

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「人間と情報環境の共生インタラクション
基盤技術の創出と展開」
研究課題「随伴性に基づくペダゴジカル情報基盤
の創成」

研究終了報告書

研究期間 2018年10月～2024年03月

研究代表者：開 一夫
(東京大学 大学院総合文化研究科
教授)

§1 研究実施の概要

(1)実施概要

情報技術と認知科学的実証研究を融合することで、人間の「学び」を支援するための情報基盤を構築してきた。

特筆すべきは、「随伴性」に関連して2つの新しい知見を得たことである。随伴性とは、行為とその結果間の関係性に関する概念であり、ある行為に対応して将来生起するかどうかを正確には予測できない事象が存在することを指す。

随伴性に関する1つめの発見は、遅延随伴教授法(DCM: Delayed Contingency Method)の効果に関するものである。この教授法は、学習ログを個々の学習者に特化した形で活用するための方法として我々が開発・実装したものである。

これまで、1000名超の研究協力者を対象に実証実験を行い、遅延随伴教授法の効果を検証してきた。大学生（私立大学学部生）と高校生（都立高校、国立高校、通信制高校、私立高校）を対象とした実証実験では、遅延随伴教授法の効果が明確に現れた。遅延随伴教授法を用いた場合（**随伴群**）と用いなかった場合（**非随伴群**）の間で、学習継続率と学習効果（「事後テストの TOEIC スコア」－「事前テストの TOEIC スコア」）に有意な差が確認された。つまり、随伴提示された群の生徒は、そうでない群よりも継続的に学習し、学習効果（TOEIC スコア）も高くなっていた。

従来の学習科学・教育学では、学習継続率は主に内発的・外発的動機付けの観点から議論されていた。しかし、我々の研究結果は、教授方法（あるいは認知的処理）が学習行動に大きな影響を与えることを示唆している。つまり、（学習の）行動変容は動機や報酬系以外の視点からも研究する必要があることを示唆する。

遅延随伴教授法は、E-Learning システム上での自律的学習を発展させていく上で非常に重要な知見である。既存の E-Learning システムや MOOCs では、学習教材（の質）や教材の提示順に重点が置かれていたが、我々の提案する遅延随伴教授法は学習教材とは基本的に独立した方法である。国内では、学童への一人一台端末の配布がほぼ完了し、自己学習能力向上への期待が高まっており、遅延随伴教授法を様々な場面で活用することが期待できる。

随伴性に関するもう1つの新たな知見は、乳幼児を対象とした実験室実験で発見された。我々は、乳児を対象とした社会的認知に関する研究において、乳児でも視線(Eye-Gaze)とその結果に関する随伴的な事象を認知していることを明らかにすることができた。この研究成果は、Nature Human Behaviour 誌に掲載済みであり、全世界の多数のメディアに取り上げられ、Altemetrics.com においては全世界の論文中上位 5%の評価を得ている。言語的教示が困難な乳幼児においても視線に随伴する事象に対して鋭敏であることを示したこの研究は、就学前児の教育などに活用可能である。

随伴性に関する発見の他、学習ログを分散 PDS によって管理する仕組みや、学習者の認知的状態をウェアラブルセンサー等によって計測する技術を確立できた。遅延随伴教授法における「学習ログ」は、**橋田 G** によって開発された分散 PDS 向けライブラリーに基づいて取得されている。また、**産総研 G** を中心に開発されたスマートウォッチで動作する学習者状態計測システムは、オンライン学習システムとのリンクが完了しており、今後は最適な学習環境や最適な学習時間の提案システムへと発展させる予定である。こうした研究成果は CREST 研究実施期間中に Nature Human Behaviour 誌を初めてとして認知科学・発達科学の有力国際ジャーナルに 21 本のオリジナル論文が採択されたほか、国内雑誌・国際会議でも多数発表することができた。

研究開始当初に掲げたインタラクションによる「学び」の行動変容メカニズムを認知科学・情報科学の視点から明確にするという目標に関して、CREST 実施期間中の実証実験により、「学習者の学習対象への能動的な接触とその後（中期的時間経過後）の学習対象の利用が学習行動の頻度向上を促す」ことが明らかになった。

