

| 学位論文内容の要旨 | |
|--|----------------------------------|
| 学位論文題目 | 半導体製造産業における黎明期のビジネス・エコシステムに関する研究 |
| 氏名 | 三宅 賢治 |
| <p>本論文は、半導体市場における未充足のニーズの存在と、それを前提とした最適規模生産について分析することで、中小ベンチャー企業が中心となりうる新たなビジネス・エコシステムの形成について検討したものである。これまで半導体製造産業は、産業全体としての規模の経済性追求を目指し、国際半導体技術ロードマップ(ITRS)に従って微細化やウェハの大口径化実現に向けて協動的・分業的に研究開発を行うことで、強固なエコシステムを形成してきた。しかし、規模の経済性追求を目指した高度なエコシステムの合理化は、小ロットの需要に対して対応力がないという課題を有している。したがって、それを充足する生産方式を核とした新たなエコシステムの形成・成長は、長期的には産業の平均生産費用曲線に変革をもたらし、業界の新たなエコシステムの形成に至る可能性がある。</p> <p>第1章では序論として研究の背景、研究方法及び論文の構成について記載した。</p> <p>第2章では半導体業界の近年の動向について概説し、漸進的な大口径化による規模の経済性実現によっては充足されない市場が存在していることを明らかにした。半導体業界では、大口径ウェハによる大量生産でコストダウンを行い、マス市場の高機能化と低コスト化の要求に対応してきた。しかし、その弊害として試作等を目的とした小ロット生産は割高かつ長納期となっており、大口径化が進行すればするほど、代替的生产方式の重要性とそれに対するニーズが高まることを示した。さらに、生産システムの小型化による小ロット向けの最適規模生産の実現は、半導体産業において中小ベンチャー企業が新たなビジネス・エコシステムを形成することにつながるケースが存在していることを明らかにした。</p> <p>第3章では、上記の問題提起の妥当性を検討する枠組みを構築するため、成熟産業である鉄鋼産業において、生産システムの小型化と操業度に関する柔軟性の実現によって市場を獲得していったミニミル生産方式の事例を分析した。その結果、①設備投資金額が少なく低環境負荷を実現した生産システムの小型化、②マーケット規模に合わせた最適規模生産、③既存プロセスとの組合せによる品質向上の3つの要因によりミニミルが普及したことを明らかにした。</p> <p>第4章では、前章での分析を前提として、革新的なプロセス開発によって半導体産業において生産システムの小型化を目指したものの不首尾に終わったボールセミコンダクター社(以下、ボールセミ社)の事例を分析した。その結果、①イノベーションの発生時期が半導体産業の成長期であったために大量生産を目指したこと、②主要部材がウェハから球状シリコンへと非連続に変化したために全製造工程の要素技術の研究開発が必要であったこと、③参加企業が少なかったためにビジネス・エコシステムを形成できなかったことがミニミルのケースと本質的に異なることを明らかにした。</p> | |

さらに、現在の半導体業界のエコシステムでは、ボールセミ社の活動時と異なり、大規模化による生産性の向上は市場ニーズを十分満たせず、新たなエコシステムの登場に適した環境条件にあることを示した。半導体の成長期から成熟期までの規模の経済をけん引した ITRS 活動は終了し、アプリケーションの観点からの新たなロードマップ(IRDS)策定が議論されている背景を分析した結果、微細化、大口径化を伴わない化合物半導体、MEMS、アナログデバイス、バイオデバイスなどが主体となる従来とは異なる新たなビジネス・エコシステム形成の可能性が明らかとなった。

第 5 章では、半導体業界において多品種少量ニーズを充足する新たな最適規模生産方式を構築する可能性のあるミニマルファブプロジェクトに注目し、中小企業の連合体によっていかにして新たなビジネス・エコシステムが形成されつつあるかを、当該プロジェクトに参加した企業に対してアンケート調査を行うことで分析した。この結果、①産学官連携コンソーシアムの設立によって、コア技術を有するオープンイノベーションを志向する企業が幅広く参集すること、②早期にコンセンサス標準を策定することで、各主体が自身の強みを生かしながら効率的に技術開発を分業化できる体制の早期整備、③プロジェクトマネジメント力とコンセプト立案力を有する強力なリーダーの存在の 3 つによって、ミニマルファブのビジネス・エコシステムは推進可能であったことが明らかとなった。

