

令和元年6月18日現在

機関番号：82611

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2014～2018

課題番号：26120003

研究課題名(和文)身体変化への脳適応機構の解明

研究課題名(英文)Neural adaptative mechanism for physical changes

研究代表者

関 和彦 (SEKI, KAZUHIKO)

国立研究開発法人国立精神・神経医療研究センター・神経研究所 モデル動物開発研究部・部長

研究者番号：00226630

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 168,000,000円

研究成果の概要(和文)：サルを対象とした神経生理学的実験から脊髄、中脳、小脳、及び大脳皮質における筋シナジーの神経表現を明らかにすると同時に、各領域間での動作原理を明らかにした(fast dynamics)。また腱付け替え手術によって人工的な身体変化を施した際の筋シナジー構造の長期的な変容の時定数を明らかにした(slow dynamics)。また、小脳は順モデルと等価な状態予測を行うこと筋シナジー制御器であることを報告した。またヒトを対象としたMRI実験では、新しいデコーディング法を開発した。これらの研究を基礎にして、筋シナジーを用いた脳卒中患者の重篤度を評価する新たな診断方法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

筋シナジー制御器の作動原理と身体変化に対する筋シナジー制御器再形成過程の神経基盤(slow dynamics)はわかっていない。例えば、筋シナジーは半世紀前に提唱された古い概念であるが、当該領域研究開始前は、その脳神経系での動作原理や身体の変容に対する再形成過程はほとんど未知であった。この点、本研究によってその一旦が明らかになった点は高い学術的意義がある。またこれらの研究成果を用いて脊髄小脳変性症や脳卒中患者を対象とした新規診断方法を提案した点は高い社会的意義を有する。

研究成果の概要(英文)：Our research group is based on three major Neuroscience hub in Japan (NCNP, NICT, TMIMS). Through frequent collaboration and discussion, we found how the embodied brain control our body. Aim of our collaborative study was to know the neural organization of muscle synergy generator and controller using electrophysiology and functional Brain imaging and propose the biomarker of brain plasticity on body representation. Through five years of collaborative research, slow dynamics in the neural adaptation to body alternation / development / adaptation to disease was investigated, and their relation to muscle synergy (generator and controller) were addressed. It is expected that we will continue collaborative research even after the research period for elucidating underlying mechanisms.

研究分野：神経科学

キーワード：脳内身体表現 筋シナジー神経表現 slow dynamics カルマンフィルター MRIデコーディング 脳卒中
中 脊髄小脳変性症 ジストニア

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

筋シナジー制御器の作動原理と身体改変に対する筋シナジー制御器再形成過程の神経基盤 (slow dynamics) の解明を目標に5年間の研究を遂行した。筋シナジーは半世紀前に提唱された古い概念であるが、当該領域研究開始前は、その脳神経系での動作原理や身体の変容に対する再形成過程はほとんど未知であった。

2. 研究の目的

本研究項目の具体的な目的は筋シナジー生成器及び制御器の脳内神経基盤を明らかにし、身体の筋骨格構造の変化や体性感覚の遮断に対する上記神経機構の可塑性 (slow dynamics) を実験的に明らかにする事である。

3. 研究の方法

研究は3拠点で協力しながら遂行した。NCNP 拠点ではマカクサルを対象とした電気生理学的な実験系によって、筋再配置における中枢神経系可塑性のダイナミクスを定量化した。具体的には筋シナジーに注目し、再配置された筋がリハビリ訓練によってどのようにその電氣的活動を变化させるかを確認した。また、可塑性誘導における感覚入力役割を調べるための光遺伝学的実験系を開発して行った。CiNet 拠点では、非侵襲的機能画像解析の実験技術を駆使して、たとえば指運動の bold 信号によるデコーディングなどから筋シナジーの皮質表現にアプローチした。また東京都医学研拠点では小脳が筋シナジー制御器を表現しているという仮説を検証するために、電気生理学的実験や計算論的神経科学手法を併用して研究を行った。

