

博士論文

(Doctoral Dissertation)

再生医療 及び コミュニケーション療育へのデジタル支援技術の
開発と検証

(Development and verification of digital support technology for regenerative medicine and communication therapy)

2025 年 3 月

(March 2025)

伊藤 賢治

(Kenji Ito)

山口大学大学院創成科学研究科

Graduate School of Sciences and Technology for Innovation,

Yamaguchi University

要 旨

第一章 序論

近年、デジタル医療の進化は目覚ましく、その応用範囲は急速に拡大している。医療分野では、がんなどの検診や確定診断支援にも AI アプリケーションを搭載した胃カメラなどが製品化されるなど、革新的な技術として注目されている。画像識別 AI は、画像データから特定のオブジェクトやパターンを認識する能力を持ち、医療診断支援、自動運転などに応用されている。たとえば、再生医療においては、多くの場合、主観識別で品質管理が行われている。これには、品質の統一性や正確性が確保されないという問題がある。また、医療機関や研究機関間での情報共有が不十分であることも課題である。こうした問題点を解決するためには、画像識別 AI を活用してエキスパー

トと同等の識別判断能力が得られ安定した製品を提供できる有効的な画像識別アプリケーションの開発及び検証を本研究の一つ目の課題とする。もう一つの児童精神科領域の医療応用方向を検討すると、現在の療育領域での支援は教材という形で受動的な訓練型支援が大半を占めている。個人ごとの特性に合わせた相互作用型が理想的ではあるが、リソースの問題や個別の教材提供の多くはその解決がない状態だった。そこへ、会話型生成 AI は、自然な対話を生成する能力を持つことから、発達障がいを対象とするコミュニケーション療育支援や、エンターテインメントなどへの利用が始まっている。この適用性検討において、コミュニケーションを支える心理やその定量的な行動評価が困難なため、主観的な意見にバイアスが掛かるという問題がある。これにより、支援の必要性やその効果を正確に評価することができないという課題が発生している。こうした問題点を解決するためには、子どものコミュニケーションや行動を定量評価する対話型生成 AI を活用した応用技術開発が近年の流れとなっている。対話型生成 AI との会話によって、感情のゆらぎや、生体センサー(心拍計)を活用し、緊張感と心拍数の相関をビジュアル化できるシステムを構築し、緊張緩和支援次世代ツールへの仕様を本研究の二つ目の課題として提案する。本研究の目的は、IT 医工技術の活用により、①培養細胞を安全で安定した品質提供可能な再生医療細胞品質管理システム(第二章)、および、②会話型生成 AI を活用した発達障がい児向けのコミュニケーション支援アプリケーションシステム(第三、四章)を、それぞれ構築し、その実用性を評価することとした。これらの各要素技術を融合する将来の開発に向けて、各分野での試作と有用性検討を目標とした。

第二章 再生医療細胞品質管理システム「AiCELLEX」の開発と検証

再生医療における治療用細胞の品質は、安全性の観点から極めて重要である。現状では、細胞の品質管理は顕微鏡観察による熟練者の主観判断を伴う手作業に依存しており、評価の効率性と品質の安定化に課題がある。画像自動識別 AI を用いることで、細胞の生存率や増殖率、機能性を客観定量的に測定し、より再現的な品質管理により、再生医療の安全性と有効性の向上が期待される。また、AI 化により、細胞の品質に関する情報を効率的にデータ管理し共有することができる。さらに、生産プロセスの自動化が可能となり、生産効率の向上と大量生産が期待される。一方で、ICT 化には高コストが伴う。設備の導入やシステムの開発には多大な費用がかかるため、高コストとなる可能性がある。これらの課題を踏まえた細胞の成長予測のクラウド型ネットワーク技術の立ち上げと可視化法開発、および、再生医療細胞の定量化に関する検証を行った。

第三章 「チャット型生成 AI を活用したコミュニケーション療育支援教材」

近年、発達障害やコミュニケーション障害を有す小児精神科の症例が増加しており、社会問題となっている。インターネット社会の病因仮説がある一方、機械学習技術の発展により登場したチャット型生成 AI は、コミュニケーション訓練への寄与が仮説された。本研究では、無料アプリケーション「VRoid Studio」を用いて 3 次元で動く男の子のアバターの音声や表情を通じて ChatGPT との対話を表示するタブレット PC システムのプロトタイプを開発した。評価には、Google BERT を用いて感情の定性的評価を実施した。結果、AI アバターは子どもよりも速く応答する傾向を有意に示し、子どもはポジティブな感情よりも中立的な感情の表現において反応に時間を要する傾向が見られ、AI アバターにはこれを認められなかった。これらの結果は、社会情緒的な人間性を育む AI アバターと子どもの相互作用システムの開発において、現試作機に至っていない重要な改良要件の提示を行うものである。

第四章 「第三章試作機器の生理心理モニタリング機能の拡張試作」

第三章の生成AIコミュニケーション療育アプリが目指す、難治性発達障害の療育支援技術開発に当たり、発達障がいへの適応障害や情緒障害の併存に留意した、現試作機の問題点を踏まえ、心理状態の変動を反映する生体センシングに基づく機能拡張を試みた。特に緊張などのネガティブな心理動態依存性が知られる指標の心拍数に焦点を当て、頻脈(100bpm)を越えると会話に介入し、心拍数の値を知らせて緊張緩和を支援するプロトタイプアプリの開発を試みた。さらに、社会コミュニケーション療

育の最高標的となる、その障害のある自閉症スペクトラム症児に研究協力をいただき、その対照の可能性のある公開イベントに試作機の体験をくださった同齡小児の試行データ比較により、本技術の社会コミュニケーション障害の再現定量的可視化の可能性を検証した。以上の再生細胞医療、および、コミュニケーション療育の領域を参照した試作および検証を踏まえ、今後、目的に応じた画像識別 AI や生成 AI、および生理モニター技術を組み合わせることで、高度な対話型製品管理システムや難治性疾病療育の拡張性を確認することができた。機械開発分野では一般には困難とされて来た、人間の感性評価の定量分析を伴う今後の開発において、画像や動画、音楽など対話を、より具体的にサウンド知化やビジュアル化するなどの脳神経科学をベースとする、学際的なアプローチにより、人類の本質的なウェルビーイングを目指す、例えば、個人の興味や優れた特性をよりよく導くアプリケーションを実現できる可能性がある。

用語説明

画像識別 AI:

AI を活用して画像内の情報を判別や特定する技術である。画像識別 AI で判別できる情報は主に「顔」「文字」「物体」の三種類に分類され、さまざまな用途に活用されている。画像認識 AI は、「機械学習」によりデジタル画像を構成するピクセルのパターンを学習させ、「深層学習」によって画像内の対象物を識別できるようにする。

対話型生成 AI:

ユーザーからの入力に基づき適切な応答を生成する技術であり、自然言語処理 (NLP)、機械学習、ディープラーニングアルゴリズムを利用している。対話型 AI は、チャットボットやバーチャルアシスタントなどの形で現れ、ユーザーとの対話をシームレスに行う。

間葉系幹細胞 (MSC):

間葉系幹細胞 (MSC) とは、成体内に存在する幹細胞 (ステムセル) の一つであり、中胚葉由来の組織である骨や軟骨、血管、心筋細胞に分化する能力を有する細胞である。近年では、外胚葉由来の神経細胞やグリア細胞 (神経細胞を支持するなどの機能を持つ)、内胚葉由来の肝細胞にも分化することが報告されている。

ChatGPT:

ChatGPT とは、米 OpenAI が開発した文章生成 AI である。GPT というニューラルネットワークをベースにした大規模言語モデルであり、多くのパラメータを持つため、人間のように文章を生成するなど、多様な自然言語処理タスクを実行できる。

Google BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers):

BERT は、Google が開発した革新的な自然言語処理技術である。文脈の両側を考慮した双方向の言語表現を学習することで、より精緻な言語理解を実現している。この技術は、検索エンジンやチャットボットなど、さまざまな分野で応用され、大きな成果を上げている。

Abstract

Chapter 1: Introduction

In recent years, the evolution of artificial intelligence (AI) has been remarkable, and its range of applications is rapidly expanding. In the medical field, AI applications are being integrated into products such as endoscopes for cancer screening and definitive diagnosis support, attracting attention as innovative technologies. Image recognition AI, which has the ability to recognize specific objects or patterns from image data, is being applied in medical diagnostic support and autonomous driving. For example, in regenerative medicine, quality control is often performed through subjective identification. This presents issues such as the lack of uniformity and accuracy in quality. Additionally, insufficient information sharing between medical and research institutions is also a challenge. To address these issues, the first objective of this study is to develop and validate effective image recognition applications that can provide stable products with expert-level identification capabilities using image recognition AI. Another direction for medical applications is to consider that most of the current support in the field of therapeutic education is passive training support in the form of teaching materials. Ideally, interactive support tailored to individual characteristics would be ideal, but resource issues and the provision of individual teaching materials have not been resolved. Here, conversational AI, which has the ability to generate natural dialogue, is beginning to be used for communication therapeutic support for developmental disabilities and entertainment. In examining this applicability, there is a problem that subjective opinions are biased due to the difficulty of quantitatively evaluating the psychology and behavior that support communication. This results in the inability to accurately assess the necessity and effectiveness of support. To solve these issues, the recent trend is to develop applied technologies that utilize conversational AI to quantitatively evaluate children's communication and behavior. By conversing with conversational AI, a system that can visualize the correlation between emotional fluctuations and heart rate using biosensors (heart rate monitors) is proposed as the second objective of this study, aiming to develop next-generation tools for tension relief support. The purpose of this study is to construct and evaluate the practicality of (1) a regenerative medicine cell quality management system that can provide cultured cells with safe and stable quality (Chapter 2), and (2) a communication support application system for children with developmental disabilities using conversational AI (Chapters 3 and 4). The goal is to prototype and examine the usefulness of each element technology in each field for future development that integrates these technologies.

Chapter 2: Human Subjective Judgment Bias Revealed by Automated Measurement Techniques in Confluency of Mesenchymal Stem Cells

The quality of therapeutic cells in regenerative medicine is extremely important from a safety perspective. Currently, cell quality control relies on manual work involving subjective judgment by skilled personnel through microscopic observation, posing challenges in evaluation efficiency and quality stabilization. By using image automatic recognition AI, it is expected to objectively and quantitatively measure cell viability, proliferation rate, and functionality, thereby improving the safety and effectiveness of regenerative medicine through more reproducible quality control. Additionally, AI can efficiently manage and share information related to cell quality. Furthermore, automation of the production process is expected to improve production efficiency and enable mass production. However, ICT implementation involves high costs. The introduction of equipment and system development can be expensive, potentially leading to high costs. Considering these challenges, the study conducted the establishment of cloud-based network technology for cell growth prediction and visualization methods, as well as verification related to the quantification of regenerative medicine cells.

Chapter 3: Emotional Features of Short Conversations between a Generative AI-Controlled Virtual Communication Trainer and Four Children

In recent years, the number of cases in pediatric psychiatry with developmental disabilities and communication disorders has been increasing, becoming a social issue. While there is a hypothesis about the etiology of the internet society, chat-type generative AI, which emerged with the development of machine learning technology, is hypothesized to contribute to communication training. In this study, a prototype tablet PC system was developed that displays dialogue with ChatGPT through the voice and expressions of a 3D moving boy avatar using the free application “VRoid Studio.” For evaluation, qualitative emotion evaluation was conducted using Google BERT. The results showed that the AI avatar tended to respond significantly faster than children, and children tended to take longer to respond in expressing neutral emotions compared to positive emotions, which was not observed in the AI avatar. These results indicate important improvement requirements for the development of an AI avatar and child interaction system that fosters socio-emotional humanity.

Chapter 4: Design of a Conversational Voice Visualization System in Alerting an Interlocutor’s Elevated Heart Rate Using Chat-Type Generative AI

In Chapter 3, we aim to develop support technologies for the treatment of intractable developmental disorders through a generative AI communication therapy application.

Considering the coexistence of adjustment disorders and emotional disorders in developmental disabilities, we attempted to expand the functionality of the current prototype based on biosensing that reflects changes in psychological states. Specifically, we focused on heart rate, an indicator known for its dependency on negative psychological dynamics such as tension. We developed a prototype application that intervenes in conversations when the heart rate exceeds tachycardia (100 bpm) and informs the user of their heart rate to help alleviate tension. Based on the prototypes and verifications referencing the fields of regenerative cell medicine and communication therapy, we confirmed the potential for advanced interactive product management systems and the scalability of treatment for intractable diseases by combining image recognition AI, generative AI, and physiological monitoring technologies according to the purpose. In future developments, which involve the quantitative analysis of human sensitivity evaluation—a task generally considered difficult in the field of machine development—we aim to realize applications that better guide individual interests and superior characteristics through interdisciplinary approaches based on neuroscience, such as concretely visualizing and sonifying dialogues with images, videos, and music, ultimately aiming for the essential well-being of humanity.

Terminology

Image Identification AI:

It is a technology that uses AI to discriminate and identify information in images. The information that can be identified by image identification AI is mainly classified into three types: "face", "character", and "object", and is used for various purposes. Image recognition AI uses "machine learning" to learn the patterns of pixels that make up a digital image, and "deep learning" to identify objects in an image.

Interactive Generative AI:

It is a technology that generates appropriate responses based on user input and uses natural language processing (NLP), machine learning, and deep learning algorithms. Conversational AI can manifest itself in the form of chatbots, virtual assistants, and other forms to seamlessly interact with users.

Mesenchymal stem cells (MSCs):

Mesenchymal stem cells (MSCs) are one of the stem cells (stem cells) that exist in adults and have the ability to differentiate into mesoderm-derived tissues such as bone, cartilage, blood vessels, and cardiomyocytes. In recent years, it has been reported that it differentiates into neurons and glial cells derived from the ectoderm (which have functions such as supporting nerve cells) and hepatocytes derived from the endoderm.

ChatGPT:

ChatGPT is a text-generating AI developed by OpenAI in the United States. It is a large language model based on a neural network called GPT, which has many parameters and can perform a variety of natural language processing tasks, such as generating sentences like a human.

Google BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers):

BERT is an innovative natural language processing technology developed by Google. By learning two-way linguistic expressions that take into account both sides of the context, more precise language understanding is realized. This technology has been applied in various fields such as search engines and chatbots, and has achieved great results.

目 次

要 旨.....	2
用語説明	5
Abstract	6
Terminology.....	9
第一章 序論.....	12
1-1 背景と目的	12
1-2 研究の意義	15
1-3 2つの中核技術 AIの原理	15
1-3-1 画像識別 AI	15
1-3-2 画像認識&ディープラーニング	16
1-3-3 CNN 概要	16
1-3-4 CNN 構造	17
1-4 会話型生成 AI	17
1-5 生成 AI 複合型アプリケーション構想	18
第二章 「画像識別 AI を活用した再生医療細胞の成長予測」.....	19
2-1 序章	19
2-2 方法	21
2-2-1 方法1	21
2-2-2 方法2	22
2-2-3 方法3	23
2-2-3-1 「AiCELLEX」・CNN 再生医療細胞識別検証.....	23
2-2-3-2 細胞数増減率・コンフル率評価	26
2-2-3-3 CNN 細胞評価	28
2-3 結果	33
2-3-1 「AiCELLEX」・CNN 相関関係評価.....	33
2-3-2 コンフルエンシー評価相関分析.....	43
2-4 考察	46
第三章 「チャット型生成 AI を活用したコミュニケーション療育支援教材」.....	48
3-1 序章	48
3-2 方法・データ	51
3-2-1 クラウドチャット AI 3D アバターシステム	51
3-2-2 VRM3D モデル表情制御	52
3-2-3 パーソナライゼーション設定	53
3-2-4 アバター感情表現コマンド制御	54
3-2-5 IT 教育指導イベント・子ども遊び体験会.....	55

3-2-6	処理負荷量依存性評価と仮説される応答時間遅延.....	55
3-2-7	BERT・感情分析に基づく遅延応答時間比較.....	56
3-3	結果.....	56
3-3-1	アバター・子ども遅延応答時間比較.....	56
3-3-2	BERT・テキスト感情分析モデル混同行列.....	57
3-3-3	単語、感情予測、応答時間遅延データセット.....	58
3-3-4	遅延応答時間・単語数相関評価.....	60
3-3-5	感情依存的な遅延応答時間の影響の評価.....	61
3-4	考察.....	63
第四章	「第三章試作機器の生理心理モニタリング機能の拡張試作」.....	67
4-1	序章.....	68
4-2	方法.....	71
4-2-1	方法1.....	71
4-2-1-1	システム設計.....	71
4-2-1-2	会話例・サンプルコード.....	73
4-2-2	方法2.....	75
4-2-2-1	会話介入支援システム・プロトタイプ.....	76
4-2-2-2	音声質問時・心拍数測定.....	77
4-2-2-3	ヒートマップ可視化・統計解析.....	77
4-2-2-4	4質問への回答率.....	78
4-3	結果.....	78
4-3-1	音声会話・心拍数トレンドグラフ表示.....	78
4-3-2	DD・RV 比較 相関分析.....	80
4-3-2-1	DD 年齢層別・統計分析.....	80
4-3-2-2	DD 心拍変動特徴.....	80
4-3-2-3	DD 心拍数測定プローブ.....	80
4-3-2-4	DD 男性回答率.....	81
4-4	考察.....	83
第五章	結論.....	86
	参考文献.....	90
	謝辞.....	98
	補足資料.....	99

第一章 序論

1-1 背景と目的

「品質管理システムと、AI コミュニケーション支援ソフトの構築」

近年、人工知能の進化は目覚ましく、その応用範囲は急速に拡大している。特に、画像識別 AI と会話型生成 AI は、様々な分野で革新的な技術として注目されている。特に、この2年間の生成 AI の進化は予想をはるかに超えたスピードで進んでいる。現在の AI ブームに至るまでの第1次 AI ブームから第4次 AI ブームの変遷は (Figure 1) のとおりである¹⁻³。

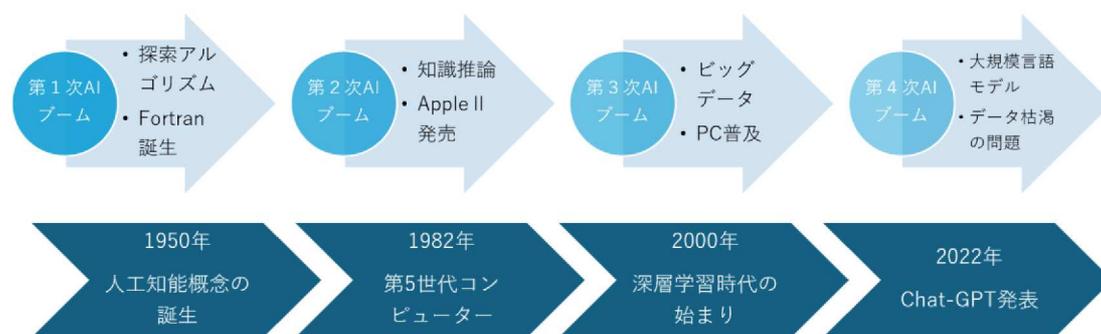


Figure 1. 第1次 AI ブーム～第4次 AI ブームの歴史

AI の進展は 1950 年代に始まり、いくつかのブームと停滞期を経てきた。第1次 AI ブームは推論と探索の時代であり、1956 年のダートマス会議で J. McCarthy が提唱した人工知能の概念が確立された。この時期の AI は「推論」と「探索」を中心に研究が進められたが、コンピュータの性能面での限界から実用化には至らず、次第に冬の時代を迎えた。

第2次 AI ブームは 1980 年代から 1990 年代にかけてであり、エキスパートシステムの登場により再び研究が活発化した。しかし、コンピュータの性能がまだ十分でなく、膨大なデータを処理することができなかったため、再び冬の時代を迎えた。

第3次 AI ブームは 2000 年代に始まり、インターネットの普及と共にデータ流通量が飛躍的に増加し、機械学習が進化した。特にディープラーニングの技術が発展し、画像認識や自然言語処理などの分野で AI が実用化され、社会に浸透していった。

2022 年からは生成 AI の急速な普及により、第 4 次 AI ブームが到来した。生成 AI はテキスト、画像、音声などを自律的に生成できる技術であり、OpenAI の ChatGPT の発表を契機に注目を集めた。ChatGPT は短期間で多くのユーザーを獲得し、生成 AI の可能性を示した。これにより、多くの企業が生成 AI の開発に参入し、世界的な開発競争が起こっている (Figure 2)。

主なサービス	提供技術
言語生成AI	
Chat-GPT/GPT-4 (OpenAI) Bard (Google) Bing Chat (Microsoft) Copilot (Microsoft)	<ul style="list-style-type: none"> ・文書作成 計算 要約 翻訳 知識発見 ・検索と組みあわせた対話的な文章作成 ・コード生成 提案 添削 プログラミング言語変換
動画生成AI	
StableDiffusion MidJourney Adobe Firefly Gen-2	<ul style="list-style-type: none"> ・画像生成 線画抽出 物体検出 ・動画作成
音生成AI	
MusicGen Synthesizer So-Vits-SVC	<ul style="list-style-type: none"> ・音楽 効果音の生成 作曲 ・声の変換 声の言語変換
その他	
—	<ul style="list-style-type: none"> ・3Dオブジェクト生成 ・分子構造生成 等

Figure 2. 主な生成 AI サービスの種類と提供技術

そこで、本研究では、以前は生物・人間・感情や心拍生理など、超複雑系情報をデジタル技術が扱うことは考えられていなかった医療分野の複数領域を対象とすることにより、大量多様な計算処理が可能となった IT 活用を第二章から第四章までの各医療分野の課題に具体的な拡張応用を試みることで、結果的に人間のウェルビーイングの達成を目指す事業の方向性を探った (Figure 3)。



Figure 3. 再生医療とコミュニケーション療育へのイノベーション要件提示

第二章で検証する画像識別 AI は、画像データから特定のオブジェクトやパターンを認識する能力を持ち、医療診断、監視システム、自動運転などに応用されている。一方、会話型生成 AI は、自然な対話を生成する能力を持ち、カスタマーサポート、教育、エンターテインメントなどで利用されている。本研究の目的は、これら二つの AI 技術を統合し、新たな応用技術を開発・検証することである。具体的には、画像識別 AI を活用した再生医療細胞品質管理システムと、会話型生成 AI を活用した発達障がい児向けのコミュニケーション支援ソフトを構築し、その有効性と実用性を評価する。

第三章で検証する生成 AI は、ユーザーが特別な調整やスキルを持たずとも、自然な言語で指示を出すだけで簡単に利用できる技術である。テキスト、画像、映像など多様な形式(マルチモーダル)のアウトプットが可能である。このブームの背景には、いくつかの要因がある。まず、ディープラーニングやトランスフォーマーモデルの開発・大規模化により、自然言語処理や画像生成などのタスクにおけるモデルの精度が飛躍的に向上したことが挙げられる。次に、膨大なデータを用いてトレーニングされた基盤モデル(Foundation Model)や大規模言語モデル(LLM)の登場により、新たなタスクに対応するための再トレーニングが不要となり、開発や利用が大幅に容易化された。これにより、AI がより複雑なタスクをこなせるようになり、その有用性が広く認知された。さらに、クラウドコンピューティングの発展や GPU の進化により計算資源が拡充され、ソースコードの公開(オープンソース化)により AI の開発や利用が一般の開発者や企業にも開かれたことも一因である。また、使いやすいユーザーインターフェース(UI)や API(Application Programming Interface)の提供により、AI との対話がより身近なものとなり、AI を利用して情報を取得したりタスクを実行したりする際に、より直感的で使いやすい方法が提供された。高い汎用性・マルチモーダル機能を通じて、AI が単一のタスクに限定されず、様々なデータ形式や入力に対応し、多様なタスクを同時に処理できるようになったことで、その有用性が一層高まった。また、人間の意図・価値観に合わせて AI を振る舞わせる仕組み(AI アライメント)の取り組みが進んだことも挙げられる。AI が人間と協調して働く環境が整い、多くの業界で AI の導入が促進された。

本研究の目的は、これら二つの AI 技術を統合し、新たな応用技術を開発・検証することである。具体的には、画像識別 AI を活用した再生医療細胞品質管理システムと、会話型生成 AI を活用した発達障がい児向けのコミュニケーション支援ソフトを構築し、その有効性と実用性を評価する。

1-2 研究の意義

「IT 技術活用による医工技術開発の加速化」

画像識別 AI と会話型生成 AI の統合は、従来のシステムでは実現できなかった新たな機能を提供する可能性がある。例えば、再生医療分野では、画像診断技術を用いて細胞の品質管理を自動化することで、高品質な細胞の安定供給が可能となり、安全性やコストの面での向上が期待される。また、教育分野では、発達障がい児向けのインタラクティブな学習支援システムが実現すれば、学習者の理解度向上と個別指導の効率化が期待される。再生医療において、細胞の品質管理は非常に重要である。高品質な細胞を安定的に供給するためには、細胞の状態を正確に評価し、適切に管理する必要がある。画像識別 AI は、顕微鏡画像を解析し、細胞の形態や状態を自動的に識別する能力を持っている。これにより、従来の手作業による評価に比べて、精度と効率が大幅に向上する。発達障がい児に対する療育支援は、個別のニーズに応じたアプローチが求められる。会話型生成 AI は、自然な対話を通じて学習支援や心理的サポートを提供する能力を持っている。さらに、生体認証センサー(例:心拍数センサー)を組み合わせることで、子どもの心理的な感情や気持ちを定量化し、より適切な支援を行うことが可能である。

1-3 2つの中核技術 AI の原理

本研究では、以下の手順で画像識別 AI と会話型生成 AI の統合システムを開発・検証する。

1-3-1 画像識別 AI

画像認識技術は、デジタル画像を分析して特定のパターン、オブジェクト、または情報を検知し理解するプロセスである。画像認識は、日常のスマートフォンのカメラアプリから医療、自動運転車、セキュリティシステムに至るまで、様々な分野で革新的な変化をもたらしている³。

画像認識のプロセスでは、対象となる画像から以下のような特徴を抽出する。

- エッジ(物体の境界線)
- 色(色相、彩度、明度)

- テクスチャ(表面の質感や模様)
- 形状(物体の形や大きさ)

これらの特徴をもとに、画像認識 AI は以下のようなタスクを行う。

- 分類(画像が属するカテゴリを決定する)
- 物体検出(画像内の特定の物体の位置を特定する)
- セグメンテーション(画像を意味のある領域に分割する)

1-3-2 画像認識&ディープラーニング

ディープラーニング(深層学習)は、多層のニューラルネットワークを用いて画像認識タスクを実行する AI 技術のサブフィールドである。多層のニューラルネットワークを用いて画像認識タスクを実行する。

ディープラーニングでは、複数の層を通じてデータが処理され、各層は入力データからより複雑な特徴を段階的に抽出する役割を担う。初期層はエッジやシンプルなテクスチャの識別に焦点を当て、より深い層ではこれらの初期特徴を組み合わせることでより高度な表現を学習する。畳み込みニューラルネットワーク(CNN)は、ディープラーニングアルゴリズムの代表的な例である。CNN は特に画像分析において強力であり、以下のような多様なアプリケーションで効果を発揮している。

- 自動運転車の障害物検出
- 医療画像分析(再生医療細胞品質、がんの診断、脳腫瘍の分類など)
- 顔認識システム(セキュリティ、エンターテインメントなど)

1-3-3 CNN 概要

CNN は、人の脳神経を模した「ニューラルネットワーク」の一種である。ニューラルネットワークは通常 3 層程度で構成されているが、さらに多くの層(深い層)から構成されるものが「ディープニューラルネットワーク」であり、CNN はディープニューラルネットワークの一つである。CNN の主な処理が畳み込み層を用いた空間フィルタリングであることから、「畳み込みニューラルネットワーク」と呼ばれている⁴。CNN は主に画像認識の分野で活用されており、そのなかでも「一般物体認識」と呼ばれる画像認識のタスクにおいて優れた性能を発揮することから注目されている。

1-3-4 CNN 構造

CNN は次の構造で成り立っている。1. 畳み込み層 2. プーリング層 3. 全結合層である。元の画像データを畳み込みフィルターに入れて、特徴を際立たせ、プーリング層で局所領域の特徴を割り出す。畳み込み処理・プーリング処理を何回か繰り返し得られた特徴を全結合層と接続して活性化関数を使って(ReLU 関数など)分類。活性化関数(ソフトマックス関数など)を用いて出力する。損失関数(クロスエントロピーなど)を使って誤差逆伝播によりフィルター、重み、バイアスを更新する。ドロップアウト層などを入れて、過学習対策など行うケースもある。

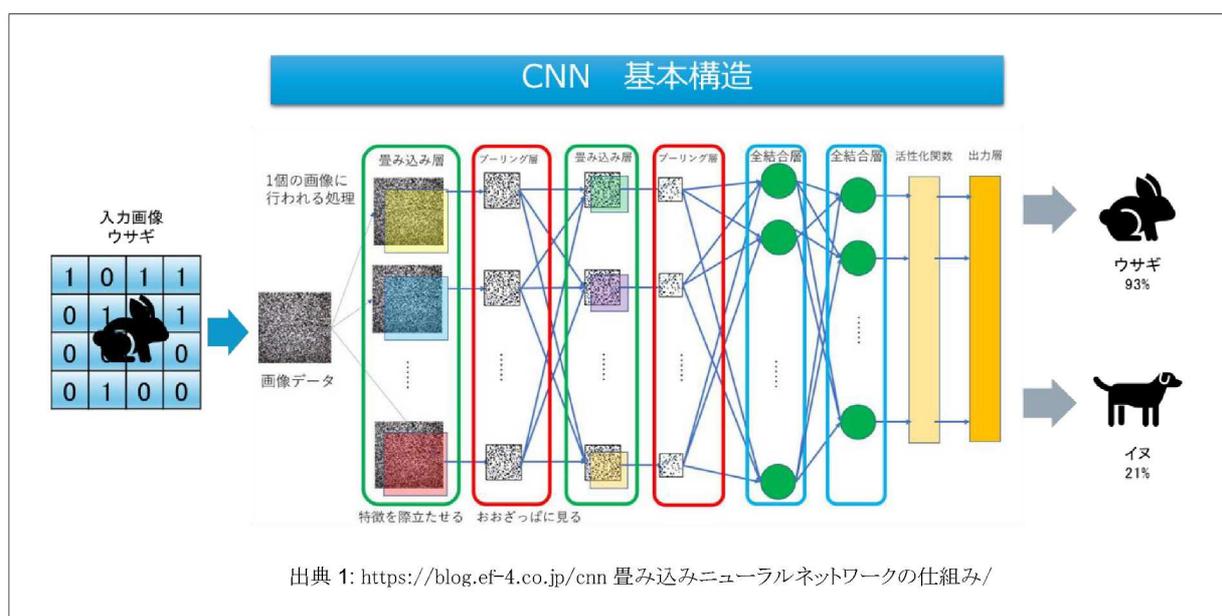


Figure 4.CNN 基本構造

1-4 会話型生成 AI

大規模言語モデル(LLM)を基に、自然な対話を生成するモデルを構築する。使用するツールとしては、Chat-GPT や LLaMA などが挙げられる。

- **データ収集:** 発達障がい児の対話データと生体認証データ(例:心拍数データ)を収集する。
- **モデルのトレーニング:** 収集したデータを用いて、大規模言語モデル(例:Chat-GPT)をトレーニングする。
- **モデルの評価:** トレーニングしたモデルの応答の自然さや正確さを評価し、必要に応じてファインチューニングを行う。