(2) 顕著な成果

＜優れた基礎研究としての成果＞

1. 認知科学・発達科学における新しい実験パラダイムの創出

概要：

視線随伴法(Gaze-Contingency)[1]、内受容感覚と社会的認知[2]、高密度脳波計と高速アイトラッカーによる同時計測[3]など、最先端の計測機器を駆使することで、発達認知科学における乳幼児研究に新しい潮流をつくることができた。これらの新しい実験パラダイムは、言語的教示をあたえることができない乳幼児の学習過程を探求するには非常に重要である。

[1] Kanakogi, Y., Miyazaki, M., Takahashi, H., Yamamoto, H., Kobayashi, T., & Hiraki, K. (2022) Third-party punishment by preverbal infants. *Nature Human Behaviour*.

[2] Masahiro Imafuku, Hiromasa Yoshimoto, and Kazuo Hiraki. (2023). Infants' interoception is associated with eye contact in dyadic social interactions. *Scientific Reports*.

[3] Matsunaka, R., & Hiraki, K. (2023). Neural correlates of attentional orienting with neutral and fearful gaze cues in 12-month-olds. *Social Neuroscience*, 18(2), 80–90.

2. 「学び」場面における脳活動計測

概要：

現実世界の「学び」場面を意識しつつ、就学前児や高校生を対象として EEG(脳波計)や fNIRS(近赤外分光法)を用いた認知神経科学的実験を行った。数学の問題解決[1,2]やグループディスカッションにおける創造性[3]に関して新たな知見を得ることができた。グループディスカッション中の脳活動計測では、複数人の脳活動を同時に計測・分析する手法を開発した [3]。また、就学前児の課題解決過程(視覚探索課題)を EEG で計測し、一人で課題解決する場合と母親が隣に在席する場合における脳活動の違いを世界に先駆けて明らかにした[4,5]。

[1] Suzuki, K., Yazawa, S., Matsunaka, R., Iwasawa, T., & Hiraki, K. (2020). Rapidly Grasping Learners' Mathematical Performance from Brain Activity. *14th Int. Conf. Interfaces and Human Computer Interaction*.

[2] Hiraki, K. (2022) How can cognitive science and technology contribute to student learning?, *Augmented Humans International Conference 2022*, online, 2022/3/13

[3] Matsunaka, R. & Hiraki, K. (in prep). Brain diversity leads to creative groups.

[4] Taishi Kawamoto & Kazuo Hiraki (2019) Parental presence with encouragement alters feedback processing in preschoolers: An ERP study, *Social Neuroscience*, 14:4, 499-504.

[5] Fred Atilla, Maryam Alimardani, Taishi Kawamoto and Kazuo Hiraki. (2023). Mother-child inter-brain synchrony during a mutual visual search task: A study of feedback valence and role. *Social Neuroscience*. DOI: doi.org/10.1080/17470919.2023.222854

3. 学習過程に潜在する時間的要因の探究

概要：

実世界における人間の「学び」メカニズムは、ラボ実験のような限られた場所・時間で解明できるものではない。オンライン学習システム上での学習ログを長期的に分析することで発見された遅延随伴教授法は、教授方法（あるいは時間をおいた認知的処理）が学習行動に大きな影響を与えることを示唆しており、「学び」の行動変容に関する新たな研究領域の開拓に資することが期待できる。

＜科学技術イノベーションに大きく寄与する成果＞

1. 学習・認知のための分散型プラットフォームの構築

概要：

開 G は橋田 G と共同して分散型認知実験プラットフォーム(Go-E-MON)を開発した[1]。このプラットフォームはオンラインで参加可能な認知実験環境と分散 Personal Data Store(PDS) [3-5]とを連携させたものである。これまでに、ネットワーク上での(認知科学的)実験を可能とする提案は存在していたが、取得された実験結果(個人データ)は実験実施者の手元で一元管理されていたため、データ流通の点で多くの課題を有していた。Go-E-Mon は従来の中央集約的な認知科学を大きく変革するものである。GO-E-MONを活用して、映像授業の視聴データを分析した論文[2]は最優秀論文賞を受賞している。

[1] Yazawa, S., Sakaguchi, K., Hiraki, K. (2022). GO-E-MON: A New Online Platform for Decentralized Cognitive Science. *Big Data and Cognitive Computing*, Volume 5, Issue 4.

