管理等のずさんさ	・設備投資過大 ・既往のしわ寄せ（赤字累積） ・過小資本
法務面等の備えの甘さ	・売掛金回収難 ・信用性低下（取引先の打ち切り）
組織・労務管理の不適切さ	・信用性低下の一部 （経営者交代による社内規律の乱れ等）

図 2.3 中小企業庁 2011 より著者作成

次に、ここでは倒産原因の定義や内容を企業共済協会の中小企業調査研究報告(表 2.1)より、企業倒産の原因である経営者の判断や戦略のまずさとした場合に、この表の摘要の中で示されていることを逆説的に企業経営の課題として捉えるならば、問題解決の取り組みや方策を検討することができる。例えば経営者のモラルが倒産要因とするならば、コンプライアンスやガバナンスの学習不足や意識欠如だと伺える。また、財務管理等のずさんさは会計知識や投資計画の不備とも捉えられる。

表 2.1 企業共済協会 中小企業調査研究報告より著者作成

主原因	細別	摘要
放漫経営	① 事業上の失敗	経験不足, 経営未熟, 経営策の不手際, 必要書類, 伝票帳簿等の不備, 事業計画または資金計画の粗雑, もしくは無計画, 事業概況の把握不十分等経営首脳陣の放漫に起因するもの.
	② 事業外の失敗	投機思惑の失敗, 企業間のあるいは役員間の内紛, 労使間の紛争による蹉跌, 経営者の経営意欲喪失などに起因するもの.
	③ 融手操作	自己の資金繰り困難からあるいは融資枠引締から, さらに取引先などから要請により融手操作を行い, 破綻を招来した場合.
過少資本	① 運転資金の欠乏	設立, 創業当初より自己資本過少, 手張り過ぎによる運転資金の欠乏など資本構成不安定などに起因するもの.
	② 金利負担の増加	高利依存, 債務過多から金利負担の増加を招き現状の売上, 収益からこれを吸収できず, また拡販による経費高に起因したもの.
他社倒産の余波	不良債権発生	取引先, 傍系会社, 関係先の倒産, 内整理などの連鎖反応により経営困難に起因するもの.
既往のシワ寄せ	赤字累積	長期に亘る業績不振によるジリ貧経営, 旧債返済の重圧, 販売地盤未確立による経営困難など過去の業績不振, 失敗のシワ寄せ, 経営方策の失敗に起因するもの.
その他	偶発的原因	代表者死亡, 水害, 火災, 震災, 交通事故, 詐欺, 盗難, 使い込みなど予期しない偶発的問題から起因したもの.
信用性低下	金融機関・取引先の打切りなど	取引金融機関の融資引締, 拒絶, または取引停止などを直接原因とするもの. 取引先の警戒視による取引不円滑に原因して, またダンピングあるいは違背行為による対外信用を著しく失墜したことに起因するもの.
販売不振		市況悪化による売行不振, 業界不況によるジリ貧, 季節的影響による売行減少, 市況低迷による利幅低下, 採算割れ, 輸出不振, 受注減少, その他商い高減少に起因するもの. 同業乱立に伴い業者間の過度の競争から出血受注, サービス過剰による採算割れとなることに起因するもの. 技術革新, 生活様式, 嗜好の変化等需要動向, 消費動向の変化に対応し得ないことに起因するもの. 円高, 円安など為替相場によるもの. 大資本の進出, 直売, デパート, スーパー・マーケットの進出から被害を受けたことに起因するもの.
売掛金等回収難	決済条件の悪化	売掛金回収遅延, 長期化, こげつき債権発生による不良債権の累積, その他受取債権の回収困難, 決済条件の悪化に起因するもの.
在庫状況悪化		在庫商品の値下り, 契約キャンセル, 製品不評等による返品増加. 売行不振に伴う在庫増大, 新品種取扱いの失敗, その他在庫状態悪化に起因するもの.
設備投資過大		社屋, 工場, 機械設備等の新增改設による資金固定化, 支店開設, 車輛購入等による運転資金枯渇, その他無計画な設備過大投資に起因するもの.

### 2.1.3 株式会社ピーエムティーの調査

株式会社ピーエムティー(以下ピーエムティー)での課題を検討するため、経営状況と日本の中小企業が置かれている現状調査を踏まえて課題の検討を行った。

業績推移を図 2.4 に示すが、大変厳しい社会的事象の 2001 年第 11 期の IT バブル崩壊や 2009 年第 18 期のリーマンショックなどを乗り越えながらも概ね発展している状況にある。

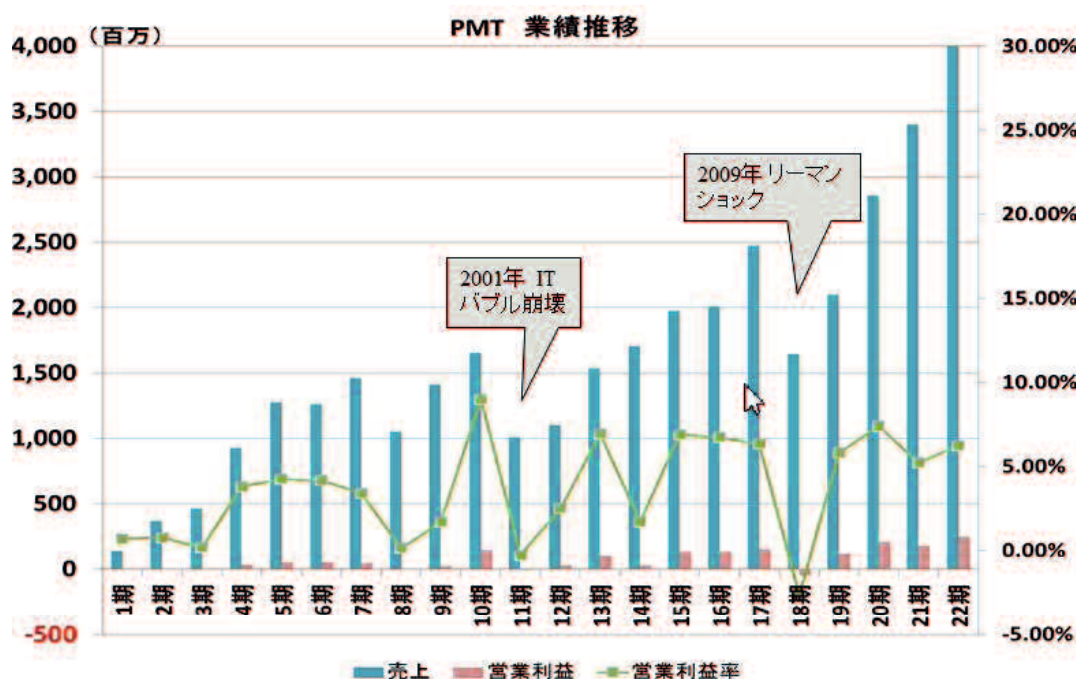


図 2.4 ピーエムティーの業績推移

また、経済産業省が調査した中小企業の現状と問題点で中小企業経営の困難さが示されていたが、ピーエムティーでのこの問題解決例として以下(表 2.2)に振り返るが、現在のところ上手く経済環境変化に対応してきていると考えられる。

表 2.2 経済産業省の示す中小企業の現状と問題点に対するピーエムティーの対応

経済産業省が示している中小企業の現状と問題点について	自社の対応例
① 困難な地域中小企業の経営	企画や開発により商品や種類を広げている
② 身動きが取れない地域中小企業	九州中心から日本全体への営業活動へ、更には海外への挑戦へと進展させた
③ 単独では余力が無く、新規事業展開が困難	産学官連携による新製品開発やオープン・イノベーションによるコア技術獲得を進めている

次に、重要な外部及び内部変化に対する対応について以下(表 2.3)に示すが、ピーエムティーは商社で創業し、そこからメーカーへと進展してきた。そこで不足する技術を習得や開発に加えて、産学官連携や経済産業省コンソーシアム助成事業、産産連携での経済産業省の「新連携」の取り組み、そして、福岡県の工業技術センターや独立行政法人産業技術総合研究所からの技術移転や指導によるものなど、多くの産学官連携や M&A によるコア技術の獲得と高度化を進めてきた。

表 2.3 ピーエムティーの外部・内部要因の対する対応例

年	重要な外部及び内部変化(事業、取組概要)	目的
1997	技術開発棟増築	商社から事業転換目指して技術者採用し装置事業へ挑戦
1998	装置開発1号機マイクロサーボプレス完成	半導体工場向け自動化装置完成し、他装置へも挑戦
	東京営業所開設	東京大田区でのモノづくり現場や産学官連携を調査
2000	製造・加工工場を新設	セラミックスや特殊加工へ進出及び加工技術挑戦
2001	半導体・ITバブル崩壊	年商17億円が翌年10億円に売上大幅減少。強い危機感から事業の多角化とメーカーを目指し研究開発に取り組むと共に経営を本気で学び始める
2002	卓上NC微細加工機開発	産総研マイクロリアクター研究会ニーズより挑戦し、NC制御や加工機製作技術の習得
	県助成金獲得(ATC付微細加工機開発)	工業技術センタからの指導と外部資金活用に視点
2003	県助成金獲得(レーザー加工機開発)	上記同様で新技術加工機へ挑戦
	経産省コンソーシアム: マイクロナノファブリケーション開発参画(産学官連携でナノ加工機開発)	安川電機、TOTOや大学との連携での技術開発習得と ナノレベルでのコア技術へ挑戦が始まった。著者がプロジェクトサブリーダーを経験
2004	超精密測定器を開発(サブミクロンの計測器)	PC制御と空気静圧機構の特殊技術を習得
	セラミックス製超精密XYステージを商品化	上記習得から高度技術の自社商品展開へ
	広域ネットワーク(ファイブテックネット)の取り組み	広域での産産連携の挑戦。経産省「新連携」助成モデルに
2005	経産省コンソーシアム: 電子部材高度加工技術開発参画(産産連携でIC高精度位置決め接合機開発)	自社主体開発に産学官連携と外部資金獲得で挑戦
	経産省中小企業・ベンチャー研究開発助成(インクジェットナノペースト微細配線装置開発)	産学官連携での新技術開発に参画
	「企動力」「ナノレゾ」などの商標登録	コアコンピタンスの明確化
	アメンバー経営の導入(管理会計と経営理念手帳作成)	管理会計による部門別採算や経営理念浸透活動をするために実施
2006	(株)エヌテックのM&A	他産業(自動車業界)へ進出
	開発棟増築(クリーンルーム、恒温恒湿室)	ナノ精度レベルへ更に挑戦のため特殊工場を完備
	経産省モノづくり革新助成(ケアMEMS)微細加工技術&装置開発	産学官連携で従来装置の高精度化に挑戦
2007	ISO14001取得	ISOマネジメントの習得
2008	中小企業庁「元気なモノ作り中小企業300社」受賞	商社から製造業転換の認知と評価に繋がった
2009	経産省戦略的基盤技術高度化支援事業サポイン認定(マスクレス描画装置の開発)	産学連携で微細半導体露光装置の開発に挑戦。その後の産総研ミニマルファブ研究会参画の契機となる
	環境事業部設立しナノバブル応用機器の開発	コア技術を「ナノシステム」として他事業展開に挑戦
	リーマンショックによる世界経済の失速で業績低下	グループ年商35億円が翌年24億に大幅減少。再減少時は月商が1/5になった。多くの社員を研究開発や技術開発に振り向け新製品作りと顧客開拓に努めた
2010	経産省ものづくり中小企業製品開発助成(ナノガス溶解システムの開発)	環境事業の開発を助成により加速し、産学連携に発展
2011	経産省戦略的基盤技術高度化支援事業サポイン認定(プラズモン医療分析装置開発)	ナノ技術をコアに産学連携での新分野(医療分析装置)の開発
2012	産総研ミニマルファブ新半導体製造プロセス開発に参画、国家プロジェクトへ昇格	従来技術をベースに小型特殊露光装置の開発へ進展

以上のことにより、ピーエムティーの経営を振り返ると、調査した中小企業庁の見解で述べられる問題としての「経営者の判断や戦略のまずさ」において、経営方針に於ける意思決定は、暗黙知としてのKKD(カン・経験・度胸)による集権的判断をしてきたと考察される。

このようなことから持続的に安定した成長を目指すためには、経営方針について客観性を持って「形式知化＝見える化」する必要がある。そして、新事業ないしはM&A企業のマネジメントを他者に委ねる必要も出てきており、困難な状況の中で、グループ経営としての一体感を持ち企業としての共通の目的に邁進して行くためにも、基本方針の一層の明確化と共通の経営管理の仕組みが必要である。

#### 2.1.4 持続的成長に関する定義の検討

我が国における公的調査に基づき、中小企業の存続の条件を検討した。多くの企業が持続的成長を目標として掲げているが、何を持って持続的成長とするのかは必ずしも明確になっていない。したがって、具体的な数値目標への還元が困難になり、持続的成長はスローガン以上の意味を果たさなくなる。国内外の持続的成長企業を調査した先行研究で定義を明示しているのを見ると、多くの企業が持続的成長を標榜し、持続的成長企業の研究も数多くなされている[13], [15]-[27]にも関わらず、持続的成長とは何かについて、明瞭かつ定量的な定義を見出すことができなかったが、調査した結果、以下の項目が尺度として検討利用されている。

- 1) GDPを1%以上上回る成長率 新田[20]
- 2) 50年以上の歴史があり、30年以上にわたって持続的に株価が概ね上昇トレンドにある日本企業を「持続的成長企業」とする 野中[13]
- 3) 「活力ある中小企業」を直近10年間で売上高経常利益率が概ね6%以上の中小企業製造業とする 赤岩[26]
- 4) 企業の「事業価値(FMV)」は将来にわたって生み出していくであろう累積利益の現在価値もしくは清算価値と定義。企業価値(FMV)を本業が将来生み出すキャッシュフローとすることや概念的な定義でDCF法、類似企業比較法、類似取引法などを活用とする 明致[21]
- 5) 最高益更新率(持続力) 三品[15]  
利益成長の持続力を測る尺度。営業利益率が過去最高を上回った年の数を全体に対する割合
- 6) 利益水準倍率(跳躍力) 三品[15]  
利益成長の跳躍力を測る尺度。分析対象期間を前期と後期に分けて、営業利益の平均値が前期と後期の何倍に飛躍したかで判断

## 7) 再下限利益率(戦略機能度合, リスク判定) 三品[15]

経営戦略のリスクを測る尺度. 実質営業利益の累積化と, それを累積実質売上高の相対比で判断

これらの項目は, 目標や企業価値判断とした場合に意味を持つものであるが, 主に上場企業を対象として議論されたものであり, 株価算定や業績数字の開示による比較対象が存在する際には理解しやすい. 一方, これらは中小企業を対象とした定義をしたものはない. 加えて, 既往の研究における定義は, 後付的に持続的成長の要因を探るためのサンプリング条件を提示しているという性質が強く, また上場企業をサンプルとするため株価を尺度とするケースが一般的であることが分かった.

そのため, 本研究では, モノづくりに於ける中小企業においても目標設定するための明示化がしやすい指標として, 持続的成長における数値化定義を『売上高経常利益率 6%以上を維持できる企業』を基本とし, 利益率だけでは短期的な業績となることやモノづくり企業に於いてはさらに売上高研究開発費割合, 売上高新品割合を考えた. また, 雇用や社員のモチベーションの維持のためには社員一人当たり営業利益の指標を併用して用いることを提案する. また, 売上高経常利益率の指標は社会環境によって変化するために, 中小企業庁の2011 中小企業白書(中小企業庁 2011)が発表する「規模別・業種別売上高別経常利益率」, 財務省 法人企業統計季報の製造業の売上高経常利益率を参考(財務省 法人企業統計季報 2011)に, 世の中の経常利益や営業利益率推移と乖離を生じないようにすることが大切である. そして, 持続的に成長する企業として捉えた際に, この定量的数値のみでは企業縮小方向でも数値は達成できることを鑑みると, 定性的な指標とする経営理念や企業風土としたものの中に持続的に成長することの共通の理念や意識を盛り込むこと, 中小企業においてはステークホルダーの優先順位を, 従業員を第一に考えた従業員満足度などの仕組みを検討しておく必要がある.

次に, ここでピーエムティーにおける三品[15]の持続力・跳躍力・リスク判定及び最終判定の指標とした数値を用いて, これまでの経営実績状況や業界大手との対比を行った(表 2.4). その結果, これまでの経営は良好であることが伺えた.



表 2.4 ピーエムティーに於ける持続力・跳躍力・リスク判定と業界大手との対比

企業名	業種分類	最高益 記録年	最高益 更新率 (%)	利益水 準倍率	最下限 利益率 (%)	持続力 判定	跳躍力 判定	リスク 判定	最終 判定
ピーエムティー		2011	36	3.27	6.73	○	○	○	○
安川電気	電気機器	1997	8	1.24	-1.0	×		×	
東陶機器	硝子・土石	1988	31	1.65	4			○	
荏原製作所	機械	1997	25	1.31	1.3			○	
芝浦メカトロニクス	電気機器	1999	3	0.38	-1.6	×	×	×	×
東芝機械	機械	1970	8	0.71	-0.2	×	×	×	×
森精機製作所	機械	1990	24	1.13	7.6			○	
九州松下電器	電気機器	1990	19	2.19	1.8			○	
日立金属	鉄鋼	1990	17	1.19	1.0	×		○	
オムロン	電気機器	1988	25	3.93	4.6			○	
花王	化学工業	1999	64	5.05	3.5	○	○	○	○
キャノン	精密機器	1997	42	12.44	4.6	○	○	○	○
京セラ	電気機器	1996	36	4.13	11.1	○		○	○
信越化学工業	化学工業	1999	44	4.44	5.5	○	○	○	○
ダイジェット工業	機械	1973	17	0.52	2.8	×	×	○	△
東芝	電気機器	1989	19	1.42	-0.8			×	
トヨタ自動車	輸送用機器	1999	38	3.06	3.6	○		○	○
ニコン	精密機器	1995	36	2.80	1.1			○	
ニチコン	電気機器	1997	28	5.57	6.7		○	○	○
日本電気	電気機器	1995	39	3.20	-0.2			×	
日本電子	電気機器	1979	17	1.14	0.8	×		○	
日立製作所	電気機器	1989	25	2.00	2.3			○	
富士写真フイルム	化学工業	1990	39	5.42	10.7			○	
牧野フライス製作所	機械	1990	28	1.13	2.4			○	
松下電器産業	電気機器	1984	25	3.47	3.9			○	
三菱電機	電気機器	1989	28	1.49	-0.3			×	
ミツミ電機	電気機器	1997	19	4.58	0.3		○	○	○
村田製作所	電気機器	1999	31	19.96	14.0		○	○	○
リコー	精密機器	1999	42	3.49	2.6	○	○	○	○
ウシオ電機	電気機器	1996	31	4.94	2		○	○	○

(出展) 中小企業白書 2011 中小企業庁

[http://www.chusho.meti.go.jp/pamflet/hakusyo/h23/h23\\_1/h23\\_pdf\\_mokuji.html](http://www.chusho.meti.go.jp/pamflet/hakusyo/h23/h23_1/h23_pdf_mokuji.html)

## 2.2 企業の持続的成長の要因

### 2.2.1 調査方法

次に企業における持続的な成長の要因とは何かを検討するため、持続的成長をキーワードとした日本語文献の検索から論文、研究レポート、書籍の26冊を対象とし、それぞれにおいて持続的成長について記述がある章または節を調査から必要と考えられる内容を整理した上で、その特徴から重要な要因を選抜した。

### 2.2.2 持続的な成長の要因調査結果

先行研究者によって示されている持続的成長の要因とする項目について、多用されている要素(キーワード)とその内容に基づき抽出をした(表 2.5)。その結果、①経営理念・ビジョン、②企業文化・組織風土、③経営マネジメント・管理システム、④イノベーションが重要な要因項目であることが分かった。

表 2.5 抽出した持続的成長の重要な要因

	要因項目
①	経営理念・ビジョン
②	企業文化・組織風土
③	経営マネジメント・管理システム
④	イノベーション

次に、持続的な成長要因とした4項目について、それを考えられる内容を示すと以下のよう  
な指摘がある。

### 1) 経営理念・ビジョン

コリンズ他[24]は今日の「新しい」経営手法も「革新的な」経営手法も決して新しくなく、普  
遍的な理念を読み取れば、誰でも教訓を学べ、誰でもその教訓を活かせると述べている。  
P. F. ドラッカー[22]は、CEOは価値観、基準、組織内の道徳を決定し、組織が正しい方向  
に進むのか、間違った方向に進むのかは、これら次第であると述べている。野中[13]は不  
確実であれば、自ら未来を創造していくために哲学や価値観に則した目標を掲げ、そこへ  
の到達プロセスを描いていく必要があると述べている。

### 2) 企業文化・組織風土

田中達也[19]らは持続的成長を実現している企業は、いずれも変わらない基本理念を  
有し、それを共有・徹底・承継し、「自己革新」のプロセスを絶えず推し進めていると述べて  
いる。アーリー・デ・グース[135]は、リビングカンパニー(長寿企業)になるには常に学習す  
る組織を作ることと述べている。ロナルド N. アッシュケナス[136]らは、革新的な経営手法の  
多くは度重なる試行錯誤を経て実現し、場当たりの対応を繰り返しているような多くの小  
さな改善の積み重ねが、最後には確固たる礎になると述べている。野中[13]は組織や人づ  
くりの巧拙が持続的成長を左右し、素晴らしい戦略・ビジネスモデルを有していても企業を  
構成する組織や人がその実現に向けて継続的に動かなければ、企業の持続的成長には  
繋がらないと述べている。

### 3) 経営マネジメント・管理システム

P. F. ドラッカー[22]は、企業の目的は一つであり、それは顧客の創造であること、起業家  
とは気質ではなく行動であり、その基礎となるのは直感でなく原理であり方法である、マネ  
ジメントという技術があってこそアントレプレナーシップもイノベーションも出現する、と述べて  
いる。ランドン・モリス[17]は、プロセスを整えることで学習することができ、そして能力を変  
えていくことができると述べている。ロナルド N. アッシュケナス[136]らは企業買収と統合として  
の方法論を開発することで、すべてのリーダーが研究結果をオンライン上で共有化すると  
共に、コミュニケーションプランや機能統合チェックリスト、ワークショップの議題一覧、コン  
サルティング情報資源といった情報管理を共有し構築できると述べている。W. チャンキム  
[137]は高成長企業は例外なく、戦略姿勢を市場での事業遂行行動に実際に適用してい  
る。一方、低業績企業は既成の成長路線に沿ってしか考えていないと述べている。

### 4) イノベーション

P. F. ドラッカー[22]はイノベーションは創造性を有する一部のひらめきや直感によって  
「起こる」のではなく、体系的なマネジメントにより「発生させる」ものであると述べている。ク  
レイトン・クリステンセン他[18]は、イノベーションの能力は神秘でも魔法でもなく、方法さえ

わかれば誰にでも体系化して習得できると述べている。

### 2.2.3 持続的な成長を達成するための基本フレームワークに関する検討

先行研究における持続的成長の要因抽出結果から、各要因項目における重要なポイントや繋がり、またその意味について、中小企業におけるステークホルダーの優先順位を従業員と位置付け、その方針を説明する際に分かり易く共有化するものであることが必要であると分かった。そのため、中小企業経営における経営の基本フレームワークとして図 2.5 を提案する。基本フレームでは1)持続的成長の要因の基本的な考え方から2)その内容について大切にすべきポイントと思考を明確に示し、その次に3)心がける点の明記、4)達成するための手法や方法論、そして、その結果として達成する必要があると考えられるシステムとプロセスを記すこととした。

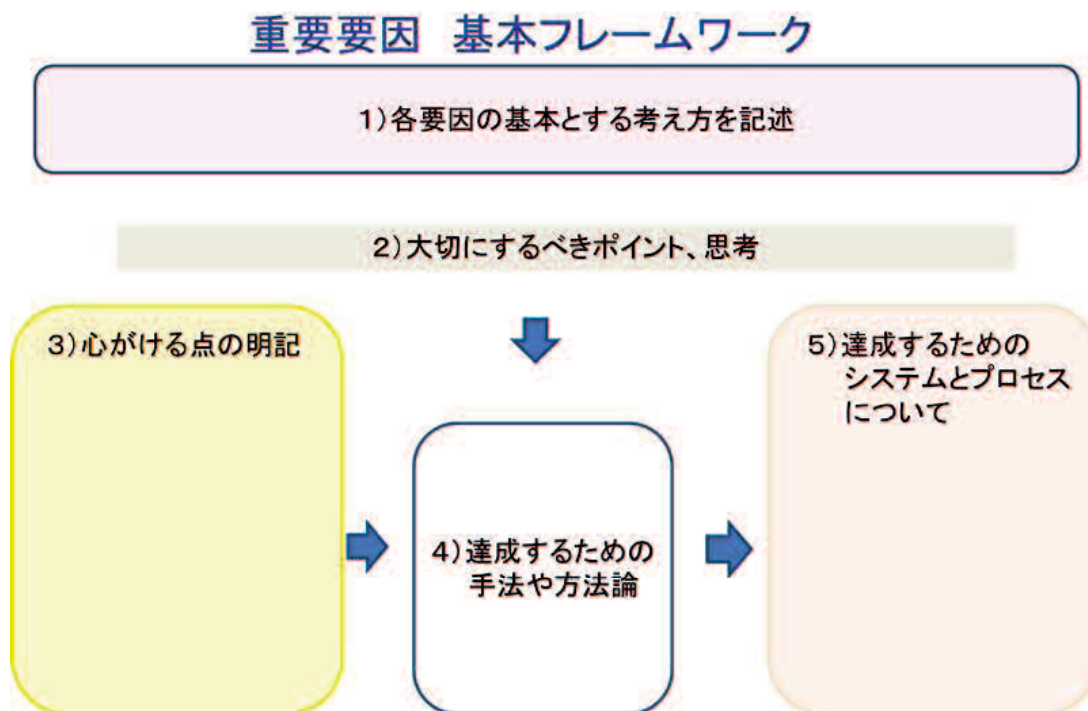


図 2.5 基本フレームワークの概略図

### 2.2.4 持続的成長重要要因への基本フレームワークの展開

次に、先行研究者が示したそれぞれの要因に対する指摘内容を基に、新たに提案した中小企業経営における経営の基本フレームワークを適用すると、以下のように整理することができる。

(1)【経営理念・ビジョン】 経営フレームワーク(図 2.6)

- 1) 各要因の基本とする考え方  
経営理念は考え方や物事の見方の確固とした起点を定め、あるべき姿と方向性を決める。
- 2) 大切にすべきポイント, 思考  
平易な表現で明確に理念を示し、誇れる内容であること。
- 3) 心がける点  
基本理念を維持し、進歩を促す具体的な仕組みを整える。  
維持される基本理念と、将来理想に向けた進歩の二つが必要。
- 4) 達成するための手法や方法論  
価値観, 基準, 組織内の道徳を決定し判断軸を明確にし、経営理念浸透のための組織的な取り組みとしてフィロソフィ手帳の配布や定期研修を実施する。
- 5) 達成するためのシステムとプロセス  
組織やすべての仕組みに浸透させる。  
(目標, 戦略, 方針, 過程, 企業文化, 経営陣の行動, オフィス, 会計・給与システム, 職務計画など)

## 経営理念、ビジョン

### 基本とする考え方

- 考え方や物事の見方の確固とした起点を定める
- 企業自らの存続意義や社会的価値といった本質を見極め、到達すべき正しい目標を明らかにする
- あるべき姿を描き方向を定める

### 大切なこと

平易な表現で明確に理念を示し、誇れる内容であること

### 心がけること

- 基本理念を維持し、進歩を促す具体的な仕組みを整える。
- 維持される基本理念と、将来理想に向けた進歩の二つが必要  
(規模や特性に適合した、変わらない・共有・徹底・承継のプロセス) 田中

### 手法・方法論

- 価値観、基準、組織内の道徳を決定し判断軸を明確にする
- 経営理念浸透のための組織的な取り組みとしてフィロソフィ手帳の配布や定期研修を実施する
- 進歩を促す具体的な仕組みを整える

### システム・プロセス

- 基本理念と、目標とする進歩に一貫性を持つ
- 組織の隅々まですべての部分が協力する
- 革新の努力を繰り返す
- 組織への浸透  
(目標、戦略、方針、過程、企業文化、経営陣の行動、オフィス・レイアウト、給与体系、会計システム、職務計画等)

図 2.6 経営理念・ビジョンの経営フレームワークの概略図

(2)【企業文化・組織風土】経営フレームワーク(図 2.7)

1) 各要因の基本とする考え方

企業をどういう人材で構成するかを決め、共通の価値観を築き、人材を登用し、能力を開発し、個々の能力の評価を行い、雇用契約を守り、社員が満足して企業を去ることができる退職制度を確立する手順を構築する。

2) 大切にすべきポイント, 思考

「資産は人である」として独創性, 創造性を常に考える。

3) 心がける点

独創性や革新性の才能などにとどまらず、経営能力, 事業ノウハウ, 十分な人脈をも兼ね備えること

組織は人間が構成するコミュニティであること, 生き残るためのビジネスを行なっているコミュニティであることを忘れないこと。

4) 達成するための手法や方法論

学習によって新しい知識を統合することで自分自身と自分の能力を変化させる組織, 社員自ら企業のいく末に関心を持ち, 企業も社員も互いに気遣う風土を作る。

5) 達成するためのシステムとプロセス

継続し学習する組織をつくること, 何よりもまず社員の開発に注意を向けること。

## 企業文化・組織風土

・企業をどういう人材で構成するかを決め、共通の価値観を築き、人材を登用し、能力を開発し、個々の能力の評価を行い、雇用契約を守り、社員が満足して企業を去ることができる退職制度を確立する手順を構築する。  
 ・自社が何者で、自社がどうすれば社会に適合するかを理解し、新しいアイデアや人材の価値を認め、未来に備えるために手元に余る資金を節約する

大切なこと

「資産は人である」 独創性、創造性を常に考えること

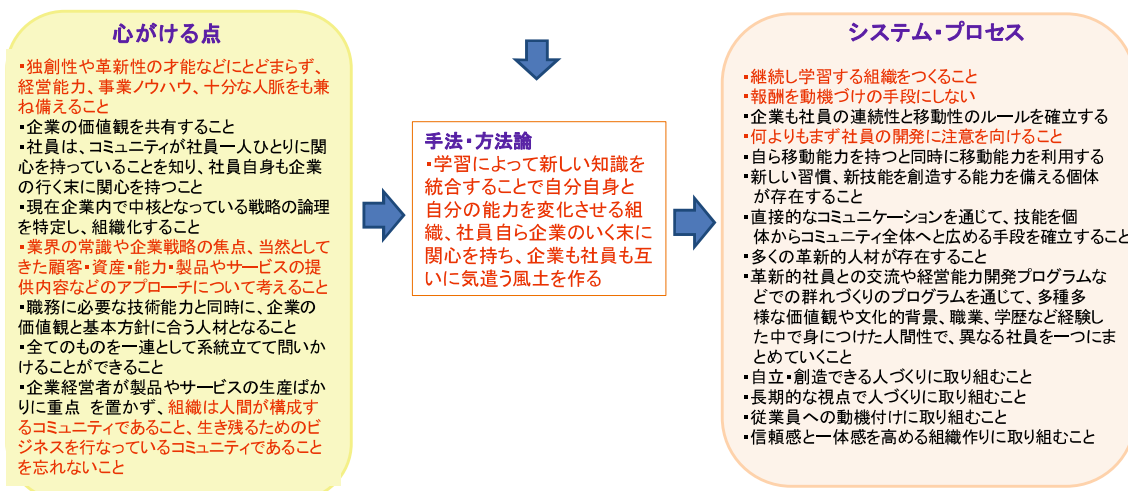


図 2.7 企業文化・組織風土の経営フレームワークの概略図

(3)【経営マネジメント・管理システム】経営フレームワーク(図 2.8)

- 1) 各要因の基本とする考え方  
 重要なのは原理であり方法である。技術やイノベーションをマネジメントする管理システムを構築し、ドメインを如何に定義するかである。
- 2) 大切にすべきポイント, 思考  
 業務モデルやビジネスモデルでもなく、経営管理モデルが企業業績を制約する。
- 3) 心がける点  
 ドメインの定義を明確にし、活動領域を定める。また、安定期を迎えると脱成熟化を目指してドメインの再定義を行う。経営管理イノベーションは、競争優位の劇的かつ長期的な変化を生み出す力が、ほかのイノベーションよりはるかに大きく重要である。
- 4) 達成するための手法や方法論  
 成熟化・コモディティ化から逃れるためには環境変化に対応して、事業そのものを日々変革していく仕組みにすることと、IT 技術を駆使した未来志向型の管理システムを構築する。
- 5) 達成するためのシステムとプロセス  
 経営指標の構築や危機管理能力などと多くの危機を乗り越えて事業を継続してきたノウハウや戦略をモデル化し、経営強化を図ること。

経営マネジメント・管理システム

- ・基礎となるのは直感でなく、原理であり、方法である・技術やイノベーションをマネジメントすることができる管理システムが必要である
- ・企業の盛衰はどのようなドメインを定義するかによって大きく左右される

大切なこと

企業業績を究極のところでは制約するものは、その企業の業務モデルでもビジネスモデルでもなく、経営管理モデルである

心がける点

- ・技術と経営の複眼的視点から社会や企業、組織における様々な問題に対して、解決を目指して取組む力、実社会において創造的問題解決に取り組む力を育てる
- ・強力なリーダーシップで継続的に変革し環境変化へ適応できるマネジメント力を備えること
- ・ドメインの定義を明確にし、活動領域を定める。また、安定期を迎えると脱成熟化を目指してドメインの再定義を行う
- ・顧客の求める成果を捉え続けるため経営環境変化への対応を常に心がけること
- ・組織は各成長ステージによってその特有の「危機」を迎え、それを「革命」によって乗り越えることで、その経験が新たな「発展」のステージへと繋がる
- ・経営管理の原理、プロセスや慣行をつくり変える力をもつ必要がある
- ・経営管理イノベーションは、競争優位の劇的かつ長期的な変化を生み出す力が、ほかのイノベーションよりはるかに大きく重要である



手法・方法論

- ・成熟化・コモディティ化から逃れるためには環境変化に対応して、事業そのものを日々変革していく仕組みにすること
- ・IT技術を駆使した未来志向型の管理システムを構築する

システム・プロセス

- ・企業の規模に応じた事業形態、組織、マネジメント、抱える問題などを考え変えていくこと
- ・戦略、組織、財務という3つの視点で、成長ステージ別に適切な戦略課題、経営要素の重点、組織のあり方、資金調達方法を考えていくこと
- ・何を行うのか決めるのと同様に、何をやらないかを決めること
- ・イノベーションを発生させることができるような体系的なマネジメントプロセスが必要である
- ・革新型企業は、商品、サービス、あるいは経営システムに、イノベーションに基づく新規性があり、さらに社会性、独立性、普遍性を備えること
- ・経営管理の技術は、経営管理の階層序列を築き、管理システムや人事慣行、計画策定、手順を持ち、報告形態や評価制度が必要である
- ・経営指標の構築や危機管理能力などと多くの危機を乗り越えて事業を継続してきたノウハウや戦略をモデル化し、経営強化を図ることで持続的な成長を目指すこと
- ・①従来の中小企業経営者とは異なる資質と能力を持った経営者を生み出す②独自の製品選択、成長性ある商品の選択をする③さまざまなイノベーションの導入をする④積極的な設備投資、新加工技術の導入とともに現場の能力主義と平和主義の両立により従業員の活性化を図りこれらを効果的に統合できる仕組みとマネジメントを行うこと

図 2.8 経営マネジメント・管理システムの経営フレームワークの概略図

(4)【イノベーション】 経営フレームワーク(図 2.9)

1) 各要因の基本とする考え方

イノベーションとは技術開発にとどまらず、開発の過程で創造される知的財産の蓄積・管理や資金調達も含め、マーケットでの販売という“事業化”までの全体に関わるものである。経済発展の原動力は企業経営者によるイノベーション(新結合の遂行)にある。①当該産業分野において實際上未知な生産方法の導入②新しい販路の開拓③原料あるいは半製品の新しい供給源の獲得④新しい組織の実現。

2) 大切にすべきポイント, 思考

イノベーションを生み出すためには「知」と「起業家精神」をもつこと。「企業の目的は一つ、それは顧客の創造である」とし、顧客の創造はまさに「顧客の求める成果」の探索が出発点であること。

3) 心がける点

「破壊的イノベーション」は技術に限らず、新しい販売方法やサービス形態の開発など様々生じ、市場の構造を一変し、既存企業の持続的な成長を脅かし始めることがある。

企業の能力に「吸収能力」がある。パートナーから何を獲得し相手に何を提供できるかを考えること。

4) 達成するための手法や方法論

オープンイノベーションで社内外のアイデアを有機的に結合し価値創造を行うことや技術開発における共同経営やライセンス、販売・マーケティングにおける提携、合併や買収(M&A)も含めて社外の経営資源を社内の経営資源と同様に活用すること。オープンとクローズドの戦略を並列に活用すること。

5) 達成するためのシステムとプロセス

アイデアの多様化, さらにはビジネスへの展開での実験の場としても大学との連携は、不可欠な活動である。



## イノベーション

・イノベーションとは技術開発にとどまらず、開発の過程で創造される知的財産の蓄積・管理や資金調達も含め、マーケットでの販売という“事業化”までの全体に関わるものである  
 ・経済発展の原動力は企業経営者によるイノベーション(新結合の遂行)にある。  
 ①当該産業分野において実際に未知な生産方法の導入②新しい販路の開拓③原料あるいは半製品の新しい供給源の獲得④新しい組織の実現

### 大切なこと

- ・イノベーションを生み出すためには「知」と「起業家精神」をもつこと
- ・「企業の目的は一つ。それは顧客の創造である」とし、顧客の創造はまさに「顧客の求める成果」の探索が出发点であること
- ・技術開発や製品開発だけが発明ではない。どのような製品を作るか、どのように売るかということにも発明がある
- ・高付加価値を生み出すためではなく、新しい顧客を増やすためにイノベーションを起こすこと

### 心がける点

- ・イノベーションを生み出すためには、「研究とは何か、独自の仮説をどう生み出し実証データで示すか」等基本が身についていること
- ・「破壊的イノベーション」は技術に限らず、新しい販売方法やサービス形態の開発など様々生じ、市場の構造を一変し、既存企業の持続的な成長を脅かし始めることがある
- ・企業の能力に「吸収能力」がある。パートナーから何を獲得し相手に何を提供できるかを考えること
- ・企業が合理性に基づき、高い技術開発、イノベーションを導入し、最も収益性の高い顧客を満足させることに取り組む合理的かつ論理的に正しいと思える行動が、かえって企業の基盤を危うくすることがある(イノベーションのジレンマ)
- ・「顧客よりも非顧客に目を向けること」が重要、得意先だけを見ていると、市場や顧客の大きな変化には気が付きにくい
- ・一見無関係な物事を関連付けられる力を育てる

### 手法・方法論

- イノベーションにはマネジメントという技術が必要で、そのマネジメントの本質は統合で共同作業である**(質問、観察、ネットワークキング、実験という四つの地道な行動習慣を通して関連の材料を手に入れ斬新なアイデアの創出を促す)
- ・Incrementalなイノベーション及び破壊的なイノベーションにも対応できる研究のケナビリティや通常のプラットフォームを企業間でシェアする戦略を持つこと
  - ・垂直連携および水平連携を行うこと
  - ・オープンイノベーションで社内外のアイデアを有機的に結合し価値創造を行うことや技術開発における共同経営やライセンス、販売・マーケティングにおける提携、合併や買収(M&A)も含めて社外の経営資源を社内の経営資源と同様に活用すること
  - ・オープンとクロズドの戦略を並列に活用すること

### システム・プロセス

- ・イノベーションを行うには活動を統合していくリーダーが必要で、客観的な物差しのない世界で自分なりの基準で物事を判断するセンスが求められる、未来の顧客価値を想定した「ストーリー」を描くこと
  - ・アイデアの多様化、さらにはビジネスへの展開での実験の場としても大学との連携は、不可欠な活動である
  - ・イノベーションの意味は技術面だけではなく、ビジネスの仕組みを変革していくことで、いくつかの血が組み合わせられて新しい結合をつくるときに生じる
- イノベーションをプロセスと考え実行する
- ①顧客と市場によって重要なニーズに取り組むこと
  - ②有用なツールを活用し、顧客価値を迅速に生み出すこと
  - ③イノベーションを率いる「チャンピオン」となって、価値創出プロセスを推進すること
  - ④多様な分野の専門家を集めた混成チームによって、天才に負けない集合知を実現すること
  - ⑤チームの方向性を定め、価値の高いイノベーションを体系的に生み出すこと

図 2.9 イノベーションの経営フレームワークの概略図

### 2.2.5 提案した持続的成長の重要な要因に基づく中小企業における適応検証

検証企業として 1991 年に創業し、現在ではグループ売上約 50 億円、総従業員数 220 名(注:2017 年 7 月末)の企業であり、持続的に成長をしてきたと考えられる中小企業であるピーエムティーを対象に調査検討を行った。ピーエムティーは5社の子会社を有するグループ企業の親会社であり、商社で創業した後に半導体、金属加工の小売業から、産学連携などを通じ様々な製品を開発、市場へ提供し、現在ではオープンイノベーションを駆使しながら自社ブランド製品を持つ企業へと事業を展開・変革している。図 2.10 に同社の売上高の推移に加え、中小企業においても持続的成長の目標設定として明示化がしやすい『売上高経常利益率』を示す。

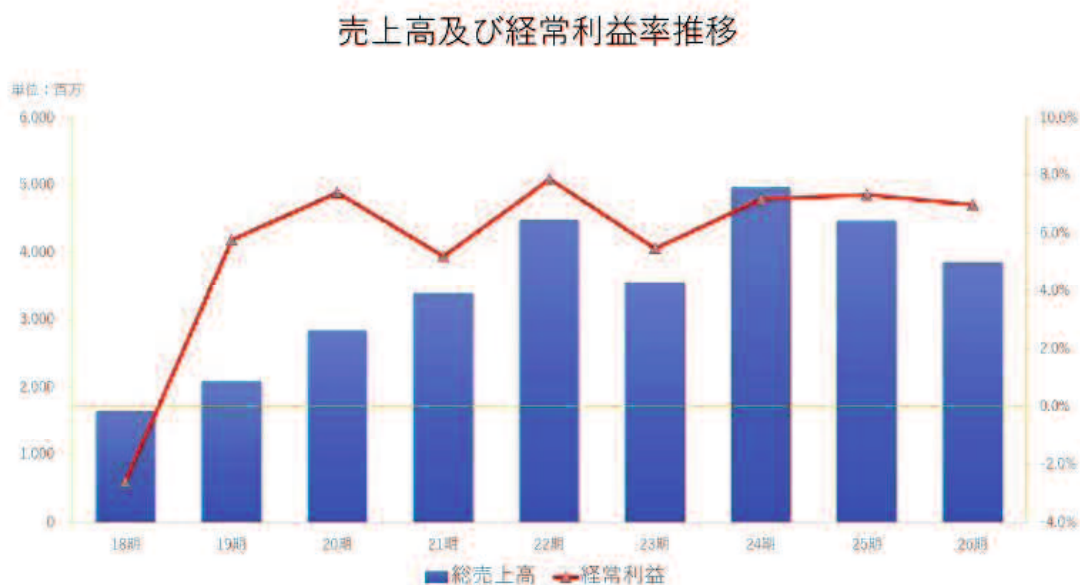


図 2.10 ピーエムティーの売上高, 売上高経常利益率推移

### 2.2.6 持続的成長要因との対比

検証企業における基本フレームワークに基づくヒアリング調査を行い、それぞれの要因について検討を行った。結果の比較としてそれぞれの要因内容の習熟度を1から5の5段階で表記し、現状とその改善内容、さらにはその実行の社内における優先度と重要度を示す方法とした。また、持続的成長の要因である①経営理念・ビジョン、②企業文化・組織風土の結果のみを記す(表 2.6)。経営フレームワークとして定量化することで、進捗度、優先重要度とした管理指標を基に達成度合いを測りPDCAを進めやすくすることが可能であると分かる。

表 2.6 持続的成長要因とピーエムティーの対比及び進捗指標の一例

持続的成長のキーワード	先行研究者の要因	習熟度	自社の状況	改善内容	優先・重要度
①経営理念・ビジョン	①基本理念を確立し維持する	1 2 3 ④ 5	経営理念を確立し、理念手帳で浸透活動中	2014年改定を実施	B2
	②CEOは価値観、基準、組織内の道徳を決定	1 2 3 ④ 5	会社としての価値観、判断軸を60項目に表している	同上	B2
	③進歩を促す具体的な仕組みを整える	1 2 3 ④ 5	経営理念浸透のために朝礼昼礼でフィロソフィ手帳の読み込みや定期研修を実施	従来通り、朝礼昼礼を主体に実施	B2
	④組織の隅々まで浸透し、すべての部分が協力	1 2 ③ 4 5	新しい方が増え、理念研修が必要	各階層研修会を年2回実施する	A2
②企業文化・組織風土	①「自己革新」のプロセスを絶えず推し進める・常に学習する組織をつくる	1 ② 3 4 5	活力ある組織へ取り組み(目標管理シート、人事考課、ワイガヤ場づくり、部門コンパ推進など)	部門別学習プログラムを仕事と個人で作成	A2
	②企業の価値観と基本方針を共有できる	1 2 ③ 4 5	全体が集うのは年度方針会のみ	定期研修を計画する	B2
	③コミュニティが社員一人ひとりと企業の行く末に関心を持つ	1 ② 3 4 5	年度方針会のみ	経営情報開示と四半期毎の実績報告	B2
	④業界の常識や企業戦略の焦点、当然としてきた顧客・資産・能力・製品やサービスの提供内容などのアプローチについて考え直すことができる	1 ② 3 4 5	経営企画会議のみで検討	半期で戦略・方針における取組を再検討協議する	B2
	⑤独創性や革新性の才能などにとどまらず、経営能力、事業ノウハウ、十分な人脈をも兼ね備える	1 ② 3 4 5	中堅リーダーの経営企画参加で教育を進めている	社内教育と共に専門に合わせた外部人材も揃える	B1
	⑥組織は経験を通して様々なことを学習する。独自の戦略や個性、文化といったものがある。	1 2 ③ 4 5	アメンバー運営で経験を出来るだけ広く共有	アメンバーを小さく分け組織運営リーダーを多く作り学習させる	B2
	⑦従業員への動機付けと信頼感と一体感を高める組織作りに取り組む	1 ② 3 4 5	定期部門会議と懇親会を実施	全体での取り組みが不足、計画する	B2

次に、その重要な要因とピーエムティーのこれまでの取り組みについて比較検討し、それに対する経営フレームワーク⑤として定量化することで、進捗度、優先重要度とした管理指標を基に達成度合いを測りPDCAを進めやすくしたことで、それに基づいた5W1Hでの細かい運用ができるように工夫した。

また、これまでの取り組みで参考とした知識創造プロセス(SECIモデル)を振り返って考えると、表出化(暗黙知⇒形式知)段階では論理が必要であり、客観性を伴った先行研究者の要因を取り入れたものでの明示化が必須であることを理解した。そして、次の連結化(形式知⇒形式知)段階には見出された形式知を運用するための定量化が必要であり、経営におけるマネジメントすべてに本研究で見出された持続的成長4要因を基軸にして照らし合わせた考えを持つことが重要である。これらを参考にピーエムティーに於ける細かなスパイラル浸透の運用モデルについて図2.11に示す。

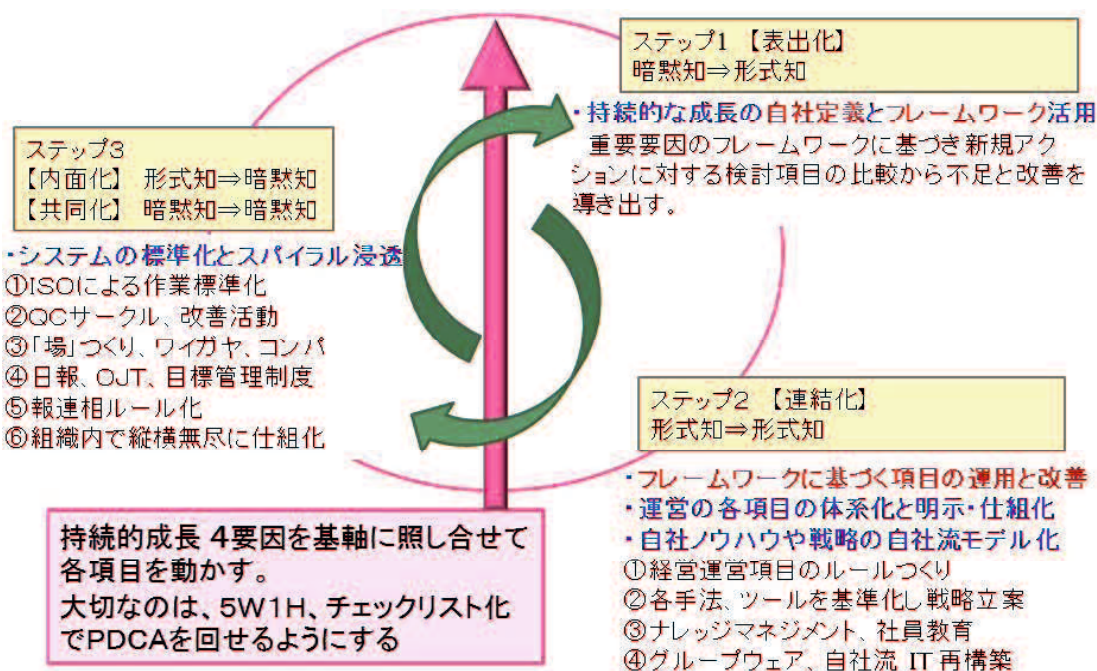


図 2.11 ピーエムティーに於けるスパイラル浸透・運用モデル

## 2.3 まとめ

本研究では先行研究の調査から持続的成長の定義と中小企業の持続的な成長に必要な重要要因を考察し、中小企業経営における経営の基本フレームワークとして提案した。さらに提案したフレームワークを基に、中小企業における実態調査からフレームワークの有効性を検討し、以下の結論を得た。

- 1) 先行研究の調査から企業における持続的成長の重要な要因として、①経営理念・ビジョン、②企業文化・組織風土、③経営マネジメント・管理システム、④イノベーションの4項目が具体的に見出された。
- 2) 上記項目に分類された要因を『形式知＝見える化』として経営の基本フレームワークとして提案した。フレームワークは、持続的な成長を達成するための中小企業に必要なシステムとして、従業員への方針説明をする際に分かり易く共有化できることや、経営マネジメントに関し客観性をもって明確にするために各要因を明示化した。
- 3) 基本フレームワークの有効性を確認するため、中小企業において比較検討し、経営フレームワークとして定量化することで、進捗度、優先重要度とした管理指標を基に達成度合いを測り、PDCAを進めやすくすることができることを示した。
- 4) 特にイノベーションについて着目し、P. F. ドラッカー[22]はイノベーションはひらめきや直感によって「起こる」のではなく、体系的なマネジメントにより「発生させる」ものである。クレイトン・クリステンセン他[18]は、イノベーションは方法さえわかれば誰にでも体系化して習得できると述べており、持続的成長をするためにはイノベーションとそのマネジメントが重要であるところを示した。

## 第3章 特許検索システムを用いた技術動向分析の一考察

### 3.1 はじめに

市場への適応のための製品やサービスについて効果的な製品開発を行うために、特許情報は技術動向や技術分析から自社や競合他社との研究戦略および方向性を明らかにするための有効な情報であるが、2012年度以前の5ヶ年における日本国内の平均出願数は約35.4万件となっており、その情報量は膨大である。そのため、精度よく高速で安定した検索システムによる特許分析に対する要求があり様々な特許検索システムが提案されている[28]-[30]。また、特許情報に含まれる技術情報の探索目的に適合する定量分析、定性分析、相関分析などを通じて分析結果を見える化することで技術情報を容易に理解することができる[31]-[34]ことから特許情報のキーワードの見える化または、目に見えない事象を掴むためのテクニックとしてパテントマップと呼ばれるものがある。また、露光装置を対象とした、技術開発組織の複雑性[35]や製品ライフサイクルに関する研究[36]などもある。そこで、本研究では製品開発を行うために、製品に提供される技術とその技術動向を分析する手法を検討し、特許検索システムの一つである YUPASS (Yamaguchi University Patent Search System) とパテントマッピングソフト [37] を組み合わせた特許分析システムを用いて半導体製造装置に欠かすことのできない露光装置[38]-[40]を例として、技術の変化とその選択が開発製品の将来の市場のシェアに与える影響[41]-[45]に関して評価を行った。

### 3.2 特許分析システムとその特徴

特許検索システムとして YUPASS, さらに取得したデータのマッピングには、汎用パテントマップソフトであるパテントマップ EXZ を用いた。また、YUPASS は、山口大学が平成16年から開発を行っている特許検索システムであり、現在も改良を続けている。主な特徴は、以下の通りである。

- 1) 特許公報に含まれる書誌的事項を含む全テキストデータの一括検索機能  
(重み付け検索を含む)
- 2) テキスト全文の始点から終点まで全ての文言検索機能  
(助詞等の部分で検索語句の自動的な丸め処理は行っていない)
- 3) 検索結果公報のCSV形式出力機能, 公報引用関係表示機能
- 4) 学内サーバ設置で安定した検索が可能
- 5) 全文検索は平成5年以降の特許実用新案に対応

特許情報の検索サービスは、無料で利用できる簡便なシステムから有料で多機能なシステムまで各種システムがリリースされており、各検索システムは様々な検索方法を利用し、検索に適合する特許を出力することができる。さらに、得られた特許情報をマッピングソフトにより特許情報に含むキーワード等の解析要素を統計的に処理することで、技術動向や技術分布、新しい技術の傾向、新しい技術分野の発見、自社と競合企業との開発の差異の把握等を行うことができる。

特許情報のマクロ解析の例としてパテントマップがよく知られており、パテントマップは特許調査・検索により選択収集された特許情報群を母集団とし、その母集団に対して探索目的に適合する定量分析・定性分析・相関分析等の分析を行い、その分析結果を図または表の形にビジュアル化し、技術開発の実態を視覚的に容易に把握できるように工夫されている。パテントマップは統計型やリスト型等という種類があり、目的に応じてマップの種類が異なる。さらに、大量の特許情報を分析し、それから効率よくパテントマップを作成するためには、従来のマニュアル方式ではなく、機械的な情報処理になるパテントマップを用いる必要がある。マニュアル方式、機械方式、それぞれの情報の流れは図 3.1 に示す。

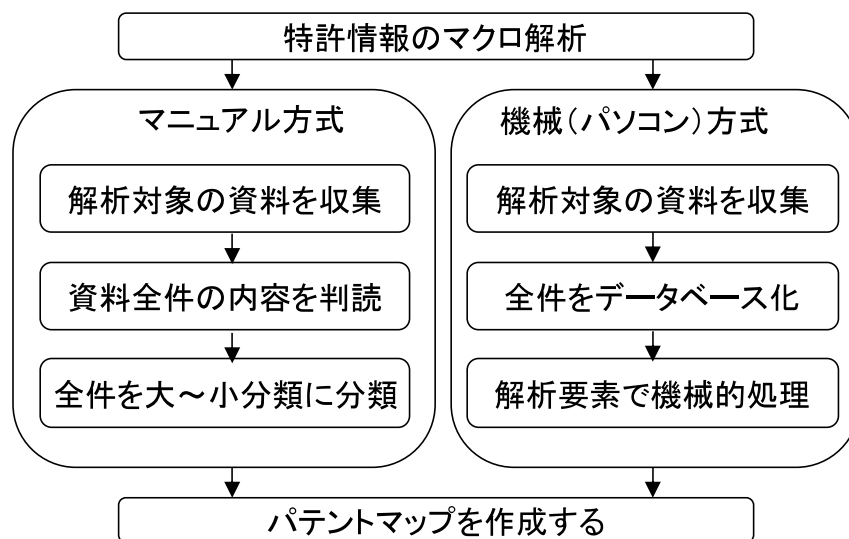


図 3.1 方式別のマクロ解析手法

解析は、解析対象の出願群を解析要素で大から小までの階層構造に分類し、その分類をさらに解析観点に沿って再配列して、マッピングソフトによりビジュアル化する。ただし、機械方式は、個々の出願内容の判読ができないため、用いる解析要素によってその解析レベルが左右され易いといった課題がある。また、出願ごとに特許情報として出願独自の発明の主題が含まれ、主題は、出願明細書中に、出願要約、請求の範囲、課題とその解決策、目的・用途、作用・効果、実施などが示される。さらに、主題は出願明細書に付与された IPC, FI, F タームの

分類系の情報や固定キーワード等に盛り込まれているため、機械方式パテントマップでは図 3.2 に示すように、発明の主題から抽出されたこれらの情報を、他の書誌事項(出願人, 発明者, 名称, 日付系, 番号系, 分類系)の情報と共に解析要素として用いることができる。

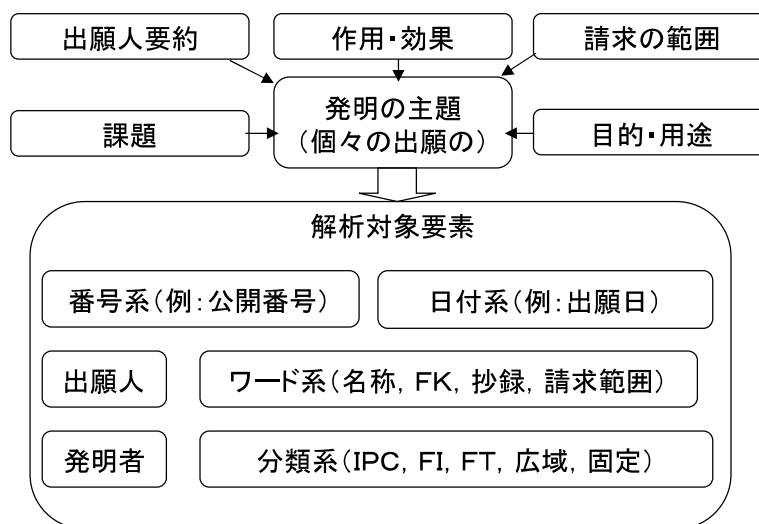


図 3.2 特許情報の解析対象要素

### 3.2.1 F タームを用いた技術内容の解析

機械方式パテントマップは、特定の解析要素、例えば出願人、IPC(国際特許分類)、FI (File Index)等のみを用いた機械的な解析手法であったため、個々の出願内容を読んで解析するマニュアル方式に比べて、技術内容の解析が不足しているという課題があった。分類系の情報を解析要素として用いた場合、その分類の種類によって解析レベルが決まり、分類によっては、解析対象情報を高いレベルで解析できる可能性がある。図 3.3 に示されるように、広域分類、IPC メイングループ、IPC サブグループ、FI、及び特許審査のための先行技術調査(サーチ)を効率的に行うために、機械検索用に開発された技術項目(分類系)である F ターム (File Forming Term)の順に分類の総数が多くなるため、F タームを解析要素とした場合、IPC 分類などに比べて、より高い解析レベルが期待できる。



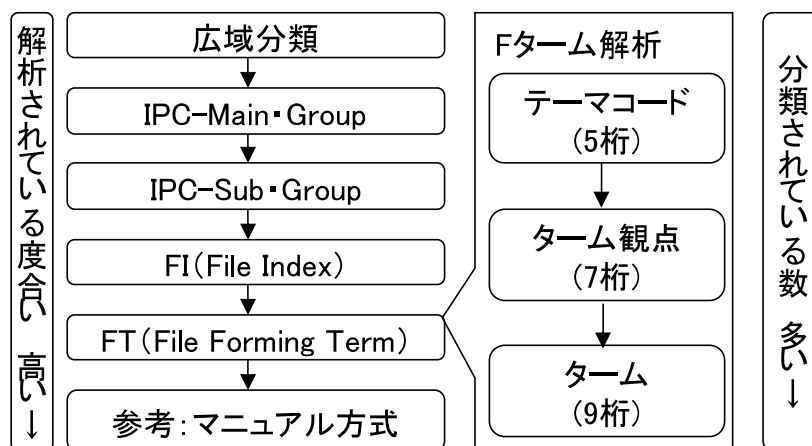


図 3.3 分類系の解析要素による解析の度合いの評価

現行の国際特許分類(IPC)のみでは、調査すべき先行技術文献も多くなるが、F タームは種々の技術的観点(目的、用途、構造、材料、製法、処理操作方法、制御手段など)から IPC を所定技術分野ごとに再区分、あるいは細区分したものであるため、F タームを組み合わせることで検索することにより、関連先行技術を効率的に絞り込むことができる。図 3.4 に示すように F タームは、テーマコード 5 桁 + 観点 2 桁 + 数字 2 桁にて構成される。一部のテーマについては、さらに付加コードと呼ばれる 1 文字の記号が設定されているものもある。付加コードは、F タームの後ろに “.” を付加する。F タームには様々な技術を対象としたテーマコードが設けられており、それぞれのテーマコードごとに独自の解析観点が定義されている。



図 3.4 F タームの構成と解析要素としての階層桁数

そこで、本研究では F タームを解析要素として注目し、検索対象とする特許情報から F タームを抽出し、パテントマップを作成する方法を用いた。実際の解析は、F タームがテーマコード 5 桁とタームコード 4 桁の合計 9 桁(付加コードを加えると 10 桁)で表現されていることから、テーマコードを大分類、タームコードの前半 2 桁(解析観点)を中分類、後半 2 桁(技術内容)を小分類に置き換えて、その大から小までで表現された分類の階層の深さ(F タームの桁数)を変えることで多様な観点を解析を行うことができる。解析全体のフローを図 3.5 に示す。

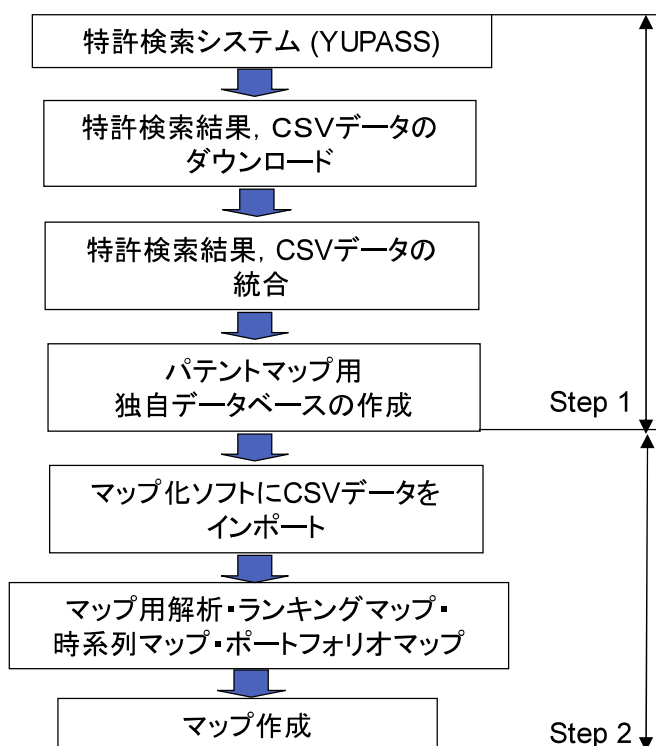


図 3.5 解析の全体フロー

### 3.2.2 解析手順

各種分析用のパテントマップを作成するために step1 として、特許文献のオンラインデータベースより、解析対象となる特許文献を収集し、独自データベースを作成するため、YUPASS の詳細検索に適したキーワードを入力し、検索結果の電子データを CSV ファイルとして取得する。ここで、YUPASS は 1 度に 10 万件まで検索リスト生成ができ、3 千件ずつ CSV データとして出力できるため、情報の漏れが少なく精度よく検索をすることができる。また、CSV 形式ファイルの中には検索で得られた解析対象となる特許情報の文献群が検索ごとにまとめて保管されていることから、EXCE 等の汎用ソフトを用いて結合することができる。次に step2 としてパテントマップ用の独自の DB 用に収集された結果をマッピングソフトにインポートしランキングマップ、時系列マップ、ポートフォリオマップ等を作成し分析を行う。ただし、パテントマップはあくまでも情報の解析を行うものであるため、解析結果の判断には分析対象に対する専門的な知識が必要である。

### 3.3 露光装置の特許分析

1990年代、ニコンとキヤノンは露光装置で世界シェアを二分していた。しかしながら、2000年代に入ると、ニコン及びキヤノンはオランダの半導体製造装置メーカーASMLに世界シェアトップの座を明け渡すことになる。これまで、ニコン、キヤノンの露光装置ビジネス衰退の原因について、経済的、経営的観点から様々な原因が調べられているが、本研究では、構築した特許情報の分析システムの有効性を確認するため、半導体製造用露光装置のシェアと技術の特徴の違いに着目し、特許情報から各社のシェア変化に与えた技術的要因をパテントマップの分析から推測することを試みた。

#### 3.3.1 露光装置のマーケットシェア

図 3.6 にニコン、キヤノン、及び ASML の露光装置に関する販売台数別の世界マーケットシェアの変化を示す。図 3.6 から分かるように、1990年代のニコンは40%以上のシェアを保有していた。1996年にはニコンが50%、キヤノンが25%のシェアを獲得しており、この二社で75%ものシェアを有していた。この時、ASMLのシェアは15%程度であった。2000年代に入るとニコン、キヤノン、ASMLの三社は激しいシェア争いを繰り広げるようになった。半導体露光装置の市場獲得シェアは、2001年にニコンが41.6%、キヤノンは34.8%、ASMLは22.4%であった。しかしながら、5年後の2006年になると、ASMLのシェアは4割に達し、2010年は6割となり、名実ともに世界トップの半導体露光装置メーカーとしての地位を確立した。

このトレンドについて、経済的及び経営的の観点から、ASMLが業界に先駆けて液浸露光装置を開発したことが要因の一つとされている。液浸露光装置は、ASMLが2004年8月、ASML製の液浸露光装置「TWINSCAN AT:1150i」の $\alpha$ 機がニューヨーク州立大学 Albany NanoTech に納品され、その後続々と同社製の液浸露光装置が出荷されていった。また、ローエンドのチップを作るための最も単純なリソグラフィー技術であるi線ステッパー市場については、「The Global Market for Equipment and Materials for IC Manufacturing」のレポートによれば、キヤノンが2006年に48.8%、ニコンは34.9%のシェアを保有し、ASMLは16.3%のシェアである。この状況は2011年になっても大きく変化することなく、キヤノンは52.9%、ニコンは40.0%、ASMLは7.7%のシェアであり、i線の市場ではシェアの変化は見られなかったが、i線露光ツールはローエンド半導体製造用であり、マーケット価格が低い。さらに、ハイエンド露光装置であるArF液浸露光のマーケットシェアはASMLが高く、2006年の液浸露光市場では、ASMLは72.4%のシェアとなった。ニコンは27.6%のシェアを占め、キヤノンはハイエンド市場には展開していない。2011年に、ASMLのシェアは82.0%にも増加し、ニコンのシェアは18.0%に低下した。このように、ASMLは液浸露光市場シェアの8割以上という非常に強い保有を示すため、露光装置世界マーケットシェアのトップになった。ASMLが大きくそのシェアを60%まで高め、ニコンは20.5%、キヤノンは10%まで低下した。

このことは、2008年の販売台数シェアは、ASLMが40.7%、ニコン30.2%、キヤノン29.1%であるが、売上基準によるシェアではASLM65.4%、ニコン23.3%、キヤノン11.3%となることから、ASLMが露光装置全体のシェアを伸ばしていることが分かる。

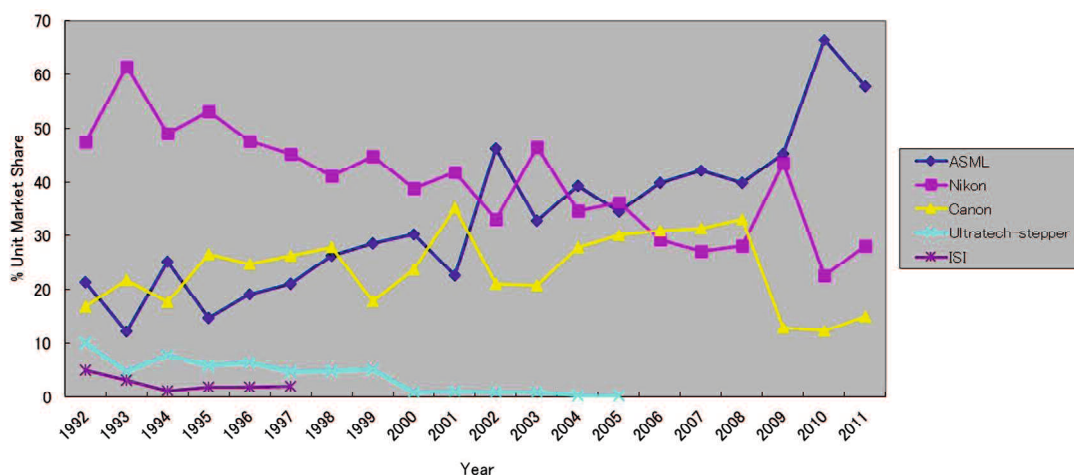


図 3.6 半導体露光装置メーカーシェアの推移

### 3.3.2 パテントマップによる分析

ニコン、キヤノン及び ASML の三社の半導体露光装置技術について分析を行うため、図 3.7 に示す検索式により、2002 年から 2011 年までの特許情報を収集した。

検索式(ニコン)	検索式(キヤノン)	検索式(ASML)
<b>詳細検索</b> 検索対象:公開特許公報(a) 発明の名称:露光 or リソグラフィ 出願人氏名:ニコン 全文: g線 (2208件) i線 (2670件) KrF (3258件) ArF液浸 (1240件) DP (561件) EUV (1456件)	<b>詳細検索</b> 検索対象:公開特許公報(a) 発明の名称:露光 or リソグラフィ 出願人氏名:キヤノン 全文: g線 (355件) i線 (708件) KrF (1293件) ArF (1277件) ArF液浸 (288件) DP (124件) EUV (526件)	<b>詳細検索</b> 検索対象:公開特許公報(a) 発明の名称:露光 or リソグラフィ 出願人氏名:ASML 全文: g線 (14件) i線 (21件) KrF (16件) ArF (32件) ArF液浸 (15件) DP (187件) EUV (783件)

図 3.7 解析対象となる特許文献の検索式と結果

次に取得した特許情報をもとに、図 3.5 に示した手順に従って、パテントマップ用独自データベースより CSV ファイルをマッピングソフトにインポートし、マップ作成を行う。本検討では PatentMapEXZ を用いてパテントマップを作成した。また、F タームを解析要素とすることで階層の深さによる大分類(5 桁)、中分類(7 桁)及び小分類(9 桁)に対し、パテントマップの作成及び分析を実施した。

## 3.4 解析結果

### 3.4.1 F ターム 5 桁による大分類(技術分野)解析

技術分野の分析を行うため F ターム 5 桁(テーマコード)のランキングマッピングにより, 各社の露光, リソグラフィの発明における出願割合を解析した. 図 3.8 に解析結果を示す. 図から分かるように ASML, ニコン及びキヤノンは, いずれも F ターム 5 桁, 5F146 と 5F046 のテーマコードの出現頻度が最も高く, ニコン, キヤノン, ASML 各社の技術分野の違いは現れず, 同様な傾向となっていることが分かる. ここで, 5F146, 5F046 はともに技術分野「半導体の露光(電子, イオン線露光を除く)」である. また, 表 3.1 に出現頻度の上位 4 項目の F ターム 5 桁とテーマコードを示す.

次に, 大分類の解析結果から最も出現頻度が高い技術分野 5F146「半導体の露光(電子, イオン線露光を除く)」に対して, テーマコード 5F146 の中で各メーカーがどのような観点に注目しているのか中分類解析を行った.