- **システムの統合:** 会話型生成 AI と生体認証センサーを統合し、リアルタイムで子どもの心理状態を評価しながら対話を行うシステムを構築する。

生成 AI には目的・機能に応じて、カテゴリごとに分類される (Figure 5)。

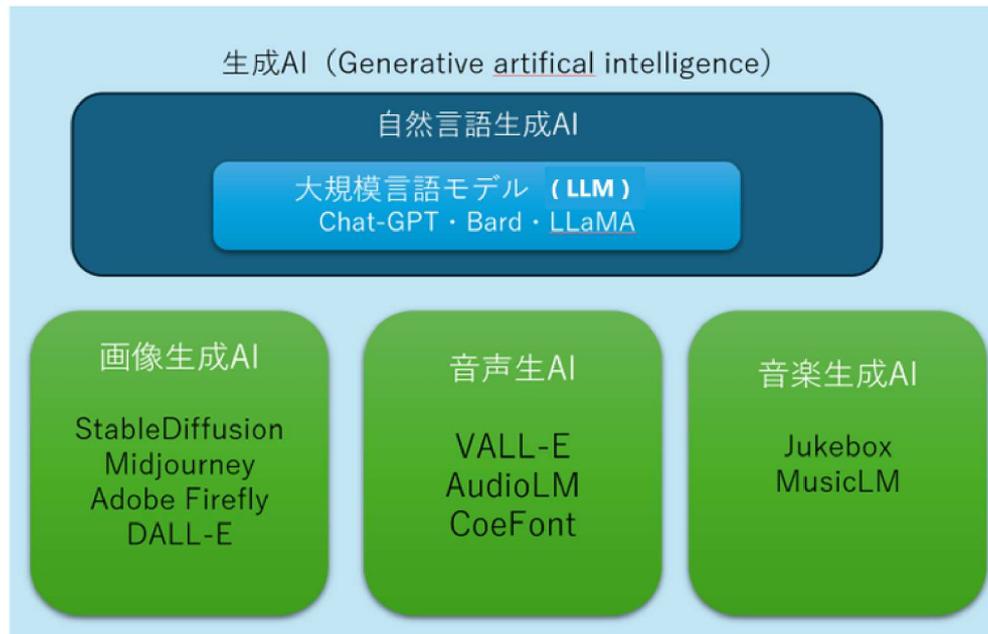


Figure 5. 生成 AI の種類

1-5 生成 AI 複合型アプリケーション構想

画像識別 AI と会話型生成 AI を統合し、インタラクティブな応用システムを模索する (Figure 6)。Hugging Face Transformers や Azure Cognitive Services を利用して統合を行う。

- **インターフェース設計:** 画像識別 AI と会話型生成 AI を統合するためのユーザーインターフェースの設計を行う。例えば、ウェブアプリケーションやモバイルアプリケーションを開発が可能になる。

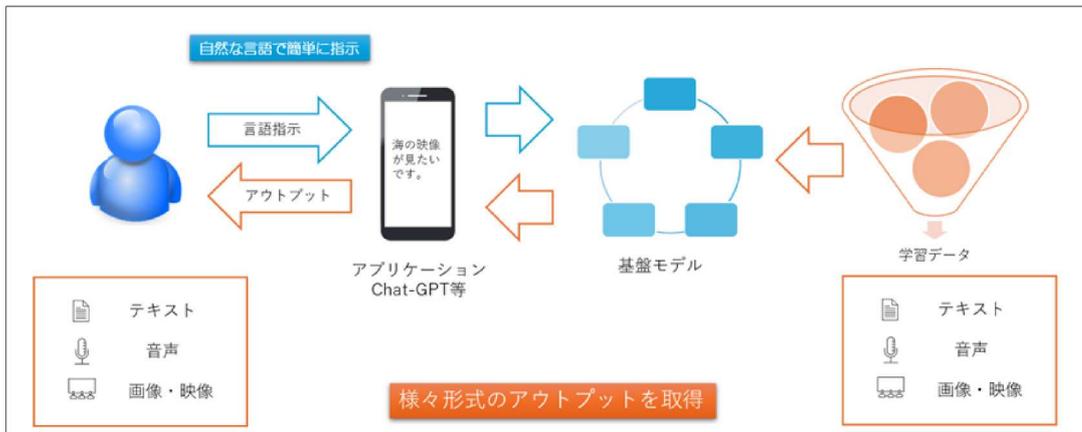


Figure 6. 生成AI複合型アプリケーション構想

第二章 「画像識別 AI を活用した再生医療細胞の成長予測」

再生医療分野において治療用細胞の品質管理が不足すると、安全性の面での脅威となるため、品質評価の安定化や時短に対するニーズは高い。現状では、細胞の品質管理が熟練者による顕微鏡観察下の目視作業で行われており、評価の効率性・品質面の両面で課題がある。その解決として、再生医療細胞の評価系をICT化することで、より多様かつ広範なデータベースに基づき細胞の生存率や増殖率、機能性などを定量的に予測することができるようになる。そして、より良質な細胞の準備が可能になり、再生医療の安全性や有効性が向上することが期待される。

ICT化とAI活用により、データの理の簡単化で、再生医療細胞の情報を効率的に管理し、品質情報を容易に共有することができる、生産プロセスの自動化が可能になる。これにより、生産効率が向上し、必要な品質・量の生産確保が可能になることが期待される。ICT化のデメリットには、設備導入やシステム開発の高コストが挙げられる。また、高ICT化に伴う情報セキュリティに関して、データ漏洩による患者のプライバシー流出のリスクや悪意のある攻撃から守る高度なセキュリティ対策が必要となる。ICT化によるデータ収集力やAI解析の高度化が相乗的に必要となるだろう。これらの課題を踏まえて、再生医療細胞品質管理システム「AiCELLEX」の開発及び再生医療細胞(間葉系幹細胞)定量化における検証を報告する。

2-1 序章

損傷や機能不全に陥った組織・器官を、多分化能を備えた幹細胞の分化誘導・制御により新たに作り出し置き換えたり増やしたりすることで治療する再生医療は、未来

型医療技術として脚光を浴び、期待されている^{5,6}。その実現の中核となる幹細胞には、出産時の限られたときにしか得ることができない臍帯血幹細胞⁷や、遺伝子制御により多分化能獲得へと操作するiPS細胞⁸などがあるが発ガンリスクや非自己由来の場合の免疫系拒絶などのリスクがある⁹。一方、成体にも多分化能を備えた細胞として骨髄や脂肪細胞にも存在することが知られている間葉系幹細胞は細胞分裂して増殖する能力(増殖能)が非常に高いことが知られている¹⁰⁻¹²。この間葉系幹細胞はひとつの系統の細胞だけではなく中胚葉由来の組織である骨や軟骨、血管、心筋細胞に分化できる能力をもつ細胞で、さらには、近年では、外胚葉由来の神経細胞やグリア細胞(神経細胞を支持するなどの機能をもつ)、内胚葉由来の肝細胞にも分化できることが報告されている¹³⁻¹⁵。自己組織からの分化誘導が可能なることから¹⁶、再生医療の臨床的実現化が既に始まっている。間葉系幹細胞(MSC)の分化誘導制御の準備段階として増殖機能活性化の状態を適切に判断でき管理することがカギを担う¹⁷。培養中の接着細胞の増殖の状態を評価する指標のひとつとして、コンフルエンス(コンフル率)がある。培養技術者¹⁸が顕微鏡下で培養容器の接着面における培養細胞の細胞占有面積率を評価する方法で、コンフルエンスの時系列変化を計測判断し、培養操作の制御法を変更する手がかりとする。主に熟練したエキスパートの目視による検査が行われている¹⁹。コンフルエンスの評価に従い、細胞の増殖機能を診断し増殖効率への介入術を決定し、経代操作を行う²⁰。この技術における問題として、目視検査時に微生物やウイルスなどの混入が起こる可能性がある²¹。また、計測者による主観的目視検査が主流のため、定量性に欠ける可能性がある。

これらの問題を解決するために、機械の目でコンフル率自動分析し培養術介入を調整する装置の開発を目指した、コンフル率の培養細胞画像分析技術を試作した。最初に、間葉系幹細胞の10培養サンプルを対象に、細胞識別の検証として、人が光学顕微鏡を使用して撮影を行う。その細胞画像を丁寧に目視の細胞数カウントを行い科目視カウント細胞数に対する自動識別細胞数の正解率の確認を行った²²。次に、十分高い細胞識別正解率を確認できた自動計測技術の検証を、より多くの培養サンプルを対象にそのコンフル率定量データを得て、同検証画像に対する熟練エキスパートA・Bの2名、および、初心者エキスパートCの3名によりコンフル率の目視検査評価を行い、その評価結果を比較する検証実験を行った²³。

2-2 方法

2-2-1 方法1

株式会社アステック、幹細胞自動培養装置 CELLA i4.0 を利用し、開発研究者が継代されているヒト間葉系幹細胞を一般的な増殖培養する培養液やトリプシン、PBS、実験プロトコルにより5日間に渡る細胞培養されたヒト間葉系幹細胞の培養サンプルを経時的に明視野顕微鏡で撮影した画像 10 枚の、元画像を 2 値化して白と黒の画像にラベリング処理にて細胞の数をカウントした。細胞培養画像 10 枚 (Figure 7) を対象とする人および自動識別定量アプリケーションが計測した細胞数の比較予備検討結果を (Table 1) に纏め信頼性を確認した。

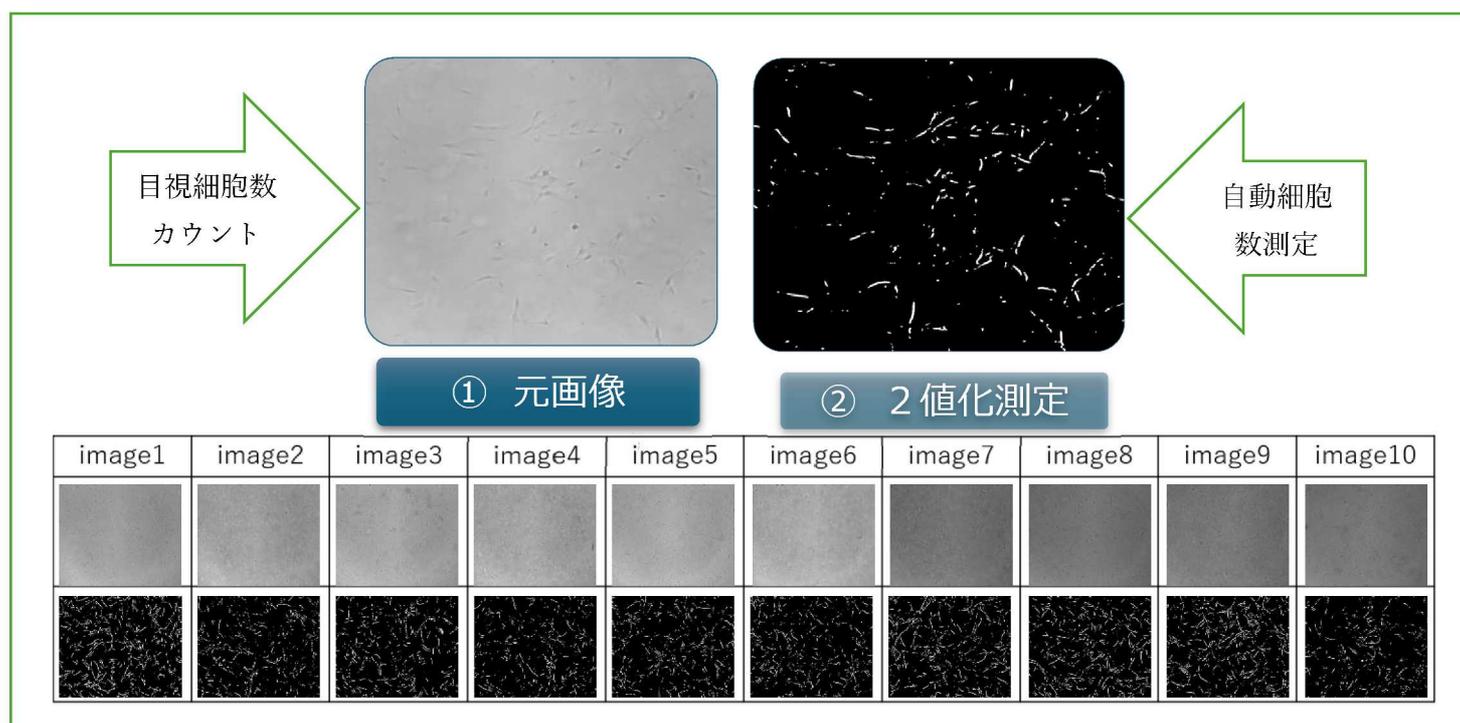


Figure 7. 10 枚の元画像と2値化画像

Table 1. 細胞数精度の評価

count result			
sample	manual	Machine	precision
image1	350	336	96.00%
image2	280	270	96.40%
image3	257	249	96.90%
image4	254	248	97.60%
image5	264	258	97.70%
image6	254	244	96.10%
image7	325	323	99.40%
image8	311	308	99.00%
image9	342	346	100.00%
image10	247	243	98.40%
		average	97.80%

* 平均精度: Adjusted Precision = $\min(|\text{Precision}|, 100)$

$$\text{Average Precision} = \frac{\sum \text{Adjusted Precision}}{N}$$

2-2-2 方法2

画像処理に基づく細胞数およびコンフル率定量の自動細胞識別アプリケーションについて述べる。フィルター処理(照明むら補正、背景ノイズ除去)、2値化、ラベリングの処理を OpenCV ベースに Python にて実行するアプリケーションを試作した(特願 2022-137645 のアルゴリズム)。間葉系幹細胞(MSC)の目視による一般的なコンフル率の算出手順は、下記に定義したコンフル率(confluency)として表される。

$$\text{*コンフル率(\%)} = (\text{一細胞面積平均}) \times (\text{細胞数}) \div \text{トータルエリア}(\text{cm}^2) \times 100$$

この方法で算出されたコンフル率は、一般的には視覚的な目安として使用される。ただし、観察者の主観的な判断に依存するため、熟練者によって行われているが正確性には限界がある。

株式会社アステックの幹細胞自動培養装置 CELLA i4.0 を利用し、開発研究者が継代しているヒト間葉系幹細胞を一般的な増殖培養用の培養液やトリプシン PBS、実験プロトコルに従い、5 日間にわたって培養した。これらのヒト間葉系幹細胞の培養サンプルを経時的に明視野顕微鏡で撮影した JPEG 画像 32 枚 (Figure 8) を使用し、32 細胞培養画像を対象に、人および自動識別定量アプリケーションが計測した細胞数の結果を Table2 にまとめた。2 名の熟練者が 32 枚の同一画像を対象に、コンフル率

目視評価を0%~100%を5%間隔で評価した。自動識別による評価値を横軸、人の評価値を縦軸とする散布図を作成し、双方間の相関性をモデルとみなして、y切片値を0と置く線形回帰直線の導出と相関係数二乗値を得て評価した。

Expert A・Expert B・Beginner C は(1)のオリジナル画像を目視でコンプレクシー評価を行った。

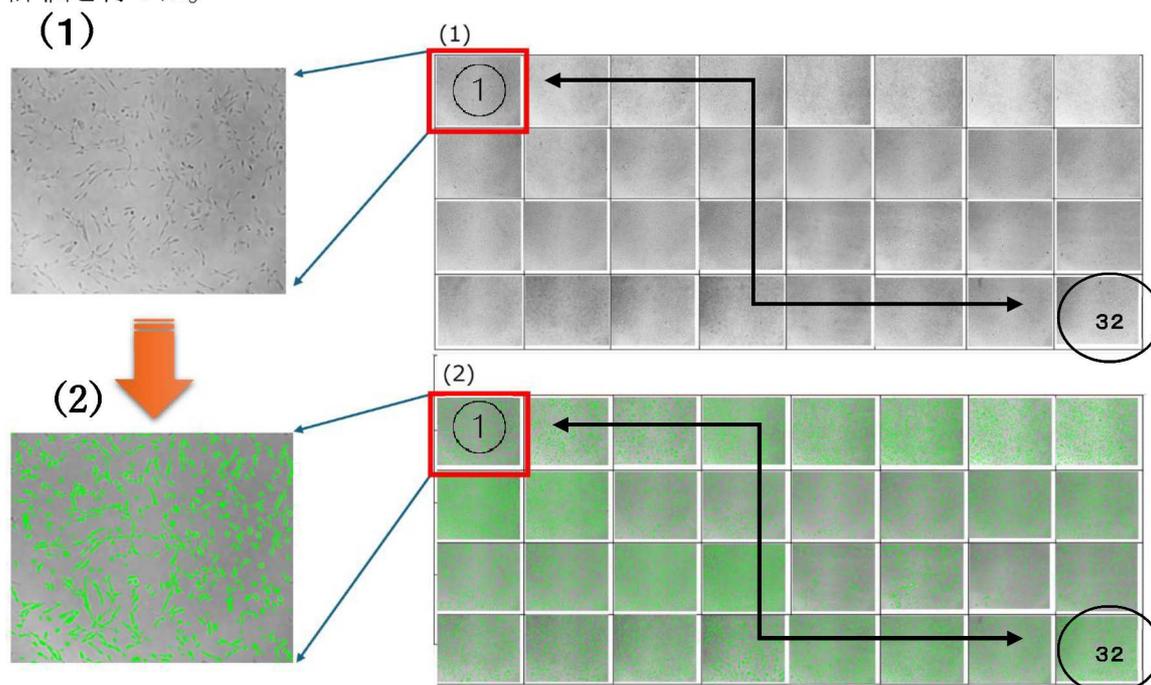


Figure 8. (1) オリジナル画像 32 枚 (2) 2 値化画像 32 枚

2-2-3 方法3

2-2-3-1 「AiCELLEX」・CNN 再生医療細胞識別検証

株式会社 AiCELLEX の再生医療細胞品質管理システム「AiCELLEX」を使用し、2値化処理による細胞数と AiCELLEX の出力するコンフル率(コンフル率($\%$)= (一細胞面積平均) \times (細胞数) \div トータルエリア(cm^2) \times 100)を取得し細胞数とコンフル率との相関を評価した。

2値化画像処理 & 定量ソフト「AiCELLEX」により、時系列ごとの画像を一括して UPLOAD し 1 画面内の細胞すべての形状データを計測し 15 の形状指標(Table 2)を算出した。そのデータを基に 1 画像ごとの平均形状指標データ 15 種と 15 の標準偏差指標を求め、計 30 種指標のヒートマップ解析(Figure 16)のデータベースとした。

Table 2. 細胞形状特性の 15 指標解説

NO.	項目名 (J)	項目名 (E)	出力DATA例	解説
DATA	プロジェクト名	project_name	CELL_A	実験全体をプロジェクトとして位置付け、プロジェクトとして一義に特定できる情報を記載（実施時期、研究プロジェクトの目標、研究実施者の情報を記載すると有効）
	サンプル名	sample_name	MSC_P2_GM	プロジェクトの中で、解析対象画像を一義に特定できる情報を記載（細胞種、細胞培養情報などを記載すると有効）
	セルタイプ	celltype_name	MSC01	画像処理のために選択した画像処理フィルター（細胞認識処理）の種類
	経過時間	elapsed_time	24	経時的な撮影を行った場合の時間間隔（日、時、分など間隔を記載。後に経時解析を行う際、共通する経時画像をサンプル間から抽出する際に重要となる情報）
	タイリング 行	tiling_position_row	3	1容器内をタイリング撮影した場合のアップロード画像集団の構成枚数（タイリングを構成する縦方向の枚数） 例：縦3枚×横2枚＝6枚で構成されるタイリングの場合は「2」
	タイリング 桁	tiling_position_column	3	1容器内をタイリング撮影した場合のアップロード画像集団の構成枚数（タイリングを構成する横方向の枚数） 例：縦3枚×横2枚＝6枚で構成されるタイリングの場合は「3」
	細胞ID	cell_number	5	1枚の画像中で認識した各細胞に付与されたラベルID
1	面積	area	200	1枚の画像中で認識した1細胞面積の総ピクセル数
2	周囲長	perimeter	51	1枚の画像中で認識した1細胞の輪郭（背景と認識領域の境界線）のピクセル数
3	輪郭のなめらかさ	compactness	13.005	1枚の画像中で認識した1細胞の輪郭の凹凸度 定義式： $(\text{perimeter})^2 / (\text{area})$ (輪郭が突起のように進展した場合、大きく算出されるスコア)
4	長さ	length	10.81665421	1枚の画像中で認識した1細胞を囲む長方形の長軸のピクセル数
5	幅	width	22.46535873	1枚の画像中で認識した1細胞を囲む長方形の短軸のピクセル数
6	長さとの幅の比	length_width_ratio	0.48148148	1枚の画像中で認識した1細胞の細長さ 定義式： $\text{length} / \text{width}$ (紡錘形に細胞が進展した場合に大きく算出されるスコア)
7	円形度	shape_factor	0.965782391	1枚の画像中で認識した1細胞の丸さ度合い 定義式： $4 \pi (\text{area}) / (\text{perimeter})^2$ (0 → 1 (真円) で算出されるスコア)
8	内接円半径	inner_radius	4.62153925	1枚の画像中で認識した1細胞の重心を中心として、輪郭に接する内接円を描いた際の半径のピクセル数
9	周囲長と内接円半径の比	perimeter_inner_radius_ratio	11.03528441	1枚の画像中で認識した1細胞の輪郭複雑度 定義式： $(\text{perimeter}) / (\text{inner_radius})$ (細胞輪郭に変化が大きく、細胞面積に対して輪郭の突起や凹凸が大きいかほど大きく算出されるスコア)
10	テクスチャ指標1	correlation	0.79957602	1枚の画像中で認識した1細胞の模様情報（テクスチャ）を表現する濃共起行列 $\frac{\sum_{i,j} (i - \mu_i)(j - \mu_j)p(i, j)}{\sigma_i \sigma_j}$ ※画像の撮影ムラ・輝度ムラの影響を受けやすいので注意 参考URL： https://jp.mathworks.com/help/images/ref/graycoprops.html
11	テクスチャ指標2	energy	0.19236568	1枚の画像中で認識した1細胞の模様情報（テクスチャ）を表現する濃共起行列 $\sum_{i,j} p(i, j)^2$ ※画像の撮影ムラ・輝度ムラの影響を受けやすいので注意 参考URL： https://jp.mathworks.com/help/images/ref/graycoprops.html
12	テクスチャ指標3	homogeneity	0.58011266	1枚の画像中で認識した1細胞の模様情報（テクスチャ）を表現する濃共起行列 $\sum_{i,j} \frac{p(i, j)}{1 + i - j }$ ※画像の撮影ムラ・輝度ムラの影響を受けやすいので注意 参考URL： https://jp.mathworks.com/help/images/ref/graycoprops.html
13	輝度の標準偏差	intensity_sd	2.11848413	1枚の画像中で認識した1細胞を構成する全ピクセルにおける輝度の標準偏差
14	輝度の平均値	intensity_ave	105.455	1枚の画像中で認識した1細胞を構成する全ピクセルにおける輝度の平均値
15	輝度の変動係数	intensity_cv	0.02008899	1枚の画像中で認識した1細胞を構成する全ピクセルにおける輝度の変動係数 定義式： $(\text{intensity_sd}) / (\text{intensity_ave})$ (面積の異なる細胞の輝度情報を比較する際に利用するスコア)

細胞の形状特徴量を定量化し、細胞それぞれの測定指標データを視覚的に評価する単位の四角 30 個を並べたヒートマップ上の黄色と水色の表示について、標準偏差 +1に近いほど標準偏差値が高いことを示し黄色、標準偏差 -1は低いことを示し水色で Cell A・B・C の細胞ごとの時系列による変化ヒートマップ (Figure 9) を概観・定量することで、以降の解析アプローチを決定した。

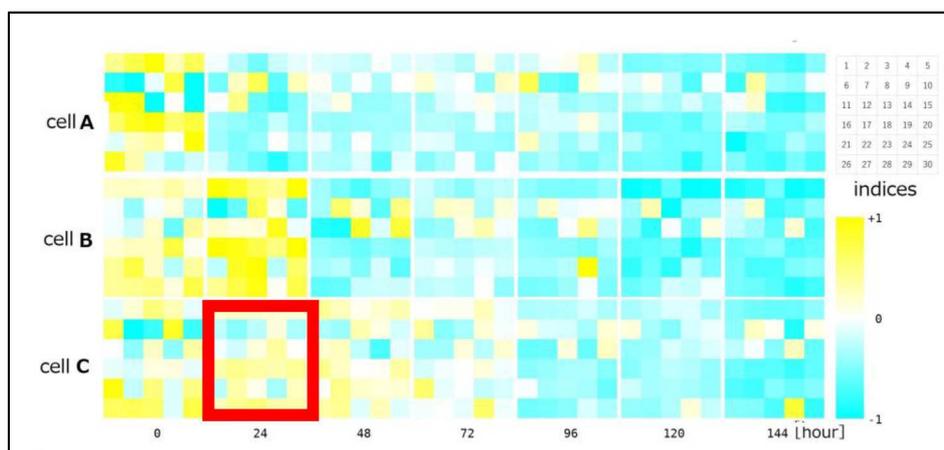


Figure 9. ヒートマップ可視化と PCA 分析による細胞形状特性の 30 指標

Table 3. ヒートマップ形状指標データ配置アドレス

	30 indices of cellular shape characterization by heatmap visualization and PCA processing.				
	1	2	3	4	5
1	mean_area	mean_perimeter	mean_compactness	mean_length	mean_width
2	mean_length_width_ratio	mean_shape_factor	mean_inner_radius	mean_perimeter_inner_radius_ratio	mean_correlation
3	mean_energy	mean_homogeneity	mean_intensity_sd	mean_intensity_ave	mean_intensity_cv
4	sd_area	sd_perimeter	sd_compactness	sd_length	sd_width
5	sd_length_width_ratio	sd_shape_factor	sd_inner_radius	sd_perimeter_inner_radius_ratio	sd_correlation
6	sd_energy	sd_homogeneity	sd_intensity_sd	sd_intensity_ave	sd_intensity_cv

2-2-3-2 細胞数増減率・コンフル率評価

時系列ごとの細胞数を 2 値化ラベリング処理により取得し増殖倍率を算出した。CNN の対象とした三つの細胞サンプルである Cell_A・B・Cそれぞれの時系列ごとのヒートマップ (Figure 9) 対象画像を2値化画像で視覚化し定量化した Figure 10.Figure 11.Figure 12 に、各サンプルの二値化処理済みイメージを元画像に重ね、24 時間ごとに 6 日間の推移を追跡した画像および各細胞数(上)・細胞面積総計の棒グラフを示す。