4. 研究成果

5年間の研究成果は多岐にわたる。例えば、サルを対象とした神経生理学的実験から脊髄、中脳、小脳、及び大脳皮質における筋シナジーの神経表現を明らかにすると同時に、各領域間での動作原理を明らかにした (fast dynamics)。また腱付け替え手術によって人工的な身体改変を施した際の筋シナジー構造の長期的な変容の時定数を明らかにした (slow dynamics)。また、小脳は順モデルと等価な状態予測を行うこと筋シナジー制御器であることを報告した。またヒトを対象としたMRI実験では、新しいデコーディング法を開発し、ヒトの運動準備脳活動から動員されている筋シナジーの種類や反応時間を予測することに成功した。これらの研究を基礎にして、筋シナジーを用いた脳卒中患者の重篤度を評価する新たな診断方法を提案した。以下に代表的研究成果を述べる。

(1) 脳内身体表現変化の slow and fast dynamics を評価するための豊長類モデルの確立

筋肉や骨格系の構造は生後様々な変化をするが、その変化に関わらず同じ行動を行うことができるのは生物の大きな特徴だと言える。さらに事故などで四肢の一部が失われた場合も、義足や義手の適用によって事故前に近い運動が可能の場合さえある。これらの例は、筋骨格系構造の変化が、行動制御の中核である脳神経系に伝えられ、筋骨格系の変化に合わせてその機能や構造が適応的に変化し、それによって変化後の四肢が制御されていると考えられる。しかし、この適応的変化の生物学的実態はほとんど明らかにされていない。そこで本研究では、中枢神経系に身体に関する多様な情報が集約された表象がなされていると想定し (脳内身体表現) それらが筋骨格系の構造変化に対応する形で変化することによって行動適応が実現しているという仮説を検証した。最終年度の本年度は、前年度までに作出した動物モデルにおいて記録した生理学的データの解析により、進展が認められた。第一に一方向性筋再配置モデルの解析から、身体改変に対する神経系機能 適応の slow dynamics には2つの局面が存在する事が明らかになった。まず再配置筋及び周辺筋の把握運動時の筋活動パターンとその3ヶ月間の時系列的变化を非負値行列因子分解 (NNMF) によって分解する解析方法を確立した (B01: 矢野・近藤博士と連携)。抽出された2つの要素は、それぞれ異なった適応の時系列を呈していた。つまり、急性期と慢性期ではそれぞれ異なった神経適応機構が働いて slow dynamics を作り出している可能性が示された。第二に、両方向性再配置モデル (つけかえ) を用いた解析からは、筋シナジーによる運動制御様式にも、その適応過程において2局面が存在する可能性を見出した (B03: 船戸博士と連携)。適応期間中、筋シナジーの空間パターンは変化しなかったが、一方各筋シナジーの時間変動が2相性の変化を示した。つまり、適応急性期には付け替えた筋が主要な貢献をする筋シナジーの時間変動パターンが、入れ替わるような現象を認めた。しかし、運動パフォーマンスの向上とともに、再び元の時間パターンに近似してゆく変化を示した。これは、たとえば関節屈曲筋シナジーへの運動指令コマンドに対して、関節進展を示す間隔フィードバックを中枢神経系が受けると、あたかも、その運動コマンドを関節進展シナジーへのコマンドと入れ替えて、運動制御を試みる (局面1)。その後、再学習によって、平衡点を探索する (局面2) ようであった。

以上2つの筋再配置モデルの解析から、身体改変への中枢神経系適応の slow dynamics には少なくとも2局面があることが明らかとなった。筋シナジー空間パターン (筋シナジー生成器: 脊髄や1次運動野を想定) が変わらず、筋シナジーの時間変動 (筋シナジー制御器: 小脳や運動前野・頭頂葉などを想定) が適応局面によって柔軟に変化するという適応パターンは、身体や中枢神経系への損傷などへの適応メカニズムのプロトタイプと考えることができる。