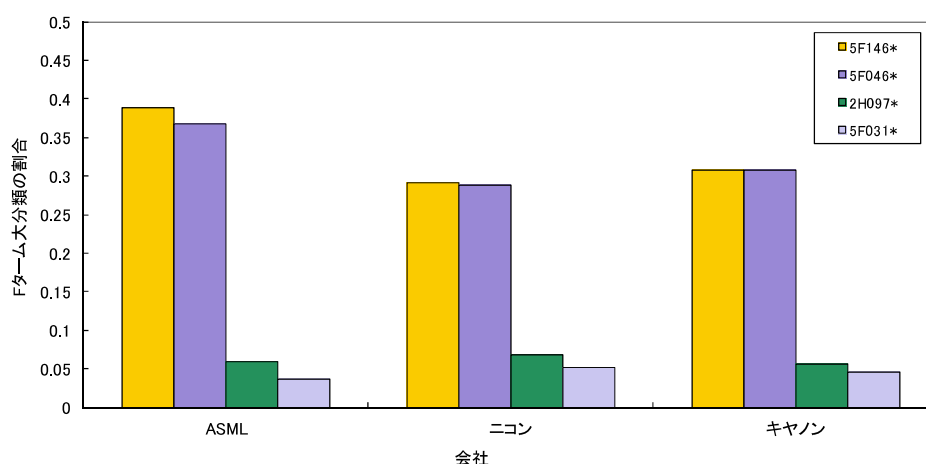


図 3.8 F ターム 5 桁ランキングマップ

表 3.1 ASML:F ターム 5 桁の割合

FT 5 桁 (大分類: 技術分野)	
FT	テーマコード
5F146	半導体の露光 (電子, イオン線露光を除く)
5F046	半導体の露光 (電子, イオン線露光を除く)
5F031	ウエハ等の容器, 移送, 固着, 位置決め等
2H097	ホトレジスト感材への露光・位置合せ

### 3.4.2 F ターム 7 桁: 中分類(観点)解析

図 3.9 に F ターム 7 桁の解析による各社のランキングマップを示す。図からわかるように ASML, ニコン及びキヤノンはいずれも, 技術分野, 5F146「半導体の露光(電子, イオン線露光を除く)」の中で観点 BA「紫外線, 光露光の種類」の出現頻度が最も高く, その傾向は各社とも一致している。また, 表 3.2 に得られた観点の上位 4 項目のコードを示す。

次に, 中分類の解析結果より技術分野 5F146「半導体の露光(電子, イオン線露光を除く)」の中で最も出現頻度が高かった観点は BA「紫外線, 光露光の種類」であった。続いて, 観点 BA の中で各メーカーが注目している技術内容について小分類解析を行った。

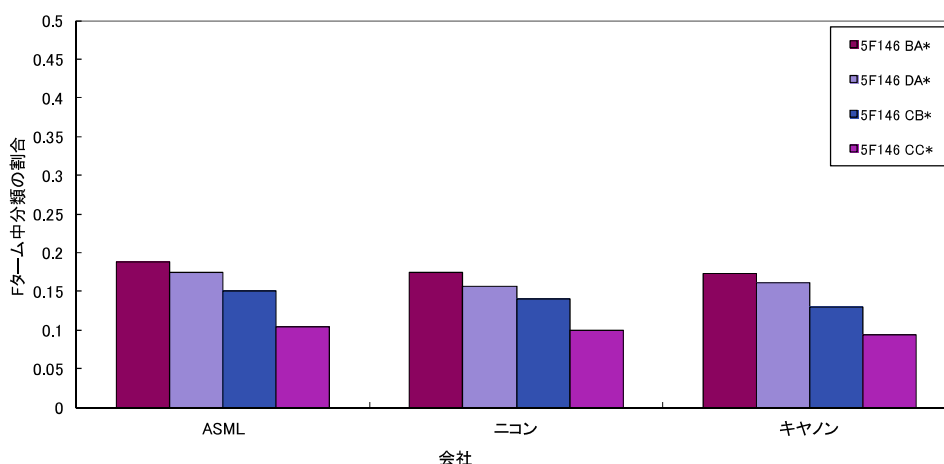


図 3.9 F ターム 7 桁ランキングマップ

表 3.2 F ターム 7 桁と観点

FT 7 桁 (中分類: 観点)	
FT	観点
5F146BA	紫外線, 光露光の種類
5F146DA	露光の制御, 調整の対象, 内容
5F146CB	光学系
5F146CC	ステージ, チャック機構, 及びそれらの動作

### 3.4.3 F ターム 9 桁:小分類(技術内容)解析

図 3.10 に F ターム 9 桁のランキングマップの解析結果を示す。また, 表 3.3 に得られた観点の上位 4 項目のコードを示す。これより, ニコン及びキヤノンはいずれも, 技術内容, BA0「投影露光」に次いで BA05「投影露光→走査型投影露光, 反射型投影露光」の出現頻度が高いが, ASML は技術内容, BA11「液浸露光」の出現頻度が最も高かった。このように, 解析深さを深くすることで, ようやく ASML, ニコン及びキヤノンの相違点を確認することができた。

以上の結果から, ASML は露光装置マーケットに大きな利益をもたらすツールとして液浸技術に最も注目しており, 技術内容の割合は 33.1%を占めているのに対しニコン及びキヤノンは投影露光技術に関する割合が最も高くなっている。また, 液浸露光はこれまでの先行研究により ASML の成功原因と考えられている技術である。

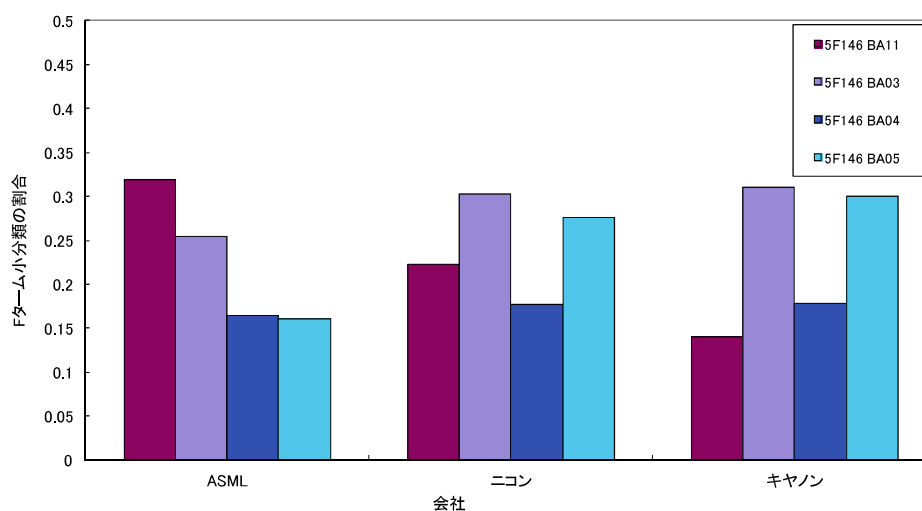


図 3.10 F ターム 9 桁ランキングマップ



表 3.3 F ターム 9 桁と技術内容

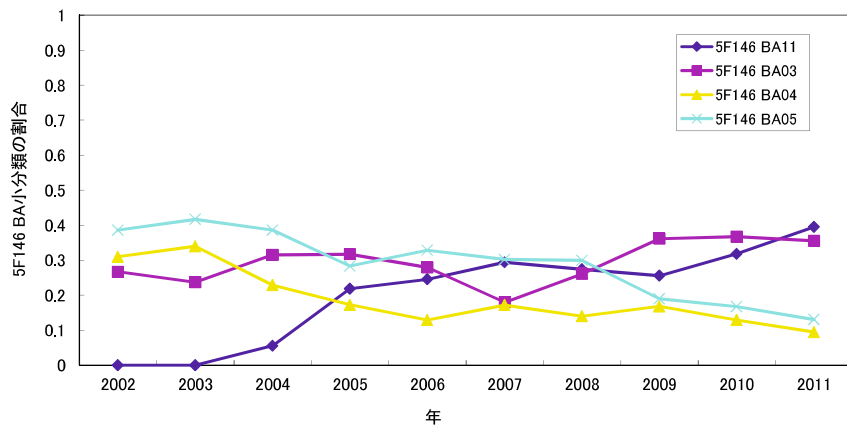
FT 全桁 (小分類: 技術内容)	
FT	技術内容
5F146BA11	・ 液浸露光
5F146BA03	・ 投影露光
5F146BA04	・ ・ 縮小投影露光
5F146BA05	・ ・ 走査型投影露光, 反射型投影露光

#### 3.4.4 時系列マップ分析

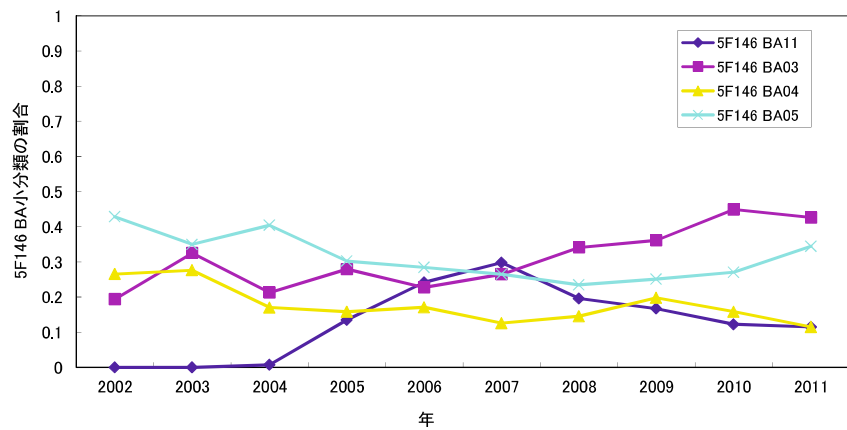
各社の露光方式技術に対する変動を詳細に検討するため時系列マップによる分析を行った。図 3.11(a), (b), (c)に各社の技術内容の変化を示す。縦軸に技術内容項目ごとの割合、横軸に2002年から2011年までの年度を示している。図 3.11(a)から、ニコンは2002年にはBA05「投影露光→走査型投影露光, 反射型投影露光」、BA04「縮小投影露光」、BA03「投影露光」の投影露光技術に対する割合が均等に高く、その後 BA05, BA03 はその割合を低下させているが BA03 については平均して高い割合となっている。また、BA11「液浸露光」については2005年に急激に増加した後、平均して高い割合となっている。

図 3.11(b)にキヤノンの分析結果を示す。図から BA03, BA05 に対する割合が高く、とくに BA03 については、割合が増加傾向にある。また、BA11 については、2007年をピークにその割合を低下させている。キヤノンは液浸露光よりローエンドのi線ステッパーに注目した結果だと考えられる。

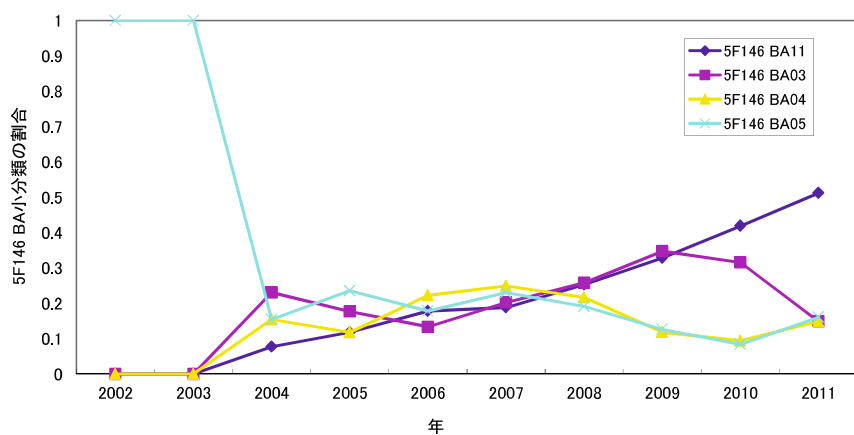
次に図 3.11(c)に示した ASLM は、2006年にはBA11, BA03, BA04, BA05 全ての割合がほぼ同一であったが、その後 BA03, BA11 は右肩上がりに割合を増加させたが、2009年以降はBA11のみ増加し、他の技術は全て低下している。とくに2011年にはBA11の割合が5割を超え他の技術は全て15%程度と低くなっている。その結果は液浸技術を適用した露光装置のシェアの拡大を図ることに結び付いたのではないかと考えられる。



(a) ニコン



(b) キヤノン



(c) ASLM

図 3.11 F ターム 9 桁(テーマコード:5F146; 観点:BA)の時系列マップ

表 3.4 F ターム 9 桁(テーマコード:5F146;観点:BA)

FT	技術内容(露光方式)
5F146BA03	・投影露光
5F146BA05	・走査型投影露光, 反射型投影露光
5F146BA04	・縮小投影露光
5F146BA11	・液浸露光
5F146BA07	・ビーム走査露光
5F146BA08	・干渉露光
5F146BA02	・プロキシミティ(近接)露光
5F146BA10	・その他*
5F146BA06	・パターンジェネレータ
5F146BA01	・密着露光
5F146BA09	・ホログラム露光

図 3.12 に各社の液浸露光装置の割合とシェアの推移を示す。各社の液浸露光の技術割合の変化とシェアの変化について、2006 年以降 ASML は BA11 の割合が継続的に増加しており、同時にシェアも増加している。次にニコンの変化を見ると平均的に BA11 は高い割合を維持した後 2010 年以降上昇傾向にあるが、ASML の増加と比較した場合上昇傾向に遅れが見られる。キヤノンは、2007 年のピーク以降、BA11 の低下とともにシェアの低下が見られる。以上のように各社の液浸露光技術 BA11 の変化とマーケットシェアの変化にはよい一致が見られる。

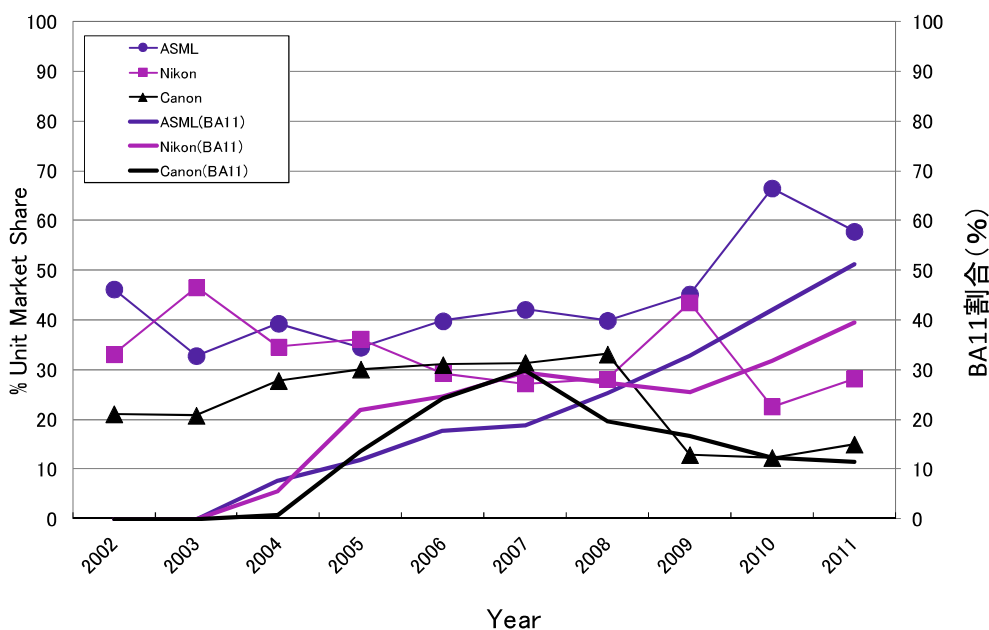


図 3.12 メーカー別世界シェアと液浸露光割合変化

以上のように、パテントマップにより各メーカーが注目している技術(ここでは、露光方式や液浸露光)の変動を分析することができる。F ターム小分類のランキングマップにより ASML が他のメーカーに比べ液浸露光を重視していること、メーカー別液浸露光の時系列マップより各メーカーが、現在、どのような露光技術の開発に積極的に取り組んでいるかをその件数及び割合から予測することができる。

### 3.4.5 ポートフォリオマップによる分析

テーマコード 5F146 「半導体の露光(電子、イオン線露光を除く)」の 小分類に対し、ポートフォリオマップによる分析を行った。ここで、ポートフォリオマップは縦軸が伸び、横軸が構成比を示している。伸びは基準期間分の対象期間の件数を対数で示し、出願件数(本研究では F ターム小分類の件数)が対象期間において基準期間に対する伸びの変化を表している。構成比は、ある技術分野に対し、その中に含んだ様々な技術内容の比率を表している。ポートフォリオマップは基準期間を 2002 年から 2005 年に設定し、対象期間を 2006 年から 2011 年とした。

図 3.13, 図 3.14, 図 3.15 に、それぞれニコン、キヤノン、ASLM のポートフォリオマップを示す。また、表 3.5, 表 3.6, 表 3.7 に各社のマップの F タームと項目の説明を示す。

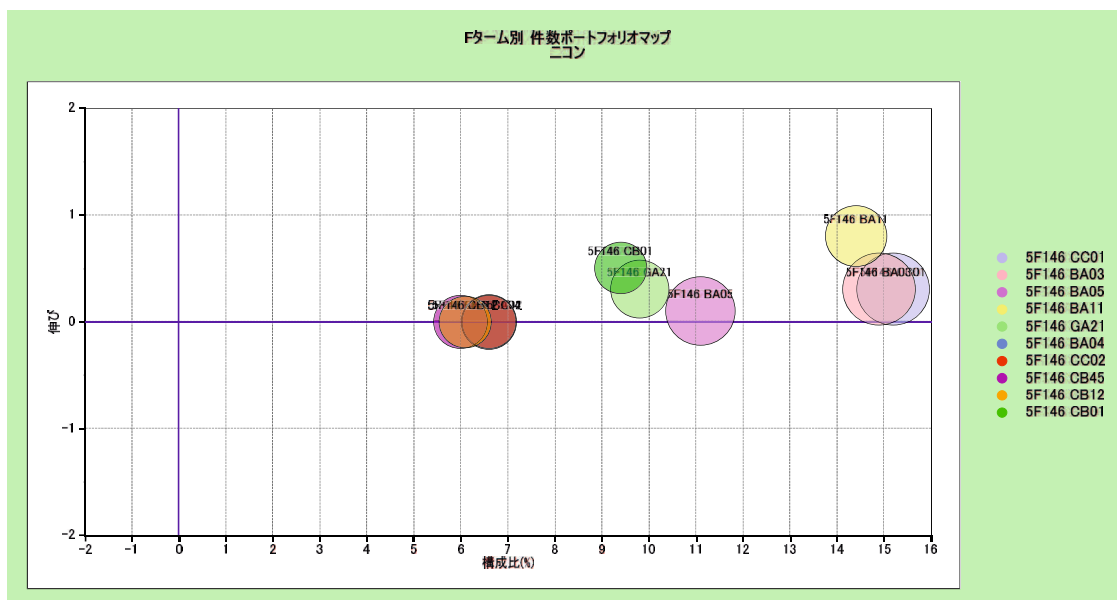


図 3.13 ニコン:F ターム 9 桁(テーマコード:5F146)のポートフォリオマップ

表 3.5 ニコン:F ターム番号とその説明

ニコン		
観点	5F146BA	紫外線, 光露光の種類
技術内容	5F146BA03	・投影露光
	5F146CC	ステージ, チャック機構, 及びそれらの動作
	5F146CC01	・ウエハステージ
	5F146BA	紫外線, 光露光の種類
	5F146BA03	・投影露光
	5F146BA05	・走査型投影露光, 反射型投影露光
	5F146BA	紫外線, 光露光の種類
	5F146BA11	・液浸露光
	5F146GA	X線露光, EUV露光
	5F146GA21	・露光波長がEUV
	5F146BA	紫外線, 光露光の種類
	5F146BA03	・投影露光
	5F146BA04	・縮小投影露光
	5F146CC	ステージ, チャック機構, 及びそれらの動作
	5F146CC02	・マスクステージ
	5F146CB	光学系
	5F146CB41	・光学系の位置
	5F146CB44	・マスク(レチクル)とウエハ間
	5F146CB45	・投影光学系
	5F146CB	光学系
	5F146CB01	・光学系要素
	5F146CB12	・レンズ
	5F146CB	光学系
	5F146CB01	・光学系要素

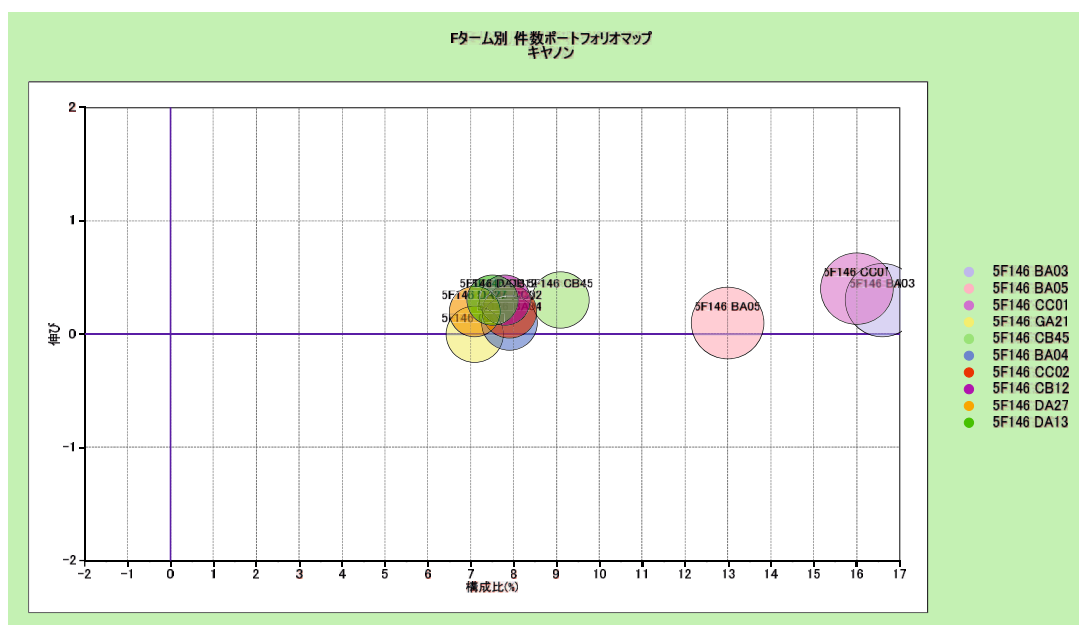


図 3.14 キヤノン:F ターム 9 桁(テーマコード:5F146)のポートフォリオマップ

表 3.6 キヤノン:F ターム番号とその説明

canon		
観点	5F146BA	紫外線, 光露光の種類
技術内容	5F146BA03	▪ 投影露光
	5F146BA	紫外線, 光露光の種類
	5F146BA03	▪ 投影露光
	5F146BA05	▪ 走査型投影露光, 反射型投影露光
	5F146CC	ステージ, チャック機構, 及びそれらの動作
	5F146CC01	▪ ウェハステージ
	5F146GA00	X線露光, EUV露光
	5F146GA21	▪ 露光波長がEUV
	5F146CB	光学系
	5F146CB41	▪ 光学系の位置
	5F146CB44	▪ マスク(レチクル)とウェハ間
	5F146CB45	▪ 投影光学系
	5F146BA	紫外線, 光露光の種類
	5F146BA03	▪ 投影露光
	5F146BA04	▪ 縮小投影露光
	5F146CC	ステージ, チャック機構, 及びそれらの動作
	5F146CC02	▪ マスクステージ
	5F146DA	露光の制御, 調整の対象, 内容
	5F146DA27	▪ 圧力, 雰囲気
	5F146CB	光学系
	5F146CB01	▪ 光学系要素
	5F146CB12	▪ レンズ
	5F146DA	露光の制御, 調整の対象, 内容
	5F146DA11	▪ 投影露光
	5F146DA12	▪ 投影光学系
	5F146DA13	▪ 倍率, 光路長, 歪

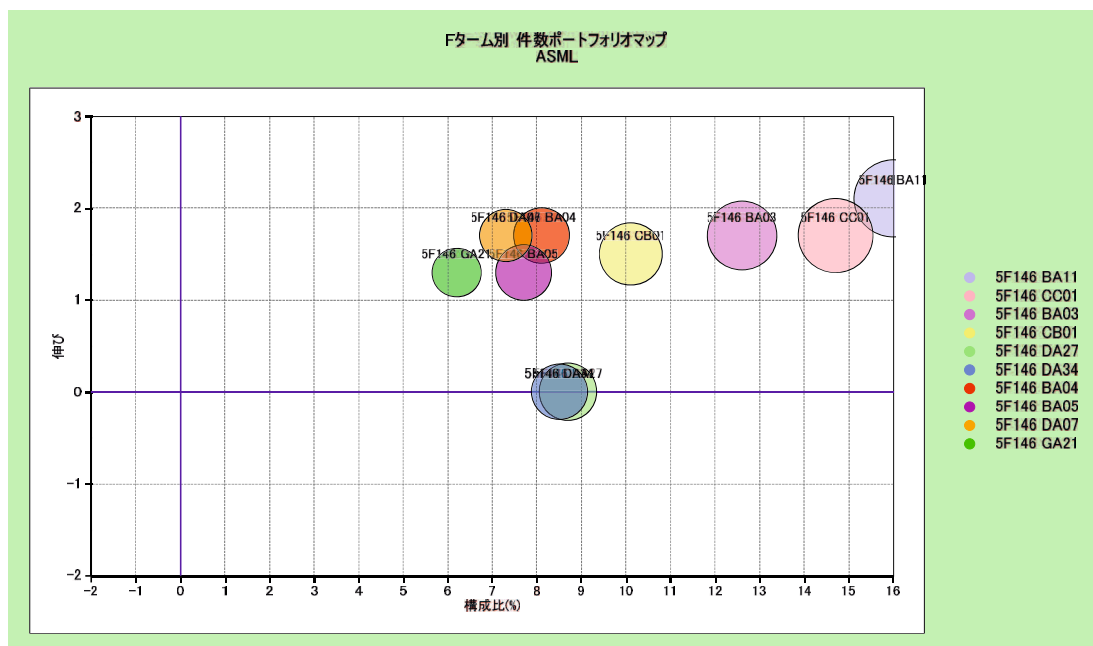


図 3.15 ASML:F ターム 9 桁(テーマコード:5F146)のポートフォリオマップ

表 3.7 ASML:F ターム番号とその説明

ASML		
観点	5F146BA	紫外線, 光露光の種類
技術内容	5F146BA11	・液浸露光
	5F146CC	ステージ, チャック機構, 及びそれらの動作
	5F146CC01	・ウェハステージ
	5F146BA	紫外線, 光露光の種類
	5F146BA03	・投影露光
	5F146CB	光学系
	5F146CB01	・光学系要素
	5F146DA	露光の制御, 調整の対象, 内容
	5F146DA34	・液浸露光装置の性能維持
	5F146BA	紫外線, 光露光の種類
	5F146BA03	・投影露光
	5F146BA04	・縮小投影露光
	5F146BA	紫外線, 光露光の種類
	5F146BA03	・投影露光
	5F146BA05	・走査型投影露光, 反射型投影露光
	5F146DA	露光の制御, 調整の対象, 内容
	5F146DA27	・圧力, 雰囲気
	5F146DA	露光の制御, 調整の対象, 内容
	5F146DA07	・ウェハ又はウェハ近傍
	5F146GA	X線露光, EUV露光
	5F146GA21	・露光波長がEUV

図 3.13 及び図 3.15 から、ニコンは ASML と同様、BA11(液浸露光方式)の構成比が一番高いことが分かるが、伸びが ASML に比べて低く、さらに全体的に ASML に比べ F ターム小分類の全体的な伸びがあまり高くない。このことから、ASLM と比べ開発の進展が低いことを意味する。

図 3.14 に示すように、BA03(投影露光)の露光方式が第一位の構成比を占め、全体的の伸びはニコンと同様に大きくない。さらに、負の伸びが多く技術の開発活動が減少傾向にあると思われる。

図 3.15 から分かるように、ASML の F ターム小分類中、BA11(液浸露光)は構成比が 16.3%、F ターム小分類の中で一番高く、伸びが正の 1 以上となっている。また、伸びが最も大きい F タームの小分類観点 DA(露光の制御, 調整の対象, 内容)は DA34(液浸露光装置の性能維持)であり、伸びが $\infty$ である。それは基準期間には件数がないが対象期間には出願件数が存在するのが原因である。マップ上では 0 軸に示したが、これはソフトの制限問題である。ASML のポートフォリオマップは、全て F タームの小分類の伸びが 1 以上であり、基準期間に対し ASML の開発が活発であることを意味する。また、構成比の高い BA11(液浸露光)や伸びが最も高い DA34(液浸露光装置の性能維持)は ASML が液浸露光方式とそれに関連する技術に注目し開発を拡大しつつあることを示している。

以上の結果から、各メーカーの相違点及び特徴を整理すると ASML は液浸露光とそれに関連する技術に注目し、多くの F タームの小分類が正の伸びを示し、活発に開発活動が進められている。一方、ニコン及びキヤノンは伸びがあまり大きくなく、同時に負の伸びも存在し、開発活動が ASML に比べあまり活発ではないことが予想される。この結果からも、各社の注目した技術の開発活動の状況が、各会社のマーケットシェアに影響を及ぼす要因の一つだと考えられる。



### 3.5 まとめ

特許検索システムとパテントマッピングソフトを組み合わせた特許分析システムを用いて、半導体製造用露光装置の技術変化が市場に与える影響について、技術動向分析を行った。その結果、以下の結論を得た。

- 1) F タームの階層深さ別の解析より、階層が深いほど、分類が細かくなり各技術分野に対する様々な内容を具体的に分析することができる。本研究において、F タームの階層深さを大分類解析から中分類まで解析した場合、ASML、ニコン及びキヤノンは、技術分野(半導体露光)の露光種の観点に注目していることが分かる。さらに小分類まで解析すると、ASML がニコン及びキヤノンより、液浸露光に最も注目しているという実態が明らかとなった。すなわち、分類数が細かいほど、それぞれの会社の特徴及び相違点を見出す確立が高くなることが分かる。
- 2) F タームの階層の深さ別の解析より、ASML の特徴が液浸露光であることが分かり、それが経済的調査から求められたシェアの内容とよく一致している。
- 3) パテントマップにより各メーカーが注目している技術(ここでは、露光方式や液浸露光)の変動を分析することができる。F ターム小分類のランキングマップより、ASML が他のメーカーに比べ液浸露光を重視していること、メーカー別液浸露光の時系列マップより、各メーカーが、現在どのような露光技術の開発を積極的に取り組んでいるかをその件数及び割合から予測することが可能である。
- 4) ASML、ニコン及びキヤノンのポートフォリオマップより、各メーカーの相違点及び特徴を整理すると、ASML は液浸露光とそれに関連する技術に注目し、多くの F タームの小分類が正の伸びを示し、活発に開発活動が進められていることが分かった。一方、ニコン及びキヤノンは伸びがあまり大きくなく、同時に負の伸びも存在し、開発活動が ASML に比べあまり活発ではないことが予想される。この結果からも、各社の注目した技術の開発活動の状況が、各会社のマーケットシェアに影響を及ぼす要因の一つだと考えられる。
- 5) 本研究で行ったパテントマップ分析は、マーケットシェアの調査レポートとよい一致を示した。よって本研究で用いた特許分析システムは、特許情報は技術動向や技術分析から、自社や競合他社との研究戦略及び方向性を明らかにするための有効な解析ツールであるといえる。

## 第4章 モノづくり会社に於けるコア技術の明確化とコア技術の中核とした製品開発に関する考察

### 4.1 はじめに

コア技術の重要性について延岡[46]は日本の製造企業が苦悩している最大の問題は、「モノづくり」が上手くできても、大きな売上や利益を結びつけることができず「価値づくり」ができていないことと指摘している。製品は顧客要求に基づき新たな価値を提案するための「こと」を達成する手段であるが、その製品価値を達成するためにコアとなる技術が存在する。そこで、製品開発プロセスの実証評価から製品のコア技術を明確化するための分析手法とモノづくり製品開発・設計プロセスを研究した。

### 4.2 コア技術の重要性について

#### 4.2.1 コア技術

延岡[46]の研究では、日本を代表する製造企業4社において、119の成功している技術进行分析している。延岡の研究では、119の成功技術の中で、特に企業の売上と利益に貢献した42の技術に着目し、革新技术と積み重ね技術に分類、比較している(表4.1)。

表 4.1 革新技术と積み重ね技術の競争優位性への貢献比較

		積み重ね技術		合計
		貢献:高	貢献:低	
革新技术 (特許)	貢献:高	5 ( 12%)	1 ( 2%)	6 ( 14%)
	貢献:低	27 ( 64%)	9 ( 22%)	36 ( 86%)
合計		32 ( 76%)	10 ( 24%)	42 (100%)

注:各項目、以下の2つの質問を5点満点で評価し、平均が4点以上の場合に、貢献度合いが高いと判断。

積み重ね技術:「組織として長年蓄積してきたノウハウやスキル」「長年の試行錯誤によって得た経験知」

革新技术(特許):「業界で最先端の技術」「特許を保有」

表 4.1 から、革新技术(特許)よりも積み重ね技術の方が、貢献度が高いことが分かる。持続

的に価値づくりを行うためには、長年にわたり競争力が維持されなくてはならない。近年において、技術変化が速くなっているが、延岡は、この点においても、積み重ね技術の重要性を主張している。それは、ある分野で革新技術が開発できても、技術変化が速ければ、その重要性が低下するのも速いこと、革新技術(特許)が市場競争において有効に働く期間が短くなることを理由に挙げている。一方で、積み重ね技術は、問題解決能力の蓄積であり、特定の技術に限定される革新技術(特許)よりも応用範囲が広いと主張している。

また、延岡は積み重ね技術をコア技術とも呼んでおり、コア技術を企業が戦略的に多くの商品に横展開して活用する「コア技術戦略」を提唱している。

さらに、延岡[138]は、差別化の源泉を商品と組織能力に分け、図 4.1 に示した枠組みで説明している。

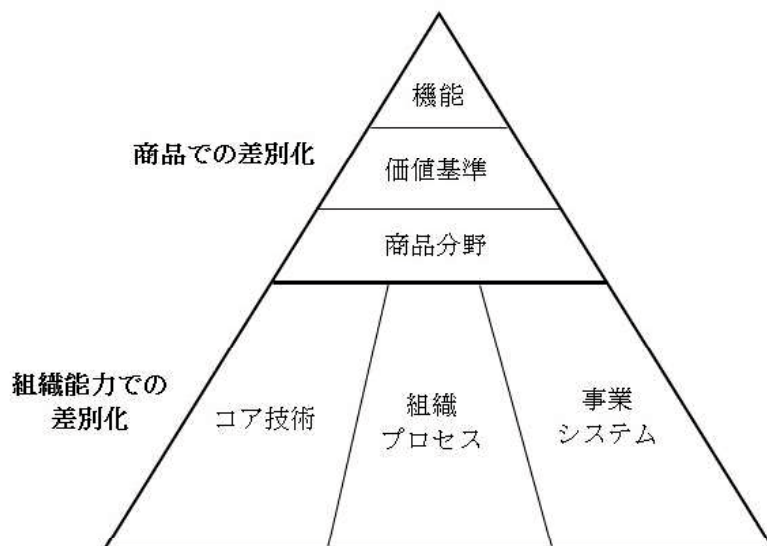


図 4.1 差別化の源泉

商品での差別化は、競合企業に模倣されることが速く、組織能力での差別化を実現することの重要性が増していると述べている。「組織能力」とは、企業が固有に持つ有形無形の資源と、それを活用する能力やプロセスである。コア技術に関する組織能力に着目すると、競合企業に模倣できない技術があれば、独自の優位性を持つことができると主張している。また、コア技術はある分野に集中しつつも、その集中のリスクを緩和するために、技術を多様な商品に応用することができるため、持続的な企業の発展に大きく貢献すると述べられている。

また、織畑[64]は、企業が継続して存続し、成長を遂げる条件の1つとして、競争相手に真似されない、あるいは競争相手に容易に追従されない製品の競争障壁が構築されなければならないことを挙げ、その主たる役割を技術が担っていると主張している。池島[65]は、中小企業が成長していくためには、蓄積した技術力を有効に活用しながら戦略展開することの

重要性を主張している。そのためには、自社の保有する技術力を整理し、競争企業と差別化するうえで、どの技術が最も有効であるか、さらには競争企業になかなか真似られない技術、すなわちキーテクノロジーを見極めることが重要と述べている。

以上のように、コア技術やキーテクノロジーなど、使用している単語に多少の違いはあるが、企業が持続的に成長するためには、競争優位性に貢献することができる、他社に模倣されない技術を保有することが重要であることは共通している。また、まずは自社の保有する技術の中で、どの技術が最も重要な技術(コア技術)であるのかを明確にする必要がある。

#### 4.2.2 製品のライフサイクルについて

近年、製品のライフサイクルが短縮化されている。2016年の経済産業省の調査[139]によると、2005年と2015年を比較したところ、全ての業種において「長くなっている」より「短くなっている」企業の方が多いという結果となっている(図4.2)。

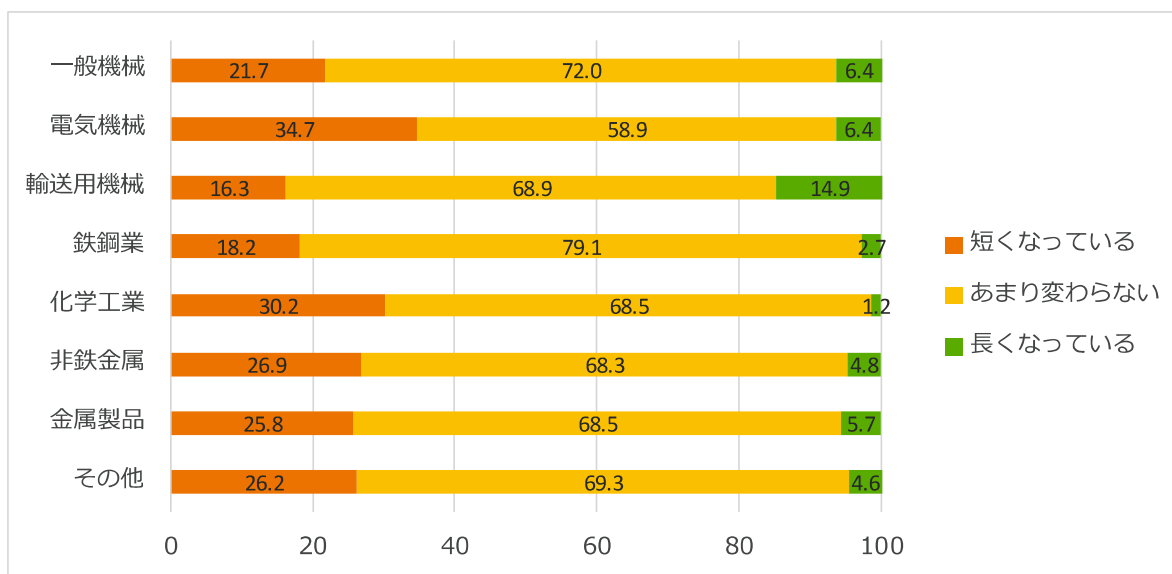


図 4.2 10年前の製品ライフサイクルとの比較結果(2015年調査)より著者作成

モノづくり会社において、短縮化の傾向があるライフサイクルに対応するためには、自社のコア技術を理解し、コア技術を中心としたモノづくりを行うことで、限りある経営資源を効率的に活用することが求められる。ここで述べるコア技術は、『自社開発製品に対して顧客が喜んでいる「機能」の中で、その機能を達成するために中心的な役割を果たしている「技術』』のことを指す。

### 4.3 コア技術の明確化方法の検討

#### 4.3.1 ピーエムティーのコア技術の明確化手順

ピーエムティーは、1991年に日本で創業したモノづくり会社である。創業当初、同社は半導体製造装置の総合商社だった。現在は半導体製造装置や加工機、インクジェット装置などの装置開発を行っている。同社は商社として創業したこともあり、技術を保有していなかった。そこで、外部企業と連携し、装置開発を行い、徐々に同社の技術として保有していった。従来の同社の製品開発プロセスを図4.3に示す。

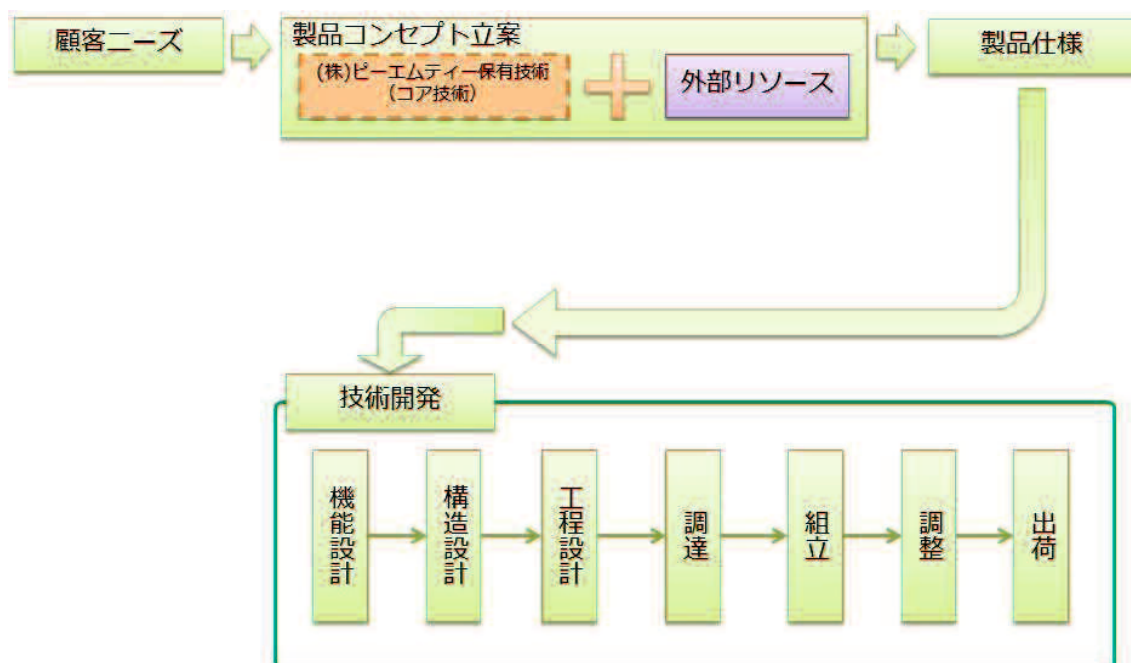


図 4.3 従来のピーエムティーの製品開発プロセス

<従来のピーエムティーの製品開発プロセス>

- ① 営業グループが主体となり、顧客の要求を聞き出す。
- ② 同社保有技術と外部のリソース(既に確立された技術)を組み合わせ、顧客の要求に応える製品のコンセプトを立案する。
- ③ 製品コンセプトを基に製品仕様値を決定する。
- ④ 製品仕様値を達成するための技術開発を行い、製品化する。

上記の流れで製品開発を行っているが、納期の遅延や工数の予定と実績に差が生じるなど、機会損失が発生している。図 4.4 に同社で行われた装置開発の機会損失を示す。この事例では、予定した開発工数 1,970 時間に対し、実際の実績は 3,195 時間(約 62%超過)であった。機会損失が発生した主要因として、同社のコア技術を理解していないことが挙げられた。

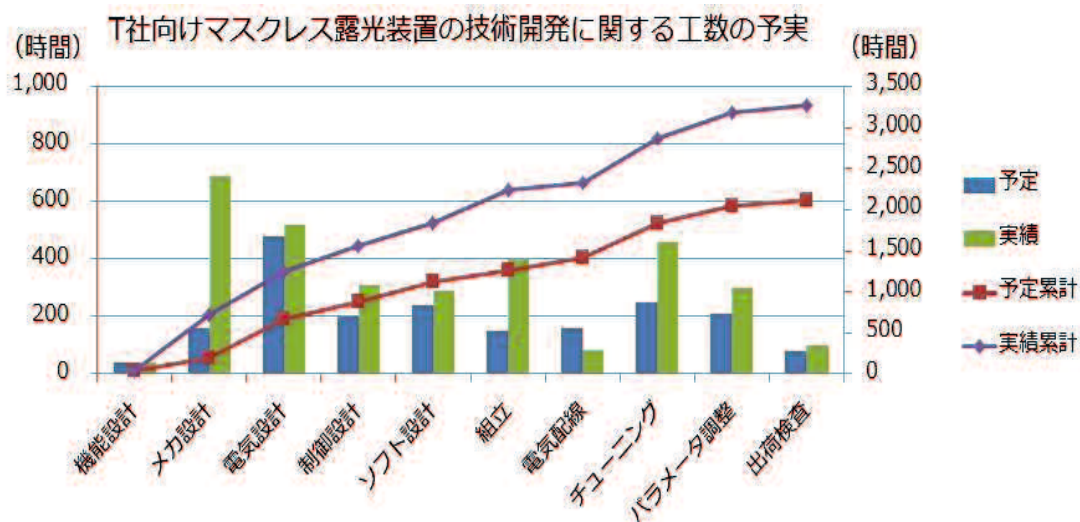


図 4.4 装置開発における機会損失の事例

そこで、同社のコア技術を理解し、コア技術を中心とした製品開発を行えば、機会損失が減少するという仮説を立てた。このことから、まずは同社のコア技術を明確にすることが必要であると考え、その方法について事前調査を行った。その結果、石尾ら[140]が自社開発製品に対して顧客が喜んでいることと、製品の機能を付け合せて評価するという手順を提案していることが分かった。しかし、評価項目については議論されているが、詳細な評価方法が議論されていない。

ここで、石尾らの提案しているコア技術の明確化手順を示す(図 4.5)。

<石尾らの提案しているコア技術の明確化手順>

- ① 顧客が対象製品を使用することで、どのような有益なこと(便益性)があるかを抽出する。
- ② 対象製品をモジュール単位、部品、原料などに分解し、製品自体、又は部品などが保持する機能を抽出する。
- ③ ①と②を組み合わせ一覧表を作成し、見える化を行うことで、要素技術を整理する。
- ④ 整理した要素技術に対して、顧客満足度調査、他社製品比較、独自性などを評価し、コア技術を選定する。

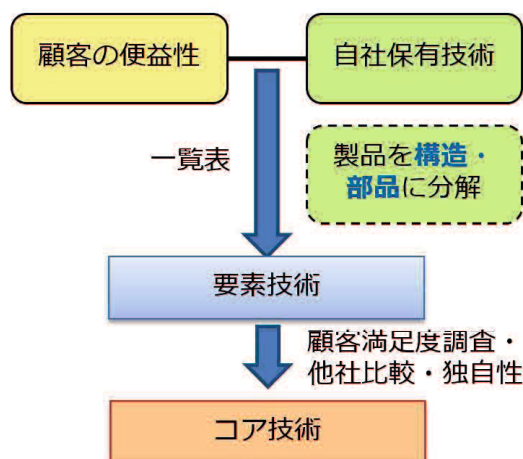


図 4.5 石尾らが提案しているコア技術の明確化手順

石尾らの研究によって、同社のコア技術を選定する手順については明らかになったが、具体的な方法について詳細が述べられていなかった。

ここで、上記の手順は、顧客にとって有益なこと(=顧客の要求)と製品・部品の機能(=専門的な技術)との関連性を明確にし、顧客満足度などの評価(=重要度の算出)を行うことによって、コア技術を導き出している。これは QFD の手法と同様であると考えた。

QFD については、概要や進め方などについて具体的に説明された書籍[141]-[144]も販売されており、製品やサービス等様々な応用事例[145], [146]も発表されている。よって、本研究では QFD の手法を参考にし、同社のコア技術を評価し、明確にすることとした。

#### 4.3.2 品質機能展開(QFD)

QFD とは、顧客のニーズ(要求品質)を専門的な技術(品質要素)に結びつけることで、どのニーズに応え、どの技術を開発するかなどを決定する作業である(図 4.6)[140]。

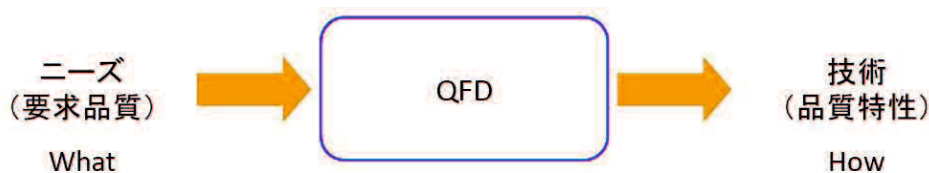


図 4.6 QFD の概要

また、赤尾[142] は QFD について、品質展開(QD)と狭義の品質機能展開(QFD)に分けて以下のように説明している。

<品質機能展開(QD)の定義>

ユーザーの要求を代用特性(品質特性)に変換し、完成品の設計品質を定め、これを各種機能部品の品質、さらに個々の部品の品質や工程の要素に至るまで、これらの間の関係を系統的に展開していくこと。

<狭義の品質機能展開(QFD)の定義>

品質を形成する職能ないし業務を目的手段の系列でステップ別に細部に展開していくこと。

赤尾は、実際には QD として行われているものが QFD と呼称されており、QD と QFD が同義語として扱われているが、厳密な QFD は QD と狭義の品質機能展開(QFD)の双方を行うことである、と指摘している。

すなわち、QFD は顧客のニーズを専門的な技術と結びつけることによって、顧客のニーズと関連性の高い要素技術を明確にし、設計品質を行っていくための手法である。本研究では「顧客のニーズを専門的な技術と結びつける」という QFD の特徴に着目し、同社のコア技術を明確にする手法として用いる。

### 4.3.3 QFD の進め方

次に、QFD の具体的な進め方を検討する。QFD の進め方は目的や対象製品の違いによって異なり、明確に定められていない。ここで、瀧田ら[145]がロケットターボポンプ用タービンの設計技術の獲得を目的とし、その達成手段として QFD を応用していることが明らかになった。

瀧田らは、ロケットターボポンプ用タービンが製造台数も少なく、用途も限定されるため、大量生産品のように一般消費者を対象にすることは難しいため、ロケットエンジンやロケット機体、それらの開発・製造工程に携わる全ての関係者がユーザーであると考え、ロケットエンジン関係者を“市場”と定義している。また、その市場の要求を機能・機構・部品に発展させながら結びつけることで、重要機構に関する部品(=重要部品)を導き出している。

ピーエムティーでは顧客の要求に合わせて製品コンセプトを立案しており、一品物の製品開発が主体で、量産の経験がほとんどない。また、納品済みのお客様にヒアリング調査を実施するのは期間やリソースの問題で難しいため、市場の定義について瀧田らの手順が参考になると考えた。さらに、QFD の対象とする製品が瀧田らは「新規開発する製品」、本研究では「開発済みの製品」と異なるが、「顧客が喜ぶ技術の選定」という目的は非常に酷似している。

よって、本研究では、石尾らが提案する同社のコア技術の選定方法として、瀧田らの手順を



参考にし、QFDを実施する。

<瀧田らの研究>

目的：重要設計パラメータ(顧客が喜ぶであろう技術)の選定

手段：市場の要求と機能・機構・部品を結びつける

対象：新規開発する製品

<本研究>

目的：ピーエムティーのコア技術(顧客が喜んでいる技術)の選定

手段：市場の要求と機能・部品を結びつける

対象：開発済みの製品

続いて、瀧田らが実施したQFDの検討の流れを下記に示す。

**【1】品質重要度の算出**

- ① 市場の定義
- ② 要求品質の抽出
- ③ 要求品質展開表の作成(②のまとめ)
- ④ 要求品質重要度の設定(AHPを採用)
- ⑤ 品質要素の抽出
- ⑥ 品質要素展開表の作成(⑤のまとめ)
- ⑦ 品質表の作成(③と⑥のマトリクス)
- ⑧ 要求品質と品質要素の重み付け(◎○△による関連付け)
- ⑨ 品質要素重要度の算出(独立配点法を採用)

**【2】品質重要度からの技術展開**

- ⑩ 機能展開表の作成
- ⑪ 品質要素 — 機能展開表の作成(⑥と⑩のマトリクス)
- ⑫ 機能重要度の算出
- ⑬ 機構展開表の作成
- ⑭ 機能 — 機構展開表の作成(⑩と⑬のマトリクス)
- ⑮ 機構重要度の算出

**【3】設計パラメータの決定と重要度の算出**

- ⑯ 部品展開図の作成(⑮との関連性を確認)
- ⑰ 重要機構に関する部品(=重要部品)の絞り込み(⑮と⑯を整理して決定)
- ⑱ 重要部品に対する設計パラメータ展開表の作成(⑰を構成する設計パラメータの形に

整理)

- ⑱ 機構 — 設計パラメータ展開表の作成
- ⑳ 設計パラメータ重要度の算出

QFD を進める中で、顧客のニーズを要求品質項目として洗い出し、評価(点数付)を行う必要がある。本来であれば顧客に直接評価して頂くことが望ましいが、顧客に直接聞き出すことが困難な場合は、階層分析法(以下、AHP)が有効とされている[142] ことが明らかになった。瀧田らの研究でも要求品質項目の評価に AHP を用いている。AHP についての調査結果は次節に示す。

#### 4.3.4 階層分析法(AHP)

AHP (Analytic Hierarchy Process) [147], [148] は不確実な状況や多様な評価基準における意思決定手法として、1971 年にピッツバーグ大学のトーマス・L・サーティ教授によって提唱された手法である。問題の分析において、主観的判断とシステムアプローチを上手くミックスした問題解決型意思決定手法の 1 つとされている。表 4.2 に示すような評価尺度を用い、複数の階層構造をもつ項目の中から、一対比較することによって各項目の重要を把握する。一対比較を行う際には表 4.3 のような一覧表を作成する。

表 4.2 評価尺度

評価尺度	
絶対的に重要	9
かなり重要	7
重要	5
少し重要	3
同じ	1
少し重要でない	1/3
重要でない	1/5
かなり重要でない	1/7
全く重要でない	1/9
補完的に用いる数値 “2、4、6、8”	

表 4.3 一覧表の例

	美味しさ	費用	満腹感
美味しさ			
費用			
満腹感			

<AHP の進め方の例>

評価基準を「美味しさ」、「費用」、「満腹感」とし、複数ある代替案(飲食店, 又は食べ物)の中から一つを選択する場合を例として説明する.

1. 各基準項目の一対比較表を作成する(表 4.3).
2. 評価尺度(表 4.2)を用い, 任意の2項目を比較する.
  - 2-1. 「美味しさ」を基準に「美味しさ」と比較する. この場合, 項目が同じなので評価尺度の「同じ」である“1”を記入する(表 4.4).

表 4.4 手順 2-1 の説明例

	美味しさ	費用	満腹感
美味しさ (基準)	↓ 1 →		
費用			
満腹感			

- 2-2. 「美味しさ」を基準に「費用」と比較する. 例では「美味しさ」の方が「費用」に比べて「重要」とであると判断し, “5”を記入する(表 4.5).

表 4.5 手順 2-2 の説明例

	美味しさ	費用	満腹感
美味しさ (基準)	1 →	↓ 5	
費用			
満腹感			

2-3. 一対比較なので、2-2で比較した基準の逆(「費用」を基準に「美味しさ」と比較した結果)には、逆数の“1/5”を機械的に記入する(表 4.6).

表 4.6 手順 2-3 の説明例

	美味しさ	費用	満腹感
美味しさ (基準)	1	5	
費用	1/5		
満腹感			

機械的に逆数を入力する。

2-4. 順番に一対比較を行い、一覧表を埋めていく(表 4.7).

表 4.7 手順 2-4 の説明例

	美味しさ	費用	満腹感
美味しさ	1	5	1/3
費用	1/5	1	1/7
満腹感	3	7	1

※ 表 4.7 の灰色で示した部分は再評価せず、機械的に記入したことを示す。

3. 各項目の重要度を算出する.

ここで、各項目の重要度を算出する仮定を下記に示す.

- ・目的からみた基準、各基準からみた代替案には、それぞれ意思決定者の主観による「重み」がある.
- ・一対比較値はそれら「重み」の比で決まる.

また、算出方法として、幾何平均法と固有値法の2種類ある.

■幾何平均法

一対比較値の平均値を重みとし、電卓でも簡単に計算できる簡易的な方法. 固有値法と比較すると精度は劣るが、直感的に理解するためには十分な近似値を得ることができる. また、AHPの一対比較値は、「項目 A と項目 B を比べて、どちらがどれくらいよいか」を問う。「どれくらいか」の「少し」や「かなり」は、何倍よいかを表す. よって、一対比較値は、何倍よいかという「比」を表しているため、その平均値は幾何平均を用いて算出する.

■固有値法

固有値法は、一対比較行列の固有値と固有ベクトルを求め、固有ベクトルを重みとする方法で、最良の推定法とされている。

ここでは、幾何平均法で算出した例を示す(表 4.8)。

表 4.8 手順 3 の説明例(幾何平均法での重要度算出)

	美味しさ	費用	満腹感	幾何平均	重要度
美味しさ	1	5	1/3	$\sqrt[3]{1 \times 5 \times 1/3}$ = 1.19	1.19 / 4.26 = 0.28
費用	1/5	1	1/7	$\sqrt[3]{1/5 \times 1 \times 1/7}$ = 0.31	0.31 / 4.26 = 0.07
満腹感	3	7	1	$\sqrt[3]{3 \times 7 \times 1}$ = 2.76	2.76 / 4.26 = 0.65

幾何平均の合計 4.26

以上より、例では「美味しさ」、「費用」、「満腹感」という評価基準の中で、「満腹感」の重要度が最も高いことが分かる。

続いて、代替案(複数の飲食店、又は食べ物)に対し、「美味しさ」、「費用」、「満腹感」を評価していく。ここでは、「肉まん」、「うどん」、「チョコレートパフェ」、「ポテトチップス」を代替案の例として考える。各評価基準別に 1 つ 1 つの代替案を一対比較して評価する。一対比較表の作成方法、評価尺度、数値の入力方法は評価基準を対象として評価したものと同様である。各評価基準別に代替案を一対比較した結果の例を以下に示す(表 4.9)。

表 4.9 各評価基準別の代替案の対比較結果のまとめ

**美味しさ** に対する一対比較

	肉まん	うどん	チョコレート	ホットケーキ	幾何平均	重要度
肉まん	1	5	1/3	3	1.50	0.26
うどん	1/5	1	1/7	1/3	0.31	0.06
チョコレート	3	7	1	5	3.20	<b>0.56</b>
ホットケーキ	1/3	3	1/5	1	0.67	0.12

**費用** に対する一対比較

	肉まん	うどん	チョコレート	ホットケーキ	幾何平均	重要度
肉まん	1	3	5	1/3	1.50	0.26
うどん	1/3	1	3	1/5	0.67	0.12
チョコレート	1/5	1/3	1	1/7	0.31	0.06
ホットケーキ	3	5	7	1	3.20	<b>0.56</b>

**満腹感** に対する一対比較

	肉まん	うどん	チョコレート	ホットケーキ	幾何平均	重要度
肉まん	1	1/3	3	5	1.50	0.27
うどん	3	1	3	7	2.82	<b>0.52</b>
チョコレート	1/3	1/3	1	5	0.86	0.16
ホットケーキ	1/5	1/7	1/5	1	0.27	0.05

最後に、表 4.9 で示した結果をまとめ、総合評価する。表 4.10 のような一覧表を作成し、評価基準の一対比較結果(重要度)と評価基準毎の代替案の一対比較結果(重要度)を乗算する。代替案の行の数値を足し合わせたものが総合得点となる。

表 4.10 総合評価の例

	美味しさ 0.28	費用 0.07	満腹感 0.65	総合得点
肉まん	$0.26 \times 0.28 = \mathbf{0.07}$	$0.26 \times 0.07 = \mathbf{0.02}$	$0.27 \times 0.65 = \mathbf{0.18}$	0.27
うどん	$0.06 \times 0.28 = \mathbf{0.02}$	$0.12 \times 0.07 = \mathbf{0.01}$	$0.52 \times 0.65 = \mathbf{0.34}$	<b>0.36</b>
チョコレート	$0.56 \times 0.28 = \mathbf{0.16}$	$0.06 \times 0.07 = \mathbf{0.00}$	$0.16 \times 0.65 = \mathbf{0.10}$	0.26
ホットケーキ	$0.12 \times 0.28 = \mathbf{0.03}$	$0.56 \times 0.07 = \mathbf{0.04}$	$0.05 \times 0.65 = \mathbf{0.03}$	0.11

この結果から、評価基準は「満腹感」の重要度が最も高く、代替案として「うどん」が最適であることが分かる。

ここで、刀根[147]はAHPの評価において、一対比較の対象となる要素数が多くなり過ぎると、評価が難しくなると指摘している。理由として、一対比較は2つの要素間で行うが、全体的なスケールで物を見ながら実行しなければならないためと述べている。具体的には要素数が7個を超えると評価が難しくなるため、なるべく7個以下に、多くても9個までに留めるよう工夫することが必要とされている。

また、AHPを活用して重要度を計算する際、同一階層における評価基準の個数の差が影響を与えることが指摘されているが、岡村[148]がその指摘を解消するための一案を提案している。それは、ある係数を各重要度に掛けることによって、同一階層での評価基準の個数を見かけ上、同一にするものである。尚、係数は、同一階層における最小個数を分母とし、同一階層で重要度を計算しようとしている個数を分子とすることで求める(式4.1)。

$$\text{係数} = \frac{\text{同一階層で重要度を計算しようとしている項目数}}{\text{同一階層における最小項目数}} \quad (4.1)$$

顧客の要求と製品の機能を付け合わせる手順は、品質機能展開(以下、QFD)[141]-[146]と同様であると考えられる。QFDは顧客の要求を達成するための専門的技術に結び付け、設計品質を実現する手法である。本研究では、QFDの顧客の要求と専門的技術を結びつけるという特徴に着目し、QFDを用いてピーエムティーのコア技術を明確にする方法を考察する。尚、考察には、同社が開発を行っているマスクレス露光装置、卓上型小型NC微細加工機、オンデマンドインクジェット装置の3製品を対象とする。

## 4.4 コア技術の明確化

### 4.4.1 コア技術の明確化手順

モノづくり会社におけるコア技術の明確化手順を図 4.7 に示す。

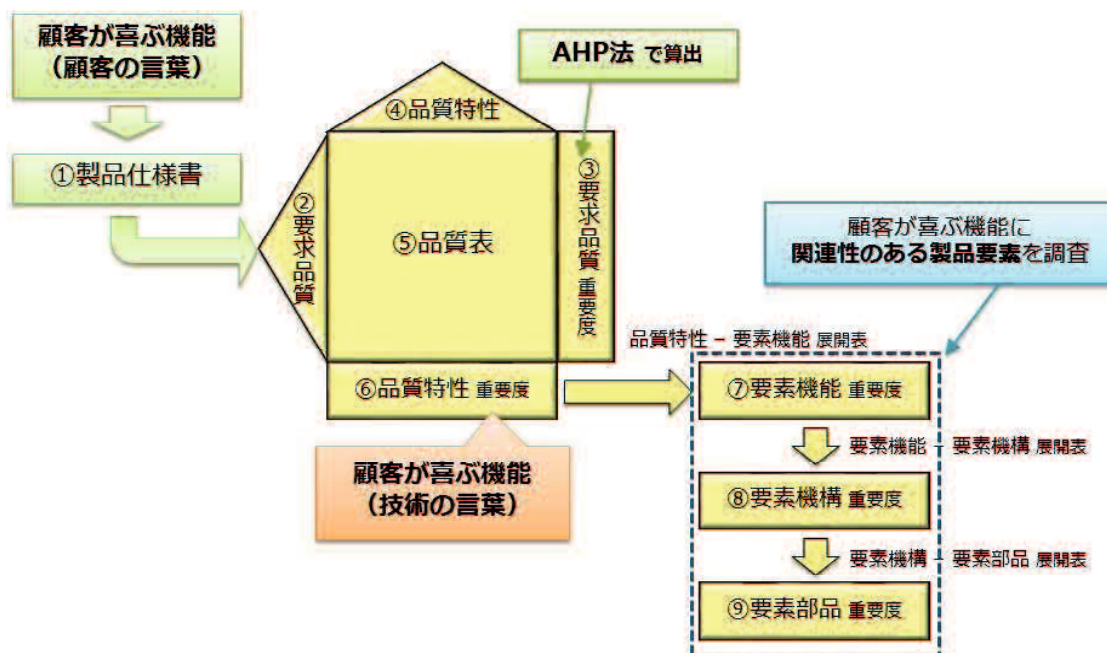


図 4.7 モノづくり会社におけるコア技術の明確化手順

#### ① 顧客要求の定義

ピーエムティー開発製品を対象とする。顧客の要求は全て製品仕様書に記されているため、「製品仕様書」を顧客の要求と定義する。

#### ② 要求品質項目の抽出

顧客の要求と考えられる製品仕様書から顧客の要求する品質として「要求品質」を抽出する。ここで、製品仕様項目をそのまま要求品質項目とするのではなく、「顧客は何故その仕様値を求めているのか」という観点で抽出し、関連する項目をグルーピングする。考察対象3製品に対して抽出された要求品質項目数を表 4.11 に示す。



表 4.11 各製品の要求品質項目の階層別項目数

製品	1次	2次	3次
マスクレス露光装置	8個	17個	38個
卓上型 NC 微細加工機	5個	16個	—
オンデマンドインクジェット装置	7個	18個	—

③ 要求品質項目の評価

次に、要求品質項目を評価し、顧客が最も喜ぶ項目を調査する。体系的な評価を行うため、AHP(階層分析法)を用い、要求品質の階層毎に評価する。評価者は顧客との情報接点がある担当者に依頼する。回答方法は、他人の意見による影響を受けることを避けるため、アンケート用紙による個人回答方式とする。

続いて、収集したアンケート結果を要求品質の階層毎に1次、2次、3次と関連する項目別に評価していく。最終的に評価結果の平均を取り、要求品質項目重要度を算出する。マスクレス露光装置を対象とした要求品質項目重要度の算出結果を表4.12、表4.13、表4.14に示す。

表 4.12 要求品質項目の1次階層の評価結果(マスクレス露光装置)

要求品質項目	重要度(個別評価)					重要度(平均)	
	A	B	C	D	E		
生産時間が短い	0.06	0.07	0.03	0.03	0.05	0.05	
微細なパターンを露光できる	0.22	0.16	0.10	0.08	0.01	0.11	
露光範囲全面の品質が一定である	0.39	0.34	0.36	0.25	0.07	0.28	1位
誰でも操作できる	0.06	0.02	0.04	0.14	0.02	0.06	
設計通りにパターンニングできる	0.15	0.16	0.27	0.17	0.12	0.17	2位
露光焦点が合う	0.07	0.16	0.09	0.17	0.12	0.12	3位
多品種の露光ができる	0.03	0.07	0.09	0.15	0.15	0.10	
装置がコンパクト	0.02	0.02	0.02	0.02	0.47	0.11	

表 4.13 要求品質項目の2次階層の評価結果(マスクレス露光装置)

要求品質項目 1次	2次	重要度 (個別評価)					重要度 (平均)	
		A	B	C	D	E		
生産時間が短い	短時間で露光できる	0.17	0.25	0.17	0.50	0.10	0.24	<b>2位</b>
	すぐに試作できる	0.83	0.75	0.83	0.50	0.90	<b>0.76</b>	
微細なパターンを露光できる	小さなデバイスを作成できる	0.25	0.50	0.17	0.13	0.17	0.24	<b>2位</b>
	どんな形状のパターンでも露光できる	0.75	0.50	0.83	0.88	0.83	<b>0.76</b>	
露光範囲全面の品質が一定である	スパス間の曇り目がなめらかである	0.17	0.25	0.50	0.90	0.25	0.41	
	広範囲に精度良く露光できる	0.83	0.75	0.50	0.10	0.75	0.59	
誰でも操作できる	作業者が変わっても品質が同じ	0.64	0.78	0.78	0.75	0.75	0.64	
	作図作業が簡単	0.05	0.07	0.18	0.06	0.17	0.11	
	どんな状態でも画像処理できる	0.31	0.65	0.04	0.18	0.07	0.25	
設計通りにパターンニングできる	設計した通りの形状に露光できる	0.25	0.50	0.50	0.50	0.50	0.45	
	設計した通りのサイズに露光できる	0.75	0.50	0.50	0.50	0.50	0.55	
露光焦点が合う	どんなワーク種類でも露光焦点が合う	0.83	0.75	0.83	0.90	0.90	<b>0.84</b>	<b>1位</b>
	ワーク設置部材に依らず露光焦点が合う	0.17	0.25	0.17	0.10	0.10	0.16	
多品種の露光ができる	どんなワーク種類でも露光できる	0.83	0.25	0.50	0.10	0.17	0.37	
	どんなレジストでも露光できる	0.17	0.75	0.50	0.90	0.83	0.63	
装置がコンパクト	装置サイズが小さい	0.90	0.25	0.75	0.88	0.90	<b>0.74</b>	<b>3位</b>
	装置を移設しやすい	0.10	0.75	0.25	0.13	0.10	0.27	

表 4.14 要求品質項目の3次階層の評価結果(マスクレス露光装置)

要求品質項目 1次	2次	3次	重要度 (個別評価)					重要度 (平均)		
			A	B	C	D	E			
生産時間が短い	短時間で露光できる	短期間に多数の条件で露光テストできる	0.83	0.25	0.50	0.83	0.88	0.66	1位	
		短時間で露光条件出しできる	0.17	0.75	0.50	0.17	0.13	0.34		
	すぐに試作できる	思いついたアイデアをすぐに試せる	0.88	0.75	0.75	0.88	0.90	0.83		
		装置が使えるまでの待ち時間が短い	0.13	0.25	0.25	0.13	0.10	0.17		
微細なパターンを露光できる	小さなデバイスを作成できる	微細な直線が露光できる	0.75	0.50	0.83	0.50	0.50	0.62	2位	
		なめらかな曲線が露光できる	0.25	0.50	0.17	0.50	0.50	0.38		
	どんな形状のパターンでも露光できる	縦線と横線を同時に露光できる	0.88	0.25	0.75	0.17	0.17	0.44		
		1つのワークに多くのパターンを露光できる	0.13	0.75	0.25	0.83	0.83	0.56		
露光範囲全面の品質が一定である	スワス開の焼き目がなめらかである	スワス開の焼き目箇所が分離しない	0.75	0.50	0.83	0.90	0.88	0.77	3位	
		スワス開の焼き目箇所が潰れない	0.25	0.50	0.17	0.10	0.13	0.23		
	広範囲に精度良く露光できる	広範囲に露光しても露光サイズが一定である	0.75	0.50	0.75	0.50	0.50	0.60		
		広範囲に露光しても露光形状が一定である	0.25	0.50	0.25	0.50	0.50	0.40		
誰でも操作できる	作業者が変わっても品質が同じ	作業内容が自動化されている	0.23	0.14	0.13	0.20	0.24	0.19	4位	
		ワーク設置が楽である	0.05	0.14	0.06	0.08	0.05	0.08		
		露光結果が安定している	0.72	0.71	0.81	0.73	0.71	0.74		
		区切りの良い単位で作図できる	0.83	0.50	0.83	0.50	0.88	0.71		
	作業作業が簡単	使い慣れたファイル形式が使用できる	0.17	0.50	0.17	0.50	0.13	0.29		
		どんな状態でも画像処理できる	ワークがどんな角度で設置されても画像処理できる	0.10	0.14	0.08	0.50	0.62		0.29
			どんなアライメントマーク形状でも画像処理できる	0.20	0.43	0.16	0.14	0.09		0.20
			ワーク面の色合いが変わっても画像処理できる	0.70	0.43	0.77	0.36	0.30		0.51
設計通りにパターンニングできる	設計した通りの形状に露光できる	設計した通りに露光データを作成できる	0.57	0.64	0.73	0.18	0.69	0.56	5位	
		どんな形状でも露光データに変換できる	0.32	0.26	0.19	0.75	0.23	0.35		
		使い慣れたCADソフトで設計できる	0.11	0.10	0.08	0.06	0.08	0.09		
	設計した通りのサイズに露光できる	露光結果から測定することができる	0.75	0.75	0.13	0.50	0.50	0.53		
		広範囲に露光しても露光位置精度が良い	0.25	0.25	0.88	0.50	0.50	0.48		
		ワーク面が反っていても露光焦点が合う	0.64	0.14	0.43	0.33	0.14	0.34		
露光焦点が合う	どんなワーク種類でも露光焦点が合う	ワーク面が傾いていても露光焦点が合う	0.10	0.14	0.43	0.33	0.14	0.23	6位	
		凸凹したワーク面でも露光焦点が合う	0.26	0.71	0.14	0.33	0.71	0.43		
		ワーク設置部材に依らず露光焦点が合う	0.75	0.50	0.50	0.50	0.50	0.55		
	ワーク設置部材が傾いていても露光焦点が合う	0.25	0.50	0.50	0.50	0.50	0.45			
多品種の露光ができる	どんなワーク種類でも露光できる	どんなワーク面積でも露光できる	0.25	0.25	0.50	0.88	0.17	0.41	7位	
		どんなワーク厚みでも露光できる	0.75	0.75	0.50	0.13	0.83	0.59		
	どんなレジストでも露光できる	感度の高いレジストでも露光できる	0.25	0.25	0.17	0.13	0.13	0.18		
		感度の低いレジストでも露光できる	0.75	0.75	0.83	0.88	0.88	0.82		
装置がコンパクト	装置サイズが小さい	工場内の全装置の規格サイズを統一できる	0.25	0.25	0.13	0.13	0.17	0.18	8位	
		作業場所が狭い(小さい)ところでも使える	0.75	0.75	0.88	0.88	0.83	0.82		
	装置を移設しやすい	装置重量が軽い	0.88	0.25	0.25	0.83	0.90	0.62		
		装置が持ちやすい形状である	0.13	0.75	0.75	0.17	0.10	0.38		

ここで、各階層における項目数の差異が評価結果に与える影響に対し、式(4.1)で求めた係数を掛けることで解消する[148].

$$\text{係数} = \frac{\text{同一階層で重要度を計算しようとしている項目数}}{\text{同一階層における最小項目数}} \quad (4.1)$$

影響を解消する前後を比較した結果を表 4.15 に示す。

表 4.15 各階層における項目数の際による影響を解消する前後の例(マスクレス露光装置)

1次		2次				3次							
要求品質項目	AHP 係数	要求品質項目	項目数 (分子)	最小項目数 (分母)	AHP	重要度 調整前	重要度 調整後	要求品質項目	項目数 (分子)	最小項目数 (分母)	AHP	重要度 調整前	重要度 調整後
マスク精度が高い	0.05	短時間で露光できる	2	2	0.24	0.011	0.011	短時間で多数の条件で露光テストできる	2	2	0.66	0.007	0.007
		すぐに製作できる						短時間で露光条件を出してできる					
複雑なパターンを露光できる	0.11	小さなデバイスを作成できる	2	2	0.24	0.027	0.027	思い通りのアイデアをすぐに試せる	2	2	0.83	0.030	0.030
		どんな形状のパターンでも露光できる						露光が見えるまでの待ち時間が短い					
露光調整金量の調整が一定である	0.28	スルスラの調整量があるからである	2	2	0.41	0.116	0.116	短時間で露光できる	2	2	0.82	0.017	0.017
		広範囲に調整できる						決められた範囲で露光できる					
誰でも操作できる	0.06	作業時間が短い	3	2	0.76	0.086	0.086	短時間と高精度を同時に露光できる	2	2	0.44	0.039	0.039
		作業作業が簡単						1つのワークに多くのパターンを露光できる					
設計通りにパターンニングできる	0.17	設計した通りの形状に露光できる	2	2	0.45	0.078	0.078	スルスラの調整量調整が分らない	2	2	0.77	0.089	0.089
		設計した通りのサイズに露光できる						スルスラの調整量調整が分らない					
露光焦点が合う	0.12	どんなワーク種類でも露光焦点が合う	2	2	0.84	0.103	0.103	広範囲に露光しても露光サイズが一定である	2	2	0.60	0.098	0.098
		ワーク種類別に対応する露光焦点が合う						広範囲に露光しても露光形状が一定である					
多量露光できる	0.10	どんなワーク種類でも露光できる	2	2	0.27	0.029	0.029	作業内容が自動化されている	3	2	0.19	0.037	0.037
		どんなレジストでも露光できる						ワーク種類が一定である					
調整がコンパクト	0.11	調整サイズが小さい	2	2	0.74	0.081	0.081	露光調整が安定している	2	2	0.74	0.027	0.027
		調整も簡単しやすい						露光調整が安定している					
								思い通りのファイル形式が使用できる					
								ワークがどんな角度で配置されても露光処理できる					
								どんなアライメントマーク形状でも露光処理できる					
								ワークの色合いが変わっても露光処理できる					
								設計した通りに露光データを作成できる					
								どんな形状でも露光データに反映できる					
								思い通りのCADソフトで設計できる					
								露光時間から測定することができる					
								広範囲に露光しても露光位置精度が高い					
								ワークが回っても露光焦点が合う					
								ワーク面が傾いていても露光焦点が合う					
								凸凹したワーク面でも露光焦点が合う					
								ワーク種類別に対応して露光焦点が合う					
								ワーク種類別に対応して露光焦点が合う					
								どんなワーク種類でも露光できる					
								どんなワーク種類でも露光できる					
								調整の多いレジストでも露光できる					
								調整の多いレジストでも露光できる					
								工場の金銀製の調整サイズを統一できる					
								作業場所が狭い(小さい)ところでも使える					
								調整量調整が早い					
								調整が待ち時間短い					
								調整が待ち時間短い					

この結果から、顧客が最も喜ぶ項目と重要度が明らかになった。次に、要求品質項目を計測可能な言葉に変換し、顧客が喜ぶ機能を明確にしていく。

④ 品質特性項目への変換

要求品質項目から計測可能な言葉(品質特性)に変換し、関連する項目のグルーピングを行う。考察対象3製品に対して、グルーピングした品質特性項目を表 4.16 に示す。

表 4.16 各製品の品質特性項目

■ マスクレス露光装置		■ 卓上型NC微細加工機		■ オンデマンドインクジェット装置	
1次	2次	1次	2次	1次	2次
光学系性能	露光分解能 データ分解能 光源出力	スピンドル性能	回転数 制御分解能	ヘッド性能	吐出量 塗布分解能 塗布速度 負圧力 チューブ長 位置読み取り分解能
ステージ性能	ステージ位置決め精度 ステージ位置決め時間 ステージ等速精度 ステージ分解能 応答速度 露光中 焦点追従範囲 露光中 焦点追従速度 ステージストローク 露光速度	ステージ性能	ステージ位置決め精度 ステージ位置決め時間 ステージ等速精度 ステージ分解能 ステージストローク 送り速度	ステージ性能	ステージ位置決め精度 ステージ位置決め時間 ステージ等速精度 ステージストローク
画像処理精度	画像認識率 オートフォーカス精度	本体外観	寸法 形状 質量	アライメント性能	画像認識率
露光均一性	照度ムラ 光源収差量 ステージ等速精度			本体外観	本体寸法 本体質量 形状
露光結果	最小線幅 スワス接合精度				
本体外観	寸法 形状 質量				

⑤ 品質表の作成

要求品質項目と品質特性項目の二次元表(品質表)を作成する(表 4.17).

