
心脳境界のメカニズム解明とその突破

領域番号：20B102

令和2年度～令和4年度
学術変革領域 (B)
研究成果報告書

令和5年6月16日

領域代表者 柴田 和久
理化学研究所・脳神経科学研究センター・チームリーダー

はしがき

本報告書は、学術変革領域 (B) 『心脳限界のメカニズム解明とその突破』について、3年間の取り組みにおける内容を成果について報告するものである。

研究組織

領域代表者 柴田 和久 (理化学研究所・脳神経科学研究センター・チームリーダー)

総括班

研究代表者 柴田 和久 (理化学研究所・脳神経科学研究センター・チームリーダー)

研究分担者 古屋 晋一 (上智大学・准教授)

研究分担者 西村 幸男 (医学総合研究所・高次脳機能研究分野・プロジェクトリーダー)

研究分担者 中澤 栄輔 (東京大学・医学系研究科・講師)

卓越班

研究代表者 古屋 晋一 (上智大学・准教授)

病態班

研究代表者 西村 幸男 (医学総合研究所・高次脳機能研究分野・プロジェクトリーダー)

健常班

研究代表者 柴田 和久 (理化学研究所・脳神経科学研究センター・チームリーダー)

倫理班

研究代表者 中澤 栄輔 (東京大学・医学系研究科・講師)

交付決定額 (配分額)

	合計	直接経費	間接経費
令和2年度	45,370 千円	34,900 千円	10,470 千円
令和3年度	40,690 千円	31,300 千円	9,390 千円
令和4年度	40,690 千円	31,300 千円	9,390 千円
総計	126,750 千円	97,500 千円	29,250 千円

雑誌論文

1. Musician's Dystonia: Family history as a predictor for onset and course of the disease. Johanna Doll, Andre Lee, Shinichi Furuya, Bernhard Haslinger, Eckart Altenmuller. *Movement Disorders*, 2023. (in press)
2. Reliability and Validity of the Embouchure Dystonia Severity Rating Scale. Thomas Mantel, Andre Lee, Eckart Altenmuller, Shinichi Furuya, Masanori Morise, Bernhard Haslinger. *Journal of Movement Disorders*, 2023. 16(2):191-195
3. Passive somatosensory training enhances motor skill of piano playing in adolescent and adult pianists. Shinichi Furuya, Ryuya Tanibuchi, Hayato Nishioka, Yudai Kimoto, Masato Hirano, Takanori Oku. *Annals of the New York Academy of Science*, 2023. 1519(1): 167-172
4. 中枢神経損傷に対する人工神経接続を用いたニューロリハビリテーション. 田添歳樹, 河合一武, 西村幸男. *脳神経内科*, 2023. 第98巻第5号: 677-683. 2023
5. 意欲が身体運動に影響を及ぼす神経基盤. 鈴木迪諒, 西村幸男. *体育の科学*. 2023. 第73巻5月号, 296-300, May 1,
6. Plyometric training enhances strength and precision of the finger movements in pianists. Kaito Muramatsu, Takanori Oku, Shinichi Furuya. *Scientific Reports*, 2022. 12: 22267
7. Corticospinal interface to restore voluntary control of joint torque in a paralyzed forearm following spinal cord injury in non-human primates. Kei Obara, Miki Kaneshige, Michiaki Suzuki, Osamu Yokoyama, Toshiki Tazoe, Yukio Nishimura. *Front. Neurosci*, 2023. 17:1127095.
8. The phase of plasticity-induced neurochemical changes of high-frequency repetitive transcranial magnetic stimulation are different from visual perceptual learning. Shang-Hua N. Lin, Yun R. Lien, Kazuhisa Shibata, Yuka Sasaki, Takeo Watanabe, Ching-Po Lin, Li-Hung Chang. *Scientific Reports*. 2023. 5720.
9. Non-invasive brain-spine interface: Continuous control of trans-spinal magnetic stimulation using EEG. Insausti-Delgado A, López-Larraz E, Nishimura Y, Ziemann U and Ramos-Murguialday A. *Front. Bioeng. Biotechnol*, 2022. 10:975037.
10. Quantitative comparison of corticospinal tracts arising from different cortical areas in humans. Usuda N, Sugawara S, Fukuyama H, Nakazawa K, Amemiya K, Nishimura Y. *Neuroscience Research*, 2022. 183: 30-49.
11. Tuning of motor outputs produced by spinal stimulation during voluntary control of torque directions in monkeys. Kaneshige M, Obara K, Suzuki M, Tazoe T, Nishimura Y. *eLife*, 2022.
12. Origin of Multisynaptic Corticospinal Pathway to Forelimb Segments in Macaques and Its Reorganization After Spinal Cord Injury. Taihei Ninomiya, Hiroshi Nakagawa, Ken-ichi Inoue, Yukio Nishimura, Takao Oishi, Toshihide Yamashita, Masahiko Takada. *Frontiers in Neural Circuit*, 2022.