第 6・第 7 章では、黎明期にあるビジネス・エコシステムに属する企業の戦略と組織能力について分析することで、参加企業に求められる内的条件について検討した。分析対象はミニマルファブ用のマスクレス露光装置の開発を担当した株式会社 PMT である。

第 6 章での分析は、4 章のボールセミ社の事例分析から導いた戦略に関する仮説の妥当性を検証する。検証の対象として、PMT 社の半導体試作受託製造サービスの分析を行う。PMT 社のターゲットとする試作半導体は、ITRS に追従しない化合物半導体、MEMS、バイオデバイスなどとしている。試作で一番コストと時間を要するのはマスク製作である。PMT 社では同社が開発したミニマルファブ用のマスクレス露光装置をフォトリソプロセスに使用し、その他のプロセスには既存装置を使用するハイブリッドプロセスで短納期と低コストを実現していることが明らかになった。

また、ビジネス・エコシステムの形成が着実に進行していくためには、関係各主体が外部からの知識を効果的に吸収・活用し、全体の開発ロードマップに沿って開発を推進できるだけの組織能力を有していなければならない。

そこで、第 7 章では、オープンイノベーション推進の基礎となる適応能力(Absorptive Capacity)について検討した。まず、適応能力の定量的評価のためのフレームワークを開発し、PMT 社がマスクレス露光装置の開発を成功できた要因を、ボールセミ社との比較で検討した。その結果、開発着手時点での社内の適用能力の程度に照らして、適切に外部知識を活用する能力を持つことが肝要であることを明らかにした。こうした情報はビジネス・エコシステムを構成すると予想される企業群が共有することで、エコシステム内での連携は活発になり、知の共有化が進展することで、より合理的かつイノベティブなエコシステムとなることを示した。

最後に、第 8 章で本研究の総括として、鉄鋼産業におけるミニミルのように半導体産業においても新たな最適規模生産方式を核としたビジネス・エコシステムの形成余地は十分存在するが、それを実現するための中小企業間のネットワークは各参加主体の戦略的な協調と、主体ごとの適応能力の違いを反映したコンピタンスの相互補完関係の強化が必要不可欠であることを指摘した。また、今回の研究は、半導体製造にかかるビジネス・エコシステムに限定して検討したが、IRDS にみられる近年の動向を踏まえれば、アプリケーションまでも含めたより広範なビジネス・エコシステムの検討が、本研究の発展につながることを指摘した。

| 学 位 論 文 内 容 の 要 旨 | |
|---|---|
| 学位論文題目 | A Study concerning Early Stage Business Ecosystem in the Semiconductor Manufacturing Industry |
| 氏 名 | MIYAKE Kenji |
| <p>This paper examined the existence of unsatisfied needs in the semiconductor market and analyzing the optimum scale production on that basis, and examined the formation of a new business ecosystem that can be centered on SME (Small to Medium Enterprise) & Start-up companies. Until now, the semiconductor manufacturing industry still aims to pursue the economy of scale as a whole industry, conduct research and development in a cooperative and divisional manner toward realization of microfabrication and wafer diameter scale-up according to ITRS; thereby realizing a robust ecosystem has been formed. However, the rationalization of sophisticated ecosystems aimed at pursuing the economy of scale has a problem that there is no ability to respond to demand of small lots. Therefore, the formation and growth of a new ecosystem centered on a production method that satisfies this, will lead to a change in the average production cost curve of the industry over the long term; possibly leading to the formation of a new ecosystem in the industry.</p> <p>In Chapter 1, I described the background of the research, research method and composition of the paper as an introduction.</p> <p>Chapter 2 outlines recent trends in the semiconductor industry and clarifies that there is a market which is not satisfied with the realization of economies of scale with incremental change of wafer diameter. In the semiconductor industry, we have responded to the demands for high-performance and low-cost for huge markets by reducing costs of mass production with large-diameter wafers. However, as a hindrance to this, small-lot production for the purpose of prototype manufacture, and such, are expensive and have a long delivery time, I showed that the larger the diameter is, the more important the alternative production methods and the need for those methods become. Furthermore, The realization of optimum scale production for small lots by scaling down of production systems revealed that there may be cases where SME & Start-up companies can form new business ecosystems in the semiconductor industry.</p> <p>In Chapter 3, in order to establish a framework to examine the validity of the above-mentioned problems, I referred to the example. that in the steel industry, which is a mature industry, And, I analyzed the case of the mini-mill production method which gained market share by realizing a scaled down version of its manufacturing system and realization of flexibility in its operations. As a result, the following points were clarified as factors of the mini mill spread: (1) The scale down of production system with low capital investment amount, low environmental impact. (2) Optimal scale production with market scale. (3) Quality improvement by combining with existing processes.</p> <p>In Chapter 4, based on the analysis in the previous chapter, I analyzed cases of Ball Semiconductor Company (Ball), which aimed to scale down the production system in the semiconductor industry through the innovative process development, but failed, I focused on the point that it differs from the mini mill case in particular. As a result, there were three differences: (1) Since the timing of occurrence of innovation was the growth period of the semiconductor industry, it was aimed at mass production. (2) The main component changed</p> | |