表 4.17 要求品質-品質特性の二次元表の例(マスクレス露光装置)

要求品質展開表	品質要求展開表			重要度 (要求品質重要度)	光学系性能			ステージ性能								
	1次	2次	3次		露光分解能	データ分解能	光源出力	ステージ位置決め精度	ステージ位置決め時間	ステージ等速精度	ステージ分解能	応答速度	露光中 焦点追従範囲	露光中 焦点追従速度	ステージストローク	露光速度
生産期間が短い	短時間で露光できる	短時間に多数の条件で露光テストできる	0.007													
	すぐに試作できる	思いついたアイデアをすぐに試せる	0.030													
		装置が使えるまでの待ち時間が短い	0.006													
複雑なパターンを露光できる	小さなパイスを作成できる	微細な直線が露光できる	0.017													
		なめらかな曲線が露光できる	0.011													
	どんな形状のパターンでも露光できる	縦線と横線を同時に露光できる	0.038													
		1つのワークに多くのパターンを露光できる	0.048													
露光範囲と全周の品質が一定である	スワス幅の狭さ目幅が一定である	スワス幅の狭さ目幅が一定でない	0.089													
		スワス幅の狭さ目幅が一定でない	0.026													
	広範囲に精度良く露光できる	露光範囲と全周の露光品質が一定である	0.098													
		露光範囲と全周の露光品質が一定である	0.066													
誰でも操作できる	作業者が変わっても品質が同じ	作業内容が自動化されている	0.015													
		ワーク設置が楽である	0.006													

⑥ 品質特性重要度の算出

各要求品質を「その品質特性で測定可能であるか」という観点で◎○△の重み付けを行う。◎○△の点数について、赤尾[144]がパレートの法則が1つの指標となりうる旨指摘していることを参考にし、本研究では◎:4, ○:2, △:1とした。評価者は製品知識を所有するプロジェクトリーダーと設計者とする。回答方法は、評価方法の説明について、評価者の解釈にばらつきが生じることを防ぐため、評価者全員の反応を見ながら評価できるグループ回答方式とする。算出した結果を表4.18に示す。

表4.18 品質特性重要度算出の例(マスクレス露光装置)

要求品質展開表				品質要素展開表	品質要素重要度													
1次	2次		3次		露光系向け性能	ステージ的機能							露光速度					
					露光分解能	データ分解能	光源出力	ステージ的置決め精度	ステージ的置決め精度	ステージ的置決め精度	ステージ的置決め精度	ステージ的置決め精度	ステージ的置決め精度	ステージ的置決め精度	ステージ的置決め精度	ステージ的置決め精度	ステージ的置決め精度	ステージ的置決め精度
生産時間が短い	短時間で露光できる	短時間で露光条件出しできる	短時間で露光条件出しできる	0.007														
	すぐに試作できる	思い通りのアイデアをすぐに試せる	装置が使えるまでの待ち時間が短い	0.006														
微細なパターンを露光できる	小さなデバイスを作成できる	微細な直線が露光できる	なめらかな直線が露光できる	0.017	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	どんな形状のパターンでも露光できる	複雑な形状も同時に露光できる	1つのワークに多くのパターンを露光できる	0.048	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
露光範囲と露光の品質が一定である	スワス時の露光径が均一である	スワス時の露光径が一定である	スワス時の露光径が一定である	0.026														
	広い範囲に露光できる	露光範囲全体の露光品質が一定である	露光範囲全体の露光品質が一定である	0.066	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
誰でも操作できる	作業者が変わっても品質が同じ	作業内容が自動化されている	ワーク設置が楽である	0.060														
	作業が簡単	戻りの早い単位で作業できる	使い慣れたファイル形式が使用できる	0.003														
設計通りにパターンニングできる	設計した通りの形状に露光できる	設計した通りに露光データを作成できる	どんな形状でも露光データに変換できる	0.041	◎	◎												
	設計した通りのサイズに露光できる	露光結果から測定することができる	露光結果から測定することができる	0.050	◎	◎												
露光焦点が合う	どんなワーク種類でも露光焦点が合う	ワーク面が傾いても露光焦点が合う	ワーク面が傾いても露光焦点が合う	0.035														
	ワーク設置部材に依らず露光焦点が合う	ワーク設置部材が傾いても露光焦点が合う	ワーク設置部材が傾いても露光焦点が合う	0.009														
多品種の露光ができる	どんなワーク種類でも露光できる	どんなワーク種類でも露光できる	どんなワーク種類でも露光できる	0.021														
	どんなレジストでも露光できる	感度の高いレジストでも露光できる	感度の高いレジストでも露光できる	0.011														
装置がコンパクト	装置サイズが小さい	工場内の設置面積を確保できる	作業場所が狭い(小さい)ところでも使える	0.066														
	装置を稼働しやすい	装置稼働が早い	装置が持ちやすい形状である	0.011														
				最終要素重要度	1.38	1.31	0.25	2.79	0.07	1.51	2.34	0.36	1.46	0.35	0.25	0.07		
				相対的品質要素重要度	6.85	6.48	1.22	13.65	0.34	7.47	11.63	1.77	7.25	1.74	1.24	0.34		

尚、以後の項目の評価者、評価方法は「⑥ 品質特性重要度の算出」と同じとする。

この結果から、顧客が最も喜ぶ「機能」が明らかになった。続けて、要素機能、要素機構、要素部品に変換していき、顧客が喜ぶ機能を達成するために関連している技術を明確にしていく。

⑦ 要素機能重要度への変換

各製品の装置動作プロセスを基に、製品が所有する要素機能を抽出し、グルーピングを行う。次に、品質特性項目とグルーピングした要素機能項目で二次元表(品質-要素機能展開表)を作成し、重み付けを行うことで、要素機能の重要度を算出する(表 4.19)。

表 4.19 品質-要素機能展開表の例(マスクレス露光装置)

品質特性項目		要素機能項目	品質特性重要度															
			1次		2次		3次		4次		5次		6次		7次		8次	
			1次	2次	露光データを作成する	露光データを形成する	ステージを動かす	ステージを止める	ワークを固定する	ワークを動かす	ステージを止める	観察光を照射する	観察用画像を表示する	ワークを観察する	レーザマークを検知する	ステージを回転させる	ワーク形状を検知する	ワーク中心座標を算出する
光学系的性能	露光分解能	6.85	◎	◎														
	データ分解能	6.48	◎	◎														
	光厚出力	1.22								△	△	△	○		○			
ステージ制御性能	ステージ位置決め精度	13.85			○	○									◎		◎	
	ステージ位置決め時期	0.34				○									○		○	
	ステージ等速精度	7.47																
	ステージ分解能	11.63				△	△		△	△					◎		○	
	応答速度	1.77																
	露光中 焦点追従範囲	7.25																
	露光中 焦点追従速度	1.74																
	ステージストローク	1.24			◎			○	○						◎			
画像処理精度	露光速度	0.34																
	画像認識率	3.06									○	△	△	◎		◎	◎	
露光均一性	オートフォーカス精度	4.99																
	照度ムラ	5.90																
	光源ひずみ	6.28																
露光結果	ステージ等速精度	7.11																
	最小線幅	0.92		○														
本体外觀	スワス接合精度	6.06		○														
	寸法	2.56			○			◎										
	形状	2.37						◎										
	質量	0.58			○	○			○	○								
要素機能重要度			53.29	67.25	50.54	41.16	22.18	42.95	41.16	7.342	4.282	4.282	14.68	107.5	14.68	91.56		
相対的要素機能重要度			2.526	3.188	2.395	1.951	1.051	2.036	1.951	0.348	0.203	0.203	0.696	5.096	0.696	4.34		

⑧ 要素機構重要度への変換

要素機能項目から関連する要素機構を抽出する。次に、要素機能項目と抽出した要素機構項目で二次元表(要素機能-要素機構展開表)を作成し、重み付けを行うことで、要素機構の重要度を算出する(表 4.20)。

表 4.20 要素機能-要素機構展開表の例(マスクレス露光装置)

要素機能項目		要素機能重要度	デライタ交換機構	デライタ生成機構	観察光照射機構	観察光無遮蔽機構	露光光照射機構	露光光無遮蔽機構	露光光遮断機構	光線小投影機構	画像表示機構	照射均一性補正機構	ワイク面観察機構	レーザーマーク検知機構	ワイク形状検知機構	アライメントマーク検知機構	ステージ水平移動機構	ステージ垂直移動機構	ステージ回転機構	ステージ追従機構	ステージ移動速度調整機構	露光照射・ステージ同期制御機構
			1次	2次																		
露光データを作成する	露光データ形式を定義する	2.53	◎																			
	露光データを作成する	3.19		◎																		
ワークを調整する	ステージを動かす	2.40															◎	◎				
	ステージを止める	1.95															◎	◎				
	ワイクを調整する	1.05																				
露光位置を補正する	ステージを動かす	2.04															◎	◎				
	ステージを止める	1.95															◎	◎				
	観察光を照射する	0.35			◎	◎																
	観察用画像を表示する	0.20								◎												
	ワークを観察する	0.20			◎	◎							◎									
露光面の傾きを補正する	レーザーマークを検知する	0.70			◎	◎								◎								◎
	ステージを回転させる	5.10																				
	ワークの形状を検知する	0.70			◎	◎																◎
	ワーク中心座標を算出する	4.34																				◎
	ステージを動かす	2.04															◎	◎				
	ステージを止める	1.95															◎	◎				
	露光焦点位置算出用画像を表示する	1.05									◎											
アライメント補正値を算出する	露光焦点位置座標を算出する	1.53																				◎
	露光面の傾き座標を算出する	1.53																				◎
	ステージを動かす	1.48															◎	◎				
露光する	ステージを止める	1.40															◎	◎				
	アライメントマーク検出用画像を表示する	0.20									◎											
	アライメントマークを検知する	0.70			◎	◎																◎
	ステージを回転させる	2.89																				
	照射露光強度との差を算出する	3.24																				◎
	露光光を照射する	5.78				◎	◎		◎													◎
	シャッターを開ける	0.33							◎													◎
	ステージを動かす	6.34															◎	◎				◎
	DMZとステージの同期をさせる	9.84															◎	◎				◎
	露光面を補正する	4.08				◎	◎		◎	◎												◎
ワークを取り出す	露光用画像を表示する	0.06								◎												◎
	露光焦点位置を追従する	7.19															◎	◎				◎
	ステージを止める	3.42															◎	◎				◎
	次の露光位置座標へステージを動かす	5.20															◎	◎				◎
	シャッターを閉じる	0.33							◎													◎
その他	ステージを動かす	2.15															◎	◎				
	ステージを止める	2.07															◎	◎				
	ワークの固定を解除する	1.05																				
	縮小投影する	3.19								◎												
要素機構重要度	観察光量を検査する	0.12				◎																
	露光量を調整する	1.27					◎															
	ステージ移動速度を調整する	2.90																				◎
要素機構重要度			10.10	12.75	7.14	6.79	50.59	34.69	2.65	65.28	25.75	16.31	0.41	2.78	2.78	2.78	107.62	122.01	31.95	28.77	105.09	139.14
相対的露光機構重要度			1.29	1.63	0.91	0.87	6.45	4.43	0.34	8.33	3.28	2.08	0.05	0.36	0.36	0.36	13.73	15.57	4.08	3.67	13.41	17.75





表 4.22 ピーエムティーに対する本研究の評価結果

重要度 項目	順位	マスクレス露光装置	卓上型小型 NC微細加工機	オンデマンド インクジェット装置	
品質特性	①	ステージ位置決め精度	ステージ位置決め精度	ステージ位置決め精度	
	②	ステージ分解能	ステージ分解能	ステージ等速移動	
	③	露光中焦点追従範囲	スピンドル制御分解能	負圧力	
要素	機能	①	光学系・ステージ同期	スピンドル・ステージ同期	IJヘッド・ステージ同期
		②	露光焦点追従	ワーク高さ計測	座標取得
		③	ステージ真直移動	ティーチング	インク吐出
	機構	①	光学系・ステージ同期	スピンドル・ステージ同期	IJヘッド・ステージ同期
		②	ステージ垂直移動	スピンドル垂直移動	ステージ水平移動
		③	ステージ移動速度調整	ステージ水平移動	IJヘッド垂直移動
	部品	①	光学系制御基板	制御ボード	制御コントローラ
		②	ステージコントローラ	リニアスケール	IJヘッドユニット (ピエゾ)
		③	リニアエンコーダー (同順位省略)	サーボモーター	サーボモーター (同順位省略)

以上より、本研究で対象とした全3製品において、顧客が最も喜ぶ機能は「高い精度でステージを位置決めすること」であることが明らかになった。また、関連する要素として、上物(光学系/スピンドル/インクジェットヘッド)と下物(ステージ)の同期制御を行うための要素機能と要素機構、それらを制御するための制御基板、制御コントローラなどの要素部品の重要度が高いということが明らかになった。

次に、以上の結果を踏まえ、製品開発工程との関係を整理することで、顧客が最も喜ぶ「機能」を達成するために中心的な役割を果たしている「技術」について考察する。

#### 4.4.2 ピーエムティーのコア技術の考察

4.4.1 の結果を踏まえ、ピーエムティーのコア技術評価結果の要約を図 4.8 に示す。

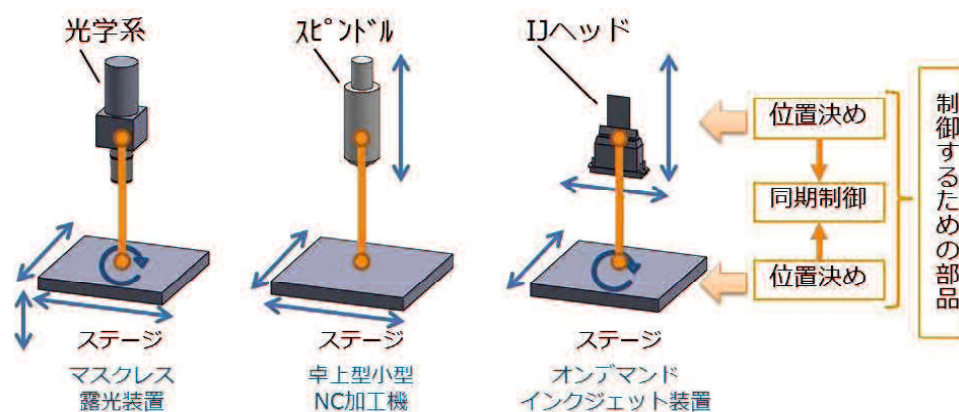


図 4.8 P-EMTに対するコア技術評価結果の要約

QFDを用いて評価した結果、本研究で対象とした全3製品において、顧客が最も喜ぶ機能は「高い精度でステージを位置決めすること」であることが明らかになった。ここで、顧客によって要求精度が異なるが、ステージの位置決め精度は機構の組み合わせによって限界精度が決まる(表 4.23)。

表 4.23 各製品の要求精度と要素機構、要素部品の関係

製品	要求精度	要素機構(限界精度)		要素部品
		ガイド	駆動源	
マスクレス露光装置	nm	クロスローラーガイド	超音波モーター	制御基板
卓上型小型NC微細加工機	μm	リニアガイド	サーボモーター	制御(NCボード)
オンデマンドインクジェット装置	μm	リニアガイド	サーボモーター	制御コントローラ

機構の組み合わせによって決まる限界精度に対して、実際の装置精度を近づけるため、機構の組立調整や同社作成の制御プログラムでの軸制御(ステージの加速度、減速度、回転数、電流値などの入力値に対してフィードバックなどを実施する)、外乱補正プログラムでのパラメータ調整(温度変化や振動などによる外乱を補正する)によって、取り扱う全軸に対して相対的に同期を取るように軸の調和を行っている(以下、軸調和力と定義する)。

次に、製品開発工程(図 4.9)を分析する。ピーエムティーの製品開発は顧客ニーズを基に、世の中になく製品コンセプトを考え、製品仕様落实到込むことから始まる。その製品仕様は、顧客によって要求精度が異なる。要求精度が異なれば、自ずと設計も変わるが、要求精度に合わせて機構を組み合わせる設計、そして、要求精度に関わらず、共通して同社で行っている組立、調整工程での軸の調和作業が同社の製品開発の中心的な工程となっていることが明らかになった。



図 4.9 ピーエムティーの製品開発工程

以上のように、顧客が最も喜ぶ機能である「高い精度でステージを位置決めすること」を達成するために中心的な役割を果たしている同社のコア技術は、「要求精度に応じて機構を組み合わせて設計し、組立調整や同社作成の軸制御プログラム・外乱補正プログラムで取り扱う全軸を相対的に調和する技術」であることが明らかになった。

## 4.5 製品開発プロセスの検討

### 4.5.1 製品開発における問題の整理

ピーエムティーの製品開発において、機会損失が発生している主要因に対して関係者で議論した内容について整理を行うために、制約理論[149], [150]の中で思考の整理に有効とされているミステリー分析[151]を用いて整理した。ここで、ミステリー分析とは、思ったとおりにいかない失敗をブレークスルーの機会に繋げることができるかとされており、物事の原因と結果に対する因果関係を図視化して整理する。尚、ミステリー分析は想定よりも良かったとき、悪かったときのどちらでも用いることができるとされている。分析の手順を下記に示す。

<ミステリー分析 >

- 1) 問題は何かを確認する。
- 2) もとものの思惑を確認する。
- 3) 何をやったのかを確認する。
- 4) 実際に起きてしまったことを確認する。
- 5) 思ったとおりにいかなかった原因を考える。
- 6) 原因の対応案を考える。
- 7) 対応案で状況が変わるかどうか考える。

具体的な進め方として、上記 1)~7)の項目を質問形式にし、順番に回答して進めることを推奨されている。図 4.10 にミステリー分析を質問形式で実施する手順を示す。

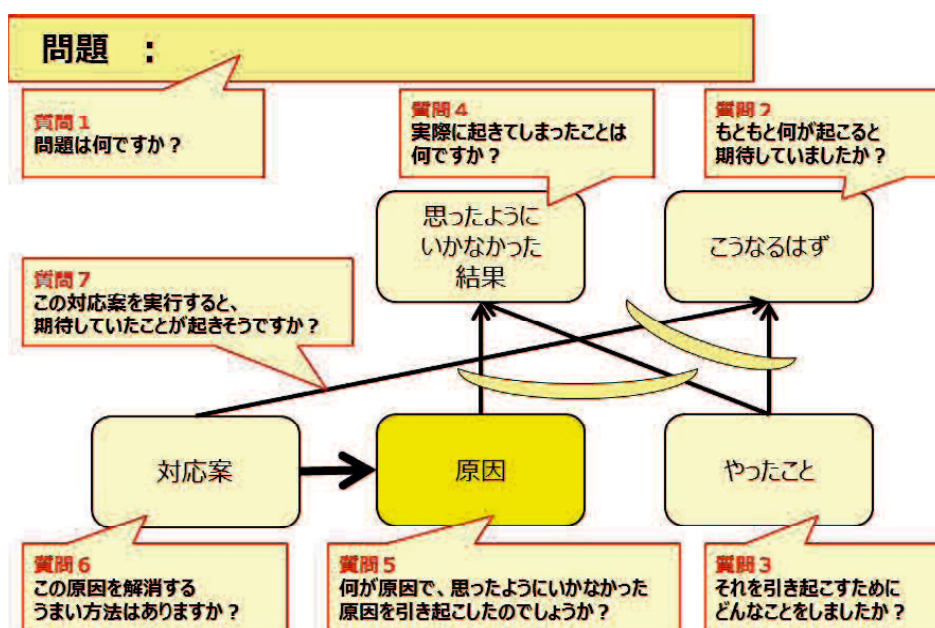


図 4.10 ミステリー分析の手順

ここで、ミステリー分析を実施する際のルールについて、概略を述べる。

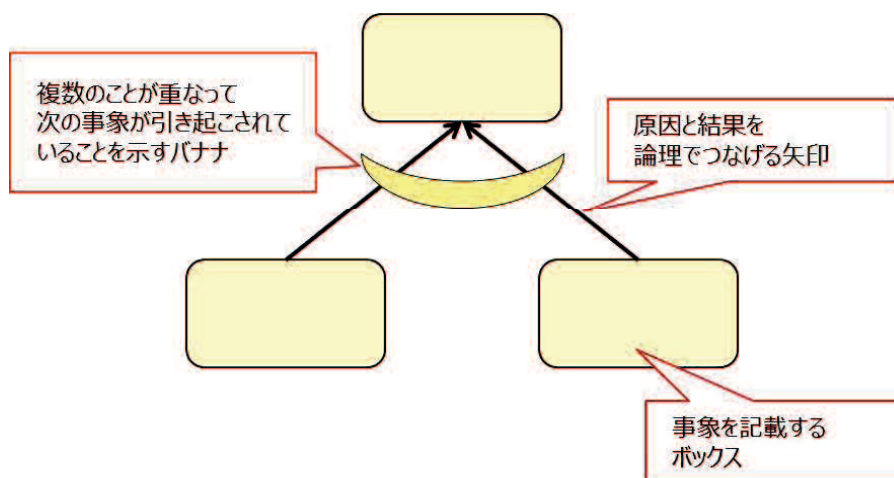


図 4.11 ミステリー分析の各図形の説明

図 4.11 に示したように、図中のボックス(四角形)には「事象」を記載する。また、ボックスとボックスが因果関係で繋がっている際は、矢印を用いる。尚、バナナ(月の形状をした円弧)は、ある結果が複数の事象が重なることで発生する場合に用いる。

次に、ミステリー分析で作成した図の読み方を図 4.12 に示す。

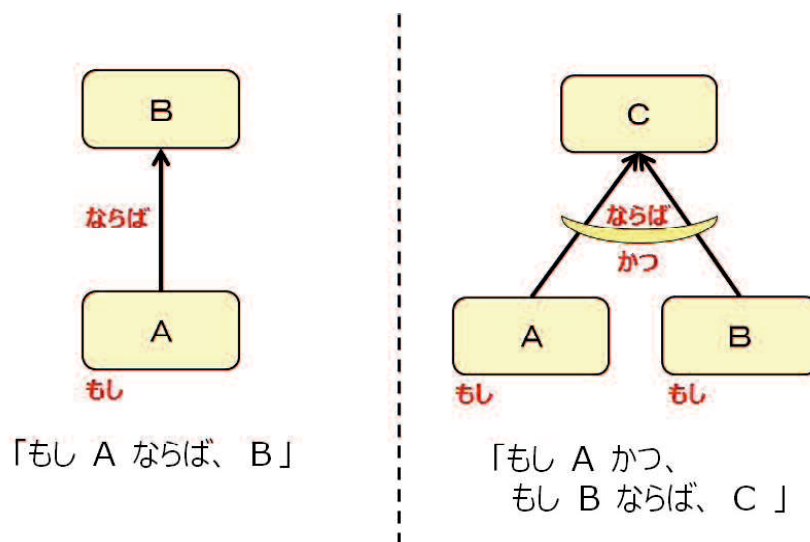


図 4.12 ミステリー分析の図の読み方

以上の概略を踏まえて、図 4.10 に示した手順を基に、同社の製品開発で機会損失が発生している主要因についてミステリー分析を行った結果を図 4.13 に示す。

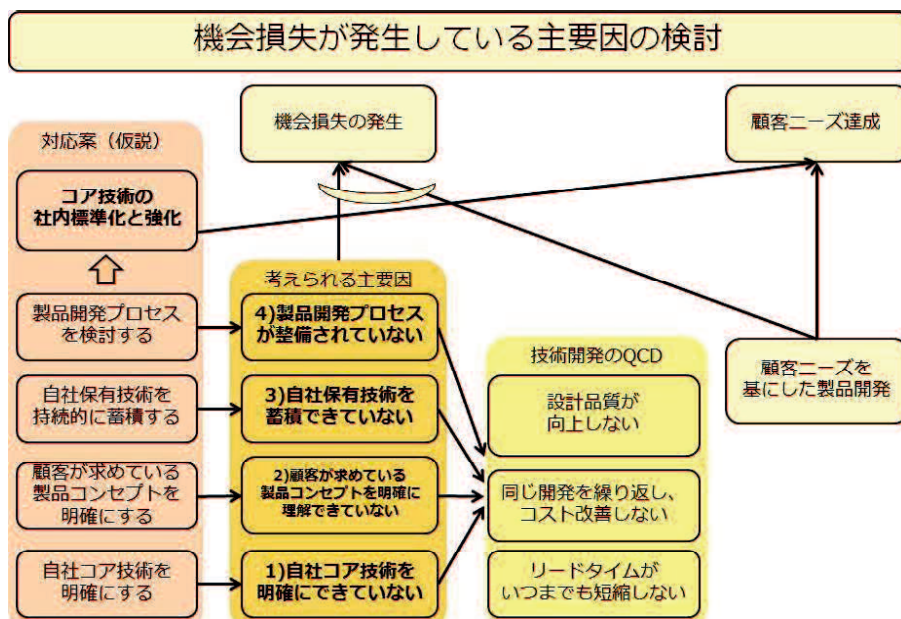


図 4.13 ピーエムティーの製品開発で機件損失が発生している主要因の整理 (ミステリー分析結果)

ミステリー分析の結果、同社の機件損失の要因として、下記の 4 項目が主要因として挙げられた。

- 1) コア技術を明確にできていない。
- 2) 顧客が求めている製品コンセプトを明確に理解できていない。
- 3) 保有技術を蓄積できていない。
- 4) 製品開発プロセスが整備されていない。

上記の 4 個の主要因によって、「設計品質が向上しない」、「同じ開発を繰り返し、コスト改善しない」、「リードタイムがいつまでも短縮しない」などの技術開発の QCD が向上せずに、機件損失に繋がっているのではないかと考えた。

そこで、各主要因に対して、それぞれ対応案を検討する必要がある。加えて、コア技術を社内標準化して、強化することによって、機件損失の発生がより改善するのではないかと考えた。

#### 4.5.2 主要因に対する対応案の検討

ここで、ミステリー分析した結果の主要因「4) 製品開発プロセスが整備されていない。」に関する対応として、同社の取組によって受注可否会議や技術開発工程の要所に成果物を確認するプロセスが整備され、2015年8月から運用が開始された。現状のピーエムティーの製品開発プロセスを図4.14に示す。

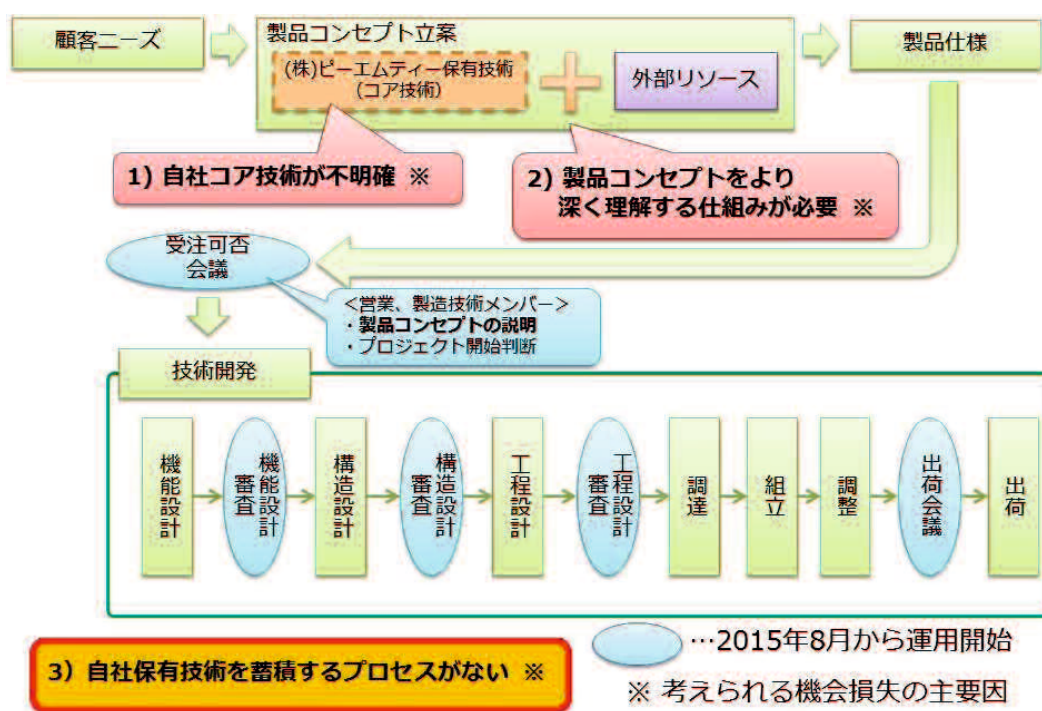


図 4.14 現状のピーエムティーの製品開発プロセス

受注可否会議では、製品コンセプトと製品仕様を基に受注可否を判断する。また、技術開発の中で、設計工程毎に成果物を関係者で確認する審査を設けた。最後に、出荷会議を実施し、製品仕様を満たしていることを確認することで出荷可否を判断する。

以上のように、受注可否会議が整備されたことで、製品開発関係者に顧客が要求する製品コンセプトが共有できるようになった。また、技術開発の要所に審査する場が整備されたことで、個人によって実施有無が異なっていた各設計での成果物を確認できるようになった。これにより、設計不具合などでの機会損失の発生が低減できるのではないかとと思われる。

この現状の製品開発プロセスに対して、残りの3個の主要因「1) コア技術を明確にできていない。」、「2) 顧客が求めている製品コンセプトを明確に理解できていない。」、「3) 保有技術を蓄積できていない。」を組み込む必要がある。また、保有技術を蓄積し、どのように社内標準化を行い、活用するのか検討する必要がある。



### 4.5.3 社内標準化の検討

QFD を用いて開発製品を評価することで、コア技術は「要求精度に応じた機構を組み合わせ設計し、組立調整や同社作成の軸制御プログラム・外乱補正プログラムで取り扱う全軸を相対的に調和する技術」であることが明らかになった。本研究で対象とした開発製品の3製品について、過去の製品開発記録を調査し、実際の要求精度に応じた機構の組み合わせ結果と、価格についてまとめた社内標準化のイメージを図4.15に示す。

機構の組み合わせ					要求精度				価格						
ガイド	ストローク [mm(下)]	単価 [万円]	駆動源		製品名	軸	ストローク [mm]	位置決め 精度 [μm]	ステージ コントローラー		価格[万円]				
			オフロード モーター	オンロード モーター					最高速 モーター	ピエゾ	種類	単価 [万円]	① 軸本体	② モータ込	③ 1000込
エアスライド	CONFIDENTIAL	CONFIDENTIAL			PLS-3000	X	CONFIDENTIAL	CONFIDENTIAL	CONFIDENTIAL	CONFIDENTIAL	CONFIDENTIAL	CONFIDENTIAL	CONFIDENTIAL		
すべり機構					PLS-3000	Y									
クロスローラー ガイド														PLS-3000	Z
														PLS-0202	X
転がり 機構														PLS-0202	Y
														PLS-0202	Z
														D-DESK-S	X
														D-DESK-H	X
														D-DESK-S	Y
														D-DESK-H	Y
														ON-D装置	Z
														MC1	X
														MC1	Y
														MC1	Z
クロスローラー リング														MC2	X
														MC2	Y
														MC2	Z
														MC3	X
														MC3	Y
														MC3	Z
					MC5	X									
					MC5	Y									
					MC5	Z									
					PLS-3000	θ									
					PLS-0202	θ									
					D-DESK	θ									

図 4.15 過去の実績(機構, 要求精度, 価格)のまとめ

過去の実績(機構, 要求精度, 価格)を蓄積し、見える化を行う。今後は各要求精度に対して機構を組み合わせ、例えば、どのように要求された位置決め精度を達成したのか、さらに詳細な技術やノウハウを紐づけて蓄積していくことを考えている。

次に、図 4.15 に示したような社内標準化をどのように活用するのか検討する。社内標準化の活用イメージを図 4.16 に示す。



図 4.16 社内標準化の活用イメージ

図 4.16 で示したような過去の実績の一覧表(社内標準化)を作成することで、顧客から「これくらいの精度の製品が欲しい」と要求された際に、一覧表を確認することで、迅速に提案することができるようになるのではないかと考えた。また、このような社内標準化を行うことで、顧客の要求にも幅広く、そして迅速に提案でき、顧客に合せた要求を達成する、という製品開発の特徴を伸ばしていけるのではないかと考えた。

さらに、社内技術者が図 4.16 を参照することで、「不足している機構の組み合わせに対する新たな挑戦」や、「既存の組み合わせの強化」のような、今後の製品開発の指標とする。また、製品化済みの機構の組み合わせに対して共有することで、同じような製品開発を繰り返すことで発生する機会損失の低減に貢献することを期待する。

また、営業部のメンバーは、自社の実力(実績)を把握することができ、顧客にコンタクトを取る際、個人(営業年数)に依存せずにアピールができるようになることを期待する。

#### 4.5.4 製品開発プロセスの提案

機会損失を発生させていると思われる主要因「1) コア技術を明確にできていない. 」, 「2) 顧客が求めている製品コンセプトを明確に理解できていない. 」, 「3) 保有技術を蓄積できていない. 」に対する対応案を検討し, 現状の製品開発プロセス(図 4.14)に組み込んだ製品開発プロセスを図 4.17 に示す.

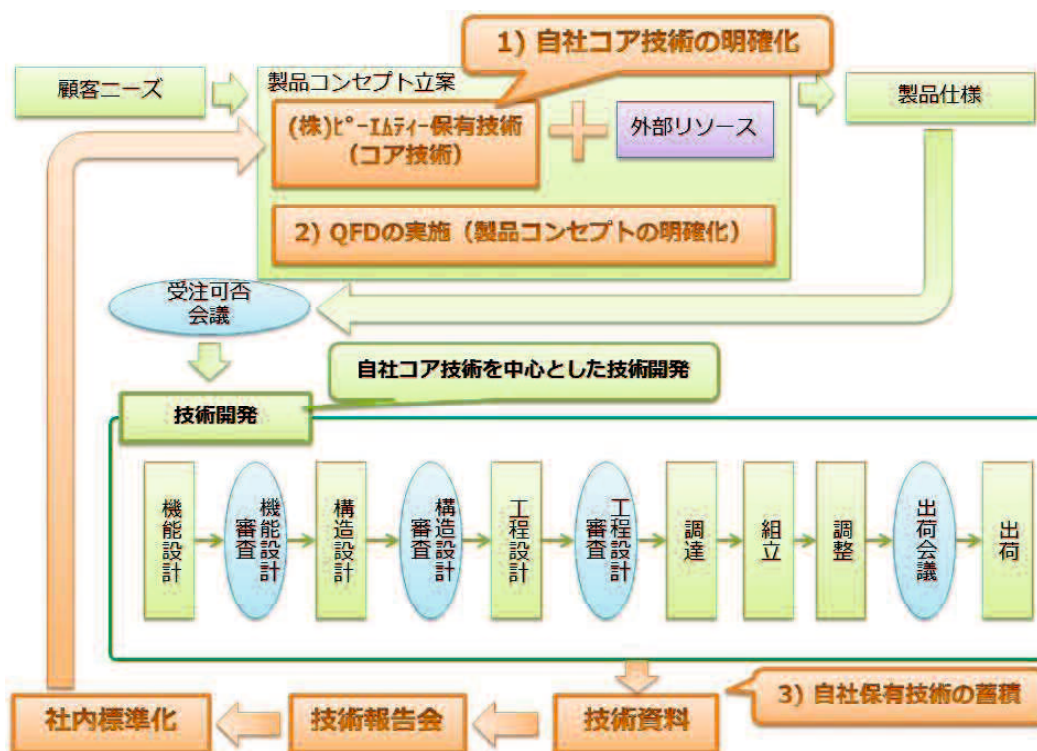


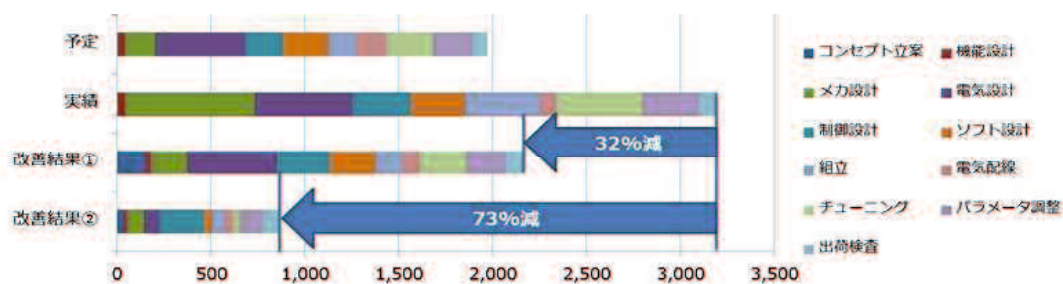
図 4.17 提案する製品開発プロセス

QFD を用いて開発製品を評価することで, コア技術を明確にした. 製品コンセプトを立案する際, 本研究で学んだ QFD を実施することで, 製品コンセプトをより深く理解する. また, 顧客ニーズを保有技術, 外部リソースと対比し, 関連する要素技術を明確にした状態でスケジュールを立て, コア技術を中心とした技術開発を行う. 技術開発を行う中で, 顧客ニーズに対して新たに達成した技術を資料化し, 社内で技術報告会を開催して共有化する. 最後に社内標準化を行い, 自社の保有技術として蓄積していく. そして, 新たな顧客ニーズに対して, 同様のプロセスを回していく.

次に、提案する製品開発プロセスを実施することで、どの程度工数が削減できるのか、製品開発関係者で効果検証を行った。

#### 4.5.5 効果の予測検証

前述する機会損失の代表例として示した、T社様向けマスクレス露光装置の工数の予定と実績の差分について、「コア技術を理解できていなかった」ために発生した数値、「製品コンセプトを理解できていなかった」ために発生した数値等を洗い出した。そして、対応案1)~3)を組み込んだ新・製品開発プロセスを実施することで、どの程度工数が削減できるのか、製品開発関係者で効果を予測検証した結果を図4.18に示す。



※ 数値の単位は時間

工程	予定	実績	対応内容①	改善工数① (予測値)	改善結果① (予測値)	対応内容②	改善工数② (予測値)	改善結果② (予測値)
コンセプト立案	-	-	・QFD実施	150	150	・社内標準化	-120	30
機能設計	40	40	・コンセプト理解 ・コア技術理解	-10	30	・社内標準化	-10	20
メカ設計	160	690	・コンセプト理解 ・コア技術理解	-500	190	・社内標準化	-100	90
電気設計	480	520	・コンセプト理解	-40	480	・社内標準化	-240	240
制御設計	200	310	・コア技術理解	-30	280	・社内標準化	-200	80
ソフト設計	240	290	・コンセプト理解	-50	240	・社内標準化	-200	40
組立	150	400	・メカ設計改善	-250	150	・社内標準化	-80	70
電気配線	160	85	-	0	85	・社内標準化	+45	40
チューニング	250	460	・メカ設計改善	-210	250	・社内標準化	-210	40
パラメータ調整	210	300	・コンセプト理解	-90	210	・社内標準化	-90	120
出荷検査	80	100	-	0	100	-	0	100
合計	1,970	3,195	-	-1,030	2,165	-	-1,295	870

図 4.18 提案する製品開発プロセスの効果の予測検証結果

結果、実績に対して 32% 削減できる見込みがあることが分かった(改善結果①)。また、蓄積した技術をベースにコア技術を社内標準化することが達成できたと仮定した場合、同様に削減できる数値を洗い出した。その結果、実績に対して 73% 削減できる見込みがあることが分かった(改善結果②)。

#### 4.5.6 技術資料と技術報告会の検討

最後に、技術開発の中で新たに明らかになった技術を蓄積するための技術資料と技術報告会のイメージを検討する。技術資料と技術報告会に関して検討した内容を図 4.19 に示す。

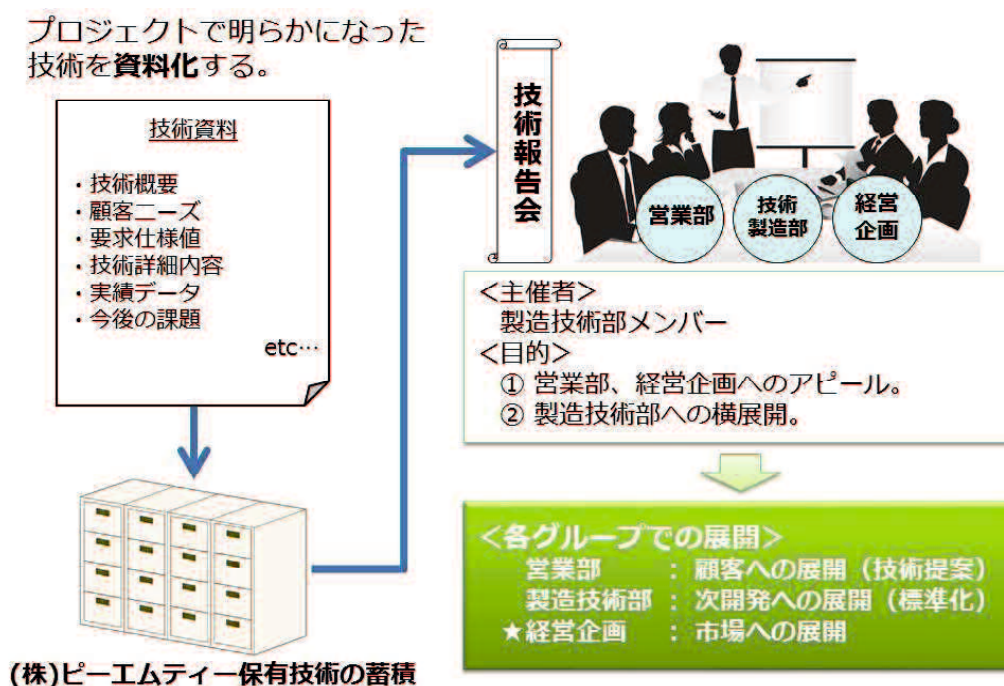


図 4.19 技術資料と技術報告会の検討内容

技術資料の項目として、技術の概要、どんな顧客ニーズを基に技術開発をすることになったのか、要求された仕様値はどのくらいなのか、などが必要なのではないかと考えた。そして、資料化した技術資料を基に、製品開発の中心となっている営業部と技術製造部、また会社の方向性を考え、意思決定を行う経営委員会のメンバーに対して技術報告会を開催する。

技術報告会の目的は、1 つ目に営業部、経営委員会に対して技術をアピールすることである。プロジェクトを通して明らかになった技術によって、顧客がどんなことに対して喜んでくれる

ようになったのかを中心に説明する。2 つ目の目的は、技術製造部へ横展開することである。そうすることで営業部は顧客への展開、経営委員会は市場への展開が容易となる。また、技術製造部は同じような技術開発をすることで発生する機会損失を低減させ、他の技術製造部のメンバーが明らかにした新技術を共有することで、今現在抱えている問題への応用や、全く新しい技術を発想することが可能となる。

## 4.6 まとめ

本研究では、ピーエムティーの現状の製品開発において発生している機会損失を低減させるために、石尾らの研究を参考にし、QFDの手法を用いてモノづくり会社のコア技術を評価する方法を考察した。また、製品開発プロセスの実証評価から製品のコア技術を明確化するための分析手法を新たに提案し、その分析手法を用いた実製品における評価検証から、その有効性を示した。さらに効果的に顧客が要求する価値を提供するためのモノづくり製品開発・設計プロセスを提案した。

今後は、本研究で明らかになったコア技術を中心に製品開発プロセスを改善することで、機会損失が低減されることを検証する。

## 第5章 技術開発手法に関する検討

### 5.1 はじめに

第5章では、前章で示した様に製品開発プロセスにおいて重要な役割を果たすコア技術をより効率的に開発するための技術開発手法の検討が必要である。そのため、実製品の市場要求に基づく課題に対して、解析主導の考え方にに基づき新たな技術開発手法を提案[66]し、その設計手法による技術開発の検討から、新たなコア技術を開発する。具体的には、顧客価値要求に答えるため、インクジェットプリンタヘッドの高品位な印刷手法であるマルチドロップ吐出技術に関する駆動波形を新たに設計するため、吐出駆動波形シミュレーションのためのシステムモデル技術及び液滴の吐出実態評価システムを構築し、構築したそれぞれのシステムを組み合わせた吐出波形の開発評価手法を提案する。



## 5.2 解析主導設計 (Analysis—Led Design, ALD)

近年、製品開発における企業間の競争は激しさを増している。これは、グローバル化の進行により企業の競争相手が国内だけにとどまらないこと、顧客ニーズが多様化していることが大きな理由として考えられる。こうした状況をふまえ、企業は製品開発においてさまざまな取り組みを行っている。とくに設計分野では Computer Aided Engineering (以降、CAE と略す) が導入され、開発コストの削減や製品品質の向上、開発期間の短縮に寄与している[152]。

CAE の分野では、有限要素法による構造解析がよく知られている。これを利用することにより、ある製品やその一部に関する変形の様子や強度などをコンピュータ上で把握することができる。しかし、このような解析手法はある個別の工学分野においてのみ効果を発揮する場合が多い。そのため、製品設計の下流工程においてよく利用されている。言い換えれば、従来の CAE は製品設計の上流工程には適していない。そこで、上流工程における新たな CAE の開発に関心が集まっている[153]。図 5.1 に設計の過程[154]を示す。

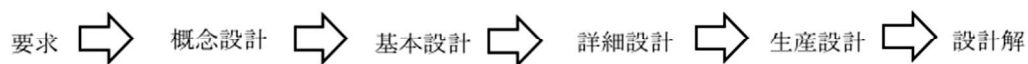


図 5.1 設計の過程

製品設計では、製品に価値を与え顧客の要求を満足するために、製品の機能を十分に考え設計する必要がある。本研究ではこの工程を機能設計と呼ぶ。また機能設計は、設計する製品の形や大きさを決定する前の段階であるため、従来の CAE 手法をこの段階に適用することは困難である。その一方で、上流工程における設計の良否が直接に製品の完成度や開発期間に影響を与える。さらに、詳細設計段階に比べて設計の自由度は大きく、必要となるコストが少ない。そのため、上流工程の重要度は高いといえる。

こうした状況の中で、設計上流に適用可能なコンピュータを用いた設計手法や概念が提案されつつある。例えば、大富らは 1DCAE[155]を提案している。1DCAE は機能設計段階で製品の評価を行う仕組みを作ることを目的としており、物理モデルシミュレーションの利用を提案している。また、過去の研究では長松によって、様々な工学分野を共通に表すことを狙いとした、独自の機能モデルが提案されている[156]。また、システムモデルに関する重要な設計思想・手法として解析主導型設計[157](Analysis Led Design, 以降 ALD と略す)と呼ばれるものがある。図 5.2 に製品開発プロセスを示す。

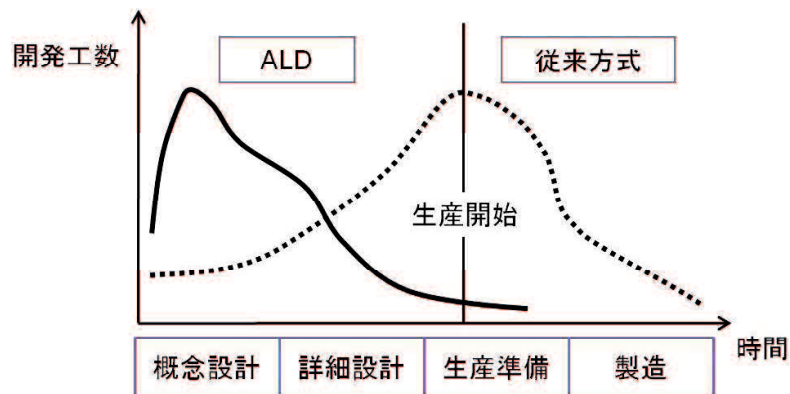


図 5.2 製品開発プロセス開発工数イメージ

従来は下流工程に開発工数を集中させることで製品開発を行っている。しかし開発途中の製品の仕様変更や上流工程の段階で発生したミスなど、上流工程にさかのぼって行う修正作業は、下流工程に発生するほど多くの手間やコストを必要とする。そこで、ALD では製品を生産する前に解析を活用した事前検討を積極的におこない、手戻りの防止・削減を行う。システムモデルは上流設計段階におけるシミュレーション手法であり、開発コストの削減、開発期間の短縮、品質の向上を達成することを狙いとしている。図 5.2 に示すように ALD 方式はアップフロントエンジニアリングを活用し初期概念設計の段階にリソース(開発工数)の大部分(ほぼ 70%)を集中させる。この段階では製品の物理的モデルはまだ開発されていない。ALD を用いてコンセプト、技術特徴、理論、製品の品質やメカニズム等広く解析し、明らかにされている。このような開発初期の厳格な事前評価により、早い段階で 製品の最適設計が可能になり、試作数、設計変更及び実験コストを削減することができる。したがって、ALD により品質の向上、開発コストの削減、開発時間の短縮が可能となる。従来の開発方式では物理的なプロトタイプを作成しいくつかの試験を行う。これはコストだけでなく多大な時間がかかる。一方、ALD による製品開発ではコンピュータ支援設計や有限要素法を用いる数値シミュレーション等のデジタルツールによるモデリング及び解析に重点を置く。これにより、数多くの物理的なプロトタイプを作成することや困難な実験をセットアップする必要がより少なくなる。

## 5.3 システムモデルの構築手法及び基本概念

### 5.3.1 システムモデル構築手法

設計上流段階におけるモデル化には、製品全体の挙動を表現することが望ましいため、製品の物理現象を1次元に単純化したものを用いる。このようなモデルの特徴として複合工学分野のモデル化に適している、有限要素法等による数値解析に比べて非常に短時間でシミュレーションできることがある。

物理現象を単純化したモデルを構築するための手法として表 5.1 に示すような3種類が考えられる。プログラミング言語で記述する数式モデリング、数値の流れを計算器(積分器微分器)で記述する信号モデリング、物理現象を抽象化した要素ブロックを使用する物理モデリング(Modelica 言語によるモデリング)である[67]。これらの手法の利点・欠点について比較を行った。これを表 5.1 に、また代表的なソフトウェアについて表 5.2 に示す。Modelica とは物理モデリング用の言語であり、利用者は注目する系の方程式を立てることなく、用意された部品ブロック(例えば、機械系におけるばね要素や質量要素など)を接続するだけで複合分野のモデル化が可能である。そのため、物理モデルを容易に作成することが可能となっており、Modelica 言語の国際標準化が進んでいる反面、一般へ普及するには時間がかかると予想される。

そこで本研究では、従来制御系分野で標準的に用いられてきた信号モデリングツールを用いて物理モデルを構築する。信号モデリングでは利用者が式を立てる必要があるため技術力が必要になるが、モデリングの自由度が高い、制御系を組み込みやすいという利点がある。また Modelica 言語では想定されていないコンポーネント(部品ブロック)が必要な時にモデル構築が難しい。以上の理由から本研究では、信号モデリングツールである、MATLAB®/Simulink および SCIRAB® (INRIA)を用いてモデル構築を行う。

表 5.1 システムモデル構築手法の比較

	利点	欠点
数式モデリング	<ul style="list-style-type: none"> <li>・モデリング時の自由度が最も高く、様々な数式を組み込みやすい</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・モデルの設計者以外にとって非常に理解しがたい</li> </ul>
信号モデリング	<ul style="list-style-type: none"> <li>・制御系を組み込みやすい</li> <li>・物理モデリングツールに比べてモデル化時の自由度が高い</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・モデリングの際に式の導出・変形が必要となるため、高い技術力が必要になる</li> </ul>
物理モデリング (Modelica 言語)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・非因果モデリングが可能である</li> <li>・利用者は数式を一から考える必要がない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・これから普及が進む</li> <li>・想定されていないコンポーネント(部品ブロック)が必要な時にモデル構築が難しい</li> </ul>

表 5.2 代表的なソフトウェア

数式モデリング	Fortran, C 言語
信号モデリング	MATLAB®/Simulink SCIRAB® (INRIA)/Xcos
物理モデリング	SimulatioX® Maplesim®

### 5.3.2 システムモデルの基本概念と基本コンセプト

システムモデルは、概念・機能設計に用いることを想定している。この段階における設計の成果は、技術者以外にも評価される。例えば投資意思決定をおこなう経営者によって機械システムの評価が行われる。そのためシステムモデルは、設計の関係者間のコミュニケーションに適することが望ましい。そこで、提案するシステムモデルは「オブジェクト指向」と呼ばれるシステム開発における考え方を取り入れている。オブジェクト指向とは関連するデータの集合と、それに対する手続き(関数、メソッド)を「オブジェクト」と呼ばれる一つのまとまりとして管理し、その相互作用によってシステムを構築する手法のことをいう。オブジェクトは外部からメッセージ(情報、データ)を送れば、その機能を発揮する。すなわち既存のオブジェクトに関していえば、内部構造や動作原理の詳細を知ることなくそのオブジェクトが利用できる。すなわちオブジェクトを現実のものに置き換えることで、開発の効率化、コミュニケーションの円滑化や成果物の再利用を促す技術といえる。

従って、システムモデルは機能と工学データ(属性値, 状態値およびその他のデータ)の一塊を部品システムと捉え, これが有機的に結合したシステムとみなしている. よって, システムモデルの基本コンセプトは以下に示すものとしている.

- ① モノを認識するために物理量を測り, それを移動・変化させるために物理量を直接操作する.
- ② 物理量の変化に情報・信号を読み取り, その変化に情報・信号をのせる.

またシステムモデルは部品システムが結合することで全体としての機能を実現する. さらに部品システムをそれぞれ独立に扱う. これにより部品システムの保守および再利用が容易となる. またシステムモデルはお互いに関連する部品システムの集合であるため, 設計者は個々の部品システムに容易に専念することができる.

## 5.4 モノつくりの価値・機能定義におけるセミ非因果モデルの提案

本節では、モノつくりの分野において価値や機能を定義する方法として用いられる、モデリング手法の現状について考察すると同時に従来曖昧であった 1D-CAE[68]の定義を概念的ではなく全物理分野に渡って時間微分のみを用いた微分代数方程式の定式化(モデリング)とシミュレーション手法として定義すると同時に新たなモデリング手法としてセミ非因果モデルの概念と、その代数方程式に対する手法を提案した。また、FEM 理論による計算結果と提案手法による数値解析の結果を比較検証することでその有効性を確認した結果を示す。

モノつくりの分野において、価値や機能を定義する方法として用いられる1D-CAEは、構造を定義し設計する3D-CAE等に比べて実用化が遅れている。しかし近年、Modelica[68]の国際標準化が進展するに従って、1D-CAEモデルを容易に開発することができる汎用ツール[68], [69]が市販されるようになってきている。しかし、物理モデルや実験モデルを統合したモデルや電気や機械の物理領域を同時に取り扱う混合物理領域モデリングを行う際、その物理現象を共通して表すことは困難であることから、実用化及び一般に普及することは容易ではなく、その対策として、HLMD(High Level Model Description)やHLMT(High Level Modeling Tool)などが提案されている。

本研究では、同様の目的で用いられているModelicaにおいて、その非因果モデルの実用的限界といわれた既存の物理モデルの周辺に保存則を緩和した近似物理モデルを設定し、実験モデルの誤差を補正することによって、実用的なモデルの構築が可能となる数値解析方法の提案を試みた。さらに、従来曖昧であった1D-CAEの定義[70]を、概念的ではなく定式化に対応し定義するため、「1D-CAEとは、全物理分野に渡って時間微分のみを用いた微分代数方程式の定式化(モデリング)とシミュレーション手法」とし、従って注意すべきは「1D-CAEでは、必要に応じて空間変数自体はモデルに導入するが、その偏微分は導入しない」ということである。その典型的な事例は、機械分野における1D-CAEの中核モデル化手法である多体動力学で、空間変数が多用されていることに見られる。図5.3に1D-CAEの技術体系図を示す。

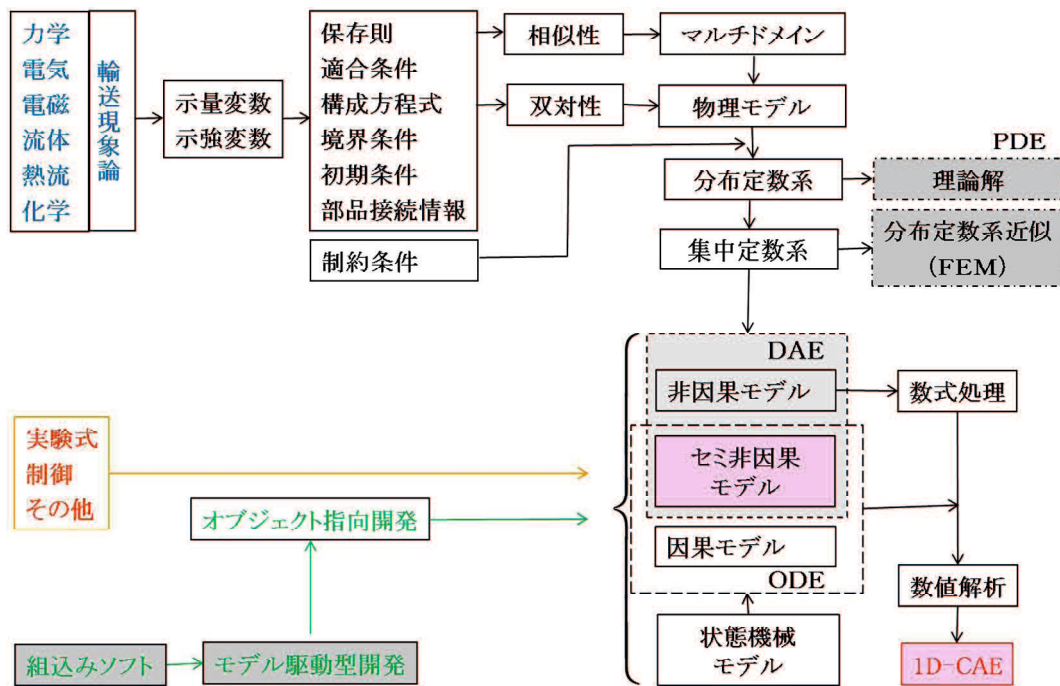


図 5.3 1D-CAE の技術体系

### 5.4.1 モデリング手法の現状

#### (1) オブジェクト指向

オブジェクト指向は、ソフトウェア開発技法のひとつであるが、この考え方は、1D-CAE の開発及び利用技術の高度化に多大な貢献をしてきた。それは以下の 3 つの場面で基本概念として採用されているからである。

- (1) 1D-CAE のソフトウェア開発
- (2) 1D-CAE ソフトウェアの利用操作法
- (3) 1D-CAE 利用者による新たな部品モデル及びシステムモデル全体の構築方法

ここで利用者にとって重要なことは、上述の(3)項により、構築されたシステムモデルの可読性及び再利用性が容易[158]となるという点である。

#### (2) 因果及び非因果モデル

従来の 1D-CAE におけるモデリング形式を大別すると以下の因果モデルと非因果モデルとなる。

##### 1) 因果モデリング形式

因果性とは、1D-CAE モデルを構成している部品モデル間の計算手順に関する原因と結果の関係である。これは、部品モデル間の入出力関係、既知数と未知数の関係又は、物

理システム全体の計算手順ともいえる。

一般的に、個々の部品モデルだけでは因果性は確定しない。因果性を確定できるのは、全部品モデルのトポロジーが構成された後である。因果モデリング形式は、Simulink[68]やXcos[68]等に代表されるソフトウェアで採用されている形式である。これは、利用者がモデル入力に先立って、計算手順を決め、ブロック線図で表現し、シミュレーションするデータフロー・ブロックダイアグラム形式である。この作業は、利用者にとって困難と大きな負担を強いることになる[159]。

## 2)非因果モデル形式

このモデル形式は、計算手順の決定を1D-CAEソフトウェアに委ねるモデリング形式である。従って、数値解析に先立って数式処理(文字式演算)を用いて微分代数方程式群を常微分方程式群に変換し、数値解析が可能となるように処理している。

### 5.4.2 モデル化手法の問題点とセミ非因果モデルの提案

因果モデル形式に比べ計算手順が自動化されている非因果モデル型式においても以下の問題があり、実用化が進まない原因となっている。

- 1) 既存の保存則を厳密に満たすという条件が実用的でない
- 2) 連成を考慮した構成方程式の追加が困難
- 3) 新たな概念・用語が多く、一般の技術者にとって理解が困難

上記の問題点を解決するため、セミ非因果モデルを提案する。セミ非因果モデリング形式とは、非因果モデルを模擬したモデリング手法をいう。このモデリング手法の必要条件は、以下である。

- ◆データフロー・ブロックダイアグラムを使用したオブジェクト指向モデリング
- ◆微分代数方程式を対象としたモデリング
- ◆データフローの変更が容易であるモデリング

既存モデルの未知変数を既知変数に変更(境界条件の変更)を行っても、簡単なデータフローの接続修正で済むようなモデリング

非因果モデル形式のように特定の物理保存則に基づく計算手順の自動生成に頼らず、特殊ブロックを用いて Bond Graph における JUNCTION ブロックを模擬することによって微分代数方程式の汎用的な数値解法の確立を目指す。セミ非因果モデルの概念は以下のようになる。

- 1) 非因果モデルの欠点を補う手法が、従来数値解析の延長上で確立が可能
- 2) オブジェクト指向を踏襲することによって、可読性と再利用性を確保が可能



- 3) 数式処理に変わる数値解析(繰り返し計算)が可能
- 4) 試行錯誤による代数ループ対策が不要
- 5) 既存の物理モデルの周辺に保存則を緩和した近似物理モデルを設定することによって実験モデルで誤差を補正し, 実用的なモデルの構築が可能

ただし, 繰り返し計算時により多大な解析時間が必要となるといった懸念がある. 本研究では, 因果モデル構築の際の代数ループ回避策の一つで採用されているブロック (Xcos の CONSTRAINT\_c, Simulink の Algebraic Constraint) を使用して, オブジェクト指向による代数方程式をモデル化する手法として, セミ非因果モデルを提案する.

#### 5.4.3 セミ非因果モデルの検証

新たに提案した数値解析方法を検証するため直列及び並列接続を含むスプリングモデルを例とし FEM 理論による解とセミ非因果モデルの解をそれぞれ比較することでその有効性の検証を行った. 図 5.4 に示した 3 つのスプリングで構成されるモデルにおいて, 図中に示す接点 1, 2, 3 に外荷重  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$  が負荷された際のそれぞれの変位  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  を求めた. ここで,  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  はバネ定数,  $R_1$  は反力である. また, 節点 0 の変位はゼロとする.

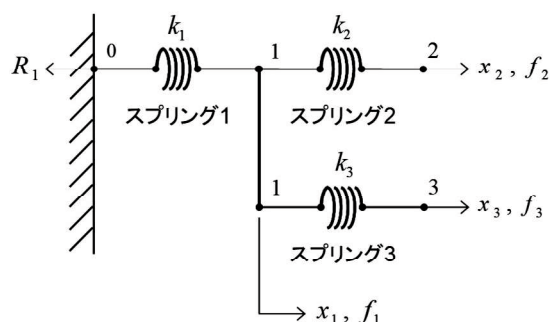


図 5.4 直列・並列接続を含むスプリングモデル

また, FEM およびシステムモデルの解析手順概要を図 5.5, 5.6 にそれぞれ示す.

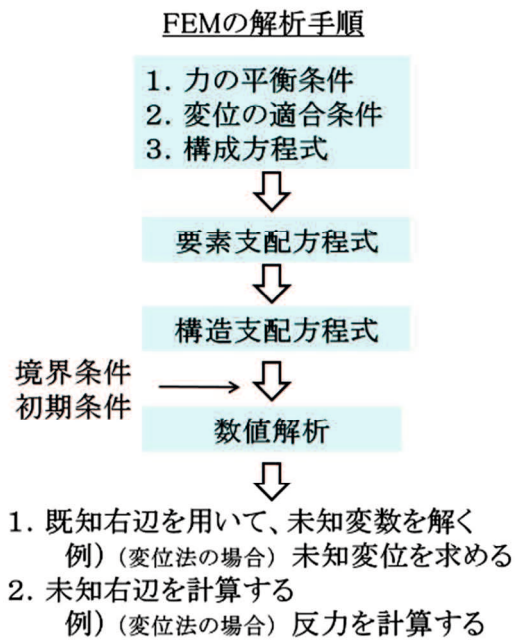


図 5.5 FEM の解析手順概要

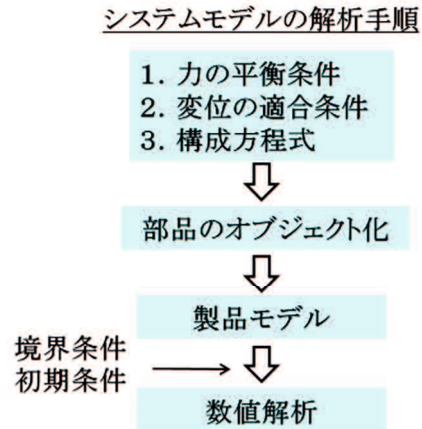


図 5.6 システムモデルの解析手順概要

## (1) FEM 理論

FEM 理論を用いて図 5.4 に示したスプリングモデルについて考え整理すると、式(5.1)として表すことができる。

$$\begin{bmatrix} k_1 & -k_1 & 0 & 0 \\ -k_1 & k_1+k_2+k_3 & -k_2 & -k_3 \\ 0 & -k_2 & k_2 & 0 \\ 0 & -k_3 & 0 & k_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -R_1 \\ f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{Bmatrix} \quad (5.1)$$

そして、節点 0 の変位をゼロとすると式(2)が得られる。

$$\begin{bmatrix} k_1+k_2+k_3 & -k_2 & -k_3 \\ -k_2 & k_2 & 0 \\ -k_2 & 0 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{Bmatrix} \quad (5.2)$$

ここで、 $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$  及び  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  をそれぞれ 1 とし、式(5.2)を解くと、変位  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  及び反力  $R$  は次のようになる。

$$x_1 = 3, \quad x_2 = 4, \quad x_3 = 4, \quad R_1 = 3$$

## (2) セミ非因果モデル

新たに提案したセミ非因果モデル化手法により検討を行う。図 5.4 に示したスプリングモデルにおいて、スプリング個々の変位  $x$ , 反力  $R$ , 弾性力  $F$  等の境界条件をそれぞれ図 5.7, 5.8, 5.9 に示す。

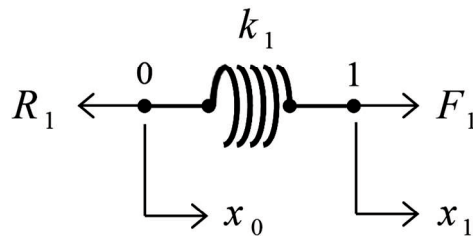


図 5.7 スプリング 1 の境界条件

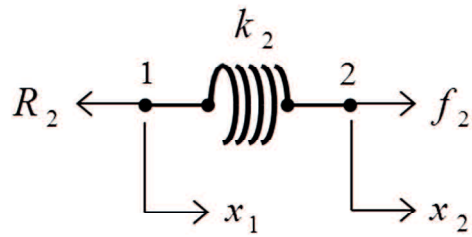


図 5.8 スプリング 2 の境界条件

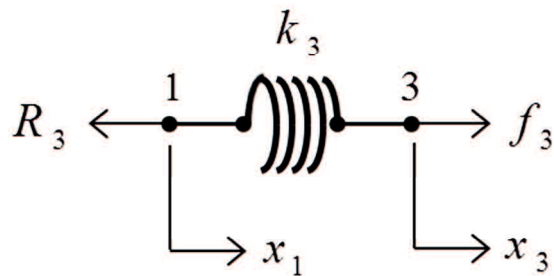


図 5.9 スプリング 3 の境界条件

ここで、図 5.7 に示したスプリング 1 の構成方程式を考えると式(5.3)および(5.4)のように表すことができる。

$$F_1 = k_1(x_1 - x_0) \quad (5.3)$$

$$R_1 = k_1(x_1 - x_0) \quad (5.4)$$

モデルの可読性を考慮し、 $x_0$  が既知変数となることから  $x_1$  を未知変数として変換すると式(5.5)が得られる。

$$x_1 = x_0 + \frac{F_1}{k_1} \quad (5.5)$$

さらに、式(5.4)および式(5.5)をもとにモデル化を行うと、図 5.10 が得られる。

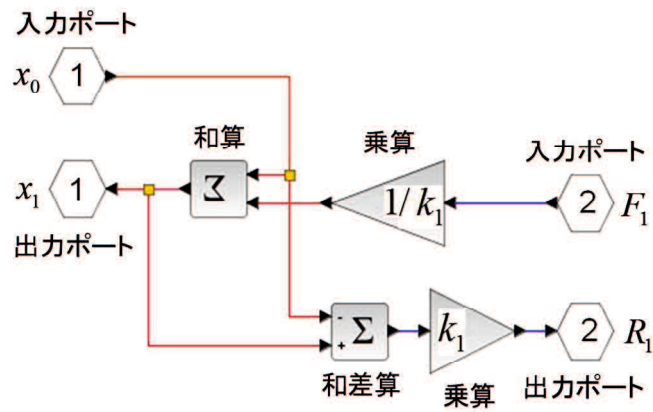


図 5.10 スプリング 1 のモデル図

同様に、スプリング 2 およびスプリング 3 をモデル化した結果を図 5.11, 図 5.12 に示す。

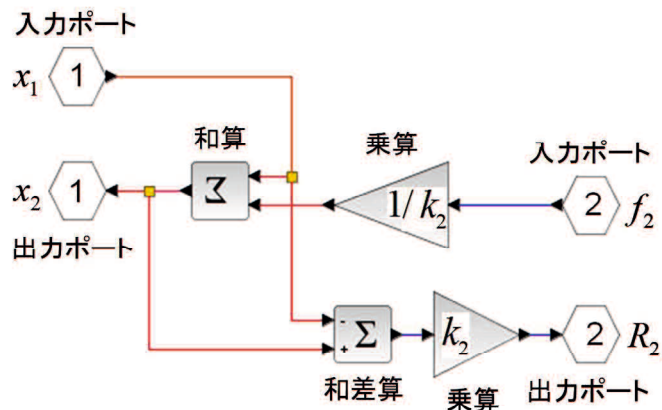


図 5.11 スプリング 2 のモデル図

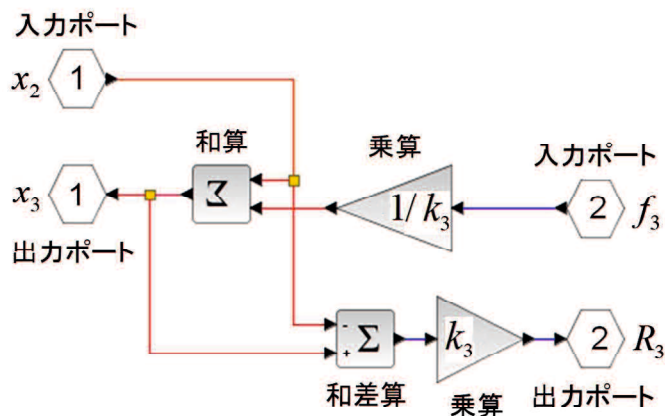


図 5.12 スプリング 3 のモデル図

次に、各スプリングについて節点 1 の接合条件を考える。スプリングに関する接合部において、 $x_1$  は共通であり、変位の適合条件となる。この関係をもとにモデル化を行うと図 5.13 の関係を得ることができる。

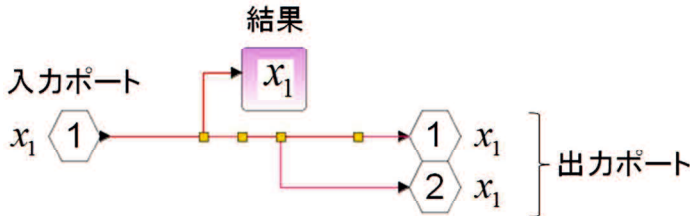


図 5.13 変位の適合条件式に関するモデル

また、接合部における平衡方程式を考えると、式(5.6)が成立し、式(5.6)をもとにモデル化を行うと図 5.14 が得られる。このモデルでは代数ループが発生するため、収束計算を行う必要がある。

$$f_1 + R_2 + R_3 - F_1 = 0 \tag{5.6}$$

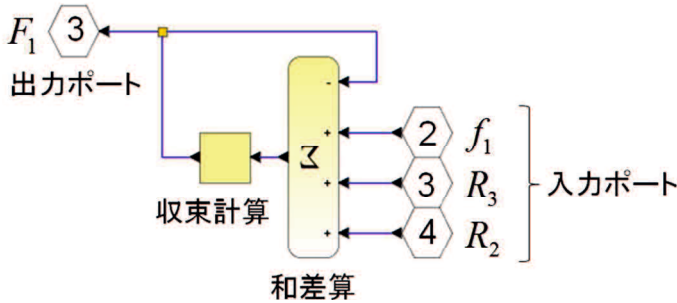


図 5.14 力の平衡方程式に関するモデル図

以上のように作成した個々のスプリングモデルおよび接合条件モデルを、入出力の情報に基づいて結線すると図 5.15 のような全体のスプリングモデルを得ることができる。

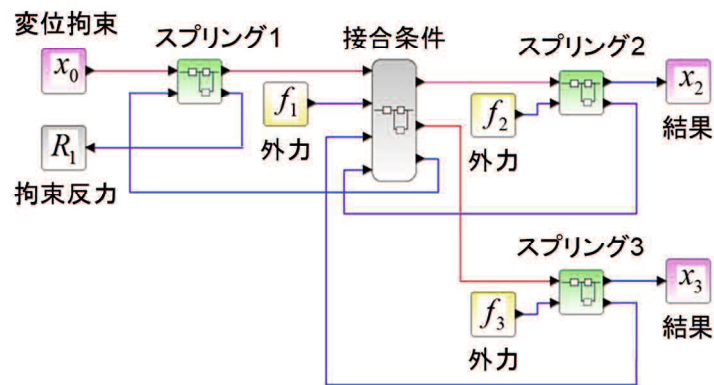


図 5.15 セミ非因果モデル化手法によるスプリングモデル全体図

モデル化した図 5.15 のスプリングモデルを汎用の数値解析ソフトである Scilab を用いて計算すると、変位  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  及び反力  $R$  は次のようになり、 $x_1 = 3$ ,  $x_2 = 4$ ,  $x_3 = 4$ ,  $R_1 = 3$  この結果を、先に求めた FEM 理論による解と比較すると一致していることが分かる。

#### 5.4.4 まとめ

本研究では従来の因果・非因果モデルの欠点を補いかつ共存使用が可能であるオブジェクト指向による代数方程式をモデル化する手法として、セミ非因果モデルを提案した。本手法に基づくモデルを構築し、Scilab を用いて数値計算を行った結果、FEM 理論によるモデルを用いて数値計算を行った結果と同様の結果が得られその有効性が確認された。

しかし検証例が少なく、今後はさらにその検証を積み重ねるとともに、セミ非因果モデル手法の充実を図る必要がある。

## 5.5 Modelica を用いた FEM アプローチによる非因果モデル及び因果モデル構築

Modelica はオブジェクト指向で方程式をベースとするプログラミング言語で、モデル定義を行うことができる。その再利用可能なコンポーネントと複合体 複数のアプリケーションドメインからの部品を含むアプリケーションは非常にモデル構築に有効である[71], [72]。また、Modelica の多くの利点は、次のように示されている。

- 1) インターフェイスはユーザーフレンドリーな、シンプルかつ効率的である[73]。
- 2) 大規模のマルチドメインモデリングに適しており複雑でユニークな技術である[74]。
- 3) 数学的記述可能な宣言型があり、これによって分析が簡素になり、コードは 簡潔で、デグレートの少ない変更が可能である[71]。
- 4) 特定の変数を手動で[75] 変更する必要がない。

上記のように、Modelica はモデル構築に有効な機能を有しており、オープンソースソフトウェアで、ツールとアルゴリズムの開発が可能である。特に学術的なユーザーに向けたソフトウェアである[76]。Modelicaha 誰もが簡単に無料でダウンロードすることができる。ダウンロードを行うと、ソフトウェアとガイダンス Dr. Modelica[72]と呼ばれる資料が得られる。この資料では Modelica について基本的な事項が記載されており、モデリングとシミュレーションの概念を理解するのに有用な資料である。

Modelica の説明書は、モデリングとシミュレーションの導入部分を理解するのに便利である。しかし、この Modelica の説明書中にも理解が難しい部分がある。特に、変換プロセスの理解には難を要する。ソルバーオーダーシステムについても明確な説明がない。我々は Modelica でソルバーオーダーシステムを提案する。今回、我々は代数変換を解く説明とソート手順の説明を行う。

次に、Modelica を使用していない人が Modelica を使用しない理由には大きく二つある。ひとつは制御システム設計エンジニア達には Modelica 以外の適切かつ十分な選択肢があるので、Modelica に切り替える必要を感じていないからである。もう一つの理由は、Modelica を使用して因果関係モデルを構築するよりも、現実から原因を発見して解決するほうがはるかに簡単だからである(例: Simulink を使うなど)。加えて、Modelica は非常に適切なツールであるが、理解するのが難しいということも今回わかった。Modelica は洗練されたライブラリだが、それゆえに、ユーザーは Modelica を使うことで、時に、モデリングに関する基本的な原則を忘れていても結果が得られるという事態が発生する難点があることも留意しなくてはならない[76]。

本論文では、基本的なモデリングの原則に新たな発見を附加することが目的である。アプローチとしては、Modelica と FEM と比較する。Modelica を使用し、FEM の概念テキスト



形式を作成する。多くのエンジニアは、この、高度なモデリングとシミュレーションに親しんでいる[160]。FEM は様々な分野で不可欠な技術に発展した。この研究では、Modelica を使って、因果関係をモデル化するエンジニアが増えることを期待する。本論文では、初心者が FEM アプローチと Modelica ソフトウェアを使用して、簡単にテキストモデリングできるように検討し、オリジナルとの比較、因果モデルと因果モデルを用いた概念と FEM アプローチシミュレーション結果をもって議論する。

### 5.5.1 ソルバオーダリングシステムを用いた単純回路モデルの解説

本節では、変換とソートの手順の詳細なステップについての説明をする。

さらに、本論文では、簡単な回路モデル構築を紐解くことから、モデル構築を理解しやすくするための Modelica 資料に対して追加説明を加える。

その抽出方法 方程式を比較する FEM とのコンセプト。モデルでは、翻訳と 図 5.16 にモデルの変換、実行イメージを示す。Modelica で作成されたモデルは、変換機能によってフラットモデルに変更され、それから水平および垂直ソート機能を分析機として使っている(図 5.17)。

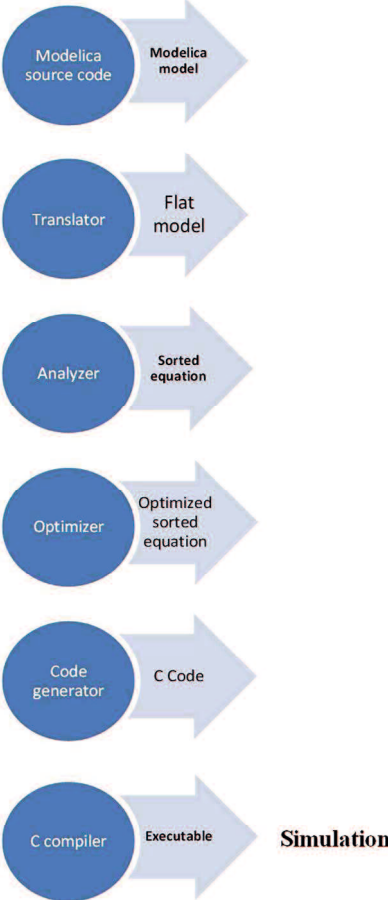


図 5.16 モデル化されたモデルの変換および実行のプロセス

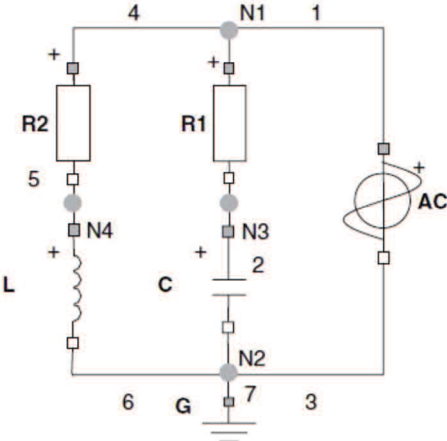


図 5.17 Modelica Concept のためのラベル付き簡易回路モデル

浮動小数変数と固定小数変数どちらで接続するかで Modelica への接続形態が 2 タイプに分かれる。

- 固定小数変数の等価結合 キルヒフの最初の法則.
- 次の式に従ってフロー変数の Sum-to-Zero 結合キルヒフの現在の法則.