13. Decrease in signal-related activity by visual training and repetitive visual stimulation, (*co-first author) Marzoll A*, Shibata K*, Toyozumi T, Chavva I, & Watanabe T. *iScience*, 2022, 25(12):105492.
14. The dorsal premotor cortex encodes the step-by-step planning processes for goal-directed motor behavior in humans. Yoshihisa Nakayama, Sho K Sugawara, Masaki Fukunaga, Yuki H Hamano, Norihiro Sadato, Yukio Nishimura. *Neuroimage*, 2022.
15. A multisynaptic pathway from the ventral midbrain toward spinal motoneurons in monkeys. Michiaki Suzuki, Ken-ichi Inoue, Hiroshi Nakagawa, Hiroaki Ishida, Kenta Kobayashi, Tadashi Isa, Masahiko Takada, and Yukio Nishimura. *The Journal of Physiology (London)*, 2022, 600(7):1731-1752
16. MRS-measured glutamate versus GABA reflects excitatory versus inhibitory neural activities in awake mice. Takado Y*, Takuwa H*, Sampei K, Urushihata T, Takahashi M, Shimojo M, Uchida S, Nitta N, Shibata S, Nagashima K, Ochi Y, Ono M, Maeda J, Tomita Y, Sahara N, Near J, Aoki I, Shibata K, & Higuchi M. *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism*, 2022, 42(1):197-212
17. Impaired feedforward control of movements in pianists with focal dystonia. Ken Takiyama, Shuta Mugikura, Shinichi Furuya. *Frontiers in Neurology* 13:983448. 2022.
18. Multisensory interactions on auditory and somatosensory information in expert pianists. Masato Hirano, Shinichi Furuya. *Scientific Reports*, 2022 12, 12503.
19. Adaptation of the corticomuscular and biomechanical systems of pianists. Yudai Kimoto, Masato Hirano, Shinichi Furuya. *Cerebral Cortex* 2022. 32(4): 709-724.
20. Individual experiences with being pushed to limits and variables that influence the strength to which these are felt: A cross-sectional survey study. Nakazawa E, Mori K, Akabayashi A. *J* 2022. 5(3):358-368.
21. The neuroethics of memory's social value: To what extent can neurotechnologies that manipulate memory be permitted? Nakazawa E, Tachibana K, Yamamoto K, Akabayashi A. *Journal of Cognition and Neuroethics*, 2022. 9 (1): 1–11.
22. The way forward for neuroethics in Japan: A review of five topics surrounding present challenges. Nakazawa E, Fukushi T, Tachibana K, Uehara R, Arie F, Akter N, Maruyama M, Morita K, Araki T, Sadato N. *Neuroscience Research* in print. 2022.
23. Temporal dynamics of the sensorimotor convergence underlying voluntary limb movement. Umeda T, Isa T, Nishimura Y. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2022, 119(48):e2208353119.
24. Activation of human spinal locomotor circuitry using transvertebral magnetic stimulation. Kawai K, Tazoe T, Yanai T, Kanosue K, Nishimura Y. *Frontiers in Human Neuroscience*. 2022. 16:1016064.
25. 人工神経接続を用いた脳・脊髄損傷後の身体運動機能の再建. 田添歳樹, 西村幸男. *Brain and Nerve*. 2022. Vol.74 No.9, 1111-1116,
26. The ventral striatum contributes to the activity of the motor cortex and motor outputs in monkeys. Suzuki M, Nishimura Y. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 16:979272.
27. A multisynaptic pathway from the ventral midbrain to spinal motoneurons in monkeys. Suzuki M, Inoue K, Nakagawa H, Ishida H, Kobayashi K, Isa T, Takada M, Nishimura Y. *The Journal of Physiology*, 2022. 600(7):1731-1752.