- [2] Satoshi Yazawa, Masashi Inutsuka, Terutaka Komahashi, Kento Kanemura, and Kazuo Hiraki. (2023). Video-playing logs for analogous videos reveal learners' proactive learning strategies. 17th International Conference on e-Learning and Digital Learning 2023(ELDL 2023)
- [3] 橋田 浩一 (2021) 教育・学習データの本人管理による価値創造. e ラーニングアワード 2021 フォーラム.
- [4] Hasida, K. (2022) Personal AI to Maximize the Value of Personal Data while Defending Human Rights and Democracy. Knowledge and Digital Technology Symposium, The Studio of Villa Bosch, Germany, 2022-05-04.
- [5] Koiti Hasida (2023) Personal AI and Behavioral Change. International Symposium: New Global Challenges for Online and AI Literacy, Shirankaikan Inamori Hall, Kyoto University, 2023-03-21. (基調講演)

2. 「日常的」学び場面でのセンシング技術の構築

概要：

実験室で得られた成果の社会実装を考慮すると重厚かつ高価な装置のみからの知見は活用しにくい。東大 G は、安価に購入可能なバンド型センサから得られる睡眠動態と英単語学習アプリへの接触記録を学習者毎に対応付け、学習（記憶）時間と睡眠に関して従来の認知科学的知見を覆す結果を得た[1]。これを受けて、産総研 G は、Apple Watch 等一般的に入手可能なウェアラブルデバイスで取得されたデータを英語学習システム上での学習ログと付き合わせることで、最適学習（休息）タイミングを Chat-GPT 等を用いて表現する技術を構築した（特許出願中）。

- [1] Yazawa, S., Yoshimoto, H., & Hiraki, K. (2018). Learning with Wearable Devices reveals Learners' Best Time to Learn. International Conference on Education and E-Learning, Bali, Indonesia, November (発表日 11 月 6 日)
- [2] Sashima, A & Kawamoto, M. (2020) "Towards Sensing and Sharing Auditory Context Information Using Wearable Device," Communications in Computer and Information Science (CCIS), Vol. 1168, 54-59, Springer.
- [3] Sashima, A & Kawamoto, M. (to appear) "Mobile Context Logger: Recognizing User's Auditory Environments and Activities using Smartwatch," Akio Sashima and Mitsuru Kawamoto, Proc. of Sensys'23.

3. 遅延随伴教授法の E-Learning システムでの活用

概要：

遅延随伴教授法は、人間の学習過程における認知的処理の関係性を明らかにした点で基礎研究としての色合いが濃い。しかし、情報処理システムの認知的 UI デザイン原理としても活用可能と考える。つまり、ある情報システムを中長期に渡って使用してもらうための手法としても期待できる。

< 代表的な論文 >

1. Kanakogi, Y., Miyazaki, M., Takahashi, H., Yamamoto, H., Kobayashi, T., & Hiraki, K. (2022). Third-party punishment by preverbal infants. *Nature Human Behaviour*.

概要：

我々は、乳児を対象とした社会的認知に関する研究において、乳児でも視線(Eye-Gaze)とその結果に関する随伴的な事象を認知していることを明らかにすることができた。この研究成果は、*Nature Human Behavior* 誌に掲載済みであり、全世界の多数のメディアに取り上げられ、*Altmetrics.com* においては全世界の論文で上位 5% の評価を得ている。言語的教示が困難な乳幼児においても視線に随伴する事象に対して鋭敏であることを示したこの研究は、就学前児の教育などに活用可能である。

2. Yamamoto, E., Matsuda, G., Nagata, K., Dan, N., & Hiraki, K. (2018). Subtle temporal delays of mothers' responses affect imitation learning in children: Mother-child interaction study. *Journal Experimental Psychology*, 179, 126-142.