オーダーシステムの理解なしに、抽出する方法を理解することは難しい。それはオーダーシステムについての説明がないからである。

本研究では、変数を抽出するためにオーダーシステムを用意しているが、回路をモデル化するには、暗黙的に 微分代数方程式系 (DAE 系) 代数と微分を明示的に定式化する方程式が必要である。

手順は次の 3 つである。

1. 水平ソート
2. 垂直分類
3. 状態空間表現

#### 水平ソートの規則:

- 1) 状態変数 (分化した フォーム) を known 変数とすることができる。
- 2) 最初、ソルバーオーダーシステムへの変数が unknown を 1 つだけの場合、解かれた変数は、known 変数になる。
  - 1) すべての変数がなくなるまで、unknown 変数を 1 つずつ解き known 変数にする。
  - 2) 1 つの式にのみ現れる変数は、その方程式を使って解いた。
  - 3) すべてのルールは再帰的に使用できる。

#### 垂直ソートの規則:

方程式に対して垂直ソートを行うことができる。

最初のステップでは、Cv と Li を known (一時的に) 変数を代入し、代数的に ベクトルの変数は式 (5.6) と (5.7) のようになる。

$$C.i = C.C * \text{der}(C.v) \quad (5.7)$$

$$L.v = L.L * \text{der}(L.i) \quad (5.8)$$

#### A. 水平方向のソーティング

表 I に示すソルバ順序付けシステムの例

まず、Cv と Li を  $t = 0$  で利用できると仮定する。

シミュレーション (入力として t, 状態変数として Li, Cv)。

水平ソートの手順は次のとおり。

- 水平ソートは入力 (時間) と 状態変数の初期値 (Li と Cv)。

- 次のターゲットは **unknown** 変数 ( $C_i, L_v$ ) である.
- 水平ソートを中間変数で除算することがあります ( $R_{2.v}, R_{1.v}, R_{1.pv}$ ) を生成する.
- 最後に逆ソートして, それを表現チェーンとして整理するターゲット **unkown** 変数 ( $C_i, L_v$ ) から削除する.
  - 1)  $C_i = C_{pi}$
  - 2)  $0 = R_{1.ni} + C_{pi} \rightarrow C_{pi} = - R_{1.ni}$
  - 3)  $0 = R_{1.pi} + R_{1.ni} \rightarrow -R_{1.ni} = R_{1.pi}$
  - 4)  $R_{1.i} = R_{1.pi} \rightarrow R_{1.pi} = R_{1.i}$
  - 5)  $R_{1.v} = R_{1.R} * R_{1.i} \rightarrow R_{1.i} = R_{1.v} / R_{1.R}$

表 5.3 C.I の水平ソート順序の例

1) C.i=C.p.i = -R1.n.i = R1.p.i = R1.i = R1.v/R1.R (Reverse Horizontal sort)									
AC	0	= AC.p.i + AC.n.i	L	0				= L.p.i + L.n.i	
AC.v		= AC.p.v - AC.n.v		L.v				= L.p.v - L.n.v	
AC.i		= AC.p.i		L.i				= L.p.i	
AC.v		= AC.VA* $\sin(2*AC.PI*AC.f*time)$ ;		L.v				= L.L* $\text{der}(L.i)$	
R1	0	= R1.p.i + R1.n.i <sup>③</sup>	G	G.p.v = 0					
R1.v		= R1.p.v - R1.n.v							
R1.i		= R1.p.i		④					
R1.v		= R1.R*R1.i		⑤					
R2	0	= R2.p.i + R2.n.i	wires	R1.p.v	=	AC.p.v		=	// wire 1
R2.v		= R2.p.v - R2.n.v		C.p.v	=	R1.n.v		=	// wire 2
R2.i		= R2.p.i		AC.n.v	=	C.n.v		=	// wire 3
R2.v		= R2.R*R2.i		R2.p.v	=	R1.p.v		=	// wire 4
				L.p.v	=	R2.n.v		=	// wire 5
				L.n.v	=	C.n.v		=	// wire 6
				G.p.v	=	AC.n.v		=	// wire 7
C	0	= C.p.i + C.n.i	Flow	0	=	AC.p.i + R1.p.i + R2.p.i		=	// N1
C.v		= C.p.v + C.n.v	at	0	=	C.n.i + G.p.i + AC.n.i + L.n.i		=	// N2
C.i		= C.p.i	① node	0	=	R1.n.i + C.p.i	②	=	// N3
C.i		= C.C* $\text{der}(C.v)$		0	=	R2.n.i + L.p.i		=	// N4

Total: 32 equations

$$C.i = R1.v/R1.R \quad (5.9)$$

$$R1.v = R1.p.v - R1.n.v = R1.p.v - C.v \quad (5.10)$$

$$R1.p.v = A C.VA*\sin(2*AC.f*AC.PI*t) \quad (5.11)$$

$$L.v = L.p.v - L.n.v = R1.p.v - R2.v \quad (5.12)$$

$$R2.v = R2.R*L.i \quad (5.13)$$

### B.垂直方向のソートテイング

次のステップは垂直ソートである。ソート順は 図 5.18 抽出された変数の結果を表 II に示す。改訂版を表 III に示す。

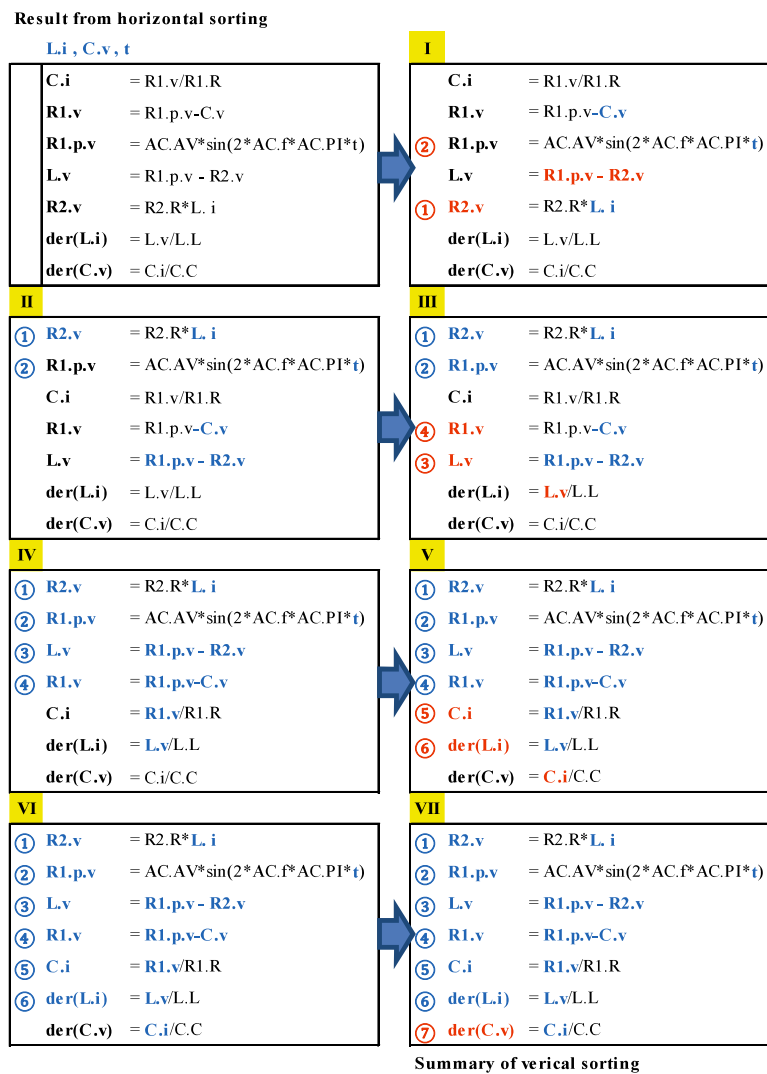


図 5.18 垂直ソート順

表 5.4 V MODELICA の単純回路モデルから抽出された変数

R1.p.i	R1.n.i	R1.p.v	R1.n.v	R1.v
R1.i	R2.p.i	R2.n.i	R2.p.v	R2.n.v
R2.v	R2.i	C.p.i	C.n.i	C.p.v
C.n.v	C.v	C.i	L.p.i	L.n.i
L.p.v	L.n.v	L.v	L.i	AC.p.i
AC.n.i	AC.p.v	AC.n.v	AC.v	AC.i
G.p.i	G.p.v			

次に, 方程式は図 5.19 に示すように BLT(Block Lower Triangular)に変換される.

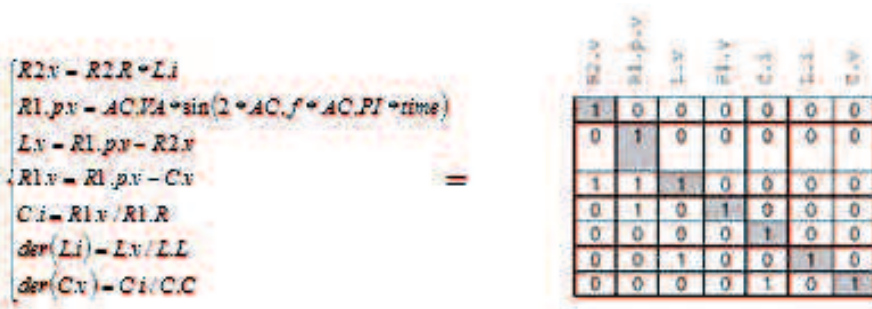


図 5.19 簡単な回路モデルの例の Block Lower Triangular(BLT)フォーム

表 5.5 簡易回路モデルからの可変抽出テーブルの改訂版(提案)

Total 32 variables		connector				In component	
State variable : L.i ,C.v		Pin.p		Pin.n		flow	nonflow
component	R1	R1.p.i	R1.p.v	R1.n.i	R1.n.v	R1.i	R1.v
	R2	R2.p.i	R2.p.v	R2.n.i	R2.n.v	R2.i	R2.v
	C	C.p.i	C.p.v	C.n.i	C.n.v	C.i	C.v
	L	L.p.i	L.p.v	L.n.i	L.n.v	L.i	L.v
	AC	AC.p.i	AC.p.v	AC.n.i	AC.n.v	AC.i	AC.v
	G	G.p.i	G.p.v				

図 5.19 の Ci 行には小さなタイプミスがあるため, BLT の小さなリビジョンを提案する. 改訂版は表 IV に示されている. 垂直ソート結果のマトリックスは次のとおりである.

$$\begin{Bmatrix} R2.v \\ R1.p.v \\ L.v \\ R1.v \\ C.i \\ \text{der}(L.i) \\ \text{der}(C.v) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & & & & & & \\ & 1 & & & & & \\ & & 1 & & & & \\ & & & 1 & & & \\ & & & & 1 & & \\ & & & & & 1 & \\ & & & & & & 1 \\ & & & & & & & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} L.i_0 \\ C.v_0 \\ AC.VA \cdot \sin(\ ) \\ R2.v \\ R1.p.v. \\ L.v \\ R1.v \\ C.i \\ L.i \\ C.v \end{Bmatrix} \quad (5.14)$$

### C.状態空間表現

次のステップは、状態空間表現を行うことです。BLT形式から、状態空間表現を2つのケースで行う。

#### - 理論的ケース

$$C.i = C.C * \text{der}(C.v)$$

$$L.v = L.L * \text{der}(L.i)$$

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \frac{dC.v}{dt} \\ \frac{dL.i}{dt} \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{1}{C.C} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L.L} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} C.i \\ L.v \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{C.C} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L.L} \end{bmatrix} \left( \begin{bmatrix} \frac{1}{R1.R} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} R1.v \\ R1.p.v - R2.v \end{Bmatrix} \right) \\ &= \begin{bmatrix} \frac{1}{C.C} & \frac{1}{R1.R} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L.L} \end{bmatrix} \left( \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} R1.p.v \\ C.v \\ R2.v \end{Bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} \frac{1}{C.C} & \frac{1}{R1.R} & -\frac{1}{C.C} & \frac{1}{R1.R} & 0 \\ \frac{1}{L.L} & 0 & -\frac{1}{L.L} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & R2.R \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} R1.p.v \\ C.v \\ L.i \end{Bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{1}{C.C} & \frac{1}{R1.R} & -\frac{1}{C.C} & \frac{1}{R1.R} & 0 \\ \frac{1}{L.L} & 0 & -\frac{R2.R}{L.L} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} R1.p.v \\ C.v \\ L.i \end{Bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -\frac{1}{C.C} & \frac{1}{R1.R} & 0 \\ 0 & -\frac{R2.R}{L.L} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} C.v \\ L.i \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{C.C} & \frac{1}{R1.R} \\ \frac{1}{L.L} \end{bmatrix} \{ AC.AV * \sin(2 * AC.f * AC.PI * t) \} \end{aligned} \quad (5.15)$$

#### - 実用的なケース

(5.9)から(5.13)までの水平結果から、式(5.16)のように状態空間表現の実例を得ることができる。



$$\begin{aligned}
 R1.v &= R1.p.v - C.v \\
 R1.p.v &= AC.VA * \sin(2 * AC.f * AC.PI * t) \\
 R2.v &= R2.R * L.i \\
 L.v &= L.p.v - L.n.v = R1.p.v - R2.v \\
 C.i &= R1.v / R1.R
 \end{aligned}$$

$$\begin{Bmatrix} \frac{dL.i}{dt} \\ \frac{dC.v}{dt} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L.L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C.C} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} L.v \\ C.i \end{Bmatrix} \tag{5.16}$$

表 5.6 シンプルな回路モデルのブロック下三角の形のための改訂版(案)

	R2.v	R1.p.v	L.V	R1.v	C.i	L.i	C.v
R2.v	1						
R1.p.v		1					
L.v	1	1	1				
R1.v		1		1			
C.i				1	1		
del(L.i)			1			1	
del(C.v)					1		1

### 5.5.2 Modelica を用いた Fem アプローチによる因果モデルと因果モデル構築

#### (1) Modelica と FEM アプローチにおけるオリジナルコンセプトの比較

図 5.16 に示す通り, FEM アプローチによれば, まず, モデル・オリジナルのコンセプトと FEM の違い モデルの翻訳と実行の段階でのアプローチモデル. 前に説明したように, モデルの概念では, 分析器として水平および垂直ソーティングを行い, ソートされた方程式を得る. FEM アプローチを使用することにより, より簡単なプロセスとなる. 簡単な回路問題を, 例えば, モデルでは, 第 1 のモデルは, すべての変数 (known と unknown の両方) を分離するのが難しい. FEM アプローチでは, known システムモデル構築後の unknown 変数 モデル構築を行うが, 初心者にとっては難しい. とくにマルチドメインでは, 別のドメインでは他のコネクタを使用する必要があり分かりにくい. 例えば, 電気ではピンを使用する.

機械的領域でフランジを使用する。特別なコネクタを使用する必要がある。FEM アプローチにはコネクタのコンセプトはない。さらに、他の違いは我々ができなかったことである。FEM アプローチでのグラフィカルモデリングを使用する。この問題は、一つの欠点である。確かに、時にはむしろ、テキストと比較してグラフィカルモデリングを使用すると便利である。とくに初心者のためのモデリングである。それにも関わらず、前述のように実践でマルチドメインでのコネクタの定義は難しい。

FEM アプローチでは、問題を解決するためのモデリング形式としてテキストのみを使用する。そして、このアプローチを使うことで、異なるソフトウェアのための言語の優位性が発揮される。他の言語の同じ言語または同じテキストモデル `scilab` の原因モデルのような因果モデルを持つソフトウェアを使うことができる。

## (2) Modelica を用いた FEM アプローチ

本節では、FEM アプローチを因果モデルとして提案する。また、因果モデル FEM アプローチによる構築も提案する。グラフィックモデリング Modelica における元の概念を図 5.20 に示す。Modelica では、すべての `known` 変数(たとえば、`a` グラウンドまたは電圧源)をグラフモデル上で最初から、ある意味ではすでにそれが因果関係になっていると言えるだろう モデル。すべてのノード平衡方程式を区別せずに `known` と `unknown` 可変 ( $V_j$  を ,  $I, J$ )。その後、`known` 変数に値が格納されます。その結果、必然的に `unknown` 変数(ノード電圧と加算電流)が得られる。理解しやすくするために、4つのジョイント、すなわち  $J_1, J_2, J_3, J_4$  を使用する。図 5.21 に FEM アプローチのグラフィカル・モデリングを示す。

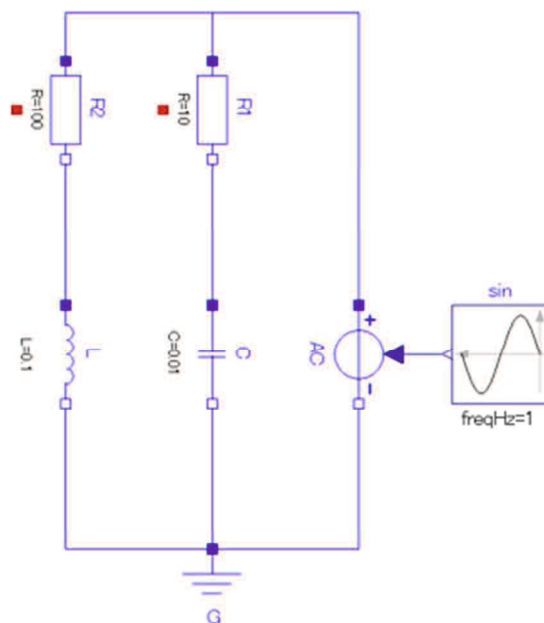


図 5.20 モデルのグラフィカルモデリング(オリジナル)

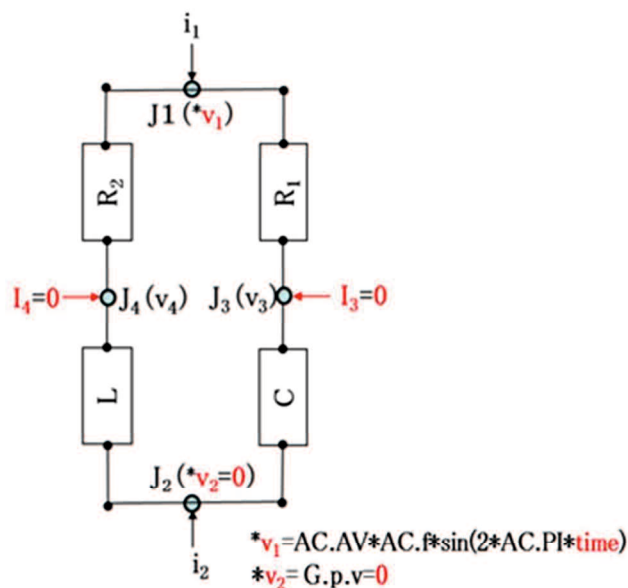


図 5.21 Modelica におけるグラフィカルモデリング (FEM アプローチ)

表 5.3 に示した簡単な回路モデルから抽出された式のため Modelica に元のテーブルと比較し、我々は FEM アプローチを提供します。Modelica のコンポーネントは、FEM アプローチ、すなわち AC, R1, R2, C および L の要素として名前が付けられます。モデルでは、各コンポーネントは最初のステップで定義され、次にコネクタに定義される。FEM では、各要素はすでに接続されており、ジョイントの変数は v1, v2, v3, v4 という名前になっている。したがって、元の Modelica と FEM のアプローチの違いは、命名規則にある。FEM では、スカラー変数だけでなく、ベクトルでもあり、異なるドメインを組み合わせることもできる。FEM の内部変数の定義は、R1, R2.i1 では R1.i1 と R1.i3, R2 では C.i4, C では C.i2, L では R2.i4, L.i3 と L.i4 である。電圧の場合は v1, v2, v3, v4, 電流の場合は i1, i2, i3, i4 です。本研究では、図 5.22 の単純回路モデル(内部変数表現)のシステムモデルを(式 5.17)として作ることができる。

$$\begin{cases} R1.i_1 + R2.i_1 = i_1 \\ L.i_2 + C.i_2 = i_2 \\ R1.i_3 + C.i_3 = i_3 \\ R2.i_4 + L.i_4 = i_4 \end{cases} \quad (5.17)$$

表 5.7 単純回路モデルから抽出された方程式に対する FEM アプローチ

AC	$0 = \begin{Bmatrix} 1 & -1 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} AC.p.i \\ AC.n.i \end{Bmatrix}$ $AC.AV * \sin(\ ) = \begin{Bmatrix} 1 & -1 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1 & -1 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} v_1 \\ 0 \end{Bmatrix}$ $\therefore v_1 = AC.AV * \sin(\ )$	L	$\begin{Bmatrix} v_2 \\ v_4 \end{Bmatrix} = L.L * del \left( \begin{Bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} L.p.i \\ L.n.i \end{Bmatrix} \right)$ $\therefore \{v_2 - v_4\} = L.L * del(L.p.i)$
R1	$\begin{Bmatrix} R1.p.i \\ R1.n.i \end{Bmatrix} = \frac{1}{R1.R} \begin{Bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} v_1 \\ v_3 \end{Bmatrix}$	G	$v_2 = 0 = \text{constant}$ $G.p.i = \text{Unknown variable}$ (reaction electric current)
R2	$\begin{Bmatrix} R2.p.i \\ R2.n.i \end{Bmatrix} = \frac{1}{R2.R} \begin{Bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} v_1 \\ v_4 \end{Bmatrix}$	wires	$v_1, v_2, v_3, v_4$
C	$\begin{Bmatrix} C.p.i \\ C.n.i \end{Bmatrix} = C.C * del \left( \begin{Bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} v_3 \\ v_2 \end{Bmatrix} \right)$ $= C.C * \begin{Bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{v}_3 \\ \dot{v}_2 \end{Bmatrix}$	Flow at node	$0 = AC.i + R1.p.i + R2.p.i \quad //J1$ $0 = C.n.i + G.p.i + AC.n.i + L.n.i \quad //J2$ $0 = R1.n.i + C.p.i \quad //J3$ $0 = R2.n.i + L.p.i \quad //J4$

表 5.6 及び 5.7 の構成要素, 要素および内部変数の定義を入力することにより, 式 5.18 のようにノード変数表現を持つ流れ変数平衡方程式を得ることができる.

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & CC & -CC & 0 \\ 0 & -CC & CC & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{v}_1 \\ \dot{v}_2 \\ \dot{v}_3 \\ \dot{v}_4 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{R1.R} + \frac{1}{R2.R} & 0 & -\frac{1}{R1.R} & -\frac{1}{R2.R} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{R1.R} & 0 & \frac{1}{R1.R} & 0 \\ -\frac{1}{R2.R} & 0 & 0 & \frac{1}{R2.R} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{LL} & 0 & -\frac{1}{LL} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{LL} & 0 & \frac{1}{LL} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \int v_1 dt \\ \int v_2 dt \\ \int v_3 dt \\ \int v_4 dt \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \end{Bmatrix} \quad (5.18)$$

FEM アプローチでは, 左辺の既知変数と右辺の未知変数を以下のように簡単に分けることができる.

- 既知の変数:

$$v_1 = \sin(2\pi \cdot \text{time}) \text{ "AC.VA"}$$

$$v_2 = 0 \text{ "G.p.v"}$$

$$i_3 = 0;$$

$$i_4 = 0;$$

- 次に, 未知変数  $i_1$ ,  $i_2$ ,  $v_3$ ,  $v_4$  を解くことができる.

その後, Modelica ソフトウェアを使用してテキストモデルを構築し, FEM アプローチによるオリジナルコンセプトのテキストモデリングを比較することができる. 単純な回路モデルでは, テキストモデルを作成することは困難ではない. より複雑なシステムでは, すべてのコンポーネント間で多くのコネクタをモデルのコンセプトに存在させることがより複雑になる. FEM アプローチは, ユーザーが Modelica を利用するための別の選択肢となり得る. 本研究では, FEM アプローチ, 因果モデルおよび因果モデル構築の2つのモデルを作成する. FEM アプローチによる因果モデル構築は2つの方程式しか必要としませんが, 非因果モデルは4つの方程式を必要とする. テキストによるモデリングとシミュレーションの結果を図 5.22-5-27 に示す. すべてのアプローチのシミュレーション結果は同じである.

```

model modelicaori
import Modelica.Electrical.Analog;
constant Real pi = Modelica.Constants.pi;
//
Modelica.Electrical.Analog.Basic.Resistor R1(R = 10);
Modelica.Electrical.Analog.Basic.Capacitor C(C = 0.01);
Modelica.Electrical.Analog.Basic.Resistor R2(R = 100);
Modelica.Electrical.Analog.Basic.Inductor L(L = 0.1);
Modelica.Electrical.Analog.Sources.SignalVoltage AC;
Modelica.Electrical.Analog.Basic.Ground G;
//
Modelica.Blocks.Sources.Sine sin(amplitude = 1, freqHz = 1);
equation
connect(sin.y, AC.v);
connect(AC.n, G.p);
connect(R2.p, AC.p);
connect(C.n, G.p);
connect(L.n, G.p);
connect(R2.n, L.p);
connect(R1.n, G.p);
connect(R1.p, AC.p);
//
annotation(Icon(coordinateSystem(extent = {{-100, -100}, {100, 100}}, preserveAspectRatio = true, initialScale = 1, grid = {1, 1})), Diagram(coordinateSystem(extent = {{-100, -100}, {100, 100}}, preserveAspectRatio = true, initialScale = 0.1, grid = {1, 1})), experiment(StartTime = 0, StopTime = 5, Tolerance = 1e-06, Interval = 0.01));
end modelicaori;

```

図 5.22 Modelica オリジナルコンセプトによるテキストモデリング

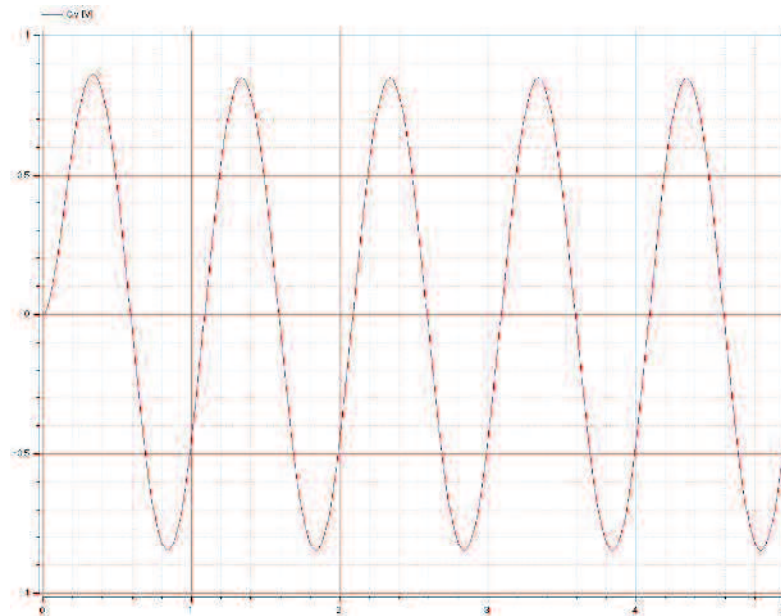


図 5.23 Modelica オリジナルコンセプトによるシミュレーション結果

```

model SimpleCircuit_FEM_20
  extends Modelica.Icons.Example;
  import SI = Modelica.SIunits;
  import Cont = Modelica.Blocks.Continuous;
  constant Real pi = Modelica.Constants.pi;
  //
  parameter SI.Resistance R1(start = 10) "Resistance-1";
  parameter SI.Resistance R2(start = 100) "Resistance-2";
  parameter SI.Capacitance C(start = 0.01) "Capacitance";
  parameter SI.Inductance L(start = 0.1) "Inductance";
  //
  Real v1, v3, v4;
  // Real i1, i2;
  Real integ_v4;
  //
equation
  // preliminary preparation.
  der(integ_v4) = v4;
  C * der(v3) + (v3 - v1) / R1 = 0 "at joint-3 ";
  (v4 - v1) / R2 + integ_v4 / L = 0 "at joint-4 ";
  // analysis condition
  v1 = sin(2 * pi * time) " AC.VA ";
  // v2 = 0 " G.p.v ";
  // i3 = 0;
  // i4 = 0;
  //
  annotation(experiment(StartTime = 0, StopTime = 5, Tolerance = 1e-06, Interval = 0.01));
end SimpleCircuit_FEM_20;

```

図 5.24 FEM アプローチのためのテキストモデリング(因果モデル構築)

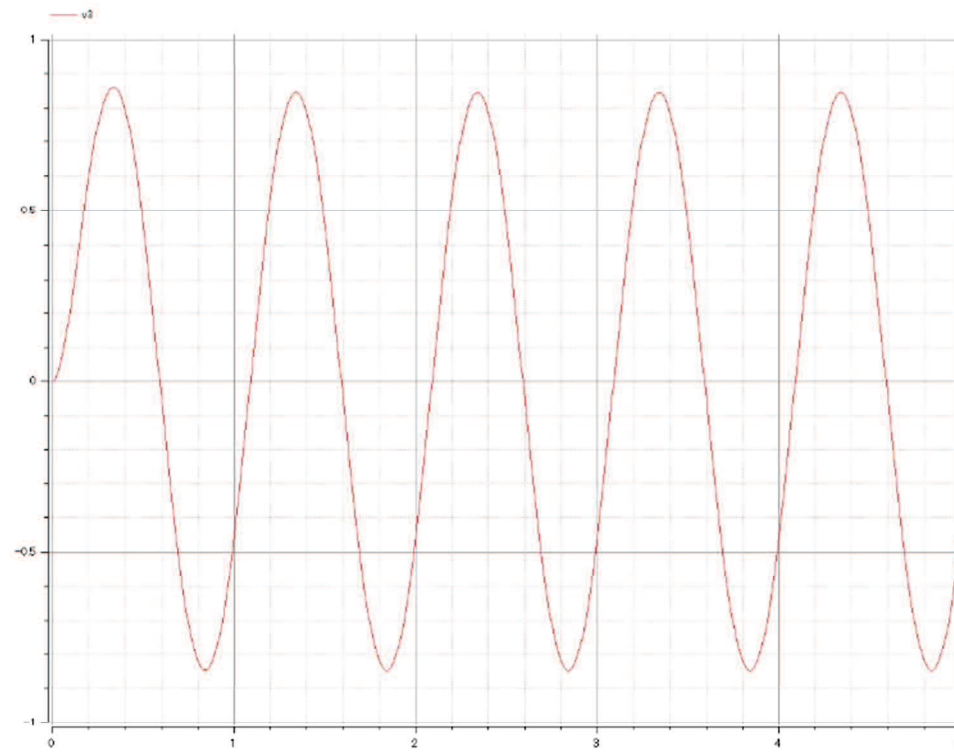


図 5.25 FEM アプローチのシミュレーション結果(因果モデル構築)

```

model SimpleCircuit_FEM_13
  extends Modelica.Icons.Example;
  import SI = Modelica.SIunits;
  constant Real pi = Modelica.Constants.pi;
  //
  parameter SI.Resistance R1(start = 10) "Resistance-1";
  parameter SI.Resistance R2(start = 100) "Resistance-2";
  parameter SI.Capacitance C(start = 0.01) "Capacitance";
  parameter SI.Inductance L(start = 0.1) "Inductance";
  //
  Real v1, v2, v3, v4;
  Real i1, i2, i3, i4;
  Real integ_v2, integ_v4;
  //
equation
  // preliminary preparation
  der(integ_v2) = v2;
  der(integ_v4) = v4;

  (v1 - v3) / R1 + (v1 - v4) / R2 = i1 " at joint-1 ";
  C * (der(v2) - der(v3)) + (integ_v2 - integ_v4) / L = i2 " at joint-2 ";
  C * ((-der(v2)) + der(v3)) + ((-v1) + v3) / R1 = i3 " at joint-3 ";
  ((-v1) + v4) / R2 + ((-integ_v2) + integ_v4) / L = i4 " at joint-4 ";
  // analysis condition
  v1 = sin(2 * pi * time) " AC.VA ";
  v2 = 0 " G.p.v ";
  i3 = 0;
  i4 = 0;
  //
  annotation(experiment(StartTime = 0, StopTime = 5, Tolerance = 1e-6, Interval = 0.01));
end SimpleCircuit_FEM_13;

```

図 5.26 FEM アプローチのためのテキストモデリング(因果モデル構築)

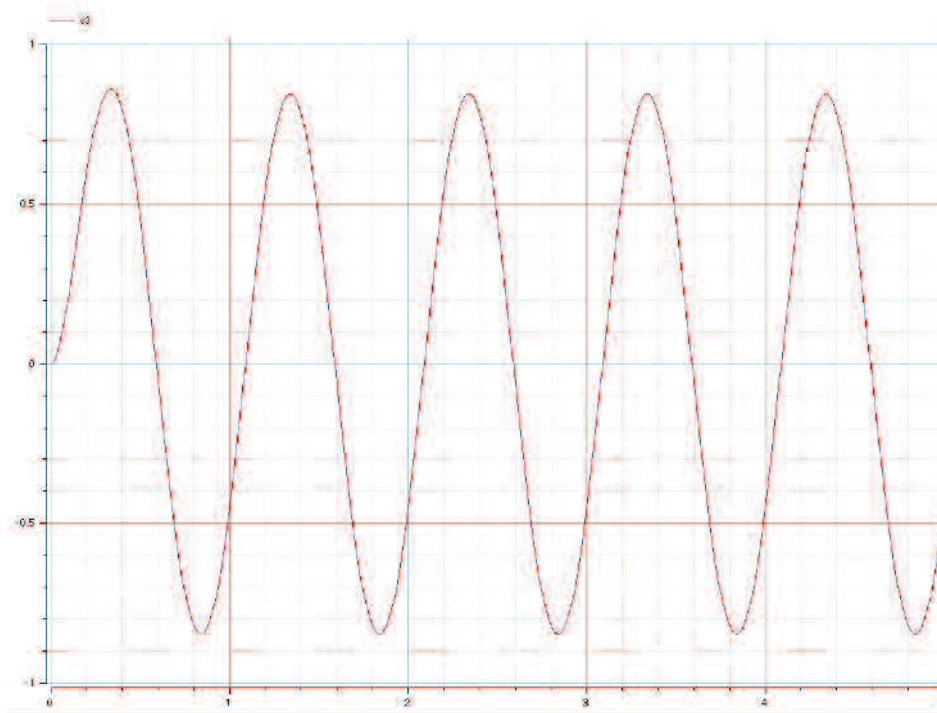


図 5.27 FEM アプローチのシミュレーション結果(因果モデル構築)

### 5.5.3 まとめ

本節では、Modelica の資料にソルバーオーダーシステムの説明を追加、改善した。Modelica におけるソーティングステップとコネクタのコンセプトを解くことができる。FEM のアプローチを使用して、FEM アプローチによるテキストモデリング 因果関係と因果モデルの構築が行われ、Modelica のコンセプトと比較した。シミュレーション結果は次のとおり。すべての異なるテキストモデリングから得られた結果は同じである。したがって、FEM のアプローチは、初心者のための代替案となる可能性があることを示した。



## 5.6 ピエゾ式インクジェットプリンタヘッドモデルの構築

コンピュータ上で作成したデータを紙などの被印刷物に転写するためのプリンタと呼ばれる装置は、日常生活から産業用の用途として多岐にわたる場面で多く使われている。プリント方式の観点からプリンタを分類すると様々な種類が存在するが、現在では電子写真方式とインクジェット方式の2種類が主流となっている。電子写真方式とは一般に「レーザープリンタ」と称されるもので、その多くはオフィス用途に使われている。その理由としてインクジェットプリンタに比して高速印刷が可能な点が挙げられる。一方でインクジェット方式は比較的低速ではあるが高画質であること、また初期導入コストが安いことから家庭用として広く普及している。さらに近年では非接触印刷が可能で、インクを加熱しないためにインク選択の制約が少ないこと、さらに被印刷物選択の自由度が高いために、産業・工業分野へと用途の拡大が進んでいる[77]。一例として紀州技研工業では鶏卵への印字にインクジェットプリンタを用いている[78]。

インクジェットプリンタを吐出方式の観点から大別すると、サーマル方式とピエゾ式の2種類になる。前者の方式ではノズル内でインクを加熱して圧力を発生させ、その圧力でインクを押し出すものである。ヘッド内に取り付けられた微小なヒーターがインクを加熱することで急激に気体へと変化する。すなわち微小なヒーターを使うためノズルのサイズが小さく、一般的なピエゾ方式のノズルの1～100分の1程度の大きさである[79]。また後者のピエゾ式インクジェットプリンタは圧電素子の逆圧電効果を利用することで液滴を吐出し、印刷をおこなっている。一例として振動板と圧電素子とのバイメタル効果を利用したものに着目すると、駆動電圧を入力することで圧電素子が伸縮し、これが圧電素子に固定された振動板のたわみ変形を引き起こす。これによってインク室の体積が増減し、内部のインク圧力が上昇した後に液滴がノズルから吐き出される。

インクジェットプリンタにおいて、ヘッドはインク吐出に直接関係するために、その設計は非常に重要である。プリンタヘッドに対する顧客の要求として、より小さい液滴を正確に長期間安定して吐出させることがある[67]。しかし、こうした要求に応えるためにはヘッド温度、ヘッド製造精度などに起因する液滴吐出方向のばらつき、液滴体積や速度のばらつきを減らすことが望ましい。

そこで、本節ではピエゾプリンタヘッドについて5.2節から5.4節で検討した内容に基づきピエゾ式インクジェットプリンタヘッドモデルの構築方法について説明する。

### 5.6.1 ピエゾ式インクジェットプリンタの吐出原理

ピエゾ式インクジェットヘッドは圧電素子に電圧を印加することで、圧電素子を変形させてインクを吐出する。プリンタヘッドのモデルを作成するためには、アクチュエータ及びインクの挙動を把握しておく必要がある。特にヘッド内のノズル先端に毛細管力によって形成されるメニスカスの挙動がプリンタの設計において重要である。

図 5.28 にメニスカスの挙動を示す。インクジェットプリンタにおいて、メニスカスの挙動は液滴の吐出に直接に関係するため、重要である。インクがノズル先端から飛び出すと同時にメニスカスを引き込む力を与えることでインクの先端部を切り離し、液滴として吐出させる。吐出されたインクの体積分だけメニスカスは後退する。その後毛細管力によってメニスカスは元の位置に戻る。すなわちインクは補充され最初の工程に戻ることで、以上の工程を繰り返すことでプリンタは印刷媒体に対して印刷をおこなう。また本研究で対象とするインクジェットプリンタは図 5.29 に示すように、液滴がノズルから次々と吐き出され、それらが最終的にひとつとなって被印刷物に着弾する方式のものである。

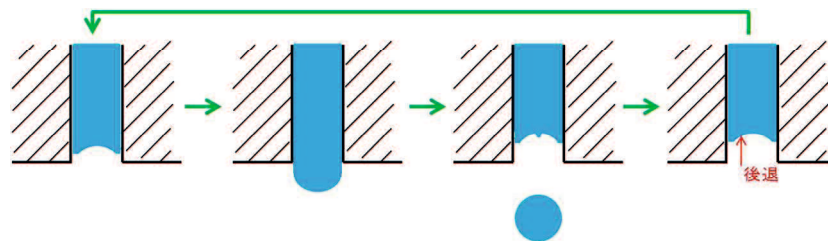


図 5.28 メニスカスの挙動

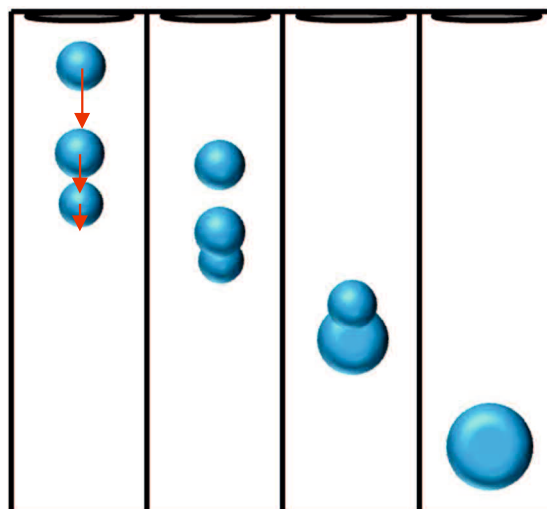


図 5.29 液滴吐出時のイメージ

## 5.6.2 機械系モデルの構築

ここではピエゾ式インクジェットプリンタヘッドのシステムモデルを構築するために、ヘッドを質量要素、ばね要素、粘性要素からなる機械系モデルへ置き換えた。さらに各種の理論式から機械系モデルの集中定数要素について導出を行った。ただし、これ以降の式に含まれる記号の定義については、前述のものと重複する可能性があるため、これまでとは別のものとする。

### (1) ピエゾヘッドの運動方程式

ピエゾヘッドの応答を表すために、これまで等価電気回路モデルや数値流体力学といった手法が利用されてきた。前者の方法は相似性を利用しているため近似が多く、後者の方法は解析に膨大な時間が必要になる。そのため本研究ではなるべく本来の物理現象を数式に変換した、流体-機械モデルを構築する。またモデル化の際にはインクの圧縮性と自由表面について考慮する。流体-機械モデルとすることから、未知関数として平均流体粒子変位  $x$ 、既知関数として力  $f$  を用いる。平均流体粒子変位を用いた理由は、メニスカスの変形を 1 次元で表現するためである。すなわち変化する体積 (3 次元) を定数である断面積 (2 次元) で除することで集中化をおこなう。図 5.30 に示すようにノズル内にメニスカスが形成されている時、この曲面と同じ球面をもつ球を考える。この球のノズル先端以下の体積  $V_m$  をノズルの断面積  $S_n$  で除したものが平均流体粒子変位となる。すなわち平均流体粒子変位は

$$x = \frac{V_m}{S_n} \quad (5.19)$$

となる。また接触角  $\theta [^\circ]$  は  $0 < \theta < 180$  の値をとる。接触角とメニスカスの関係を図 5.31 に示す。 $\theta = 0^\circ$  の時、球の直径  $R$  とノズルの直径  $r$  は一致する。従ってこの時  $x$  は

$$x = \frac{V_m}{S_n} = \frac{\left(\frac{4}{3}\pi R^3\right) \cdot \frac{1}{2}}{\pi r^2} = \frac{2}{3}r \quad (5.20)$$

となる。すなわち  $x$  は次のような値の範囲をとる。

$$-\frac{2}{3}r < x < \frac{2}{3}r \quad (5.21)$$

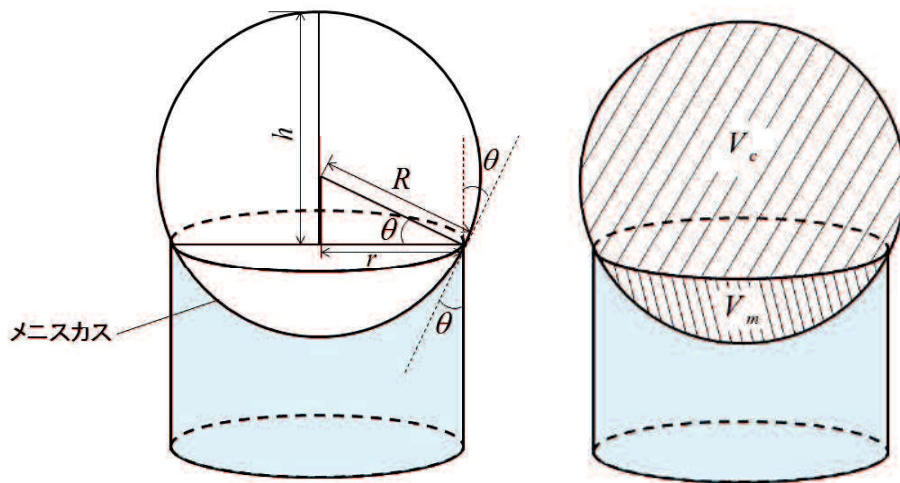


図 5.30 ノズルおよびメニスカスをなす球の模式図

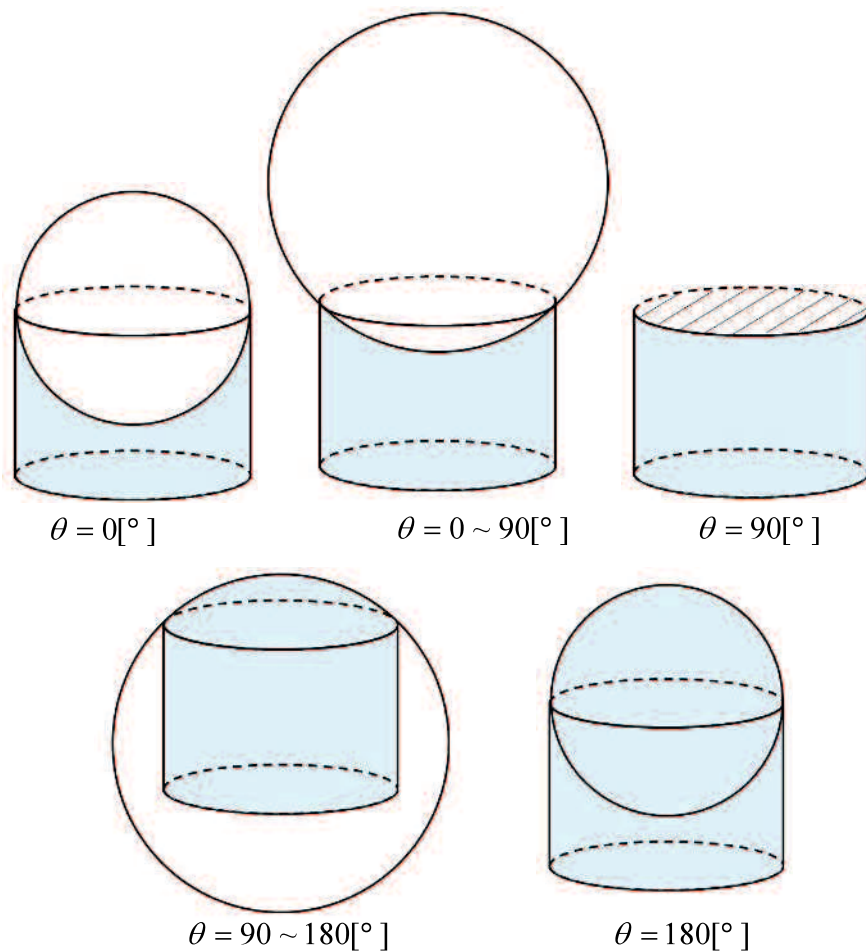


図 5.31 接触角とメニスカスの関係

本研究ではヘッドの基本構造をノズルとインク供給管を開口とした2つの穴を有するヘルムホルツ共鳴器と考え、図5.32に示すようにプリンタヘッドを機械系モデルに置き換えた。ノズルに対応する要素としてメニスカスによる非線形バネ、流路抵抗および質量を、アクチュエータに対応する要素として、積層変断面梁のばねを、圧力室に対応する要素としてヘルムホルツの共鳴器を、インク供給管に対応する要素として流路抵抗と質量を考えた。また各質量にアクチュエータから外力が加わるものとした。これに関して運動方程式を立てると式(5.5.1)のようになる。

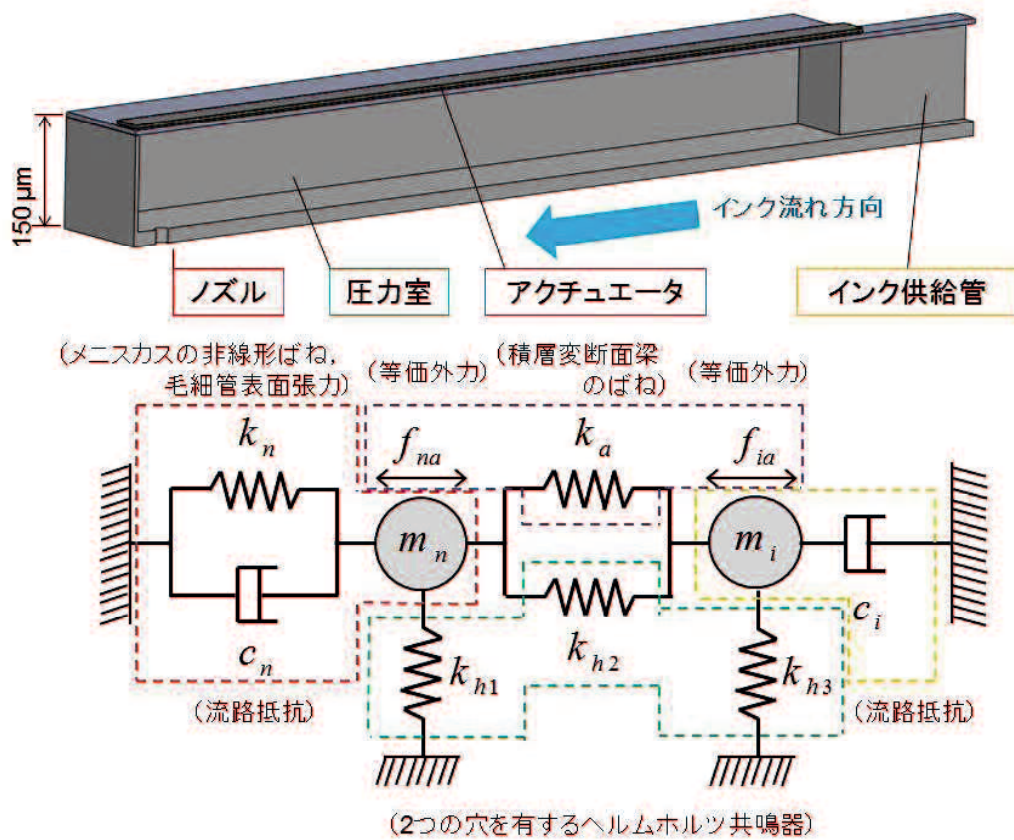


図 5.32 ピエゾ式プリンタヘッドモデル

$$\begin{bmatrix} m_n & 0 \\ 0 & m_i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_n \\ \ddot{x}_i \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_n & 0 \\ 0 & c_i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_n \\ \dot{x}_i \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{h1} + k_{h2} + k_n + k_a & -k_a - k_{h2} \\ -k_a - k_{h2} & k_{h2} + k_{h3} + k_a \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_n \\ x_i \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_{na} \\ f_{ia} \end{Bmatrix} \tag{5.22}$$

ここでの文字式の定義は以下の通りである.

$m_n$ : ノズル内の流体質量

$m_i$ : インク供給路の流体質量

$k_n$ : メニスカスのばね定数

$k_a$ : アクチュエータによるばね定数

$k_{h1}, k_{h2}, k_{h3}$ : ヘルムホルツによるばね定数

$c_n$ : ノズルの粘性係数

$c_i$ : インク供給路の粘性係数

## (2) 集中定数要素の導出

### a 質量要素の導出

ここでは式(5.22)中に含まれる集中定数要素の導出について述べる. はじめに質量要素について考える. 先に示したプリンタヘッドの機械系モデルに含まれる質量  $m$  の計算方法を以下に示す. 図 5.33 に示すような長さ  $l$ , 断面積  $S$  の管について考える. この管が密度  $\rho$  のインクによって満たされているとすれば, インクの質量  $m$  は式(5.5.2)で表される. またこの式は管断面が円形, 矩形どちらの場合にも適用できる.

$$m = \rho l S \quad (5.23)$$

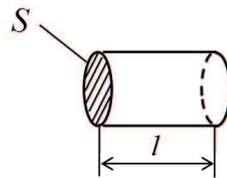


図 5.33 管

### b 粘性減衰要素の導出

次に粘性減衰要素について考える. 過渡応答解析において断面内の流速分布が定常流れの分布と同様であると仮定し, 非定常流れの流路抵抗を導く. 管路断面が直径  $d$  の円形の場合, 流体の粘度を  $\eta$ , 流量を  $q$ , 管路端の圧力差を  $p$  とする. ポアズイユ流れの式は

$$p = \frac{128\eta l}{\pi d^4} \dot{q} \quad (5.24)$$

となる. ここで外力  $F$  は圧力と面積の積で表されることから,

$$F = Sp = S \frac{128\eta l}{\pi d^4} \dot{q} \quad (5.25)$$

流量は管断面積と流体の速度の積で表すことができるから

$$\dot{q} = S\dot{x} \quad (5.26)$$

式(5.25)に式(5.24)を代入して

$$F = S \frac{128\eta l}{\pi d^4} \dot{q} = \frac{8\eta}{\pi^4} S^2 \dot{x} = 8\pi\eta l \dot{x} \quad (5.27)$$

従って管路断面が直径  $d$  で円形の場合の粘性係数は

$$8\pi\eta l \quad (5.28)$$

で表される. ノズルは断面が円形であることから

$$c_n = 8\pi\eta l \quad (5.29)$$

また, 矩形流路の場合は, 矩形の縦横長をそれぞれ  $a, b (a \geq b)$  として

$$c_i = \frac{64\eta l}{ab^3 X} (ab)^2 = \frac{64\eta l}{X} \frac{a}{b} \quad (5.30)$$

$$\text{ただし } X = \frac{16}{3} - \frac{1024}{\pi^5} \frac{b}{a} \left( \tanh \frac{\pi a}{2b} + \frac{1}{3^5} \tanh \frac{3\pi a}{2b} + \dots \right)$$

で表される.

### c ばね要素の導出 1

続いて, 式(5.22)中に含まれるメニスカスの復元力  $k_m x_n$  について考える. 先ほど述べたよう

に、インクが吐出された後、毛細管力の働きによってインクが補充される。従ってここではメニスカスの復元力を毛細管力により算出する、

図 5.34 に表面張力を説明するために、ガラス管と液体のモデルを示す。復元力を  $F$ 、インクの表面張力を  $\sigma$ 、ノズルの直径を  $r$ 、接触角を  $\theta$  とすれば表面張力による復元力は、

$$\begin{aligned} F &= 2\sigma \frac{1}{r} \cos \theta \cdot \pi r^2 \\ &= 2\pi r \sigma \cos \theta \end{aligned} \quad (5.31)$$

で表される。すなわち接触角に依存する非線形な復元力といえる。

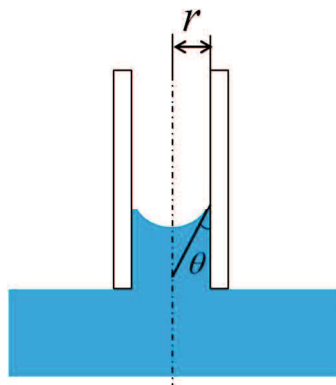


図 5.34 毛細管現象

しかし、先ほど記述した運動方程式は変数を平均流体粒子変位  $x$  としている。そのため、上に基づく復元力を運動方程式に組み込むには、この形のままで不適である。そこで、接触角  $\theta$  と変位  $x$  の関係式を導く必要がある。この関係式は以下ようになる。

$$x = -\frac{r \cos \theta}{3} \frac{2 + \sin \theta}{(1 + \sin \theta)^2} \quad (5.32)$$

しかし、接触角を式変形によって求めることは難しい。そこで、ニュートンラプソン法を用いて近似的に接触角を計算することを考える。

ここでニュートンラプソン法の公式は以下のとおりである。

$$x_n = x_{n-1} - \frac{f(x_{n-1})}{f'(x_{n-1})} \quad (5.33)$$

式(5.32)を変形して  $f(\theta)$  および  $f'(\theta)$  を求めることを試みる。式(5.32)を変形すると以下の



ようになる.

$$3x(1 + \sin \theta)^2 + r \cos \theta(2 + \sin \theta) = 0 \quad (5.34)$$

従って

$$f(\theta) = 3x(1 + \sin \theta)^2 + r \cos \theta(2 + \sin \theta) \quad (5.35)$$

これを  $\theta$  について微分して

$$f'(\theta) = 6x(1 + \sin \theta)\cos \theta - 2r \sin \theta + r \cos 2\theta \quad (5.36)$$

となる.  $x_n = \cdot_n$  として式(5.34)に式(5.35), (5.36)を代入すれば以下のようになる.

$$\theta_n = \theta_{n-1} - \frac{3x(1 + \sin \theta_{n-1})^2 + r \cos \theta_{n-1}(2 + \sin \theta_{n-1})}{6x(1 + \sin \theta_{n-1})\cos \theta_{n-1} - r(2 \sin \theta_{n-1} - \cos 2\theta_{n-1})} \quad (5.37)$$

以上より, 繰り返し計算をおこなうことで接触角を計算することができる.

#### d ばね要素の導出 2

次に, 2 つの穴を有するヘルムホルツ共鳴器における力と変位の関係を求める. これにより, ばね定数  $k_h$  を導く. 図に示すような体積  $V_0$  の圧力室に長さ  $l_n$ , 断面積  $S_n$  のノズルと長さ  $l_i$ , 断面積  $S_i$  のインク供給路が接続されたものを考える. 波長に対して容器のサイズが十分小さいとき, ノズルおよびインク供給路内の流体は一体となって運動する. ノズルとインク供給路の体積はそれぞれ

$$V_n = S_n l_n \quad (5.38)$$

$$V_i = S_i l_i \quad (5.39)$$

となる. この体積がピストンとして振動し, 共鳴すると考える.

ピストンに力が掛かっていない場合, 容器の中も外気と同じ圧力となる. しかし, ピストンが  $\Delta x$  押し込まれた場合圧力室の体積は  $V_0$  から  $V$  に減少する. これに伴って圧力は  $p_0$  から  $p$  まで増加する. 従って圧力の差によって, それぞれのピストンは内部から

$$\Delta F_n = -S_n(p - p_0) \quad (5.40)$$

$$\Delta F_i = -S_i(p - p_0) \quad (5.41)$$

の力を受ける. ここでピストンはある周波数で振動するものとする. また, これに伴う体積の膨張および圧縮は微小なため, 断熱状態と見なす. 従ってボイルの法則より状態方程式は比熱比  $\kappa$  を用いて

$$p_0 V_0^\kappa = p V^\kappa \quad (5.42)$$

となる. 式(5.5.9)を変形すると

$$p = p_0 \left( \frac{V_0}{V} \right)^\kappa \quad (5.43)$$

となる. ここで, 体積の減少分は

$$V_0 - V = S_n \Delta x_n - S_i \Delta x_i \quad (5.44)$$

式(5.5.13)を変形すると

$$V = V_0 - (S_n x_n - S_i x_i) \quad (5.45)$$

となる. 式(5.5.12)に式(5.5.14)を代入すると

$$\begin{aligned} p &= p_0 \left( \frac{V_0}{V} \right)^\kappa \\ &= p_0 \left\{ \frac{V_0}{V_0 - (S_n x_n - S_i x_i)} \right\}^\kappa \\ &= p_0 \left\{ \frac{V_0}{V_0 - (S_n x_n - S_i x_i)} \frac{V_0 + (S_n x_n - S_i x_i)}{V_0 + (S_n x_n - S_i x_i)} \right\}^\kappa \\ &= p_0 \left[ \frac{V_0 \{V_0 + (S_n x_n - S_i x_i)\}}{V_0^2 - (S_n x_n - S_i x_i)^2} \right]^\kappa \end{aligned} \quad (5.46)$$

ここで  $V_0^2 \gg (S_n x_n - S_i x_i)^2$  として, 上式の分母は  $V_0^2$  と近似できるので,

$$\begin{aligned}
 p &= p_0 \left[ \frac{V_0 \{V_0 + (S_n x_n - S_i x_i)\}}{V_0^2} \right]^\kappa \\
 &= p_0 \left( 1 + \frac{S_n x_n - S_i x_i}{V_0} \right)^\kappa
 \end{aligned}$$

さらに、微小値  $\varepsilon$  に対して以下の近似式が成り立つことが知られている。

$$(1 + \varepsilon)^\alpha \doteq 1 + \alpha \varepsilon$$

よって、 $V_0 \gg S_n x_n - S_i x_i$  より

$$p \doteq p_0 \left( 1 + \kappa \frac{S_n x_n - S_i x_i}{V_0} \right) \quad (5.5.15)$$

式(5.5.15)を式(5.5.10)に代入して

$$\begin{aligned}
 \Delta F_n &= -S_n (p - p_0) \\
 &= -S_n \left\{ p_0 \left( 1 + \kappa \frac{S_n x_n - S_i x_i}{V_0} \right) - p_0 \right\} \\
 &= -\kappa p_0 \frac{S_n^2 x_n - S_n S_i x_i}{V_0}
 \end{aligned}$$

同様にして  $\Delta F_i$  について求めると次のようになる。

$$\begin{aligned}
 \Delta F_i &= S_i (p - p_0) \\
 &= S_i \left\{ p_0 \left( 1 + \kappa \frac{S_n x_n - S_i x_i}{V_0} \right) - p_0 \right\} \\
 &= \kappa p_0 \frac{S_n S_i x_n - S_i^2 x_i}{V_0}
 \end{aligned}$$

従って、上の2式を行列形式で表すと以下のようになる。

$$\begin{Bmatrix} \Delta F_n \\ \Delta F_i \end{Bmatrix} = -\frac{\kappa p_0}{V_0} \begin{bmatrix} S_n^2 & -S_n S_i \\ -S_n S_i & S_n^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_n \\ x_i \end{Bmatrix}$$

よって圧力室は次のようなばね定数行列をもっている。

$$[K] = \frac{\kappa p_0}{V_0} \begin{bmatrix} S_n^2 & -S_n S_i \\ -S_n S_i & S_n^2 \end{bmatrix} \quad (5.5.16)$$

一方、インクの音速  $u$  は以下のように表される。

$$u = \sqrt{\frac{\kappa p_0}{\rho_0}} \quad (5.5.17)$$

式(5.5.17)を変形して

$$\kappa p_0 = u^2 \rho_0$$

これを式(5.5.16)に代入するとばね定数行列は次のようになる。

$$[K] = \frac{u^2 \rho_0}{V_0} \begin{bmatrix} S_n^2 & -S_n S_i \\ -S_n S_i & S_n^2 \end{bmatrix}$$

一般によく知られるヘルムホルツ共鳴器は、開口部は一つである。この場合、図 5.35 に示すように質量要素がひとつ、ばね要素がひとつのモデルで表現される。ここで固定端は物理モデル上の固定端であり、圧力が変化する前、すなわち大気圧を基準とした状態を考える。

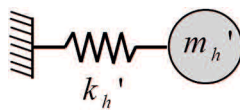


図 5.35 一般的なヘルムホルツ共鳴のモデル

しかし、先述の2つの穴を有するヘルムホルツ共鳴器の場合、4行4列の行列式となる。そのため、図 5.36 に示すようにばね要素が3つ、質量要素が2つのモデルで表現し、拘束を考慮したものであると考えることが妥当である。

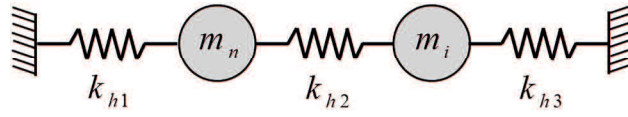


図 5.36 二つの開口を有するヘルムホルツ共鳴のモデル

図 5.36 に含まれるばね要素をそれぞれ,

$$k_{h1} = \frac{u^2 \rho_0}{V_0} (S_n^2 - S_n S_i), \quad k_{h2} = \frac{u^2 \rho_0}{V_0} S_n S_i, \quad k_{h3} = \frac{u^2 \rho_0}{V_0} (S_i^2 - S_n S_i)$$

とすれば, この場合の要素剛性マトリクス  $K'$  は次のようになる.

$$K' = \frac{u^2 \rho_0}{V_0} \begin{bmatrix} (S_n^2 - S_n S_i) & -(S_n^2 - S_n S_i) & 0 & 0 \\ -(S_n^2 - S_n S_i) & (S_n^2 - S_n S_i) + S_n S_i & -S_n S_i & 0 \\ 0 & -S_n S_i & S_n S_i + (S_i^2 - S_n S_i) & -(S_i^2 - S_n S_i) \\ 0 & 0 & -(S_i^2 - S_n S_i) & (S_i^2 - S_n S_i) \end{bmatrix} \quad (5.5.18)$$

ここで両端の拘束を考慮すれば式 (5.18) 中の 2 行 2 列, 2 行 3 列, 3 行 2 列および 3 行 3 列要素のみが残る. 従って要素剛性マトリクスは次のように変形できる.

$$K' = \frac{u^2 \rho_0}{V_0} \begin{bmatrix} (S_n^2 - S_n S_i) + S_n S_i & -S_n S_i \\ -S_n S_i & S_n S_i + (S_i^2 - S_n S_i) \end{bmatrix}$$

この式は式 (5.5.16) と一致する. よって, ばね要素 3 つと質量要素 2 つから成るヘルムホルツ共鳴器をプリンタヘッドモデルに組み込んでいる. ただし, インク供給路側のばねは大気圧との差を固定端とできないので, これについては今後妥当性について検討する必要がある.

### e ばね要素の導出 3

次にアクチュエータによるばね定数  $k_a$  の導出を行う. アクチュエータの構造を考えれば, これは 4 辺を固定端として, 板上に等分布荷重を加えたものである. しかし, 板の長手方向の長さ比べて横手方向の長さは十分短い. そのため長手方向の両端の拘束が体積変化量に与える影響は小さいものとする. これにより梁の長手方向は自由端とする. すなわちこれ以降では, アクチュエータを梁モデルとしてモデル化を行う.

アクチュエータは通常振動板の幅よりも圧電素子の幅の方が狭くなっている. そのためアクチュエータの断面は一定でない. 従ってアクチュエータは4層組み合わせ変断面梁とする. 図5.37に示すように振動板の幅を  $w_a$ , 電極および圧電素子の幅を  $w_c$ , 振動板が電極よりはみ出した部分の長さを  $w_m$  とする. ただし,  $w_a = 2w_m + w_c$  である. また振動板の厚さを  $t_1$ , 下部電極の厚さを  $t_2$ , 圧電素子の厚さを  $t_3$ , 上部電極の厚さを  $t_4$  とする.

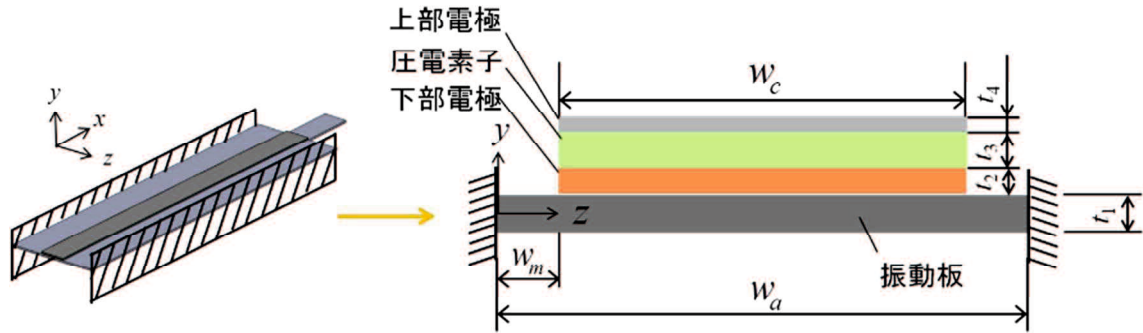


図 5.37 4 層組み合わせ変断面梁モデル

はじめに 4 層組み合わせ変断面梁の中立軸, 中立軸を解析軸とした場合の平板の曲げつよさを求める. さらに振動板の曲げつよさを平衡軸の定理を用いて求める.