28. A cross-sectional study of attitudes toward willingness to use enhancement technologies: implications for technology regulation and ethics. Nakazawa E, Mori K, Udagawa M, Akabayashi A. *BioTech*, 2022. 11(3), 21.
29. Noncontact and High-Precision Sensing System for Piano Keys Identified Fingerprints of Virtuosity. Takanori Oku, Shinichi Furuya. *Sensors*, 2022, 22(13), 4891.
30. Visual perceptual learning of a primitive feature in human V1/V2 as a result of unconscious processing, revealed by decoded functional MRI neurofeedback (DecNef). Wang Z, Tamaki M, Frank SM, Shibata K, Worden MS, Yamada T, Kawato M, Sasaki Y, & Watanabe T, *Journal of Vision*, 2021, 21(8):24.
31. The DecNef collection, fMRI data from closed-loop decoded neurofeedback experiments, Cortese A, Tanaka SC, Amano K, Koizumi A, Lau H, Sasaki Y, Shibata K, Taschereau-Dumouchel V, Watanabe T, & Kawato M. *Scientific Data*. 2021, 65.
32. Preserving Agency During Electrical Muscle Stimulation Training Speeds up Reaction Time Directly After Removing EMS, Kasahara S, Takada K, Nishida J, Shibata K, Shimojo S, & Lopes P, *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1-9.
33. Neurotechnology for Bypassing Damaged Neural Pathways. Kato K, Nishimura Y. *Journal of Aging Science*, 2021
34. Back to feedback: aberrant sensorimotor control in music performance under pressure. Shinichi Furuya*, Reiko Ishimaru*, Takanori Oku, Noriko Nagata. *Communications Biology* 2021. 4(1): 1367
35. Nucleus accumbens as the motivation center is essential for functional recovery after spinal cord injury. Michiaki Suzuki, Yukio Nishimura. *Journal of Rehabilitation Neurosciences*, 2021, 21: 23-28
36. The Ventral Striatum is a Key Node for Functional Recovery of Finger Dexterity After Spinal Cord Injury in Monkeys. Suzuki M, Onoe K, Sawada M, Takahashi N, Higo N, Murata Y, Tsukada H, Isa T, Onoe H, Nishimura Y. *Cerebral Cortex*. 2020, 30(5):3259-3270.
37. Role of the nucleus accumbens in functional recovery from spinal cord injury. Sawada M, Nishimura Y. *Neuroscience Research* 2021 Nov;172:1-6.
38. Assessment of safety of self-controlled repetitive trans-vertebral magnetic stimulation. Sasada S, Kadowaki S, Tazoe T, Murayama T, Kato K, Nakao Y, Matsumoto H, Nishimura Y, Ugawa Y. *Clinical Neurophysiology* 2021. 132(12):3166-3176.
39. Changes in beta and high-gamma power in resting-state electrocorticogram induced by repetitive transcranial magnetic stimulation of primary motor cortex in unanesthetized macaque monkeys. Honda Y, Nakamura S, Ogawa K, Yoshino R, Tobler PN, Nishimura Y, Tsutsui KI. *Neuroscience Research*. 2021. 171:41-48.
40. Cerebellar outputs contribute to spontaneous and movement-related activity in the motor cortex of monkeys. Sano N, Nakayama Y, Ishida H, Chiken S, Hoshi E, Nambu A, Nishimura Y. *Neuroscience Research*. 2021. 164:10-21.
41. 閉回路型脊髄刺激によるニューロモジュレーションの誘導. 田添歳樹, 西村幸男. *運動器リハビリテーション*, 2021, 32(3), 255-262