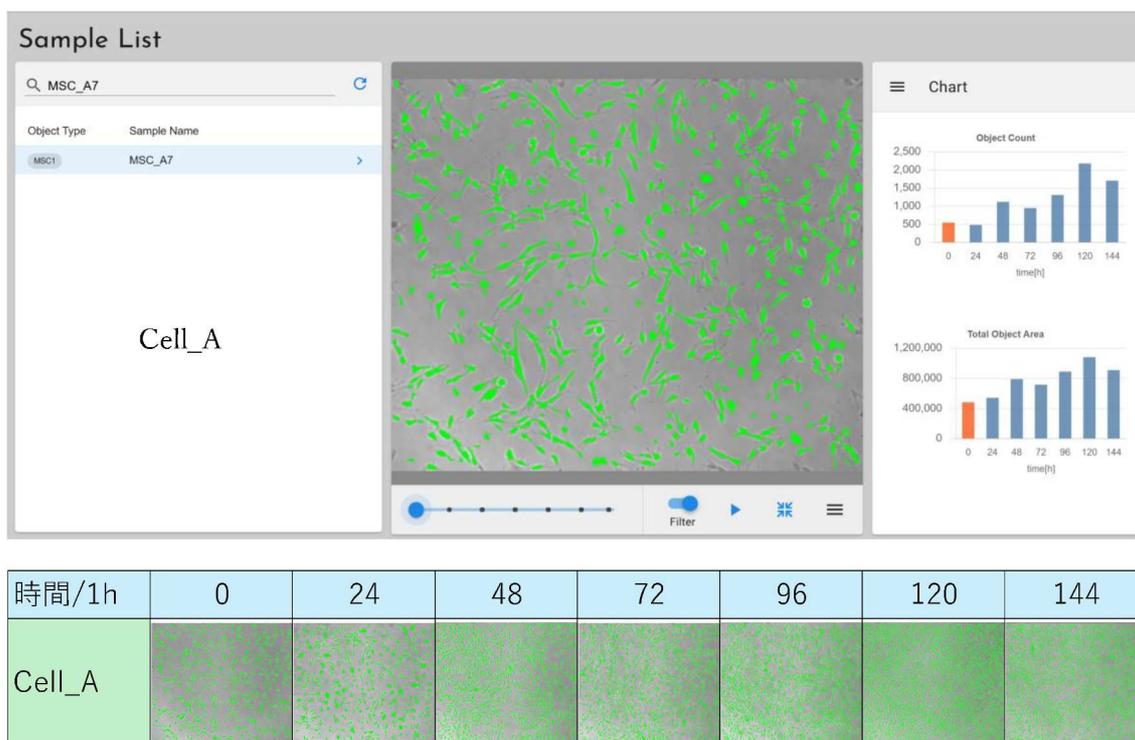


Figure 10. Cell_A 「AiCELLEX」細胞測定及び 24 時間ごとの時系列 2 値化画像

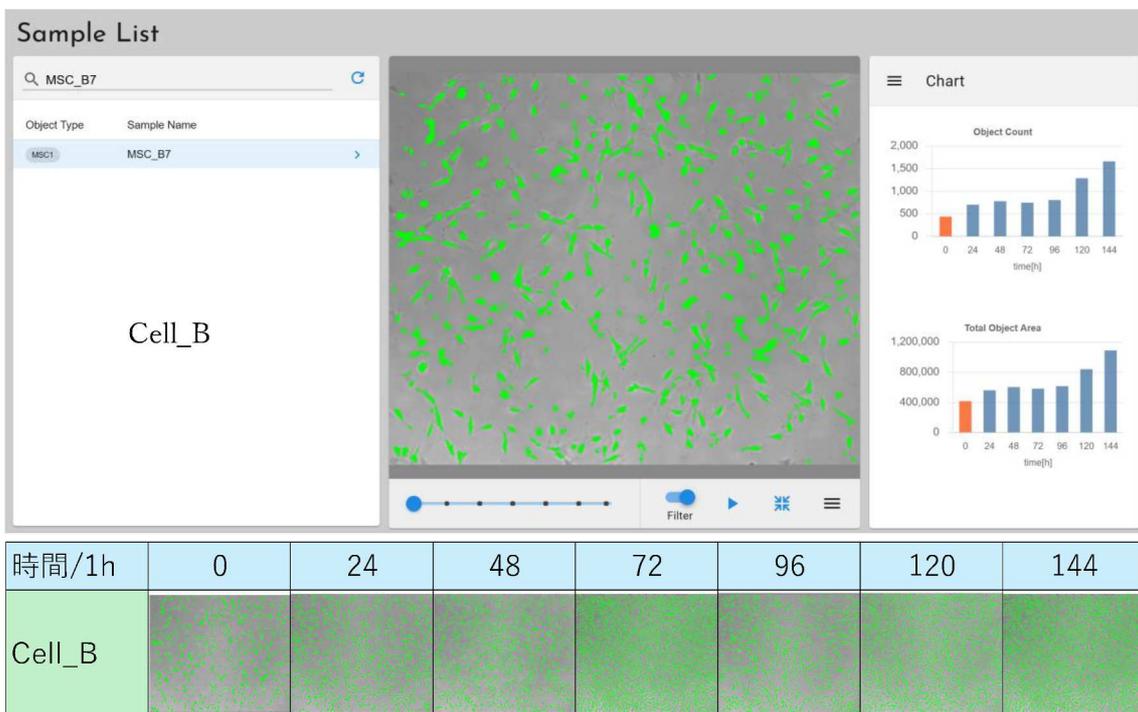


Figure 11. Cell_B 「AiCELLEX」細胞測定及び 24 時間ごとの時系列 2 値化画像

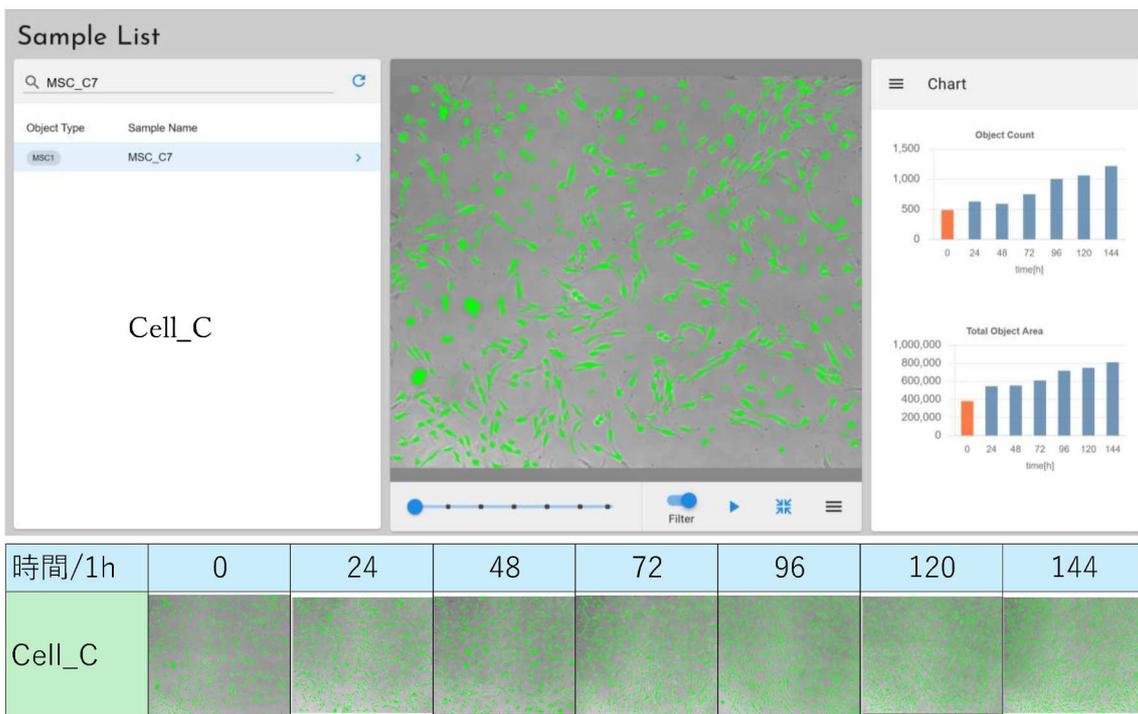


Figure 12. Cell_C 「AiCELLEX」細胞測定及び 24 時間ごとの時系列 2 値化画像

2-2-3-3 CNN 細胞評価

2 値化画像処理に基づき細胞数とコンフル率を求めている前述法に対し、さらなる精度向上を目的としてCNNによる細胞の判別評価を行った。2 値化画像処理 CNN の手法、すなわち 2 値化画像+CNN 学習による細胞評価である。本評価の特徴は、個々の細胞形状変化が微小なため、元のグレースケール画像による深層学習では変化が捉えにくく、前処理として2 値化画像に変換し、より特徴が際立つことを目的とした2 値化画像での学習手法とした。学習画像の枚数を取得するため、元画像から 256×256 サイズのスプリット画像を取得した (Figure 13)。CNN による画像振り分け評価が2 値画像処理ソフト「AiCELLEX」の出力するコンフル率との相関関係があるか検証を行い、これまでの2 値化画像処理のみの形状評価に CNN が有効であるか検証をおこなった。2 値化細胞画像を使用することで、特徴がより顕著に表れ、大量の細胞画像を必要としない判別手法になる仮説をたて実験と評価を行った。

CNN 学習の前処理として1枚の元画像のスプリットおよび2 値化処理を行う。

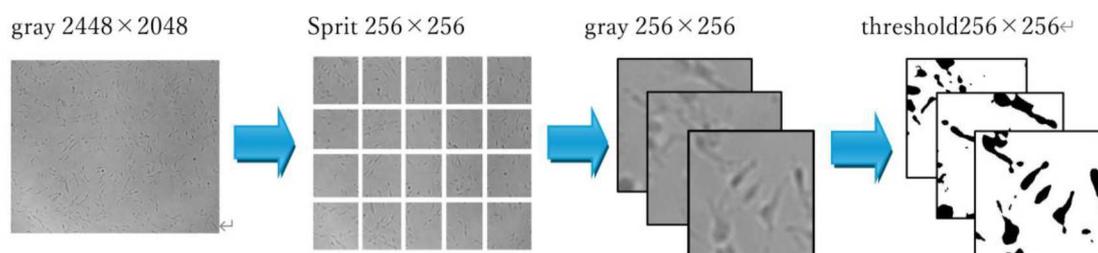


Figure 13. CNN 学習用画像作成前工程

学習画像課程は次の8項目の Protokol とした。

1. 2448×2048 ピクセルの画像から Sprit 処理により 256×256 ピクセル (72 枚) を抽出
2. gray 256×256 画像を threshold の値 30 に設定しすべての画像を2 値画像変換
3. 1 画像 72 枚に分割された画像を学習と評価に用いた。
4. training image 各 52 枚 test image 各 10 枚
5. 学習とテストには、class1 A1・B1・C1 画像 class7 A7・B7・C7 画像を使用
6. Class1 156 枚 training image Class7 156 枚 training image 合計 312 枚
7. Class1 30 枚 test image Class7 30 枚 test image 合計 60 枚
8. Class1 ~ Calss7 各72枚 Prediction 合計 504 枚

参考資料として、巻末に第 2 章 参考プログラムソース
1. 256×256 画像スプリットおよび 2 値化処理プログラム (Python 3.11.3)
を掲載した。

本研究の第 2 章 CNN 解析に用いたノート PC デバイス概要を以下に示す。

デバイス名	Sony VAIO VJS142C12N
プロセッサ	Intel(R) Core(TM) i7-10710U CPU @ 1.10GHz 1.61 GHz
実装 RAM	16.0 GB (15.8 GB 使用可能)
デバイス ID	E549CCA1-7374-4612-9EBD-E64CE1CF5D2F
プロダクト ID	00330-53195-13342-AAOEM
システムの種類	64 ビット オペレーティング システム、x64 ベース プロセッサ
エディション	Windows 11 Pro
バージョン	24H2

master_image 2448×2048	1	2	3	4	5	6	7
Cell_A_Gray							
Cell_B_Gray							
Cell_C_Gray							
Sprit_image 256×256	1	2	3	4	5	6	7
Cell_A_Gray							
Cell_B_Gray							
Cell_C_Gray							
Sprit_image 256×256	1	2	3	4	5	6	7
Cell_A_Binarized (Threshold 30)							
Cell_B_Binarized (Threshold 30)							
Cell_C_Binarized (Threshold 30)							
[hour]	0	24	48	72	96	120	144

Figure 14. CNN 学習用マスター画像・スプリット画像・2 値化画像

最上(水色)ブロックが、Cell A・B・Cの元画像である(Figure 14)。7時系列の3サンプル Cell A・B・C 元画像 21 枚を読み込み、オリジナルサイズのまま平坦化処理を行う。これにより画像全体の照明ムラをある程度除去する。中段(緑色)ブロックの 256×256 の画像サイズにスプリットを行う。さらに下段(桃色)ブロック 256×256 のサイズ画像で平坦化処理を行い、threshold の値 30 にて 2 値化画像に変換した、計 72×21=1512 枚の画像を取得した。

CNN 学習用のフォルダー構造を(Figure 15)に示す。補足資料の CNN 混同行列・Epoch プログラム (Python 3.11.3)の実施階層と同様である。Training_image ・ test_image ・ prediction フォルダーに class_1・class_7 のフォルダーを作成し目的の画像を保存する。Output2 フォルダーは、CNN 測定の終了した混同行列グラフ・EPOCH グラフ・EPOCH データが CSV で保存される仕様である。下記にディレクトリ構造を示す。

```
# 学習用画像ディレクトリ
training_directory = 'C:/ABC_image/dataset2/training_set'

# 検証用画像ディレクトリ
test_directory = 'C:/ABC_image/dataset2/test_set'

# 予測用画像ディレクトリ
predict_directory = 'C:/ABC_image/dataset2/prediction'

# ヒートマップ画像保存先ディレクトリ
save_plot_directory = 'C:/ABC_image/dataset2/output2'

# 学習画像サイズ縦
target_size_high = 256

# 学習画像サイズ横
target_size_width = 256

# エポック数
epochs = 35
```

Figure 15. CNN 学習用のフォルダー仕様 学習サイズ エポック数設定

```
# 学習用画像ディレクトリ
training directory = 'C:/ABC image/dataset2/training set'
    Class_1      A1・B1・C1 画像 各 52 枚 合計 156 枚
    Class_7      A7・B7・C7 画像 各 52 枚 合計156枚

# 検証用画像ディレクトリ
test directory = 'C:/ABC image/dataset2/test set'
    Class_1      A1・B1・C1 画像 各 10 枚 合計30 枚
    Class_7      A7・B7・C7 画像 各 10 枚 合計30 枚

# 予測用画像ディレクトリ
predict directory = 'C:/ABC image/dataset2/prediction'
```

```
Class_1      A1 画像 72 枚
Class_7      A1~7 画像 各 72 枚 測定時画像入れ替え評価測定
# ヒートマップ画像保存先ディレクトリ
save_plot_directory = 'C:/ABC_image/dataset2/output2'
                混同行列グラフ・EPOCH グラフ・EPOCHCSV ファイル
# 学習画像サイズ縦
target_size_hight = 256
# 学習画像サイズ横
target_size_width = 256
# エポック数
epochs = 35
```

使用アプリケーション

Visual Studio Code

バージョン: 1.96.2 (user setup)

コミット: fabdb6a30b49f79a7aba0f2ad9df9b399473380f

日付: 2024-12-19T10:22:47.216Z

Electron: 32.2.6

ElectronBuildId: 10629634

Chromium: 128.0.6613.186

Node.js: 20.18.1

V8: 12.8.374.38-electron.0

OS: Windows_NT x64 10.0.26100

Python 3.11.3

1 日目と 7 日目の両極端な画像の学習モデルを作ることにより、評価する画像がどちらの class 画像に照合しているか時系列ごとにシフトするのではないかという仮説を検証するためのモデルとした。CNN 計算として、1 日目を Class 1 と 7 日目を Class 7 とおいた学習用画像による学習後、テストデータにより 9 割以上で安定となるモデルを確認後、各日の予測 Prediction データで Class1 および Class7 に関する正解率の算出と、予測計算評価を横軸、正解を縦軸とする混同行列を得た。また、Class 7 の正解率の推移により細胞画像の各日の推移を Accuracy 値としてコンフル率との線形近似による相関性評価を行った。

2-3 結果

2-3-1 「AiCELLEX」・CNN 相関関係評価

細胞数とコンフル率の相関関係調べるために 2 値化画像処理ソフト「AiCELLEX」のラベリング画像処理にて得られた、細胞数(**Table 4**)とコンフル率(**Table 5**)の時系列を横軸にした散布図 (**Figure 18**) にプロットし可視化した。Cell_A、Cell_B、Cell_C の細胞数 (**Figure 16**) とコンフル率 (**Figure 17**) との相関関係を評価した。各細胞のデータを正規化し、線形近似式、正規相関係数、P 値を求めた。

Table 4. Cell_A・B・C 時系列による細胞数

Cell_count	1	2	3	4	5	6	7
Cell_A	543	478	1117	945	1305	2178	1702
Cell_B	433	696	774	742	800	1282	1656
Cell_C	485	625	589	747	1001	1215	1001

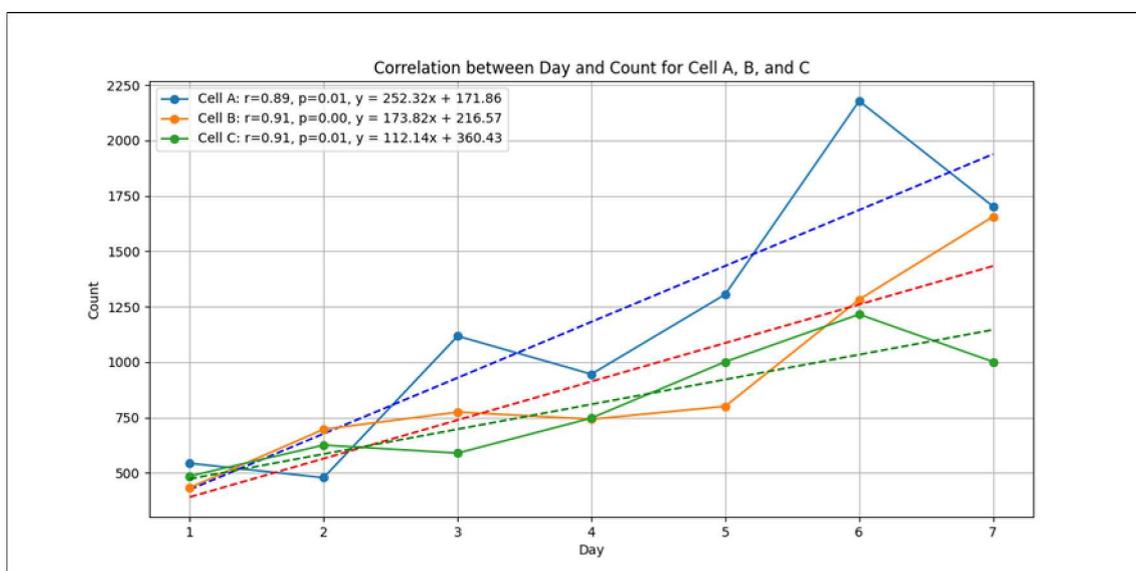


Figure 16. 時系列による細胞数と Cell_A・B・C の相関関係

Cell A は、時間が経過するにつれて細胞数は増加した。特に、5 日目から 6 日目の細胞数の増加が顕著であった。最初の 543 個から始まり、最終的には 1702 個に達した。細胞数の増加は有意に正の傾きを持つ直線的であり、成長の一貫性が見られた。Cell B は、時間が経過するにつれて細胞数は増加したが、Cell A ほどの急激な増加は見られなかった。最初の 433 個から始まり、最終的には 1656 個に達した。増加の途

中でやや停滞期が見られたが、5 日目以降に再び増加した。Cell C は、時間が経過するにつれて細胞数は増加したが、他のセルと比べると増加の幅は小さかった。最初の 485 個から始まり、最終的には 1001 個に達した。増加の途中で一度減少する時期が見られたが、その後再び増加した。Cell B のデータも時間の経過とともに細胞数が増加する傾向を示しているが、増加のペースは Cell A ほどではない。最終的には増加しているが、細胞の成長には時間がかかることが示唆される。Cell C のデータは、他のセルと比較して細胞数の増加が比較的小さいことを示している。途中で一度減少する時期が全細胞にみられ、特に Cell C はより抑制傾向が顕著に見られる。総じて、Cell A は他のセルに比べて増殖能力が高く、Cell B および Cell C は増殖において一定の抑制を示す増殖率の差異を得た。

Table 5. Cell_A・B・C の時系列によるコンフル率

AiCELLEX_Confluency (%)	1	2	3	4	5	6	7
Cell_A	9.584	10.765	15.696	14.232	17.697	21.512	18.103
Cell_B	8.218	11.120	11.973	11.558	12.201	16.705	21.681
Cell_C	7.556	10.851	11.016	12.116	14.269	14.927	16.132

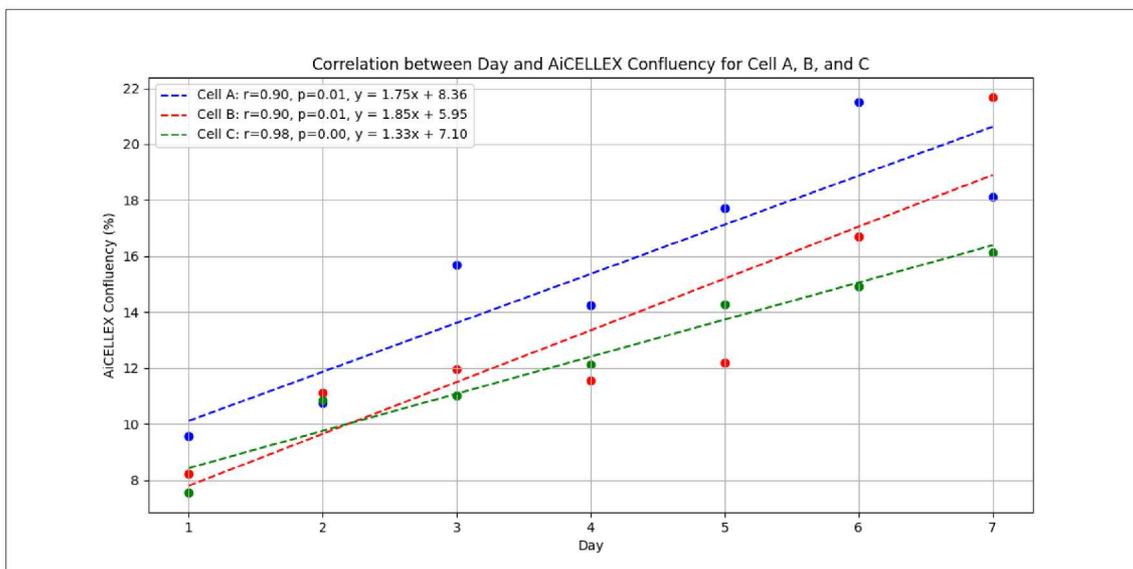


Figure 17. 時系列によるコンフル率と Cell A・B・C の相関関係

次に、同じく時系列を横軸としたコンフル率を縦軸とする **Figure 17** において、Cell A は、コンフル率は時間の経過とともに増加し、特に 5 日目以降の増加が顕著であった。初期値は 9.584%で、6 日目で最大の 21.512%に達した。その後 7 日目で 18.103%に減少した。コンフル率の増加はほぼ一貫しており、成長の一貫性が見られた。Cell B は、コンフル率も時間の経過とともに増加したが、増加のペースは Cell A ほどではな

かった。初期値は 8.218%で、7 日目で最大の 21.681%に達した。増加の途中でやや停滞期が見られたが、6 日目以降に再び増加した。Cell C は、コンフル率は時間の経過とともに増加したが、他のセルと比べると増加の幅は小さかった。初期値は 7.556%で、7 日目で 16.132%に達した。増加の途中で一度減少する時期が見られたが、その後再び増加した。Cell A のデータは、時間の経過とともにコンフル率が一貫して増加することを示している。特に 5 日目以降の増加が顕著であり、細胞の成長が活発化していることが示唆される。Cell A のデータは、時間の経過とともにコンフル率が最終日を除き概ね増加することを示している。特に 5 日目以降の増加が顕著であり、細胞の成長が活発化していることが示唆される。Cell B のデータも時間の経過とともにコンフル率が増加することを示しているが、増加のペースは Cell A ほどではない。最終的には増加しているが、細胞の成長には時間がかかることが示唆される。Cell C のデータは、他のセルと比較してコンフル率の増加が比較的小さいことを示している。総じて、Cell A は他のセルに比べて増殖能力が高く、Cell B および Cell C は相対的に増殖能力が劣位であることが示唆された。

Table 6. AiCELLEX による細胞数とコンフル率

Cell_count/Day	1	2	3	4	5	6	7
Cell_A	543	478	1117	945	1305	2178	1702
Cell_B	433	696	774	742	800	1282	1656
Cell_C	485	625	589	747	1001	1215	1001
Accuracy (%)							
Cell_A_class7	1.39	0.00	27.78	16.67	36.11	73.61	65.28
Cell_B_class7	0.00	5.56	15.28	12.5	8.33	47.22	73.61
Cell_C_class7	0.00	4.17	2.78	11.11	19.44	22.22	58.33

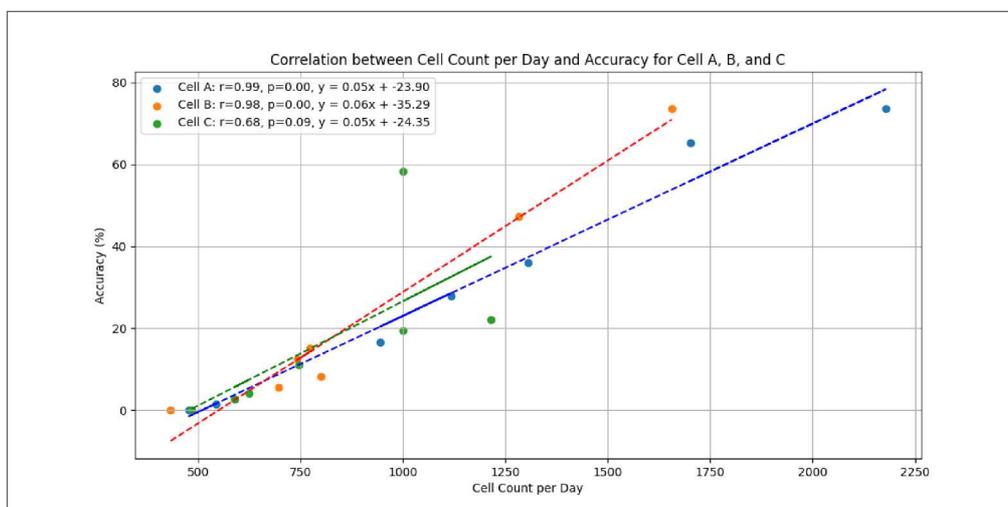


Figure 18. AiCELLEX による細胞数とコンフル率の相関関係

以上の細胞数およびコンフル率の測定結果を Table 6 に纏め、相関評価を Figure 18 の散布図において線形近似により行った。Cell_A の相関係数が 0.99 と非常に高く、P 値が 0.00 であることから、時間と Cell_A の間には非常に強い正の相関があることが示された。この結果は、時間が経過するにつれて Cell_A の Class 7 細胞の精度が向上することを意味する。時間と Cell_B の相関係数が 0.98、P 値が 0.00 であり、時間と Cell_B の間にも非常に強い正の相関が見られた。Cell C は、相関係数は 0.68、P 値は 0.09 である。細胞数とコンフル率の間には正の相関があり、細胞数が増加するにつれてコンフル率も増加する正相関基盤が強く示唆された。Cell A のデータは、細胞数とコンフル率の間に強い正の相関があることを示している。回帰方程式から、細胞数が増加するにつれてコンフル率も増加することが分かる。Cell B は他のセルに比べて一貫性が高く、細胞数の増加がコンフル率に大きく影響していることが明らかである。Cell A のデータも細胞数とコンフル率の間に正の相関があることを示しているが、Cell B ほど強くはない。細胞数の増加に伴いコンフル率も増加する傾向が確認されるが、変動が大きい可能性がある。Cell C のデータも細胞数とコンフル率の間に正の相関があることを示している。ただし、相関の強さは Cell A および Cell B よりも低い。以上の結果から、各 Cell において細胞数とコンフル率の間に正の相関が存在することが確認された。細胞数に対するコンフル率の効率においては、3 サンプルの中で Cell B がより優位であることが示唆された。

さらに、次頁より、1日目および7日目の細胞画像の機械学習、CNN で得られた算出モデルによる各日の画像を Class7 により予測したときの正解率を示す精度 Accuracy 値と、AiCELLEX が算出したコンフル率との相関性の評価を行った。

Table 7. Cell_A・B・C 細胞全体の判定精度

Overall Accuracy (%)	1	2	3	4	5	6	7
Cell_A	50.00	49.31	63.19	57.64	67.36	87.5	81.94
Cell_B	50.00	52.78	57.64	56.25	54.17	73.61	86.81
Cell_C	50.00	52.08	51.39	55.56	59.72	61.11	79.17

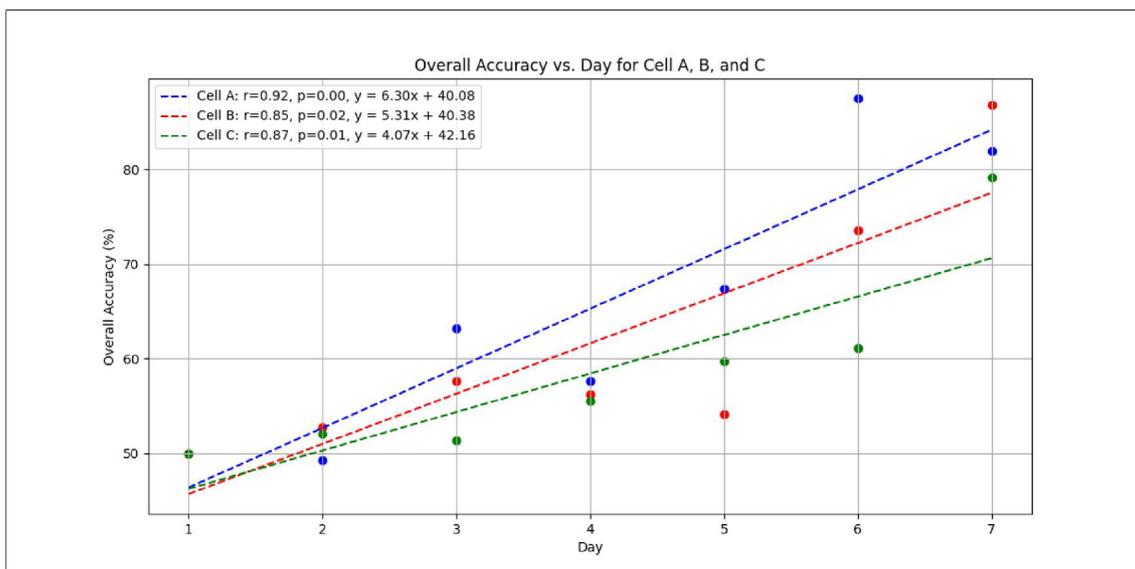


Figure 19. Cell_A・B・C 細胞全体の判定精度と相関関係

時間の異なるセル Cell_A、Cell_B、Cell_C の精度に基づいて、相関関係を分析した (Figure 19)。相関係数と P 値の結果から、次のことが有意に示された。Cell_A の相関係数が 0.92 と非常に高く、P 値が 0.00 であることから、時間と Cell_A の間には非常に強い正の相関があることが示された。この結果は、時間が経過するにつれて Cell_A の Class 7 細胞の精度が向上することを意味する。時間と Cell_B の相関係数が 0.85、P 値が 0.02 であり、時間と Cell_B の間にも強い正の相関が見られた。この結果は、時間が経過するにつれて Cell_B の精度が向上することを示唆している。時間と Cell_C の相関係数が 0.87 と高く、P 値が 0.01 であることから、時間と Cell_C の間にも強い正の相関があることが示された。これらの結果から、時間が経過するにつれて各セルの精度が向上することがわかる。

Table 8. 時系列による Predictions class_7 画像の Accuracy の測定データ

Accuracy (%)	1	2	3	4	5	6	7
Cell_A_class7	1.39	0.00	27.78	16.67	36.11	73.61	65.28
Cell_B_class7	0.00	5.56	15.28	12.5	8.33	47.22	73.61
Cell_C_class7	0.00	4.17	2.78	11.11	19.44	22.22	58.33