断面 2 次モーメント  $I$  は中立軸からの距離によって決まる. ここで, 4 層組み合わせ変断面梁の中立軸の求め方について示す. 4 層から構成されるアクチュエータの梁モデルの中立軸  $y_N$  は次のようになる. ただしヤング率を  $E$ , 断面積を  $A$  とする. 添え字 1~4 はそれぞれ振動板, 下部電極, 圧電素子, 上部電極を表す.

$$y_N = \frac{1}{2} \frac{E_1 A_1 (y_{1H} + y_{1L}) + E_2 A_2 (y_{2H} + y_{2L}) + E_3 A_3 (y_{3H} + y_{3L}) + E_4 A_4 (y_{4H} + y_{4L})}{E_1 A_1 + E_2 A_2 + E_3 A_3 + E_4 A_4}$$

$$y_N = \frac{1}{2} \frac{E_1 t_1^2 + E_2 (t_1 + t_2)^2 - E_2 t_1^2 + E_3 (t_1 + t_2 + t_3)^2 - E_3 (t_1 + t_2)^2 + E_4 (t_1 + t_2 + t_3 + t_4)^2 - E_4 (t_1 + t_2 + t_3)^2}{E_1 t_1 + E_2 t_2 + E_3 t_3 + E_4 t_4}$$

ここで  $y_{1H}$ ,  $y_{1L}$  はそれぞれ梁の最下層である振動板の下部位置および上部位置である.  $y_{2H}$ ,  $y_{2L}$ ,  $y_{3H}$ ,  $y_{3L}$ ,  $y_{4H}$ ,  $y_{4L}$  については, それぞれ添え字 2 は下部電極, 3 は圧電素子, 4 は上部電極を示す. アクチュエータの中心から右側の長さを  $z_R$  左側の長さを  $z_L$  とする. 次に, 中立軸を解析軸とした場合の合成断面 2 次モーメントを求める.

$$\begin{aligned}
 (EI)_V &= \iint E(y - y_N)^2 dy dz \\
 &= E_1 \int_{y_{1L}}^{y_{1H}} (y - y_N)^2 dy \cdot \int_{z_{1L}}^{z_{1R}} dz + E_2 \int_{y_{2L}}^{y_{2H}} (y - y_N)^2 dy \cdot \int_{z_{2L}}^{z_{2R}} dz \\
 &\quad + E_3 \int_{y_{3L}}^{y_{3H}} (y - y_N)^2 dy \cdot \int_{z_{3L}}^{z_{3R}} dz + E_4 \int_{y_{4L}}^{y_{4H}} (y - y_N)^2 dy \cdot \int_{z_{4L}}^{z_{4R}} dz \\
 &= E_1 (z_{1R} - z_{1L}) \left[ \frac{1}{3} (y - y_N)^3 \right]_{y_{1L}}^{y_{1H}} + E_2 (z_{2R} - z_{2L}) \left[ \frac{1}{3} (y - y_N)^3 \right]_{y_{2L}}^{y_{2H}} \\
 &\quad + E_3 (z_{3R} - z_{3L}) \left[ \frac{1}{3} (y - y_N)^3 \right]_{y_{3L}}^{y_{3H}} + E_4 (z_{4R} - z_{4L}) \left[ \frac{1}{3} (y - y_N)^3 \right]_{y_{4L}}^{y_{4H}} \\
 &= \frac{1}{3} E_1 (z_{1R} - z_{1L}) \{ (y_{1H} - y_N)^3 - (y_{1L} - y_N)^3 \} + \frac{1}{3} E_2 (z_{2R} - z_{2L}) \{ (y_{2H} - y_N)^3 - (y_{2L} - y_N)^3 \} \\
 &\quad + \frac{1}{3} E_3 (z_{3R} - z_{3L}) \{ (y_{3H} - y_N)^3 - (y_{3L} - y_N)^3 \} + \frac{1}{3} E_4 (z_{4R} - z_{4L}) \{ (y_{4H} - y_N)^3 - (y_{4L} - y_N)^3 \}
 \end{aligned}$$

平板の曲げ強さ  $D_c$  を用いて体積変化量を計算する。ここで  $D_c$  は以下のように表される。

$$\begin{aligned}
 D_c &= \frac{E_1}{3(1-\nu_1^2)} \{ (y_{1H} - y_N)^3 - (y_{1L} - y_N)^3 \} + \frac{E_2}{3(1-\nu_2^2)} \{ (y_{2H} - y_N)^3 - (y_{2L} - y_N)^3 \} \\
 &\quad + \frac{E_3}{3(1-\nu_3^2)} \{ (y_{3H} - y_N)^3 - (y_{3L} - y_N)^3 \} + \frac{E_4}{3(1-\nu_4^2)} \{ (y_{4H} - y_N)^3 - (y_{4L} - y_N)^3 \} \\
 D_c &= \frac{E_1}{3(1-\nu_1^2)} \{ (t_1 - y_N)^3 - (-y_N)^3 \} + \frac{E_2}{3(1-\nu_2^2)} \{ (t_1 + t_2 - y_N)^3 - (t_1 - y_N)^3 \} \\
 &\quad + \frac{E_3}{3(1-\nu_3^2)} \{ (t_1 + t_2 + t_3 - y_N)^3 - (t_1 + t_2 - y_N)^3 \} \\
 &\quad + \frac{E_4}{3(1-\nu_4^2)} \{ (t_1 + t_2 + t_3 + t_4 - y_N)^3 - (t_1 + t_2 + t_3 - y_N)^3 \}
 \end{aligned}$$

平衡軸の定理を利用することで振動板の断面 2 次モーメントを求める。中立軸を基準とした時の断面 2 次モーメントを  $I$ ，距離  $y$  離れた時の断面二次モーメントを  $I'$  とすれば、これは以下のように表される。

$$I' = I + y^2 A$$

従って梁の最下層の振動板のはみ出し部の断面 2 次モーメントを求めることができる。平行

軸の定理と梁と板の相似関係を用いて振動板の曲げ剛性を求めると

$$D_1 = \frac{E_1}{1-\nu_1^2} \left\{ \frac{t_1^3}{12} + \left( y_N - \frac{t_1}{2} \right)^2 t_1 \right\}$$

となる。基準断面の梁の曲げつよさを  $(EI)_e$ 、任意の断面の梁の曲げつよさを  $(EI)_x$  とする。

$$(EI)_e \theta = \int_0^x \frac{(EI)_e M}{(EI)_x} dx$$

$$(EI)_e y = \int_0^x \int_0^x \frac{(EI)_e M}{(EI)_x} dx dx$$

ここで、 $\theta$  はこれまで接触角と定義したが、「ばね要素の導出3」に限りたわみ角とする。  $y$  についてはたわみ量とする。上式をもとに基準断面として幅  $w_c$  の部分の曲げつよさを  $(EI)_c$ 、任意断面として幅  $w_m$  の部分の梁の曲げつよさを  $(EI)_m$  としてたわみについて計算を行う。

$$\begin{aligned} (EI)_c y(x) &= \int_0^x \int_0^x \frac{(EI)_c}{(EI)_m} M dx dx \\ &= \int_0^x \int_0^x \left( \frac{(EI)_c}{(EI)_m} \right) \left( \int_0^x \int_0^x p dx dx \right) dx dx \\ &= \frac{(EI)_c}{(EI)_m} \left[ \frac{p}{24} x^4 + \frac{1}{6} c_1 x^3 + \frac{1}{2} c_2 x^2 + c_3 x + c_4 \right]_0^{w_m} \\ &\quad + \frac{(EI)_c}{(EI)_c} \left[ \frac{p}{24} x^4 + \frac{1}{6} c_1 x^3 + \frac{1}{2} c_2 x^2 + c_3 x + c_4 \right]_{w_m}^{w_m+w_c} \\ &\quad + \frac{(EI)_c}{(EI)_m} \left[ \frac{p}{24} x^4 + \frac{1}{6} c_1 x^3 + \frac{1}{2} c_2 x^2 + c_3 x + c_4 \right]_{w_m+w_c}^{w_a} \end{aligned}$$

ここで梁の左端は完全拘束であることから、 $c_3=c_4=0$  となる。また、梁の右端においてたわみはゼロとなるため、

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{(EI)_c}{(EI)_m} \left( \frac{p}{24} w_m^4 + \frac{1}{6} c_1 w_m^3 + \frac{1}{2} c_2 w_m^2 \right) \\ &\quad + \left\{ \frac{p}{24} (w_m + w_c)^4 + \frac{1}{6} c_1 (w_m + w_c)^3 + \frac{1}{2} c_2 (w_m + w_c)^2 \right\} - \left( \frac{p}{24} w_m^4 + \frac{1}{6} c_1 w_m^3 + \frac{1}{2} c_2 w_m^2 \right) \\ &\quad + \frac{(EI)_c}{(EI)_m} \left[ \frac{p}{24} w_a^4 + \frac{1}{6} c_1 w_a^3 + \frac{1}{2} c_2 w_a^2 - \left\{ \frac{p}{24} (w_m + w_c)^4 + \frac{1}{6} c_1 (w_m + w_c)^3 + \frac{1}{2} c_2 (w_m + w_c)^2 \right\} \right] \end{aligned}$$



これを  $c_1, c_2$  について整理すると

$$\begin{aligned} & \left[ \frac{(EI)_c}{(EI)_m} \left\{ \frac{1}{6} w_m^3 + \frac{1}{6} w_a^3 - \frac{1}{6} (w_m + w_c)^3 \right\} + \left\{ \frac{1}{6} (w_m + w_c)^3 - \frac{1}{6} w_m^3 \right\} \right] c_1 \\ & + \left[ \frac{(EI)_c}{(EI)_m} \left\{ \frac{1}{2} w_m^2 + \frac{1}{2} w_a^2 - \frac{1}{2} (w_m + w_c)^2 \right\} + \left\{ \frac{1}{2} (w_m + w_c)^2 - \frac{1}{2} w_m^2 \right\} \right] c_2 \\ & = - \left[ \frac{(EI)_c}{(EI)_m} \left\{ \frac{P}{24} w_m^4 + \frac{P}{24} w_a^4 - \frac{P}{24} (w_m + w_c)^4 \right\} + \left\{ \frac{P}{24} (w_m + w_c)^4 - \frac{P}{24} w_m^4 \right\} \right] \end{aligned}$$

となる。さらに、梁の右端のたわみ角はゼロであることから、

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{(EI)_c}{(EI)_m} \left( \frac{P}{6} w_m^3 + \frac{1}{2} c_1 w_m^2 + c_2 w_m \right) \\ & + \left\{ \frac{P}{6} (w_m + w_c)^3 + \frac{1}{2} c_1 (w_m + w_c)^2 + c_2 (w_m + w_c) \right\} - \left( \frac{P}{6} w_m^3 + \frac{1}{2} c_1 w_m^2 + c_2 w_m \right) \\ & + \frac{(EI)_c}{(EI)_m} \left[ \frac{P}{6} w_a^3 + \frac{1}{2} c_1 w_a^2 + c_2 w_a - \left\{ \frac{P}{6} (w_m + w_c)^3 + \frac{1}{2} c_1 (w_m + w_c)^2 + c_2 (w_m + w_c) \right\} \right] \end{aligned}$$

これを先ほどと同様  $c_1, c_2$  について整理すると

$$\begin{aligned} & \left[ \frac{(EI)_c}{(EI)_m} \left\{ \frac{1}{2} w_m^2 + \frac{1}{2} w_a^2 - \frac{1}{2} (w_m + w_c)^2 \right\} + \left\{ \frac{1}{2} (w_m + w_c)^2 - \frac{1}{2} w_m^2 \right\} \right] c_1 \\ & + \left[ \frac{(EI)_c}{(EI)_m} \{ w_m + w_a - (w_m + w_c) \} + \{ (w_m + w_c) - w_m \} \right] c_2 \\ & = - \left[ \frac{(EI)_c}{(EI)_m} \left\{ \frac{P}{6} w_m^3 + \frac{P}{6} w_a^3 - \frac{P}{6} (w_m + w_c)^3 \right\} + \left\{ \frac{P}{6} (w_m + w_c)^3 - \frac{P}{6} w_m^3 \right\} \right] \end{aligned}$$

以下に示す関係を用いて、梁の曲げ問題を板曲げとして断面 2 次モーメントを板の曲げつよさに置き換える。ただし、梁の高さを  $h$ 、幅を  $b$ 、板の厚さを  $t$ 、ポアソン比を  $\nu$  とする。

$$\text{梁: } EI \frac{d^2 y}{dx^2} = M_b, \quad EI = \frac{Ebh^3}{12}$$

$$\text{板: } D \frac{d^2 z}{dx^2} = M_p, \quad D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$$

さらに板の幅方向および長さ方向にわたって積分することで体積変位量は次のように求められる。

$$\begin{aligned}
 \Delta V_a &= \int_0^{w_a} \int_0^{l_a} z(x) dx dz \\
 &= \frac{l_a}{D_c} \left\{ \frac{D_c}{D_m} \left[ \frac{p}{120} x^5 + \frac{1}{24} c_1 x^4 + \frac{1}{6} c_2 x^3 \right]_0^{w_m} + \left[ \frac{p}{120} x^5 + \frac{1}{24} c_1 x^4 + \frac{1}{6} c_2 x^3 \right]_{w_m}^{w_m+w_c} + \frac{D_c}{D_m} \left[ \frac{p}{120} x^5 + \frac{1}{24} c_1 x^4 + \frac{1}{6} c_2 x^3 \right]_{w_m+w_c}^{w_a} \right\} \\
 &= \frac{l_a}{D_m} \left( \frac{p}{120} w_m^5 + \frac{1}{24} c_1 w_m^4 + \frac{1}{6} c_2 w_m^3 \right) + \frac{l_a}{D_c} \left\{ \frac{p}{120} (w_m + w_c)^5 + \frac{1}{24} c_1 (w_m + w_c)^4 + \frac{1}{6} c_2 (w_m + w_c)^3 \right\} \\
 &\quad - \frac{l_a}{D_c} \left( \frac{p}{120} w_m^5 + \frac{1}{24} c_1 w_m^4 + \frac{1}{6} c_2 w_m^3 \right) + \frac{l_a}{D_m} \left( \frac{p}{120} w_a^5 + \frac{1}{24} c_1 w_a^4 + \frac{1}{6} c_2 w_a^3 \right) \\
 &\quad - \frac{l_a}{D_m} \left\{ \frac{p}{120} (w_m + w_c)^5 + \frac{1}{24} c_1 (w_m + w_c)^4 + \frac{1}{6} c_2 (w_m + w_c)^3 \right\} \tag{5.5.19}
 \end{aligned}$$

なお、積分定数  $c_1, c_2$  についてはシステムモデル構築時にコンピュータによる計算で求めることとした。また積分定数  $c_1, c_2$  には圧力  $p$  が含まれる。そこで  $p$  をくくりだすために

$$c_1' = p c_1, \quad c_2' = p c_2$$

とすれば式(5.5.19)は次のように変形できる。

$$\begin{aligned}
 \Delta V_a &= p \frac{l_a}{D_m} \left( \frac{1}{120} w_m^5 + \frac{1}{24} c_1' w_m^4 + \frac{1}{6} c_2' w_m^3 \right) + p \frac{l_a}{D_c} \left\{ \frac{1}{120} (w_m + w_c)^5 + \frac{1}{24} c_1' (w_m + w_c)^4 + \frac{1}{6} c_2' (w_m + w_c)^3 \right\} \\
 &\quad - p \frac{l_a}{D_c} \left( \frac{1}{120} w_m^5 + \frac{1}{24} c_1' w_m^4 + \frac{1}{6} c_2' w_m^3 \right) + p \frac{l_a}{D_m} \left( \frac{1}{120} w_a^5 + \frac{1}{24} c_1' w_a^4 + \frac{1}{6} c_2' w_a^3 \right) \\
 &\quad - p \frac{l_a}{D_m} \left\{ \frac{1}{120} (w_m + w_c)^5 + \frac{1}{24} c_1' (w_m + w_c)^4 + \frac{1}{6} c_2' (w_m + w_c)^3 \right\}
 \end{aligned}$$

$$\Delta V_a = \frac{1}{k'} p$$

ただし  $k'$  は

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{k'} &= \frac{l_a}{D_m} \left( \frac{1}{120} w_m^5 + \frac{1}{24} c_1' w_m^4 + \frac{1}{6} c_2' w_m^3 \right) + \frac{l_a}{D_c} \left\{ \frac{1}{120} (w_m + w_c)^5 + \frac{1}{24} c_1' (w_m + w_c)^4 + \frac{1}{6} c_2' (w_m + w_c)^3 \right\} \\
 &\quad - \frac{l_a}{D_c} \left( \frac{1}{120} w_m^5 + \frac{1}{24} c_1' w_m^4 + \frac{1}{6} c_2' w_m^3 \right) + \frac{l_a}{D_m} \left( \frac{1}{120} w_a^5 + \frac{1}{24} c_1' w_a^4 + \frac{1}{6} c_2' w_a^3 \right) \\
 &\quad - \frac{l_a}{D_m} \left\{ \frac{1}{120} (w_m + w_c)^5 + \frac{1}{24} c_1' (w_m + w_c)^4 + \frac{1}{6} c_2' (w_m + w_c)^3 \right\}
 \end{aligned}$$

である。また力は圧力と面積の積となるため、

$$F_n = S_n p = S_n k' \Delta V_a = S_n k' (\Delta V_n - \Delta V_i) = S_n k' (S_n x_n - S_i x_i) = k' (S_n^2 x_n - S_n S_i x_i)$$

$$F_i = -S_i p = -S_i k' \Delta V_a = S_i (\Delta V_i - \Delta V_n) = S_i k' (S_i x_i - S_n x_n) = k' (S_i^2 x_n - S_n S_i x_i)$$

従ってノズルおよびインク供給路に対するアクチュエータ平板のばね定数行列は以下のようになる。

$$[K_a] = k' \begin{bmatrix} S_n^2 & -S_n S_i \\ -S_n S_i & S_i^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_n \\ x_i \end{Bmatrix}$$

さらに、有限要素法による数値解析を用いて、全周を完全拘束した矩形板に等分布荷重を与えたときの最大たわみ量を求め、これを梁理論から求めた最大たわみ量と比較することでアクチュエータを梁としてモデル化することが妥当であるか検証した。

図 5.38 に解析モデルを示す。図 5.39, 5.40 にそれぞれ荷重条件および拘束条件を示す。z 方向から  $10 \times 10^{-12} \text{ [N/mm}^2 \text{]}$  を等分布荷重として負荷した。また図 5.40 に示すように板の全周を完全固定した。

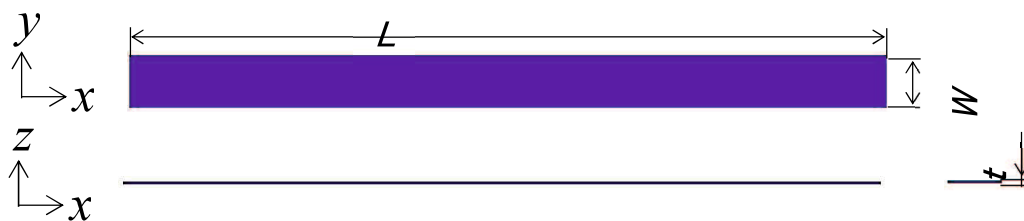


図 5.38 解析モデル

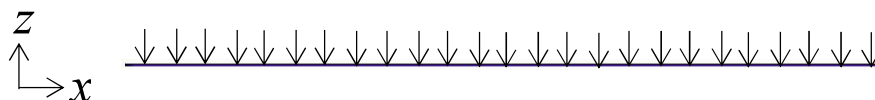


図 5.39 荷重条件



図 5.40 拘束条件

モデル化に際しては3次元CADソフト Solidworks®を用いて、形状を作成した。作成したモデルに対して Hypermesh®を用いて要素分割を行った。さらに、作成した要素は3次元ソリッドの6面体要素、要素サイズは1.3×1.3[mm]とした。

幾何形状パラメータは表 5.8 に示すものを用いた。

表 5.8 解析モデルの幾何形状パラメータ

長さ $L$ [mm]	1200
幅 $W$ [mm]	82
厚さ $t$ [mm]	2.625

材料に関しては銅を想定した均質・等方な弾性体とした。材料特性を表 5.9 に示す。

表 5.9 銅の材料特性

ヤング率 $E$	129.8 [Gpa]
ポアソン比 $\nu$	0.343

また梁理論において最大たわみ量  $v_{\max}$  は次の式で求められる。

$$v_{\max} = \frac{WL^4}{384EI}$$

以上より、最大たわみ量の比較したものを表 5.10 に示す。

表 5.10 最大たわみ量の比較

有限要素法	梁理論
$-5.69 \times 10^{-6}$	$-6.02 \times 10^{-6}$

表 5.10 より有限要素法による最大たわみ量と梁理論における最大たわみ量の相対誤差について計算すると、約 5%であったことから、梁の全周を固定した板曲げを梁として近似できると判断した。

### f 等価外力の導出

次に、圧電素子に電圧を印加することで発生する等価外力  $f_{na}, f_{ia}$  について求める。はじめに圧電方程式を以下に示す。

$$S_1 = s_{11}^E T_1 + d_{31} E_3^*$$

$$D_3 = d_{31} T_1 + \varepsilon_{33}^T E_3^*$$

ここで文字式の定義は次のとおりである。

$T_1$ : 応力 [N/m<sup>2</sup>],  $S_1$ : ひずみ [-],  $E_3^*$ : 電界 [V/m],  $D_3$ : 電束密度 [C/m<sup>2</sup>],

$d_{31}$ : 圧電ひずみ定数 [m/V],  $\varepsilon_{33}^T$ : 誘電率 [F/m],  $s_{11}^E$ : 弾性コンプライアンス [m<sup>2</sup>/N]

ここで、図 5.41 に示すように、説明のためにアクチュエータを振動板と圧電素子から成る 2 層の組み合わせ梁として考える。実際のモデルは 4 層として計算している。振動板の厚さを  $t_m$ 、圧電素子の厚さを  $t_p$  とする。

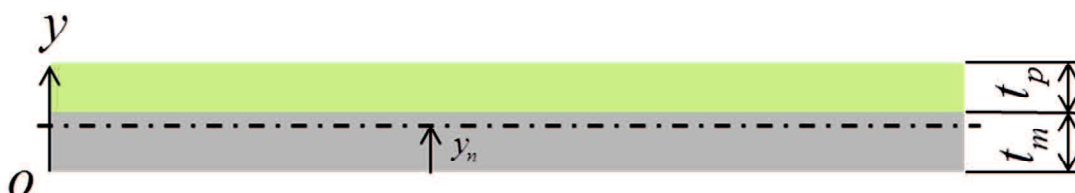


図 5.41 2 層組み合わせ梁

圧電素子に電圧を加えると、曲げモーメント  $M_b$  が発生することで振動板は曲げ変形を起こす。この曲げモーメント梁に加わる力  $F$  と、中立軸  $y_n$  から圧電素子の中心までの距離との積で表される。従ってこれを計算すると以下のような式となる。

$$M_b = \left( t_m + \frac{1}{2} t_p - y_n \right) F \quad (5.5.20)$$

さらに力  $F$  を圧電素子に加わる応力  $\sigma_{b1}$  と圧電素子の断面積との積として式 (5.5.20) を変形すると

$$M_b = \left( t_m + \frac{1}{2} t_p - y_n \right) (\sigma_{p1} t_p b) \quad (5.5.21)$$

となる.

ここで先述の圧電方程式より

$$\sigma_{p1} = T_1 = E_p S_1 = E_p d_{31} E_3^* \quad (5.5.22)$$

となる. 式(5.5.22)を式(5.5.21)に代入して

$$M_b = t_p b \left( t_m + \frac{1}{2} t_p - y_n \right) E_p d_{31} E_3^* \quad (5.5.23)$$

となる. ここでモーメントの平衡方程式を立てると以下ようになる. ただし,  $E$  はヤング率,  $I$  は断面二次モーメントである.

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = M_b$$

これを2階積分すると以下ようになる. ただし  $c_1, c_2$  は積分定数とする.

$$y = \frac{1}{2EI} M_b x^2 + c_1 x + c_2$$

境界条件は  $x=0$  で  $y=0$ ,  $x=l_b$  で  $y=0$  であることから  $c_1, c_2$  はそれぞれ

$$c_1 = -\frac{1}{2EI} M_b l_b$$

$$c_2 = 0$$

となる. 従って

$$y = \frac{1}{2EI} M_b (x^2 - l_b x)$$

となる。これを振動板の下面にわたって積分すると体積変位量 $\Delta V_a$ は

$$\begin{aligned}\Delta V_a &= \frac{1}{2D} M_p \int_0^{w_a} \int_0^{l_a} (x^2 - w_a x) dx dy \\ &= \frac{w_a^3 l_a}{12D} M_p\end{aligned}\quad (5.5.24)$$

となる。ただし、梁の曲げ剛性は板の曲げ剛性を書き直している。ここで、振動板に加わる圧力 $p$ とこれによる圧力室の体積変化との関係式は

$$\begin{aligned}\Delta V &= \frac{w_a^5 l_a}{720D} p \\ p_c &= \frac{720D}{w_a^5 l_a} \Delta V_c\end{aligned}\quad (5.5.25)$$

である。ここで

$$\frac{\Delta V_c}{p_c} = \frac{\Delta V_a}{p_a}$$

と仮定し、これを変形すると

$$p_a = \frac{\Delta V_a}{\Delta V_c} p_c\quad (5.5.26)$$

式(5.5.26)に式(5.5.24)、(5.5.25)をそれぞれ代入すると

$$p_a = -\left(\frac{w_a^3 l_a}{12D} M_p\right) \left(\frac{720D}{w_a^5 l_a}\right) = -\frac{60M_p}{w_a^2}\quad (5.5.27)$$

ここで、 $M_b$ の式を板曲げの場合の曲げモーメントに関する式に変形すれば

$$M_p = t_p \left( t_m + \frac{1}{2} t_p - z_n \right) \frac{E_p}{1 - \nu_p} d_{31} E_3^* \quad (5.5.28)$$

である。また電圧  $V$  を用い、 $E_3 = (V/t_p)$  として式(5.5.27)に式(5.5.28)を代入すると

$$p_a = -\frac{60}{w_a^2} t_p \left( t_m + \frac{1}{2} t_p - z_n \right) \frac{E_p}{1 - \nu_p} d_{13} \frac{V}{t_p}$$

となる。圧力にノズルおよびインク供給路の断面積をかけることで等価外力を求める。従ってノズルおよびインク供給路に加わる等価外力は次のようになる。

$$\begin{aligned} F_n = S_n p_a &= -\frac{60 S_n}{w_a^2} t_p \left( t_m + \frac{1}{2} t_p - z_n \right) \frac{E_p}{1 - \nu_p} d_{13} \frac{V}{t_p} \\ &= -\frac{60 S_n E_p d_{13}}{w_a^2 (1 - \nu_p)} \left( t_m + \frac{1}{2} t_p - z_n \right) V \end{aligned}$$

$$F_i = \frac{S_i}{S_n} F_n$$

### (3) システムモデルの構築

先述の式をもとに汎用の数値計算ソフト SCILAB®を用いてモデルを作成した。これを図 5.42 から図 5.49 に示す。図 5.42 をみると分かるように、システムモデルの提案する二対入出力システムを導入することで、プリンタヘッドを構成する部品システム中心にモデル化できた。また図 5.43 に示す Actuator ブロックの内部では入力用に読み込んだ駆動波形をノズルとインク供給路に加わる外力に変換する処理をおこなっている。また図 5.45 に示す Nozzle ブロックの内部ではノズルの流動抵抗とメニスカスの非線形バネを含んだ運動方程式について計算している。さらに図 5.47 に示す Inlet ブロック内部ではインク供給路の流動抵抗を含んだ運動方程式について計算している。図 5.48 に示す Droplet ブロック内部では液滴吐出時のタイミングと初速度について計算している(計算式については後述)。また図 5.49 に示す Ink common room ブロック内部では流量に関する計算を行っている。



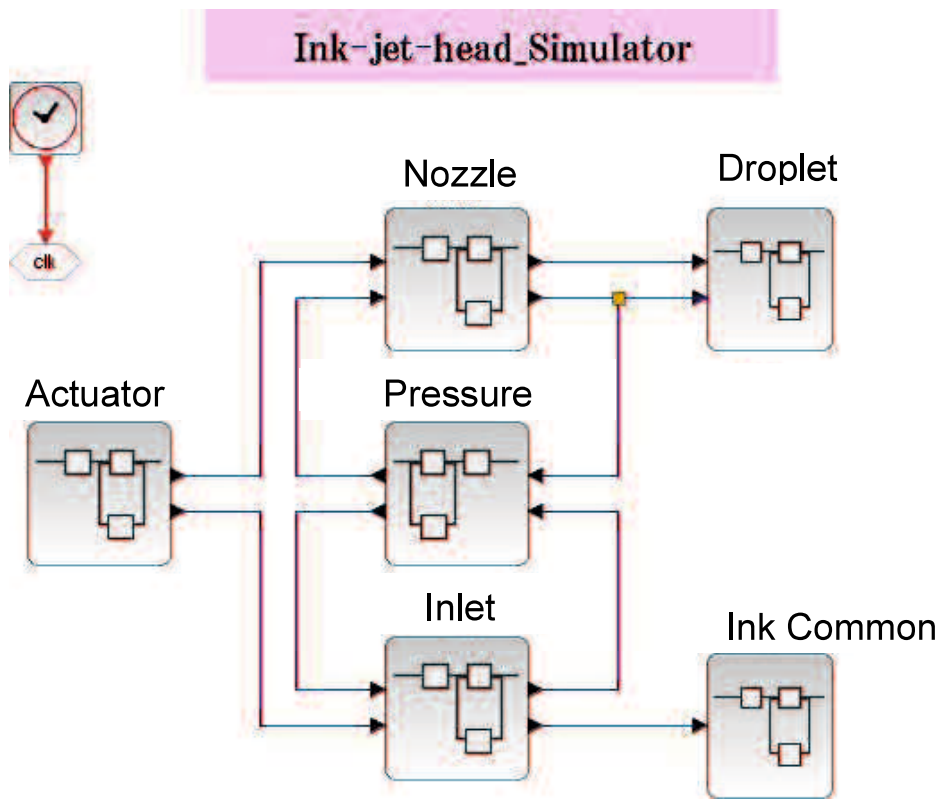


図 5.42 Xcos モデル

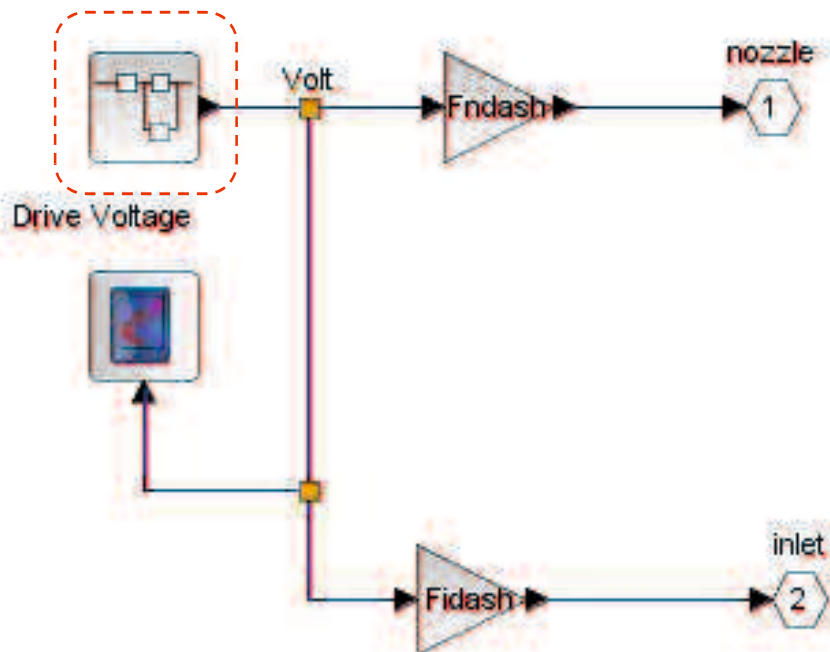


図 5.43 Actuator ブロックの内部

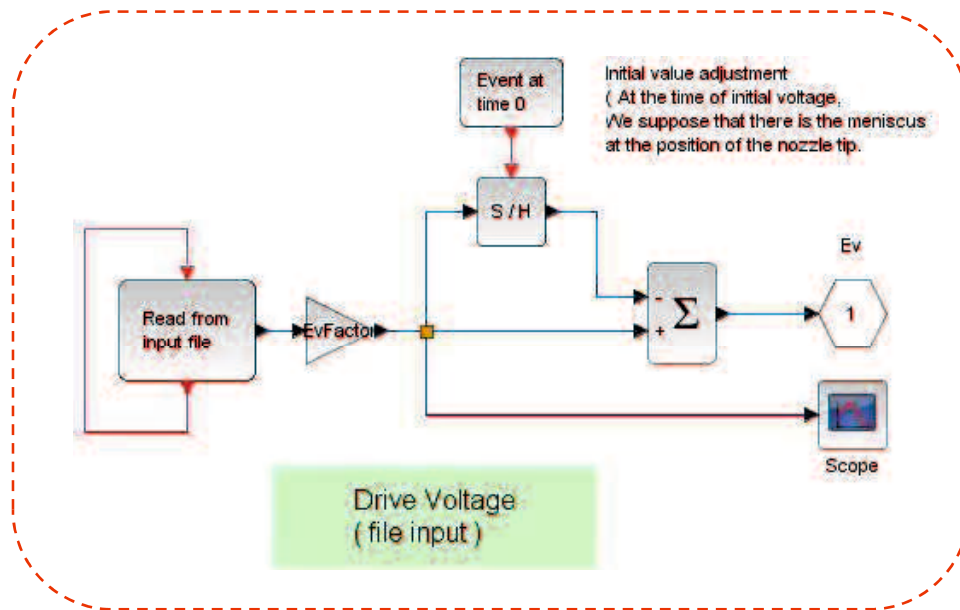


図 5.44 Drive Voltage ブロックの内部

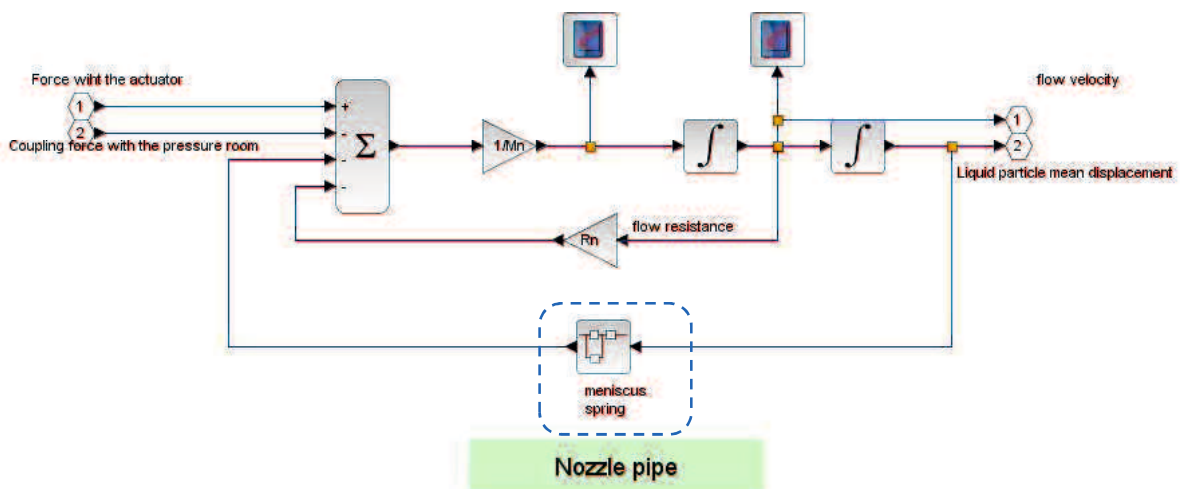


図 5.45 Nozzle ブロックの内部

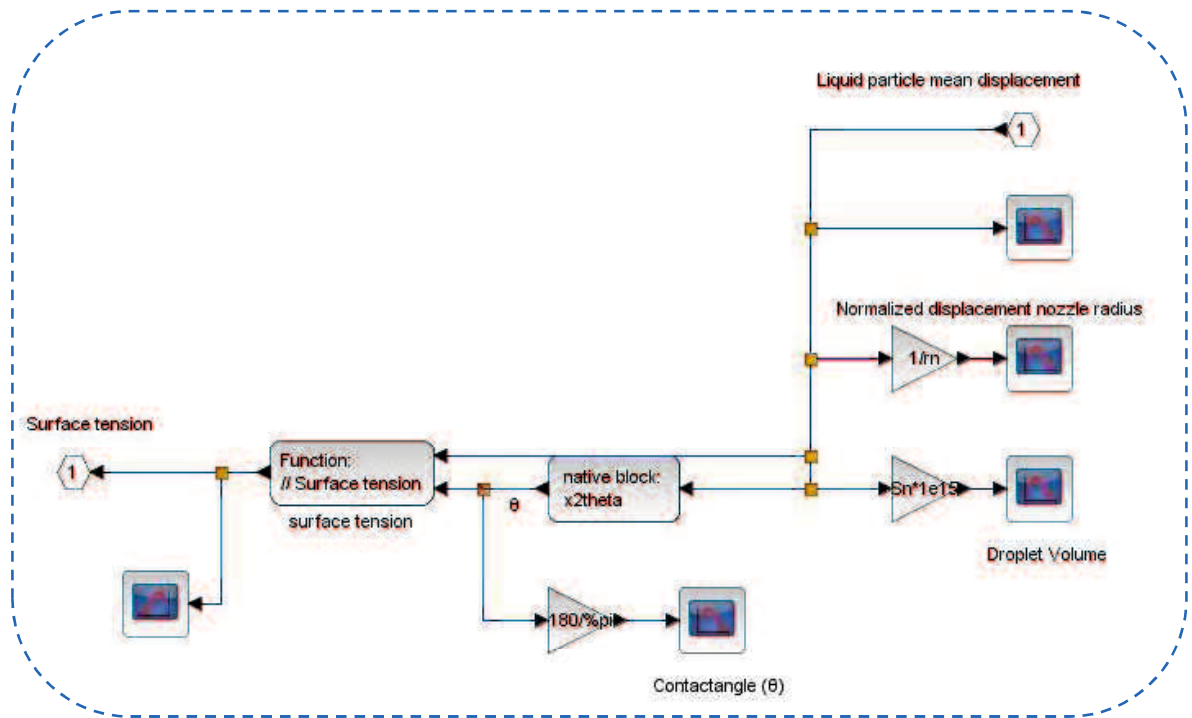


図 5.46 meniscus spring ブロックの内部

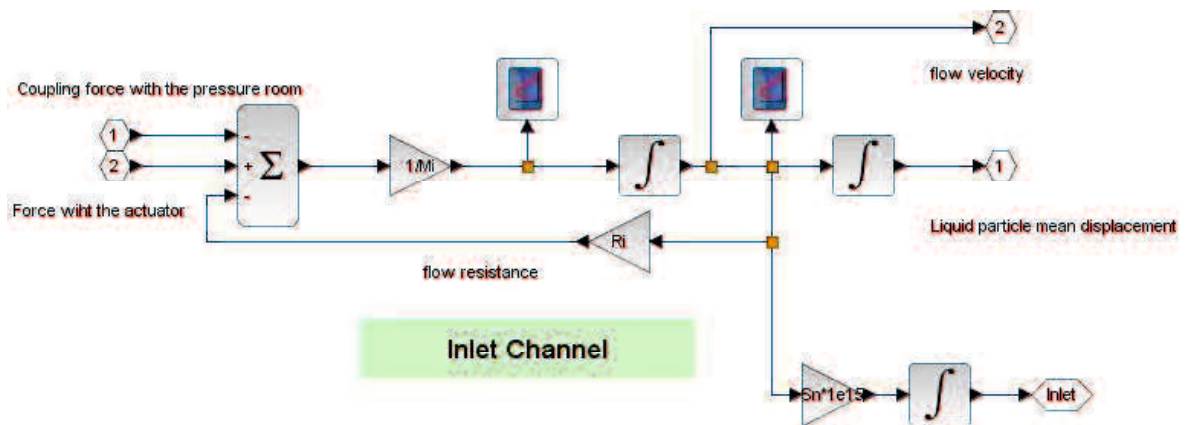


図 5.47 Inlet ブロックの内部

Timing for Droplet

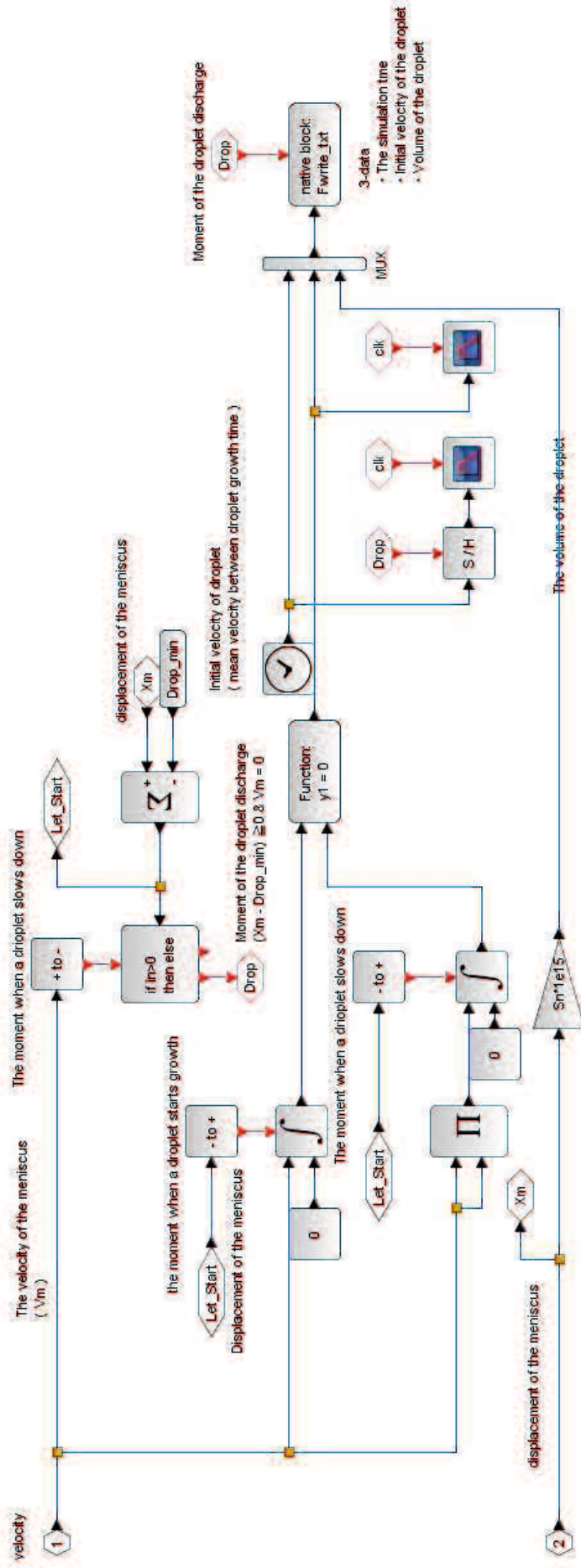


図 5.48 Droplet ブロックの内部

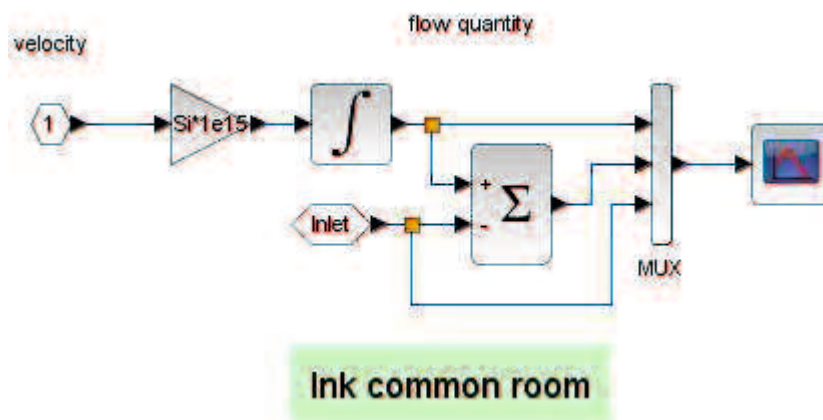


図 5.49 Ink Common Room 内部のブロック

#### (4) 駆動電圧波形の形成

産業用のピエゾ式インクジェットプリンタでは、被印刷物に変更があった場合、入力する電圧波形についても変更する必要がある。そこで、作成したモデルに入力するための電圧波形を決定するために図 5.50 に示すようなアプリケーションを作成した。同図中の上部は駆動波形を表す。また画面下部ではこの波形を変更できるようにパラメータを設定した。このパラメータは各波に対してそれぞれ DOWN,KEEP,UP,WAIT が設定されている。DOWN は波が下がる時間を KEEP はその次の保持時間を, UP は波が立ちあがる時間を, WAIT は立ち上がり後の保持時間をそれぞれ表す。また EEP1, WAIT1,に対応する波形の立ち上がり/立下り率についても変更できる。こうしたパラメータを変更することで入力波形を変更できる。

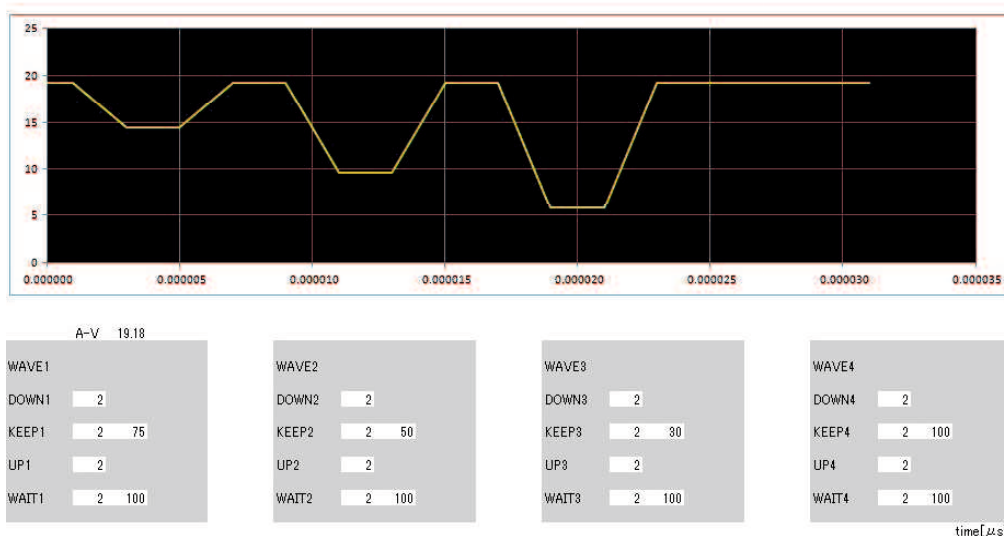


図 5.50 波形変更用アプリケーション

### 5.6.3 ピエゾ式インクジェットプリンタヘッドモデルのシミュレーション

#### (1) シミュレーション結果

先に示した, SCILAB®モデルを用いてシミュレーションをおこなった. その結果を図 5.52 に示す. この際, 入力として図 5.51 に示すような波形を用いた.

また, シミュレーションに用いたアクチュエータの構成材料およびその物性値を表 5.11 から表 5.16 に示す.

図 5.52 より時間の経過とともにノズル部質量  $m_n$  の速度が増加していることがわかる. また正の速度ピークが3つあることから, 3つの小液滴が次々とノズルから吐出されることがわかる. さらに小液滴の初速は次第に増加していることもわかる. 以上よりノズル先端に形成されるメニスカスの挙動を定性的に再現できたと考える.

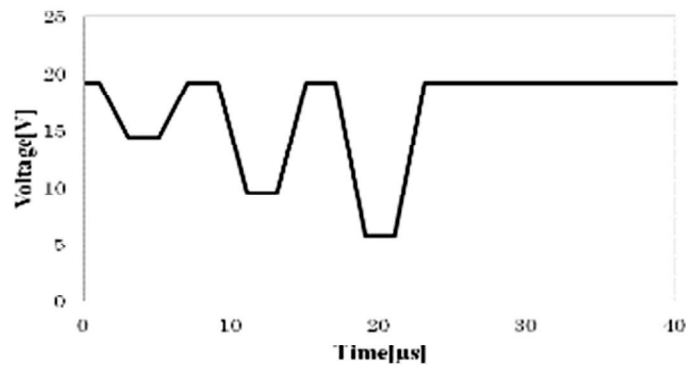


図 5.51 駆動電圧波形

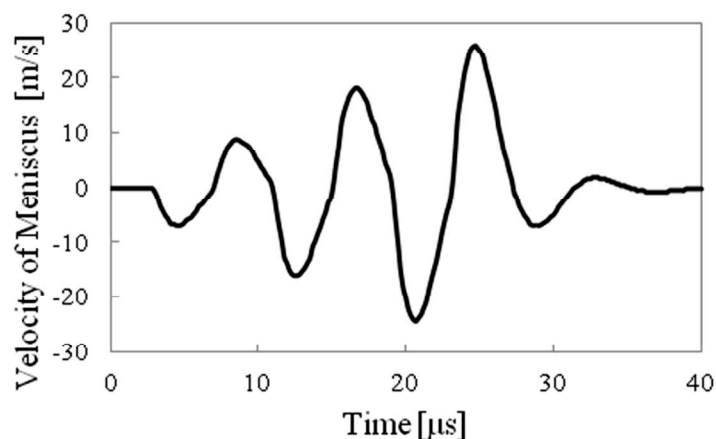


図 5.52 時間とメニスカス速度の関係

表 5.11 材料定数<sup>13</sup>

材料	ヤング率 $E$ (GPa)	ポアソン比 $\nu$
白金 Pt	168	0.38
圧電素子 PZT	82.2	0.338
銅 Cu	129.8	0.343
クロム Cr	279	0.21

表 5.12 アクチュエータの板厚および幅

材料	板厚 [ $\mu\text{m}$ ]	幅 [ $\mu\text{m}$ ]
白金 Pt	7.0	220
圧電素子 PZT	2.625	220
銅 Cu	3.5	220
クロム Cr	1.0	220

表 5.13 ノズルの幾何形状パラメータ

形状	直径 [ $\mu\text{m}$ ]	長さ [ $\mu\text{m}$ ]
円形直管	20	20

表 5.14 インク供給管の幾何形状パラメータ

形状	幅 [ $\mu\text{m}$ ]	高さ [ $\mu\text{m}$ ]	長さ [ $\mu\text{m}$ ]
矩形直管	80	13	200

表 5.15 圧力室の幾何形状パラメータ

幅 [ $\mu\text{m}$ ]	高さ [ $\mu\text{m}$ ]	長さ [ $\mu\text{m}$ ]
220	130	2000

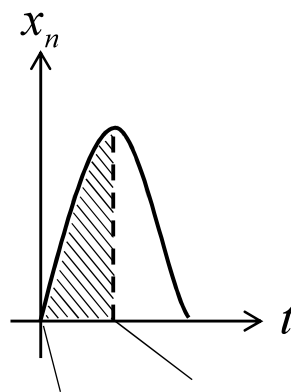
表 5.16 インクの物性値

表面張力 [N/m]	音速 [m/s]	密度 [ $\text{kg/m}^3$ ]	粘度 [ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ]
$31.5 \times 10^{-3}$	1200	1000	0.011

## (2) 液滴吐出のアニメーション

前述のシミュレーションは、メニスカスの挙動についてのみのシミュレーションであった。ここではその結果より、吐出された液滴の速度および体積の計算をおこなう。またこの計算結果より液滴吐出時の様子をあらわすアニメーションを作成した。

はじめに液滴吐出時の初速度の計算について説明する。集中定数系としてモデル化をおこなっているため、インク吐出時の速度は、そのまま速度のピークとはならない。そこで運動量を用いて、吐出時速度を求めた。流体における運動量は質量流量と速度の積となる。そのためインクがノズル先端から飛び出し始めた時から、停止するまでの間の運動量の流出量を質量流量の流出量で除したものとする。従って液滴の運動量を式(5.5.29)に、液滴の質量流量を式(5.5.30)に、液滴吐出時速度はこれらを用いて式(5.5.31)のようにして計算した。図 5.53 に時間とノズル部質量の変位の関係を模式的に示した。積分開始時間 ( $x_n=0$ ) を  $t_1$ 、積分終了時間 ( $v_n=0$ ) を  $t_2$  とする。



積分開始

時間  $t_1$  終了時間  $t_2$ 

図 5.53 積分開始および終了時刻を示した模式図

$$\begin{aligned}
 P' &= \int_{t_1}^{t_2} (\rho A v \cdot v) dt \\
 &= \int_{t_1}^{t_2} (\rho A v^2) dt \\
 &= \rho A \int_{t_1}^{t_2} v^2 dt
 \end{aligned}
 \tag{5.5.29}$$



$$M' = \int_{t_1}^{t_2} (\rho A v) dt = \rho A \int_{t_1}^{t_2} v dt \quad (5.5.31)$$

$$v_{init} = \frac{P'}{M'} = \frac{\rho A \int_{t_1}^{t_2} v^2 dt}{\rho A \int_{t_1}^{t_2} v dt} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} v^2 dt}{\int_{t_1}^{t_2} v dt} \quad (5.5.32)$$

次に、求めた吐出時速度をもとにインクの飛翔時の速度を求める方法について説明する。前述のようにノズル部質量の正の速度ピークで液滴が吐出されると考える。そこで、図 5.52 における正の速度ピークとなる時間、および前述の液滴速度、液滴体積を出力しておく。その後これを初期値として次に示すような運動方程式から吐出速度の計算をおこなう。ただし、微小な液滴であるため速度に比例する空気抵抗を受けるものとした。

$$m_d \frac{d^2 x}{dt^2} + c_d \frac{dx}{dt} = m_d g$$

ここで液滴の質量を  $m_d$ 、抵抗係数を  $c_d$ 、重力加速度を  $g$ 、液滴の変位を  $x$  とする。また抵抗係数  $c_d$  は空気の粘性係数を  $\mu$ 、インクの液滴半径を  $r_d$  とすれば、

$$c_d = 6\pi\mu r_d$$

である。また質量は密度と体積の積であらわされることから

$$m = \frac{4}{3}\pi\rho r^3$$

で表される。

さらに2番目に吐出された小液滴が 1 番目に吐出された小液滴に衝突することで一つの液滴となる。また次に示すような式を用いて衝突後の液滴の初速度を計算する。

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_3 v_3$$

ここで添え字 1, 2, 3 はそれぞれ1番目の液滴の速度, 2番目の液滴の速度, 衝突後の液滴の速度を表す。上式をさらに変形して

$$v_3 = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_3}$$

さらに衝突前後の質量は等しいため、

$$m_3 = m_1 + m_2$$

これを上式に代入すると

$$v_3 = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}$$

となる。以上示した式より作成した液滴吐出計算用のモデルを図 5.54 に示す。

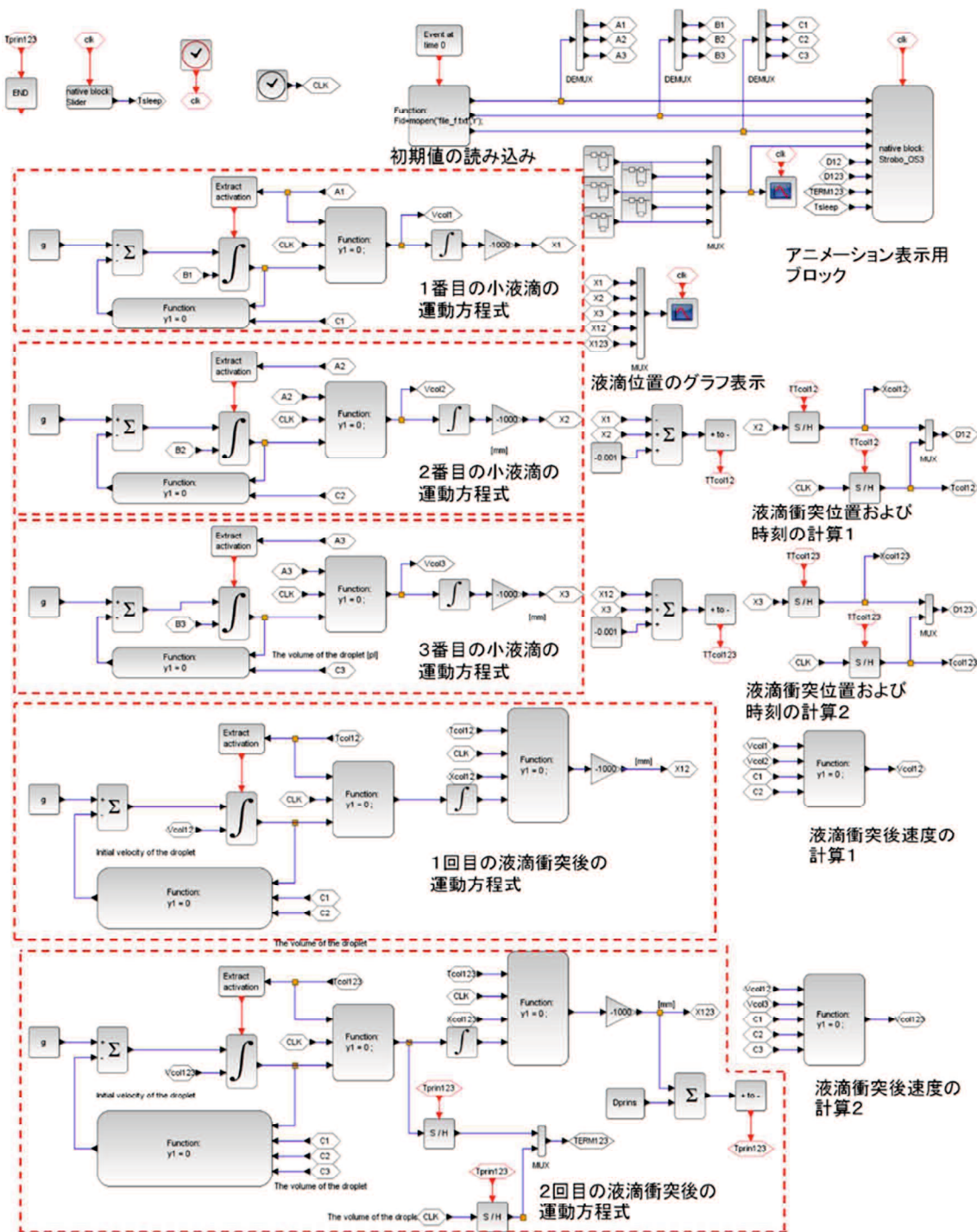


図 5.54 液滴吐出計算用モデル

図 5.55 から 5.61 にアニメーション実行時の様子を示す。液滴が次々に吐出され、衝突することで最終的にひとつの液滴となり、ひとつとなった液滴は、その後被印刷物に到達する。アニメーションよりこの一連の様子が視覚的に確認できる。ただし、ノズルと被印刷物の距離は 1[mm]としている。またアニメーション終了時には図 5.61 に示すように、各小液滴が吐出された時間、各小液滴の初速度、体積、さらには小液滴が集合した液滴の着弾時速度が表示されるようにした。

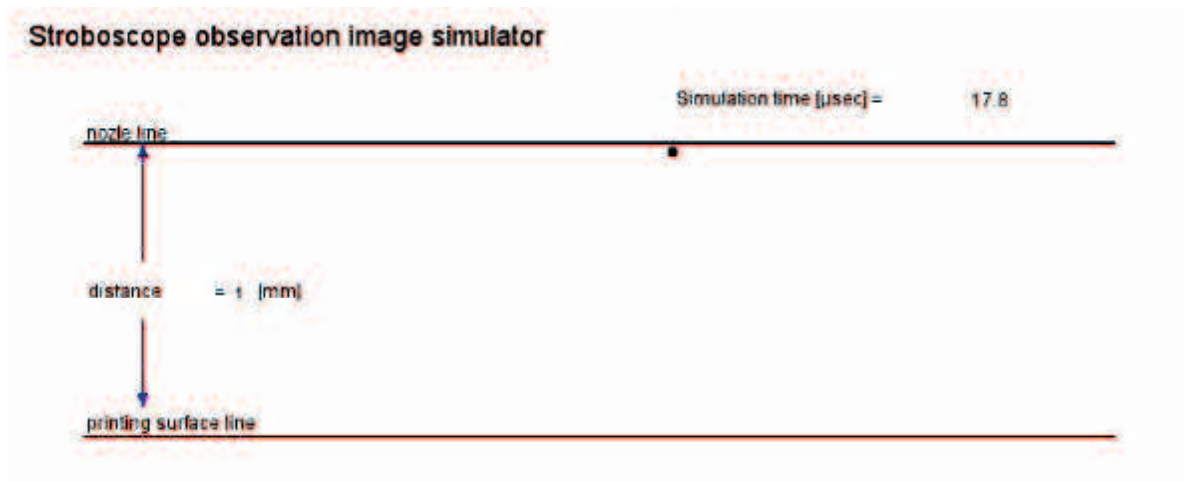


図 5.55 アニメーションの様子 1

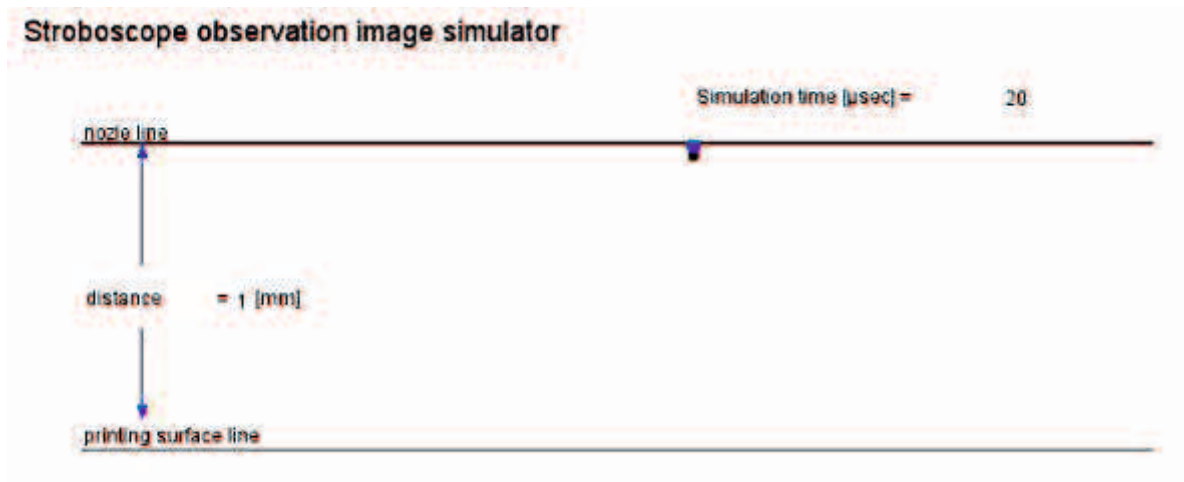


図 5.56 アニメーションの様子 2

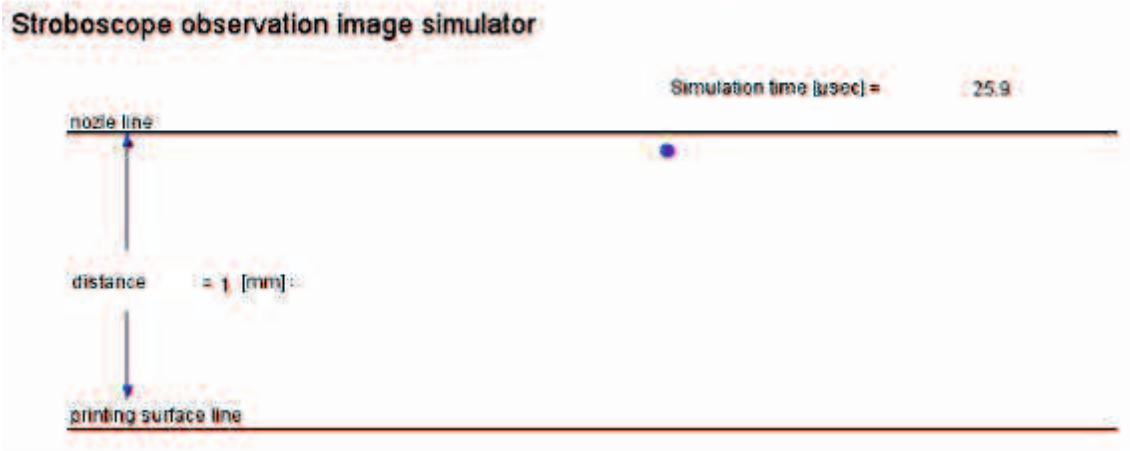


図 5.57 アニメーションの様子 3

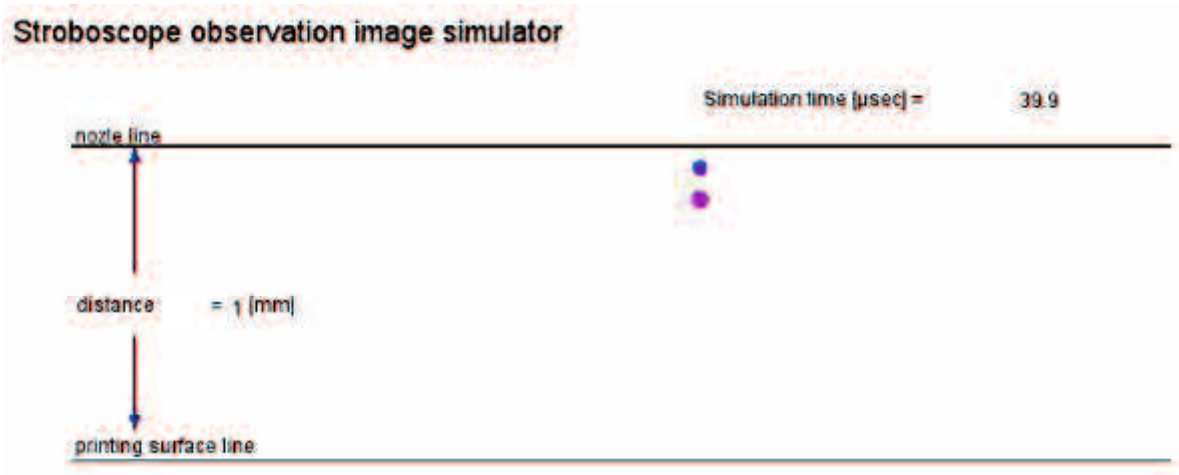


図 5.58 アニメーションの様子 4

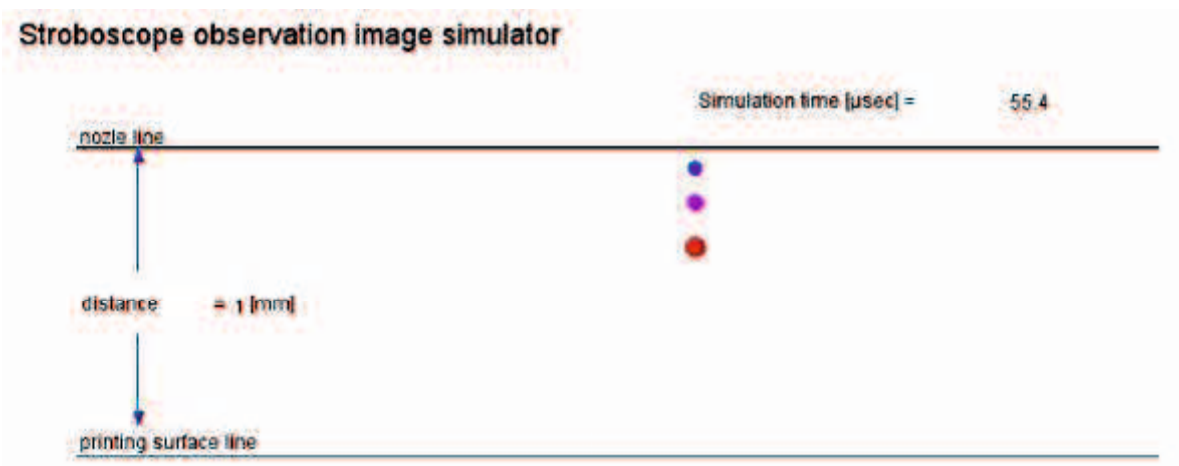


図 5.59 アニメーションの様子 5

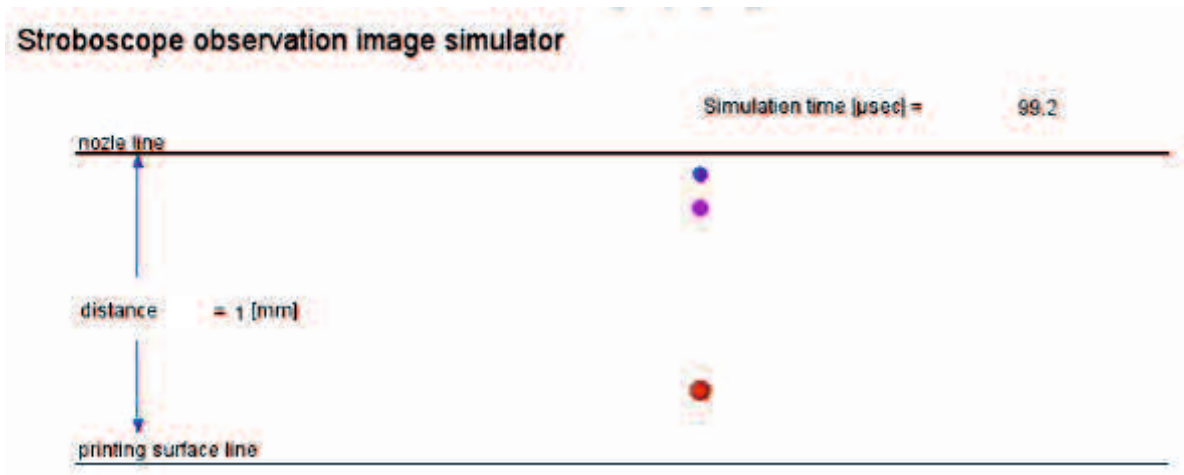


図 5.60 アニメーションの様子 6

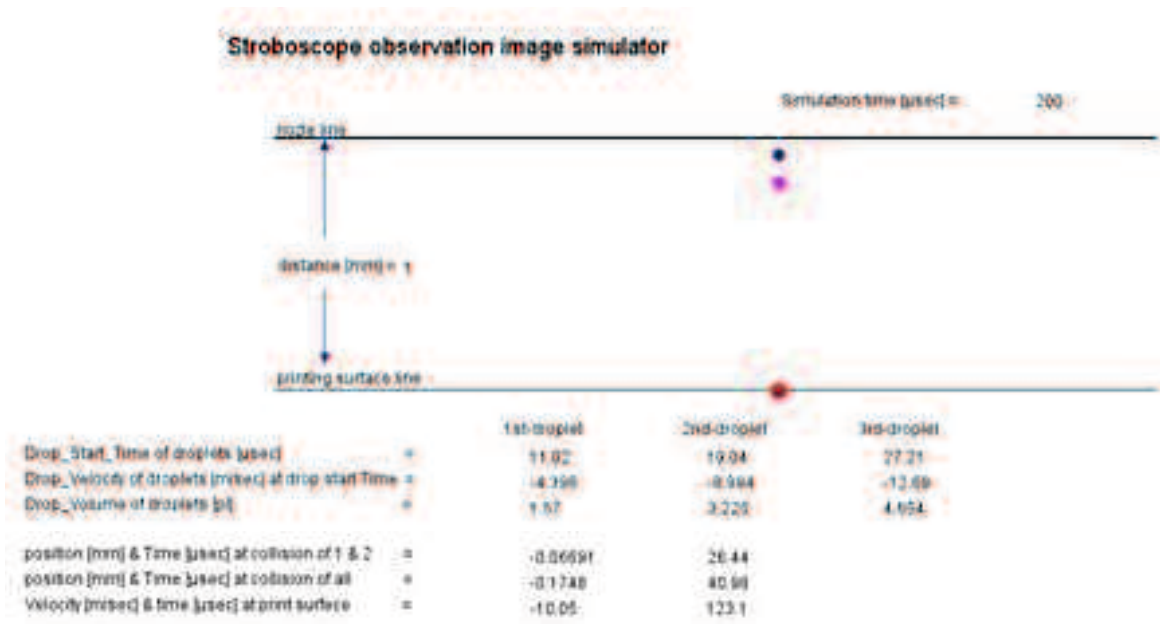


図 5.61 アニメーション終了時の画面

#### 5.6.4 まとめ

本節では、ピエゾ式インクジェットプリンタヘッドのシステムモデルをコンピュータ上で構築し、シミュレーションすることでプリンタヘッドの挙動を定性的に表現することが可能であることを示した。システムモデルを用いることで設計上流段階から製品の機能に大きく影響をおよぼす設計因子を短時間で効率よく把握することが可能である。

次節ではシステムモデルについて、シミュレーション結果に関する定量的な検証を実施し信頼性を確認する。

## 5.7 実験評価システムに関する検討

インクジェット方式のプリンタには、吐出方式の違いから大きく分けてサーマル方式とピエゾ方式の2種類[80]-[82]がある。図 5.62 にサーマル方式のインクジェットプリンタの概略図を図 5.63 にピエゾ方式のインクジェットプリンタの概略図を示す。前者のサーマル方式は、インクを加熱させ、沸騰による気泡の圧力でインク滴を吐出する。後者のピエゾ方式は、ピエゾ(圧電素子)にピエゾに電圧を印加し、振動板を変形させることにより液室のインクをノズルへ押し出し、液滴を吐出している。ピエゾ方式のインクジェットプリンタは、熱を使用しないため、様々なインクが使用できる。そのため、印刷対象が紙に限らず、有機 EL ディスプレイ、図 5.64 のような回路基板[83]、錠剤などへの応用が可能である。

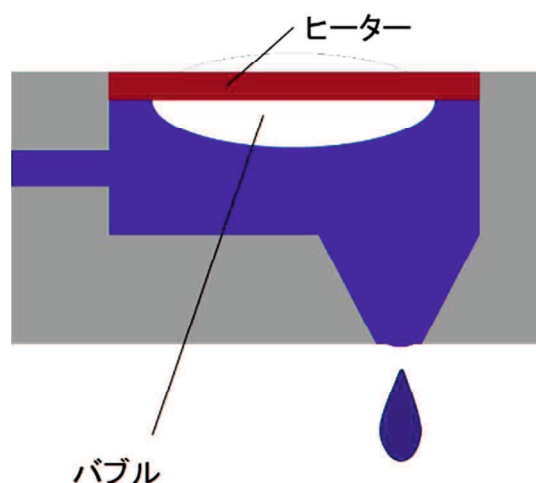


図 5.62 サーマル方式インクジェットプリンタヘッド

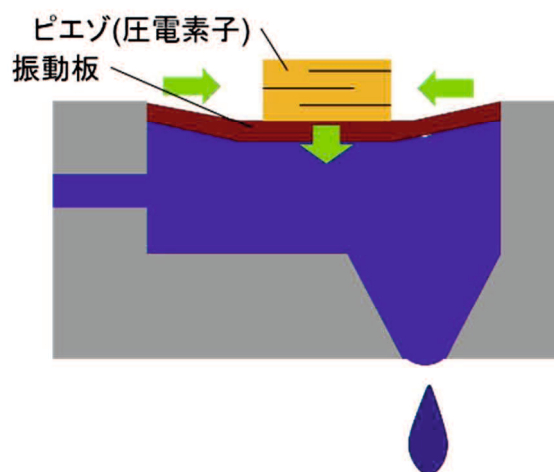


図 5.63 ピエゾ方式インクジェットプリンタヘッド

前述のインクジェットプリンタは、ピエゾに電圧を印加し、ダイヤフラムを変形させることにより液室のインクをノズルへ押し出し、液滴を吐出している。この電圧は、入力電圧波形と呼ばれ、この波形を変化させることにより、吐出速度や体積をコントロールする。印刷品質を向上させるためには、吐出される液滴の体積や速度を適切に制御できなければならないが、インクと入力電圧波形のマッチングに関する評価方法について十分な検討がなされていない。また、先行研究においても、実機における検証はまだ行われてない。そこで、精度の保障された実験装置・実験方法の確立に対する要求がある。そこで本節では、実験評価システムについて検討した結果を示す。

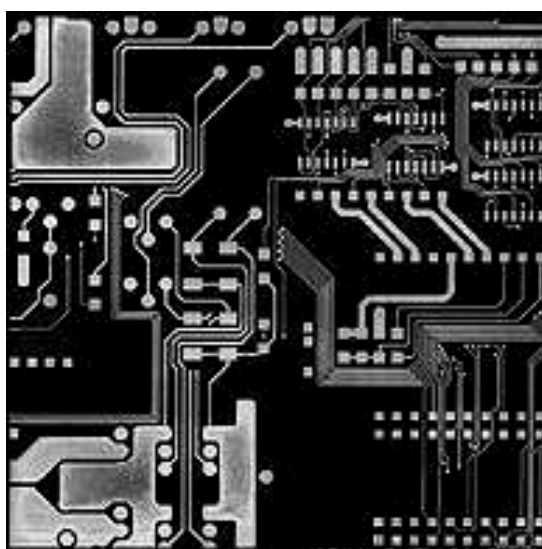


図 5.64 プリント基盤

### 5.7.1 ピエゾ方式インクジェットプリンタの入力電圧波形

ピエゾ方式のインクジェットプリンタは、図 5.65 に示す入力電圧波形[161]-[164]により吐出される液滴の速度や体積を変化させている。この波形は、Base Volt[V], DOWN[ $\mu$ s], KEEP[ $\mu$ s], UP[ $\mu$ s], WAIT[ $\mu$ s]を変更することで、コントロールすることができる。また、この波形の変化とヘッドに起こる変化の関係は図 5.66 のように表される。本研究で使用するインクジェットプリンタは、図 5.66 における電圧が印加された状態 (WAIT) から電圧が零まで下げられた状態(DOWN $\rightarrow$ KEEP), また電圧が印加される(UP)という 1 つのサイクルを通して液滴が吐出される。このような駆動方式を Pull-Push 駆動と呼ぶ。この方式では、最初に電圧を印加していない状態から始める Push-Pull 駆動よりも、液滴の大きさが小さく、液滴速度が速くなる特徴がある。ただし、速度が速くなる一方、後述するリガメントが発生しやすくなるデメリットもある。



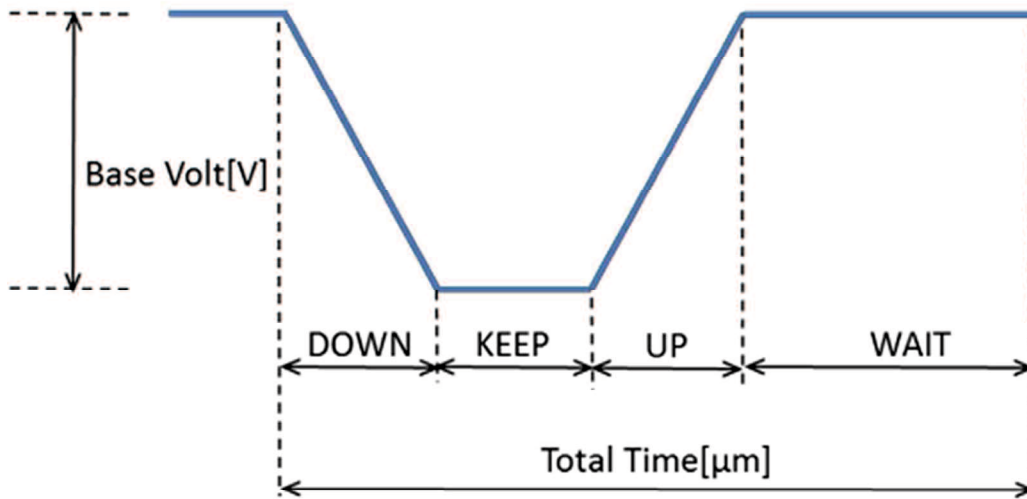


図 5.65 入力電圧波形

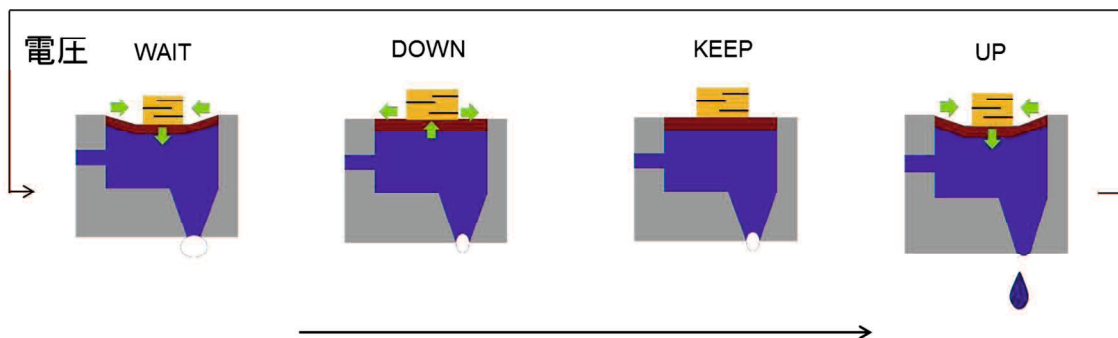


図 5.66 入力電圧波形とヘッドの動作関係

### 5.7.2 安定した液滴の吐出

印刷品質を向上させるためには、安定した吐出が必要不可欠である。本研究の実験装置では、液滴の速度、体積、形状の3点から評価を行うことができる。特に液滴の速度と形状は密接に関係しており、吐出速度を速くすれば、製造速度の高速化が可能となる反面、液滴の形状が崩れ印刷品質が悪化してしまう恐れがある。液滴の形状が崩れていない場合の画像を図 5.67 に示し、液滴の形状が崩れたときの画像を図 5.68 に示す。この液滴から伸びている液柱はリガメントと呼ばれ、図 5.69 のように定義される。本研究では、リガメントが無いものを安定、リガメントが有りのものを不安定と定義した。

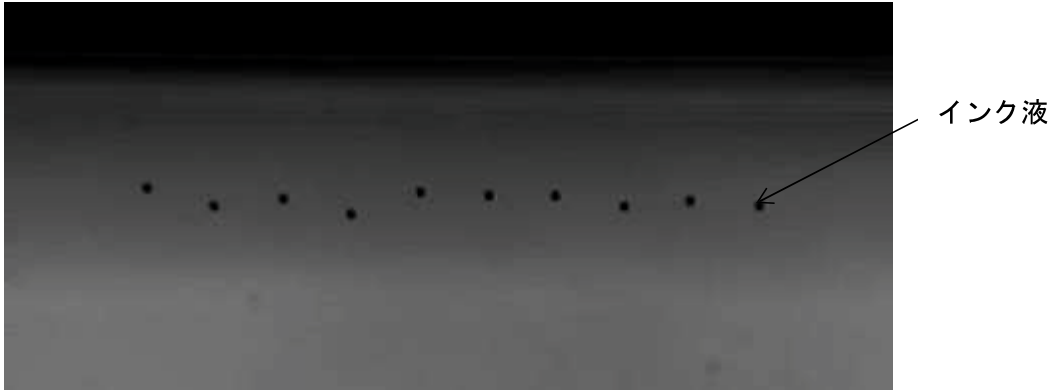


図 5.67 液滴の形状(リガメント無)

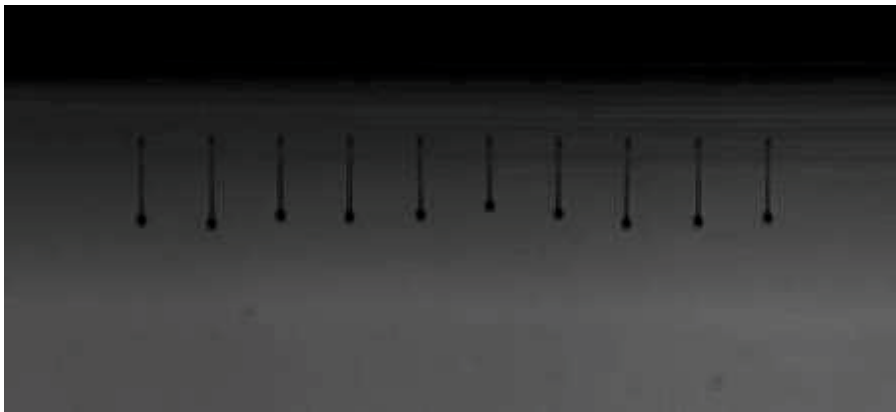


図5.68 液滴の形状(リガメント有)