(2) 小脳における状態予測のメカニズム解明および小脳性運動障害の評価精度の10倍化

B-1. 小脳における状態予測の証明

寛(都医学研)グループは、B01 班の田中宏和博士(北陸先端科学技術大学院大学)と共同で、大脳小脳における順モデル仮説の検証を行った。感覚情報は数十 msec 以上の遅れを伴い脳に到達し、そのままでは制御が不安定になる。そこで小脳にあるとされる順モデルの状態予測でこの遅れを補正し、滑らかで正確な制御が実現されるとする仮説が有力である。この順モデルは脳内身体表現の中核であるが、その実態は不明であった。そこで我々は運動課題中のニホンザルの小脳で苔状線維(入力)、プルキンエ細胞(中間)、歯状核細胞(出力)という3つの神経細胞集団の活動を分析し、歯状核からの小脳出力が未来の小脳入力(=運動野の出力)を予測する情報を持ち、カルマンフィルター等であることを明らかにした(Tanaka et al. The Cerebellum, 2019)。

B-2. 小脳障害評価のデジタル化

小脳障害の脳内身体表現を分析するには、医師による低精度(数 cm)の肉眼評価に代わる、mm 単位の高精度評価を可能にするシステムが必要になる。そこで Microsoft 社および B02 近藤グループと共同で Kinect v2 を利用して小脳機能評価システム SARA のデジタル化を行った[2]。このシステムでは、記録精度の10倍化に加え、全身の異常運動を同時に評価可能であり(図1)従来のSARAを越える全く新しいシステムである。今後、複数の synergy controller が並列動作する脳内身体表現の分析ツールとして活用する予定である。

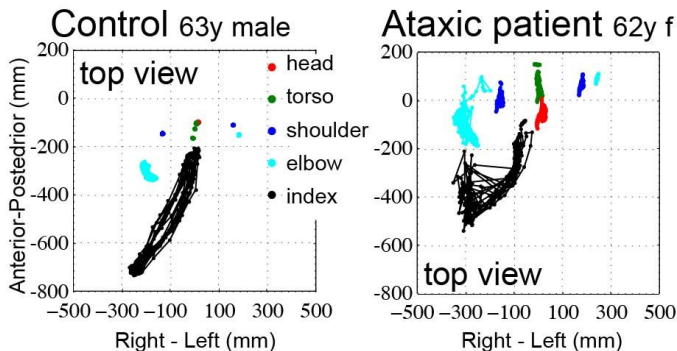


図1 Kinect v2 による SARA の鼻-指試験のデジタル化: 従来の臨床評価では指先(黒)のみの動きを低精度(数 cm)で評価してきた。新システムでは身体局所の動きを mm 単位の高精度で評価し、さらに全身の他の部位の動きも同時記録できるため、異常運動の全体像の評価が可能である。小脳失調患者では、指先の振戦のみならず体幹や肩肘等の近位部の動揺が増加していることに注目。

(3) ヒトの大脳 小脳連関の発達 (slow dynamics)の解明

研究分担者の内藤(情報通信研究機構)グループは、寛(都医学研)らが行っている大脳 小脳ループの研究に関連して、人の大脳 小脳ループが発達に伴い、どのように形成されるのかについて、MRI 研究を行った。まず、DiffusionMRI を用いて、小学生(8-11 歳)、中学生(12-15 歳)、成人(18-23 歳: 各 19 名)の脳内神経線維を撮像し、大脳から小脳への入力線維、小脳から大脳への出力線維および脊髄から小脳への入力線維を描出した。これらの線維の成熟(例えば髄鞘化)度合いを定量的に評価すると、全ての線維が(両半球とも)、小学生、中学生、成人へと成長するに伴い、ゆっくりと成熟することがわかった[1]。続いて、FunctionalMRI を用いて、小学生、中学生、成人が 1Hz の音に正確に合わせた手首運動をしている際の脳活動を計測し、小脳の機能結合の発達の变化を調査した。成人に比べると、小学生・中学生では、大脳(運動野)と小脳の遠距離領域間の機能結合が弱く、反対に、小脳内(小脳皮質と核)の機能結合が強いことがわかった[1]。発達に伴い、小脳内の局所的機能結合は減弱し、反対に運動野 小脳の遠距離領域間の機能結合が徐々に優位となることがわかった(図2)。これら一連の結果は、運動制御において重要な働きをする運動野 小脳ループは小学生ではまだ解剖学的にも機能的にも未成熟で、発達に伴いゆっくりと成熟していくことを示した。また、この研究は、人の脳機能が、局所的機能結合が優位な状態から遠距離領域間の機能結合が優位になる状態へと成熟するという slow dynamics の原理が、運動野 小脳連関の発達にも当てはまることを初めて明らかにした。