42. 中澤栄輔. ニューロモデュレーションの医療倫理. 精神医学 63 卷 12 号:1767-1774. 2021 年
43. Artificial cortico-muscular connection via neural interface to regain volitional control of limb movements. Kato K, Nishimura Y. *Journal of Rehabilitation Neurosciences*. 2020, 20(1), 1–6.
44. The Ventral Striatum is a Key Node for Functional Recovery of Finger Dexterity After Spinal Cord Injury in Monkeys. Suzuki M, Onoe K, Sawada M, Takahashi N, Higo N, Murata Y, Tsukada H, Isa T, Onoe H, Nishimura Y. *Cerebral Cortex*. 2020, 14;30(5):3259-3270.
45. Stimulus outputs induced by subdural electrodes on the cervical spinal cord in monkeys. Kato K, Nishihara Y, Nishimura Y. *Journal of Neural Engineering*. 2020;17(1):016044.
46. Overcoming the ceiling effects of experts' motor expertise through active haptic training. Hirano M, Sakurada M, Furuya S. *Science Advances*. 2020, 6: eabd2558
47. Soft exoskeleton glove with human anatomical architecture: production of dexterous finger movements and skillful piano performance. Takahashi N, Furuya S, Koike H. *IEEE Transaction on Haptics*. 2020. 13(4) 679-690
48. Skillful and pathological movement coordination in musical performance. Furuya S, Oku T, Kimoto Y, Nishioka H, Hirano M. *Advances in Exercise & Sports Physiology*. 2020. 26(2) 23-26
49. Aberrant somatosensory-motor adaptation in musicians' dystonia. Furuya S*, Lee A*, Oku T, Altenmüller E. *Movement Disorders*. 2020. 35(5) 808-815
50. Specialized somatosensory-motor integration functions in musicians. Hirano M, Kimoto Y, Furuya S. *Cerebral Cortex*. 2020. 30(3) 1148-1158
51. Non-invasive Neuromodulation-基礎・検査・治療 B.検査と治療 歩行障害. 田添歳樹, 兼重美希, 西村幸男. *Clinical Neuroscience*. 38 卷 1 号: 80-84. 2020 年
52. 人工神経接続の臨床応用 田添歳樹, 加藤健治, 西村幸男 医学のあゆみ (医歯薬出版株式会社) 275 卷 12・13 号, 1271-1274, 2020
53. 意欲は身体運動に影響を与えるのか. 菅原 翔, 鈴木迪諒, 西村幸男. *Clinical Neuroscience* 別冊. Vol. 36 No.6, 740-742, 2020
54. 中澤栄輔. 臨床研究の歴史と研究倫理. 整形外科 71 卷 6 号:598–601. 2020 年

学会発表

1. 意思決定を操作する脳科学技術の倫理—調査を踏まえて. 中澤栄輔. 先端神経倫理学ワークショップ. 2022
2. Plastic change of locomotor circuits in humans. 西村幸男. 日本生理学会大会. 2022.
3. ヒト脊髄歩行中枢の柔軟性. 西村幸男. 日本脊髄障害医学会. 2022.
4. 神経インターフェイスによる神経損傷のバイパス. 西村幸男. 日本脳神経外科学会. 2021.
5. Origin of corticospinal tracts in humans; diffusion weighted imaging study. Usuda N, Sugawara SK, Hiroyuki F, Nakazawa K, Amemiya K & Nishimura Y. ヒト脳イメージング研究会. 2021.
6. 中枢・末梢神経系の統合的解析による随意運動制御の神経機構. 梅田達也, 横山修, 鈴木迪諒, 兼重美希, 伊佐正, 西村幸男. Motor Control 研究会. 2021.