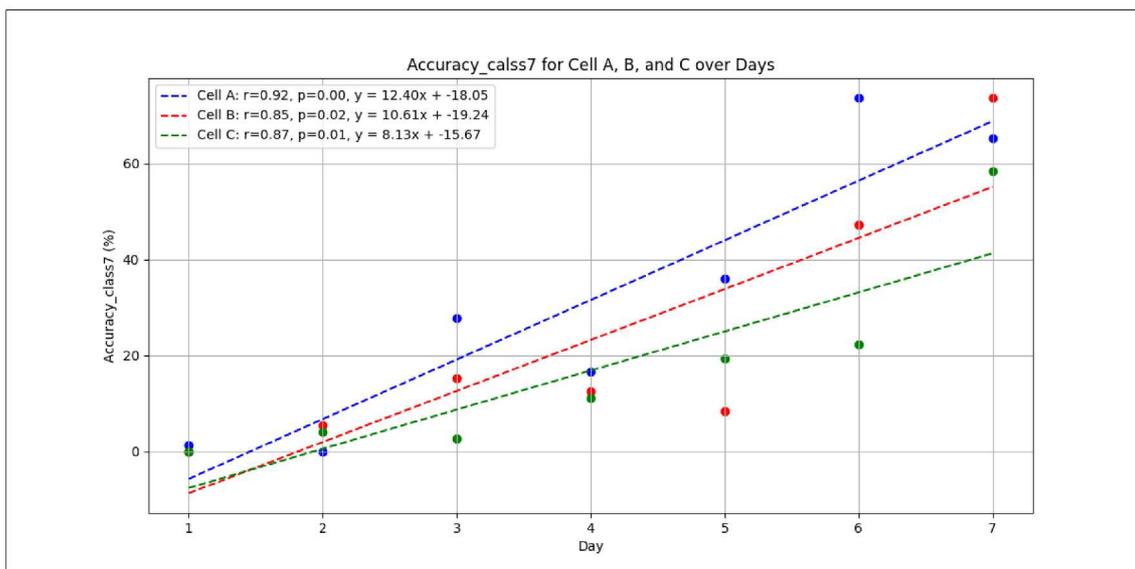


Figure 20. 時系列による Predictions class_7 画像の Accuracy との相関関係

class_7 のデータに基づいて、時間と異なるセル Cell_A_class7、Cell_B_class7、Cell_C_class7 の精度に関する相関関係を分析した (Figure 20)。時間と Cell_A_class7 の相関係数が 0.92 と高く、P 値が 0.00 であることから、時間と Cell_A_class7 の間には非常に強い正の相関があることが示された。この結果は、時間が経過するにつれて Cell_A_class7 の精度が向上することを意味する。時間と Cell_B_class7 の相関係数が 0.85、P 値が 0.02 であり、時間と Cell_B_class7 の間にも強い正の相関が見られた。この結果は、時間が経過するにつれて Cell_B_class7 の精度が向上することを示唆している。時間と Cell_C_class7 の相関係数が 0.87 と高く、P 値が 0.01 であることから、時間と Cell_C_class7 の間にも強い正の相関があることが示された。この結果は、時間が経過するにつれて Cell_C_class7 の精度が向上することを示している。

Table 9. AiCELLEX_Confluency と class_7 Accuracy 混同行列測定データ

AiCELLEX_Confluency (%)							
Cell_A	9.58	10.77	15.70	14.23	17.70	21.51	18.10
Cell_B	8.22	11.12	11.97	11.56	12.20	16.71	21.68
Cell_C	7.56	10.85	11.02	12.12	14.27	14.93	16.13
Accuracy (%)							
Cell_A_class7	1.39	0.00	27.78	16.67	36.11	73.61	65.28
Cell_B_class7	0.00	5.56	15.28	12.50	8.33	47.22	73.61
Cell_C_class7	0.00	4.17	2.78	11.11	19.44	22.22	58.33

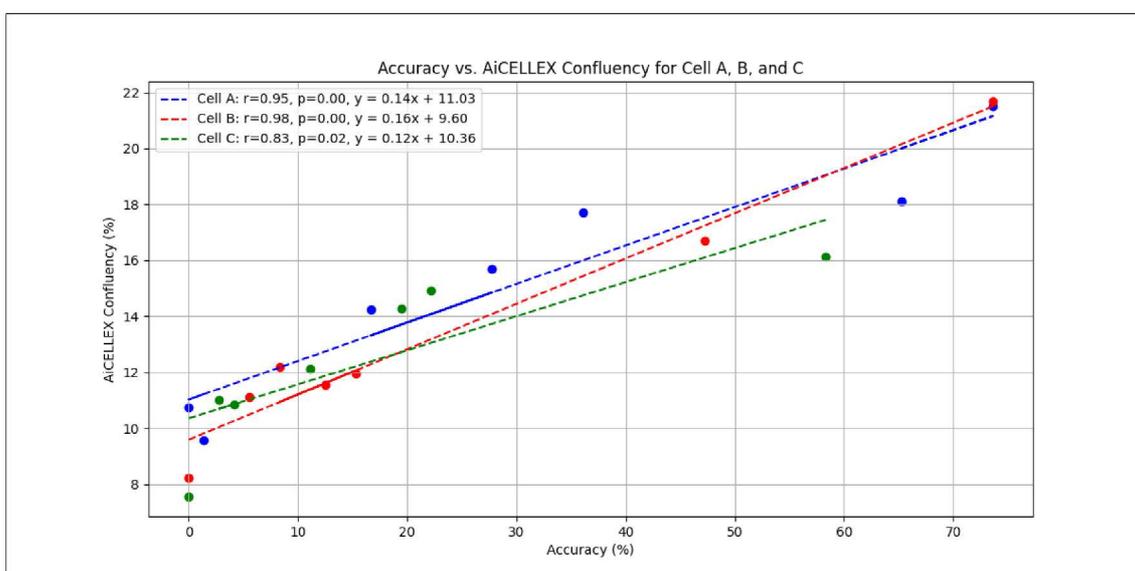


Figure 21. AiCELLEX_Confluency と class_7 Accuracy との相関関係

2 値化処理「AiCELLEX」によるコンフル率 Confluency と CNN 学習による Accuracy の相関関係の分析をおこなった(Table 9, Figure 21)。その結果、Accuracy が向上するにつれて Confluency が増加することが示された。特に、Cell_B_class7 と Cell_B の間には非常に強い正の相関が見られた(相関係数 = 0.98、P 値 = 0.00)。この結果は、Confluency が増加することで各セルの Accuracy が向上する正の相関を示唆している。その相関の強さや傾向には差異があるものの、3サンプルいずれも非常に統計的に有意である。

最後に CNN 学習モデル全体の俯瞰を行った。各 CellA ・ CellB ・ CellC について、1日目と7日目の画像による二種クラス分けの学習モデルに基づき、1日目2日目以降の各日目をクラス毎の予測精度結果を調べた混同行列および epoch グラフを示す(Figure 22, Figure 23)。算出された結果は、1日目から7日目にかけて7日

目の識別率が上昇することを予測するもので、概ね期待通りの成功率の上昇を認めることができたので、一定以上の識別率を有したのものとして本モデルを採用することとした。

Figure 22 は、細胞画像学習時の epoch グラフとなる。学習モデルの画像は、2-2-3-3 CNN 細胞評価でのべた class1 A1・B1・C1 画像 class7 A7・B7・C7 画像を使用。

- ① Class1 156 枚 training image Class7 156 枚 training image 合計 312 枚
- ② Class1 30 枚 test image Class7 30 枚 test image 合計 60 枚
- ③ Class1 ~ Class7 各72枚 Prediction 合計 504 枚

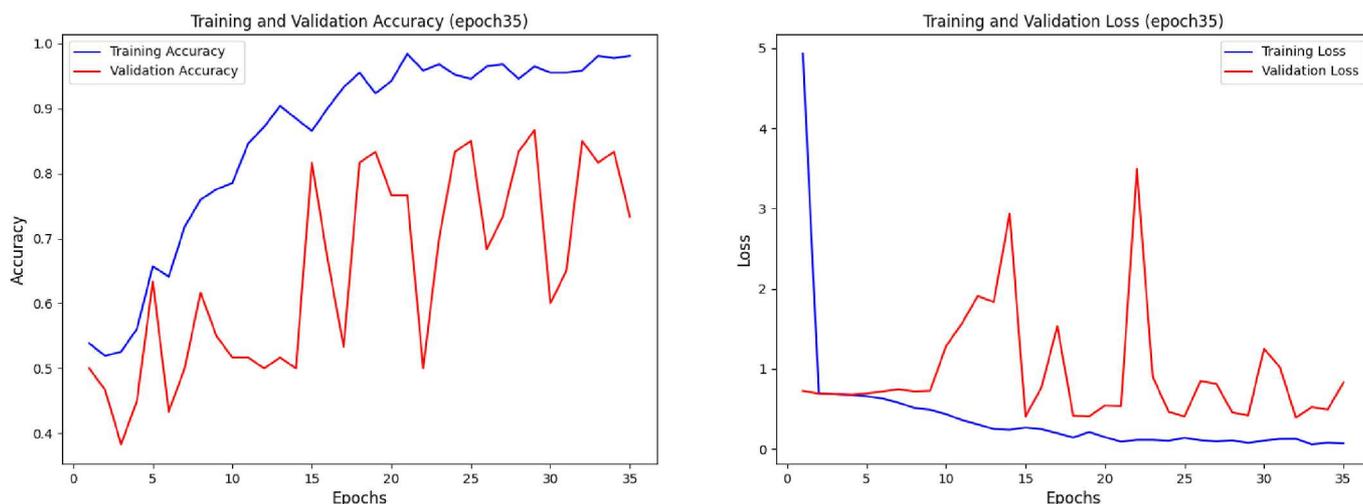


Figure 22. training accuracy training loss epoch グラフ

Epoch 回数は 35 回とし、training accuracy の値は、0.538 から始まり epoch35 回目に 0.981 を示した (Table 10)。Training loss の値は4.928から始まり 0.071 を示し、学習モデルの信頼性を確認した。Figure 23 の混同行列グラフは Figure 22 の学習モデルを使用して求めたグラフとなる。

Table 10. training accuracy training loss data

epochs	training_accuracy	validation_accuracy	training_loss	validation_loss
1	0.538	0.500	4.928	0.726
2	0.519	0.467	0.695	0.692
3	0.526	0.383	0.686	0.687
4	0.561	0.450	0.676	0.678
5	0.657	0.633	0.659	0.695
6	0.641	0.433	0.630	0.718
7	0.718	0.500	0.579	0.746
8	0.760	0.617	0.512	0.720
9	0.776	0.550	0.489	0.727
10	0.785	0.517	0.436	1.282
11	0.846	0.517	0.361	1.567
12	0.872	0.500	0.307	1.909
13	0.904	0.517	0.250	1.833
14	0.885	0.500	0.241	2.936
15	0.865	0.817	0.269	0.405
16	0.901	0.667	0.248	0.769
17	0.933	0.533	0.197	1.533
18	0.955	0.817	0.144	0.417
19	0.923	0.833	0.212	0.408
20	0.942	0.767	0.148	0.543
21	0.984	0.767	0.092	0.536
22	0.958	0.500	0.114	3.495
23	0.968	0.700	0.114	0.900
24	0.952	0.833	0.104	0.464
25	0.946	0.850	0.140	0.408
26	0.965	0.683	0.110	0.849
27	0.968	0.733	0.097	0.813
28	0.946	0.833	0.108	0.456
29	0.965	0.867	0.078	0.421
30	0.955	0.600	0.105	1.250
31	0.955	0.650	0.127	1.019
32	0.958	0.850	0.128	0.392
33	0.981	0.817	0.060	0.522
34	0.978	0.833	0.080	0.492
35	0.981	0.733	0.071	0.833



Figure 23. 混同行列グラフ

Cell A, B, C の 0, 24, 48, 72, 96, 120, 144 時間の画像を対象に、Figure 22 で得られた class 1 と class 7 を識別するモデルの評価を行った。その結果、確かにいずれのサンプルでも、初期は class 7 分類の正解数が小さいのに対し、144 時間では正解数の割合が高くなることが認められ、データ画像の細胞画像の質が時間経過に伴い、class1 分類から class 7 分類に変化して行く様子を定量的に認めることができた。

2-3-2 コンフルエンシー評価相関分析

次に、ヒト間葉系幹細胞の培養サンプルを対象に開発したコンフルエンシー自動識別定量アプリケーションは、人が丁寧にカウントし正解とみなせる細胞数よりわずかに少なめに示すものの、95%以上の正解率を示し、少なくとも個々の細胞識別能力に関わり十分な評価成功率を確認することができたデータを活用し評価を行った (Table 1)。

自動細胞識別アプリケーションはオリジナル画像を読み込み 2 値化後 ラベリング処理を行い 1 画面内における細胞の面積率を精密測定した。コンフル率の視覚的評価と自動識別評価表 (Table 11) に 32 間葉系幹細胞培養サンプル像 (Figure 8) に対する 2 名の熟練者 ExpertA,B と 1 名の初心者 BeginnerC のコンフル率評価値の結果の一覧をまとめた。Expert と Beginner の 3 名は、画像に対して 5% 刻みで、細胞画像のコンフル率を評価した。

その結果、機械が自動的に提示したコンフル率より 3 人の方がはるかに高い値を共通に示した。

3 人のエキスパートと機械識別のコンフルエンシーの相関関係を調べるために散布図に全サンプルデータをプロットし、相関性を仮定して、y 切片を持たない直線回帰の導出を行った (Figure 24 (1)、(3)、(5))。

その結果、コンフル率が相対的に低いサンプルに対して、人が低くコンフルエンシーを評価し、コンフル率が相対的に高いサンプル画像に対して人が高く評価をする傾向が示唆された。そこで、自動識別コンフルエンシーを手掛かりに低中高の三群に分け、回帰直線の上と下に示された培養画像サンプル数のヒストグラムを作成し可視化した (Figure 24 (2)、(4)、(6))。灰矢印で示す通り、前述の傾向が確認された。

Table 11. コンフル率の視覚的評価と自動識別評価

Culture #	Expert A		Expert B		Beginner C		Machine
	%	H/L	%	H/L	%	H/L	%
1	30	L	35	L	30	L	10.79
2	20	L	25	L	25	L	10.71
3	20	L	30	L	30	H	7.88
4	60	H	70	H	55	H	9.88
5	50	H	60	H	50	H	13.36
6	80	H	80	H	70	H	14.63
7	60	H	60	H	50	H	14.08
8	65	H	65	H	50	H	14.93
9	95	H	90	H	90	H	20.52
10	90	L	80	L	80	L	26.46
11	20	L	25	L	10	L	9.32
12	30	L	30	L	10	L	13.17
13	15	L	20	L	15	L	13.28
14	15	L	25	L	10	L	14.81
15	50	L	50	L	30	L	15.42
16	60	L	60	L	50	L	17.42
17	50	L	50	L	40	L	18.45
18	65	H	60	H	30	L	13.53
19	80	H	75	H	70	H	19.74
20	95	H	85	L	85	H	24.6
21	10	L	10	L	10	L	8.07
22	10	L	20	L	15	L	12.24
23	10	L	5	L	5	L	5.48
24	15	L	25	L	10	L	9.32
25	50	H	50	H	45	H	13.17
26	35	L	40	L	35	L	13.28
27	50	L	60	H	60	H	14.81
28	30	L	40	L	35	L	15.42
29	70	H	70	H	70	H	17.42
30	80	H	80	H	75	H	18.45
31	60	H	50	H	45	H	13.53
32	80	H	70	H	80	H	19.74

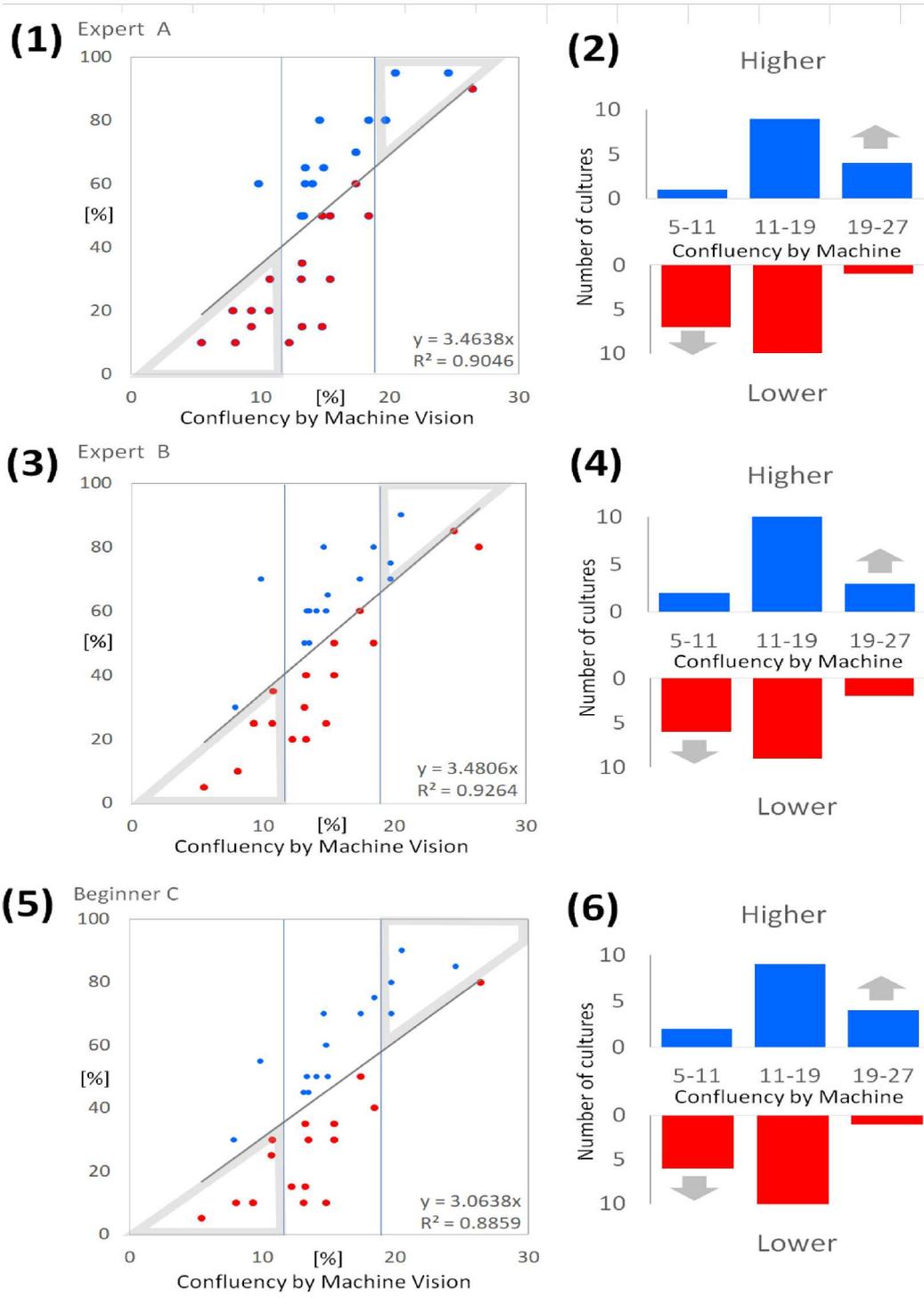


Figure 24. 人間と機械の合流性の相関分析

2-4 考察

ヒト間葉系幹細胞の培養サンプルを対象に開発したコンフルエンシー自動識別定量アプリケーションは、人が丁寧にカウントし正解とみなせる細胞数よりわずかに少なめに示すものの、95%以上の正解率を示し、少なくとも個々の細胞識別能力に関わり十分な評価成功率を確認することができた (Table 1)。コンフルエンシーの評価に関して、機械の識別値よりエキスパート 3 名の評価値の方がはるかに高い値を示しつつ、一定の相関係数を得たことから、互いのコンフルエンシー率評価には一定の機能達成が認められたと考えられる。コンフルエンシー値の差異についての考察としては、細胞境界の定義識別が困難で、人の方がより培地背景より細胞境界を識別する能力が高く、細胞境界を広く識別した可能性がある。一方、3 名ともコンフルエンシーが相対的に低いとより低く、高いとより高く回答していることから、主観的判断における認知心理的バイアスが影響を与えた可能性が示唆された²⁴。これに代わる考察としては、人間と機械の識別感度の違いの影響も考えられ、機械の識別感度をより上げる細胞境界像の強調法などの技術革新が必要である可能性が示唆された²⁵。熟練者 2 名と初心者 1 名の個性の違いは回帰直線と相関係数により評価することができ、熟練者の方が傾き係数が高く相関係数も高い傾向が認められた²⁶。また、機械コンフルエンシーに基づく、個人内の分散にコンフルエンシー依存的なバイアスは特に認められない傾向がある。これらの傾向の可視化には、いずれにしても、機械による再現性の保証された定量分析技術に基盤があり、機械識別の必要性が認められた²⁷。

2 値化画像処理評価「AiCELLEX」と、機械識別向上を目的とする CNN 評価との相関関係の結果において、Cell_A、Cell_B、Cell_C のいずれも細胞数とコンフル率の間に正の相関が見られ、細胞数の増加に伴いコンフル率も増加することが示された。特に Cell_B は最も強い相関を示し、細胞の増殖がコンフル率に与える影響が大きいことが示唆される。この結果は、細胞の増殖とコンフル率の関係を理解する上で重要な知見を提供し、今後の研究においても有用な基礎データとなった可能性がある。本研究で興味深い現象は、Cell_A の増殖能力が高いことが示唆されているが、最終日に Cell_B より低くなっていること、Cell_C に極めて近いことから、その現象の原因を丁寧に探る必要がある。それは2の n 乗で増える増殖率が増えることに伴い、細胞増殖サイクル上での本来の各一サイクル内ステージに伴う細胞成長面積増減サイクルが影

響し振幅自体が大きく揺らぐようになったため、ABC 間の位相のずれで増減順位の入れ替わりが起こっている可能性やコンフル率が多くなると細胞相互作用が大きくなり細胞成長を抑圧する傾向が生じた可能性などが推測され、異なるメカニズムの複合を想定する必要性が示唆された。

ただし、本研究の対象画像サンプル数、エキスパートいずれも少数のため、本研究の初動的示唆を基盤に、さらなる例数を重ねる予定である。

人工知能や機械学習を活用することで、再生医療製品の品質管理がより効率的かつ正確に行われるようになることが期待される²⁸。機械による細胞画像認識技術を用いて、自動的に細胞の形態や機能を評価することで、クラウド化を取り入れることにより、品質管理システムの普及に伴い膨大な量のデータに基づき、再生医療製品の品質管理がより効率的になることが期待される²⁹。このことで、結果的に標準化データベースと個別化医療の普及に寄与できる。また完全機械化により、コンタミネーションリスクは抑制され、医療システム全体の再現性が向上されると考えられる³⁰。

従来の方法では、品質評価を行うまでに約 5 カ月必要であったが、本画像処理開発技術を使用することで、約 6 時間で解析データを提供できる事例もある。これは、細胞の前工程から培養・画像取得・画像解析・データ解析・評価レポート作成までの全工程をコンサルティング提供することで実現化したものである。プロフェッショナルの作業者のみが次の工程の進行や出荷の合否など行う限られた仕事を、クラウド型再生医療細胞品質管理システムの開発により、間葉系幹細胞、iPS 細胞、ES 細胞、オルガノイド、人工肉、金属組織などへの多様な応用が、期待できる。今後 CNN での評価方法を、コンフル率に応用可能となれば、細胞の増殖率などの予測精度の向上が見込まれる。培養液も高価なため、早期の AI 予測評価が可能になれば、培養コストも下げることが可能となり、自由診療の価格や、将来的な医療費負担の減少に期待できる。

第三章 「チャット型生成 AI を活用したコミュニケーション療育支援教材」

発達障害などのコミュニケーション障害を主な症状とする小児精神科の症例の増加が社会問題となっている。インターネットワーク社会がコミュニケーション障害の原因となり得る一方で、機械学習技術の発展とともに出現しているチャット生成 AI は、その設計によってはコミュニケーション訓練に貢献する可能性がある。そこで、無料一時利用サービス「VRoid Studio」の 3D 男の子アバターの表情を、男の子の声による音声、リアルタイムに視聴できる会話テキスト、3D 男の子アバターの表情を通じて、OpenAI Chat-GPT との入出力を音声で表示するタブレット PC システムのプロトタイプを開発した。地域の子どもたちに新しいデジタル教材を紹介するイベントでは、ボランティアで参加した 4 人の子どもたちが、アバターと数分間の短い交流を試みた。このプロトタイプを評価するために、コミュニケーションにおける心理的要素として重視すべき感情について、自然言語処理を用いて文の意味や文脈を理解する深層学習モデルである Google BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers) を用いて、感情の定性的評価を行った。子どもたちとアバターとの会話を支えるチャット生成 AI アバターの予備的試行段階である本研究のプロトタイプは、子どもよりも何倍も速く応答し、子ども自身が表現する文字数やアバター自体が表現するほど応答時間が長くなる傾向があったことをこれから紹介する。さらに、ポジティブな感情よりも中立的な感情の中身は、子どもの反応に時間を要しているように見えた分析例についても触れる。これらの留意により社会情緒的な人間性の深い適応機能を育むことを目標とした AI アバターと子どもの相互作用システムの開発要件を見つける本研究を次のように行った。

3-1 序章

近年、インターネットや IT/AI 技術の発展により、社会の情報通信環境は大きく変化し続けている。これらの技術は、世界に歴史的な産業革命をもたらし、人々の生活様式や概念に激しく多様な変化をもたらした。社会環境の体系的な変化の影響を受けた子どもの社会的コミュニケーション形成にはいくつかの問題が発生して来た可能性がある。日本では、一般的な教育環境において発達障害などの児童精神科の疾患症例が増加していることは、子どもが育つことが難しくなっている社会になっていることを示唆しているのかもしれない。インターネットゲームなど、デジタルを通じた子ども同士の新しいコミュニケーションスタイル^{31,32} は、幼い子どもほど機能的に吸収しやすいデジタ

ル技術特有の特徴を持っており、人と人をつなぐ新たなデジタルならではの優位な機能を持つ一方で、古来より人文系情報の相互作用を通じて進化してきた複雑な社会機能の学習を子どもが失う原因にもなりかねないことも示唆されて来た³³。OpenAI の Chat-GPT (会話型生成型 AI) の爆発的な普及は、従来の人間のソーシャル情報収集のライフスタイルを変えた。そこでの考慮として、チャット型生成型のようなインタラクティブ AI は、自然な会話を実現するための以下の主要技術について知られている。

1つ目は、入力された単語のさまざまな部分間の関係を効率的に学習するためのセルフアテンションメカニズムを利用したニューラルネットワークに基づく Transformer アーキテクチャ³⁴である。この改善により、コンテキストを理解し、適切な応答を生成する能力がもたらされた。2つ目は、大量のテキストデータを事前に学習して言語の基本構造とパターンを学習し、特定のタスクやドメインを微調整して、特定のコンテキストでもより高い精度で応答を生成することである³⁵。そして3つ目は、ユーザー入力を分析し、適切な応答を生成するための自然言語処理(NLP)技術である。これには、形態素解析、文法解析、意味解析が含まれる。この新しいツールは³⁶、ユーザーの声から広く学び続け、全体の共通性と地域特性の両方を兼ね備えながら日々進化しており、一般的な生活から教育まで、あらゆる領域に統合されている^{37,38,39}。これらのキーテクノロジーを実現した結果、この生成 AI は、会話の文脈を理解し適切な応答を生成する、ユーザーが提起する多様なトピックに応答する、新しいデータやフィードバックに基づいて継続的に学習し、応答の品質を向上させるという3つの能力によって、幅広いユーザーに対して自然で期待されるコミュニケーションを一般的に実現する⁴⁰。

新たに開発された革新的な IT ツールがそうであったように、それに費やす時間と労力によって活性化されていた脳機能の変性など、人類に利益をもたらしながらも、その悪影響が存在するとされるものの存在を否定することは困難である。リスク克服とより相性の良い新しい IT ツールのプラス面を活用することで、新世代のコミュニケーションを支える可能性を探るため^{38,39,41}、ユーザーの発言文脈をポジティブまたはネガティブに理解できるアバターフレンドの声や典型的な感情依存的な表情を表現できるタブレット PC を用意した。仮想空間で彼らの精神的な発達をサポートするためのアドバイスや情報交換を行う。PC はチャット音声で表情を表示することができる。成長過程のコミュニケーションとモニタリングをさらにサポートするために、プロトタイプマシンにはリアルタイムで会話を表示およびテキスト保存する機能が用意された(Figure 25)。本研究は、山口県内各所の子どもたちに新しい IT ツールを紹介するイベントで展示され、参加し

た4人の子どもたちが数分間遊んだプロトタイプの内容をレビューすることで、コミュニケーション機能の形成に貢献し、改善の余地を提示する可能性について報告するものである。アバターと子どもの相互作用を調べるために、遅延応答時間の比較に着目し、受け取った文章と発話された文章の量的処理による遅延、または何らかの感情的性質によって異なる処理時間が発生するという仮説的予測の下で、文字数と感情カテゴリとの相関関係を評価することを試みた。実際の教育現場や個人現場で活用しやすい簡易指標である会話応答遅延時間を捉え、感情評価という難題を、テキスト分析に処することで得られる感情のシグナルを考慮した相関関係の有無を探った。



出典2: 萩プレーパーク (わくわくキッズフェスタ)

3-2 方法・データ

3-2-1 クラウドチャット AI_3D アバターシステム

このシステム設計の全体図、外部の UI/UX イメージ、およびその後の分析のフローチャートを **Figure 25** に示す。音声認識 (Browser Edge)、会話生成 (Azure OpenAI Service (GPT 3.5))、音声認識・Web Speech API (Browser Edge)、pixiv アカウントを通じた商用利用可能な VRM モデル (櫻田文也 (男性モデル)) の 3D アバターモデル (Three javascript@pixiv Circle / 3-vrm: 無料) などの各モジュールを統合したシステムである。

本研究の第 3 章に用いたノート PC デバイス概要を以下に示す。

タブレット	Surface Pro 8
デバイス名	TABLET-1RPC0D5S
プロセッサ	11th Gen Intel(R) Core(TM) i5-1135G7 @ 2.40GHz 2.42 GHz
実装 RAM	8.00 GB (7.84 GB 使用可能)
デバイス ID	0A1AE208-F584-4AE0-AA9E-3A7B22148B46
プロダクト ID	00356-06253-43437-AAOEM
システムの種類	64 ビット オペレーティング システム, x64 ベース プロセッサ
ペンとタッチ	10 タッチ ポイントでのペンとタッチのサポート