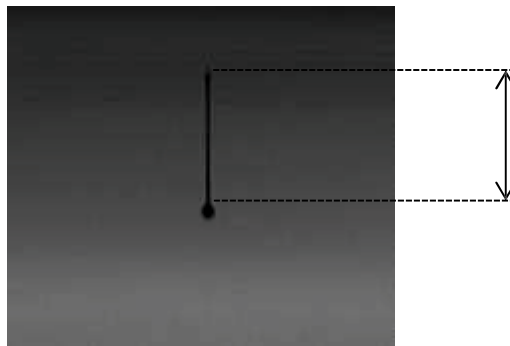


図5.69 リガメント長さ

### 5.7.3 実験評価システムに関する検討、液滴制御方法の検討

吐出される液滴を制御するため、ヘッドの入力パラメータ(入力電圧波形、ヘッド温度、インク物性)が液滴の形状や速度、体積などに与える影響を評価できる手法について提案し、その手法を用いた評価から各種入力パラメータが液滴の形状及び特性に与える影響について評価を行った結果の考察から、先に構築したインクジェットプリンタヘッドのシステムモデル評価システムを用いてシステムモデルと実験値のパラメータ調整手法を提案・評価を行う。

### 5.7.4 液滴吐出実験

#### (1) 実験装置

吐出される液滴の速度、体積、形状を測定するために図 5.70 に示す実験装置(IJ-DOT-R5)を使用した。この実験装置は図 5.71 に示すように

1. 圧電型 D33 積層 PZT を用いた印刷ヘッド GEN5
2. Charged- 結合素子(CCD) カメラ型 UI - 5240CP-M - GL
3. 光源(ストロボ LED)
4. 液体

により構成されており、ヘッドと PC とカメラを接続し、吐出された液滴の観察が行える。ここで、駆動電圧は、インクジェットヘッド内のピエゾアクチュエータを駆動するために使用され、ピエゾアクチュエータの膨張または収縮をもたらす。ピエゾアクチュエータは、インクチャンバ内に圧力を発生させ、適切な駆動電圧は、圧力波を増幅して、インクジェットヘッドからインク滴を噴射することができる。駆動電圧および波形設計は、液滴観察システム、すなわち「プリントヘッド GEN5 (2.1.5.0) のドロップステーション」を用いて PC 上に入力し、液滴を吐出するために、信号が PC からプリントヘッドに送られる。印刷ヘッド GEN5 に圧電式 D33 積層 PZT を用いて接続された液滴観察システムソフトウェアを PC に搭載し、印刷ヘッドを駆動するための駆動波形を入力する。図 5.72 に入力電圧波形を変更する画面を示す。

次に、シャドウグラフ技法を使用して、インクジェット液滴画像を得する。拡大表示されたドロップレットによってブロックされる光源の明るい背景を使用し、液滴画像は、iDS CMOS センサーを備えた UI-240CP-M-GL 型 CCD カメラを用いて撮影した。発射信号に同期したストロボ光を用いて、液滴画像は取得された CCD カメラ画像内で固定されているように見ることができる。ドロップレット画像は、PC 上にドロップウォッチの形で表示される。図 5.73 に液滴の観察画面を示す

また、インクボトルは外部にあり、ボトル内のインクの水面がヘッド面より-20[mm]になっている状態で実験を行う。また本実験評価システムはマルチパルスも設定することが可能である。

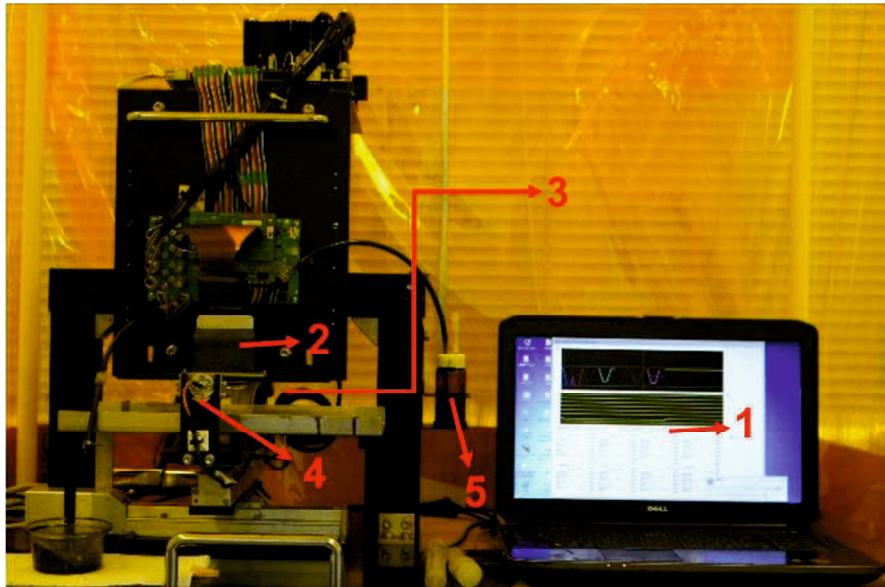


図 5.70 実験装置(IJ-DOT-R5)

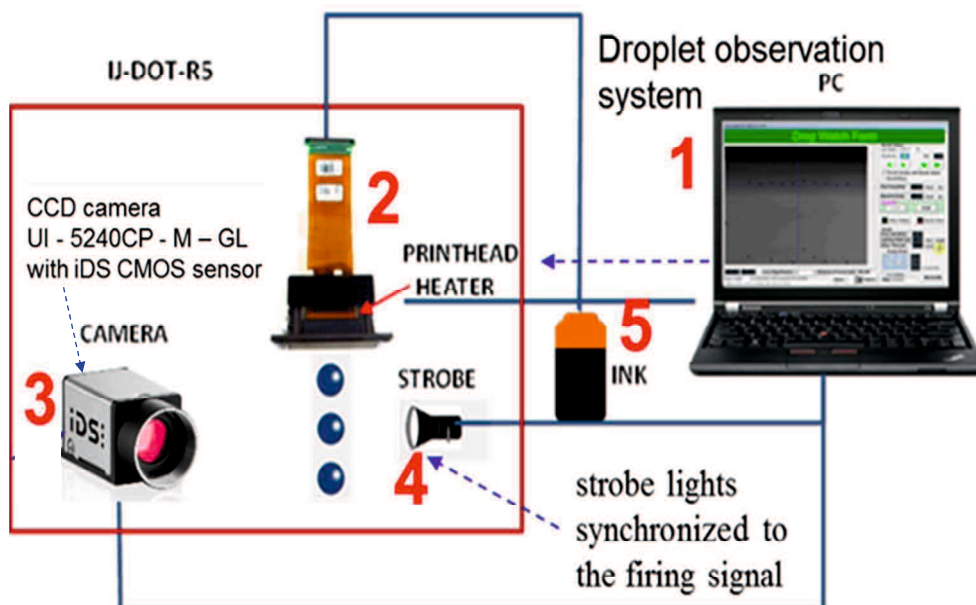


図 5.71 実験装置の全体図

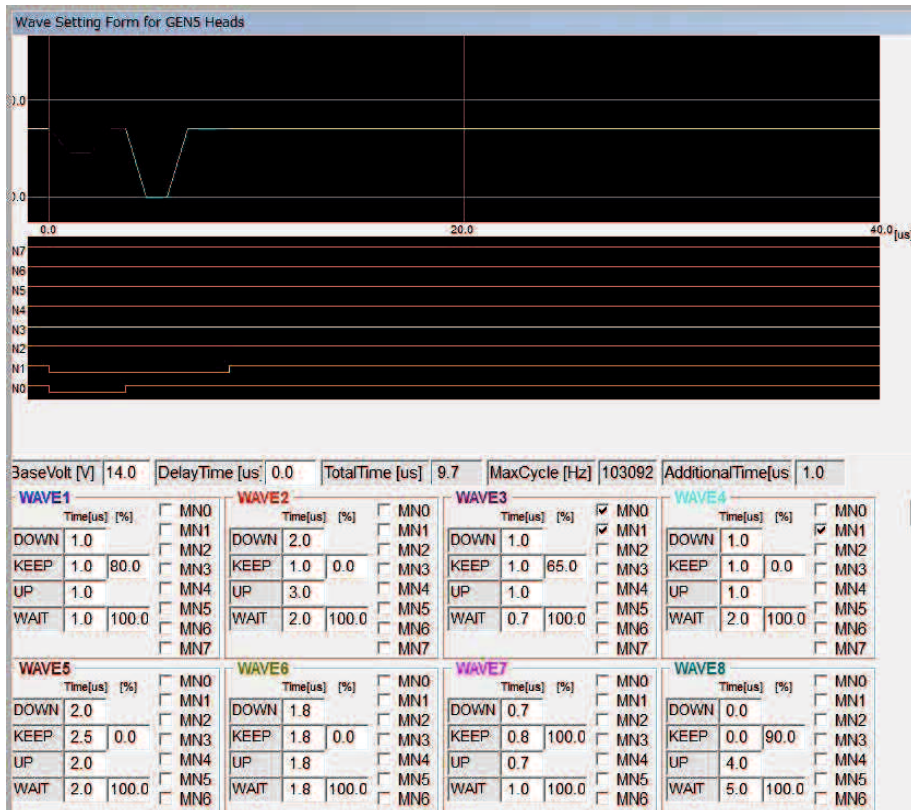


図 5.72 コントロール画面

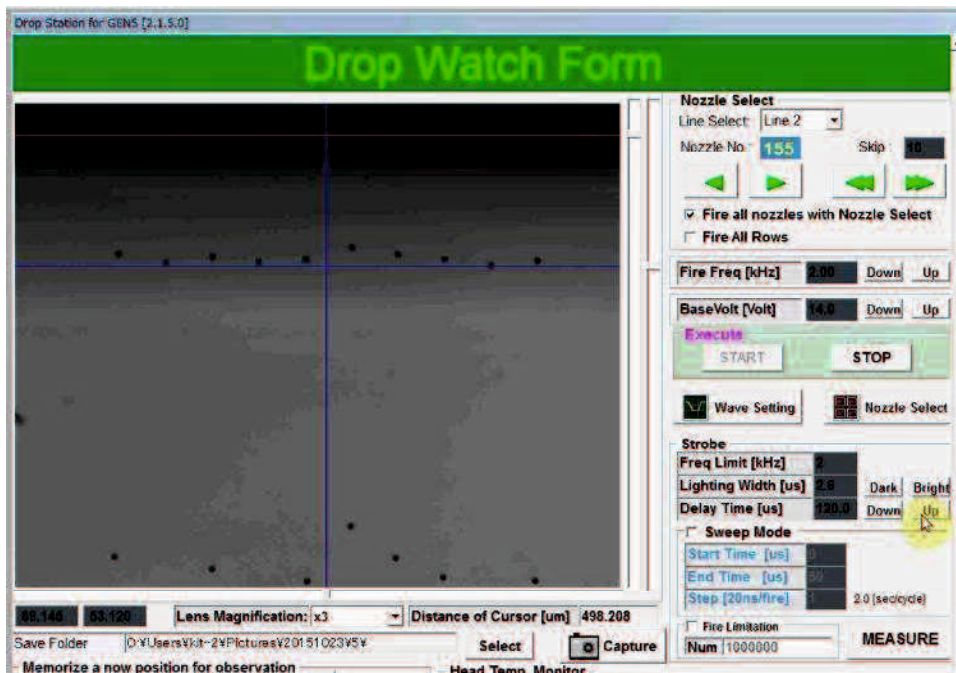


図 5.73 液滴吐出画面

また、体積を測定するために液滴の重さを測る装置として図 5.74 に示す天秤(AUW220D)を使用した。



図 5.74 電子天秤

## (2) 実験方法

先述したように本実験では、吐出される液滴の体積、速度、形状について評価することができる。今回、ノズルから 500[ $\mu\text{m}$ ]離れた位置における速度を液滴速度と定義し、500[ $\mu\text{m}$ ]離れた位置まで液滴が到達するのにかかる時間を計測し、速度を導出した。また、体積は 100 万発吐出した液滴の重さを測り、そこから 1 滴あたりの体積を求めた。図 5.73 上に表示されている赤線と青線の間隔は 500[ $\mu\text{m}$ ]に設定されており、その間を経過するのにかかる時間より速度を算出した。本実験において、インクはメーカーより支給された UV インクとダワノールを使用した。

### (3) 実験条件と評価方法

実験評価は、以下に示す 6 種類を行なった。

実験① ノズル間のばらつき検証

実験② 液滴吐出の傾向把握実験(インクジェットヘッドの固有周期の導出)

実験③ 吐出周波数と波形の関係

実験④ システムモデル構築及び検証用(温度, 波形, 電圧の関係)

実験⑤ 温度, 波形, 形状の関係及びマッピング

実験⑥ UV インクとダワノールの比較

また、詳細な条件を以下に示す。ただし、実験装置が 15[°C]以下の環境下では、ヘッドヒーターが機能しないため、室温 15[°C]以上、ヘッドヒーターの設定温度以下の室温で実験条件とした。

#### 実験① ノズル間のばらつき検証

本研究では 10 個のノズルを同時に吐出させ液滴の観察を行った。図 5.67 に示すようにノズル間に液滴の吐出のばらつきが発生する、そのため各ノズルにおけるばらつきがどのように発生するかを調査した。以下にノズルにおける吐出のばらつき調査において入力した条件を表 5.17 に示す。

表 5.17 実験条件①

吐出周波数	2[kHz]
電圧	14[V]
波形	T1=[2μs], WAIT=[2μs](固定)
ヘッド温度	28[°C]
使用インク	ダワノール

## 実験② 液滴吐出の傾向把握実験(インクジェットヘッドの固有周期の導出)

最も速度, 体積が最大となる波形を検証した. 本研究ではヘッドの周期は単パルスにおける吐出であることを踏まえ,  $KEEP[\mu s] + (UP[\mu s] + DOWN[\mu s]) / 2$  と定義した. 表 5.18 と表 5.19 に条件を示す.

表 5.18 実験条件②

吐出周波数	2[kHz]
電圧	14[V]
波形	表 2-3 参照
ヘッド温度	40[°C]
使用インク	UV インク

表 5.19 実験条件②(波形)

条件	DOWN[ $\mu s$ ]	KEEP[ $\mu s$ ]	UP[ $\mu s$ ]	周期[ $\mu s$ ]
1	1.0	2.0	1.0	6.0
2	1.0	2.5	1.0	7.0
3	1.0	3.0	1.0	8.0
4	1.0	3.5	1.0	9.0
5	1.0	4.0	1.0	10.0
6	1.0	4.5	1.0	11.0
7	1.0	5.0	1.0	12.0



## 実験③ 吐出周波数と波形の関係

吐出周波数と波形の関係、波形と速度の関係を求めることを目標とした実験である。DOWN=KEEP=UP=T1[ $\mu$ s]とし、実験条件を表 5.20 に示し、T1 を以下の図 5.75 に示す。

表 5.20 実験条件③

吐出周波数	2[kHz]
電圧	14[V]
波形	T1=1.2~2.8[ $\mu$ s](0.2[ $\mu$ s]間隔), WAIT=2[ $\mu$ s](固定)
ヘッド温度	28[ $^{\circ}$ C]
使用インク	ダワノール

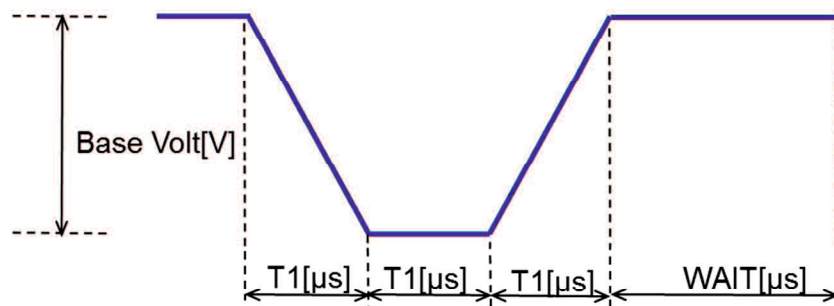


図 5.75 実験条件(波形)

## 実験④ システムモデル構築及び検証用(温度, 波形, 電圧の関係)

システムモデルの構築に必要なデータの取得を目的とする. 入力(波形, 電圧, ヘッド温度)と出力(体積, 速度)からシステムモデルの同定を行うため, 速度導出に関する実験を行う. 設定条件を以下の表 5.21, 表 5.22 に示す. さらに, 体積導出に関する実験条件を表 5.23 に示す.

表 5.21 実験条件④(速度)

Head Temp[V]	Down [ $\mu$ s]	Keep [ $\mu$ s]	Up [ $\mu$ s]	Wait	Base Volt[V]
20,21,22[ $^{\circ}$ C]	1	2.0	1	2	13,13.5,14[V]
		2.5			
		3.0			
		3.5			
		4.0			

表 5.22 実験条件④-2(速度)

Head Temp[V]	Down [ $\mu$ s]	Keep [ $\mu$ s]	Up [ $\mu$ s]	Wait [ $\mu$ s]	Base Volt[V]
23,24,25[ $^{\circ}$ C]	1	2.0	1	2	12,12.5,13[V]
		2.5			
		3.0			
		3.5			
		4.0			

表 5.23 実験条件④-3(体積)

Head Temp[V]	Down [ $\mu$ s]	Keep [ $\mu$ s]	Up [ $\mu$ s]	Wait [ $\mu$ s]	Base Volt[V]
20,25,30[ $^{\circ}$ C]	1	2.0	1	2	14,17,20[V]
		3.0			
		4.0			

表 5.24 実験条件④(体積検証用)

吐出周波数	20[kHz]
電圧	14[V]
波形	T1=1~2.8[ $\mu$ s](0.2[ $\mu$ s]間隔), WAIT=2[ $\mu$ s](固定)
ヘッド温度	28[ $^{\circ}$ C]
使用インク	ダワノール

## 実験⑤ 波形と液滴形状の関係及びマッピング

前述のリガメントの長さの計測と速度の関係を求め、どの条件が安定した吐出(リガメントが発生しない)かを明らかにすると同時に吐出が安定する範囲の速度を求めることを目的とする。

表 5.25 に実験条件を示す。

表 5.25 実験条件⑤

吐出周波数	2[kHz]
電圧	11~20[V](1[V]間隔)
波形	T1=0.6~3[ $\mu$ s](0.2[ $\mu$ s]間隔), WAIT=2[ $\mu$ s](固定)
ヘッド温度	20 $^{\circ}$ C,24 $^{\circ}$ C,28 $^{\circ}$ C(ダワノール) 35 $^{\circ}$ C,40 $^{\circ}$ C,45 $^{\circ}$ C(UV インク)
使用インク	ダワノール,UV インク

## 実験⑥ UV インクとダワノールの比較

KEEP のみを変化させることで、KEEP と液滴の吐出の関係を明らかにすると同時に、使用するインクの違いについても考察することを目的とする。液滴の速度では、リガメントの有無による不安定、安定があり正しく比較することが難しいため、液滴の体積による比較を行う。表 5.26 に実験条件を示す。

表 5.26 実験条件⑥

吐出周波数	2UV0[kHz]
電圧	14[V]
波形	DOWN=UP=1[ $\mu$ s], KEEP=2~4 $\mu$ s(0.5 $\mu$ s 間隔) WAIT=2 $\mu$ s(固定)
ヘッド温度	28°C(ダワノール), 40°C(UV インク)
使用インク	ダワノール,UV インク

## (4) 実験結果と考察

実験①～⑥の結果をそれぞれ以下に示す。

## 実験①

ノズル間のばらつきを図 5.76 に示す。図 5.76 のように吐出された液滴を画像で確認するとばらつきがあることが分かる。より多くの入力電圧波形のパターンの実験を行うためには、数多くのノズルを測定し、平均値を求めると、明らかに他のノズルとは値が大きく異なるノズルを排除し、正規分布の中央に位置するノズルを選定し、実験を進めていく方が効率的であると判断した。ただし、再現性を確認するために、必ず同じノズルで同条件の実験を繰り返し測定した。

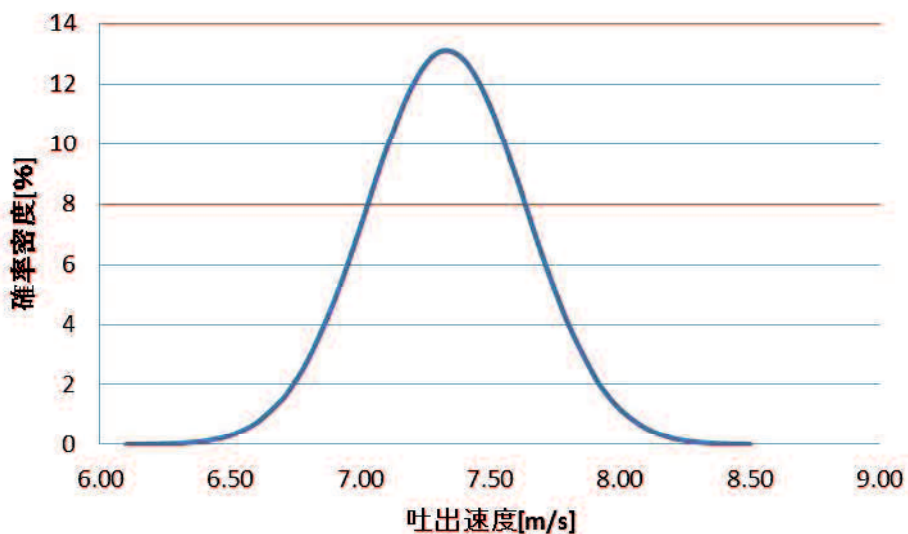


図 5.76 ノズル間のばらつき

実験②

図 5.77 に周期と体積の関係を示し、図 5.78 に周期と速度の関係を示す。この結果より体積と速度共に周期が 8[ $\mu$ s]が最も値が大きい結果となった。インクジェットヘッドの取扱説明書では基本波形と呼ばれる DOWN=KEEP=UP=WAIT=2[ $\mu$ s]波形を基準としており、先述した周期の求めたかたを適用すると基本波形の周期 8[ $\mu$ s]となる。実験②の結果も同様に周期 8[ $\mu$ s]付近で体積、体積が最大となっており、本研究で使用したインクジェットプリンタヘッドの固有周期(共振周期)であると考えられる。

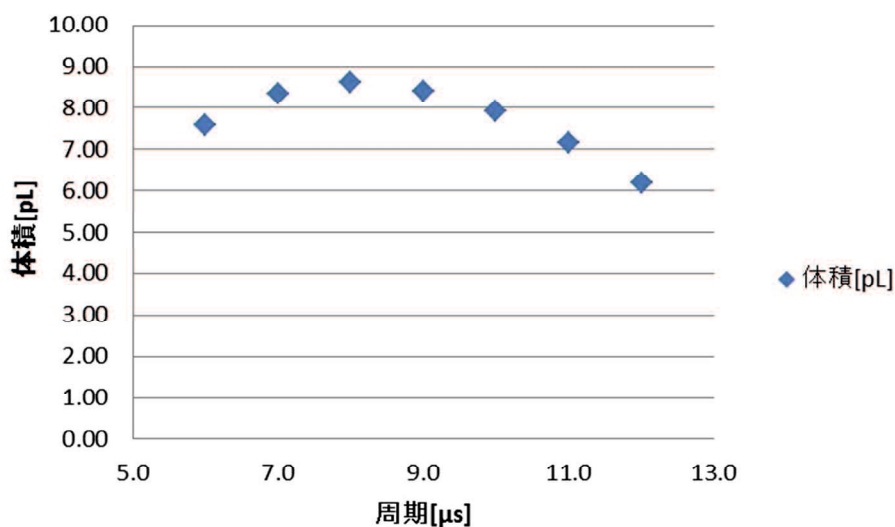


図 5.77 周期と体積の関係

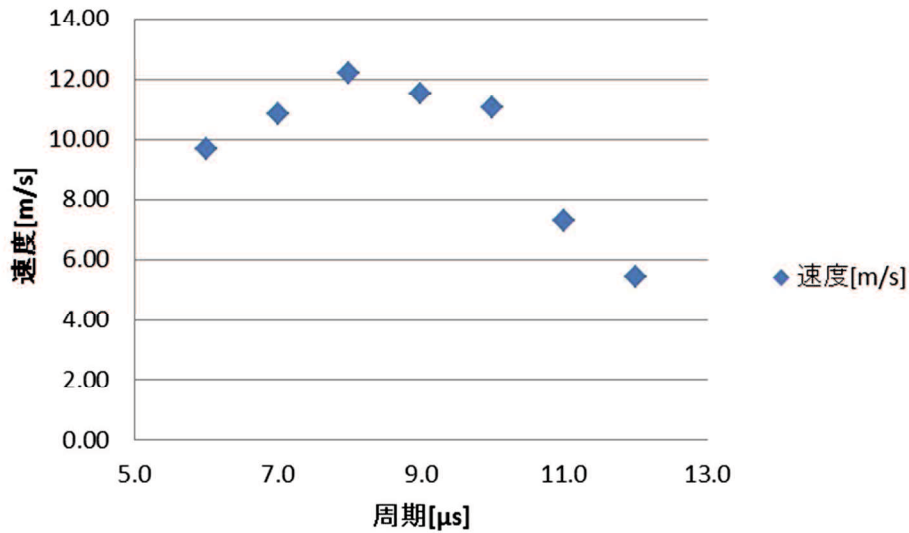


図 5.78 周期と速度の関係

実験③

図 5.79 に吐出周波数と速度の関係を示し、図 5.80 に T1 と速度の関係を示す。図 5.79 の吐出周波数と速度の関係より、 $T1=2.6, 2.8[\mu s]$ を除けば、吐出周波数 20[kHz]以下であればほとんど吐出速度に影響がないと言える。図 5.80 の T1 の速度の関係を見ると、実験②で示した結果と同様に周期が 8[μs](実験③における  $T1=2[\mu s]$ )で最も速度が最大となった。

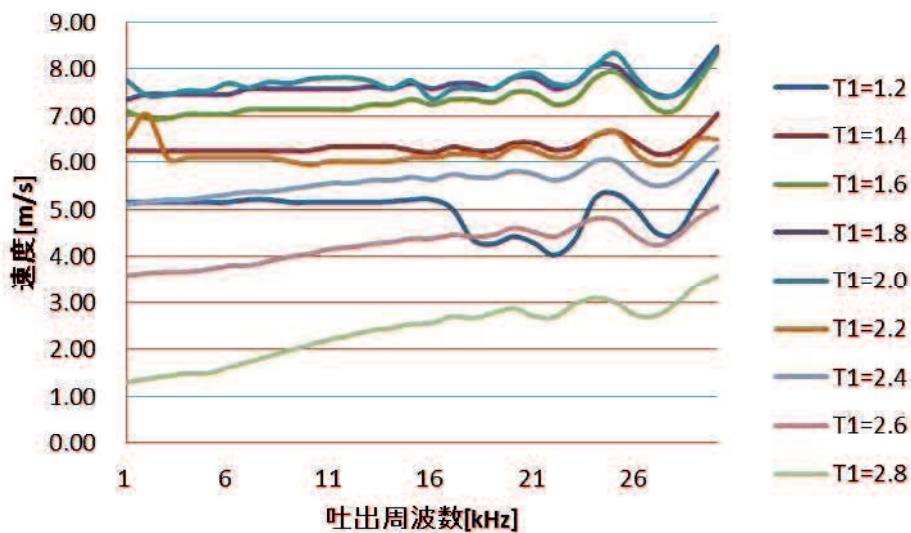


図 5.79 吐出周波数と速度の関係

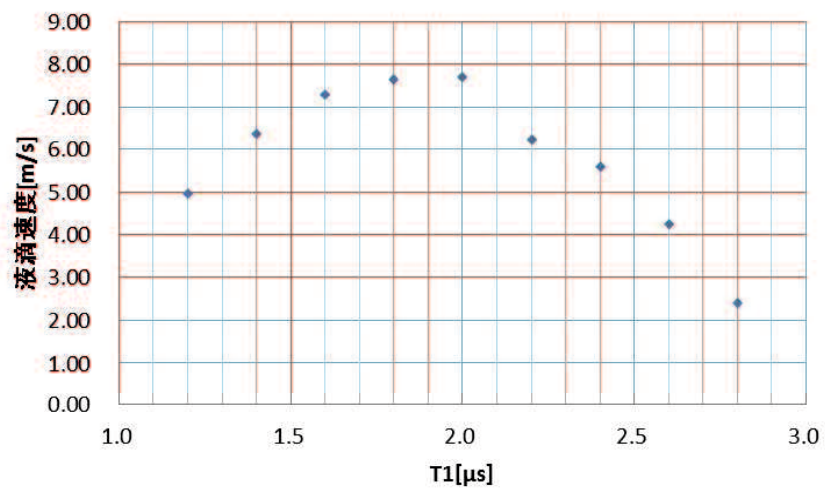


図 5.80 T1 と速度の関係

## 実験④

表 5.27～表 5.29 にシステム同定用のデータを示す。それぞれの表は、ヘッド温度、電圧、波形と速度、体積の関係をこの 2 つの表は表している。システム同定方法は、後述する。

表 5.27 システム同定用実験データ(20~22℃)

Head Temp [°C]	Down [μs]	Keep [μs]	Up [μs]	Wait [μs]		Base Volt[V]		
						13	13.5	14
20	1	2.0	1	2	速度 [m/s]	1.83	2.98	3.91
		2.5				2.85	3.88	4.76
		3.0				3.04	4.03	4.90
		3.5				2.33	3.38	4.27
		4.0				0.93	1.65	2.67
21		2.0				2.67	3.58	4.46
		2.5				3.68	4.50	5.32
		3.0				3.95	4.76	5.56
		3.5				3.46	4.27	5.05
		4.0				2.07	2.98	3.82
22		2.0				3.68	4.55	5.43
		2.5				4.52	5.32	6.17
		3.0				4.67	5.49	6.25
		3.5				4.07	4.93	5.75
		4.0				2.55	3.50	4.33



表 5.28 システム同定用実験データ(23~25°C)

Head Temp[ °C]	Down [μs]	Keep [μs]	Up [μs]	Wait [μs]		Base Volt[V]		
						12	12.5	13
23	1	2.0	1	2	速度 [m/s ]	2.27	3.27	4.24
		2.5				3.23	4.17	5.05
		3.0				3.45	4.42	5.21
		3.5				2.95	3.91	4.74
		4.0				1.49	2.54	3.42
24		2.0				2.98	3.97	4.81
		2.5				3.91	4.81	5.62
		3.0				4.12	4.95	5.75
		3.5				3.62	4.50	5.26
		4.0				1.89	3.21	4.03
25		2.0				3.58	4.46	5.32
		2.5				4.39	5.21	6.02
		3.0				4.55	5.38	6.17
		3.5				4.03	4.85	5.62
		4.0				2.61	3.52	4.35

## 実験⑤

表 5.29 システム同定用実験データ(体積)

Base Volt[V]	Head Temp[V]	T1 [ $\mu$ s]	Wait [ $\mu$ s]	速度[m/s]
14	28	1	2	5.04
		1.2		5.85
		1.4		6.55
		1.6		7.03
		1.8		7.21
		2		7.10
		2.2		6.78
		2.4		6.36
		2.6		5.74
		2.8		4.98

以下表 5.30 にヘッド温度 28[°C]の場合における電圧とリガメントの長さの関係を示し、表 5.31 に同じ条件における電圧と速度の関係を示す。本実験における安定、不安定の評価を適用すると、黄色で示したリガメントが 0 の部分が安定に相当する部分である。

表 5.30 波形とリガメントの関係

電圧	T1[μs]																			
	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2	2.2	2.4	2.6	2.8	3							
11	-	-	-	-	0	0	0	0	0	-	-	-	-							
12	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-							
13	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-							
14	-	-	0	0	55	90	70	0	0	0	0	0	-							
15	-	0	0	135	200	225	220	175	40	0	0	0	-							
16	-	0	0	240	280	310	300	275	200	0	0	0	0							
17	0	0	130	240	300	330	350	325	275	145	0	0	0							
18	0	30	215	305	340	375	380	370	320	240	0	0	0							
19	0	65	280	340	375	390	500	500	350	290	115	0	0							
20	0	240	320	365	390	500	500	500	390	320	200	0	0							

単位[μm]

表 5.31 波形と速度の関係

電圧	T1[μs]		0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2	2.2	2.4	2.6	2.8	3
	11	-	-	-	-	-	0.83	1.85	2.23	2.05	1.37	-	-	-	-
12	-	-	-	1.60	3.01	3.82	4.13	3.94	3.33	2.23	-	-	-	-	-
13	-	-	-	1.70	3.45	4.72	5.43	5.49	4.90	3.88	2.16	-	-	-	-
14	-	-	-	3.55	5.05	6.17	7.04	7.46	6.25	5.26	3.68	1.35	-	-	-
15	-	-	-	2.66	5.10	6.41	8.06	9.09	8.47	6.67	4.95	2.84	-	-	-
16	-	-	-	4.17	6.41	8.33	9.80	10.87	11.63	10.42	8.77	4.07	1.19	-	-
17	2.13	5.56	8.20	10.00	11.63	12.82	13.16	13.16	12.20	10.42	7.81	5.10	2.49	-	-
18	3.62	6.85	9.80	11.63	13.16	14.29	14.71	14.71	13.89	11.90	9.43	6.02	3.55	-	-
19	4.90	8.62	11.36	13.16	14.71	15.63	16.13	16.13	15.15	13.16	10.87	7.46	4.46	-	-
20	6.02	10.20	12.82	14.29	16.13	17.24	17.24	17.86	16.67	14.71	11.90	8.77	5.26	-	-

単位[m/s]

次に、図 5.81 に液滴の吐出なし、安定、不安定を整理して縦軸を電圧[V],横軸を T1[μs]としたマッピングを示す。また同様に、ヘッド温度を 20[°C],24[°C] に変更し、マッピングしたものを図 5.82,図 5.83 に示す。

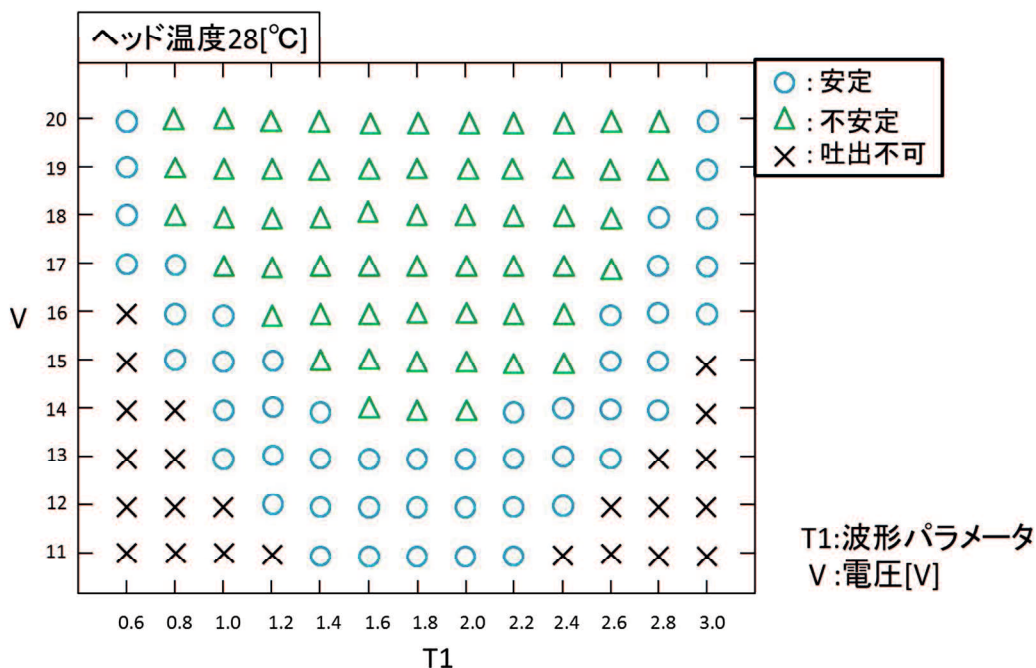


図 5.81 波形・電圧・温度と液滴の安定・不安定判定(ダワノール) 28°C

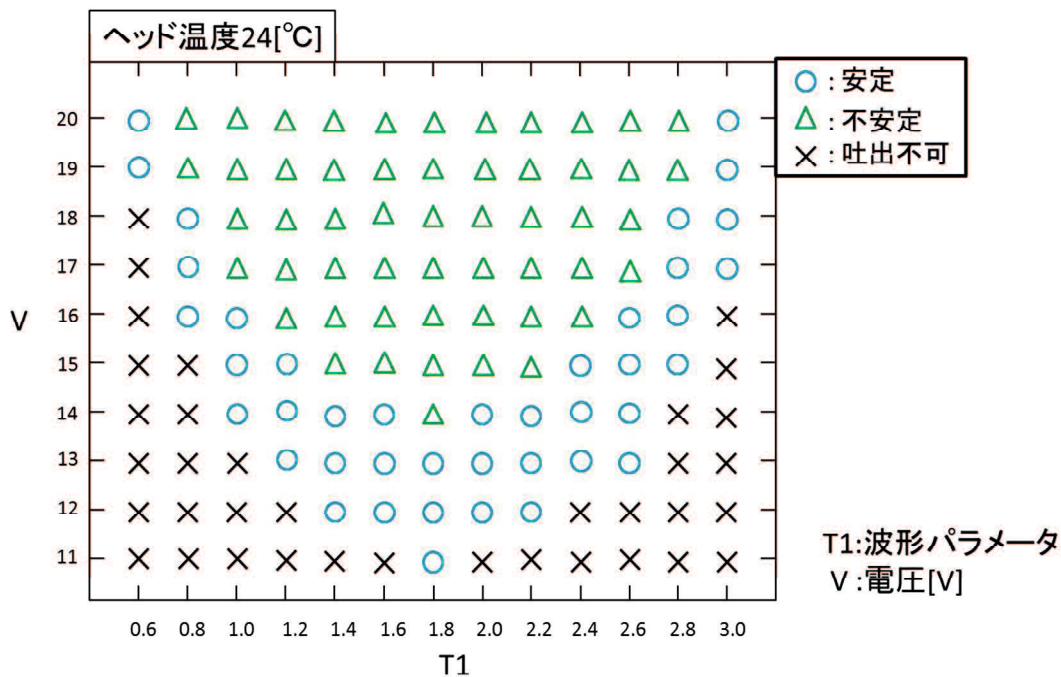


図 5.82 波形・電圧・温度と液滴の安定・不安定判定(ダワノール) 24°C

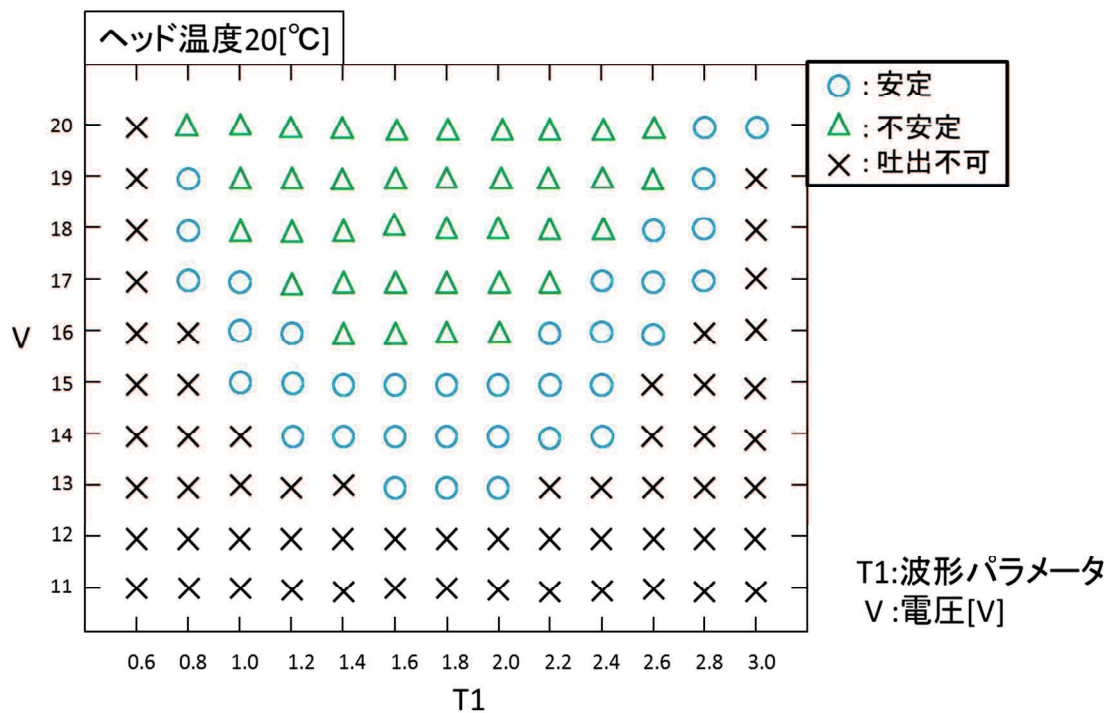


図 5.83 波形・電圧・温度と液滴の安定・不安定判定(ダワノール)20°C

図 5.81～図 5.83 のマッピングの結果より、温度が高くなるにつれ吐出速度が上がり、T1=2.0[μs]付近で最も低い電圧での液滴の吐出が確認できた。これは、実験②で判明した固有周期付近が最も速度が高い結果と一致する。実務で使用する場合においては、ヘッドの耐久性を考慮すると高圧での使用は好ましくないと判断できるため、T1=2.0[μs]前後を基準に低い電圧から調整するが良いと考えられる。また、食品に印刷するときでは、衛生上の問題からヘッド温度を上げられないため、高温時に比べ少し高い電圧を使用する必要がある。

図 5.84 に、ダワノール使用時のヘッド温度 28[°C]におけるリガメントが発生しない限界の速度の正規分布を示す。この正規分布の中心に位置する速度が、安定と不安定の境界の液滴速度であると考えられる。

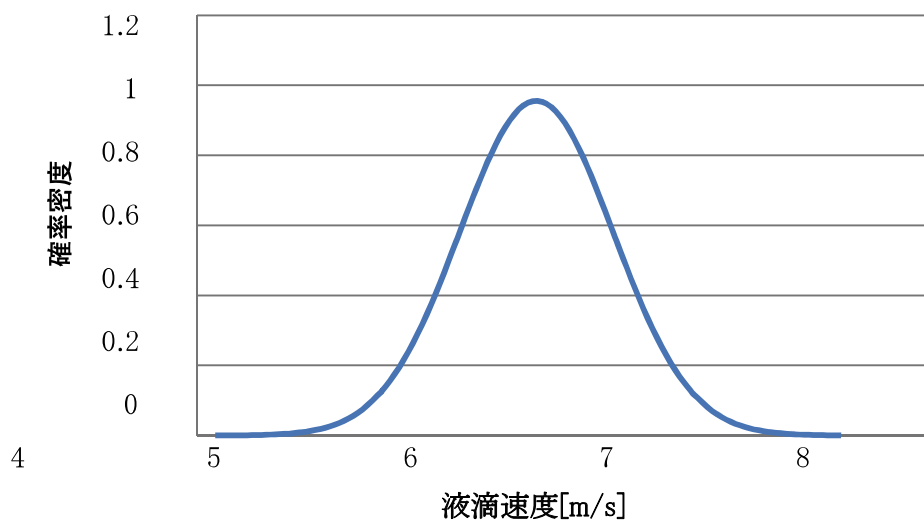


図 5.84 安定と不安定の境界(ダワノール)

同様に、UV インクを用いた場合の実験のマッピングを図 5.85～5.87 に示す。UV インクを用いた場合でもダワノールと同様に  $T1=2.0[\mu\text{s}]$  付近で最も低い電圧での液滴の吐出が確認できた。また、図 5.89 にUVインク使用時のヘッド温度  $40[^\circ\text{C}]$  における吐出された液滴のリガメントが発生する直前の速度の結果のばらつきを示す。図 5.84 と図 5.88 を比較すると、ダワノールの方が、速度が高い場合でも、安定した吐出をするということが分かる。

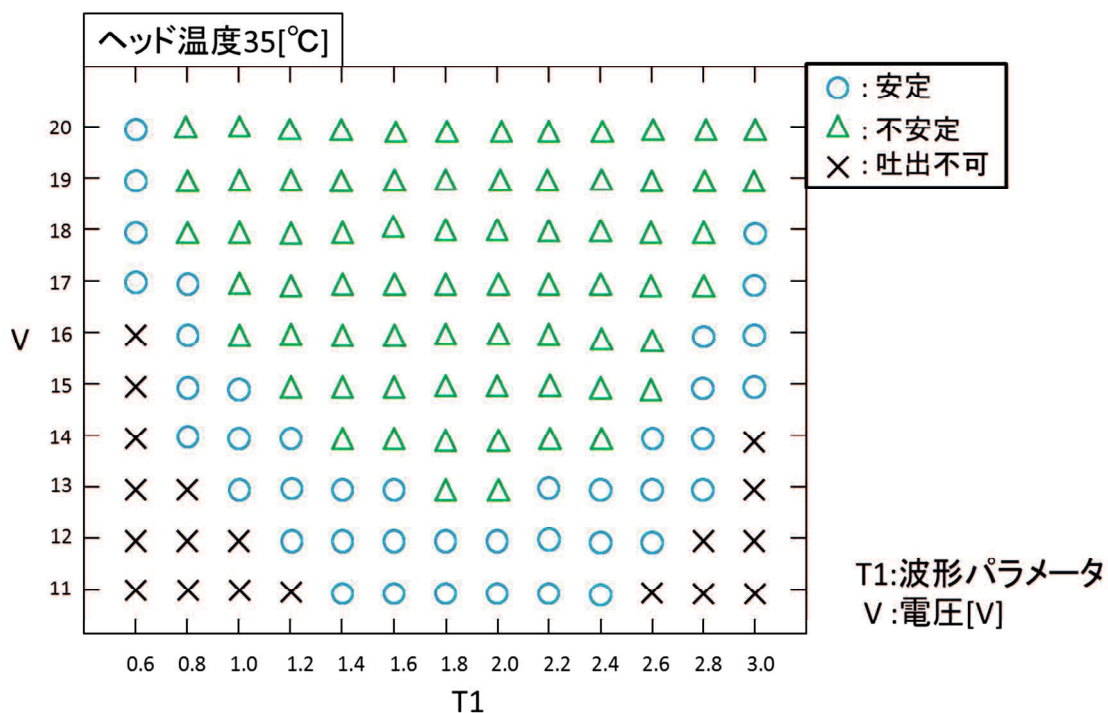


図 5.85 波形・電圧・温度と液滴の安定・不安定判定(UV インク) 35°C

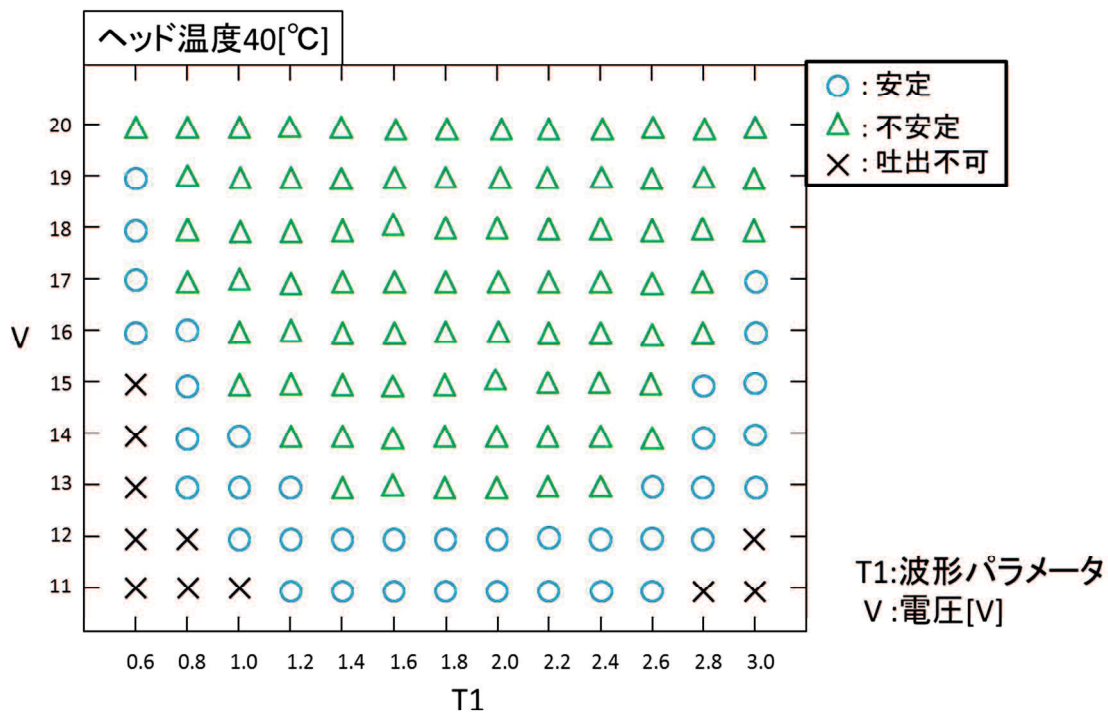


図 5.86 波形・電圧・温度と液滴の安定・不安定判定(UV インク) 40°C



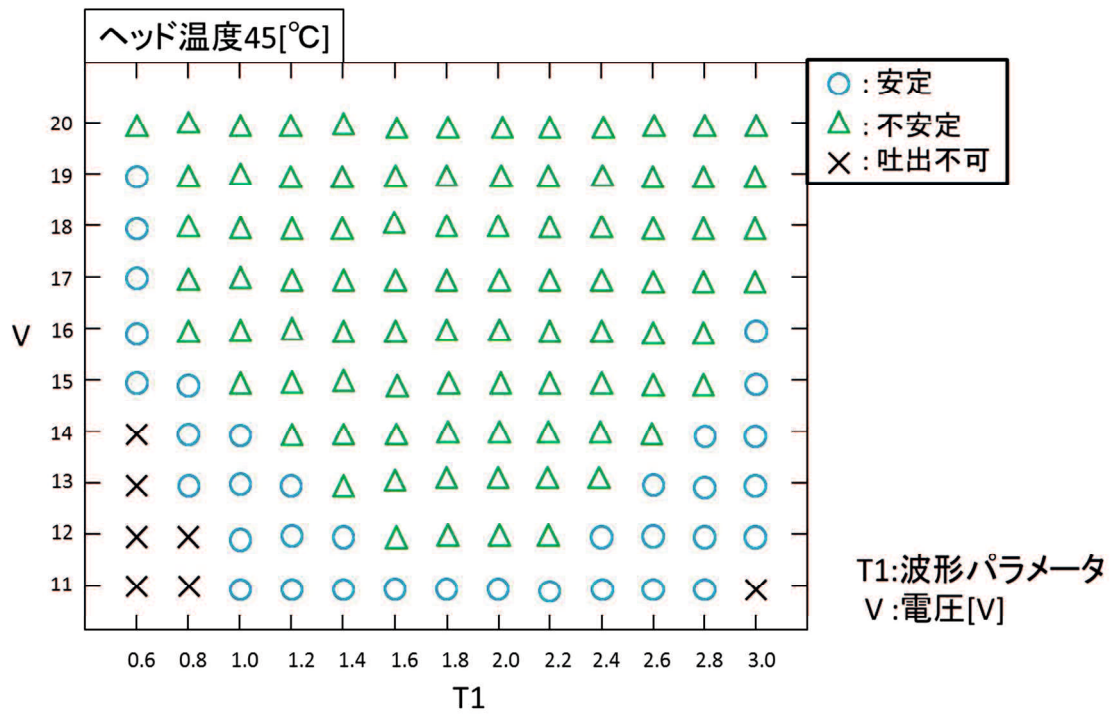


図 5.87 波形・電圧・温度と液滴の安定・不安定判定(UV インク) 45°C

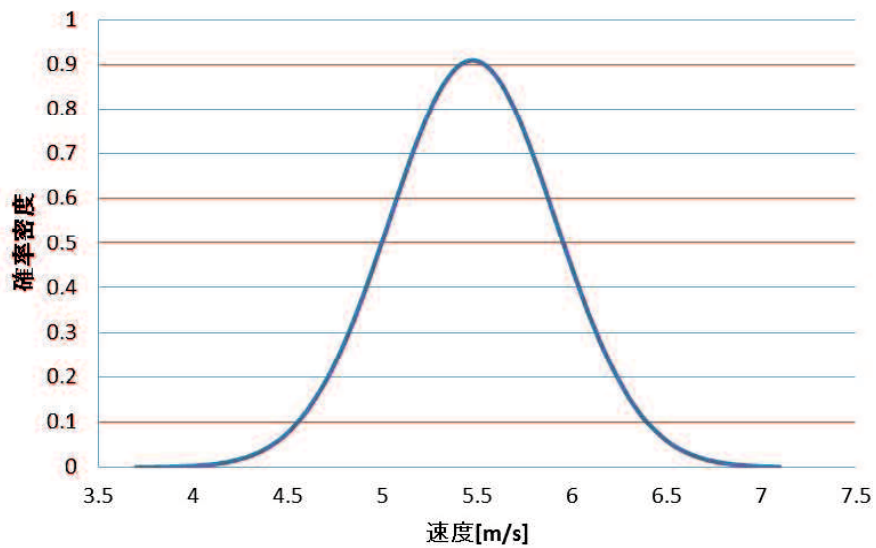


図 5.88 安定と不安定の境界(UV インク)

## 実験⑥

下図に KEEP のみを変更した場合の UV インクとダワノールの吐出された液滴の体積を示す。

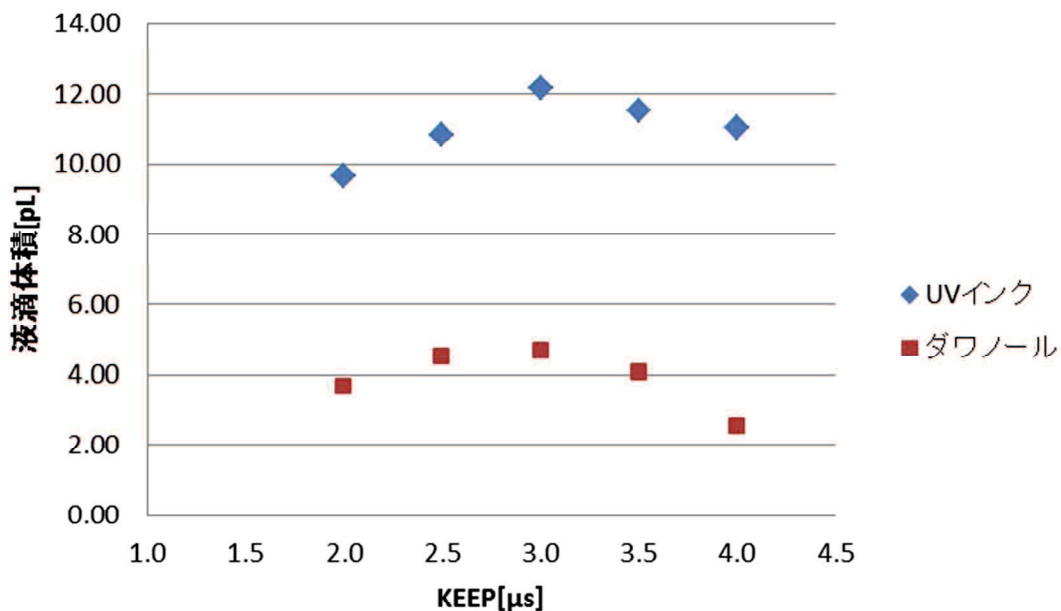


図 5.89 UV インクとダワノールの比較

図 5.89 の結果から、ダワノールと UV インクの実験結果の数値は異なるが、どちらも KEEP=3[μs]のとき、ともに液滴の体積が最大となることが分かる。また、KEEP[μs]に対する吐出された液滴の体積の変化も、ダワノールと UV インクともに似た傾向となっている。ダワノールと UV インクで実験結果が図のように異なるのは、インクの粘性の違いがあると考えられる。

## 5.7.5 システム同定

本研究で開発したシステムモデル及び実態評価システムを同期させるために、システム同定を行なった。同定には、実験②のデータを基準として用い同定した。また、システムモデルでは、実機同様に入力電圧波形、ヘッド温度、インクパラメーターを入力することにより、吐出される液滴の体積と速度を求めることができることから、図 5.90 に示すように、システムモデルにおける、入力(電圧波形、ヘッド温度、インク)と出力(速度、体積)の関係より補間係数を求め、システム同定した。

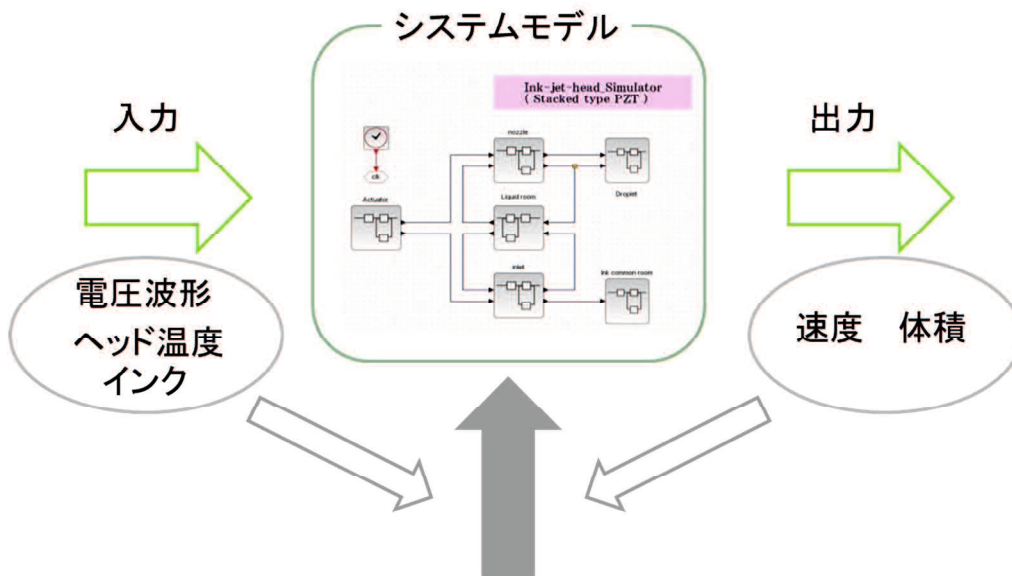


図 5.90 システム同定

次に具体的なシステム同定の方法を説明する。まず、補間なしで1質点系のモデルでの解析を行いシミュレーション値①を得る。このシミュレーション値①に(出力値(実験値)/シミュレーション値①)をかけ、シミュレーション値②を計算する。さらにこのシミュレーション値②に(出力値(実験値)×出力値(実験値)/シミュレーション値①/シミュレーション値②)をかけ補間を行う。以下にその考え方の図 5.91 を示す。ただし、ここでの出力値(実験値)は実験で得られた液滴の体積及び速度を指す。補間に使用する実験データは、ダワノールの場合、実験④の結果を使用し、UV インクの場合は、実験⑤の結果を使用する。

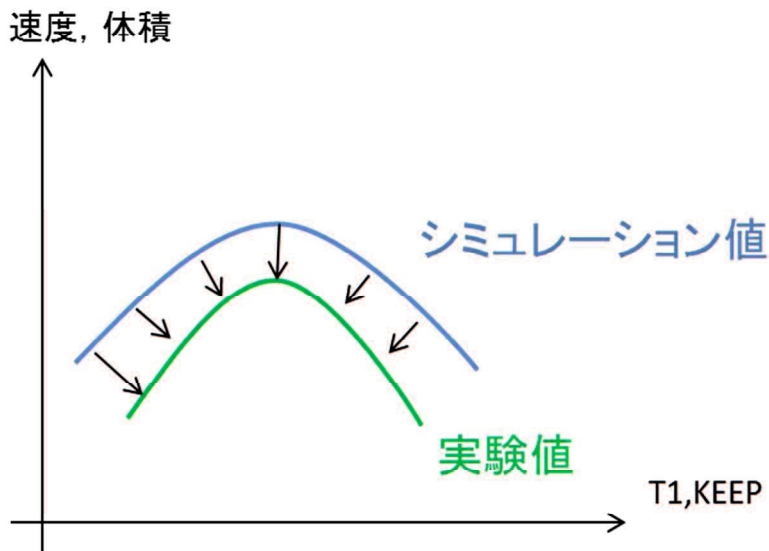


図 5.91 システム同定の考え方

## (1) 解析条件と結果

本研究で構築したシステムモデルによるシミュレーション結果と実験結果を比較し、システムモデルの実用性について検討する。先述したように本システムモデルでは、ヘッド温度とインクの種類(粘性)、入力電圧波形を変更し、吐出された速度と体積を求めることができる。比較する結果は実験④の検証結果と実験⑤マッピング結果を使用する。以下の表 5.32 に比較対象を示す。

表 5.32 比較対象

	使用インク	ヘッド温度[°C]	比較対象
条件 1	ダワノール	20, 24	速度
条件 2	ダワノール	28	体積
条件 3	UV インク	40	速度

条件 1 では、ヘッド温度 20[°C],電圧 14[V]の時とヘッド温度 24[°C],電圧 13[V]における実験とシミュレーション結果の比較を行う。ただし、波形は T1=1.4~2.4[μs](間隔 0.2[μs]間隔)とする。以下の図 5.92 と図 5.93 に条件 1 の比較結果を示す。

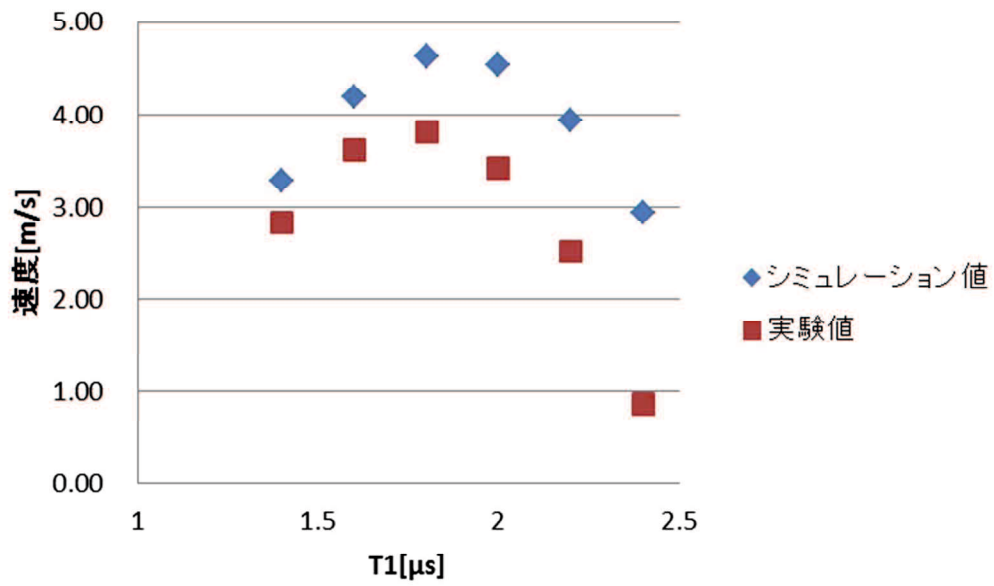


図 5.92 条件 1 の比較結果 (20°C)

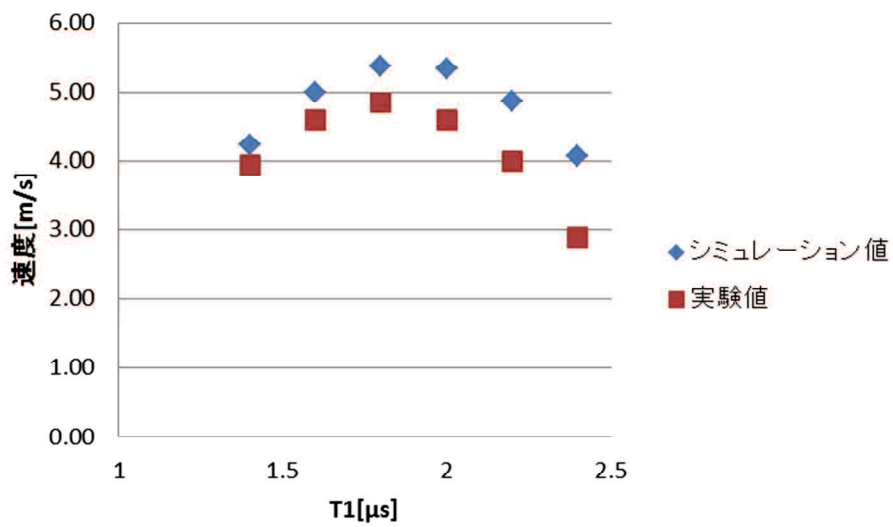


図 5.93 条件 1 の比較結果 (24°C)

次に、条件 2 の比較を行う。波形は  $T1=1.4\sim 2.4[\mu s]$ (間隔  $0.2[\mu s]$ 間隔), 電圧  $14[V]$ とする。図 5.94 に  $T1$  と体積の関係を示す。

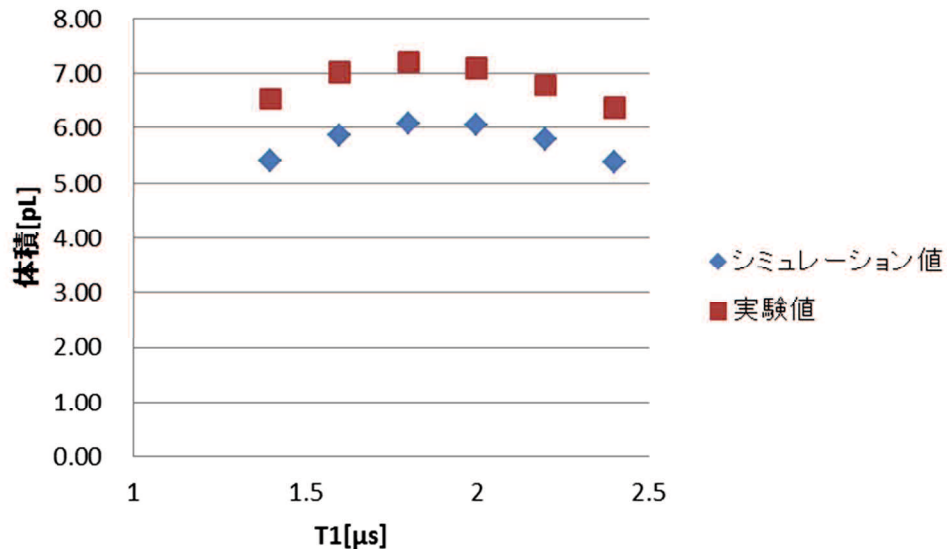


図 5.94 ダワノールにおける比較結果(体積)

最後に条件 3 の比較を行う。波形は  $T1=1.2\sim 2.8[\mu s]$ (間隔  $0.2[\mu s]$ 間隔), 電圧  $17[V]$ とする。図 5.95 に UV インクにおける  $T1$  と速度の関係を示す。

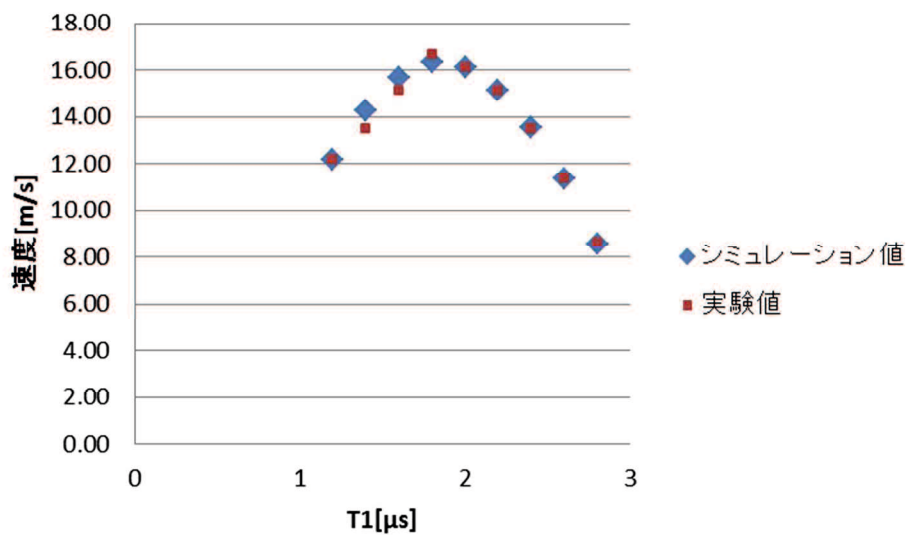


図 5.95 UV における比較結果

### 5.7.6 まとめ

本節では、吐出される液滴を制御するため、ヘッドの入力パラメータ(入力電圧波形、ヘッド温度、インク物性)が液滴の形状や速度、体積などに与える影響を評価できる手法について提案し、その手法を用いた評価から各種入力パラメータが液滴の形状及び特性に与える影響について評価を行った。その結果、吐出される液滴の体積、速度、形状からヘッドを評価する実験方法を提案した。その結果、温度、電圧、入力電圧波形(T1)の関係を形状、速度に関するパターンマッピングにより評価し、最適条件を求めることができた。

また、同時にシステムモデル評価システムについて同定を行い、システムモデルのシミュレーション結果は、実験値と比較して、定性的に傾向が一致しており、入力パラメータを任意で変更して、吐出される液滴の速度や体積の傾向を評価することができることを明らかにした。

## 5.8 予備振動を抑制した駆動波形によるシングル吐出制御の実験的研究

本節では、これまでのシステムモデル評価システム、実験評価システムを基に、予備振動を抑制した駆動波形によるシングル吐出制御方法について検討を行う。インクジェットプリンタの性能向上と印刷品質の向上を目的として、インクジェット印刷実験システムの研究開発が行われている。これらの研究は、圧電液滴型オンデマンド(DOD)インクジェット技術に焦点を当て、インクジェット印刷実験システムを進歩させるための最も重要な問題として、液滴形成プロセスの良好な理解は、インクジェットシステムの印刷品質を改善するために重要である。しかし、インクジェット微小液滴の実験的研究は、液滴のサイズが小さく、液滴の速度が速いために困難となっている[84]-[86]。

そこで、これまでに構築してきた評価システムをより効果的で効率的な実験システムとして確立するため、特に最良の波形設計を見つけるために実験結果と分析を確実にするための、実験標準を構築することが重要である。そこで、インクジェットプリンタにおける、液滴重量測定のための吐出制限数と、インクジェットプリンタ実験システムを標準化するために必要となる速度測定のためのノズルヘッド距離を明らかにする。さらに、液滴重量測定には 1,000,000 滴が用いられ、1 データを収集するために 20 分以上が必要であること、また、液滴速度測定における液滴距離観測の標準化は存在していないことから本研究では、実験システムを評価し、実験システムの標準を決定した。同時に、インクジェットプリンタの固有周期を決定する必要がある、固有周期が明らかにできれば、作動パルスの時間パラメータの計算を単純化することができる[85]。さらに、最高液滴速度を生成する波形を知ることによって、プリンタヘッドを駆動するための最も効率的なパラメータを決定することが可能となる[87]。したがって、実験評価に基づく結果から実際の固有周期は、より高速の液滴を生成するための推奨事項として使用することができる。

しかし、液滴吐出プロセス、形状、体積、速度は圧電素子の駆動波形の影響を受ける[85]、[88]、[89]ことから、先行研究者により液滴の挙動を調べるための研究が行われているが[84]-[99]。これまでの研究では、正(台形)波形または正と負の(バイポーラ)波形を使用し[86]、[87]、[89]-[92]、[100]、Kwon らは、効率的な波形を設計する方法を提案している。本研究では、基本波形として正(台形)波形、正負両波形を用いた高速噴射波形、負波形を用いた 3 種類の波形を比較検討し、滞留時間の最適値を決定する[91]。Kim らは、バイポーラ波形のダブルピエゾアクチュエータを使用し、液滴速度を放出させる効果を明らかにしている[93]。Shin らの液滴形成への影響を観察するためにダブルポジティブ波形を使用し、圧電アクチュエータを駆動して液滴を生成するための最も単純な波形はユニポーラ波形であり、負の波形を用いる研究は依然として限られています[92]。そこで、液滴を吐出するアクチュエータとして、圧電(PZT)プリントヘッドにユニポーラ負の波形を用いた。液滴速度に対する印加電圧効果は、これらの研究[87]、[89]、[92]、[98]、[101]-[103]によって議論されている。Xu らは、より高い印加は



液滴のサイズを減少させると述べ、より高い電圧がより大きな液滴のサイズを生成すると結論づけた。本研究では、駆動波形設計における印加電圧の違いによる振動の抑制効果を検討し、最適な電圧を決定する。さらに作動波形の設計と予備波形との比較と、基本波形に対する振動の抑制について詳細な検討を行い、使用ヘッドの標準評価インク(Dowanol)により、異なるノズルヘッド温度および 14V から 18V までの印加電圧によって試験し、液滴の形状、容積および速度を観察することにより、各作動波形の最適基底電圧を明らかにした。

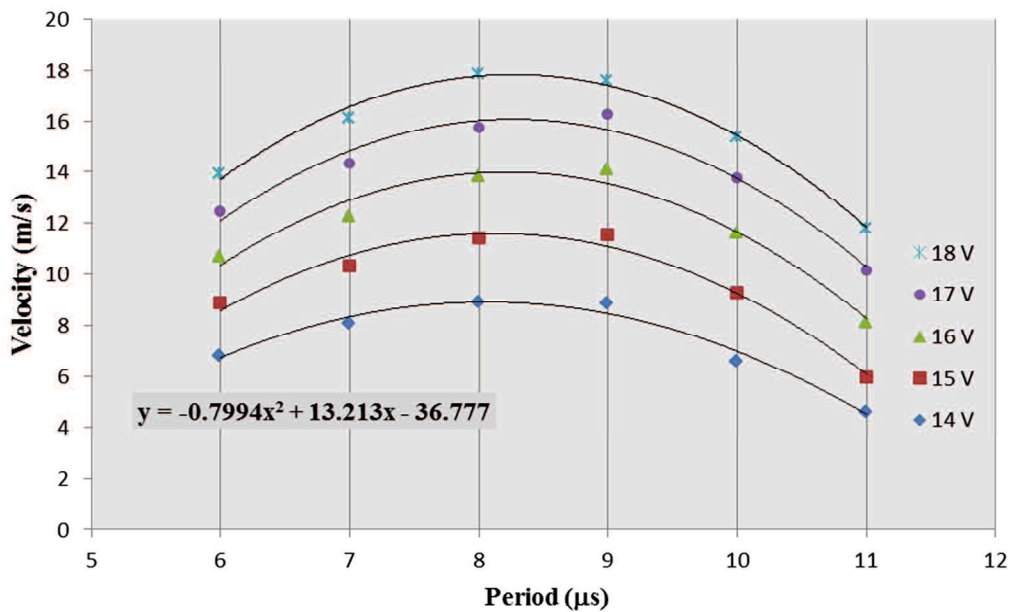
### 5.8.1 実固有周期に関する研究

固有周期は、インクが自由振動を開始してからその振動の 1 サイクルを完了する時間を示す。インクジェット方式では、液滴を吐出するアクチュエータから液滴が最高速度に達するまでの期間がある。作動パラメータの前の期間の指定は、波形の入力パラメータで  $8\mu\text{s}$  であり、ダウン、キープ、アップの時間はそれぞれ  $2\mu\text{s}$  である。以後、この時間は固有周期(Tan)と呼ぶ。本章の目的は、本研究で用いたインクジェット装置用の基本波形の実際の固有周期を決定することである。実際の固有周期は、液滴速度[165]の最高値を与えることができる tkeep の入力パラメータから決定する必要がある。したがって、tkeep と落下速度の関係を決定するために、他の入力パラメータを固定値として設定した。波形の入力パラメータを表 5.33 に示す。この実験では、ヘッド温度として  $28^{\circ}\text{C}$  を使用した。

表 5.33 実際の固有周期の実験のための入力パラメータ

No	Time <sub>(down)</sub> → t <sub>d</sub> ( $\mu\text{s}$ )	Time <sub>(Keep)</sub> → t <sub>k</sub> ( $\mu\text{s}$ )	Time <sub>(Up)</sub> → t <sub>u</sub> ( $\mu\text{s}$ )	Total Period ( $\mu\text{s}$ )
1	1	2	1	6
2	1	2.5	1	7
3	1	3	1	8
4	1	3.5	1	9
5	1	4	1	10
6	1	4.5	1	11