discontinuously from wafer to silicon sphere, so it is necessary to research and development of the elemental technologies of the whole manufacturing process. (3) Business ecosystem was not formed because of few participating companies.

Furthermore, in the current semiconductor industry ecosystem; unlike Ball's activities, improvement in productivity due to large-scaled products cannot fully satisfy the market needs and it is shown that the environmental condition is suitable for the appearance of a new ecosystem. The ITRS activities that towed economies of scale from the growth stage of semiconductors to the maturity stage was finished, as a result of analyzing the background that a new roadmap (IRDS) formulation from the viewpoint of the application is being discussed, it became clear that the possibility of forming a new business ecosystem was different from the conventional one which is mainly composed of compound semiconductors, MEMS, analog devices, bio-devices and the like without miniaturization and large diameter wafer.

In Chapter 5, I focus on the minimal fab projects that may establish a new optimal scale production method that meets the needs of high-mix and low volume production in the semiconductor industry, and I analyzed how a new business ecosystem is being formed by the federation of SME by questionnaire survey of companies participating in the project. As a result, it became clear that the business ecosystem of the minimal fab could be promoted by the following three points: (1) The establishment of industry-academia collaborative consortium, companies that have core technologies oriented towards open innovation will gather from a wide. (2) By establishing consensus standards at an early stage, early development of a system that allows each entity to divide up technological development efficiently while making full use of its strengths. (3) Existence of strong leaders with project management skills and concept planning skills

In Chapter 6 and Chapter 7, I analyzed the internal conditions required of participating companies by analyzing the strategy and organizational capabilities of companies belonging to the business ecosystem in the early stages. The object of analysis is PMT Co., Ltd. who was in charge of developing a mask-less exposure equipment for the minimal fab.

The analysis in Chapter 6 examines the validity of the strategy hypothesis derived from the case analysis of Ball in Chapter 4. As a target of verification, I analyzed PMT which started foundry service of semiconductor prototyping. The targeted prototype semiconductor by PMT is supposed to be a compound semiconductor, MEMS, biotechnology device, etc. that does not follow ITRS. Making the mask is the most costly and time-consuming activity in prototype cost. It became clear that the PMT realized short delivery time and low cost by using the hybrid process between photolithography process with the mask-less exposure equipment for the minimal fab developed by PMT and existing equipment for other processes.

Also, in order for the formation of business ecosystems to progress steadily, we must have enough organizational capacity so that each of the parties concerned can absorb, utilize externally knowledge effectively, and promote development along the entire development roadmap.