7. 人工神経接続システムによる脳機能再建. 西村幸男. 医工連携マッチング例会 世代医療システム産業化フォーラム. 2021.
8. Differential involvement of the dorsal premotor cortex in each stage of conditional visuo-goal behavior in humans. Nakayama Y, Sugawara SK, Fukanaga M, Hamano HY, Sadato N & Nishimura Y. 日本神経科学大会. 2021.
9. Location specific excitation of human spinal locomotor circuitry by transvertebral magnetic stimulation. Tazoe T, Nishimura Y. 日本神経科学大会. 2021.
10. Activation of human spinal locomotor circuitry using transvertebral magnetic stimulation. Kawai K, Tazoe T, Kanosue K, Nishimura Y. 日本神経科学大会. 2021.
11. Bypassing spinal lesion via artificial cortico-spinal pathway induces task-related modulations in an ensemble of neurons in monkey primary motor cortex. Obara K, Kaneshige M, Suzuki M, Tazoe T, Nishimura Y. 日本神経科学大会. 2021.
12. The primary motor cortex implements internal models of spinal reflex action during voluntary movement. 梅田達也、横山修、鈴木迪諒、兼重美希、伊佐正、西村幸男. 日本神経科学大会. 2021.
13. Pre-movement activity in human spinal-cord: Preliminary brain-spinal cord stimulations fMRI study. Sugawara SK, Usuda N, Fukuyama H, Amemiya K, Nishimura Y. 日本神経科学大会. 2021.
14. Long-lasting reinforcement in motor task through nucleus accumbens stimulation. Suzuki M, Nishimura Y. 日本神経科学大会. 2021.
15. Top-down control of distributed attention by the supplementary eye field in monkeys. 横山修、西村幸男. 日本神経科学大会. 2021.
16. Boosting motor outputs and inducing cortical adaptation via artificial neural connection. Kaneshige M, Obara K, Suzuki M, Tazoe T, Nishimura Y. 日本神経科学大会. 2021.
17. Quantitative comparison of corticospinal tracts from cerebral cortex in humans. Usuda N, Sugawara SK, Fukuyama H, Amemiya K, Nakazawa K, Nishimura Y. 日本神経科学大会. 2021.
- 18.ブレインマ・マシーンイン・インターフェース(BMI)と脳科学. 西村幸男. 神経法学会. 2021.
19. Higher-order statistics contained in natural scenes allow task-irrelevant visual perceptual learning of supra-threshold orientation to occur. Shibata K, Ogawa D, Sasaki Y, & Watanabe T. Vision Sciences Society Annual Meeting, 2021.
20. 脳科学分野における ELSI. 中澤栄輔. 応用脳科学アカデミーベーシックコース 3 「ELSI」. 2021.
21. 脳神経倫理の展望—研究倫理とニューロフィードバック. 中澤栄輔. 神経法学会. 2021.
22. Brainbank and Neuroethics in Japan. Nakazawa E. Korea Neuroethics Roundtable Meeting. 2021.
23. 人工神経接続による脳機能再建. 西村幸男. 日本難病医療ネットワーク学会. 2020.
24. Bypassing damaged neural pathways via a neural interface. 西村幸男. 日本神経学会. 2020.

25. 硬膜下脊髄刺激は随意筋活動をブーストする. 兼重美希, 尾原圭, 鈴木迪諒, 田添歳樹, 西村幸男. 日本神経科学大会. 2020.
26. Fronto-parietal activation during planning of goal-directed actions in humans. Nakayama Y, Sugawara SK, Fukunaga M, Hamano YH, Sadato N & Nishimura Y. 日本神経科学大会. 2020.
27. The functional role of ventral midbrain for motivated motor outputs in humans. Sugawara SK, Nakayama Y, Yamamoto T, Hamano YH, Fukunaga M, Sadato N & Nishimura Y. 日本神経科学大会. 2020.

図書

1. 第10章ニューロフィードバックは精神疾患の治療に応用できるか（「心の病」の脳科学 なぜ生じるのか、どうすれば治るのか）, 柴田和久（分担執筆）, 林（高木）朗子, 加藤忠史（著）. 2023.
2. 中澤栄輔. 脳神経倫理の展開と情動を操作する技術—MRIニューロフィードバックに着目して. わが国における神経法学の基盤研究—法学・医学・心理学の協働—〈神経科学・心理学篇〉27–32. 2022年
3. Sensorimotor incoordination in musicians' dystonia. Shinichi Furuya and Takanori Oku. A book chapter in *Basic and Translational Applications of the Network Theory for Dystonia* (edited by Aasef Shaikh and Anna Sadnicka). Springer, 2023 (in press).
4. Mechanisms of fMRI neurofeedback, Shibata K, A book chapter in *fMRI Neurofeedback* (edited by Michelle Hampson). Academic Press, 2021.