表 5.33 の入力パラメータの実験結果を図 5.96 に示す。異なる周期を有する液滴速度のデータが二次関数を形成することが分かる。実験曲線のパターンから、最大値は、周期  $8\mu\text{s}$  および  $9\mu\text{s}$  の近傍にある。言い換えれば、t<sub>d</sub>, t<sub>k</sub>, t<sub>u</sub>, t<sub>w</sub> のパラメータ値は  $2\mu\text{s}$  以上でなければならない。固有周期の正確な値を決定するために、二次関数  $y = AX^2 + BX + C$  は、実際の固有周期を表す x の得られた最大数に使用できる。この方程式から、(5.7.1)と(5.7.2)を用いて、軸の最大値から推定された実際の固有周期を求めることができる。

図 5.96  $T_{\text{keep}}$  関数としての液滴速度

$$X = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (5.7.1)$$

$$X_{\text{max}} = \frac{-b}{2a} \quad (5.7.2)$$

実験データから得られる二次関数は次のとおりである。

$$y = -0.7994x^2 + 13.213x - 36.777$$

$$a = -0.7994, \quad b = 13.213 \text{ の時, 最大は } x_{\text{max}} = \frac{-13.213}{2(-0.7994)} = 8.264 \mu\text{s}.$$

推定されたインクジェット装置の実際の固有周期は  $8.2643 \mu\text{s}$  であると判断される。実際の固有周期は  $T_{\text{an}}$  によって象徴される。この結果から、インクジェットプリンタ装置では、固有周期として  $8.26 \mu\text{s}$ ,  $t_d$ ,  $t_k$ ,  $t_u$ ,  $t_w$  の入力パラメータとして  $2.066 \mu\text{s}$  を提案し、基本波形でより高い液滴

速度を得ることができる。この研究から導き出された固有周期実験結果は、波形概念設計の新たな指標となる。これによって、インクジェットプリンタ実験の作業効率を向上することができる。

### 5.8.2 吐出制限数の実験標準

液滴重量による吐出制限の量の間的相关を決定する。仮説検定は、液滴の差の吐出制限数は異なる液滴重量を示すことができないため、入力パラメータは表 5.34 に示す基本波形を使用した。

表 5.34 実吐出の制限数の実験のための入力パラメータ

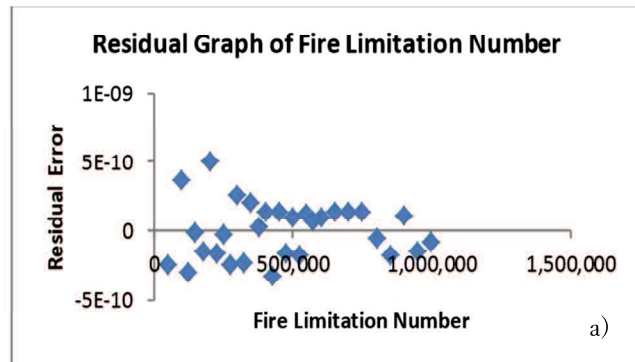
$t_k$	$t_d$	$t_u$	Voltage	Fire Frequency	Head Temperature
2	2	2	14V – 18V	1 kHz	27°C

吐出数は 50,000 から 1,000,000 まで(間隔 25,000)であった。仮説検定は回帰分析を用いて行なった結果を図 5.97 に示す。

図 5.97a および図 5.97c は、異なる吐出制限数を有する液滴重量の回帰結果を示す。その実験の R<sup>2</sup> 乗(R<sup>2</sup>)値は非常に小さいことがわかる。R<sup>2</sup> = 0.0034 は、液滴重量の移動のパーセンテージが、吐出制限数に起因するわずか 0.34%であることを意味する。さらに、有意な F 値の結果は 0.76093766, 0.05 以上であることがわかる。それは、入力が有意義ではないことを意味する。換言すれば、液滴重量に異なる数の吐出制限を使用することによる有意な効果はないということがわかる。100,000 に必要な時間と 1,000,000 の吐出制限を比較すると、それには大きな違いがある。1,000,000 の吐出制限数に対して液滴重量の 1 つのデータを採取するのは 20 分以上であり、100,000 滴に対してはわずか ±1 分である。さらに、吐出処理中の蒸発した液滴は、1 百万の吐出制限数を使用するとより多くなる可能性があることから、ノズルからの移動中に液滴が部分的に蒸発すると、質量測定に影響を与える可能性がある[166]。しかし、蒸発効果は無視できないものの、100,000 滴を用いることにより、吐出プロセス中の蒸発効果を低減することができる。したがって、液滴重量測定基準には吐出制限数 100,000 滴の使用を推奨する。

**Analysis Result**

Regression statistics	
Multiple correlation R	0.057964427
R square R2	0.003359875
Adjusted R square R2	-0.032234415
Standard Error	2.06989E-10
Observations	30



Analysis of variance table

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i> <i>F</i>	<i>significant F</i>
Regression	1	4.04425E-21	4.04425E-21 0.094393644	0.76093766
Residual	28	1.19965E-18	4.28445E-20	
Total	29	1.20369E-18		

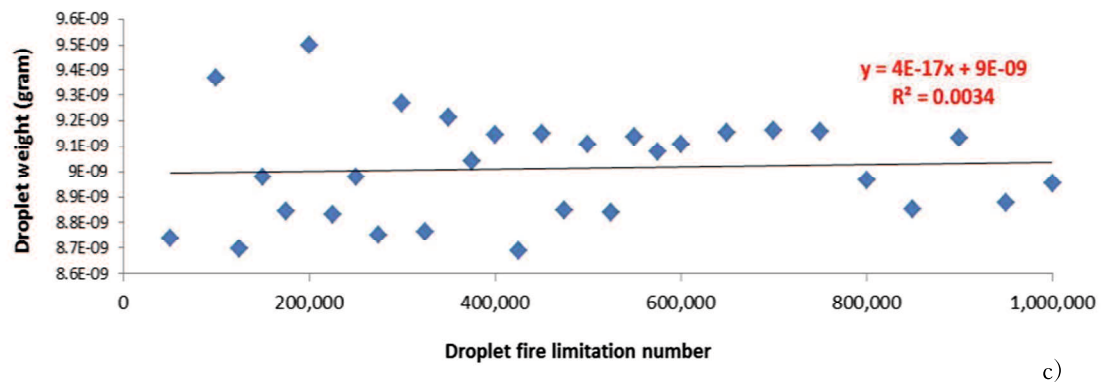


図 5.97 吐出制限数実験の回帰結果

5.8.3 波形の制動効果に与える影響

形成過程と形状に関する検討を行う。

(1) 駆動波形

本研究では、次のように3つの負の波形を使用した。

a. 基本波形

実際の固有周期についての実験によると、TD, TK の推奨入力パラメータは、TU は 2.066 $\mu$ s である。わかりやすいように、基本波形として 2 $\mu$ s と省略する。

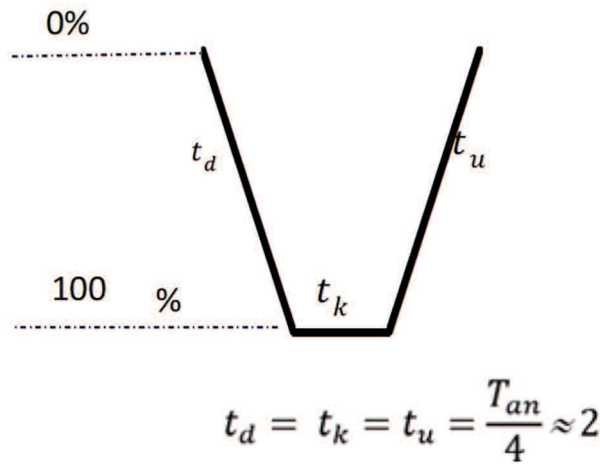


図 5.98 基本波形のプロファイル

## (2) 予備振動

予備振動は、液滴の速度を加速し、主パルスの前に 1 パルス付加することによって体積を増加させる働きをする。予備振動を発生させる目的のメインパルスの付加的なフロントパルスは、基本波形を使用していましたが、異なる電圧を使用した。

最初のパルスの電圧パーセンテージを決定するために、先の実験を行って、振動が液滴吐出によって単一液滴を生成させないことを確実にした。この実験では、液滴が実際にノズルから滴下されるまで、ベース電圧の 10%から異なるベース電圧のスタートを使用した。td, tk, tu の入力パラメータは基本波形と同じである(図 5.99)。

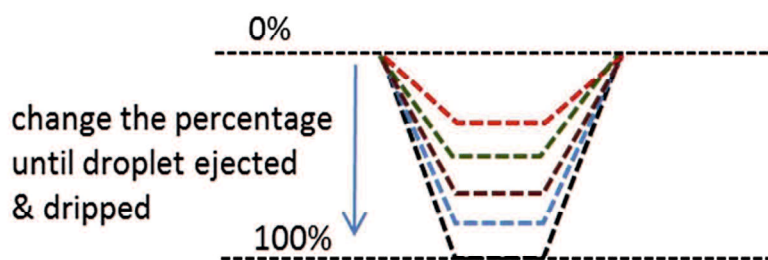


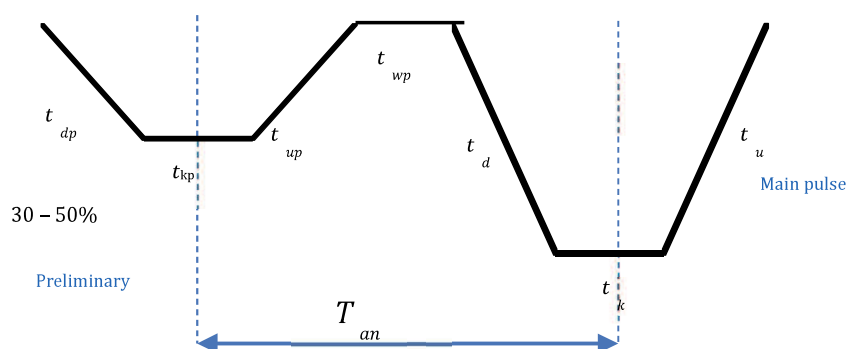
図 5.99 予備振動率を決定するための事前実験

液滴が完全に噴出する(完全に壊れるまで滴下されるまでの)ベース電圧のパーセンテージを表 5.35 に示す。

表 5.35 ベース電圧の割合(ブレイクアップ液滴まで)

Base Voltage (Volt)	Start eject at (% of base voltage)
10	100
11	90.9
12	83.33
13	76.92
14	71.5
15	66.67
16	62.5
17	58.82
18	55.55

予備振動の最大印加電圧は、液滴吐出を行わない場合は 9.9V 以下でなければならない。そこで予備振動電圧として 14~18V の 30~50% を使用した。予備振動を伴う作動波形のプロファイルを図 5.100 に示す。予備振動による最適波形を決定するために、ベース電圧と異なる電圧パーセンテージの影響を調べた。



$$t_{dp} = t_{kp} = t_{up} = t_{wp} = t_d = t_k = t_u = \frac{T_{an}}{4} \approx 2$$

図 5.100 予備振動による波形のプロファイル

(3) 振動の抑制

振動抑制機能は、残留振動を低減し、液滴の速度と体積を抑制することである。この実験では、メインパルス後にパルスを加えることで、振動を抑制する。図 5.101 (a) は、2 つの同じパルスから分離時間(波形 6s)の波形を示す。図 5.101 (b) は、時間の異なる 2 つのプラスからの波形を示します。実験装置に入力しやすくするために波形を修正した。

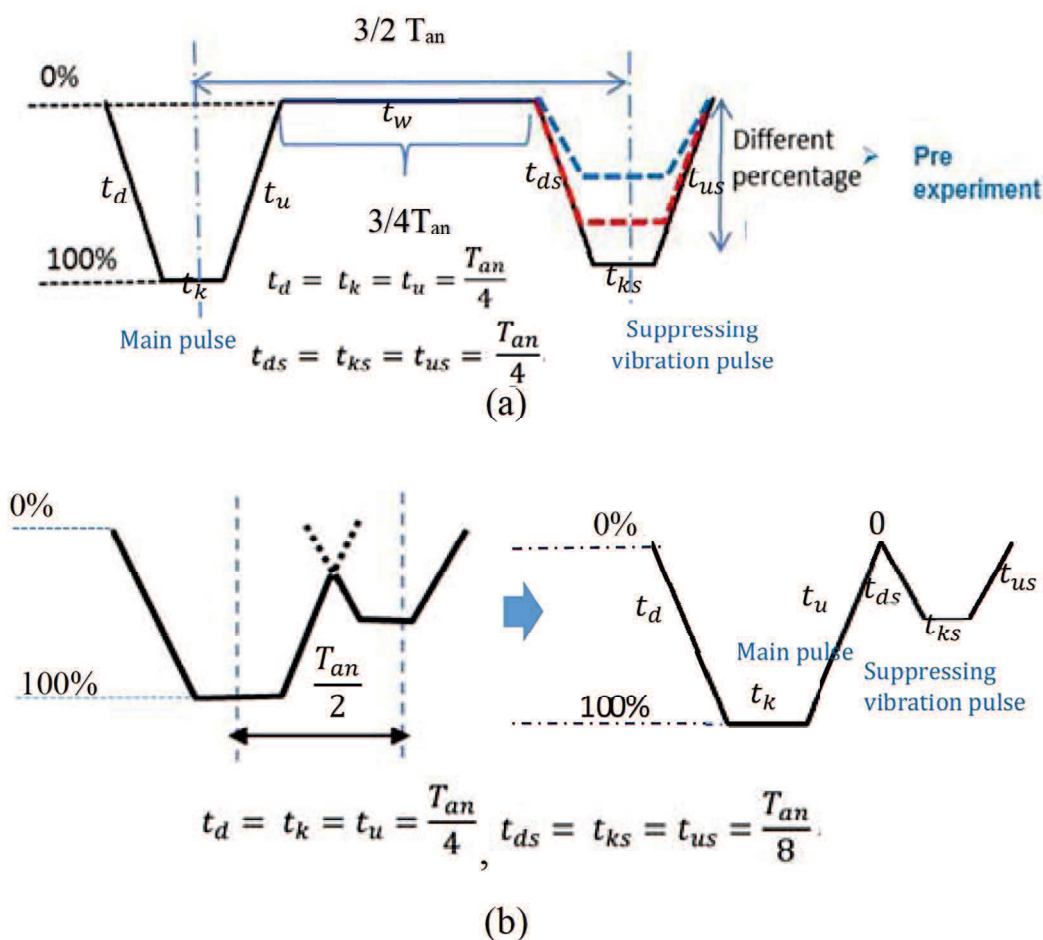


図 5.101 振動を抑制した波形のプロファイル

振動を抑制するための第二のパルスは、実際の固有周期 ( $T_{an}/2$ ) の半分の期間を使用した。抑制パルスを用いた作動波形では、30%、40%、50%のベース電圧を使用した。

#### (4) 各段階の液滴形成プロセス, 形状および速度

このセクションの目的は、液滴形成プロセスを調査し、プリントヘッドノズルから異なる距離にある液滴の形状と速度を観察することである。もう一つの目的は、液滴の速度を測定するために、ノズルからの液滴観察距離の実験基準を決定することである。現在、実験は設定距離として 500 $\mu\text{m}$  を適用する。この実験では、ノズルヘッドからの異なる距離での液滴の形状および速度が 200 $\mu\text{m}$  から 1000 $\mu\text{m}$  までであることを観察した。実験では異なる電圧を印加した。

実験結果からの液滴形成過程を図 5.102 に示す。液滴形成について論じた研究では、プロセスを 4 段階に分けた[97]。本研究では、液滴形成過程を 3 段階に分けた。最初の段階は、液滴がまだノズルに接続されているときである。ベース電圧 14V では 200 $\mu\text{m}$ , 15-18V では 200-400 $\mu\text{m}$  である。この段階では、液滴速度は依然として作動波形の影響を受け、より高い液滴速度を生成する。

次の段階は、液滴がノズルから崩壊し、依然としてリガメントの収縮過程またはネッキングプロセス中である場合である。この段階での速度は、空気抵抗のために徐々に減少し、アクチュエータからの圧力効果はもはやない。液滴の速度がより安定したら、第 3 段階で、単一の透明な液滴を形成するか、または分離する。



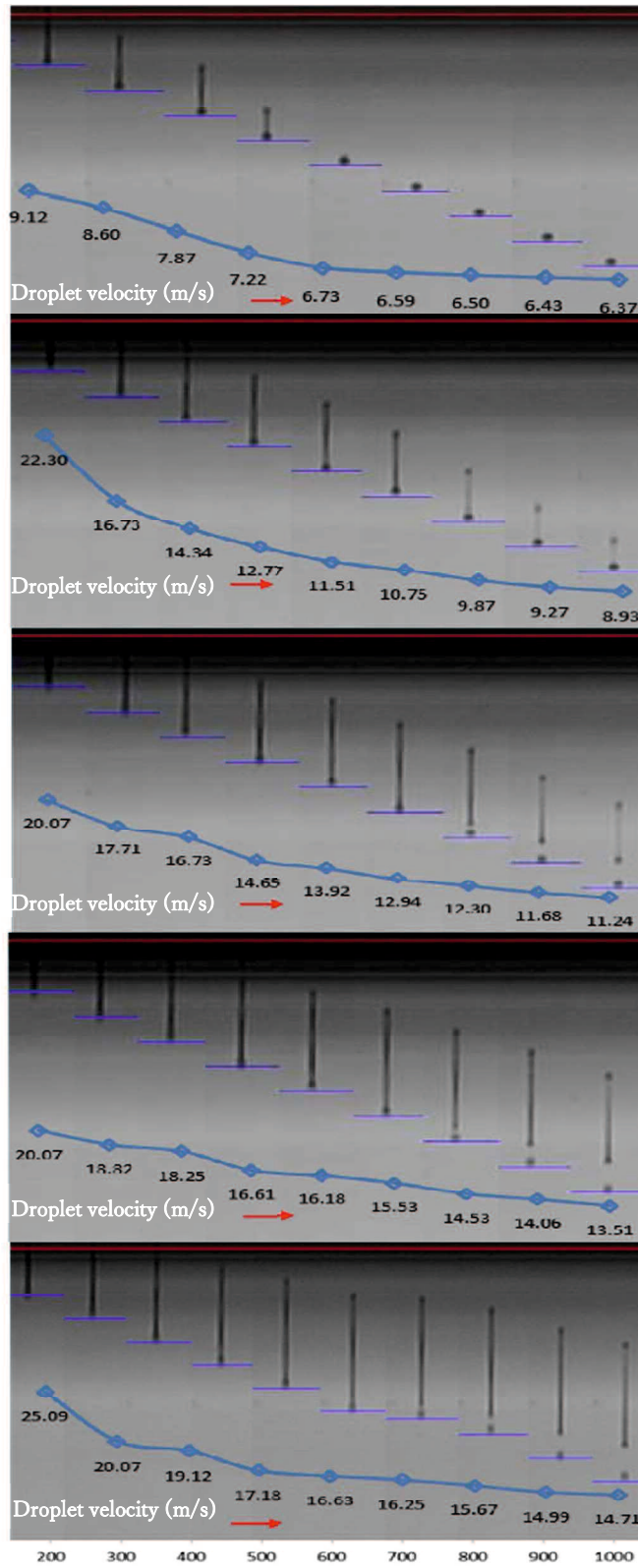


図 5.102 液滴形成過程と速度 (基本波形)

液滴が単一の透明液滴になり得ないときの2つの条件は、リガメントと呼ばれる尾を有する液滴、またはサテライト(サテライト)と呼ばれるより小さな液滴が続く主な液滴である。これらの2つの条件は、高い印刷品質には推奨されない。速度測定のためのインクジェットプリンタ実験システムでは、ノズルからの液滴観察距離および標準距離として1000 $\mu\text{m}$ を推奨する。この距離は、ノズルヘッドからの印刷面の距離基準である。同じ距離では、我々の実験における液滴の形状は、印刷面に到達したときの液滴の形状に等しくなる。滴速度は、ノズルからノズルまでの経過時間で除したノズルからの距離(D)の平均から、液滴速度測定に近づくのに適したD(T)に達するまで得られる。液滴速度測定方法を図5.103に示す。

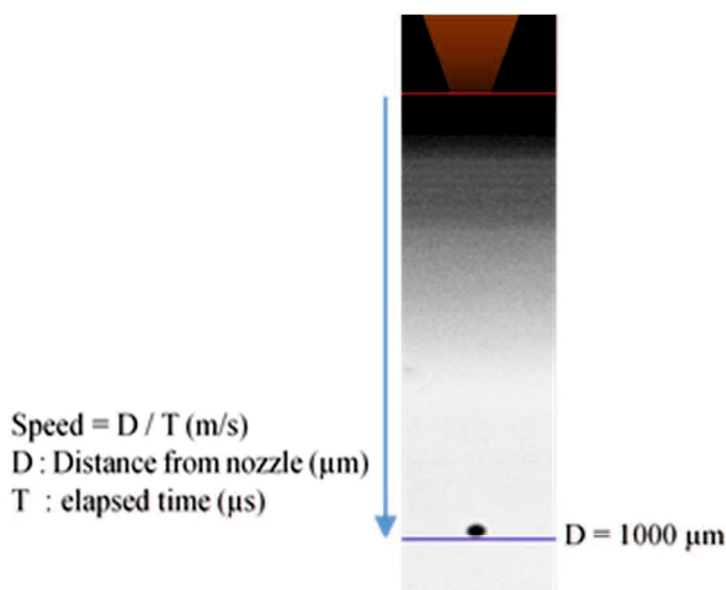


図 5.103 U 液滴速度測定

基本動作波形の最終液滴形状(ノズルから1000 $\mu\text{m}$ )を図5.104に示す。予備振動抑制振動の実験結果を図5.105に示す。基本波形では、透明な液滴は印加電圧14Vのみから生成され、14V以上ではリガメントが生成される。より大きな電圧はより長いリガメントを引き起こした。この状態は、予備振動の30%でも発生する。他の結果は、より高い電圧がサテライトとの主液滴間の距離を長くしたことを示した。

異なる液滴形成プロセスは、予備振動を伴う作動波形を用いて生成され、図5.106に示されており、異なる種類の液滴形状を示す。(a)、主液滴と結合してきれいな液滴(b)、長い分裂リガメント(c)を有する液滴、およびサテライト(d)を有する主液滴を有する液滴を含む。リガメントやサテライトのない透明な液滴が50%の予備振動波形の14Vであることがわかる。この図は、異なる作動波形における高いベース電圧における液滴形状が、長いリガメント、液滴および切断されたリガメントまたは1つより多い滴を有する液滴を生成したことを示す。

Dowanol インクの印加電圧が高くなると、「ウォーターガン」効果が生じ、長いリガメント液滴が生成される可能性がある。作動波形に印加される電圧が大きいほど、より長いリガメントが生成される。電圧が大きければ大きいほど振幅が大きいため、ヘッド液滴の速度を上げ、テール液滴がヘッド液滴に到達できないようにする。短い尾を組み合わせると、液滴は2滴になり、大きな液滴は頭の液滴となり、いわゆる「サテライト」と呼ばれる尾の液滴から小さな液滴が形成される。

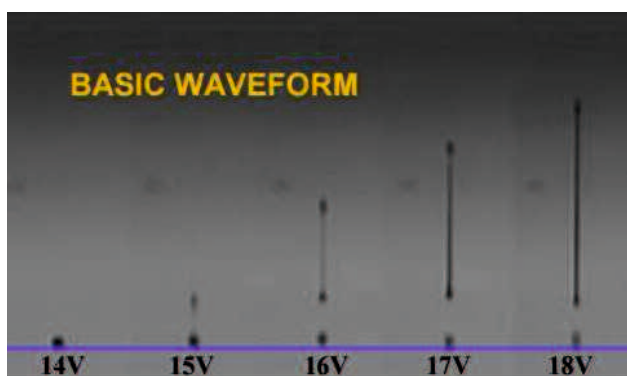


図 5.104 基本波形の液滴形状(1000 μm from nozzle)

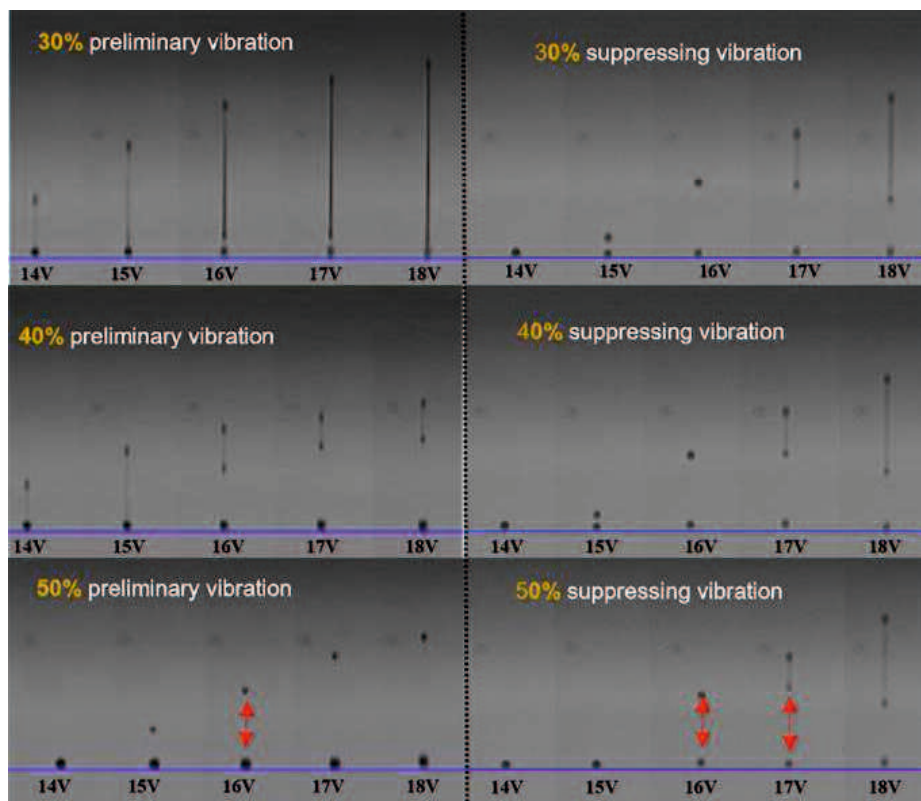


図 5.105 振動波形の予備と抑制のための液滴形状

#### (5) 種々の作動波形を有する電圧およびヘッド温度が液滴と速度に与える影響

前節では、液滴形状が作動波形の印加電圧の影響を受けていることを記載した。印加電圧の更なる効果は、特に、液滴の速度及び体積についても示した。その後、異なる作動波形について検討した。

##### A. 予備振動

前述したように、作動波形における予備振動の機能は、実際の振動の前に初期振動を発生させて液滴を吐出させる。したがって、予想される結果は、より高速かつ大量になる。実験結果は、液滴速度について図 12 に示され、30%、40%、50%の予備振動を有する作動波形の液滴体積について図 13 に示される。

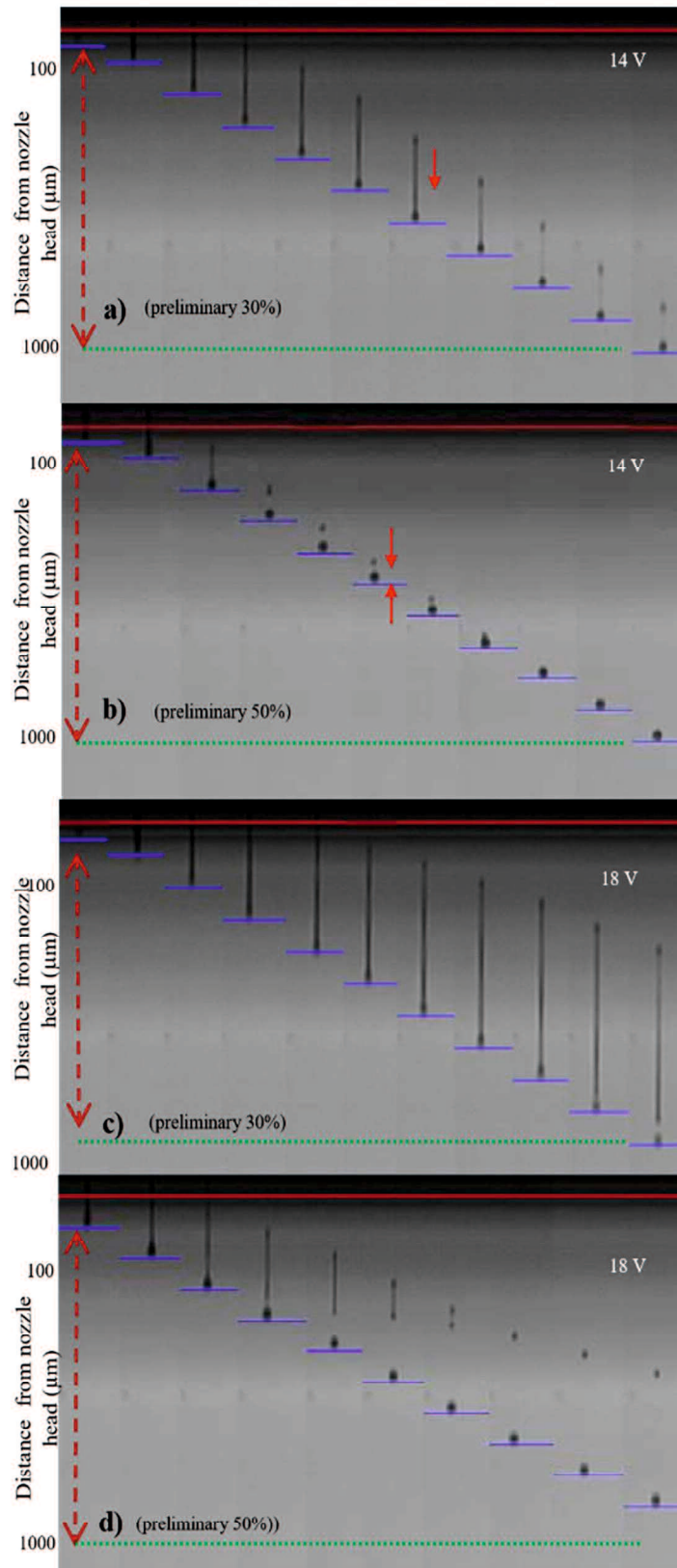


図 5.106 予備振動のための液滴形成プロセス

図 5.107 は、14-16V の印加電圧で 30%の予備振動を有する作動波形の液滴速度が基本波形よりも高く、17V で同様の速度を示し、18V でより低いことを示す。14~15V における 40%の予備振動は、基本波形よりも速い速度を生成し、その後、16~18V から大幅に減少した。50%の予備振動に対して、生成された液滴は、すべてのベース電圧において基本波形よりも低い速度である。

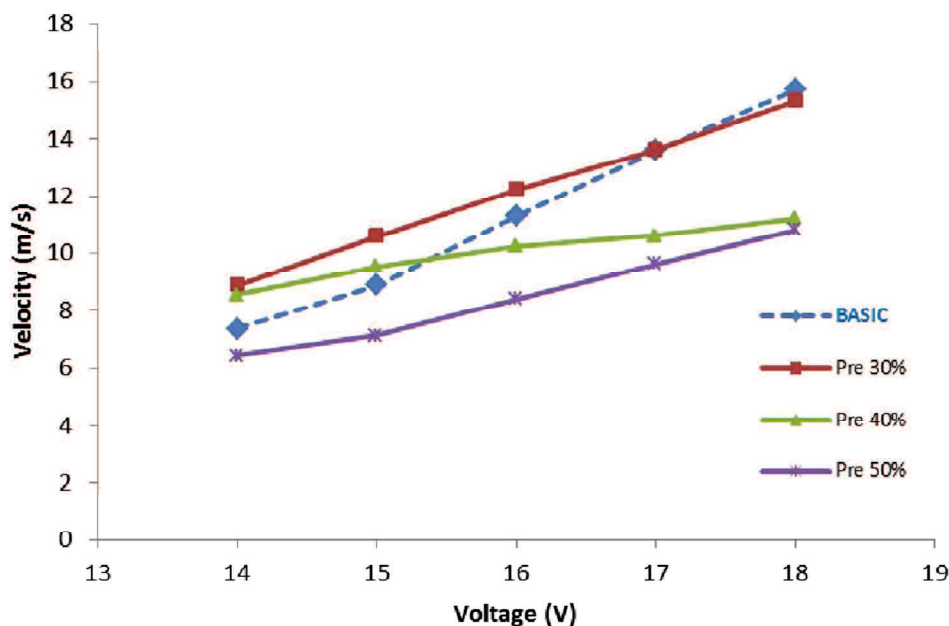


図 5.107 基本波形と予備振動波形の液滴速度の比

この現象は、予備振動としてのベース電圧のパーセンテージを決定するための予備実験の観察によって説明することができる。ベース電圧 14V と 15V の低いパーセンテージ(30%)では、ノズルから液滴が吐出されない。低エネルギーのためノズルオリフィスからインクを噴射することができない。噴射されなかった予備振動によって支持された高エネルギーを有する第 2 のパルスは、より高いエネルギーによってインクを「押し」と吐出させ、より高い初期速度とより高い体積を生成する。一方、50%の予備振動は、ノズルから液滴を出す。第 2 または主パルスからの「引っ張り」エネルギーのために「前」および「後」またはノズルにスロッシングすると、予備振動からのインクは主パルスからのインクと組み合わせられる。同じ電圧では、液滴のより大きい質量を押しエネルギーが同様であり、液滴の初期速度はより低くなる。

予備振動の異なるパーセンテージと比較した液滴体積を図 5.108 に示す。この図から、より高い電圧がより大きな液滴体積を生成することがわかる。さらに、予備振動のパーセンテージは、液滴体積と直線性がある。

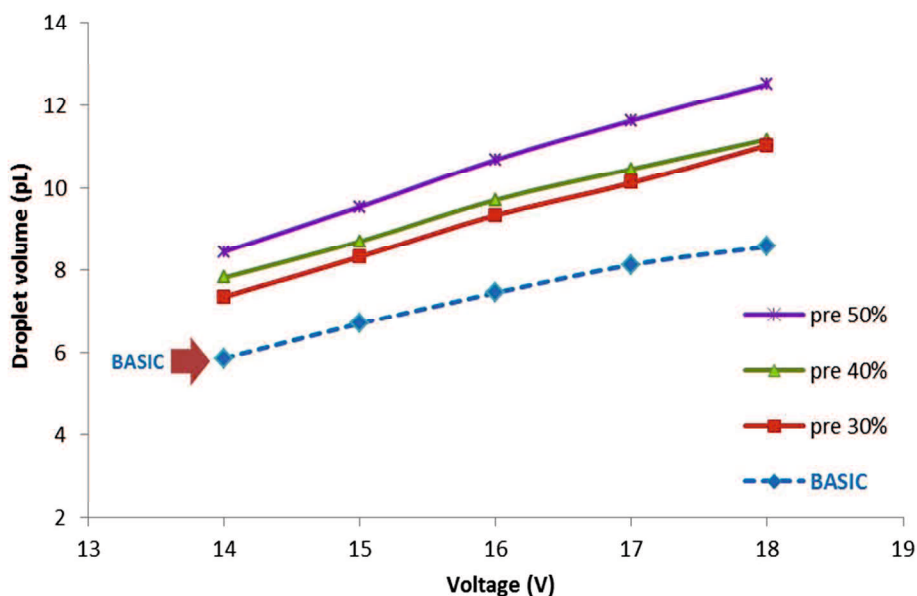


図 5.108 基本波形と予備振動波形の液滴体積の比較

液滴吐出における作動波形に関連する印加電圧の影響では、インクジェットプリンタの PZT プリントヘッドを駆動する際に、負の波形またはプルプッシュモードを使用した。 piezo素子上の印加電圧は、ノズルを用いてチャンネルを拡大し、最初に液体チャンバ内の液滴体積を増加させる正の圧力を生成する。圧力は負の圧力になり、インクをノズルから押し出します。より高い電圧が印加されると、より高い圧力がチャンネルに与えられ、液滴の速度が増加し、より多くの流体がノズルから吐出され、より大きな液滴体積が生成される。

予備振動波形の液滴速度の異なる現象についての他の説明は、波の重畳原理によるものであり、波形を設計するための他の研究における測定されたメニスカス運動の概念と同様である。波動機構の図を図 5.109 に示す。

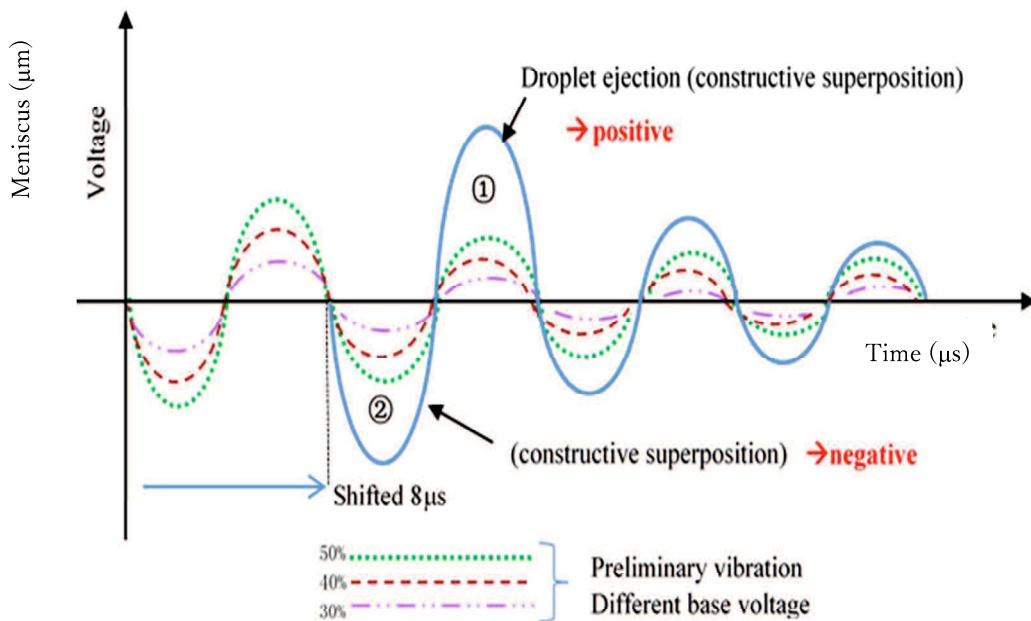


図 5.109 「予備振動」波形の波の重ね合わせの概念の説明

予備振動波形は、振幅が同じで波長が同じ 2 つの波からなり、第 1 波は、電圧の低い予備振動であり、液滴の吐出はないが、第 2 波は、液滴を生成するはずの主パルスとして作用する。その 2 つの波と全く同じ位相が建設的な重ね合わせ原理をもたらす、残留振動において正と負の両方の極性を含む大きな結果を生み出す。予備振動におけるベース電圧の割合が大きいと、ピーク①に大きな波が生じ、より大きな液滴が生成される。ピーク②におけるより大きな負の波は、液滴速度に「耐える」エネルギーを回復するなどのより大きな背圧を生成し、速度を低下させる。液滴速度は、予備振動のベース電圧パーセンテージ(40%および 50%)および印加電圧(> 15V)の方が高い傾向にあった。

液滴体積に対するヘッドの温度効果を図 5.110 に示す。また、図 5.111 から異なる印加電圧における液滴速度に対するヘッド温度効果も確認することができる。より高いヘッド温度が液滴体積および速度の増加を導くことを示している。この現象はアンドレイ式で説明することができます。インク(T)の温度は、液体の粘度( $\eta$ )に影響を与える。粘性( $\eta$ )のアンドレイ(Andrade)式を式(5.7.3)に示す。

$$\eta = A \exp\left(\frac{B}{T+C}\right) \quad (5.7.3)$$

Andrade 方程式を用いた温度と粘性の関係と温度の関数としての粘度の計算についてのい



くつかの研究が記載されている[94], [95]. その式から, より高い温度がより低い粘度になることが決定される. 液体の粘度は温度に依存します. 液体中の分子凝集が粘度を支配する. より高い温度では, 液体中の分子はよりエネルギー的に分離される. したがって, 凝集力が減少すると, 粘度も低下する. DoD の場合, 液滴を生成する作動波形はインクの粘性の影響を受けると述べられている[96]. より高い温度のインクについては, より低い粘度を意味し, 液滴速度を増加させることが決定さる.

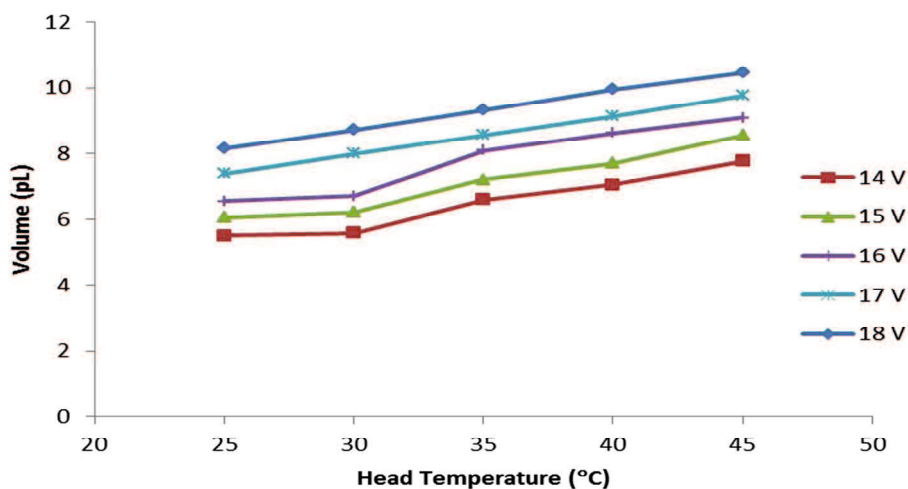


図 5.110 ヘッド温度の関数としての液滴体積(基本波形)

## B.振動の抑制

振動を抑制する機能とは, 残留振動を低減し, 第2パルスをずらして液滴の体積と速度を抑制することである.

- 「A 波形を抑制する」

Suppress A モデルのメカニズムの説明は, 図 5.100 および図 5.101 を参照.

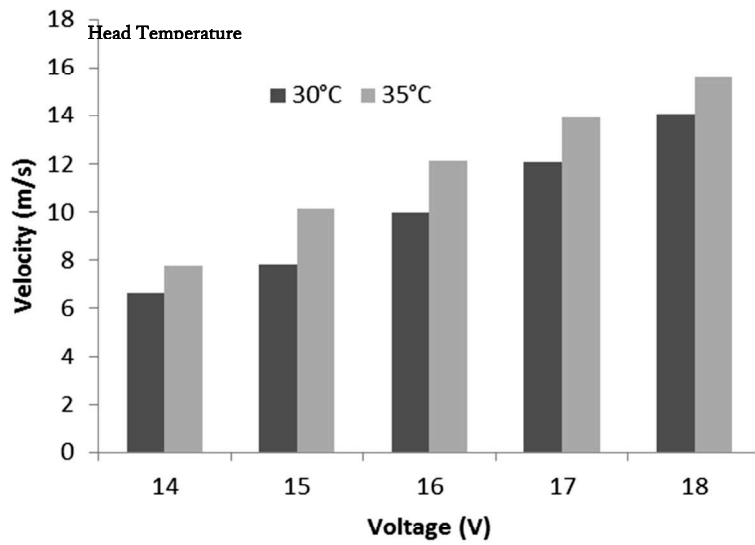


図 5.111 異なるヘッド温度における電圧の関数としての液滴速度(基本波形)

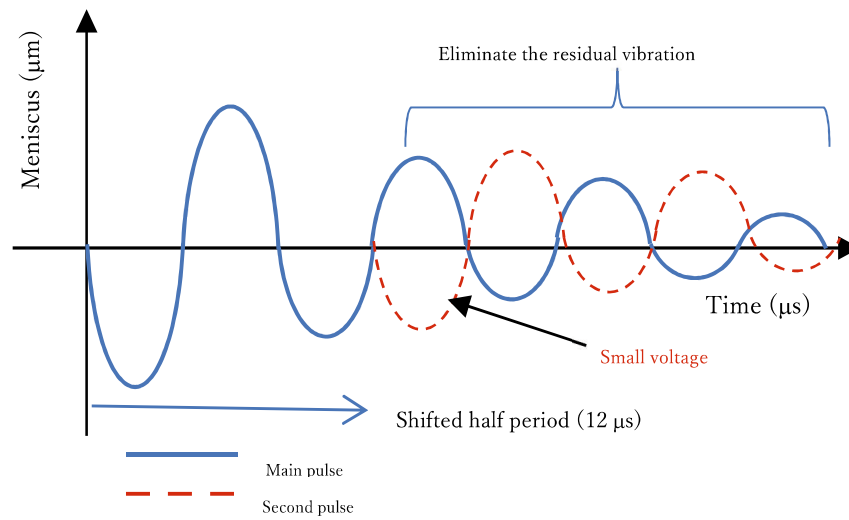


図 5.112 説明「抑止 A」波形出力(低電圧)

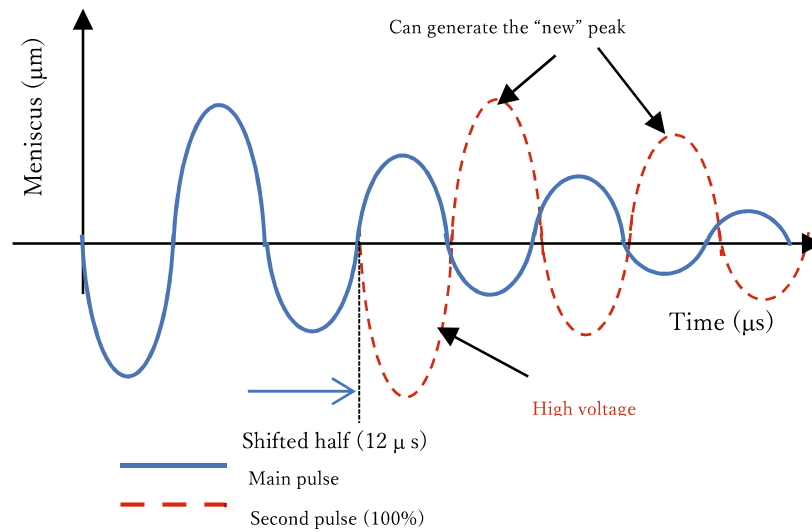


図 5.113 説明「抑止 A」波形出力(高電圧)

図 5.112 および図 5.113 は、振動を抑制する異なる電圧の効果を示す。適切な小さな電圧は、主パルスの残留振動を減少させ、波の重ね合わせ原理のみから単一のピークを生成することができる。高電圧は、マルチドロップを生成するマルチパルスなどの新しいピークを生成する可能性がある。作動振動における第 2 パルスのパーセンテージを決定するための実験前の結果「抑制 A」を図 5.114 に示す。

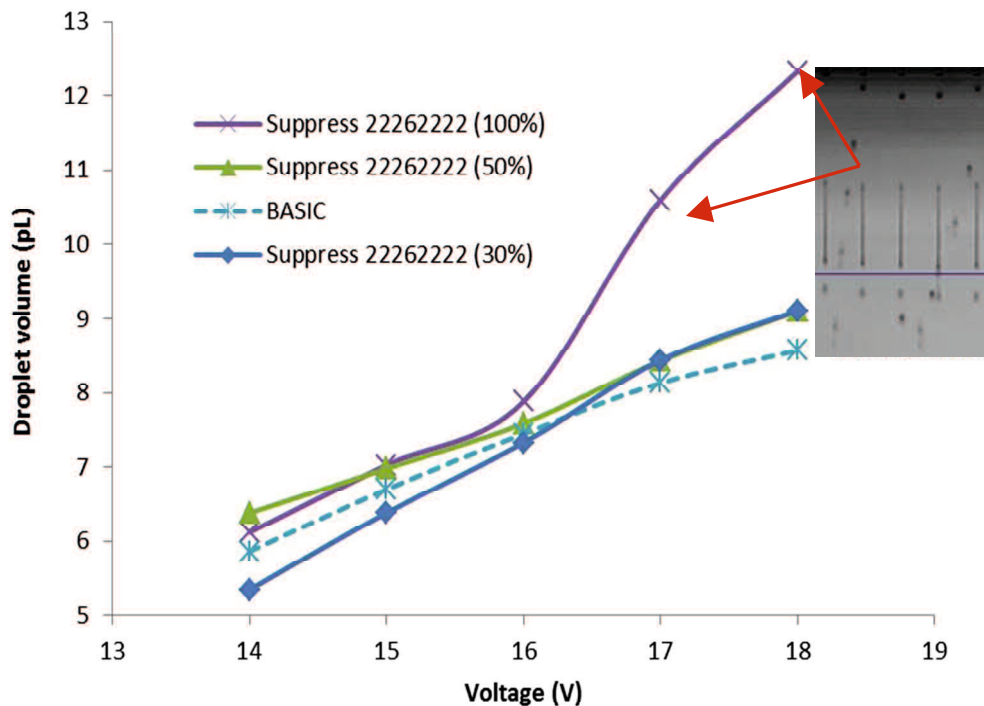


図 5.114 「抑制 A」(第 2 のパルスの異なる割合)に対する実験前の結果

図 5.114 は、第 2 パルスの割合が、特に低電圧における振動を抑制する 30%の残留振動を低減するのに有効であることを示している。ベース電圧 17,18V で 100%抑制すると、体積に大きな差がある。実験装置のモニター表示から、インク滴が雨のように降下したことがわかる。クロストークの影響が考えられる。インクジェットシステムにおけるクロストークは、1 つまたは複数のノズルからの作動波形が他のノズルに意図せずに衝突して液滴を噴射する場合の現象である。第 2 パルスの高電圧は、他のノズルで望ましくない圧力摂動を引き起こす可能性がある。

#### - "B の抑制"波形

振動抑制のメカニズムは図 5.115 に示されており、この図は主ピークを含む波の重ね合わせを示す。第 2 のパルスのシフトされた期間は適合せず、振動を抑制することによる影響は、より低い電圧では有意ではない。実験結果を図 5.116 に示す。

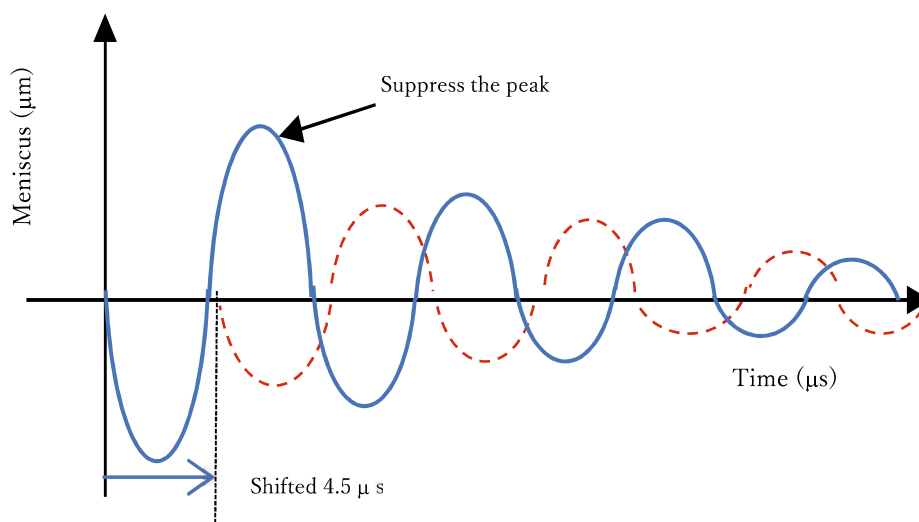


図 5.115 「抑制 B」波形出力の説明

図 5.116 は、抑制振動が液滴速度を効果的に抑制することができるという情報を与える。有意な抑制された速度は、図 5.105 に示されるように、14V および 15V のベース電圧において明確な液滴形状を有する 50%抑制振動によってもたらされる。

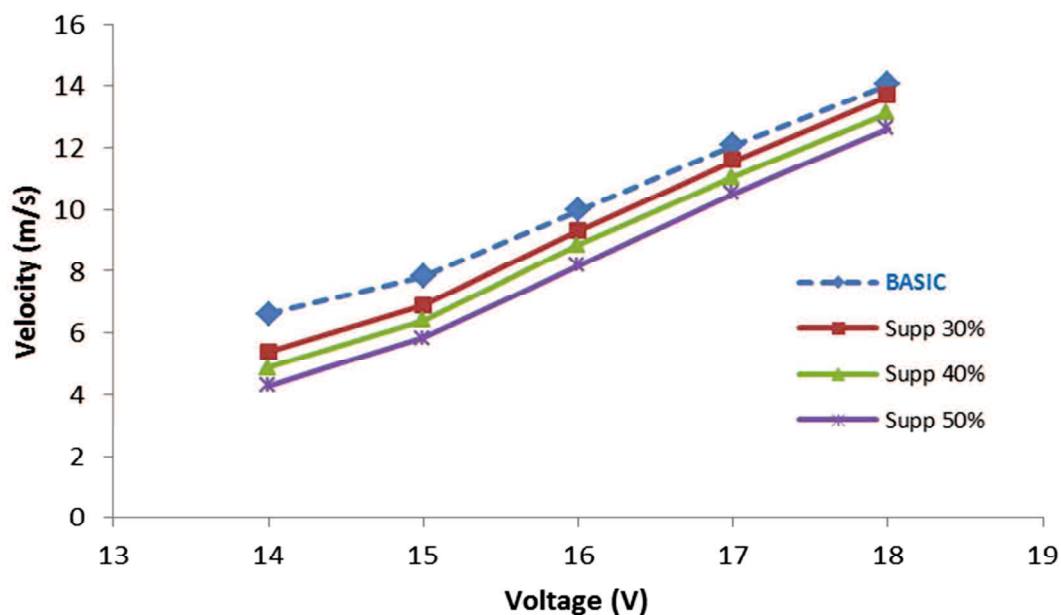


図 5.116 基本波形と「抑制 B」波形との液滴速度の比較

#### 5.8.4 まとめ

本実験研究は、実験装置の実際の固有周期と他のパラメータを実験標準として明らかにするために行った。その結果、Dowanol インクを用いたインクジェットプリンタ実験のために決定された実際の固有周期は  $8.2643\mu\text{s}$  であった。これにより、実験システムにおいて作動基本波形の  $t_d$ ,  $t_k$ ,  $t_u$  及び  $t_w$  入力パラメータとして  $2.066\mu\text{s}$  を提案し使用することができる。次に吐出制限数基準の推奨値は、液滴重量測定の場合は 100,000 滴、液滴速度測定の場合はノズルから  $1000\mu\text{m}$  の距離である。この規格は、実験設計の正確性を向上させるために標準化する必要がある、また、インクジェットプリンタ実験システムにおける作業効率を高めるためにも重要である。

以上の結果を元に、予備および抑制振動により、液滴のサイズ、容積および速度を制御することができる。さらに液滴の速度と体積を調整する重要な項目として予備的な振動抑制の電圧パーセンテージであることを明らかにした。ベース電圧 14-16V での 30% 予備振動とベース電圧 14-15V での 40% 予備振動は、液滴の速度と体積を増加させることに有効であり、50% では速度は遅くなるが、基本波形よりも大きくなる。一方、「A 抑制」波形を入力することで、30% の振動を抑制し、残留振動を低減することができる。「B 抑制」波形を用いて振動を抑制する 50% は、液滴の体積および速度を抑制する効果を明らかにした。次に印加電圧の増加と共にヘッド温度の影響により、液滴の速度および体積も増加することを示した。さらに最適印加電圧は、入力パラメータごとにリガメントやサテライトがない液滴の形状を考慮して決定され、14V が最適なベース電圧であることを明らかにした。

## 5.9 シングルおよびマルチドロップ吐出方式の DoD インクジェットプリンタの新しい駆動波形設計に関する研究

本節では、クリアな球形の液滴を用い、サテライトやリガメントを発生させないマルチドロップ吐出法の開発は、インクジェットプリンタ技術において大きな課題となっている。そのため、これまでに明らかにした評価システムを基に、シングルドロップ方式とマルチドロップ方式の両方で新しい駆動波形を設計した。設計プロセスは、波形の重ね合わせ原理に基づく概念モデルを使用し、サテライト、リガメント、またはウィーピングの発生なしに、5つの主パルスに対して液滴形状に関して優れた性能が達成され、それによって同じノズルから5つの異なる液滴サイズを生成することができることを明らかにした。これは、特にマルチドロップ吐出方法の根本的な改良であり、これにより印刷品質が向上することができる。

インクジェット印刷の技術開発の課題は、高信頼性で高画質を得ることである。さらにもう1つの課題は、市場のカスタマイズの能力を向上させるために、より広い範囲の液滴体積を達成する必要がある[104]。しかし、現在のプリントヘッド技術のカスタマイズは限定されている。さらにインク特性に耐性がある印刷ヘッド技術を開発する必要がある[105]。現在、異なるインクを使用する場合は、プリントヘッドを交換する必要があることや異なるプリントヘッドを使用した場合、良好な結果を得るために流体配合調整が必要となる。したがって、プリントヘッドの設計を変更することなく、より広い範囲のインク特性に使用できる最良の動作パラメータを見つけることは重要な課題である。

ほとんどの市販のプリンタは、単一の液滴サイズを生成するためにバイナリ技術を使用しており、いくつかのインクジェットプリンタでは、複数の液滴サイズを生成することができるが、同じノズルから吐出される液滴のサイズ範囲は小さいままである[106]。同じノズルから異なる液滴サイズを生成するインクジェット印刷の技術は、グレースケール技術と呼ばれ、グレースケール技術におけるマルチドロップ方法の実施は依然として限定されている。この方法における制約は、最適な液滴形成を得るために波の重ね合わせにおいて最適な結果を得るために複数のパルスを同期させることが困難なためである。最適な液滴は、サテライトを持たない液滴であり[107]-[110]。サテライトは、特定のインクジェットプリンタの用途では受け入れられず、高い印刷品質のために排除する必要がある[111], [112]。多くの研究がサテライトの形成を観測している[92], [101], [103], [108], [113]-[123]。しかしながら、サテライトを除去する研究は限定的で、ドロップオンデマンド(DoD)インクジェットプリンタを用いて最適な印刷結果を得るためには、入力波形を適切に設計する必要がある[88], [89]。したがって、サテライトまたはリガメントなしではっきりとした球形の液滴を得るために、駆動波形の最適設計を決定することが必要である。

駆動波形の設計については数多くの研究が行われている[90], [91], [100], [124]。サテライトの発生原因となる残留振動の低減に関する研究も報告されている[88], [125]。さらに、異なる

る方法を用いて液滴体積を制御する他のいくつかの研究が行われ、他の多くの研究では、駆動波形としてプッシュプル(正の波形)またはバイポーラ法を用いている[86]-[88], [91], [92], [102], [103], [113]-[118], [121], [124], [126]-[133]. 市販のインクジェットプリンタに一般的に使用されている方法はプルプッシュ方式または負の波形であり、液滴の安定性に相関する高速かつ狭い列の液滴を生成することができる[134]. これらの研究では、PZT 駆動パルスの負の波形またはプッシュプッシュモードを使用し、この方法を使用することで、実現化していない長いリガメントまたは液滴サテライトの形成を防ぐことが期待されている. 本研究では、PZT プリントヘッドを駆動するための駆動波形において、シングルおよびマルチドロップ生成方法の両方で適用できる波形の設計を行った. 設計の主な目的は、サテライト、リガメント、またはウィーピングの発生なしに良好な液滴性能を達成することであり、新たに提案した設計波形の有効性を Dowanol インクにより検証した. さらに、新たに設計した波形の有効性を粘性の異なる複数のインクを用いて評価し、粘性が異なるインク特性であっても波形形状を一部修正することで適応可能であることを明らかにした.

### 5.9.1 基本波形における制限

図 5.117 において単一滴および複数滴(2 つおよび 3 つのパルス)について定義された基本波形は、インクジェット装置内の圧電素子を駆動すると考えられる. この波形は、特にマルチドロップ噴射方式では制御能力が非常に限られており、この波形から生成された液滴形状を図 5.118 および図 5.119 に示す.

図 5.118 に、単一滴(1 パルス)の液滴形状、図 5.119 に、マルチドロップ噴射を発生させるための駆動波形の 2 つおよび 3 つのパルスの結果を示す. これらの図から、基本波形を駆動波形として使用することにより、液滴の形状が期待通りではなかったことを示しており 1 回の液滴噴射でサテライトまたはリガメントのない透明な球形液滴は、14V の印加電圧でのみ発生することが確認できた. また、印加電圧が高いほど、リガメントが長くなることも示されている. さらに、図 5.119 に、マルチドロップ噴射を生成するための 2 パルスおよび 3 パルス駆動波形の液滴形状を示す. 図から、2 パルスの入力波形から生成された液滴の後にサテライトが続き、3 つのパルスがリガメントで液滴を吐き出してウィーピングしていることが確認できる. これは、基本波形を使用するときに 2 つ以上のパルスを適用することが不可能であることを意味している. さらに、我々の目標であるサテライトのない理想的な液滴の場合、この 2 パルス設計も推奨できない.

これまでの研究では、駆動波形設計における予備振動抑制効果の影響を調べ 予備振動抑制効果を用いて液滴の体積と速度を制御できることが証明されているが、リガメントおよびサテライトの形成の防止は未だ達成できていない.

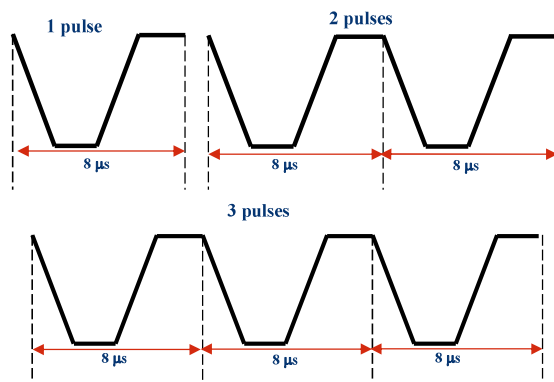


図 5.117 基本波形プロファイル

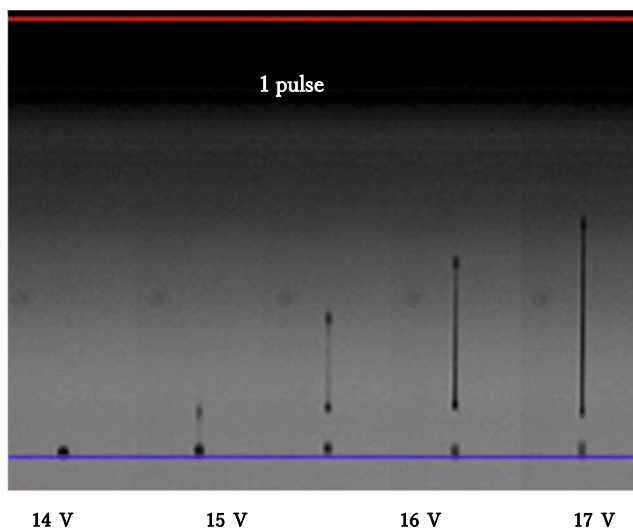


図 5.118 基本波形からの液滴形状(1パルス)

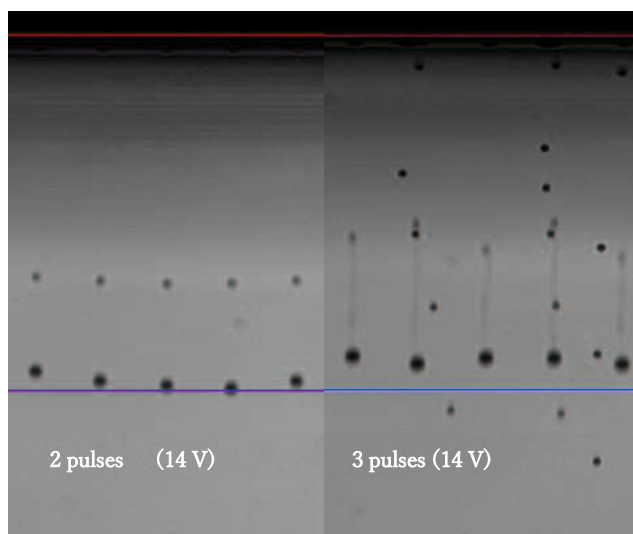




図 5.119 基本波形からの液滴形状(2つおよび3つのパルス)

### 5.9.2 実験方法

本研究は、5.6 節で構築した実験システムを用い、図 5.120 に示すように、PDCA (Plan-Do-Check-Action) サイクルを用いて実施した。計画の段階として、現在の実験システムの文献レビューと評価が実施し、問題の定式化と研究目的を明確にした上で、実験標準を決定し、あらかじめノズルチェックを行っておく。次に「実行」ステップとして、液滴挙動を制御する仮説および基本概念は、理論的および実験的アプローチを利用した。これはまた、プリントヘッド機構および液滴挙動に対する駆動パルスモードの効果に関する研究からはじめ、文献レビューに基づいて、波形を設計するプロセスは、波形の重ね合わせ原理を使用するシステムモデルによるシミュレーション(5.5 節を参照)を同時に行う。最適な液滴性能を生成するための波形設計を決定するために、プロセス設計中に実験アプローチを「評価」ステップとして使用した。また、新しい駆動波形の最終的な設計を得るために、波形設計の改善を本研究の「実行」ステップとして適用した。

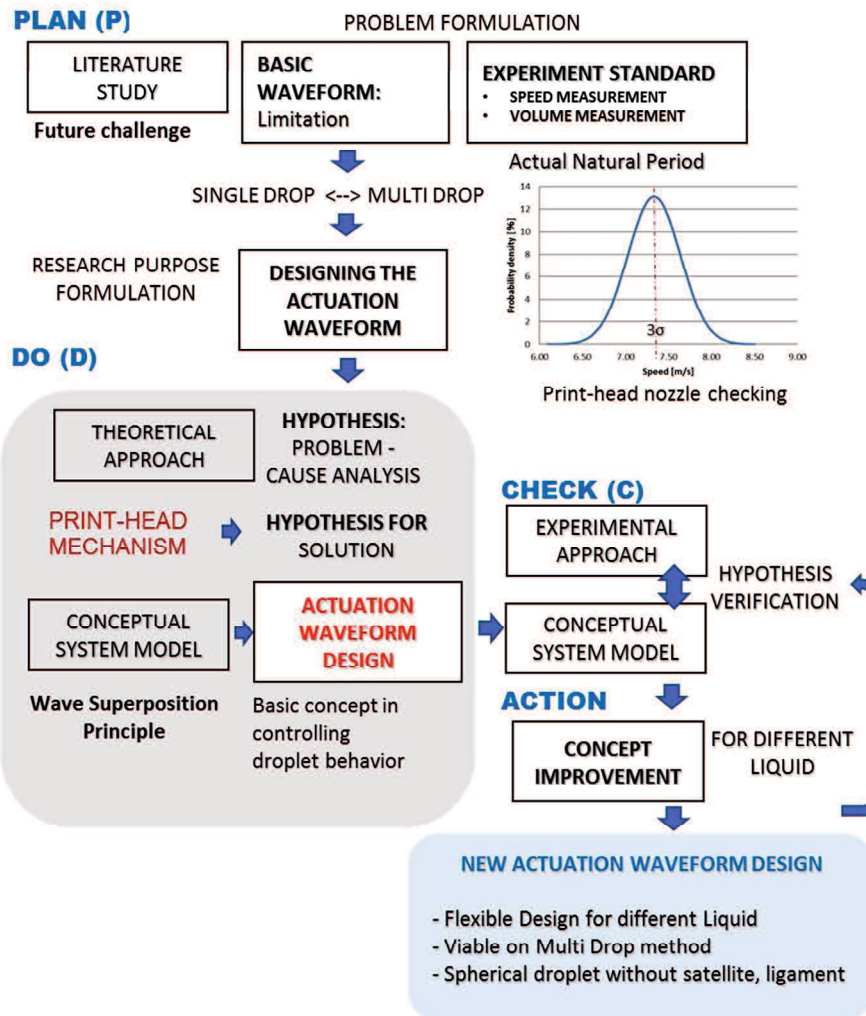


図 5.120 PDCA サイクルによる研究方法

### 5.9.3 新しい駆動波形設計のコンセプト生成

他の研究者らは、予備振動としての小さな負圧がウィーピングの発生を防ぐことができると述べているが[103]、負の波形がそのようなウィーピングを避ける方法についての説明はなされていない。小さな圧力は、液滴の吐出が起こらないことを意味している。また、長い滞留時間は( $t_{keep}$ )大きな電圧[103]を生成できることが示されている。さらに、サテライト効果を抑制するための効果的な滞留時間は効率的な滞留時間よりも長くなければならないが、液滴噴射を生じない可能性がある」と結論付けられている[117]。

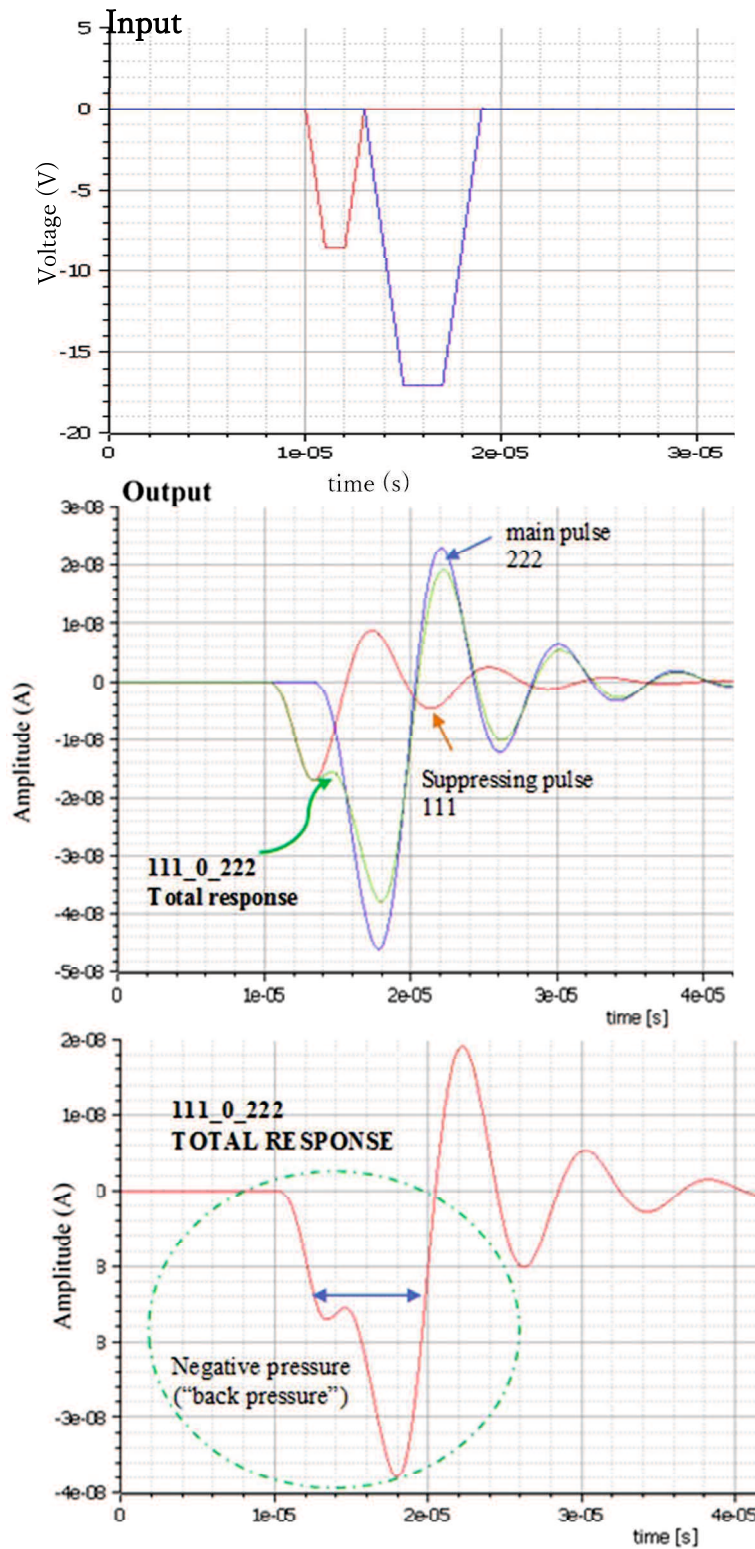


図 5.121 波の重ね合わせ原理を用いたシミュレーションモデル

最適波形は、波の重ね合わせ原理を用いた簡単な概念的システムモデルを用いて設計した(図 5.121 参照)。その結果、実効的な予備振動により大きな電圧が発生する可能性があることが分かり、1 回の液滴噴射の実験結果は、サテライトやリガメントを発生させない明確な球形の液滴で液滴体積を減少させる効果を示している(図 5.122)。したがって、これは、予備振動がサテライトの発生またはウィーピングを回避することができるという仮説を裏付けるものである。したがって、マルチドロップ吐出用予備振動設計は、長い滞留時間( $t_{keep}$ )で大きな電圧を使用する必要がある。

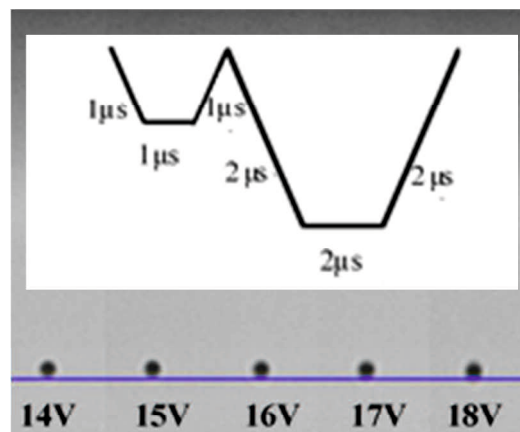


図 5.122 小さな予備振動による波形設計の実験結果

異なる滞留時間を用いた実験は、液滴吐出せずに( $t_{keep}$ )を設定し、予備振動として 2-6-2 μs(262)の入力パラメータを使用することによって、球形液滴を生成することが達成されることが分かった。262 パルスのプロファイル、いわゆる「U」波形を図 5.123 に示す。

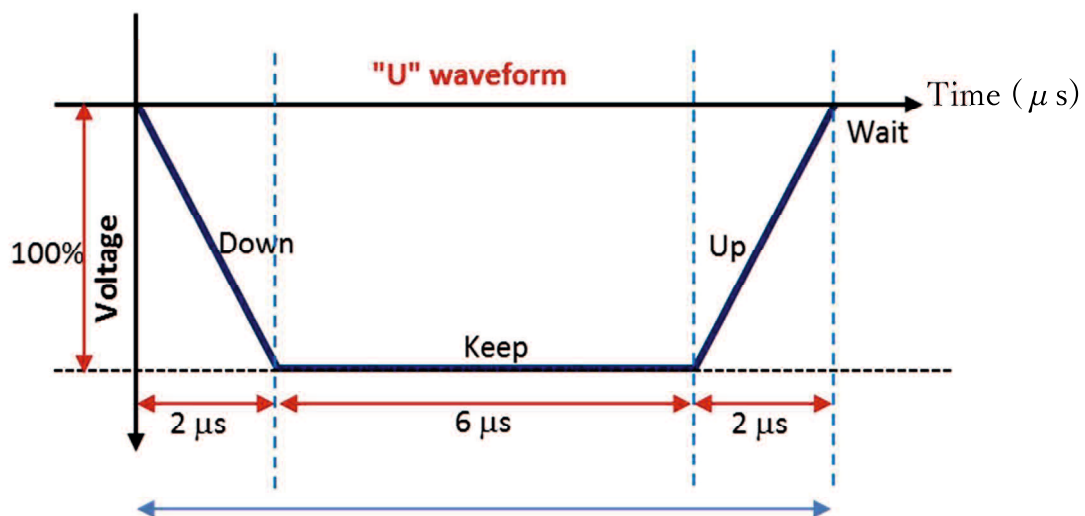


図 5.123 予備振動としての「U」波形プロファイル

次に、電圧を大きくするもう一つのアイデアは、予備振動と抑制振動を組み合わせることである。2つのパルスを重複させ、 $4\mu\text{s}$ の時間をシフトすることによって、液滴を放出することなく大きな電圧を生成することができる。大きい電圧を生成するための別の予備振動を発生させる概念図 5.124 に示す。この波形は、入力パラメータ  $t_{\text{down}} t_{\text{keep}} t_{\text{up}} 221(50\%)_0_{122}$  を有する2つの重なったパルスから生成される。「W」の文字のような形状を有しているので、「W」予備振動と呼ぶ。