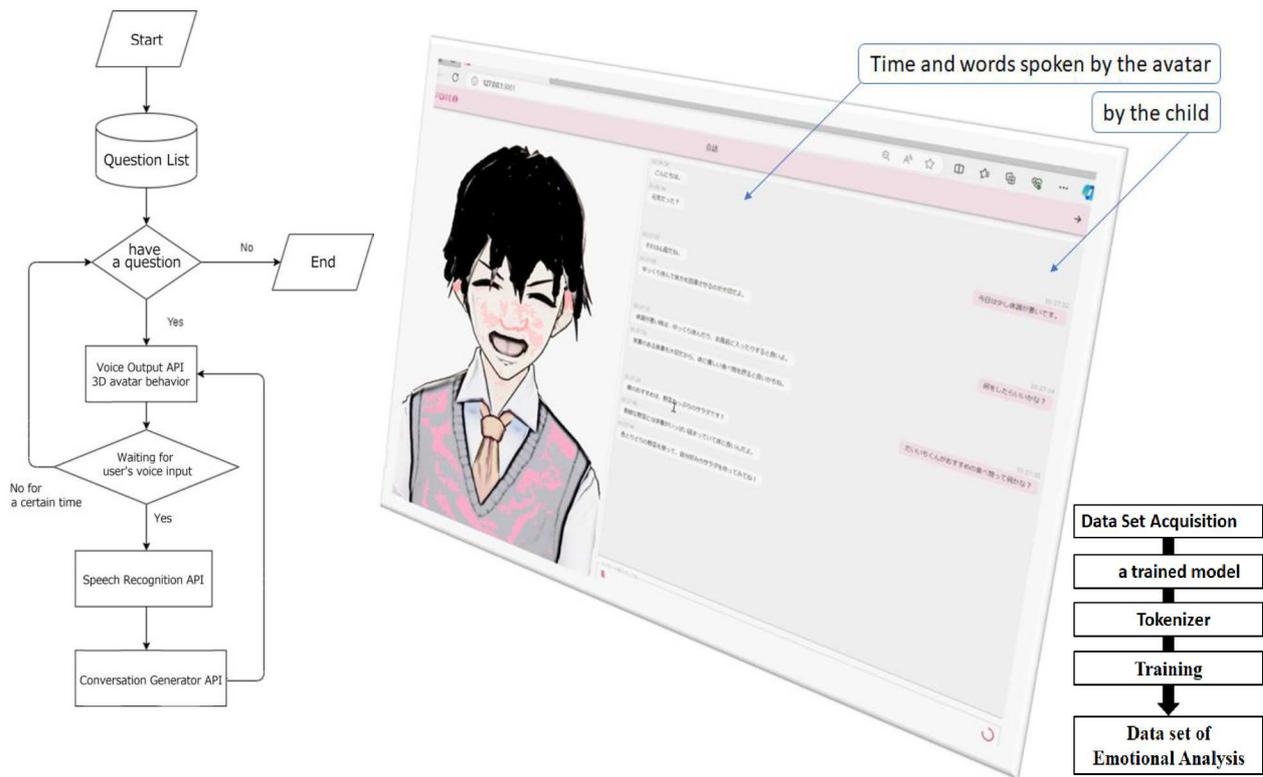


Figure 25. 子どもの声、顔、言葉の表現を備えた Chat-GPT アバター

3-2-2 VRM3D モデル表情制御

VRM (Virtual Reality Model) は、VR アプリケーション用の 3D アバターファイル形式である。日本発祥のこの形式は、異なるプラットフォーム間の相互運用性を重視するように設計されている。VRM の特徴は、さまざまな用途で使用できる 3D モデル形式である。これにより、アバターを一度作成すれば、複数のプラットフォームで使用できる。VRM ファイルは「.vrm」拡張子を持ち、glTF 2.0 に基づいており、商用利用や再配布のための権利情報で VRM データを設定することができる。pixiv で VRM モデルを制御するために、主に three-vrm ライブラリを使用している。このライブラリは、Three.js と組み合わせて、VRM モデルを Web 上に表示および制御する。基本コマンド 以下の設定情報は、3 つの VRM を使用して VRM モデルを制御するための基本的な JavaScript コマンドに関するものである。

3-2-3 パーソナライゼーション設定

キャラクターに対してユーザーに親近感を持たせるために、名前、年齢、性別、趣味、特技、自己紹介など各プロフィール項目を設定することでアバターの個性表現を設定することが可能である (Table 12)。

Table 12. アバターのキャラクター・パーソナライズコマンド

プロフィール	コマンド	機能
名前	SetName("Character Name")Sets	キャラクターの名前設定
年齢	SetAgeSets	キャラクターの年齢設定
性別	SetGender("Gender")Sets	キャラクターの性別設定
身長	SetHeight	キャラクターの身長設定
体重	SetWeightSets	キャラクターの体重設定
趣味	SetHobbies(["Hobbies1", "Hobbies2", ..])	キャラクターの趣味設定
特技	SetSkills(["feat1", "feat2", ...])	キャラクターの特技設定
自己紹介	SetIntroduction("Self-introduction")	キャラクターの自己紹介設定

3-2-4 アバター感情表現コマンド制御

Chat-GPT のセンチメント分析を用いて、テキストから特定の感情をポジティブ、ネガティブ、ニュートラルに識別する技術により、アバターの表情を制御した。JavaScript コマンドは、Table 13 に示す「Neutral」「Positive (喜び、微笑)」「Negative (悲しみ)」「Negative (怒り)」の 4 つの感情面で、ユーザーの話し方に合わせてアバターの表情を変えることを可能にした。感情の主なカテゴリーは、中立的、肯定的、否定的の 3 つである。アバターの表情の設定では、データ量が少なかったため、応答テキスト分析では両方を一緒に否定的な感情と見なしていたが、悲しみと怒りの表情では否定的な感情の中で別々に設定されていた。

Table 13. アバターの感情表現のコマンド

感情	コマンド	アバターの表情
ニュートラル	<code>vrn.blendShapeProxy.setValue('neutral', 1.0);</code>	
ポジティブ 喜び 笑顔	<code>vrn.blendShapeProxy.setValue('joy', 1.0);</code> <code>vrn.blendShapeProxy.setValue('smile', 1.0);</code>	
ネガティブ 困惑 悲しみ	<code>vrn.blendShapeProxy.setValue('confused', 1.0);</code> <code>vrn.blendShapeProxy.setValue('sorrow', 1.0);</code>	
怒り	<code>vrn.blendShapeProxy.setValue('angry', 1.0);</code>	

たとえば、ユーザーが「私は幸せです」と言った場合、次のコマンドが実行される。

[JavaScript の記述]

```
if (userEmotion === 'happy') {  
    vrm.blendShapeProxy.setValue('joy', 1.0);  
}
```

同様に、ユーザーが「sad」と言うと、次のコマンドが実行される。

[JavaScript の記述]

```
if (userEmotion === 'sorrow') {  
    vrm.blendShapeProxy.setValue('sorrow', 1.0);  
}
```

会話中の感情表現とキャラクターの表情を調和させることで、会話対象との臨場感を出すことができた。

3-2-5 IT 教育指導イベント・子ども遊び体験会

本研究プロトコルは、山口大学人一般研究審査委員会 (2023-064) において審議され、承認された。すべての研究メンバーは、承認されたプロトコルを遵守した。研究者たちは、2023 年秋に山口県で 2 回にわたり、新しい IT 教育ツールを紹介する一般公開イベントを開催した。公開イベントでは、対話型生成 AI と会話するタブレット型アバターをその場で紹介した。2 年生から 4 年生までの 4 人の小学生の男の子が、その地域で親と一緒に自発的に参加し、教室の机で各ティーチングアシスタントの立ち会いの下でプロトタイプと会話ゲームを数分以内で遊んだ。

3-2-6 処理負荷量依存性評価と仮説される応答時間遅延

生成された AI アバターと 4 人の子どもとの会話を収録した JSON ファイルから、会話時間や内容情報をプログラミングコードで自動抽出し、Excel ファイルに変換した。このデータセットから、アバターと子どもたちの遅延応答時間と会話キャラクターの数の平均と標準偏差を計算した。ピアソンの積率相関係数、線形回帰を用いた切片、および確率を用いて、アバターと子どもが発する音声量と遅延応答時間との間に相関があるかどうかを評価した。有意性が見出された場合、認知処理機能への負荷と文形成に関わる負荷との関係を仮説し得る指標、と設定した。

3-2-7 BERT・感情分析に基づく遅延応答時間比較

Google が 2018 年にリリースしたインタラクティブな教師なし言語モデルである BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers) や自然言語処理により、少量の教師ありデータをファインチューニングによる文章理解や感情分析など、さまざまなタスクに活用することができる。文はトークン化され、教師データについては、人工知能 (AI) モデルとデータを共有および使用するためのオープンソースプラットフォームである HuggingFace の「tyqiangz/multilingual-sentiment-datasets」を使用して、ニューラル言語モデルを通じて文の自然さを確率で表現した⁴²。東北大学自然言語処理研究グループ (<https://www.nlp.ecei.tohoku.ac.jp/research/open-resources/>) が公開した日本語版ウィキペディアの日本語版「cl-tohoku/bert-japanese」で学習した BERT モデルを使用した。モデルアーキテクチャは、元の BERT 基本モデルと同じである。12 のレイヤー、768 次元の隠れ状態、および 12 のアテンションヘッド。学習データは 8000、テストデータは 200、バッチサイズとエポックサイズは 8 と 1 であった。微調整された学習済みモデルのパフォーマンスは、正規化された混同行列を使用して評価された。得られたモデルを用いて、4 人の子どもとアバターとの間の会話文の各セットを、ポジティブ、ニュートラル、ネガティブの 3 つの感情グループに分けた。そして、アバターまたは子どもたちの遅延応答時間は、自身または相手の話すグループで、肯定的、中立的、否定的な 3 つの異なる感情グループ間で比較され、仮説的な感情依存性を探した。

3-3 結果

3-3-1 アバター・子ども遅延応答時間比較

人の子どもとの短い会話と、AI 制御のチャット型バーチャルトレーナーによるあらゆる感情に関連する特徴量を推定することを目的として、子どもとバーチャルトレーナー双方の音声応答遅延時間を指標として対象とした。最初のアウトラインとして、**Table 14** は、子どもとアバターの遅延応答時間の平均と標準偏差をそれぞれまとめたもので、アバターの応答時間が子どものそれよりもはるかに速かったことを示している。遅延反応の平均値と標準偏差は、これら 4 人の子どもまたはアバターの平均値は、それぞれ 9.5 秒 ± 1.0 秒、または 1.0 ± 0.2 であった。アバターの応答遅延時間が、子どもの応答遅延時間に比べて約 9.5 倍も大幅に短縮された。

Table 14. 遅延応答時間 平均±標準偏差 [s]

	子どもの返答時間_Ave±SD[s]	アバターの返答時間_Ave±SD[s]
Child_1	10.6±3.3	0.9±0.5
Child_2	8.5±1.1	0.9±0.4
Child_3	10.1±5.6	0.91±0.3
Child_4	8.8±2.1	1.3±0.4

また、4 人の子どもとアバターの日本語の単語文字量を比較(**Table 15**)したところ、4 人の子どもが発声した平均値と標準偏差が 8.4 ± 5.2 、アバターが発話した日本語の単語文字量が 32.6 ± 21.7 であった。生徒の t-test によって計算された、子どもとアバターの間の p 値は $2.32E-09$ ***で、アバターが発した文字の量が子どもよりも約 3.9 倍も有意に多いことが確認された。

3-3-2 BERT・テキスト感情分析モデル混同行列

東北大学自然言語処理研究グループによる感情分類のための BERT を用いた精緻な学習モデルの性能について、多言語のデータセットに基づき、ポジティブ、ニュートラル、ネガティブの各感情の予測精度を評価した。微調整された学習済みモデルのパフォーマンスの正規化された混同行列を(**Figure 26**)に示す。肯定的と否定的な区別は、正解が約 90%、誤の識別が約 0.01%であるのに対し、中立の識別は一般的に正解が約 64%、誤の識別は 0.11%から 0.19%であった。ネガティブとポジティブの両方、いわゆる「極性」の精度が高いのに対し、ニュートラルの精度が低い、つまりどちらもないということは、人間の感情であるテキストで分類するための識別境界があいまいな感情分類における困難さを考えると、ニュートラルが境界であるため低くなることが想像される整合性のある結果であることが確認された。

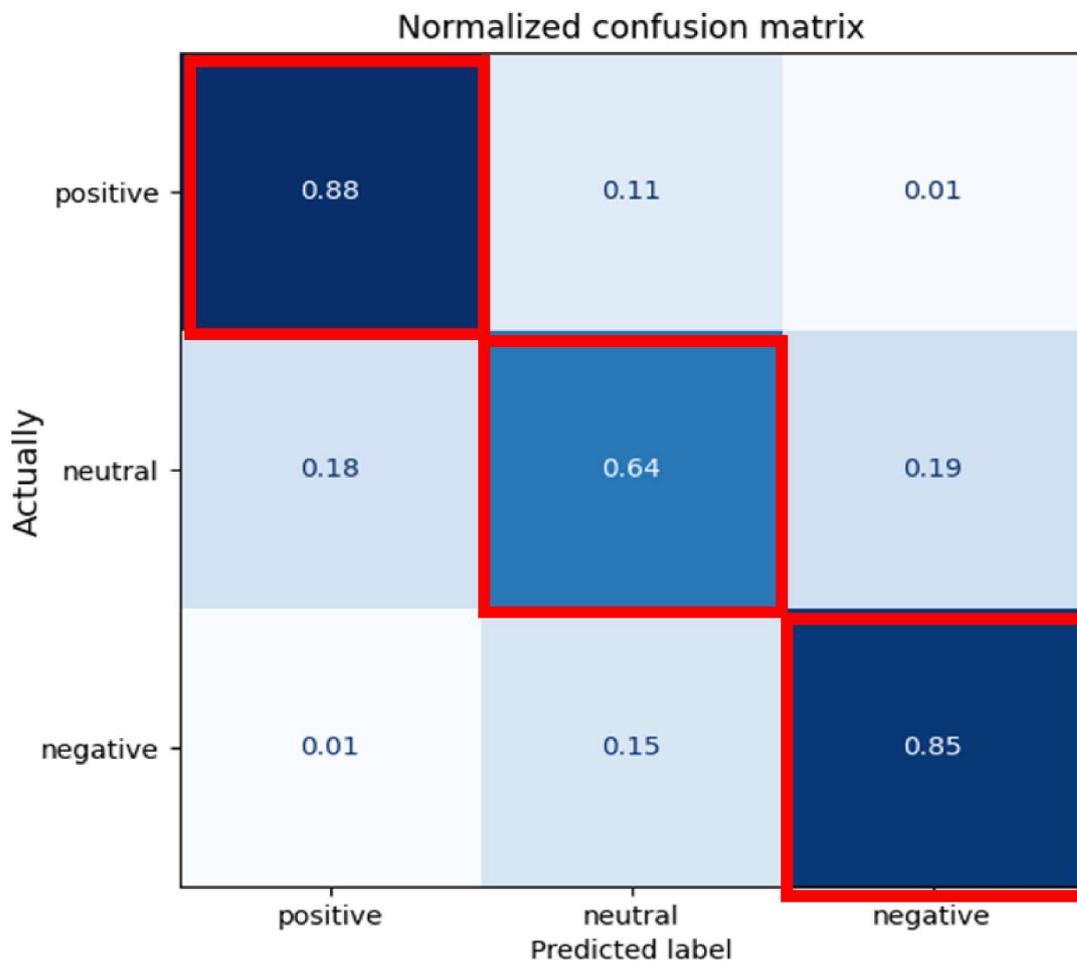


Figure 26. モデル性能の正規化混同行列

3-3-3 単語、感情予測、応答時間遅延データセット

Table 15 で示すように、1 人の子どもとアバターの時系列に沿ったペアデータセットの例であるように、4 人の子どもとアバターとの間の数分間の全会話文、応答遅延の時間、および BERT 事前学習モデルによる複数文の各セットの感情分析結果を纏めた。

Table 15. 子どもとアバターのデータセットの例

アバターの会話	子ども		子どもの会話	アバター	
	遅延時間[s]			遅延時間[s]	
こんにちは、元気にしてる？	positive	8.513	こんにちは元気にしてる？	positive	0.535
はい。元気です！	neutral	8.522	普通山口	positive	0.603
山口はとても美しい場所ですね	neutral	12.993	ばか？	negative	1.196
それは失礼ですよ!そのような言葉を使うのは良くありません!相手を尊重しましょう。	neutral	6.443	おち	neutral	0.873
相手を傷つけるような態度は控えてください。	negative	10.686	何？これわからないお疲れ	neutral	0.678
すみません、何か困っていることはありますか？	neutral	19.262	なんか難しい話してみよ。	neutral	1.503
たとえば、量子力学について話しましょうか量子力学は微小な世界で物理現象を説明する学問で、粒子の位置や速度などを確定的に予測することが難しいとされています。これには確率的な要素が関わっているんですよ。興味があれば、もっと詳しくお話しできますが、要点はこんな感じです。	neutral	10.604	何歳？	neutral	0.622
僕は6歳です	neutral	9.145	僕は賛成だよ	neutral	0.901
まだ小学生だよ。	neutral	6.688	ちょっと賛成だよ。	neutral	1.074
ちょっと賛成なんですね。どうしてそのように感じるんですか？	neutral	6.617	僕は何歳だよ？	negative	1.176

3-3-4 遅延応答時間・単語数相関評価

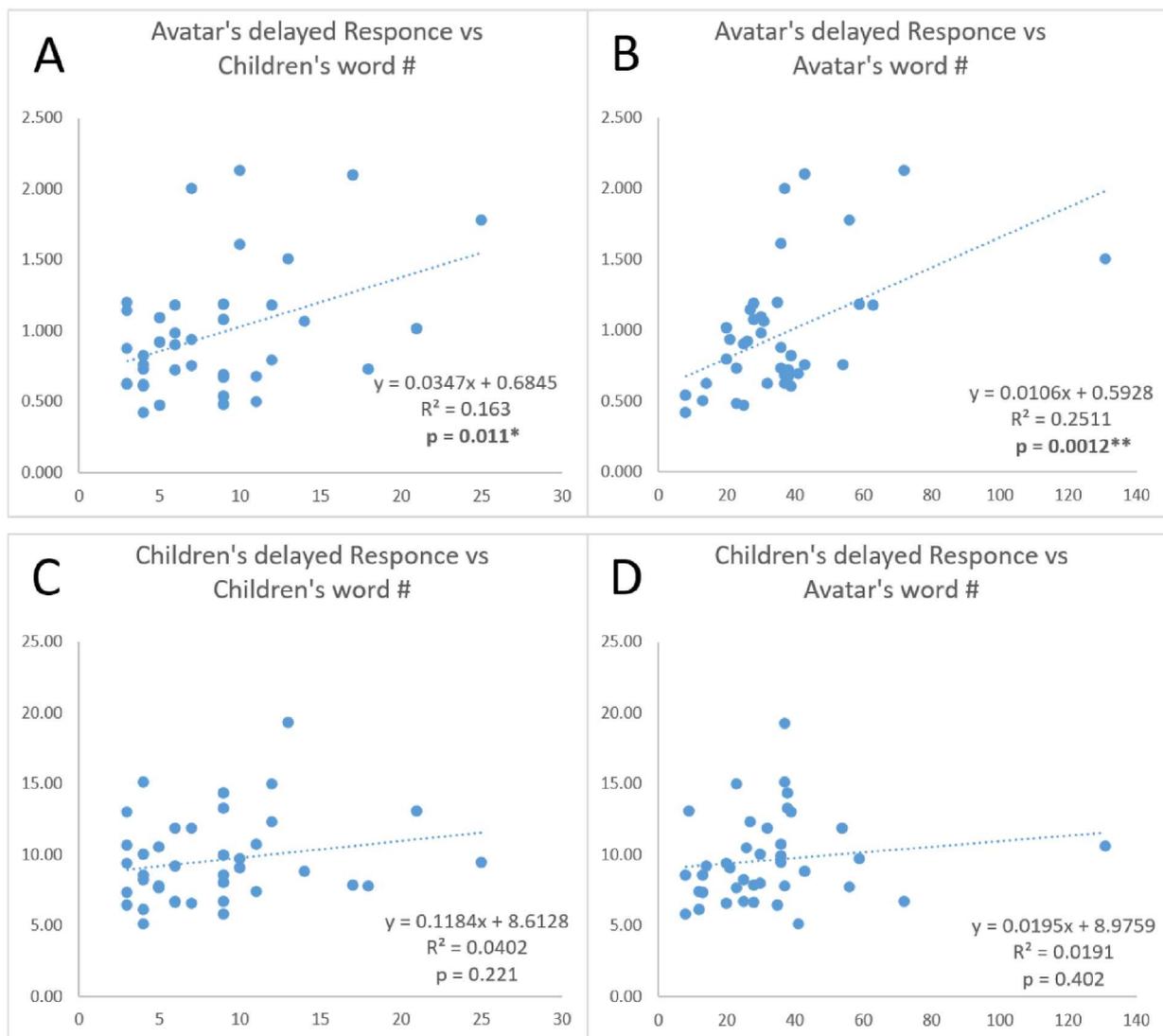


Figure 27. アバターと子どもの遅延応答時間と各テキストの文字数

線形回帰とピアソン積モーメント相関係数、切片 ($p < 0.05$ または 0.01 未満の確率は有意差ありとみなし、1 つまたは 2 つの * とともに視覚化した。

- A) アバターの遅延応答秒数と子どもの最後の発話単語数の関係。
- B) アバターの遅延応答秒数とアバターの発話単語数の関係。
- C) 子どもの遅延応答秒数とアバターの最後の発話単語数の関係。
- D) 子どもの遅延応答秒数とアバターの発話単語数の関係。

アバターや子どもが文を受信して応答する処理時間がテキストの量に依存するかどうかを検討するため、遅延応答時間ごとに受信したテキスト量と発話された文の量との相関分析を、線形回帰とピアソン積率相関係数、切片、および確率で行った **Figure 27**)。その結果、**Figure 27C** において、子どもの遅延応答と子どもの言葉数に対する相関近似直線 ($y = 0.1184x + 8.6128$, $R^2=0.0402$, $p = 0.221$) および **Figure 27D** における子どもの遅延応答とアバターの言葉数 ($y = 0.0195x + 8.9759$, $R^2 = 0.0191$, $p = 0.402$) では、相関係数、 R^2 値、または子どもの応答遅延時間との間の相関係数、 R^2 値は、有意ではなく低かった。これに対し、アバターの応答遅延時間と言葉に関わる相関評価においては、生成 AI による機械処理によって受信、認識、形成、出力される文字の量と高い相関関係があることが明らかになった。アバターの応答遅延と子どもの言葉数 (**Figure 27A**: $y = 0.0347x + 0.6845$, $R^2 = 0.163$, $p = 0.011*$) およびアバターの遅延応答対アバターの言葉数 (**Figure 27B** $y = 0.0106x + 0.5928$, $R^2 = 0.2511$, $p = 0.0012**$) で有意な正相関性が認められた。この結果は、AI が機械制御したアバターの単語認識・形成の処理機能が、より単純で統一されたメカニズムに支配されていることを示唆しているのに対し、子どもの単語認識・形成の処理機能はむしろ収束することなく多様化していることを示唆している。

3-3-5 感情依存的な遅延応答時間の影響の評価

最後に、遅延応答時間における感情依存を示す可能性を探るために、BERT による感情分析によって感情タイプが特定された単語を自らが発する子どもが発声する応答遅延時間 (**Figure 28A**:子ども)、アバターが発声するとき (**Figure 28B**:アバター)の比較、または相手が発した感情タイプを識別した言葉を受信し次の発声を行うまでの遅延応答時間 (**Figure 28C**:アバターの感情を含んだ言葉に対する子どもの発声遅延)、(**Figure 28D**:こどもの感情を含んだ言葉に対するアバターの発声遅延)に及ぼす影響を確認するために、ポジティブ、ニュートラル、ネガティブの 3 つの感情グループ間でグループ間比較を試みた。その結果、4 人の子ども全員の共通性として、応答遅延時間は、ポジティブな言葉を発したとき (**Figure 28A**) や受け取ったとき (**Figure 28C**) に一般的に短く、ニュートラルな言葉では長くなる傾向 (赤矢印) があつたが、この傾向は、発声したアバター (**Figure 28B**) や受け取った (**Figure 28D**) の状況では、4 人の子どもには見られなかった。

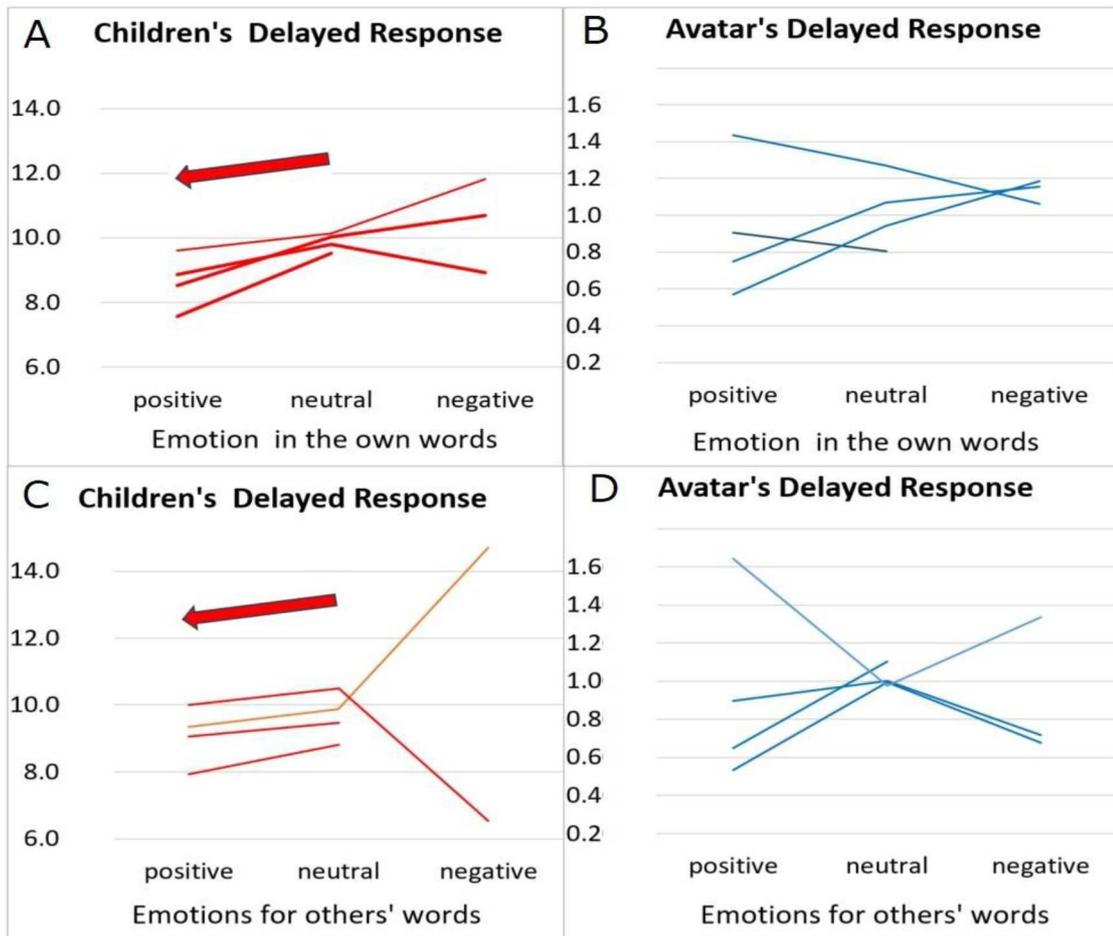


Figure 28. 感情的単語グループ・遅延反応平均時間

- A) アバターの最後の発話から子どもの次の発話までの遅延時間
(子ども自身が発す言葉: ポジティブ、ニュートラル、ネガティブ)
- B) 子どもの最後の発話からアバターの次の発話までの遅延時間
(アバター自身が発す言葉: ポジティブ、ニュートラル、ネガティブ)
- C) 子どもの遅延時間
(アバターの最後の発話: ポジティブ、ニュートラル、ネガティブ)
- D) アバターの遅延時間
(子どもの最後の発話: ポジティブ、ニュートラル、ネガティブ)

3-4 考察

本予備的プロトタイプ評価研究において、チャット生成 AI アバターと一般の子どもたちとの会話に関連する開発上の考慮事項を探求し、IT/AI の積極的な使用が引き起こす可能性のあるコミュニケーション障害のリスクを除去しつつ、教育機能を追求するための要件を探ることを試みた 46.47。この新しい生成 AI ツールにより、人間性を積極的に向上させるための新しい方向へ、教育の新規適用性を切り開く試みを行った。神経生物学で特定されて来た複雑な脳神経基盤を理解し適用するためにはこの未知の生成 AI/IT 技術は、高感受性期間中に生涯にわたる基礎的な心身の神経ネットワークを形成している子どもたちの脳が、十分な配慮なしにこの技術環境にさらされると、深刻な影響が与えられる可能性がある。

デフォルト設定でのアバターの遅延応答時間の平均は、子どもたちの約 10 倍速かったことが **Table 15** に示されている。さらに、アバターが生成するテキストの量は子どもたちの約 3.9 倍と有意に多いことがわかった。このように、相互に対話し影響を与え合う二人の話者のパフォーマンスに大きな違いがあることは、同年代の人々の理想的なコミュニケーション状態からは程遠いと予想された。会話における両方のコミュニケーションの同期リズムは今後の教材開発において重要な要素と考えられるため、反応時間設定の最適化が今後の調査で求められる 45,46。

Figure 27 に示されているアバターと子どもたちの遅延応答時間と発話文字数の相関関係は、定量的な特徴を探ることを目的としており、その結果、ChatGPT によって支配されるアバターは受信および認識された文字数に大きく依存していることがわかった (**Figure 27A**, $p = 0.011^*$)。さらに、アバターによって生成された文字数にも依存していることが示された (**Figure 27B**, $p = 0.0012^{**}$)。これは、処理負荷に関連していると考えられるが、子どもたちには有意な依存関係は見られなかった。子どもたちの遅延応答時間が自己またはアバターの文字数に依存しないことは、心理生物学の複雑さを説明できる多様な精神活動を示唆しているかもしれない。これは、アバターの **Figure 27A** および **Figure 27B** における有意な相関関係に反映されている可能性がある 47。これは、自己および他者が使用する単語数に応じた遅延時間が、子どもではより多様な分散を示すことから、脳や全身の神経系ネットワークが支配する、より複雑な機能の感情の存在を示唆している可能性があるが、さらなる検証が求められる。

このスモールサイズという研究の限界は、公共のイベントで偶然出会った 4 人の子どもたちだけに由来するものであるが、一般社会状況として、子どもたちの言葉の一つ

一つを丁寧に扱い、脳内の物理的な処理負荷の観点だけでなく、心理的な影響についてもより多くの仮説をもって探求することを試み、深層学習 BERT を用いた定量分析を交えながら行ったものである^{48,49}。子どもたちのメンタルヘルスを深く考えている会話の文字数としてのテキストの量は、前述の **Figure 27** のようにアバターの応答時間の遅延とわずかに関連しているように見えたが、子どものコミュニケーション学習を支援するデジタル技術の発展には、話し手の声色やピッチ、速度などの特性を解析して感情を識別する音声認識手法や、それらに基づいて感情を分類する学習モデルが存在する。