研究成果による産業財産権の出額・取得状況

なし

研究成果

卓越班

ハプティックデバイスを用いて、打鍵中の鍵盤の重さを微小に操作し、その差異を弁別させるトレーニングをピアニストに行った結果、ピアニストの力触覚弁別機能の向上のみならず、一定の力で打鍵を繰り返す際の発揮力のバラツキが減少した。このような力触覚機能と運動機能の向上は、ピアニストにおいてのみ認められ、非音楽家では認められなかった。また、打鍵力のエラーを可視化するトレーニングを行った結果、このような力制御能力の向上は認められなかった。以上の結果から、力触覚を対象とした能動知覚のトレーニング(Active Haptic Training)は、エキスパートの技能の限界突破に寄与することが示唆された(Hirano et al., 2020)。可変聴覚フィードバックを用いて演奏中の聴覚情報に外乱を与えた結果、パフォーマンスの異常はピアニストの非緊張時の演奏には認められなかったが、ピアニストの緊張時と非音楽家の非緊張時に認められた。これは聴覚フィードバックに基づく運動制御(フィードバック制御)が心理緊張に伴い機能異常を起こすことを示唆している。さらに、可変聴覚フィードバックによる聴覚外

乱を無視して練習するトレーニングを行った結果、心理緊張下での感覚フィードバック制御の失調が低減した。以上の結果から、心理不安に伴うパフォーマンスの限界を打破するために、可変聴覚フィードバックを用いたトレーニングが有効である可能性が示唆された(Furuya et al., 2022)。

手指の外骨格ロボットを用いて受動運動を繰り返し行った結果、ピアニストの手指巧緻運動技能の向上が認められた。さらに、介入効果を異なる年代のピアニストで比較した結果、成人ピアニストに比べて、10代の若年ピアニストの方が介入効果が大きいことが明らかになった。これらの結果は、受動体性感覚トレーニングがエキスパートの巧緻運動技能を向上することを示唆する予備的知見である(Furuya et al., 2023)。

病態班

報酬を得ることを期待している際だけでなく、報酬を奪われることが予測される際にも、運動の準備時の腹側中脳の活動で将来の筋出力量が予測できることがヒト脳機能画像実験で明らかになった。昨年度確立した腹側中脳リアルタイム fMRI フィードバックの実験系を用いて、自分自身で腹側中脳の活動が制御できることを見出した。マウスでは、セロトニン神経の活動が辛い運動時に活動が高くなることを見出した。これらのことから中脳のモノアミン系神経核は病態脳においても潜在能力の座になりうると考えられた。

サルの頸髄に化学遺伝学手法によって人工受容体を発現させ、人工リガンドによって神経細胞の活動を操作する DREADD 法を適用することで、運動時間、筋出力の向上、脊髄反射、熱に対する反応が亢進した。このように DREADD 法により運動機能と体性感覚の両方の機能を向上させることに成功した。これらの結果から、脊髄損傷後、損傷されていない脊髄には運動機能と体性感覚機能の潜在能力があると考えられた。

慢性脊髄損傷患者に対して、人工神経接続システムによる6か月の介入を行ったところ、自力歩行の速度が速くなった。この人工神経接続システムの介入後には、脳と脊髄の神経結合強度が高まっていた。また、脊髄刺激で歩行を誘発できる領域が大きくなっていた。このように、歩行機能の向上には歩行に関わる脊髄内神経回路に加えて、脳と脊髄間を繋ぐ神経回路の再組織化が起こることを見出した。