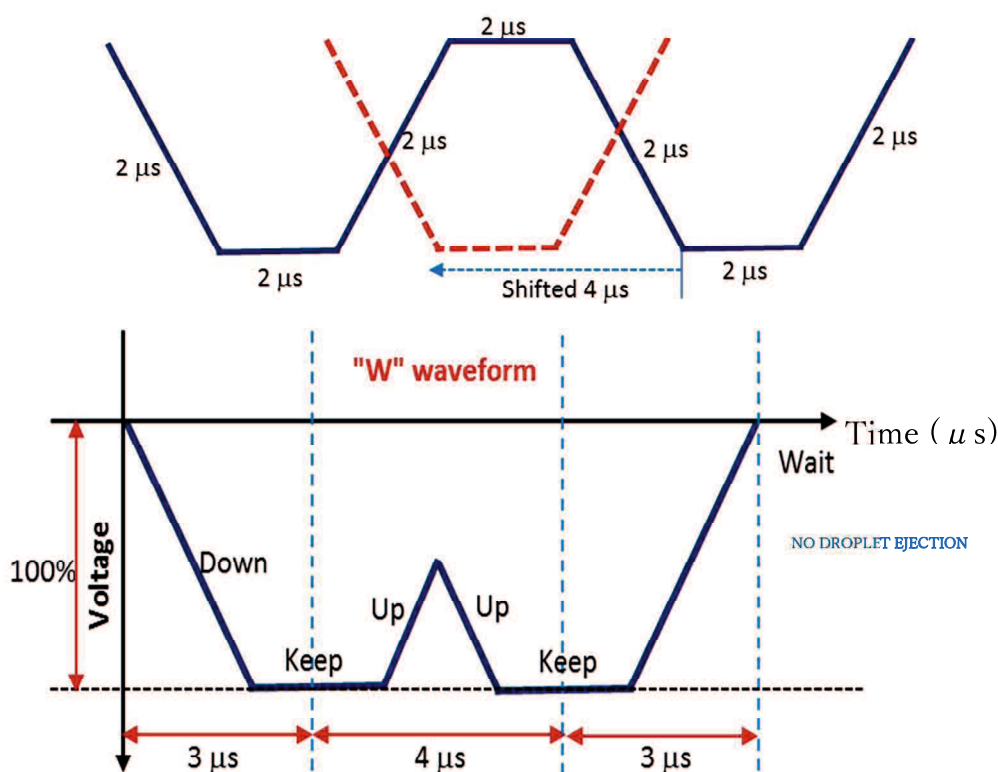


図 5.124 「W」波形プロファイルとしての予備振動

前述のように、本研究では、プルプッシュモードを駆動パルスとして使用し、噴射プロセス中に「プル」およびプッシュ「ステージ」を適用している。したがって、我々は、長い  $t_{\text{keep}}$  を伴う「U」と「W」の波形は、2つの波ランプ、即ち前部ランプと後部ランプから成ると仮定している。第1のランプ、すなわち、前側ランプは、液体チャンバ内のインクを吸引するために使用される「プル」モードである。第2のランプ、すなわち後部ランプは、ノズルからインクを吐出するために使用される「プッシュ」モードである。180°の位相差を有する各波の応答は、前部ランプ応答が後部ランプ応答の1周期前に移動させるので、後部ランプの第二のピークは、前後ランプの破壊的な重ね合わせによって除去される。262個の自然時からの前部および後部ランプの合計応答は、図 5.125 に示すように、残留振動のないいわゆる「ソリトン」という単一の負の

パルス応答を生成する。完全なソリトンは、減衰させないでシステムに到達できることに注意が必要である。実際のインクジェットシステムでは、液体粘度のために減衰の存在を避けることができない。

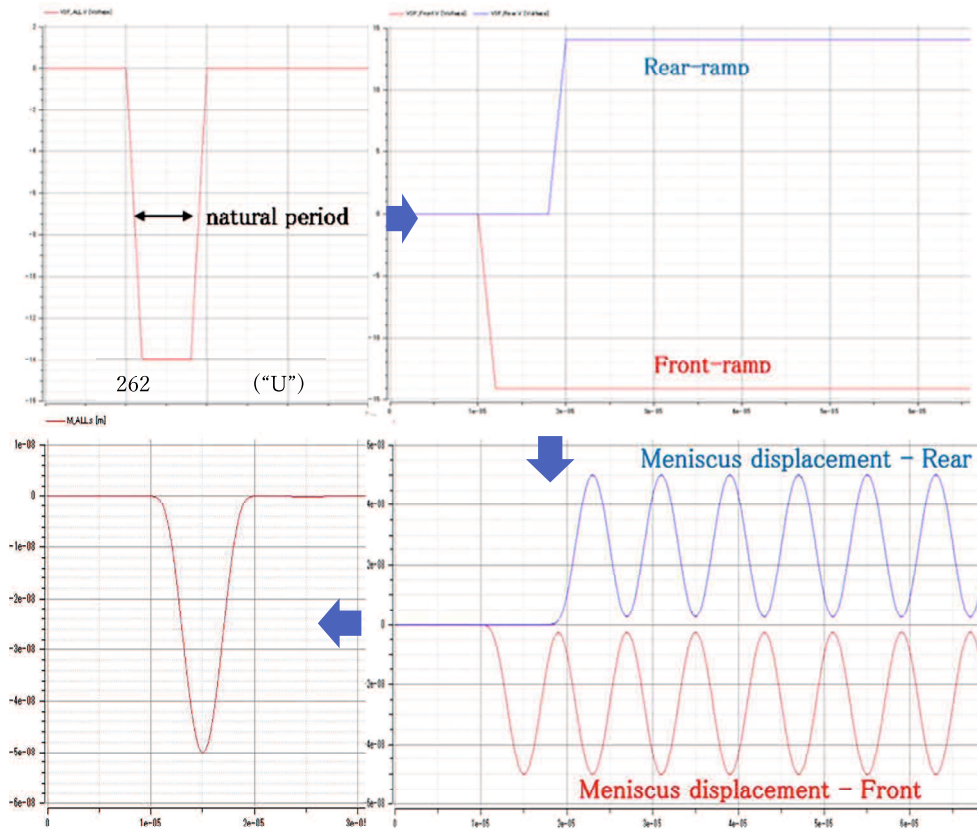


図 5.125 「U」波形の前後傾斜概念

「U」波形と「W」波形の概念モデルを使用したシミュレーション結果の比較を図 5.126 に示す。「U」と「W」のわずかな違いが示されている。

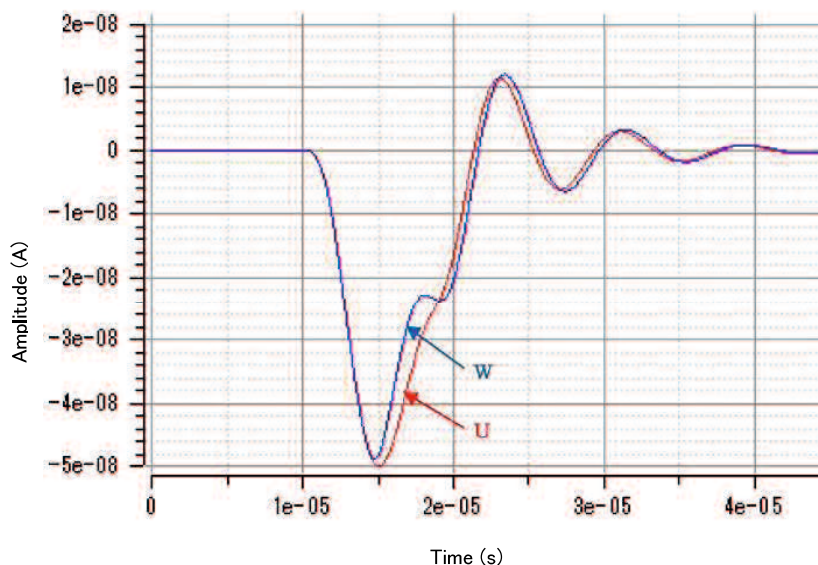


図 5.126 概念的なシステムモデルを用いた "U"と "W"波形応答

### (1) 単一液滴波形設計

適切な  $t_{\text{wait}}$  またはメインパルスと予備振動として「U」または「W」との間の時間を確認するため予備実験を行った。その結果、効果的な「待ち」の時間、または  $t_w$  は、ゼロであることが明らかになった。  $T_{\text{wait}}$  は第 IV 章に記載前予備振動におけるようなための  $2\mu\text{s}$  を使用して、吐出された液滴が明確でないことがわかった。したがって、提案された波形設計のように、単一液滴の入力波形を図 12 に示す。

この章の目的である効果的な設計は、以下の要件を備えた液滴を生成することができる波形を決定するために使用できる。

- サテライト やリガメント のないクリアな液滴
- 基本波形 よりも高速

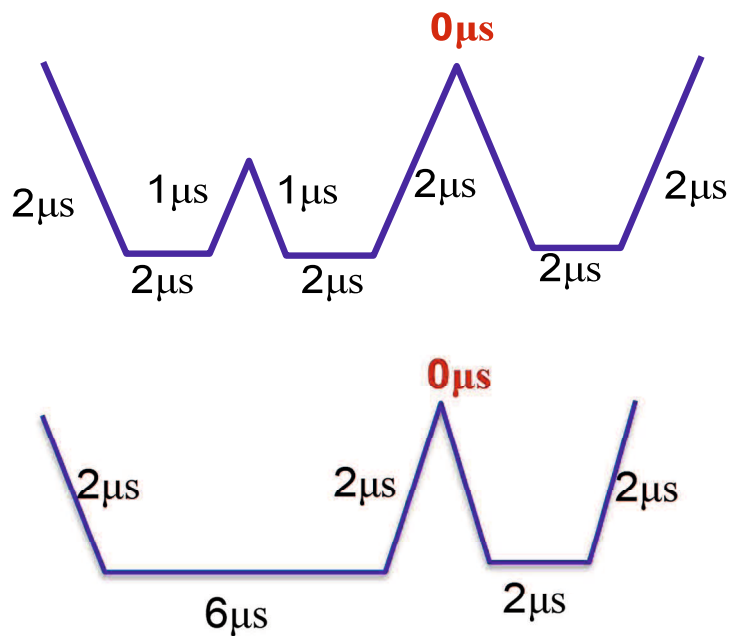


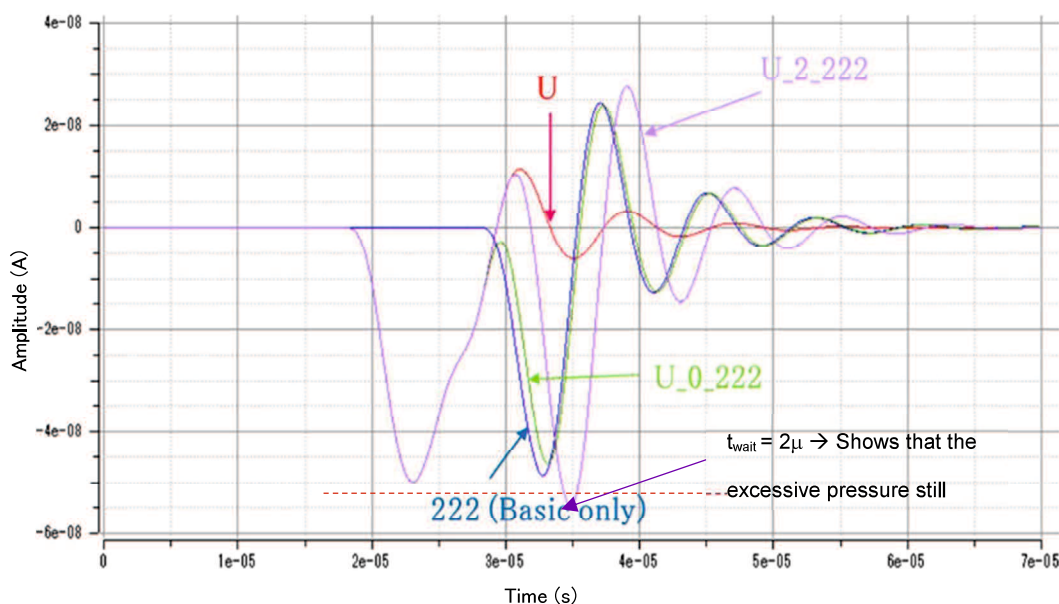
図 5.127 「W」と「U」の単一液滴波形

図 5.128 に示すシミュレーション結果を有する概念モデルは、以下の 3 つの波形の比較である。

- ・ 独立した「U」の波形。
- ・  $t_{\text{wait}} = 0\mu\text{s}$  の U + メインパルス。
- ・  $t_{\text{wait}} = 2\mu\text{s}$  の U + メインパルス。

$t_{\text{wait}}$  のパラメータは、二つのパルス間の時間間隔は、駆動波形を設計する上で非常に重要である。これは、 $t_{\text{wait}} = 0\mu\text{s}$  の予備メインパルス(図 13)との間の分離のための最適な時間である。



図 5.128 異なる  $t_{\text{wait}}$  を有する「U」波形の比較

## (2) マルチドロップ波形設計

正確な滴の配置を達成するためには、インクジェットプリンタのマルチノズルにおける各滴について同様の速度が望ましい[113]。このセクションの目的は、次の要件を満たすことができる波形設計を決定することにある。

- ・マルチドロップ方式(マルチパルス)を用いて、液滴サイズまたは重量を大きくする
- ・サテライトまたはリガメントなしな液滴である。
- ・異なるサイズであっても同一の速度(最大 2.5%の偏差)である。
- ・同じ印加電圧から生成する。

「W」または「U」波形から  $t_{\text{wait}}$  に加えて、マルチドロップ概念のための波形を設計する上で重要な点は、各パルス間の分離時間である。これは、各パルス間の  $t_{\text{wait}} = 2\mu\text{s}$  は、良好な液滴性能のために最適な時間であることが決定できた。残留振動を低減し、サテライトを 2~5 パルスで回避するためには、最後のパルスにおける追加の抑制振動も必要である。同じベース電圧で同じ速度の液滴を生成するには、ベース電圧のパーセンテージを拡大して電圧を調整する必要がある。マルチドロップ法における駆動波形設計の概念的なシステムモデルを図 5.129 に示す。この図は、未調整電圧(a)と調整電圧(b)の入力応答の比較を示している。これは、第 2、第 3 および第 4 のパルスから得られる未調整電圧からの予備振動の負圧応答が、「W」または「U」波形から得られるソリトンよりも大きいことを表している。対照的に、第 1、第 2 および第 3 のパルスの適切な調整された電圧は、ソリトンよりも低い負圧で応答を生成し、第 4

のパルスについて同様である。概念的なシステムモデルにおける新しい設計を用いた基本波形のマルチドロップ応答の比較を図 5.129 に示し、完全な波形プロファイルを図 5.130 に示す。

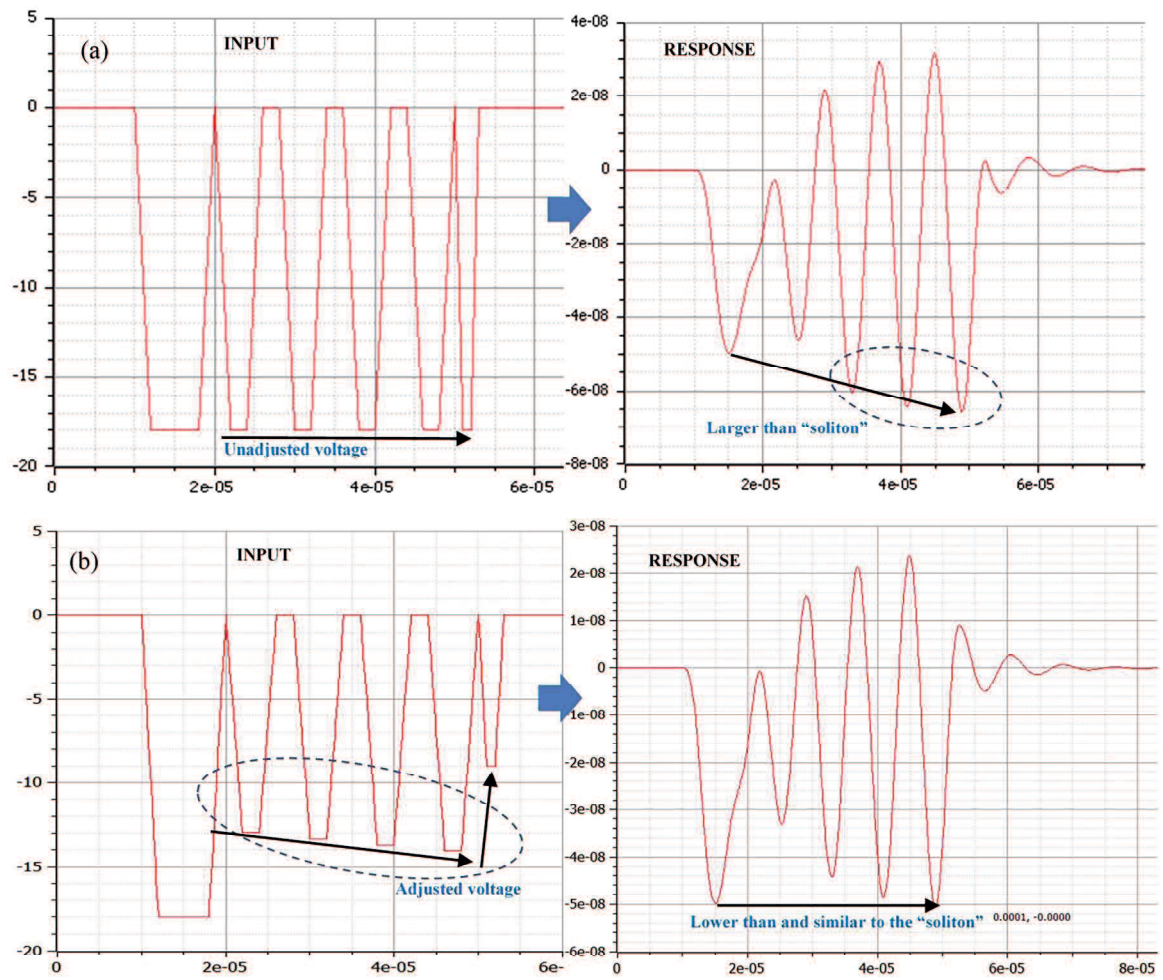


図 5.129 マルチドロップコンセプトの調整電圧と未調整電圧の入力応答

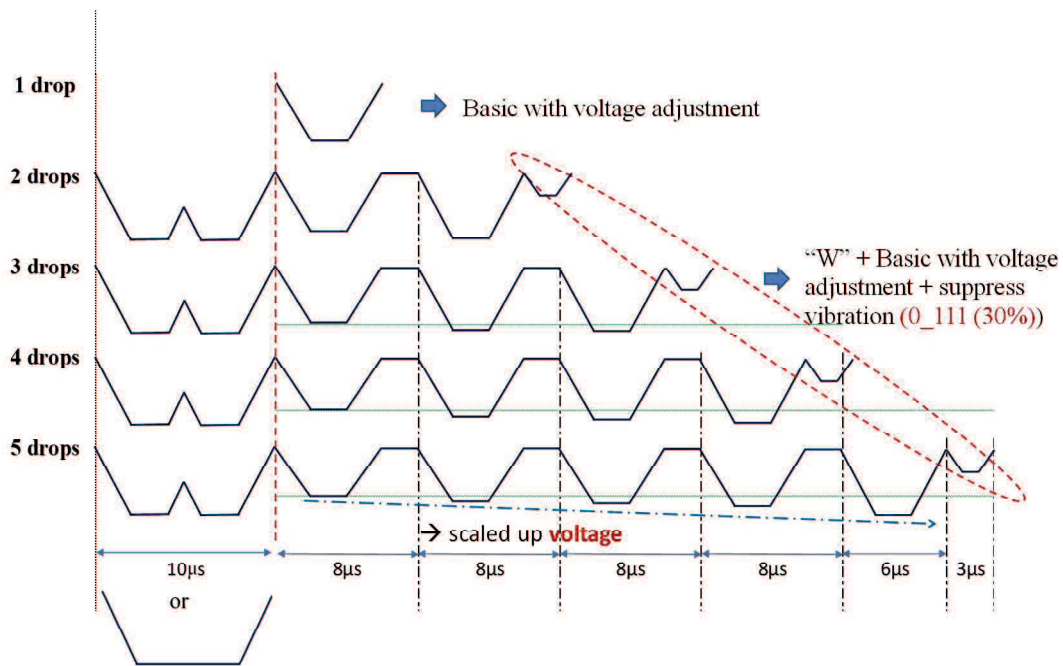


図 5.130 マルチドロップ方式の波形プロファイルの新設計

#### 5.9.4 結果と考察

##### (1) 単一液滴

図 5.131 に実験結果を示す。図からわかるように基本波形の明瞭な液滴は、印加電圧が 14V であり、その他はリガメントを有する液滴を生成することが分かる。予備振動としての追加の「U」および「W」波形については、「W」および「U」波形について、それぞれ 14-17V および 14-16V で明瞭かつ大きな液滴が得られた。次に、図 5.131 から、14V 基本波形、16V 「W」波形、15V 「U」波形では、クリア液滴の速度がほぼ同じであることが分かる。「W」波形によって 17V でより速い速度が達成され、1 回の液滴射出に対して「U」波形によって 16V でより速い速度が達成することができる。これらの結果は、予備振動がサテライトまたはリガメントを除去するのに有効であるため、適切な電圧および「U」または「W」波形を使用して、同様により速い速度で大きな体積を得ることができることを意味する。

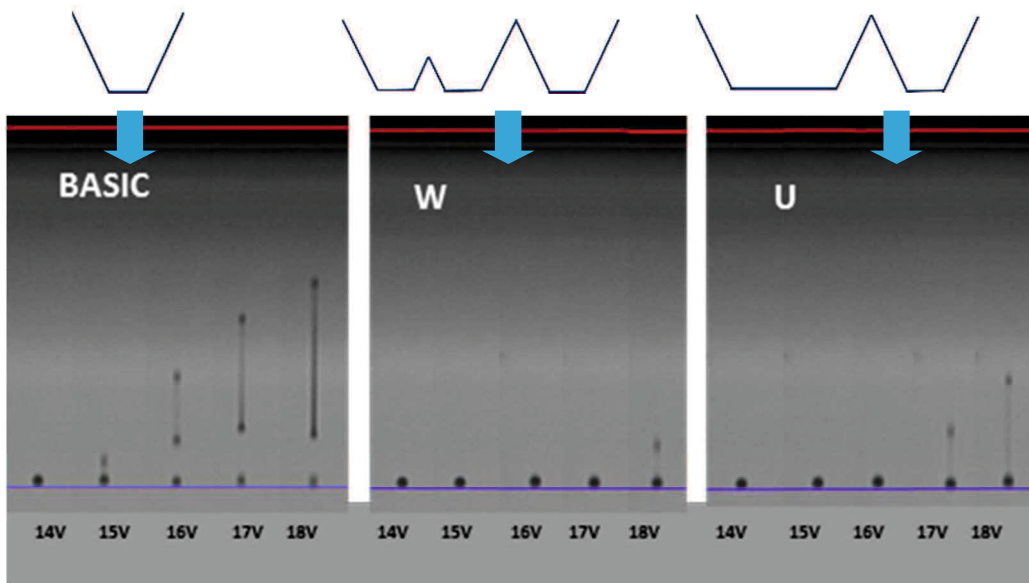


図 5.131 液滴形状のシングルドロップ法の比較

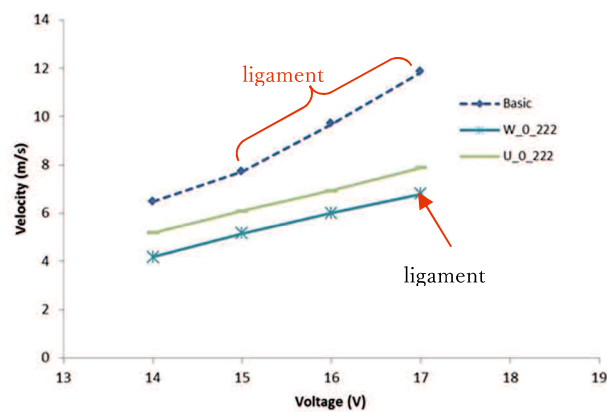


図 5.132 液滴速度の比較（基本波形，"U"，"W"波形）

図 5.133 は、同じ印加電圧で、"U"と"W"の両方の波形が、W"波形はより大きな体積を生成することができる。

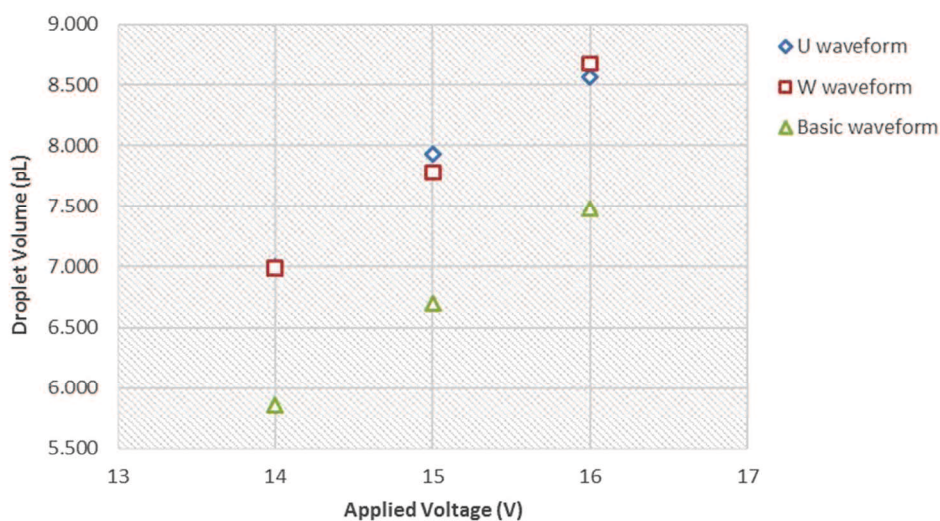


図 5.133 シングルドロップ吐出における液滴体積の比較  
(U, "W", 基本波形)

## (2) マルチドロップ

前項で説明したように、単一液滴の基本波形入力からの液滴形状は、15V 未満の印加電圧からのみ透明な液滴を得ることができることを示している。リガメントを有する液滴は、単一液滴で 14V を超える場合生成される。チャンバは「圧縮振動状態」ではなく「流動状態」と推定され、長いリガメントを有する液滴が生成される。

マルチドロップの適用はまた、基本波形では生成不可能であることが実証されている。そこで、特に孤立波の特性を有するプッシュプル反射駆動法(共振振動掘削パルス)を提案し、マルチドロップにおける解決策を提案する。この方法を用いることで液室全体のインクを均一かつ同期し圧縮膨張させることにより、ヘルムホルツ共鳴箱を実現することができる。なお、過剰な(予備的な)振動(メニスカスでの吸引)に起因するノズル間の干渉は、液体室の不規則な振動を引き起こす。また、主駆動パルス(10V~14V)の低電圧の液滴は、球形でありあるため、メニスカスの小さな表面張力を生じることができる。

マルチドロップ法を用いた液滴制御は、「媒体表面に着弾する前に同一のノズルで吐出された先端の液滴に追いつき一体化した液滴の塊になるよう制御する」方法です。マルチドロップの他の概念方法は、液滴が媒体表面上で合流する必要がある。本研究における Dowanol インクのマルチドロップコンセプト図を図 5.134 に示す。先端に液滴が発生した直後に直径が小さくなり、その後、表面張力により、その速度は吐出速度より遅くなる。そして、ノズル領域内で急速に増加する。次の液滴の速度は、前の液滴と合流する方が速くなければならないので、

マルチドロップの概念では、液滴がサテライトまたはリガメントの残りがなくても合流できるようにドロップスピードを調整する必要がある。液滴速度は、各パルスに適した速度を見つけるために電圧を変化させることによって調整することができる。このように、マルチドロップ法は、グレースケール印刷を達成することを可能とする一連の滴サイズの生成を可能とする。

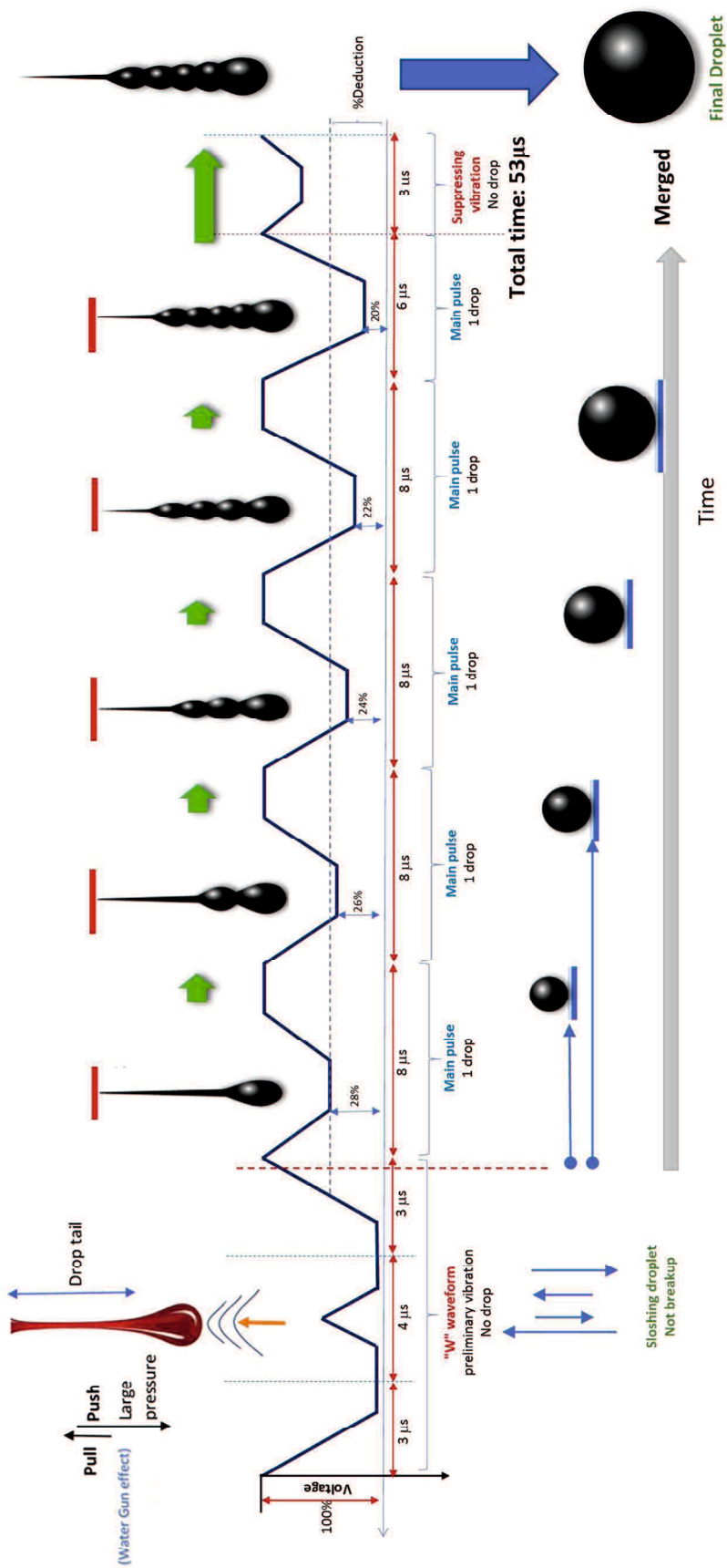


図 5.134 マルチドロップ噴射(例えば5パルスの概念図

各パルス間の速度の変化は図 5.135 に示されており、異なるパルス数の間の速度差に外れ点がないことを示している。図 5.136 は、第 1 の主パルスから 5 つ後ろのパルスまでの液滴サイズの差を示す。「U」と「W」の波形設計では、リガメントやサテライトを使用せずにクリアな液滴が生成され、5 番目のパルスの後まで「ウィーピング」の発生は見られない。これは、基本波形を適用するときの入力駆動波形から示される結果と比較して、抜本的な改善によるものである。各パルスからの液滴体積の差は、予備振動効果のために単一の液滴の乗算よりも大きくなる。この結果は、液体チャンバを均一かつ同期的に圧縮または膨張させることができる予備的な振動として、追加の「W」または「U」波形を使用して実際のヘルムホルツ共鳴を生成することが可能であるという仮説を裏付けている。

異なる印加電圧での液滴速度はこれまでの研究と一致しており、印加電圧が高いほど液滴速度が速くなることを示している。この結果は、液滴速度を制御し、基本波形よりも速い速度でより大きな液滴を得ることを可能にする。同じ印加電圧での液滴体積と速度とを比較することにより、「U」および「W」波形がより小さい液滴速度で、より大きな体積またはより大きな液滴サイズを生成することが決定することができる。この特性は、ピエゾ駆動パルスの他のモード、すなわちプッシュプルモードと同様であり、したがって、「U」波形および「W」波形(負極)は、液滴およびプッシュプルモード(正極)を生成することができることから、プッシュプル反射法と呼ぶ。



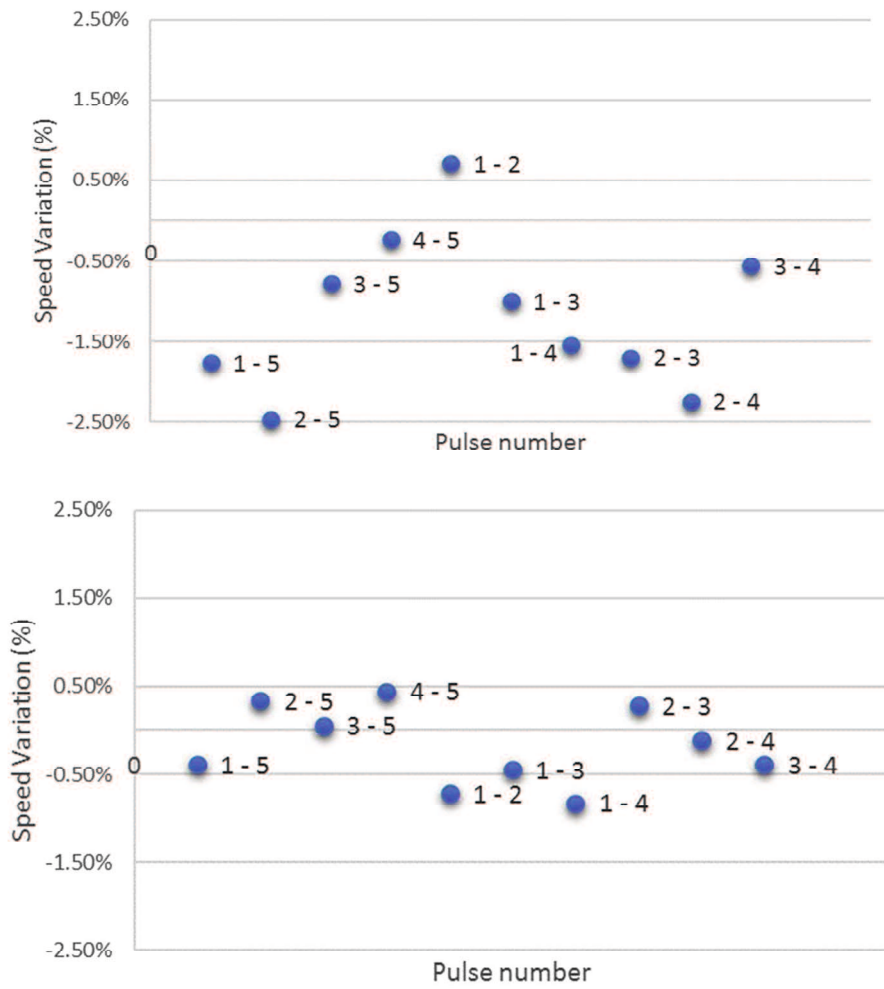


図 5.135 速度差 (a)「U」波形と (b)「W」波形

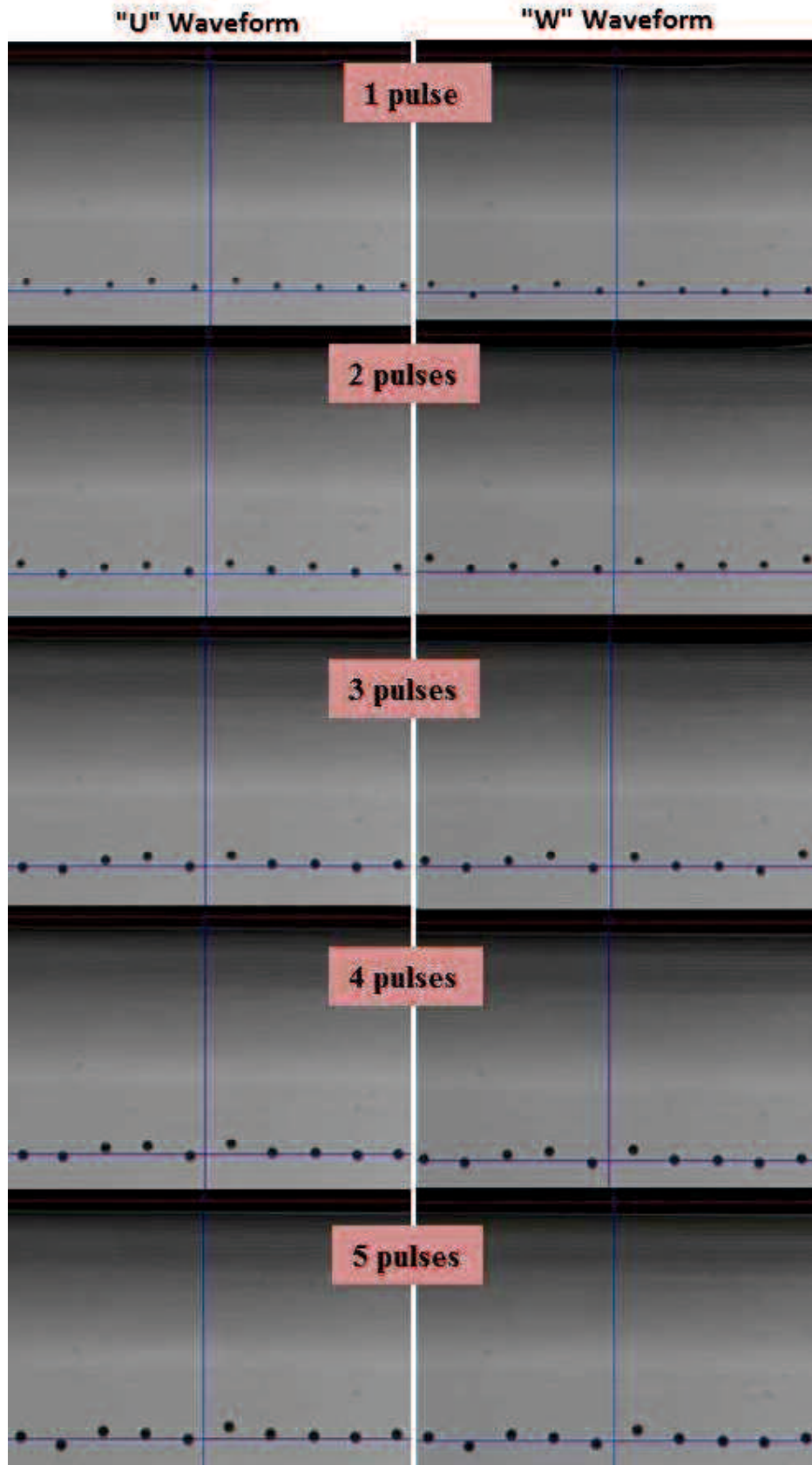


図 5.136 液滴「U」の形状と「W」予備振動

### 5.9.5 まとめ

1. 「U」波形と「W」波形は、液滴体積を高品質で制御するための「調整因子」として有効に利用することができることを明らかにした(サテライトやリガメントのないクリアな液滴)。
2. 基本波形のみでは、クリアな液滴を生成することは不可能である。「U」波形と「W」波形は、「ウィーピング」の発生無しに、マルチドロップを生成することが有効であることを明らかにした。低い電圧で振動をさらに抑制することは、サテライトやリガメントを防止し、同様の速度で生成するために必要である。
3. プッシュプル方式(いわゆるプッシュプル反射波形)のような結果を生じさせるプルプッシュ方式のインクジェットプリンタの開発には、U, W 波形が有効である。
4. 電圧を適切に調整することによって、同じ速度の異なる体積のクリアな液滴を得ることができる。
5. 液滴制御のために提案された波形のメカニズムを説明するために、概念シミュレーションモデルを構築した。提案した「W」および「U」波形は、大きな電圧として孤立波を発生させ、液体チャンバ内でヘルムホルツ共鳴を可能にする2つの波、すなわち前部ランプおよび後部ランプからなると仮定し、特に、マルチドロップの概念では、この予備パルスは、追加の振動を抑制し、残留振動を低減しながら、「ウィーピング」の発生を回避し、それによりマルチパルス波形からの過度の圧力を抑制するのに有効であることを明らかにした。さらに、各液滴の間に適切な速度を生成するために電圧調整を行う必要があり、各パルスの負の応答は少なくとも「W」または「U」波形の負の部分と同様でなければならない。"keep"または  $t_{\text{keep}}$  の時間は、パルス間の適切な波の干渉を生成するために、ゼロであるか、または一時停止なしでなければならない。

## 5.10 まとめ

インクジェットプリンターヘッドの高品位な印刷手法であるマルチドロップ吐出技術に関する駆動波形を新たに設計するため、吐出駆動波形シミュレーションのためのシステムモデル技術及び液滴の吐出実態評価システムをそれぞれ開発し、開発したシステムを組み合わせた吐出波形の開発評価手法を構築した。その吐出波形の開発評価手法を用いた研究から、従来の駆動波形では制御が困難であった。高品位のマルチドロップ吐出のための駆動波形を設計し、その技術の有効性を明らかにすることが出来た。その設計手法による技術開発の検討から、新たなコア技術を開発した。

## 第6章 結論

### 6.1 本研究のまとめ

本研究では、経営ビジョンに基づき企業を持続的に成長させるために必要となる主要因の調査から主要因を構築するための仕組みと、関連する知財について特許検索システムを用いて技術動向分析の考察を行った上で、そこから中小企業の競争優位性を構築するためにモノづくりの特徴とモノづくりを支えるコア技術の明確化方法、コア技術を中心とした解析主導の考え方に基づく製品開発手法とその適用及びプロセスを示した。

現代のビジネス環境に於いて、企業を持続的に成長させていくことは非常に困難である。その背景には日本の技術力に対する評価は高いが国際競争力ランキングは徐々に低下している状況があり、競争力の向上にはイノベーションの創出が重要であるとの指摘がなされている。イノベーションの創出には、社会の様々な「こと」に対応した市場への適応のための製品やサービスを効果的に見出し効率的に開発し提供することが必要であり、強い社会的要求がある。このような環境の中、企業を持続的に成長させるために必要となる製品を効率的に開発するための手法とその製品開発プロセスについて研究を行うことは重要であると考え、モノづくりを行なっている中小企業が持続的に成長するために必要となる製品開発手法とそのプロセスについて有用性を示すことが出来た。

第1章では、研究の背景、目的、研究アウトライン及び論文の構成を示した。

第2章では、中小企業における持続的成長要因に関する一考察として、先行研究者の文献調査から中小企業における持続的成長の定義を示した上で、持続的に成長するための基礎となる主要因を考察し抽出した。さらに、その要因を基に企業がその組織へ適用する際の課題やその解決方法について考察を行った結果を示すことが出来た。そして特に、モノづくり企業が競争優位性を保ち持続的成長をするためにはイノベーションとそのマネジメントが重要であることを示した。

第3章では、特許検索システムを用いた技術動向分析の一考察として、特許検索システムの一つであるYUPASSとパテントマッピングソフトを組み合わせた特許分析システムを用いて、半導体製造装置に欠かすことのできない露光装置を例として、技術の変化が市場に与える影響について特許情報の技術動向分析から考察を試みた。特許情報は技術動向や技術分析

から自社や競合他社との研究戦略及び方向性を明らかにするために有効な情報である。その特許情報に含まれる技術情報の探索目的に適合する定量分析、定性分析、相関分析等を通じて、分析結果を見える化することで技術情報を容易に理解し、企業における競争優位を高めるため、効果的な製品開発を行う研究開発戦略および方向性を明らかにするための有効な情報であることすることを示すことが出来た。

第4章では、モノづくりに於けるコア技術の明確化に関する検討を行った。製品は顧客要求に基づき新たな価値を提案するための「こと」を達成する手段であるが、その製品価値を達成するためのコア技術を明確にする分析手法の提案、及びその手法を用いてコア技術を活用した効率的な製品開発プロセスを示した。製品のコア技術を明確化する手法について提案し、実装置を基に検討評価を行い、その有効性を示した上で、顧客が要求する価値を提供するためのモノづくりのための製品開発・設計プロセスを示すことが出来た。

第5章では、製品開発プロセスにおいて重要な役割を果たす製品のコア技術について、コア技術をより効率的に開発するための技術開発手法が必要であることから、インクジェット(IJ)解析・実験より、コア技術をより効率的に開発するため、実製品において解析主導設計を適用した製品開発手法と新たなコア技術を開発した。顧客価値要求に応えるため解析主導設計を適用した。新たなIJ技術波形の開発評価手法を提案し開発した手法を適用することで、従来の駆動波形では制御が困難であった高品位のマルチドロップ吐出のための駆動波形を設計した。設計した駆動波形は吐出速度を一定にした状態で吐出重量を制御することができることを明らかにした。

第6章では、経営ビジョンに基づきコア技術を中心とした解析主導設計の考え方に基づく製品開発手法とそのプロセスとして、得られた結果を総括し、効果的且つ効率的な製品開発プロセスを示すことが出来た。

本研究は、モノづくりを中心とした中小企業が持続的に成長するために必要な主要因を示し、その要因を実行するための方法の一つとして重要であるコア技術を明確化した。また、競争優位性を効率的に構築するための製品開発手法と設計プロセスを示した。

総括し、効果的な製品開発における顧客価値の探索、提案、さらに獲得するための顧客価値・競争優位を得るための設計開発手法とその設計プロセス方法を示しており、今後のモノづくり中小企業におけるコア技術開発を中心とした競争優位性を保つための持続的成長の方向性を示したものである。

## 6.2 今後の展望

今後の展望として、モノづくりの中小企業が持続的に成長していくための定義に関する調査や一般化は不足していたと考えるが、多くの中小企業が発展していくために、得られたコア技術を基にしたコア技術戦略としての製品開発として、今後日本での労働人口の減少からくる無人化や自動化、省力化への対応とした、例えばロボットシステムなどへの展開を図っていくことを検討し、さらなる有用性を示して社会への発展に貢献していきたいと考える。

## 謝辞

本研究の遂行や論文をまとめるにあたり、大変多くの方々にご指導とご協力をいただきました。この場を借りて、心より感謝の意を表します。

山口大学大学院へ8年間在籍し、ままならない研究と苦勞の連続でした。その中で、入学当初の大学院技術経営研究科から理工学研究科博士後期課程までと、長きに渡りご指導を賜りました上西 研教授、同様の中に大変多くの時間を取って研究や論文のご指導を賜りました春山繁之教授には、心より感謝申し上げます。そして、博士課程では同大学院創成科学研究科の江 鐘偉教授、古賀 毅准教授、同大学院技術経営研究科の Nguyen Huu Phuc 准教授には随所に適切なご指導を賜り、深く感謝申し上げます。

また、後方よりサポートをいただきましたピーエムティーの浜崎義樹氏、石井好恵氏、西山敬朗氏、大神 臣氏、黒木伸彦氏には最後までのお応援、心の支えとなり本当にありがとうございました。そして、ピーエムティーの社員の皆様にはアンケートやデータ収集などと研究の支えになっていただきました。誠にありがとうございます。

最後に、妻 文子や子供たちには修士課程、博士後期課程と長期に渡り学びを支えてくれました。業務との関係で時間確保が難しく、なかなかままならない苦勞を伴いながら家庭を顧みる余裕もない中でも、心の支えと多くの協力をいただきました。家族のお陰です、本当にありがとうございました。

私は健康で学べることに大変感謝しております。また、社会人となつての学び直しが、学業や研究を通じて学ぶ習慣化ともなりました。今後は、後進や世の中のためにも社会に貢献し、お返しの人生を歩みたいと考えております。

京谷忠幸 拝



## 参考文献

- [1] Moldavska, A., welo, T. 2017. The concept of sustainable manufacturing and its definitions; A content-analysis based literature review. *Journal of Cleaner Production*, vol. 166, pp. 744-755.
- [2] Despeisse, M., Oates, R, M., & Ball, D, P. 2013. Sustainable manufacturing tactics and cross-functional factory modeling. *Journal of Cleaner Production*, vol. 42, pp. 31-41.
- [3] Badurdeen, F., & Jawahir, I,S. 2016. Strategies for value creation through sustainable manufacturing. In: 14th Global conference on sustainable manufacturing. [online] Stellenbosch: *Procedia Manufacturing*, pp. 20-27. Available at: <http://www.sciencedirect.com> [accessed 30 Aug. 2017].
- [4] England, R. 2015. Strategic resilience for through-life engineering services. In: The fourth International Conference on Through-life Engineering Services. [online] Shrivenham: *Procedia CIRP*, vol. 38, pp. 187-196. Available at: <http://www.sciencedirect.com> [accessed 30 Aug. 2017].
- [5] Golini, R., Longoni, A., & Cagliano, R. 2014. Developing sustainability in global manufacturing networks: The role of site competence on sustainability performance. *International Journal of Production economics*, vol. 147, pp. 448-459.
- [6] Longoni, A., Golini, R., & Cagliano, R. 2014. The role of new form of work organization in developing sustainability strategies in operations. *International Journal of Production economics*, vol. 147, pp. 147-160.
- [7] Hitomi, K. 2004. Efficiency analysis in Japan's industry and manufacturing. *Journal of Technovation*, vol. 24, pp. 741-748.
- [8] Ko, H, J. 2013. Great moderation in Japanese economy. *Japan and the World Economy*, vol. 27, pp. 10-24.
- [9] Kiyota, K. 2013. Skills and changing comparative advantage: The case of Japan. *Japan and the World Economy*, vol. 28, pp. 33-40.
- [10] Phan, C, A., Abdallah, B, A., & Matsui, Y. 2011. Quality management practices and competitive performance: empirical evidence from Japanese manufacturing companies. *International Journal of Production economics*, vol. 133, pp. 518-529.
- [11] Sueyoshi, T., Goto, M., & Omi, Y. 2010. Corporate governance and firm performance: Evidence from Japanese manufacturing industries after the lost decade. *European Journal of Operation Research*, vol. 203, pp. 724-736.
- [12] Umeda, Y. 2015. Can Japanese manufacturing industry provide through-life engineering services? In: The fourth International Conference on Through-life Engineering Services. [online] Tokyo: *Procedia CIRP*, vol. 38, pp. 183-186. Available at: <http://www.sciencedirect.com> [accessed 30 Aug. 2017].

- [13] 日本の持続的成長企業.野中郁次郎.リクルートマネジメントソリューションズ.2010
- [14] Shankar, M, K., Kannan, D., Kumar, U, P. 2017. Analysing sustainable manufacturing practices-A case study in Indian context. Journal of Cleaner Production, vol. 164, pp. 1332-1343.
- [15] 戦略不全の因果.三品和宏.東洋経済新報社.2007
- [16] 成長戦略論.ダイヤモンド.A.D.グース.ハーバード・ビジネス・レビュー.2001
- [17] イノベーションを生み続ける組織.ランドン・モリス.日本経済新聞社.2009
- [18] イノベーションのDNA.クレイトン・クリステンセン.Harvard Business School Press.2012
- [19] 持続的成長を実現している企業のDNAを探る.田中達也.中井計英.日笠賢積.西田達矢 研究レポート.関西生産性本部.2002
- [20] 持続的成長のための戦略と実践.現代の経営 UFJ Institute report UFJ 総合研究所 新田真.2004
- [21] 持続的成長企業を実現する経営者を輩出するために.経営者研究.日本能率協会経営研究所.明致親吾.鈴木邦夫.奈良井佳洋.服部毅.松本晃.丸山康幸.2008
- [22] チェンジ・リーダーの条件.P.F.ドラッカー.ダイヤモンド社.2000
- [23] 経営の未来.ゲイリー・ハメル.日本経済新聞社.2008
- [24] ビジヨナリー・カンパニー.ジェームズ・C・コリンズ.日経 BP 出版.1995
- [25] 企業の社外との連携によるイノベーションの仕掛けづくりの現状.西尾好司.富士通総研経済研究所レポート.2011
- [26] 中小企業経営のあるべき姿に関する研究会.赤岩茂.関東経済産業局.2010
- [27] 中小企業・ベンチャー企業論.植田浩志.桑原武志.本多哲夫.義永忠一.有斐閣.2006
- [28] Teruaki TAKAHASHI, “Korekara No Tokkyo Jyouhou Searcher (Meaning of Searcher. A future of searcher for patent information)”, Information Science and Technology, Vol. 52, No. 3 (2002), 136-142
- [29] Teruaki TAKAHASHI, “Tokkyo Jyouhou Ni Kansuru Samazama na Doukou (Patent Information Now. Various Trends in Patent Information)”, Information Science and Technology, Vol. 48, No. 11 (1998), 618-622
- [30] Teruaki TAKAHASHI, “Tokkyo Jyouhou No Kouritsuteki na Macro Kaiseki Shuhou No Kentou - F-term wo Katsuyou Shita Patent Map (Consideration of efficient macro-analysis method of patent information- Patent Map to have adopted F-term as analytic factors)”, Information Science and Technology, Vol. 52, No. 2 (2002), 100-106
- [31] Richard S. Campbell, “Patent Trends as a Technological Forecasting Tool\*”, World Patent Information, Vol.5, No.3, pp.137-143,1983
- [32] Kimio ARAI, “Tokkyo Jyouhou Kaisekiron (Patent Information Analysis Theory)”, Information Management, Vol. 27, No. 7 (1983), 535-553
- [33] Kimio ARAI, “Tokkyo Jyouhou Kaiseki Ni Yoru Gijyutsu No Doukou, Bunpu Chousa (Trends in Technology, Distribution Survey by Patent Analysis)”, Information Science and

Technology, Vol. 43, No. 8 (1993), 728-739

[34] Kimio ARAI, “Tokkyo Jyohou Bunseki To Patent Map (Patent Information Analysis and Patent Map)”, Information Science and Technology, Vol. 53, No. 1 (2003), 16-21

[35] Hiroyuki Chuma, “Increasing complexity and limits of organization in the microlithography industry: implication for science-based industries”, Research Policy, 35(2006), 394-411

[36] Handerson, R., “Of life cycles real and imaginary: The unexpectedly long old age of optical lithography.” Research Policy, 24(1995), 631-643

[37] Yasuhiro Ariga, Examples and Overview of Patent Map (R) EXZ - Exploring the development outcome of automobile engine manufacturers - Inpatec Ltd

[38] Okazaki, S., Suzuki, A., Ueno, T. (Eds.), Hajimete-no Handoutai Lithography Gijyutsu (Introduction to Microlithography). Kogyo Chosa-kai

[39] Junichi Sato, (2010), Yoku Wakaru Saishin Handoutai Seizou Souchi no Kihon to Shikumi. Shuwa System

[40] Hiroshi Taguchi, Nobuo Takahashi, “Handoutai Kourokou Souchi ha Gijyutsuteki Genkai wo Norikoeta no ka?- Keieigaku Rinkou Henderson (1995) (Did Semiconductor Optical Lithography Apparatus Overcome its Technical Limitation?- Business Administration Seminar, Henderson (1995))”, Akamon Management Review, Vol. 9, No. 8(2010), 599-606

[41] Online article: “Can Nikon Or Canon Ever Catch ASML In The Lithography Market?”, Monday, April 2nd, 2012, <http://www.siliconsemiconductor.net/news>

[42] Online article: “[Report]: Handoutai Rokou Souchi Share no 6-wari wo Kakutoku - Yokushin suru ASML ([Report]: Earn 60% of the semiconductor exposure apparatus share-ASML breakthrough)”, 2007/06/21, <http://news.mynavi.jp>

[43] ASML homepage: [www.asml.com](http://www.asml.com)

[44] Nikon homepage: [www.nikon.co.jp](http://www.nikon.co.jp)

[45] Canon homepage: [canon.jp](http://canon.jp)

[46] 価値づくり経営の論理(延岡 2015)

[47] Identifying core technologies based on technological cross-impacts: An association rule mining (ARM) and analytic network process (ANP) approach. Expert Systems with Applications. Chulhyun Kim, Hakyeon Lee, Hyeonju Seol, Changyong Lee.(2011)

[48] Technological diversification, core-technology competence, and firm growth. Research policy. Jungho Kim, Chang-Yang Lee, Yunok Cho.(2016)

[49] Analysis on core technologies and cutting-edge technologies of new energy based on input-output method. 13<sup>th</sup> Global Congress on Manufacturing and Management, GCM 2016.

Procedia Engineering Jian-hua Liu, Zhan Meng, Zhao-hua Jiang.(2017)

[50] An Integrated Framework for the Selection and Acquisition of Core Technologies: The Case of Taiwan’s LED Industry. Long Range Planning. Daw Ma, Shiu-Wan Hung.(2015)

- [51] Identifying emerging core technologies for the future: Case study of patents published by leading telecommunication organizations. *Telecommunications Policy*. Heeyong Noh, Young-Keun Song, Sungjoo Lee. (2016)
- [52] Review of core technologies for development of 2G HTS NMR/MRI magnet: A status report of progress in Korea University. *Results in Physics*. J.B. Song, Y.H. Choi, D.G. Yang, Y.G. Kim, K.L. Kim, H.G. Lee. (2017)
- [53] The Selection and Promotion of Core Technology to China's Energy Goals. CUE2016- Applied Energy Symposium and Forum 2016: Low carbon cities & urban energy systems. *Energy Procedia*. Mei Sun, Cuixia Gao, Changsheng Jia, Faye D.F. Ni, Jijian Zhang. (2016)
- [54] Identifying Core Technology Structure of Electric Vehicle Industry through Patent Co-citation Information. *IACEED 2010. Energy Procedia*. Xin Wang, Yibing Duan. (2011)
- [55] Unveiling the core technology structure for companies through patent information. *Technological Forecasting & Social Change*. Hsiao-Chun Wu, Hung-Yi Chen, Kung-Yen Lee. (2010)
- 論文 10-17
- [56] Integrating Business Modeling and Road Mapping Methods – The Innovation Support Technology (IST) Approach. *Technological Forecasting & Social Change*. Hotoshi Abe, Takashi Ashiki, Akihiko Suzuki, Fumio Jinno, Hiraku Sakuma. (2009)
- [57] Strategic Evaluation of Technological Capabilities, Competencies And Core-Competencies Of Manufacturing Companies. *Robust Manufacturing Conference (RoMac 2014). Procdia CIRP* Josef Greitemann, Elias E. Christ, Anna C. Matzat, Gunther Reinhart. (2014)
- [58] Is ASR ready for wireless primetime: Measuring the core technology for selected application. *Speech Communication*. Harry M. Chang. (2000)
- [59] Constructing a strategy on the creation of core competencies for African. *Technological Forecasting & Social Change*. Shenxue Li, Timothy Clark, John Sillince. <http://dx.doi.org/10.1016/j.techfore.2017.08.008>
- [60] The contribution of technology selection to core competencies. *Internationa Journal of Production Economics*. Marko Torkkeli, Markku Tuominen. (2002)
- [61] The semiconductor silicon industry roadmap: Epochs driven by the dynamics between disruptive technologies and core competencies. *Technological Forecasting & Social Change*. Steven T. Walsh, Robert L. Boylan, Chris McDermott, Al Paulson. (2005)
- [62] Application of technology roadmaps to governmental innovation policy for promoting technology convergence. *Technological Forecasting & Social Change*. Yuko Yasunaga, Masayoshi Watanabe, Motoki Korenaga. (2009)

- [63] PetroChina key exploration domains: geological cognition, core technology, exploration effect and exploration direction. *Petroleum Exploration and Development*. JIA Cheng-zao, ZHAO Zheng-zang, DU Jin-hu, ZHAO wen-zhi, ZOU Cai-neng, HU Su-yun. (2008)
- [64] 差別化戦略の本質 いかにして価格低下競争から脱するか(織畑 2002)
- [65] 中小企業の経営戦略と技術力蓄積(池島 1990)
- [66] Implementing ALD in Product Development: The Effect of Geometrical Dimensions on Tubular Member Deformation  
Shigeyuki Haruyama, Aidil Khaidir Bin Muhamad, Tadayuki Kyoutani, Dai-Heng Chen, Ken Kaminishi, *International Journal of Industrial and Manufacturing Engineering*. Vol:7, No:11, 2013, pp2184-2188
- [67] 森崇, 設計・研究教育における 1D-CAE の可能性, 日本機械学会, No.10-8, Dynamics and Design Conference 2010 CD-ROM 論文集
- [68] H. Oida, Improvement of product quality and design work efficiency by computer, *Japan machinery Journals*, vol.91, No.833, 1988, pp 349-354
- [69] T. Mori, The possibility of 1D-CAE in the design and research and education, the Japan Society of Mechanical Engineers, No.10-8, Dynamics and Design Conference 2010
- [70] S. Yamamoto, S. Haruyama, T. Sumimoto, J. Kaneko, System Model and Analysis of Three-dimensional Dynamic for Flexible Multi-body System, *Proceeding of the 8th International Conference on Innovation Management*, 2011, pp 342-348
- [71] Fritzson P., Bunus P., “Modelica – A General Object-Oriented Language for Continuous and Discrete-Event System Modeling and Simulation”, In *Proc. Annual Simulation Symposium (2002)*: 365-380.
- [72] Fritzson P., “Introduction to Modeling and Simulation of Technical and Physical Systems with Modelica”, A John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2011.
- [73] Kousa J. A., “Virtual Computational Test bed for Building Integrated Renewable Energy Solutions”, Thesis report of Eindhoven University of Technology, 2014.
- [74] Otter M., “Modeling, Simulation & Control with Modelica 3.0 & Dymola 7”, 2009.
- [75] Elmqvist H., et al, “Object Oriented & Hybrid Modeling in Modelica”, *Journal European des Systemes Automates, AP II-JESA*, volume 35, 2001.
- [76] Zupančič B., Sodja A., “Computer-aided Physical Multi-domain Modelling: Seome Experiences from Education and Industrial Applications”, *Simulation Modelling Practice and Theory* 33, (2013): 45-67.
- [77] 高橋恭介監修, *インクジェットプリンターの応用と材料 II*, 株式会社シーエムシー出版社, (2007)
- [78] 紀州技研工業ホームページ, <http://www.kishugiken.co.jp/>
- [79] 川本広行, 中島一浩, 鴨井和美, *インクジェットプリンタの最新技術*, 日本 AEM 学会誌,

Vol.11, No.1, pp23-29, (2003)

- [80] 日本画像学会 藤井雅彦, シリーズ「デジタルプリンタ技術」インクジェット(2011) 7-14
- [81] 張 俊華 インクジェットプリンタヘッド, セラミックス 42(2007) №1 51-52
- [82] 高橋 恭介 インクジェットプリンターの応用と材料Ⅱ《普及版》(2013) 69-72
- [83] 赤羽 正雄 インクジェット技術開発と技術経営京都マネジメント・レビュー 22(2013), 169-181
- [84] Van der Meulen, M.J., “Meniscus Motion and Drop Formation in Inkjet Printing”, Thesis, Physics of Fluids, University of Twente, Netherlands, 2014
- [85] Stephen D. Hoath, “Fundamentals of Inkjet Printing”, Wiley-VCH, 2016
- [86] Chung, W.H., “Study of Micro-Droplet Behavior for a Piezoelectric Inkjet Printing Device Using a Single Pulse Voltage Pattern”, Materials Transactions, Vol. 45, No. 5 pp. 1794-801, 2004
- [87] Gan et al., “Reduction of Droplet Volume by Controlling Actuating Waveforms in Inkjet Printing for Micro-pattern Formation”, J. Micromech. Microeng. 19, 055010 (8pp), 2009.
- [88] Szczech et al., “Fine-Line Conductor Manufacturing Using Drop-On-Demand PZT Printing Technology” IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, vol. 25, no. 1, 2002
- [89] Xu, C. et al., “Electric Field-assisted Droplet Formation Using Piezoactuation-based drop-on demand Inkjet Printing”, Journal of Micromechanics and Microengineering 24,115011 (9pp), 2014
- [90] Kwon, K. & Kim, W., “A Waveform Design Method for High Speed Inkjet Printing Based on Self-Sensing Measurement”, Sensor and Actuators A 140, pp 75-83, 2007
- [91] Kwon, K., “Waveform Design Methods for Piezo Inkjet Dispensers based on Measured Meniscus Motion”, Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 18 No. 5, 2009.
- [92] Shin, P. et al., “Control of Droplet Formation for Low Viscosity Fluid by Double Waveforms Applied to a piezoelectric Inkjet Nozzle”, Microelectronics Reliability 51, pp 797 – 804, 2011
- [93] Kim et al., Development of Inkjet Nozzle Driven by Double Piezo Actuators”, ISFV15, 2012
- [94] Ioana S., “A New Viscosity-Temperature Relationship for Vegetable Oil” Journal of Petroleum Technology and Alternative Fuels Vol. 3(2), pp. 19-23, 2012
- [95] Singh, R.N., and Sommer, F., “Viscosity of Liquid Alloys: Generalization of Andrade’s Equation” Monatsh Chem, 143:1235–1242 Springer-Verlag, 2012
- [96] E. P. Furlani, “Fluid Mechanics for Inkjet Printing,” Fundamentals of Inkjet Printing: The Science of Inkjet and Droplets, ed. S. D. Hoath, Wiley pp. 13-56, 2016.
- [97] Wijshoff, H., “Drop Formation Mechanism in Piezo-acoustic Inkjet”, NSTI-Nanotech Vol. 3, 2007
- [98] Jiuan Lin, H., et al., “The Effects of Operating Parameters on Micro-Droplet Formation in a Piezoelectric Inkjet Printhead Using Double Pulses Voltage Pattern, Material Transactions, Vol.

- 47, No. 2, pp 375 – 382, Japan Institute of Metal, 2006
- [99] Shyng Leu, T., et.al., “Experimental Study of Meniscus Dynamic Behaviors in Squeeze-Mode Piezoelectric Inkjet Printhead”, *Material Science Forum* Vol. 594, pp 155-162, Trans Tech Publication, 2008
- [100] Khalate, A.A., et al, “A Waveform Design Method for a Piezo Inkjet Print-head Based on Robust Feedforward Control”, *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 21No. 6, pp 1365-1374, 2012
- [101] Kim, B.H et al., “Dynamic characteristics of a piezoelectric driven inkjet printhead fabricated using MEMS technology”, *Sensors and Actuators A* 173, pp 244-253, Elsevier, 2011
- [102] Dong, H. and Carr, W.W., “An Experimental Study of Drop-on-Demand Drop Formation”, *Physics of Fluids* 18, 072102, 2006
- [103] Smith, P.J. and Stringer, J., “Application in Inkjet Printing”, *Fundamentals of Inkjet Printing: The Science of Inkjet and Droplets*, ed. Hoath, S.D., Wiley pp 397- 414, 2016
- [104] Van der Meulen PhD thesis, “Meniscus motion and drop formation in inkjet printing”, Mark-Jan van der Meulen, *Physics of Fluids*, University of Twente, P.O. Box 217, 7500 AE Enschede, The Netherlands, 2014
- [105] Martin, G.D., and Willis, M., “Inkjet Technologies: What Next?” in *Fundamentals of Inkjet Printing: The Science of Inkjet and Droplets*, (S.D. Hoath (Ed), pp 419-444, Wiley-VCH (2016)
- [106] Hutching, I.M., and Martin, G.D., “Inkjet Technology for Digital Fabrication, John Wiley & Sons, Ltd., Publication, 2013
- [107] Holthoff, E.L., et al., “Standardized Sample Preparation Using a Drop-on-Demand Printing Platform”, *Sensors journal*, 13, 5814-5825, 2013
- [108] Kwon K.S., “Experimental analysis of waveform effects on satellite and ligament behavior via in situ measurement of the drop-on-demand drop formation curve and the Instantaneous jetting speed curve”, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 20, 115005 (14 pp), 2010
- [109] Martin, G.D., et.al., “Inkjet Printing – The Physic of Manipulating Liquid Jets and Drops”, *Journal of Physics: Conference Series* 105, IOP Publishing Ltd, 2008
- [110] Ezzeldin M. et al, “Experimental-based feedforward control for a DoD inkjet printhead”, *Control Engineering Practice* 2, pp 940–952, 2013
- [111] Meinhart C.D. and Zhang, H., “The Flow Structure Inside a Microfabricated Inkjet Printhead”, *Journal of Microelectromechanical System*, Vol. 9, No. 1, IEEE, 2000
- [112] Jan G. et.a., “Inkjet-based Micromanufacturing” Wiley-VCH Verlag & Co., 2012
- [113] Hsiu M. and Hwang W.S., “Effects of Pulse Voltage on the Droplet Formation of Alcohol and Ethylene Glycol in a Piezoelectric Inkjet Printing Process with Bipolar Pulse”, *Material Transactions*, Vol. 49, No. 2, pp. 331-338, 2008
- [114] Liou, T.M., et. al., “Effects of actuating waveform, ink property, and nozzle size on

- piezoelectrically driven inkjet droplets”, *Microfluid Nanofluid*, pp 575-586, Springer, 2010
- [115] Jo, B.W. et. al., “Evaluation of jet performance in drop-on-demand (DOD) inkjet printing”, *Korean J. Chem. Eng.*, 26 (2), pp 339-348, 2009
- [116] Xu, C et al., “Study of Droplet Formation Process during Drop-on-Demand Inkjetting of Living Cell-Laden Bioink”, *American Chemical Society*, pp 9130 – 9138, 2014
- [117] Yang, G. and Liburdy J.A., “Droplet Formation from a Pulsed Vibrating Micro-Nozzle”, *Journal of Fluids and Structures* 24, pp 576-588, © Elsevier, 2008
- [118] Khalate, A.A., et. al., “Performance improvement of a drop-on-demand inkjet printhead using an optimization-based feedforward control method”, *Control Engineering Practice*, 19, pp 771-781, 2011
- [119] Chung Wu, H et. Al., “Effect of Actuating Pressure Waveform on the Droplet Behavior in a Piezoelectric Inkjet”, *Material Transaction Vol. 51 No. 12* pp 2269 – 2276, 2010
- [120] Chung Wu, H. et.al., “Simulation of Droplet Ejection for a Piezoelectric Inkjet Printing Device, *Material Transaction Vol. 45 No. 3* pp 893 – 899, 2004
- [121] Chung Wu, H. et.al., “Development of a Three-Dimensional Simulation System for Micro-Inkjet and Its Experimental Verification”, *Material Science and Engineering A* 373, pp 268 – 278, Elsevier, 2004
- [122] Poozesh, S., “Inkjet Printing: Facing Challenges and Its New Applications in Coating Industry”, *Doctoral Dissertation of Mechanical Engineering, paper 72.*, University of Kentucky, 2015
- [123] Zhang, H., et.al.,” Numerical Investigation of the Influence of Companion Drops on Drop-on-Demand Ink Jetting”, *Journal of Zhejiang University, Applied Physics & Engineering No. 13*, pp 584-595, 2012
- [124] Wei, H., et.al.,”A Waveform Design Method for High DPI Piezoelectric Inkjet Print-head Based on Numerical Simulation”, *Microsystem Technology*, published online © Springer, 2017
- [125] Khalate, A.A. et al., “Minimization of cross-talk in a piezo inkjet printhead based on system identification and feedforward control, *Journal of Micromechanics and Microengineering* 22, 115035 (21pp), 2012
- [126] Lin Tsai, H., et.al, “Fabrication of Microdots Using Piezoelectric Dispensing Technique for Viscous Fluids”, *Material Journals, Vol 8 (10)*, 2015
- [127] Herran,L., “Jet Instability and Droplet Formation for Bio-Printing Application”, *PhD Dissertation, Clemson University, 2013*, accessed from [http://tigerprints.clemson.edu/all\\_dissertations](http://tigerprints.clemson.edu/all_dissertations)
- [128] Xu, J. and Attinger, D., “Drop on Demand in a Microfluidic Chip”, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 18, 065020, 10 pp, IOP Publishing, 2008
- [129] Tsai, M.H., et.al, “The Micro-droplet Behavior of a Molten Lead-free Solder in an Inkjet



- Printing Process”, Journal of Micromechanics and Microengineering, 19, 125021, 10 pp, IOP Publishing, 2009
- [130] Tsai, M.H.,” Effect of Pulse Voltage on Inkjet Printing of a Silver Nano powder suspension”, Nanotechnology, Vol. 19 No. 33, IOP Publishing, 2008
- [131] Jang, D., et.al., “Influence of Fluid Physical Properties on Ink-Jet Printability”, Langmuir 25 (5), pp 2629-2635, ACS Publications, 2009. Downloaded from <http://pubs.acs.org>
- [132] Jung, S., “Fluid Characterisation and Drop Impact in Inkjet Printing for Organic Semiconductor Devices”, University of Cambridge, 2011
- [133] Herran, C.L., et.al., “Performance Evaluation of Bipolar and Tripolar Excitations during Nozzle-jetting-based Alginate Microsphere Fabrication”, Journal of Micromechanics and Microengineering. 22, 2012.  
Published on line at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0960-1317/22/085025/pdf>.
- [134] Yamaguchi, S., et.al.,” Cell Patterning Through Inkjet Printing of One Cell Per Droplet”, Biofabrication 4, 045005 (8pp), IOP Publishing, 2012
- [135] リビングカンパニー.A.D.グース.日経 BP.1997
- [136] インテグレーション・マネジャーの要件.ロナルド N.アシュケナス.ハーバード・ビジネス・レビュー.1998
- [137] ブルーオーシャン戦略.W.チャンキム.ランダムハウス講談社.2005
- [138] MOT [技術経営] 入門(延岡 2008)
- [139] 経済産業省 製造基盤白書(2016 年版)
- [140] 製造業における実践イノベーション経営(石尾ら 2009)
- [141] 商品開発のための品質機能展開(赤尾洋二 著 2010)
- [142] 品質展開入門(赤尾洋二 著 1990)
- [143] 品質展開法(1)(大藤正、赤尾洋二、小野道照 著 1990)
- [144] 品質展開法(2)(大藤正、赤尾洋二、小野道照 著 1994)
- [145] ロケットバーボンプ用タービンのパラメータ設計(瀧田ら 2012)
- [146] 品質機能展開法(QFD)による行政サービスの市民評価に関する研究(山本ら 2005)
- [147] ゲーム感覚意思決定法(刀根薫 著 1986)
- [148] AHP の QFD への適用における重要度の調整に関する研究(岡村 2006)
- [149] クリティカルチェーン—なぜ、プロジェクトは予定どおりに進まないのか？(エリヤフ ゴールドラット (著), 三本木 亮 (著) 2003)
- [150] 図解 コレならできるクリティカルチェーン—もう、プロジェクトは遅れない！(津曲 公二 (著), 中 憲治 (著), 酒井 昌昭 (著) 2004)
- [151] 考える力をつける 3 つの道具(岸良裕司、きしらまゆこ 著 2014)
- [152] 大井田浩, コンピュータによる製品品質及び設計業務効率の向上, 日本機械学会誌, vol.91, No.833, pp349-354, 1988

- [153] 大富浩一, シミュレーション技術と上流設計, 日本機械学会 2004 年度年次大会講演資料集(8), pp388-389, 2004
- [154] 吉川弘之, 富山哲男, 設計学—ものづくりの理論—, 放送大学教育振興会, pp.17
- [155] 大富浩一, 羽藤武宏, 1DCAE によるものづくりの革新, 東芝レビューVol.67 No.7, 2012
- [156] 椿広計, 河村敏彦, 設計科学におけるタグチメソッド, 日科技連出版社, 2008
- [157] 田口玄一, 横山巽子, オフライン品質工学, 日本規格協会, 2007
- [158] B. Zupančič, Optimization of a Process Control System using OO Approach with Matlab-Modelica Environment, Asia Simulation Conference, 2006, pp 143-147
- [159] B. Zupančič, R. Karba, M. Atanasijević-Kunč, J. Musić, Continuous Systems Modelling Education – Causal or Acausal Approach? Proceeding of the ITI 2008 30th , 2008, pp 803-808.
- [160] Liu G. R., et al, “The Finite Element Method, A Practical Course”, Elsevier Science Ltd. All rights reserve, 2003.
- [161] 富士フィルム株式会社 特開 2012-250477
- [162] 富士フィルム株式会社 特許第 5410490 号
- [163] セイコーエプソン株式会社 特開 2012-223936
- [164] セイコーエプソン株式会社 特開 2013-166329
- [165] Kwon, K.S., “Vision Monitoring”, in “Inkjet based Micromanufacturing, pp127-144, Wiley VCH, 2012
- [166] Verkouteren, R.M, et.al, “Inkjet Metrology: High Accuracy Mass Measurement of Microdroplets Produced by Drop-on-Demand Dispenser”, Analytical Chemistry, Vol. 81