概要：

ダブル TV パラダイムと呼ばれる実験環境を構築し、幼児と養育者間のコミュニケーションの遅延時間をコントロールした実験を実施した。実験の結果、僅か 1 秒の通信遅延が子どもの模倣学習に影響を与えることを示した。この研究は子どもと養育者とのインタラクティブな学びにおいて「今性」と「応答性」が大きな役割を果たしていることを示している。認知科学・発達科学だけでなく、遠隔授業におけるネットワーク通信遅延

や E-Learning システムをデザインする上でも重要な知見となる。(概要は、毎日新聞等多数のメディアで報道されている。)

3. Alimardani,M., Duret,J., Jouen, A-L., Hiraki,K. (in press) Social Robots as Effective Language Tutors for Children: Empirical Evidence from Neuroscience. *Front. Neurorobot.* Volume 17.

概要:

ロボットを教育現場で活用しようとする試みは少なくない。しかしながら、その効果についてはあいまいなままである。この研究では、日本の就学前児を対象に EEG(脳波計)を用いたコネクティビティ解析を行うことでアプローチした。具体的には、ロボットがジェスチャーをしながらフランス語で「紙芝居」(実際にはモニター上の画像のシークエンス)をする場合と、音声のみ(音声はロボットの場合と同じ)で読み聞かせする場合とを比較した。実験の結果、ロボットがジェスチャーを使いながら読み聞かせをする方が、音声のみの場合よりもフランス語単語の記憶成績が高くなった(被験児は実験前までフランス語への接触経験はない)。さらに、EEG のコネクティビティ解析の結果、シータ波帯域でのグローバルな同期がロボットで読み聞かせされた子どもの方が音声のみの群よりも高いことが明らかになった。この結果は、子どもの学びにロボットが有効利用できる可能性を発達認知神経科学的に示唆するものである。

§ 2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

(1) 研究代表者グループ (東京大学)

- ① 研究代表者: 開 一夫 (東京大学大学院総合文化研究科研究科 教授)
- ② 研究項目
 - ・ ペダゴジカル情報基盤の設計と実装
 - ・ 全体の研究統括

(2) 橋田グループ (東京大学)

- ① 主たる共同研究者: 橋田 浩一 (東京大学 大学院情報理工学系研究科 教授)
- ② 研究項目
 - ・ 分散 PDS による学びの蓄積

(3) 産総研グループ (産総研)

- ① 主たる共同研究者: 河本 満 (産業技術総合研究所人間拡張研究センター主任研究員)
- ② 研究項目
 - ・ ウェラブルセンシング技術に関する研究開発
 - ・ 音環境理解によるインタラクションセンシング技術の研究開発

(2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

1. 実用化に向けての展開

- ・ 開一夫: サンリオエデュタメント事業とのアドバイザー契約(継続中)
- ・ 開一夫: 一般社団法人「赤ちゃんラボ 5.0」の立ち上げ(準備中)
- ・ 門倉(開研究室): スタートアップの立ち上げ(準備中)

2. 社会還元的な展開活動

- ・ 開一夫: テレビ東京の乳幼児向け番組「シナぷしゅ」(月曜日から金曜日放送)での監修を通じて、子ども番組制作者と共に TV 映像と発達(知育)に関して議論している。(一部は CREST の若手支援 COLAB での研究テーマとして展開中)。

- ・開一夫: (株)電通と共同して「子どもの視展」を開催(2022.7.22-9.19, ITOCHU SDGs Studio Gallery)。この展覧会は好評で、その後、「子どもの視点カフェ」として常設展示されている。
- ・開一夫: Ed-AI 研究会(教育と AI に関する研究会)を東京大学が主体となって立ち上げた。これまで十数回の研究会・シンポジウムを開催した。Ed-AI 研究会は現在も活動中である。
- ・開一夫: 出版社(ディカヴァー21)と共同して、赤ちゃん向け絵本を監修し、累計 80 万部を超えるベストセラーになっている。絵本は、中国語、韓国語、イタリア語、アラビア語、英語に翻訳されている。
- ・橋田浩一: 文科省の MEXCBT 等との連携による新サービスの導入を図っている。