また、ユーザーからの非言語生体信号(心拍数、皮膚電気活動、脳波^{50,51,52,53}、心電図 (ECG) など)を用いて感情を分類する方法も存在する。さらに、テキスト、音声、画像、生体信号などの複数のソースを組み合わせる感情を識別する方法として、マルチモーダル感情検出と呼ばれるものがある^{54,55}。本研究プロトタイプ技術のように、インタラクティブな出力メディアとプラットフォームを開発する別のアプローチとして、メタバースとその大規模化など⁵⁶、より没入感のある体験を提供するマルチモーダルと 3 次元空間制御技術を組み合わせることで、人間の認知と感情心理学のネットワーク形成と調整方法を改善する可能性がある。プロジェクションマッピングは、現在 IT を通じて拡大および開発されている⁵⁷。

近年、学習障害や発達障害のある子どもたちは、学業だけでなく、日々の人間関係においても多くの困難に直面している。これらの問題を軽減するためには、定期的にソーシャルスキルを養うための研修を実施する事が重要である。この問題を解決するために、学校やデイサービスセンター、特別支援学校など様々な施設でソーシャルスキル研修が開発・改善されている⁵⁸。ソーシャルスキルトレーニングは、遊びや楽しい方法で対人関係や集団生活において適切かつ効果的に考え、行動する能力を向上させることで、子どもたち自身が積極的にそのプロセスに取り組むことが期待される。しかし、一般的なソーシャルスキル研修では、専門的な知識が必要であり、日常的にそれに取り組むことができる環境づくりに時間を割くことが重要である。本研究の目的は、発達障がい児、特にコミュニケーション障害児の将来に向けたコミュニケーション能力の向上について、生成 AI を用いたアバターとの対話を通じて可能性や課題を検討することである。本研究は予備的な試みに過ぎないため、今後の発達障害への応用可能性を慎重に検証していくことが求められる⁵⁹。

また、デジタル信号を加えて人間の複雑性を模倣することで、自律的に学習を続ける人工知能を持つ IT ロボティクスは、生物にどんどん近づいている。その結果、例え

ば、個々の個体固有の生産活動が機械に置き換わり始めるなど、生物と機械の大きな違いによってそれまで形成されていた距離感が変わり、人間の活動が機械を超える活動へと進化せざるを得なくなるかもしれない。一方で、人間の活動に代わる生成 AI を搭載したデジタル製品は、人間とのインタラクションが可能になりつつあり、これが依然依存症の発症につながることを懸念されている。また、子どもたちがデジタルゲームへの依存度を高め、学校に行かないなどの深刻な社会的不適応につながるリスクについても多くの報告がある。アナログ信号よりも処理が容易なデジタル信号を脳のニューラルネットワークで交換することで、複雑な信号処理を必要とするアナログ処理が少なくなってしまうことで脳の能力低下を招き、依存症の発症が早まる可能性がある。このことを念頭に置いて、私たちは警鐘を鳴らし、現実空間と仮想空間を組み合わせた新しい教育システムの開発が急務であることを訴えたい^{60,61}。

現代の多くの研究報告では、機械の脳は認知レベルを向上させたが、心は改善されていない、または抑制しているという多くの見解がある。しかし、神経科学が明らかにした物理化学的システムは、現在の機械よりもはるかに複雑であるが、機械はいつかその複雑さに到達するかもしれない^{62,63}。私たちは、地球や宇宙の生命において、機械と共存し、進化し、向上させる叡智の育成方向を探求していきたいと考えている。

無料一時利用サービス「VRoid Studio」の 3 次元男性アバターの表情から、男性の声による音声、リアルタイムに視聴できる会話テキスト、3 次元男性アバターの表情を通じて、OpenAI Chat GPT との入出力を音声で表示する対話型生成 AI を用いたタブレット PC システムのプロトタイプを試作開発した。地域の子どもたちに新しいデジタル教材を紹介するイベントでは、無作為で参加した 4 人の子どもたちが、アバターと数分間の短いチャットを介した交流を試みた。この生成 AI チャットボットのプロトタイプを評価するために、自然言語処理の深層学習モデルである Google BERT を用いて、各子どもたちとアバターとの間のコミュニケーションされた言葉量と感情のポジティブ、ニュートラル、ネガティブな感情の心理学的評価を行った。その結果、チャット生成 AI アバターの予備的な本プロトタイプは、子どもよりも何倍も速く、より多く応答することがわかった。アバターの応答時間は、アバターが受け取って認識した子どもの言葉とアバター自身のスピーチで表現される文字数によって長くなる傾向があった。

さらに、ポジティブな感情よりもニュートラルな感情の内容は、4 人の子どもたちが反応して文章を作り、アバターの言葉を受け取り認識するのに時間が必要であるように

思われた。子どもとアバターの両方の応答遅延時間は、音声コミュニケーションにおける彼らの感情状態を予測する指標として役立つかもしれない。これらのノートは、認知と感情を持つ社会的人間性の教育のための AI アバターと子どもの相互作用システムを開発するための次の仕様の要点として、応答遅延時間の感情タイプを考慮したモニターと応答調節が、本コミュニケーション支援技術開発上でのひとつの要件ではないか、と提案する。

第四章 「第三章試作機器の生理心理モニタリング機能の拡張試作」

現代の社会障害が関与する症例が増加し続ける中、社会機能の育成支援介入技術の開発が期待されている。私たちは、チャット型 AI を活用して、前章での音声感情分析技術に対し、音声会話中に心理状態の変動を投影する可能性のある心拍数の昇降を感知して話者に通知することで⁶⁴、例えば会話の練習や心拍数の上昇を知らせて緊張緩和を支援するなどを含めたプロトタイプアプリの開発を試みた。自閉症スペクトラム症状を含む言語コミュニケーション障害の療育において、その症状が一般に情緒障害を伴い、テキスト信号によるデジタルコンテンツを多様に開発できるチャット教材は、多くの子どもたちにおけるデジタルへの嗜好性の高さからもブレイクスルーとなる開発ポテンシャルが見込まれる。

一方で、デジタルツールの劇的な進化の早さから、人類の教育システムにおけるデジタル教材の活用経験が少なく、益もあればリスク性もある可能性がある。そこで我々は、言語コミュニケーションの初動的デジタル学習教材として、男子のアバターと音声で、名前、年齢、および、果物や色の嗜好性を順に問い回答をログする機能と、内省的認知情動神経活性の影響を捉える可能性のある心拍を耳たぶや指先から得る定量的生理情報を収集するプロトタイプを試作した。2歳から8歳までの発達障害者支援センターに療育サービスを受けている発達障害児14名、および、デジタル教材開発を紹介するイベントで無作為に参加した12名に試行して頂き、ログ情報から比較することで、発達障害児の特徴抽出を試みた。その結果、男子でアバターへの低回答数や、心拍の年齢依存的低下傾向が認められないこと、一部の子どもは短時間の文脈推移にも関わらず心拍の激しい昇降変動を示す特徴が示され、より高度化する療育システム開発への要件提示候補として、本章で報告する。

4-1 序章

対話型生成 AI は、リアルタイムに会話した内容をテキスト化しユーザーの興味や関心がどこにあるかを探索可能となるデータベースを作成し将来の方向性の情報を構築した⁶⁵。また、会話形成を阻害する心理的ストレスの影響を感知し、その影響を軽減する機能も期待されている。対話型生成 AI を利用したコミュニケーションアプリは心拍センサーを Bluetooth で接続し、リアルタイムで同期させることができる。心拍数とは、一定の時間内に心臓が拍動する回数のことで、通常は 1 分間の回数 bpm:(beat per minutes)で表現す。この研究では、心拍が毎分 100bpmを超えた場合に会話中に回収し、影響を受けた対話者と AI の両方に話し言葉のテキスト視覚化を提供するシステムの設計を試みた。本レポートの目的は、将来の実証試験のための初頭のプロトタイプを完成させることである⁶⁶。

測定する心拍数と脈拍数の違いについて、一般的に心拍数とは、心臓が全身に血液を送り出す際の拍動の回数を指す。心臓が血液を送り出すと、全身の動脈に脈動(脈拍)が生じ、この脈拍を測定するのが脈拍数の測定である。心拍数と脈拍数は厳密には異なる定義を持つが、一般的には同義として使用されることが多い。これは、脈拍数と心拍数が原則として同じ数値になるためである。脈拍数は性別および年齢によって正常値が若干異なるが、通常は一般成人で 60~100 拍/分を基準値としている。男性と女性を比較した場合、男性より女性の方が心拍数は多い傾向にある。個人差はあるが、成人男性の心拍数は 1 分間に 65~70 拍、成人女性の心拍数は 1 分間に 70~80 拍といわれている(Table 16)。

Table 16. 脈拍数の正常値年代別表

年代	脈拍数(1 分間当たり)
新生児	130~140
幼児	110~120
子ども	80~90
成人(男性)	65~75
成人(女性)	70~80 年代別正常値
高齢者	60~70

出典 3: <https://shira-beru.com/myaku/>

脈拍数が多い(早い)場合、1分間の心拍数が100拍を超えると頻脈といい、この状態は「脈が早い」とされる。今回の検証では、この頻脈を緊張のスレシホールドと想定して心拍数が100bpmを超えると会話に介入するトリガーとした。脈拍が早い原因としては、交感神経の働きが優位になっている可能性がある。緊張している場面や興奮している状態のときに心拍数は高くなる。また、ストレスとも大きな関係があり、精神的に強いストレスを感じていると交感神経が興奮し脈拍数が早くなる。さらに、運動や入浴といった日常生活の動作でも脈拍数は上がる。

脈拍数が少ない(遅い)場合、1分間の心拍数が60拍未満の場合は除脈という。副交感神経の状態が優位になっていると脈拍数は少なくなる。就寝中や起床時のリラックス状態では脈拍数は少ない。また、日常的にマラソンなどの長距離競技をしている人は心肺能力が高く、平均して脈拍が遅いとされる。心拍数が少ないと全身に送られる血液量が少なくなるため、酷い場合には意識消失などの状態になることがあるため注意が必要である。

発達障害症例数は年々増えている。中でも言語発話を介したコミュニケーションに症状をもつ³² 神経発達障害の自閉症スペクトラム障害は、現代社会での適応において、多くの課題に阻まれる⁶⁷。その病因としてこれまでの研究が示した知見では神経系のみならず免疫系や代謝系などの遺伝子や環境因子との相互作用による脆弱性など、多岐にわたるが、他の発達障害や精神疾患と同様に根治が非常に難しい特徴を有す。この症状の改善には、前述の包括的な病因のシステム理解と臨界期学習の関わりなどの元に家庭や学校でより早期に病因に合わせ最適化された介入が有効であることが考えられている。⁶⁷⁻⁷⁹ 言語コミュニケーション療育において、デジタルコンテンツを多様に開発できるクラウドインターネット教材は、**ASD** の子どもたちにおける嗜好性の高さからも、ブレイクスルーとなる開発ポテンシャルが見込まれる。近年、子どもの育成環境で生じているインターネット技術の発展は、世界的な歴史的な産業革命をもたらし、社会コミュニケーションの劇的な変化をもたらしているが、一方で、発達障害症例数増加との係わりも多くのレポートが警告していることもあり、自ずと子どもたちの学習システムを変えていく必要がある。ロボティクスのハードウェアと⁸⁰ AIの発展により目覚ましい技術革新が続いて、間もなくロボットが生活を支援する時代の到来が予測され、子どもの養育のみならず、社会コミュニケーション学習も含め多様な分野の教育をも担う可能性がある⁸¹。

そこで、本研究の後半では、ソフトウェア上での社会コミュニケーション療育・教育支援を行うチャットボットの開発を目指して、まず予備的検討として、社会コミュニケーションの最初の課題を搭載したチャットボットを、こども自身についての同世代他者への紹介を音声で伝えるトレーニングとして単純な4種の情報に関わる男のこのアバターの自己紹介を述べたあとに同じカテゴリーに関わる質問を行い、そのこどもの回答を促す機能により試作した。4つの質問の前半は自身の基本情報を尋ねる質問で Q1「あなたのお名前は？」および Q2「あなたは何歳？」、後半は Q3「何が好き？」、および Q4「何色が好き？」と尋ね、自身の嗜好性を他者に伝えることを練習してもらい社会コミュニケーションの基本の初動練習教材機能のチャットボット試作を用意した。初動段階として、返答反応設定は、5秒間音声途切れたら Q1 から Q4 の順に次の質問へ移る機能のみとした。また、将来的には生成 AI 型チャットボットとの接続により、こどもの多様な質問に対する回答に依存したチャットボットの回答を拡張することが想定されるが、予備的検討段階の本研究では、より狭義かつ定型の質問に対する回答を得る過程で、次に示す定量的生理指標に焦点を当てた、社会コミュニケーション機能不全に伴う特徴の抽出により、その機能の何らかの可視化への可能性を目標とした。

我々の心理機能状態を分析し診断する手がかりとする定量指標を心拍に仮説し、そのログ機能を備えたプロトタイプの開発を試みた。静止状態の心拍は年齢依存的に低下することが知られている。一方、心拍は、心理的な変動により自律神経系の支配を受けて変動することが知られている。そこで、本研究において、我々の試作機を介した、これらの複合的な心拍機能への影響を、何らかの自閉症症状を有すこどもたちのグループと大学の IT 技術をこどもに発信する地域イベントに集まった無作為に体験を募り応じたボランティアの子どもたちのグループとの間で比較を行うことで、自閉症に関わる特徴の可視化を試みた。日本においては、発達障害症例数増加に伴い療育介入支援を行う社会福祉サービスのシステムが発展してきており、その施設および社会コミュニケーションに関わる自閉症症状を主訴とする親子の皆様へ協力を得て、試作機を体験して頂いたので、その分析を以下に紹介したい⁸²⁻⁸⁴。

4-2 方法

4-2-1 方法1

4-2-1-1 システム設計

ユーザーが生成 AI と自然なコミュニケーションを行うと、音声会話の内容全体がテキストに変換されデータベースに保存される。また、会話と同時に心拍センサーにセンシングが開始され、心拍数が 100bpm を超えると、会話への介入しユーザーに身体の現在の状態を知らせるアルゴリズムとした。その監視と制御の流れを(Figure 29)に示す。

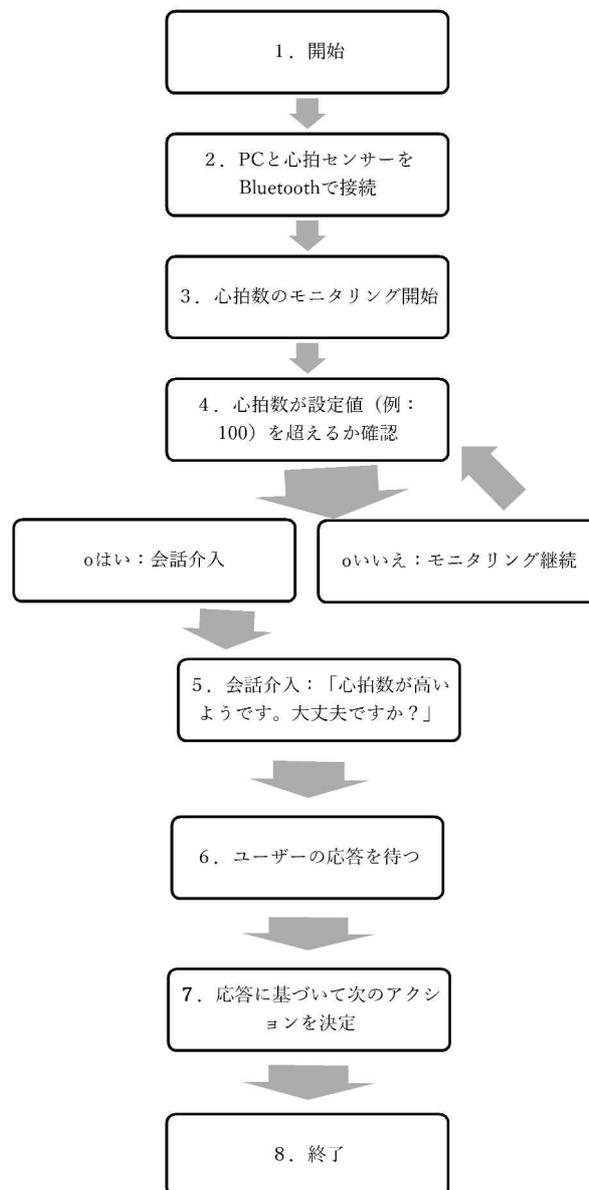


Figure 29. 会話と心拍数モニタリングのシステムフローチャート

本研究の第 4 章に用いたノート PC デバイス概要を以下に示す。

デバイス名	Sony vaio VJS142C12N
プロセッサ	Intel(R) Core(TM) i7-10710U CPU @ 1.10GHz 1.61 GHz
実装 RAM	16.0 GB (15.8 GB 使用可能)
デバイス ID	E549CCA1-7374-4612-9EBD-E64CE1CF5D2F
プロダクト ID	00330-53195-13342-AAOEM
システムの種類	64 ビット オペレーティング システム、x64 ベース プロセッサ
ペンとタッチ	このディスプレイでは、ペン入力とタッチ入力は利用できません
エディション	Windows 11 Pro
バージョン	24H2
OS ビルド	26100.2605
心拍センサー	
Sensor	Ear-dip Heart Rate Sensor MOA210427104
Bluetooth dev	M5Stack Basic M5STACK-BASIC



Figure 30. 心拍センサー

4-2-1-2 会話例・サンプルコード

会話の例:

1. アシスタント(対話型生成 AI): 「こんにちは」
2. アシスタント: 「お元気ですか?」
3. ユーザー: 「元気です。」
4. * 心拍数が 100 を超えている
5. アシスタント: 「心拍数が高いようです。」
6. アシスタント: 「大丈夫ですか?」
7. アシスタント: 「何か心配することはありますか?」

Sample Python Code:

Python

```
import time
import bluetooth
# BluetoothConfiguring the Connection
sensor_address = '00:11:22:33:44:55' # Bluetooth address of the heart rate sensor
port = 1
#Heart rate settings
threshold = 100
def connect_to_sensor(address, port):
    sock = bluetooth.BluetoothSocket(bluetooth.RFCOMM)
    sock.connect((address, port))
    return sock
def read_heart_rate(sock):
    data = sock.recv(1024)
    heart_rate = int(data.decode('utf-8'))
    return heart_rate
def main():
    sock = connect_to_sensor(sensor_address, port)
    while True:
```

```
heart_rate = read_heart_rate(sock)
print(f"Current heart rate: {heart_rate}")
if heart_rate > threshold:
    print("Your heart rate seems to be high. Are you okay?")
    time.sleep(1)
if __name__ == "__main__":
    main()
```

* 上記参考 Python プログラムの参考例。

4-2-2 方法2

この自閉症児への適用に関する研究計画書は、社会福祉法人発達障害支援センター施設倫理審査委員会「自閉症スペクトラム障害児教育支援研究」において承認された(2022-001)である。支援センターでは、センター利用者の中から任意に参加者を募り、本研究プロトタイプでは、親の同意のもと参加を希望していた子ども 14 人(Table 17)、発達障害(グループ DD)を紹介し、コミュニケーション研修の活用を試みた。センターでの通常のサポートサービス中、センターのソーシャルコミュニケーション学習サービスの受信者に関するものを除いて、臨床背景情報は共有されない。本学の技術開発を紹介するイベントで、来場者の子どもを無作為に設定したこの研究プロトコルは、山口大学の一般研究審査委員会(2022-078)で審議され承認された。2022 年秋に山口県で新しいIT 教育ツールを紹介する一般公開の子ども向けイベントが開催され、子どもたちは自分と保護者の同意のもと、ランダムに来場し、試験に参加した(Table 17 ランダム来場者(グループ RV))。各研究メンバーは、承認されたプロトコルを遵守した。

Table 17. 参加者の性別と年齢の平均と標準偏差。

グループ (人数/年齢[歳])	発達障害(DD)	ランダムビジター(RV)
女性	4/ 5.5±1.9 (平均 ± SD*)	8/ 5.9±2.1
男性	10/ 5.0±1.9	4/ 7.0±0.8
両性別計	14/ 5.1±1.9	12/ 6.3±1.8

* スチューデント t-test では、グループ DD と RV の間に有意差なしを確認(*SD:標準偏差)

* 発達障害(英: Developmental disability、DD)

4-2-2-1 会話介入支援システム・プロトタイプ

15V のバッテリー駆動のノート PC(Microsoft Surface Pro 8)は、主に各コンテキスト関連のイラスト画像と子声出力で男の子のアバターを表示し、Python のカスタマイズプログラミングによって制御された Q1 から Q4 までの 4 つのシリアルコンテキストを提供した(Figure 31)。各子どもの参加者は、サポートスタッフ(Figure 31A)の横の教室の机



に数分ほど座っていたが、簡単な事前説明の要約以外は事前の紹介はなかった。スタッフがアプリを起動した後、アバターの Q1 の自己紹介の例が再生され、続いて子ども参加者の名前を尋ねる質問の音声と画像が再生され、5 秒以内に答えるように求められる。音が出ない時間が5秒以上あると、自動的に次の質問文脈に順次切り替わる。これら 4 つの文脈で発達障害児のソーシャル・コミュニケーション・トレーニングを推進するためのデザインコンセプトは、自己紹介を実践するための目標を設定し、アバター・トレーナーの例を参考にしている。

Q1: 相手への直接自己識別。

「はじめまして、太郎です。君の名前は？」

Q2: 年齢ベースの世代属性

「私は 6 歳です。あなたは何歳ですか？」

Q3: カテゴリーに縛られずに自分の好みを共有する。

アバターの例で果物に偏った後

「私はリンゴが好きです。何が好き？」

Q4: 色のカテゴリーに縛られた自分の好みを共有する。

「私は青が好きです。何色が好きですか？」

Figure 31. 心拍数ログ付きコミュニケーショントレーニングシステム

座ったままの子どもが男の子の-avatarからの質問に答える様子を、スタッフのアシストで対応した。Q1 から Q4 の 4 つの自己紹介例と質問回答を促すシリアル表示画像が一連の文脈設定となっている。質問に対する答えの設計コンセプトにおいては、社会に与える影響を推定し、Q1 の「名前」や Q2「年齢」と比較して、Q3「嗜好物」は、選択のカテゴリーの違いだけでなく、例のカテゴリー「くだもの」を、質問で限定しない回答作成の自由度が増す設定であることから、回答にばらつきが生じる可能性が高くなることが予想される設定とした。複雑性が増した Q3 と比べると、Q4 は例と同じカテゴリーを限定した質問と捉えられているため、回答のばらつきが狭まり、回答作成コストが下がると予測される。

4-2-2-2 音声質問時・心拍数測定

心拍クリッププローブ(Grove: Seeed studio、5 ボルト)は、各参加者の好みに応じて、耳たぶまたは人差し指の先端に取り付けられた。心拍数は、ソーシャルコミュニケーショントレーニングと同じ Python プログラミングにより、マイコン(M5 Stack Core)で毎秒測定され、Q1 から Q4 までの-avatarの質問音声の最後にデータが記録された。その結果、各参加者の心拍数は、各子どもの参加者が-avatarから質問を受け取り、5 秒以内に音声で与えられるはずの答えを準備していたときに記録した、神経生理学的反応情報として仮想的に想定された。参加者がプローブの取り外しを希望した場合、心拍プローブは測定不能となり該当しない(N/A)結果データと定義された。

4-2-2-3 ヒートマップ可視化・統計解析

グループ RV と比較したグループ DD の特徴を見つけるために、データ表を年齢依存に配列し、Excel(Microsoft)で赤(高値)と青(低値)の色のヒートマップを使用して視覚化した。これは、Q1 から Q4 までの-avatarの自己紹介例と追加の 4 つの質問回答文脈の各心拍計測値、およびそれらの最小心拍数と最大心拍数の表で、質問のコンテキスト遷移に従って左列から右列へと収集された。年齢依存の心拍数線形回帰方程式を導出した後、統計ソフトウェア R を使用したピアソン積率相関分析により、各有意性を評価した。グループ DD とグループ RV の差は、各性別の子どもの t-test・P 値を使用して評価され、全体的には R を使用して評価された。

4-2-2-4 4質問への回答率

データ表 (Table 18) では、アバターが自己紹介として出題した問題に回答したか (白で「回答(回答)」)、回答しなかったか、問題に合わない回答をしたか (灰色で「回答なし(NR)」) で回答を記録した。各グループの正解率(100%を 1)も表示した。

4-3 結果

4-3-1 音声会話・心拍数トレンドグラフ表示

プロトタイプでは、対話型生成 AI が左側に、ユーザーが右側にいて、各対話キャッチは時間とテキストでディスプレイに表示された (Figure 33)。同時に、音声会話の時点を中心拍数のトレンドグラフに示し、心拍変動が有意に示された場合には会話内容を特定することができた (Figure 34)⁸⁵。対話型生成 AI とユーザーの両方が話すほとんどの会話は、ディスプレイ上で正しく視覚化された。



Figure 32. プロトタイプアプリ 心拍センサーを装着の実施風景

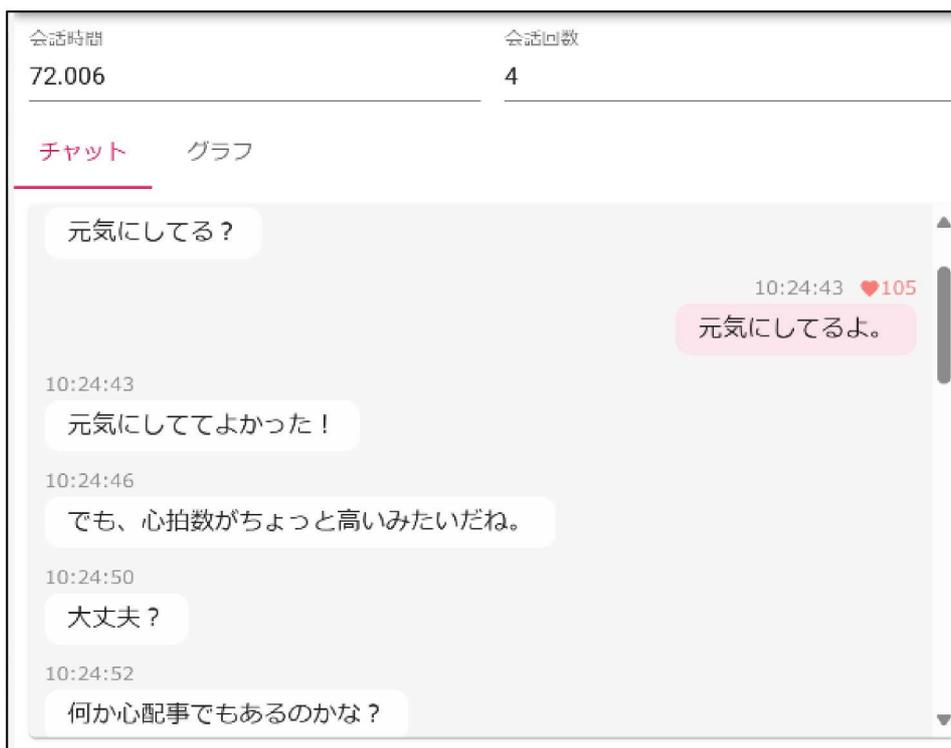


Figure 33. AI とユーザーの会話のテキスト可視化

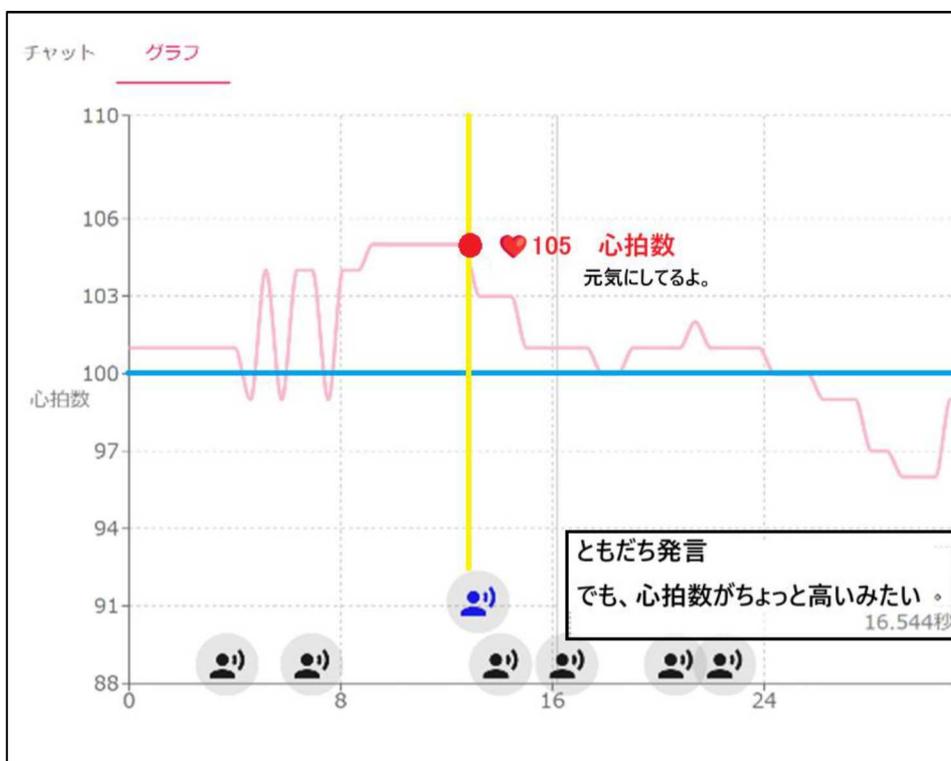


Figure 34. 会話時の心拍数の推移

4-3-2 DD・RV 比較 相関分析

グループ DD とグループ RV について、Q1 から Q4 までの 4 つのコンテキスト遷移ごとに収集された心拍数データを、ヒートマップ表現の赤(高周波)と青(低周波数)の各指標で比較するために年齢別に可視化し、最小値、最大値、最大値と最小値の差を **Table 18** にまとめた。年齢依存の相関をさらに探索するために、**Figure 35** で線形回帰分析によるグループ DD とグループ RV の比較を構築し、ピアソンの製品モーメント相関分析で調査した。その結果、これらのデータにはグループ DD の以下の特徴が浮かび上がった。

4-3-2-1 DD 年齢層別・統計分析

Table 18. 心拍数の測定値と応答率に関連するヒートマップは、グループ RV の心拍数が若い年齢層(赤の傾向)で高く、高齢の年齢層(水色の傾向)でわずかに低くなるのに対し、グループ DD では低い値(濃い青色の細胞)が幅広い年齢層で見られることを示している。この傾向は、**Figure 35** に示す年齢依存の線形回帰分析によって確認でき、グループ RV では、最小 ($y = -4.36x + 114$, $R^2 = 0.420$, $p = 0.0226$) および MAX ($y = -4.57x + 124$, $R^2 = 0.342$, $p = 0.0457$) の値で、Pearson の線形回帰の積モーメント相関分析によって確認される。グループ DD は、最小値($y = 1.97x + 69.4$, $R^2 = 0.0456$, $p = 0.464$) と MAX ($y = 3.95x + 70.9$, $R^2 = 0.201$, $p = 0.108$) の値であるが、有意ではなく、**Table 18** と **Figure 35** との間の統計分析の一貫性を確認する。