健常班

2020年度

本課題は2020年10月に開始され、2020年度は5ヶ月間の実施であった。この5ヶ月は特に、2021年度からの研究を加速するため、研究環境を整備・構築し、研究アイデアを蓄積し、予備的な実験を開始することに主に注力した。2020年度内の着任を見込んでいた外国人研究員は、コロナの蔓延に伴う日本政府のビザ発給停止による影響で、来日時期が未定になった。研究者側の努力ではどうにもならない問題で、日本政府の方針に依存するが、着任は早くとも2021年度の夏以降になると見込まれた。従って、当初予定していたよりも研究計画は多少後ろ倒しにする必要が出た。研究技術員についても、コロナ禍の混乱等が主な原因で、2020年度の雇用には至らなかった。しかし、2021年度初頭の着任にこぎつけることはできた。提案研究に関わる実験について、予備的な検討を進め、これまで、行動実験パラダイムの追試を試みた。詳細な解析に至っておらず、まだ明確な結果は得られていないが、2021年度に継続して検討を行う予定である。コロナ禍において実験の実施に制限があった一方、関連文献を読み込む時間や研究内容について考える時間を取ることはできたので、2021年度以降の活動に活用した。研究環境や研究技術の整備・構築として、計算用パソコンの購入とセットアップを行った。また理化学研究所のMRIセンターに勤務する研究技術員と協力し、リアルタ

イム脳情報解読フィードバック法を実施するための機材やソフトウェア、アルゴリズムを整備し、リアルタイム脳情報解読フィードバック法を用いた実験のための環境を整えた。

2021 年度

コロナ禍が原因で着任が遅れていた研究技術員は 2021 年度初頭に着任が叶ったものの、外国人研究員の着任は 2021 年 11 月下旬まで最終的にずれ込んだ。そのため 研究計画に一定の遅れがあったが、2021 年度は主として行動実験、脳刺激実験、脳波実験を行った。研究 1 に関して、行動実験と脳刺激実験で、指運動の学習の限界を超える方法を調べるために指の系列順序運動訓練の前後に異なる訓練を挟んだり、系列順序運動訓練のあとに 脳の特定の部位を経頭蓋磁気刺激(TMS)を断続的に刺激する実験を行った。TMS を一次運動野に打った場合と体性感覚野に打った場合で学習結果が異なるという知見が得られつつあり、この実験を予備実験として 2022 年度に本実験を行う予定を立てた。また研究 3 に関して、指を動かす単純な反応時間課題を用いて、反応時間の限界を超えるための方法を模索した。ソニー・コンピュータ・サイエンス・ラボラトリーとの共同研究から、皮膚電気刺激により筋肉を人工的に駆動させる方法によって、通常の訓練では達成不可能な反応時間の向上を達成する方法を見つけた。この成果をヒューマン・コンピュータ・インターフェイス分野のトップ国際会議である CHI 21 で発表した。脳波実験では柔軟な認知的判断を促進する脳の仕組みや判断の締切に迫られた極限状態での意思決定のメカニズムについて調べている。2021 年度はデータ計測に費やしたが、2022 年度も継続して実験を行う。その他、視覚の学習において、既知のパラダイムでは学習が成立しない状況で学習を起こすことが可能なパラダイムを発見し、国際学会である Vision Sciences Society で発表した。また、本研究におけるコア技術のひとつである fMRI ニューロフィードバックの本の執筆に関わり、一章分を担当した。

2022 年度

2022 年度は運動学習、運動パフォーマンス、視覚の学習に関わる研究に従事した。研究 1 に関して、運動学習の限界突破についての研究では、2 つの成果が得られた。第一に、指の系列順序運動訓練の前後に異なる訓練を挟んだり、脳の特定の部位を経頭蓋磁気刺激(TMS)で刺激する実験を行った。TMS を一次運動野に打つか体性感覚野に打つかで結果が異なるという知見が得られ、Motor Control 研究会にて発表を行った。第二に、外骨格ロボットを用いて受動的に指を動かす実験系を構築した。すでに学習した指運動に対して、学習の 1 日から数日後に同じ運動を受動的に被験者に経験させると、さらなる運動学習の促進が得られることがわかった。この知見は班会議で発表した。研究 2 に関して、運動パフォーマンスの限界突破に関わる研究では、「運動課題から気をそらすことで運動パフォーマンスの限界を超えることができる」という仮説にもとづいた実験を行った。グリップを最大限の力で握り続けるという課題を行う傍らいくつかの認知課題を行うと、認知課題が難しいほどグリップをより強く握れることがわかった。この結果は、脳が自己の運動をパフォーマンスに対して普段は能動的に抑制をかけており、記憶課題によって気が散った結果この抑制が弱まることを示唆している。これらの知見も班会議で発表した。視覚の学習に関わる実験では、2 つの成果が得られた。第一に、異なる課題を用いたとしても 2 つの学習の干渉が避けられない状況があることを発見し、視覚の学習における限界メカニズムの理解に寄与した。この知見は iScience 誌に掲載された。第二に、伝統的な人工視覚刺激では学習が不可能であった訓練条件において、自然界に見られる視覚特徴を備えた視覚刺激を用いれば、これまで考えられていた学習の限界を超えた学習結果が得られることを発見した。またその学習における脳メカニズムを示すための脳イメージング実験も行った。