Therefore, Chapter 7 discussed the Absorptive Capacity that is the basis of promoting open innovation. First, I developed a framework for quantitative assessment of Absorptive Capacity, and investigated the factors that PMT was able to successfully develop the mask-less exposure equipment, in comparison with Ball. As a result, it was clear that it is essential to have the ability to properly utilize external knowledge in light of the degree of in-house Absorptive Capacity at the time of development. This kind of information is shared by a group of companies

expected to compose a business ecosystem, so that cooperation within the ecosystem becomes active; thus, progress of sharing of knowledge also, shown innovation that leads to a more rational and innovative ecosystem.

Finally, in Chapter 8, as a summary of this research, I showed that just as mini-mill in the steel industry case could prove, the semiconductor industry could also follow the same example. Thus, it is possible to form a business ecosystem centered on a new optimal scale production method. And in order to realize this, it is essential to strengthen mutual complementary relationships between strategic cooperation of each participating entity and competence reflecting the difference in Absorptive Capacity of each entity.

In addition, although this study was limited to business ecosystem related to semiconductor manufacturing, based on recent trends in IRDS, I pointed out that consideration of a broader business and ecosystem including the application will lead to the development of this research.

学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

(博士後期課程博士用)

山口大学大学院理工学研究科

| | | | |
|--|---------------------|------|-------|
| 報告番号 | 理工博甲 第 709 号 | 氏名 | 三宅 賢治 |
| 最終試験担当者 | | 主 査 | 上西 研 |
| | | 審査委員 | 南 和幸 |
| | | 審査委員 | 岡本和也 |
| | | 審査委員 | 松浦良行 |
| | | 審査委員 | 古賀 毅 |
| 【論文題目】 半導体製造産業における黎明期のビジネス・エコシステムに関する研究 | | | |
| 【論文審査の結果及び最終試験の結果】 <p>これまで半導体製造産業は、産業全体としての規模の経済性追求を目指し、国際半導体技術ロードマップ(ITRS)に従って微細化やウェハの大口径化実現に向けて協調的・分業的に研究開発を行うことで、強固なエコシステムを形成してきた。しかし、近年、大規模化による生産性の向上だけでは市場ニーズを十分満たせなくなっており、新たなエコシステムの登場に適した環境に移行しつつある。</p> <p>本論文は、以上の背景に基づき、半導体市場における未充足のニーズの存在とそれを前提とした最適規模生産について分析することで、中小ベンチャー企業が中心となりうる新たなビジネス・エコシステムの形成について検討したものである。</p> <p>内容は、まず序論として研究の背景、研究方法等について述べた上で、以下のように要約される。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 生産システムの小型化による小ロット向けの最適規模生産の実現を前提とした場合、半導体産業において、中小ベンチャー企業が新たなビジネス・エコシステムを形成するケースが存在しうることを明らかにした(第2章)。 2. 成熟産業である鉄鋼産業において、生産システムの小型化と操業度に関する柔軟性の実現によって市場を獲得していったミニミル生産方式の事例を分析した。その結果、①設備投資金額が少なく低環境負荷を実現した生産システムの小型化、②マーケット規模に合わせた最適規模生産、③既存プロセスとの組合せによる品質向上の3つの要因によりミニミルが普及したことを明らかにした(第3章)。 3. 革新的なプロセス開発によって半導体産業において生産システムの小型化を目指したものの不首尾に終わったボールセミコンダクター社(以下、ボールセミ社)の事例を分析した。その結果、①イノベーションの発生時期が半導体産業の成長期であったために大量生産を目指したこと、②主要部材がウェハから球状シリコンへと非連続に変化したために全製造工程の要素技術の研究開発が必要であったこと、③参加企業が少なかったためにビジネス・エコシステムを形成できなかったことがミニミルのケースと本質的に異なることを明らかにした(第4章)。 4. 半導体業界において多品種少量のニーズを充足する新たな最適規模生産方式を構築する可能性のあるミニマルファブプロジェクトに注目し、中小企業の連合体によって、いかにして新たなビジネス・エコシステムが形成されるのかを、当該プロジェクトに参加した企業に対してアンケート調査を行うことで分析した。この結果、①産学官連携コンソーシアムの設立によって、コア技術を有するオープンイノベーションを志向する企業が幅広く参集すること、②早期にコンセンサス標準を策定することで、各主体が自身の強みを生かしながら効率的に技術開発を分業化できる体制を早期に整備すること、③プロジェクトマネジメント力とコンセプト立案力を有する強力なリーダーが存在することの3つによって、ミニマルファブのビジネス・エコシステムは推進可能であったことを明らかにした(第5章)。 | | | |