4-3-2-2 DD 心拍変動特徴

グループ DD では、**Table 18** と **Figure 35**. 年齢依存性心拍数の線形回帰分析の両方に三角形でマークされた子ども2名が共通な特徴として、最大値と最小値の差が大きく濃い赤で示された(**Table 18**、列「MAX-min」、「値 32」、「値 43」)。さらに、どちらも Q3 で高値を示した。Q3 では、他の文脈よりも複雑な要素の処理が促されるように設定されている文脈設計であった。

4-3-2-3 DD 心拍数測定プローブ

N/A 表記は、心拍数測定プローブが不快で取り外された状況がグループ DD のみであることを示した。

4-3-2-4 DD 男性回答率

Table 18 の主に A(心拍数/分)と B(回答/応答速度)の 2 つの分類データで構成した。回答率のヒートマップ表現では、DD 男児の回答率が文脈 Q3、次に Q4 で特に低かった。

Table 18. 心拍数の測定値と応答率に関連するヒートマップ

A. The child's heart rate response when answering question from the boy avatar										B. Answer (Ans) or No Response (NR)				
swearing Group	Gender	Age	Q1 Name?	Q2 Age?	Q3 Fruit?	Q4 Color?	min	MAX	MAX-min	Q1	Q2	Q3	Q4	
DD	m	2	57	57	N/A	N/A	57	57	0	NR	NR	NR	NR	no speech
DD	f	3	84	84	90	87	84	90	6	NR	Ans	Ans	Ans	
DD	m	3	102	105	110	N/A	102	110	8	NR	NR	NR	NR	no speech
DD	m	4	80	N/A	66	N/A	66	80	14	Ans	Ans	NR	Ans	
DD	m	4	N/A	N/A	75	75	75	75	0	Ans	Ans	Ans	NR	
DD	m	4	N/A	75	54	54	54	75	21	NR	Ans	Ans	Ans	
DD	f	5	90	93	92	105	90	105	15	Ans	Ans	Ans	Ans	
DD	m	5	78	86	106	74	74	106	32	NR	NR	NR	NR	△
DD	m	6	99	98	100	99	98	100	2	Ans	Ans	Ans	Ans	
DD	m	7	98	98	98	101	98	101	3	Ans	NR	NR	Ans	
DD	f	7	102	101	103	105	101	105	4	NR	Ans	NR	Ans	
DD	m	7	90	92	94	95	90	95	5	Ans	Ans	Ans	Ans	
DD	f	7	70	61	72	63	61	72	11	Ans	Ans	Ans	Ans	
DD	m	8	67	63	106	72	63	106	43	NR	NR	NR	NR	△
RV	f	2	106	104	103	112	103	112	9	NR	NR	Ans	Ans	
RV	f	5	107	110	99	95	95	110	15	Ans	Ans	Ans	Ans	
RV	f	5	102	96	102	96	96	102	6	Ans	Ans	Ans	Ans	
RV	f	5	79	77	78	77	77	79	2	NR	NR	Ans	Ans	
RV	f	6	100	115	100	113	100	115	15	NR	NR	Ans	Ans	
RV	m	6	95	95	91	90	90	95	5	Ans	NR	NR	NR	
RV	m	7	107	106	112	103	103	112	9	Ans	Ans	Ans	Ans	
RV	m	7	80	82	89	87	80	89	9	Ans	NR	Ans	Ans	
RV	f	8	83	75	78	84	75	84	9	NR	Ans	Ans	Ans	
RV	f	8	70	76	72	80	70	80	10	Ans	Ans	Ans	Ans	
RV	f	8	83	82	85	84	82	85	3	Ans	Ans	Ans	Ans	
RV	m	8	73	76	80	77	73	80	7	NR	Ans	Ans	Ans	
Mean and Comparison										Answering Rate				
DD	f mean	5.5	80.8	82.0	88.7	87.0	77.3	84.3	7.0	0.5	1	0.75	1	
DD	m mean	5.0	86.8	85.2	90.0	84.3	80.4	94.0	13.6	0.5	0.5	0.4	0.5	
DD	all	5.1	84.8	84.4	89.7	84.5	79.5	91.2	11.7	0.5	0.6	0.5	0.6	
RV	f mean	5.4	97.0	98.1	96.8	96.6	93.0	101.8	8.8	0.5	0.6	1.0	1.0	
RV	m mean	8.0	77.3	77.3	78.8	81.3	75.0	82.3	7.3	0.75	0.5	0.75	0.75	
RV	all	6.3	90.4	91.2	90.8	91.5	87.0	95.3	8.3	0.6	0.6	0.9	0.9	
t-test	f	0.77	0.59	0.50	0.95	0.79	0.71	0.71	0.91					
	m	0.07	0.63	0.60	0.78	0.44	0.40	0.73	0.50					
	all	0.14	0.34	0.31	0.86	0.29	0.22	0.51	0.37					

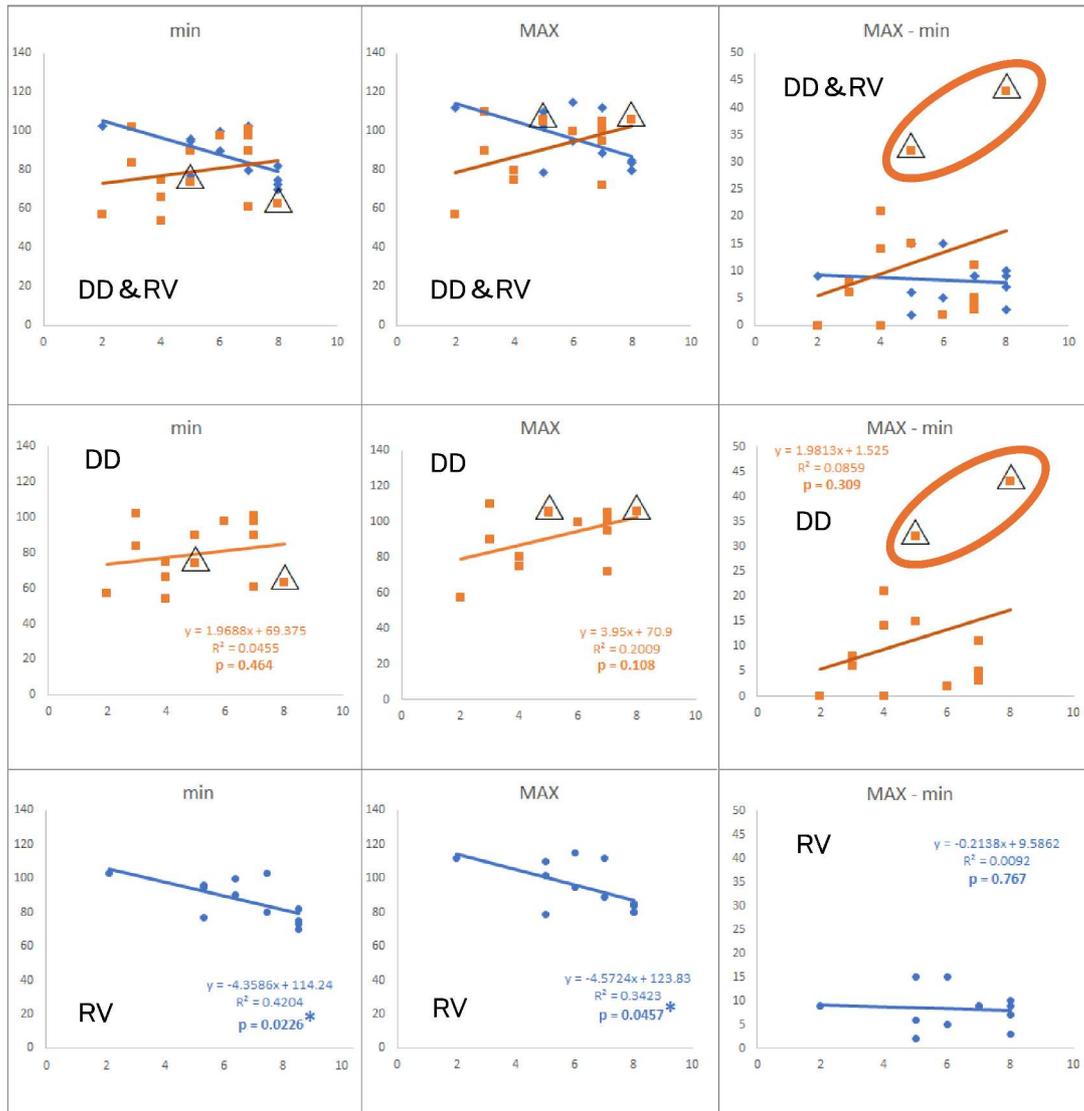


Figure 35. 年齢依存性心拍数の線形回帰分析

最初の列は、4つの文脈での最小心拍数を示している。同様に、2行目と3行目には、それぞれ心拍数の最大値と差が表示される。1行目には、2行目のグループ DD と3行目のグループ RV がオーバーレイされている。年齢相関評価の比較を min、最大 MAX、および、その差分 MAX-min に関して散布図上で線形近似により評価を行った (Figure 35)。その結果、RV 群は min、MAX とともに有意な年齢依存の負相関性が認められた一方、DD 群にはみられなかった。

4-4 考察

心拍モニターを伴うコミュニケーション育成支援のタブレット教材の社会実装に向けた実証試験のためのプロトタイプを開発した。本プロトタイプでは、対話型生成 AI とユーザーとの間の会話を一定の精度でテキスト化し、タブレットに接続された心拍センサーとの心拍変動をデータ連携するための環境を整備できた上で、その心拍計測の心理推量評価系としての可能性を探るために定型文をキャラクターが発話しその応答発言を記録分析し限られた範囲の評価分析を、発達障害児および無作為に参加した子ども間の比較を行った。



Figure 36. 萩プレーパーク 実証試験風景

この研究では、言語コミュニケーションに関わる社会性機能発達の障害症例に向けた、デジタルヒューマンによる同機能を育てる、こども療育システム開発を目指とした予備的基礎プロトタイプの試作と、発達障害児(グループ DD)およびイベントで無作為に参加下さった子どもの協力者(グループ RV)を得て試行を頂き、グループ RV に対するグループ DD の定量的特徴を得る検討を試みた。タブレットPC上で男の子のアバターの画像のディスプレイと音声の出力により、4つの連続し異なる内容の文脈を用意し、同じ男の子の-avatarによる各文脈標的内容の自己紹介をこどもに例示した後、同様な回答をこどもに促すことで、こどもの言語の聞き取りから他者に伝えるための回答構築と発信を介した社会的対話コミュニケーションをトレーニングすることを目的とした、ごく初動的で限定的な教材プロトタイプを試作した。社会コミュニケーションにおいては自他の間の複雑で多様な関係性を参照し理解する認知機能のみならず、自他の社会性において相互に生じる情動を調整する機能も伴い、対話形成の最適化を図

る機能を育てる必要がある。その方向性を教材開発目標とするなかで本初動研究では4つの連続し段階的あるいは不連続とも考えられる文脈の推移として、こどもの回答が予め想定される文脈である、Q1(名前)、Q2(年齢)、Q3(好きな果物、ただし質問時には果物のカテゴリーを除く)、Q4(好きな色)を用意し、想定回答(Ans)に至った、あるいは至らなかった(NR)か、どうかを判断した(Table 18B)。そして、本教材プロトタイプのもう一つの特徴機能の開発を探るために、非常に困難なこどもの内在性の認知心理応答を予測支援することができるかもしれない心拍数のデータの可能性探索を焦点とした。特にアバターによる自己紹介例を聞き取り自身の回答の構築や発信準備を行うタイミングである各文脈でのアバター発声の最終時に絞ってログを行ない、年齢依存性や文脈推移との係わりの評価により、グループ RV に対するグループ DD の特徴探索を試みた(Figure 35A)。

最初にグループ DD の顕著な特徴として、耳タブまたは指先に取り付ける、アスリートや患者用の心拍計測既製品として利用されていることが知られているクリップ型心拍計測プローブに関して、グループ DD は14人中5名が4つの文脈のうち、1回か2回、不快として外したのに対し、グループ RV は全員が全文脈で外さず計測が可能であったことである。このことに関連背景としては、自閉症スペクトラム症候群の体性感覚過敏の有症状者の多さがよく知られている。本結果は一見すると、心拍計測プローブの体性感覚刺激を抑えた形式の選択や開発に向かうべき、と結論づけられるかもしれないが、本研究が目指するトレーニング教材開発の観点からとらえ直してみると、不快ゆえプローブを外したこどもは4歳以下に限られ、さらに2つの文脈以上からは計測できたことから、トレーニングにはむしろ敢えて設定するストレス因子下での社会コミュニケーション構築の学習の意義がある可能性すらも、自己制御学習を課題案とする可能性など言及したい。⁸⁶⁸⁷

心拍に関わる統計的有意なグループ RV に示された休状態での年齢依存的な心拍値の低下(Table 18, Figure 35min、MAX 値)の先行知見とも整合性のあるヒートマップ Figure 35A および上で同じ傾向は、同じクリップ式心拍プローブに、それなりの影響を受けた可能性を考慮した上でも認められた、安定な RV の特徴、すなわち、無作為に参加したグループだけれど一般性が高いこどもの集団であった可能性があるかもしれない。Figure 35 の MAX-min を年齢依存的に線形近似した Figure 35 では、グループ RV が殆ど文脈推移上でのデータの差異が無く、Figure 35 の MAX-min のヒートマップ色が白っぽく、すなわち全体の平均周辺に均一性があるのに対し、グループ

DD では Figure 35 で大きく飛び値を示した子どもや、逆に数名は高年齢側でありながら高心拍数を保ち変動が低い子どもなどのばらつきが認められ、個々の子どもの生理および認知心理状態が多様に異なる状態の反映としての心拍状態が仮説された。Table 18B の回答率評価を重ねると、本データ間ではその相関は全体にないようである。一方、△印で文脈推移における心拍変動が大きいこどもは2名とも、回答を4つのいずれの文脈においても示さなかったが、Q3 において非常に心拍を高く(赤)変動させていることが共通で Q4 では再び心拍が低下していること(青化)から、内省的な自律神経系などの変化が心拍の生理応答信号によりはじめて可視化され他者が定量客観的に検知できた可能性があるのかもしれない。実際、グループ RV では回答率が Q1,Q2 では回答しないこどもが多く存在しが、Q3,Q4 は例外の1名を除き、全員が答えていることから、グループ DD の特に男子の回答の低さが DD の特徴のひとつといえる可能性があり、質の異なる文脈の推移の比較には、社会コミュニケーションの言語を介した認知心理状態と非言語の情動などの情報の短期変動をデジタル情報として投影し扱うとした場合、より詳細なトレーニング支援教材を開発する手がかりとなる技術の可能性もある。発達障害児やあらゆる子どもには比較的デジタルコンテンツへの親和性が知られており、その利益を得る可能性の一方で、社会性コミュニケーション機能不全にもインターネットなどの影響によるリスクを同時に扱い、そのバランス調整を探索することはひとつの鍵になるだろう。今後の開発発展の方向には、現代の革命因子であるチャット型生成 AI の活用が考えられる。一方で、人間以上の能力を有したチャットボット、chat GPT は多くの利益を産んでいるが、人類が手にして浅い時間しか経験していない、この改革的なツールを、必要に応じて分解したりダウングレードしたりと分析の論拠に十分な多様なアプローチプロセスが今後も必要になるであろう⁸⁸⁸⁹。

本研究の限界として、研究協力者の少なさの点や、非常に大きな目標である社会コミュニケーションに関わる要素の少なさがあげられる。チャットボットを使った機械教材が、人類の進化やウェルビーイングへの確かな寄与となっているかは、そのツールの便利さから応用発展が目覚ましい速度で進んでおり、常時モニタリングとディスカッションをする必要がある。本報告は予備的検討段階ではあるが、益の享受のみならず、伴うリスクの仮説と検証を、その一瞬一瞬の成長にあるこどもたちや保護者、多様な市民と共に、最適化を探るための振り返りとディスカッションの一步ずつの進め方例を示したものとする。

第五章 結論

本研究では、一貫して、超複雑系である生物・人間・医療に関わる培養細胞や感情を伴う言語コミュニケーションや心拍生理信号に関わる情報価値創造の処理を、これまでは巧みの技を養って来た人間コンピュータにより扱われていた分野へ、デジタル・AI 技術を活用することで補完や代替の可能性を探った。(Figure 37)

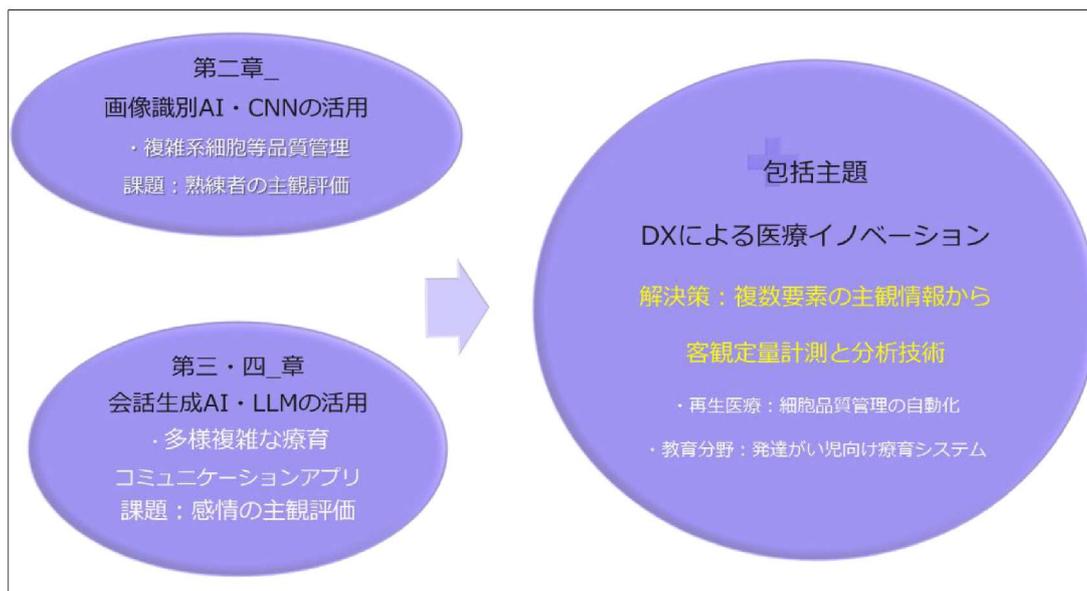


Figure 37. 医療・療育へのデジタル支援技術の開発と検証

第二章での再生医療細胞品質管理システムの開発と検証においては、人間の意思決定や評価には感情や先入観が大きく影響を与えることが示された。具体的には、ヒト間葉系幹細胞の培養サンプルを対象としたコンフルエンシー自動識別定量アプリケーションの評価において、エキスパートの主観的判断が結果にバイアスをもたらすことが示された。エキスパートは、細胞境界の識別においておそらく機械よりも高い能力を持つ一方で、感情や経験に基づく認知心理的バイアスが影響を及ぼし、評価結果にばらつきが生じることが確認された。間葉系幹細胞の培養サンプルを対象に開発されたコンフルエンシー識別定量アプリケーションは、95%以上の正解率を示し、少なくとも個々の細胞識別能力に関わり十分な評価成功率を確認することができた。機械の識別値よりもエキスパートの評価値が高く、主観的判断によるバイアスが影響している可能性が示唆された。これに代わる考察としては、人間と機械の識別感度の違いの影響も考えられ、機械の識別感度をより上げる細胞境界像の強調法などの技術革新が必要である可能性が示唆された。エキスパート 2 名とビギナー 1 名の個性の違いは回帰直線と相関係数により評価することができ、エキスパートの方

が傾き係数が高く相関係数も高い傾向が認められた。また、機械コンフルエンシーに基づく、個人内の分散にコンフルエンシー依存的なバイアスは特に認められない傾向がある。

これらの傾向の可視化には、いずれにしても、機械による再現性の保証された定量分析技術に基盤があり、機械識別の必要性が認められた。ただし、本研究の対象画像サンプル数、エキスパートいずれも少数のため、本研究の初動的示唆を基盤に、さらなる例数を重ねる予定である。また、精度を上げる方法として、今後、人工知能や機械学習を活用することで、再生医療製品の品質管理がより効率的かつ正確に行われるようになることが期待される。そして、機械による細胞画像認識技術を用いて、自動的に細胞の形態や機能を評価することで、クラウド化を取り入れることにより、品質管理システムの普及に伴い膨大な量のデータに基づき、再生医療製品の品質管理がより効率的になり患者全体の医療費の軽減に繋がることが期待できる。

第三章生成 AI 制御のバーチャルコミュニケーショントレーナーと 4 人の子どもとの短い会話の感情的特徴の検証においては、生成 AI である Google BERT を使用した発話言語の感情タイプ識別を伴い、話者や聴者の音声応答遅延時間の指標意義探索を試みた。この遅延は、AI においては AI の処理能力やアルゴリズムの複雑性に起因するものである可能性が示唆され、一般にはリアルタイムでの応答が求められるシステムにおいては遅延短縮方向が目標となるのに対し、むしろ、適切に応答遅延時間の調節が重要である可能性が示唆された。具体的には、アバターと子どもたちのコミュニケーションにおいて、アバターの応答時間が子どもの言葉の認識と発話生成より短いことが示され、相互コミュニケーションにおいてはその調整の必要性が提起された。発話言語の感情タイプの定量的評価の試験では、感情分析手法が導入され「ポジティブ」「ニュートラル」「ネガティブ」のマーカースとして定量化が行われ、例えば、子どもたちとアバターのコミュニケーションにおいて、ポジティブな感情よりも中立的な感情における子どもの応答遅延時間の延長が起こる共通な現象を認め、脳内の認知心理応答処理に影響を与えた可能性が示唆された。

第四章では最初に、対話型生成 AI を用いた対話者の心理的頻脈を含む心拍数上昇を警告する会話型音声可視化システムの設計を行った。本技術開発において、対話型生成 AI とユーザーとの間でインタラクションの時系列を持つテキスト視覚化をプロトタイプアプリにて整備し、初頭作動確認を行った結果、正確な音声識別結果を明示

した。後半では、言語コミュニケーションを介した社会性機能発達の障害症例に向けた、デジタルヒューマンによる同機能療育システム開発を目指した予備的基礎プロトタイプを、内省的認知情動を推量すると仮説した生理指標として耳タブや指先にクリップ式プローブによる心拍計測機能を伴い、試作開発と検証を行った。タブレットPC上で男の子のアバターの画像のディスプレイと音声の出力により、4つの連続し異なる内容の文脈を用意し、アバターによる各文脈標的内容の自己紹介をこどもに例示した後、同様な予測される回答をこどもに促す会話構築と発信を介した社会的対話コミュニケーションのトレーニングを目的とした。発達障害児(グループ DD)およびイベントで無作為に参加下さったこどもの協力者(グループ RV)の定量的特徴を得る試行において、心拍プローブに不快を感じ部分的な文脈における計測不能となったこどもは DDのみで14人中5名存在した。また、4つの文脈はQ1(名前)、Q2(年齢)、Q3(好きな果物、ただし質問時には果物のカテゴリーを除く)、Q4(好きな色)を用意し、想定回答(Ans)に至った、あるいは至らなかった(NR)判断を確認したところ、前半は両グループで半分程度の回答率だが、後半ではグループ RVのみ回答率が上昇した。心拍はグループ RVが休止状態の年齢依存的低下で既報と同様の傾向が見られたのに対し、グループ DDはみられなかった。さらに一部のグループ DDのこどもには、回答表現に関わらず短時間の文脈推移で大きな心拍変動を認め、内省的生理活性が確認された可能性が高い。今後の学習教材開発への文脈設定や心拍指標設計の意義について仮説提示を行うことができたかもしれない。

本研究の根幹となる、超複雑系情報により相乗的機能が構成される再生医療及びコミュニケーション療育へのデジタル支援技術の開発と検証を通じて、これ迄限界だと思われていた常識の壁を乗り越え新たな価値を産み出す可能性をAI/IT技術によって把握することができた。IT活用技術がさらに発展し、医工技術開発において受動的なシステムではなく能動的システムの応用範囲が拡大することが期待される。これにより、AI技術の社会的なインパクトが一層強化されるであろう。AIの活用の意義とさらなる可能性についてAIの活用には大きな意義があり、特にバイアスの軽減や感情の定量化において有用であることが示された。しかし、さらなる可能性として、AIの処理速度の向上やアルゴリズムの最適化が求められる一方で、あえて速度を制御する必要性も見出された。これにより、より迅速かつ正確なデータ処理と共に対象ごとの最適化を伴い、実用化への道が開かれるであろう。本研究の成果として、以下の点が今後期待される。画像識別AIと会話型生成AIを活用することで、従来のシステムでは実

現できなかった高度な学習および識別機能を提供することができる。例えばIT 医工技術を活用し再生医療細胞の品質評価判断時に対話型生成 AI との対話によりエキスパートとの情報と共に安全で安定した品質の再生医療細胞の提供が可能になるシステム構築があげられる。またコミュニケーション療育の現場では対話型生成 AI によるバーチャルヒューマンとの会話だけでなく、コミュニケーションの中で発生した会話の心理機能によって画像、動画、音楽等を生成しよりリアリティーのあるコミュニケーション療育が可能になるであろう。

参考文献

1. Jonkman, J. E. N. *et al.* An introduction to the wound healing assay using live-cell microscopy. *Cell Adh Migr* **8**, 440–451 (2014).
2. Alzubaidi, L. *et al.* Review of deep learning: concepts, CNN architectures, challenges, applications, future directions. *Journal of Big Data* **2021 8:18**, 1–74 (2021).
3. Srivastava, S. *et al.* Comparative analysis of deep learning image detection algorithms. *J Big Data* **8**, (2021).
4. Younesi, A. *et al.* A Comprehensive Survey of Convolutions in Deep Learning: Applications, Challenges, and Future Trends. *IEEE Access* **12**, 41180–41218 (2024).
5. Glicksman, M. A. Induced Pluripotent Stem Cells: The Most Versatile Source for Stem Cell Therapy. *Clin Ther* **40**, 1060–1065 (2018).
6. Nuti, N., Corallo, C., Chan, B. M. F., Ferrari, M. & Gerami-Naini, B. Multipotent Differentiation of Human Dental Pulp Stem Cells: a Literature Review. *Stem Cell Reviews and Reports* vol. 12 Preprint at <https://doi.org/10.1007/s12015-016-9661-9> (2016).
7. Harris, D. & Rogers, I. Umbilical cord blood: a unique source of pluripotent stem cells for regenerative medicine. *Curr Stem Cell Res Ther* **2**, 301–309 (2007).
8. Takahashi, K. & Yamanaka, S. Induction of pluripotent stem cells from mouse embryonic and adult fibroblast cultures by defined factors. *Cell* **126**, 663–676 (2006).
9. Battey, J., Cole, L. & Goldthwaite, C. A. The Clinical application of pluripotent cells: The promise and The Challenges. (2008).
10. Zhu, W. *et al.* Mesenchymal stem cells derived from bone marrow favor tumor cell growth in vivo. *Exp Mol Pathol* **80**, 267–274 (2006).
11. Taléns-Visconti, R. *et al.* Hepatogenic differentiation of human mesenchymal stem cells from adipose tissue in comparison with bone marrow mesenchymal stem cells. *World J Gastroenterol* **12**, 5834–5845 (2006).
12. Singh, T. S., Sathyamoorthy, O. R., Eswari, S., Basha, S. H. & Parthiban, M. In vitro Culture and Morphometry of Porcine Adipose Derived Mesenchymal Stem Cells (pAD-MSCs). *Indian J Anim Res* (2022) doi:10.18805/IJAR.B-4752.
13. Miura, M. *et al.* Bone marrow-derived mesenchymal stem cells for regenerative medicine in craniofacial region. *Oral Dis* **12**, 514–522 (2006).