倫理班

1 年目(2020 年度)は、心脳限界認識の哲学に関して文献研究を開始した。既存の心の哲学、現象学の文献から心脳限界認識に関連する哲学的議論を抽出し、論点の整理を行うことで、議論のテーブルを設定した。それをもとに、領域全体での会議において、限界突破概念について哲学的整理を行った。また、倫理研究としてはエンハンスメントと人間性、社会性について国民の意識を調査した。

2 年目(2021 年度)は、2020 年度に引き続き、心脳限界認識の哲学に関して文献研究を実施した。既存の心の哲学、現象学の文献から抽出した心脳限界認識に関連する哲学的議論をもとにした議論のテーブルをもとにして、限界突破概念について哲学的整理を推進した。倫理研究としてはエンハンスメントと人間性、社会性について国民意識調査を実施した。結果として、エンハンスメントに関する欲求については、社会経済的格差が影響している。また、エンハンスメントの欲求は他者の行動に影響されることがわかった。

3 年目(2022 年度)は、2021 年度に引き続き、心脳限界認識の哲学に関して文献研究を実施した上で、一般市民を対象とした調査の分析を進め、専門家グループで検討を重ね、研究成果を取りまとめて論文化を行った。限界の経験を有する群、限界を見据えて努力するとをやめた経験を有する群、それらふたつを有さない群の 3 群は均等に分かれる(Nakazawa E, Mori K, Akabayashi A. 2022. Individual experiences with being pushed to limits and variables that influence the strength to which these are felt: A cross-sectional survey study. J 5(3):358–368.)。倫理研究としてはエンハンスメントと人間性、社会性について国民意識調査の結果を取りまとめ、論文化を行った。エンハンスメントに関する欲求については、限界経験、および社会経済的格差が影響している。また、エンハンスメントの欲求は他者の行動に影響される(Nakazawa E, Mori K, Udagawa M, Akabayashi A. 2022. A cross-sectional study of attitudes toward willingness to use enhancement technologies: implications for technology regulation and ethics. BioTech 11(3):21.)。

心脳限界突破という新たな融合領域において、倫理的・法的・社会的問題を人文学的アプローチにもとづいて掘り下げ、概念を彫琢することは、領域に社会的・学問論的位置づけを与えることに貢献すると考えられた。病態・健常・卓越の三様態を横断し、自己の心脳限界を認識し突破を欲する主体として人間を捉えることは、既存のエンハンスメント論の刷新になるのみならず、心脳限界突破の科学が浮かび上がらせる新たな人間像を社会に提示することであり、本研究の創造的な点である。

心脳限界認識の哲学と心脳限界突破の倫理学という研究目的のために、理論的研究と経験的研究を織り交ぜた複合的な手法を採用するのが、本研究の独自性であった。哲学的研究としては、心の哲学、現象学において培われた研究手法を軸にしつつ、適宜、行動経済学の哲学など社会哲学を援用した。倫理学的研究としては、倫理理論に基づく理論的分析のみならず、心と脳に関する自然科学の知見を尊重し、かつ、質問紙調査や聞き取り調査など経験的手法を用いることにした。こうした哲学理論横断的、かつ、理論-経験横断的な研究手法は、哲学・倫理学研究の方法論の構築という観点から独自性を有したと考えられる。