5. 黎明期にあるビジネス・エコシステムに属する企業の戦略と組織能力について分析することで、参加企業に求められる内的条件について検討した。分析対象はミニマルファブ用のマスクレス露光装置の開発を担当した株式会社 PMT とした。分析の結果、ビジネス・エコシステムの形成が着実に進行していくためには、関係各主体が外部からの知識を効果的に吸収・活用し、全体の開発ロードマップに沿って開発を推進できるだけの組織能力を有していなければならないことを明らかにした（第6章）。

6. 適応能力の定量的評価のためのフレームワークを開発し、PMT 社がマスクレス露光装置の開発を成功できた要因を、ボールセミ社との比較で検討した。その結果、開発着手時点での社内の適用能力の程度に照らして、適切に外部知識を活用する能力を持つことが肝要であることを明らかにした。こうした情報はビジネス・エコシステムを構成すると予想される企業群が共有することで、エコシステム内での連携が活発になり、知の共有化が進展することで、より合理的かつイノベティブなエコシステムとなることを示した（第7章）。

以上のように、本研究は、半導体製造産業における新たな最適規模生産方式を核としたビジネス・エコシステムの形成余地の存在を示し、それを実現するためには、中小企業間の戦略的な協調とコンピタンスの相互補完関係が必要不可欠であることを明らかにしたものである。鉄鋼産業におけるミニミルの事例分析から得た分析フレームを半導体製造産業に応用する等、その独創性は評価できるものであり、今後の当該分野の発展に大いに貢献できるものと判断される。

本審査会では、予備審査会で指摘された不十分な箇所を追加・修正を行うとともに、質問事項に対する明確な回答があった。また、公聴会においてミニマルファブのマーケット等についての質問があったが、これらの質問に対して的確な回答がなされた。

以上より、本研究は独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士（学術）の論文に十分値するものと判断した。論文内容及び本審査会、公聴会での質問に対する応答などから総合的に判断し、最終試験を合格とした。

なお、関連論文の発表状況は以下のとおりである。

※査読付き論文（4編）

1. Kenji Miyake, Yoshiyuki Matsuura and Ken Kaminishi, The Proposal of Metrics and Evaluation Methods to Explicit Knowledge of the Absorptive Capacity, Journal on Innovation and Sustainability, Volume 5, Number 2, pp.42 – 55, January 2014.
2. Shigeyuki Haruyama, Aidil Khaidir Bin Muhamad, Tadayuki Kyoutani, Kenji Miyake, Tomohisa Kimura and Ken Kaminishi, A Study of Technology Trends Analysis Using Patent Search Systems, Journal on Innovation and Sustainability, Volume 5, Number 2, pp.18 – 35, January 2014.
3. 三宅 賢治、松浦 良行、上西 研、半導体製造プロセス関連産業のイノベーション・エコシステムに関する一考察、日本ベンチャー学会誌、第26号、pp.71 – 75、平成27年9月。
4. 三宅 賢治、事例分析に基づく半導体デバイス製造ベンチャー企業のフォーカス戦略検討と仮説提示、東アジア経済経営学会誌、第8号、pp.63 – 72、平成27年11月。

※査読のある国際会議の会議録（2編）

1. Masanori Iwata, Kenji Miyake, Nobuyoshi Yamauchi and Junko Kazusa, Blue GaN based LED Fabrication using Hybrid Process of The Minimal Photolithography System and MOCVD, IEEE Xplore, August 2016.
2. Kenji Miyake and Ken Kaminishi, Study on the Focus Strategy of Small to Medium Enterprise & Start-up Companies in the Semiconductor Manufacturing Industry Case Study of Minimal Fab, Proceedings of the 13th International Conference on Innovation & Management, pp.582 – 590, November. 2016.