14. Dazzi, F., Ramasamy, R., Glennie, S., Jones, S. P. & Roberts, I. The role of mesenchymal stem cells in haemopoiesis. *Blood Rev* **20**, 161–171 (2006).
15. Schumann, D., Kujat, R., Nerlich, M. & Angele, P. Mechanobiological conditioning of stem cells for cartilage tissue engineering. *Biomed Mater Eng* (2006).
16. Vojtaššák, J. *et al.* Autologous biograft and mesenchymal stem cells in treatment of the diabetic foot. in *Neuroendocrinology Letters* vol. 27 (2006).
17. Uccelli, A., Moretta, L. & Pistoia, V. Immunoregulatory function of mesenchymal stem cells. *European Journal of Immunology* vol. 36 Preprint at <https://doi.org/10.1002/eji.200636416> (2006).
18. Rapier, C. E., Jagadeesan, S., Vatine, G. & Ben-Yoav, H. Microfluidic channel sensory system for electro-addressing cell location, determining confluency, and quantifying a general number of cells. *Sci Rep* **12**, (2022).
19. Lee, P., Lin, R., Moon, J. & Lee, L. P. Microfluidic alignment of collagen fibers for in vitro cell culture. *Biomed Microdevices* **8**, 35–41 (2006).
20. Jonkman, J. E. N. *et al.* Cell Adhesion & Migration An introduction to the wound healing assay using livecell microscopy An introduction to the wound healing assay using livecell microscopy. *Cell Adh Migr* **8**, (2014).
21. Ender, E. E., Nealey, P. F. & Yin, J. Fidelity of micropatterned cell cultures. *J Biomed Mater Res A* **74A**, 92–103 (2005).
22. Kunimatsu, R. *et al.* Comparative characterization of stem cells from human exfoliated deciduous teeth, dental pulp, and bone marrow-derived mesenchymal stem cells. *Biochem Biophys Res Commun* **501**, 193–198 (2018).
23. Edlund, C. *et al.* LIVECell-A large-scale dataset for label-free live cell segmentation. *Nat Methods* **18**, 1038–1045 (2021).
24. Simon, M., Houghton, S. M. & Aquino, K. Cognitive biases, risk perception, and venture formation: How individuals decide to start companies. *J Bus Ventur* **15**, 113–134 (2000).
25. Qazi, T. H., Mooney, D. J., Duda, G. N. & Geissler, S. Biomaterials that promote cell-cell interactions enhance the paracrine function of MSCs. *Biomaterials* **140**, 103–114 (2017).
26. Park, G. & Thayer, J. F. From the heart to the mind: Cardiac vagal tone modulates top-down and bottom-up visual perception and attention to emotional stimuli. *Frontiers in Psychology* vol. 5 Preprint at <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00278> (2014).
27. Fabijańska, A. Segmentation of corneal endothelium images using a U-Net-

- based convolutional neural network. *Artif Intell Med* **88**, 1–13 (2018).
28. Takemoto, Y., Imai, Y., Kanie, K. & Kato, R. Predicting quality decay in continuously passaged mesenchymal stem cells by detecting morphological anomalies. *J Biosci Bioeng* **131**, 198–206 (2021).
 29. Khan, O. F., Chamberlain, M. D. & Sefton, M. V. Toward an in vitro vasculature: differentiation of mesenchymal stromal cells within an endothelial cell-seeded modular construct in a microfluidic flow chamber. *Tissue Eng Part A* **18**, 744–756 (2012).
 30. Ker, D. F. E. *et al.* An Engineered Approach to Stem Cell Culture: Automating the Decision Process for Real-Time Adaptive Subculture of Stem Cells. *PLoS One* **6**, e27672 (2011).
 31. Tomoto, F. *et al.* Stress Brain and Behavior Human motion tracking AI revealed that a hand-made swing in Nature led to the emergence of children's cooperative society. *Stress and Behavior" ISBS Conference* **3**, (230AD).
 32. Hua, Z. *et al.* Four Temporary Waterslide Designs Adapted to Different Slope Conditions to Encourage Child Socialization in Playgrounds. *J Vis Exp* **2022**, e64235 (2022).
 33. Tsui, Y. Y. yau & Cheng, C. Internet Gaming Disorder, Risky Online Behaviour, and Mental Health in Hong Kong Adolescents: The Beneficial Role of Psychological Resilience. *Front Psychiatry* **12**, 722353 (2021).
 34. Vaswani, A. *et al.* Attention Is All You Need. *Adv Neural Inf Process Syst* **2017-December**, 5999–6009 (2017).
 35. Openai, A. R., Openai, K. N., Openai, T. S. & Openai, I. S. Improving Language Understanding by Generative Pre-Training.
 36. (PDF) Speech and Language Processing: An Introduction to Natural Language Processing, Computational Linguistics, and Speech Recognition. https://www.researchgate.net/publication/200111340_Speech_and_Language_Processing_An_Introduction_to_Natural_Language_Processing_Computational_Linguistics_and_Speech_Recognition.
 37. Dwivedi, Y. K. *et al.* Opinion Paper: “So what if ChatGPT wrote it?” Multidisciplinary perspectives on opportunities, challenges and implications of generative conversational AI for research, practice and policy. *Int J Inf Manage* **71**, 102642 (2023).
 38. Kamalov, F., Santandreu Calonge, D. & Gurrib, I. New Era of Artificial Intelligence in Education: Towards a Sustainable Multifaceted Revolution. *Sustainability* **2023, Vol. 15, Page 12451** **15**, 12451 (2023).

39. Lv, Z. Generative artificial intelligence in the metaverse era. *Cognitive Robotics* **3**, 208–217 (2023).
40. Brown, T. B. *et al.* Language Models are Few-Shot Learners. *Adv Neural Inf Process Syst* **2020-December**, (2020).
41. Baldassarre, M. T., Caivano, D., Fernandez Nieto, B., Gigante, D. & Ragone, A. The Social Impact of Generative AI: An Analysis on ChatGPT. in *ACM International Conference Proceeding Series* (2023). doi:10.1145/3582515.3609555.
42. Devlin, J., Chang, M. W., Lee, K. & Toutanova, K. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding. *NAACL HLT 2019 - 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies - Proceedings of the Conference* **1**, 4171–4186 (2018).
43. Hohenstein, J. *et al.* Artificial intelligence in communication impacts language and social relationships. *Scientific Reports* **2023 13:1 13**, 1–9 (2023).
44. Privitera, A. J. ; *et al.* AI and Aphasia in the Digital Age: A Critical Review. *Brain Sciences* **2024, Vol. 14, Page 383 14**, 383 (2024).
45. Fujii, S. & Wan, C. Y. The role of rhythm in speech and language rehabilitation: The SEP hypothesis. *Frontiers in Human Neuroscience* vol. 8 Preprint at <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00777> (2014).
46. Kotz, S. A., Ravignani, A. & Fitch, W. T. The Evolution of Rhythm Processing. *Trends in Cognitive Sciences* vol. 22 896–910 Preprint at <https://doi.org/10.1016/j.tics.2018.08.002> (2018).
47. Li, Z. *et al.* Complex interplay of neurodevelopmental disorders (NDDs), fractures, and osteoporosis: a mendelian randomization study. *BMC Psychiatry* **24**, (2024).
48. Devlin, J., Chang, M.-W., Lee, K. & Toutanova, K. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding. (2018).
49. He, J. & Hu, H. MF-BERT: Multimodal Fusion in Pre-Trained BERT for Sentiment Analysis. *IEEE Signal Process Lett* **29**, 454–458 (2022).
50. Ancilin, J. & Milton, A. Improved speech emotion recognition with Mel frequency magnitude coefficient. *Applied Acoustics* **179**, (2021).
51. Sato, N. & Obuchi, Y. *Emotion Recognition Using Mel-Frequency Cepstral Coefficients. Journal of Natural Language Processing* vol. 2 (2007).
52. *Speech Emotion Recognition Using Convolutional Neural Network and Its Use Case in Digital Healthcare.*

53. Yun, H. I. & Park, J. S. End-to-end emotional speech recognition using acoustic model adaptation based on knowledge distillation. *Multimed Tools Appl* **82**, 22759–22776 (2023).
54. Zhong, P., Wang, D. & Miao, C. Knowledge-Enriched Transformer for Emotion Detection in Textual Conversations. (2019).
55. Udahemuka, G., Djouani, K. & Kurien, A. M. Multimodal Emotion Recognition Using Visual, Vocal and Physiological Signals: A Review. *Applied Sciences (Switzerland)* vol. 14 Preprint at <https://doi.org/10.3390/app14178071> (2024).
56. Maghaydah, S., Al-Emran, M., Maheshwari, P. & Al-Sharafi, M. A. Factors affecting metaverse adoption in education: A systematic review, adoption framework, and future research agenda. *Heliyon* vol. 10 Preprint at <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28602> (2024).
57. Tao, T. *et al.* Elderly Body Movement Alteration at 2nd Experience of Digital Art Installation with Cognitive and Motivation Scores. *J — Multidisciplinary Scientific Journal* **3**, 138–150 (2020).
58. Mirzaei, S. S., Pakdaman, S., Alizadeh, E. & Pouretamad, H. A systematic review of program circumstances in training social skills to adolescents with high-functioning autism. *International Journal of Developmental Disabilities* vol. 68 237–246 Preprint at <https://doi.org/10.1080/20473869.2020.1748802> (2022).
59. Conde, M. & Rodríguez-Sedano, F. J. Is learning analytics applicable and applied to education of students with intellectual/developmental disabilities? A systematic literature review. *Comput Human Behav* **155**, (2024).
60. Chhetri, B., Goyal, L. M. & Mittal, M. How machine learning is used to study addiction in digital healthcare: A systematic review. *International Journal of Information Management Data Insights* vol. 3 Preprint at <https://doi.org/10.1016/j.jjime.2023.100175> (2023).
61. Mohammad, S., Jan, R. A. & Alsaedi, S. L. Symptoms, Mechanisms, and Treatments of Video Game Addiction. *Cureus* (2023) doi:10.7759/cureus.36957.
62. Shuaib, A., Arian, H. & Shuaib, A. The increasing role of artificial intelligence in health care: Will robots replace doctors in the future? *Int J Gen Med* **13**, 891–896 (2020).
63. Harzheim, J. A. What Does It Mean to Be Human Today? *Cambridge Quarterly of Healthcare Ethics* Preprint at <https://doi.org/10.1017/S0963180124000100> (2024).
64. Alshanskaia, E. I., Zhozhikashvili, N. A., Polikanova, I. S. & Martynova, O. V.

- Heart rate response to cognitive load as a marker of depression and increased anxiety. *Front Psychiatry* **15**, 1355846 (2024).
65. Koshihara, M. *et al.* Blood Glucose Dependence on Emotional Behaviors and Body Surface Temperatures in Common Marmoset's Socio-Psychological Learning with Peers - for 'Development of Human-Environment Interface by Sensing and Multivariate Analysis of Bio-Ecosystem' -. *ECS Trans* **50**, (2013).
 66. Honda, A., Masaki, H. & Yamazaki, K. Recommendation of occupational therapy tasks based on autonomic nervous activity. *The Japanese Journal of Health Psychology* **13**, 9–18 (2000).
 67. Koshihara, M. *et al.* Peer attachment formation by systemic redox regulation with social training after a sensitive period. *Scientific Reports* **2013 3:13**, 1–8 (2013).
 68. Mimura, K. Multivariate PCA Analysis Combined with Ward's Clustering for Verification of Psychological Characterization in Visually and Acoustically Social Contexts. *J Clin Toxicol* **03**, (2013).
 69. A Sensitive Period of Peer-Social Learning. <https://www.longdom.org/open-access/a-sensitive-period-of-peer-social-learning-2161-0495.1000158.pdf>.
 70. Karino, G. *et al.* Common marmosets develop age-specific peer social experiences that may affect their adult body weight adaptation to climate. *Stress, Brain and Behavior* **3**, (2015).
 71. Koshihara, M. *et al.* A Susceptible Period of Photic Day-Night Rhythm Loss in Common Marmoset Social Behavior Development. *Front Behav Neurosci* **14**, 539411 (2021).
 72. Koshihara, M. *et al.* Socio-emotional development evaluated by Behaviour Output analysis for Quantitative Emotional State Translation (BOUQUET): Towards early diagnosis of individuals with developmental disorders. *OA Autism* **1**, (2013).
 73. Peer-Social Network Development Revealed by the Brain Multivariate Correlation Map with 10 Monoamines and 11 Behaviors. <https://www.longdom.org/open-access/peer-social-network-development-revealed-by-the-brain-multivariate-monoamines-and-behaviors-2161-0495.1000161.pdf>.
 74. Karino, G. *et al.* Inexpensive Home Infrared Living/Environment Sensor with Regional Thermal Information for Infant Physical and Psychological Development. *International Journal of Environmental Research and Public Health* **2020, Vol. 17, Page 6844** **17**, 6844 (2020).
 75. Koshihara, M. *et al.* A cross-species socio-emotional behaviour development

- revealed by a multivariate analysis. *Scientific Reports* 2013 3:13, 1–7 (2013).
76. Koshihara, M. *et al.* Susceptible period of socio-emotional development affected by constant exposure to daylight. *Neuroscience Research* vol. 93 Preprint at <https://doi.org/10.1016/j.neures.2014.09.011> (2015).
 77. Senoo, A. *et al.* Effects of constant daylight exposure during early development on marmoset psychosocial behavior. *Prog Neuropsychopharmacol Biol Psychiatry* **35**, 1493–1498 (2011).
 78. Koshihara, M. *et al.* Psycho-Cognitive Intervention for ASD from Cross-Species Behavioral Analyses of Infants, Chicks and Common Marmosets. *CNS Neurol Disord Drug Targets* **15**, (2016).
 79. Tseng, A., Biagianni, B., Francis, S. M., Conelea, C. A. & Jacob, S. Social Cognitive Interventions for Adolescents with Autism Spectrum Disorders: A Systematic Review. *Journal of Affective Disorders* vol. 274 Preprint at <https://doi.org/10.1016/j.jad.2020.05.134> (2020).
 80. Dell’Osso, L. *et al.* Autism Spectrum, Hikikomori Syndrome and Internet Gaming Disorder: Is There a Link? *Brain Sciences* vol. 13 Preprint at <https://doi.org/10.3390/brainsci13071116> (2023).
 81. Gómez-Espinosa, A., Moreno, J. C. & Pérez-de la Cruz, S. Assisted Robots in Therapies for Children with Autism in Early Childhood. *Sensors* vol. 24 Preprint at <https://doi.org/10.3390/s24051503> (2024).
 82. Grabowski, K. *et al.* Emotional expression in psychiatric conditions: New technology for clinicians PCN Psychiatry and Clinical Neurosciences. *Psychiatry Clin Neurosci* **73**, (2018).
 83. Sarganas, G., Schaffrath Rosario, A. & Neuhauser, H. K. Resting Heart Rate Percentiles and Associated Factors in Children and Adolescents. *Journal of Pediatrics* **187**, (2017).
 84. Shahimi, N. H. *et al.* Association between mental illness and blood pressure variability: a systematic review. *BioMedical Engineering Online* vol. 21 Preprint at <https://doi.org/10.1186/s12938-022-00985-w> (2022).
 85. Trotman, G. P. *et al.* Anxiety, Stress, & Coping An International Journal Associations between heart rate, perceived heart rate, and anxiety during acute psychological stress Associations between heart rate, perceived heart rate, and anxiety during acute psychological stress. (2019) doi:10.1080/10615806.2019.1648794.
 86. Mikkelsen, M., Wodka, E. L., Mostofsky, S. H. & Puts, N. A. J. Autism spectrum disorder in the scope of tactile processing. *Developmental Cognitive*

Neuroscience vol. 29 140–150 Preprint at
<https://doi.org/10.1016/j.dcn.2016.12.005> (2018).

87. Fadlalmola, H. A. *et al.* Effects of Massage on Self-regulatory Difficulties, Tactile and Oral Abnormalities, and Parenting Stress in Children with Autism Spectrum Disorder (ASD): A Systematic Review and Meta-analysis. *International Journal of Therapeutic Massage & Bodywork Research Education & Practice* **17**, 4–19 (2024).
88. Sarganas, G., Schaffrath Rosario, A. & Neuhauser, H. K. Resting Heart Rate Percentiles and Associated Factors in Children and Adolescents. *Journal of Pediatrics* **187**, 174-181.e3 (2017).
89. *Verhaltens-Und Fertigkeitenbasierte Frühinterventionen Bei Kindern Mit Autismus Behavioural and Skill-Based Early Interventions in Children with Autism Spectrum Disorders.*

謝辞

本論文の作成にあたり、多くの方々にご指導ご鞭撻を賜りました。

・指導教官の山口大学創成科学研究科 小柴満美子准教授には、終始適切なお指導を賜りました。ここに深謝の意を表します。

・同学科、藤井 文武教授 大木 順司教授 間普 真吾教授 森田 実准教授には、本論文の作成にあたり、副査として適切なお助言を賜りました。ここに感謝の意を表します。

・本研究に使用する機材やソフトウェアの開発においてご協力いただきました株式会社アステック 細胞科学研究所 坂井 孝則氏 朴 晶淑氏に感謝の意を表します。

・本研究に使用するソフトウェアの開発においてご支援をいただきました、株式会社イノテックの社員の皆様に感謝の意を表します。

・対話型生成 AI アプリケーションの現地検証においてご協力いただきました。社会福祉法人発達障害支援センター施設(発達障害サポートセンター 未来図)の職員の皆様および現地での検証に参加いただいた方々に感謝の意を表します。

・対話型生成 AI アプリケーションの現地検証においてご協力いただきました。萩市プレーパークの職員の皆様および現地での検証に参加いただいた方々に感謝の意を表します。

最後に、所属する小柴ゼミのみなさまには多くのご支援をいただきました。お礼申し上げます。ありがとうございました。

補足資料

第二章 参考プログラムソース

1. 256×256 画像スプリットおよび2値化処理プログラム (Python 3.11.3)

```
import os
from PIL import Image, ImageFilter, ImageOps

# 指定したフォルダー内の画像をすべて 256×256 サイズにスプリットして保存する関数
def split_images_in_folder(folder_path):
    print("フォルダーを処理中:", folder_path) # デバッグメッセージ
    # フォルダー内のすべてのファイルを取得
    files = os.listdir(folder_path)
    print("見つけたファイル:", files) # デバッグメッセージ

    # 画像ファイルを処理
    for file_name in files:
        # ファイルのフルパスを取得
        file_path = os.path.join(folder_path, file_name)

        # 画像ファイルかどうかを確認
        if os.path.isfile(file_path) and
file_name.lower().endswith(('.png', '.jpg', '.jpeg')):
            print("ファイルを処理中:", file_path) # デバッグメッセージ

            try:
                # 画像を開く
                img = Image.open(file_path)

                # ソフトフィルタを適用(ガウシアンブラー)
                img = img.filter(ImageFilter.GaussianBlur(2))

                # 画像の幅と高さを取得
                width, height = img.size

                # 画像を 256×256 サイズにスプリット
                for i in range(0, width, 256):
```

```

for j in range(0, height, 256):
    # スプリットされた画像の領域を定義
    box = (i, j, i + 256, j + 256)

    # スプリットされた画像が指定サイズを満たすか確認
    if i + 256 <= width and j + 256 <= height:
        # スプリットされた画像を切り取る
        split_img = img.crop(box)

        # 平坦化処理を適用
        split_img = ImageOps.equalize(split_img)

        # 指定したしきい値で二値化を適用
        threshold = 30 # しきい値を設定
        split_img = split_img.convert('L')
        split_img = split_img.point(lambda x: 255 if
x > threshold else 0, '1')

        # ノイズと思われる 5 ピクセル以下の領域を削除
        split_img =
split_img.filter(ImageFilter.MinFilter(1))

        # 新しいフォルダーのパスを作成(元のファイル名ごとにフ
フォルダーを作成)
        new_folder_path = os.path.join(folder_path,
file_name.split('.')[0])
        if not os.path.exists(new_folder_path):
            os.makedirs(new_folder_path)

        # スプリットされた画像の保存パスを作成
        split_img_file_name =
f"{file_name.split('.')[0]}_{i}_{j}.jpeg"
        split_img_file_path =
os.path.join(new_folder_path, split_img_file_name)

        # スプリットされた画像を JPEG 形式で保存

```

```

        split_img.save(split_img_file_path, 'JPEG')
        print("スプリットされた画像を保存:",
split_img_file_path) # デバッグメッセージ
    except Exception as e:
        print(f"エラーが発生しました: {e}")

# 使用例:
# フォルダー内の画像をスプリットして保存する
split_images_in_folder('C:/ABC_image2/C_Gray')

```

第二章 参考プログラム

2. CNN 混同行列・Epoch プログラム (Python 3.11.3)

```

### 設定
まず、学習用、検証用、予測用の画像ディレクトリと、ヒートマップ画像の保存先ディレクトリを設定
します。また、学習画像のサイズとエポック数も指定します。

```python
学習用画像ディレクトリ
training_directory = 'C:/ABC_image/dataset2/training_set'

検証用画像ディレクトリ
test_directory = 'C:/ABC_image/dataset2/test_set'

予測用画像ディレクトリ
predict_directory = 'C:/ABC_image/dataset2/prediction'

ヒートマップ画像保存先ディレクトリ
save_plot_directory = 'C:/ABC_image/dataset2/output2'

学習画像サイズ縦
target_size_hight = 256

学習画像サイズ横

```

```

target_size_width = 256

エポック数
epochs = 35
```

### ライブラリのインストール
必要なライブラリをインストールします。

```python
pip install numpy scipy scikit-learn tensorflow keras seaborn pandas
matplotlib
```

### ライブラリのインポート
必要なライブラリをインポートします。

```python
import os
import numpy as np
import pandas as pd
import tensorflow as tf
from tensorflow.keras.preprocessing.image import ImageDataGenerator
from sklearn.metrics import confusion_matrix, accuracy_score
from keras.preprocessing import image
import seaborn as sns
import matplotlib.pyplot as plt
```

## データ前処理

### 学習セットの前処理
学習用画像データを前処理します。画像のリスケール、シアー変換、ズーム、水平反転を行います。

```python
```

```

```

train_datagen = ImageDataGenerator(rescale = 1./255,
                                   shear_range = 0.2,
                                   zoom_range = 0.2,
                                   horizontal_flip = True)
training_set = train_datagen.flow_from_directory(training_directory,
                                                target_size =
(target_size_high, target_size_width),
                                                batch_size = 32,
                                                class_mode = 'binary')
'''

### テストセットの前処理
検証用画像データを前処理します。画像のリスケールを行います。

```python
test_datagen = ImageDataGenerator(rescale = 1./255)
test_set = test_datagen.flow_from_directory(test_directory,
 target_size =
(target_size_high, target_size_width),
 batch_size = 32,
 class_mode = 'binary')
'''

CNN の構築

CNN の初期化
CNN モデルを初期化します。

```python
cnn = tf.keras.models.Sequential()
'''

### 畳み込み層の追加
最初の畳み込み層を追加します。

```python

```

```
cnn.add(tf.keras.layers.Conv2D(filters=32, kernel_size=3,
activation='relu', input_shape=[target_size_hight, target_size_width,
3]))
```
```

プーリング層の追加

プーリング層を追加します。

```
```python
cnn.add(tf.keras.layers.MaxPool2D(pool_size=2, strides=2))
```
```

2 番目の畳み込み層の追加

2 番目の畳み込み層とプーリング層を追加します。

```
```python
cnn.add(tf.keras.layers.Conv2D(filters=32, kernel_size=3,
activation='relu'))
cnn.add(tf.keras.layers.MaxPool2D(pool_size=2, strides=2))
```
```

平坦化

平坦化層を追加します。

```
```python
cnn.add(tf.keras.layers.Flatten())
```
```

全結合層の追加

全結合層を追加します。

```
```python
cnn.add(tf.keras.layers.Dense(units=target_size_hight,
activation='relu'))
```
```

```

### 出力層の追加
出力層を追加します。

```python
cnn.add(tf.keras.layers.Dense(units=1, activation='sigmoid'))
```

## CNN のトレーニング

### CNN のコンパイル
CNN モデルをコンパイルします。

```python
cnn.compile(optimizer = 'adam', loss = 'binary_crossentropy', metrics =
['accuracy'])
```

### CNN のトレーニングと評価
学習セットで CNN をトレーニングし、検証セットで評価します。

```python
history = cnn.fit(x=training_set, validation_data=test_set,
epochs=epochs)
```

## 予測

### 予測と評価
予測ディレクトリ内の画像を予測し、混同行列と精度を計算します。

```python
import os
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns

```

```

from tensorflow.keras.preprocessing import image
from sklearn.metrics import confusion_matrix, accuracy_score

予測ディレクトリのリストを取得
predict_directories = os.listdir(predict_directory)
classes = training_set.class_indices

y_true = []
y_pred = []

各ディレクトリ内の画像を予測
for dir in predict_directories:
 target_dir = os.path.join(predict_directory, dir)
 files = os.listdir(target_dir)

 for file in files:
 file_path = os.path.join(target_dir, file)
 test_image = image.load_img(file_path,
target_size=(target_size_hight, target_size_width))
 test_image = image.img_to_array(test_image)
 test_image = np.expand_dims(test_image, axis=0)
 test_image = test_image / 255.0 # 画像を正規化

 result = cnn.predict(test_image)
 y_true.append(classes[dir])
 y_pred.append(1 if result[0][0] > 0.5 else 0)

y_true と y_pred を使って混同行列や精度を計算
matrix = confusion_matrix(y_true, y_pred)
labels = [v for v, _ in training_set.class_indices.items()]

混同行列をデータフレームに変換
cm = pd.DataFrame(matrix, columns=labels, index=labels)

全体の accuracy を計算
overall_accuracy = accuracy_score(y_true, y_pred)

```

```

マトリックスごとの accuracy を計算
matrix_accuracy = matrix.astype('float') / matrix.sum(axis=1)[:,
np.newaxis]

混同行列のヒートマップを作成
plt.figure(figsize=(10, 7))
ax = sns.heatmap(cm, annot=True, cmap='Blues', fmt='d',
cbar_kws={'label': 'Scale'}, annot_kws={"size": 30})

グラフに全体の accuracy 平均値を追加
plt.title(f'Confusion Matrix\nOverall Accuracy: {overall_accuracy:.2%}',
fontsize=21)

マトリックスごとの accuracy をグラフに記載
for i in range(matrix.shape[0]):
 for j in range(matrix.shape[1]):
 text_color = 'white' if cm.iloc[i, j] > cm.values.max() / 2 else
'black'
 ax.text(j + 0.5, i + 0.3, f'{matrix_accuracy[i, j]:.2%}',
 horizontalalignment='center', verticalalignment='center',
color=text_color, fontsize=25)

plt.xlabel("Prediction", fontsize=19)
plt.ylabel("Actually", fontsize=19)
plt.xticks(fontsize=19)
plt.yticks(fontsize=19)

プロットを保存するディレクトリを作成(存在しない場合)
save_plot_directory = "C:/ABC_image/dataset2/output2" # ここで正しいパスを指
定
os.makedirs(save_plot_directory, exist_ok=True)

混同行列のヒートマップを画像ファイルとして保存
plt.savefig(os.path.join(save_plot_directory, "confusion_matrix.png"))

```

```

plt.show()

学習履歴の保存とプロット
history_pd = pd.DataFrame({
 "epochs": list(range(1, epochs+1)),
 "training_accuracy": history.history['accuracy'],
 "validation_accuracy": history.history['val_accuracy'],
})
history_pd.to_csv(os.path.join(save_plot_directory,
"prediction_history.csv"), index=False)
print(history_pd)

トレーニングと検証の精度をプロット
plt.plot(history_pd["epochs"], history_pd["training_accuracy"], 'b',
label='training_accuracy acc')
plt.plot(history_pd["epochs"], history_pd["validation_accuracy"], 'r',
label='validation_accuracy acc')
plt.title(f'Training and validation accuracy (Epochs: {epochs})',
fontsize=18)
plt.legend()

精度のプロットを画像ファイルとして保存
plt.savefig(os.path.join(save_plot_directory, "accuracy.png"))

```

## 図表目次

FIGURE 1. 第1次 AI ブーム～第4次 AI ブームの歴史.....	12
FIGURE 2. 主な生成 AI サービスの種類と提供技術 .....	13
FIGURE 3. 再生医療とコミュニケーション療育へのイノベーション要件提示 .....	13
FIGURE 4. CNN 基本構造 .....	17
FIGURE 5. 生成 AI の種類.....	18
FIGURE 6. 生成AI複合型アプリケーション構想.....	19
FIGURE 7. 10 枚の元画像と 2 値化画像.....	21
FIGURE 8. (1) オリジナル画像 32 枚 (2) 2 値化画像 32 枚 .....	23
FIGURE 9. ヒートマップ可視化と PCA 分析による細胞形状特性の 30 指標.....	25
FIGURE 10. CELL_A 「AICELLEX」細胞測定及び 24 時間ごとの時系列 2 値化画像 .....	26
FIGURE 11. CELL_B 「AICELLEX」細胞測定及び 24 時間ごとの時系列 2 値化画像 .....	27
FIGURE 12. CELL_C 「AICELLEX」細胞測定及び 24 時間ごとの時系列 2 値化画像 .....	27
FIGURE 13. CNN 学習用画像作成前工程.....	28
FIGURE 14. CNN 学習用マスター画像・スプリット画像・2 値化画像.....	30
FIGURE 15. CNN 学習用のフォルダー仕様 学習サイズ エポック数設定 .....	31
FIGURE 16. 時系列による細胞数と CELL_A・B・C の相関関係 .....	33
FIGURE 17. 時系列によるコンフル率と CELL A・B・C の相関関係 .....	34
FIGURE 18. AICELLEX による細胞数とコンフル率の相関関係 .....	35
FIGURE 19. CELL_A・B・C 細胞全体の判定精度と相関関係.....	37
FIGURE 20. 時系列による PREDICTIONS CLASS_7 画像の ACCURACY との相関関係.....	38
FIGURE 21. AICELLEX_CONFLUENCY と CLASS_7 ACCURACY との相関関係 .....	39
FIGURE 22. TRAINING ACCURACY TRAINING LOSS EPOCH グラフ .....	40
FIGURE 23. 混同行列グラフ.....	42
FIGURE 24. 人間と機械の合流性の相関分析.....	45
FIGURE 25. 子どもの声、顔、言葉の表現を備えた CHAT-GPT アバター.....	52
FIGURE 26. モデル性能の正規化混同行列 .....	58
FIGURE 27. アバターと子どもの遅延応答時間と各テキストの文字数 .....	60
FIGURE 28. 感情的単語グループ・遅延反応平均時間.....	62
FIGURE 29. 会話と心拍数モニタリングのシステムフローチャート .....	71
FIGURE 30. 心拍センサー .....	72
FIGURE 31. 心拍数ログ付きコミュニケーショントレーニングシステム.....	76
FIGURE 32. プロトタイプアプリ 心拍センサーを装着の実施風景 .....	78
FIGURE 33. AI とユーザーの会話のテキスト可視化.....	79
FIGURE 34. 会話時の心拍数の推移 .....	79
FIGURE 35. 年齢依存性心拍数の線形回帰分析 .....	82

FIGURE 36. 萩プレーパーク 実証試験風景.....	83
FIGURE 37. 医療・療育へのデジタル支援技術の開発と検証.....	86
TABLE 1. 細胞数精度の評価.....	22
TABLE 2. 細胞形状特性の 15 指標解説.....	24
TABLE 3. ヒートマップ形状指標データ配置アドレス .....	25
TABLE 4. CELL_A・B・C 時系列による細胞数.....	33
TABLE 5. CELL_A・B・C の時系列によるコンフル率 .....	34
TABLE 6. AICELLEX による細胞数とコンフル率 .....	35
TABLE 7. CELL_A・B・C 細胞全体の判定精度.....	37
TABLE 8. PREDICTIONS CLASS_7 画像の判定精度 .....	38
TABLE 9. AICELLEX_CONFLUENCY と CLASS_7 ACCURACY 混同行列測定データ .....	39
TABLE 10. TRAINING ACCURACY TRAINING LOSS DATA .....	41
TABLE 11. コンフル率の視覚的評価と自動識別評価.....	44
TABLE 12. アバターのキャラクター・パーソナライズコマンド .....	53
TABLE 13. アバターの感情表現のコマンド .....	54
TABLE 14. 遅延応答時間 平均±標準偏差 [S].....	57
TABLE 15. 子どもとアバターのデータ セットの例.....	59
TABLE 16. 脈拍数の正常値年代別表.....	68
TABLE 17. 参加者の性別と年齢の平均と標準偏差。 .....	75
TABLE 18. 心拍数の測定値と応答率に関連するヒートマップ .....	81
出典 1: <a href="https://blog.ef-4.co.jp/cnn">HTTPS://BLOG.EF-4.CO.JP/CNN</a> 畳み込みニューラルネットワークの仕組み/.....	17
出典 2: 萩プレーパーク (わくわくキッズフェスタ) .....	50
出典 3: <a href="https://shira-beru.com/myaku/">HTTPS://SHIRA-BERU.COM/MYAKU/</a> .....	68