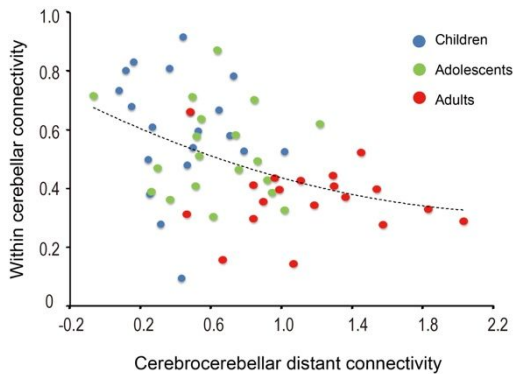


図2 手首運動制御における、小脳内局所機能結合優位から運動野 小脳遠距離領域間機能結合優位への発達。ドットは各被験者のデータ。青: 子供、緑: 中学生、赤: 成人。縦軸に小脳局所結合の度合い(a.u.)、横軸に運動野 小脳遠距離領域間結合の度合いを示す。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 104 件)

- Amemiya K, Morita T, Saito DN, Ban M, Shimada K, Okamoto Y, Kosaka H, Okazawa H, Asada M, Naito E, Local-to-distant development of the cerebrocerebellar sensorimotor network in the typically developing human brain: a functional and diffusion MRI study, Brain Structure and Function, 224(3), 2019, 1359-1375. doi: 10.1007/s00429-018-01821-5

2. Tanaka H, Ishikawa T, Takei S, Neural evidence of the cerebellum as a state predictor. *Cerebellum*, doi:10.1007/s12311-018-0996-4. 2019.
3. Takei S, Ishikawa T, Lee J, Honda T, Hoffman DS, Physiological and morphological principles underpinning recruitment of the cerebellar reserve. *CNS & Neurological Disorders - Drug Targets*, 17:184-192, 2018. doi: 10.2174/1871527317666180315164429.
4. Morita T, Saito DN, Ban M, Shimada K, Okamoto Y, Kosaka H, Okazawa H, Asada M, Naito E, Self-face recognition begins to share active region in right inferior parietal lobule with proprioceptive illusion during adolescence. *Cerebral Cortex*, 28(4):1532-1548, 2018. 査読有 DOI: 10.1093/cercor/bhy027
5. Hirose S, Nambu I, Naito E, Cortical activation associated with motor preparation can be used to predict the freely chosen effector of an upcoming movement and reflects response time: An fMRI decoding study. *Neuroimage*, 183:584-596, 2018. 査読有 DOI: 10.1016/j.neuroimage.2018.08.060
6. Min K, Shin D, Lee J, Takei S, Electromyogram refinement using muscle synergy based regulation of uncertain information. *J Biomech*, 72:125-133, 2018
7. Min K, Iwamoto M, Kimpara H, Takei S. Muscle synergy-driven robust motion control. *Neural Computation*, 30(4): 1104-1131, 2018 doi : [10.1162/neco_a_01063](https://doi.org/10.1162/neco_a_01063)
8. Ikegami T, Ganesh G, Takeuchi T, Nakamoto H, Prediction error induced motor contagions in human behaviors, *eLife*, 7, 2018, e33392 査読有 DOI: 10.7554/eLife.33392
9. Takei T, Confais J, Tomatsu S, Oya T, Seki K, Neural basis for hand muscle synergies in the primate spinal cord. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 114 (32): 8643-8648, 2017.
10. Confais J, Kim G, Tomatsu S, Takei T, Seki K, Nerve-specific input modulation to spinal neurons during a motor task in the monkey. *J. Neurosci*. 37(10):2612-2626, 2017.
11. Tomatsu S, Kim G, Confais J, Seki K. Muscle afferent excitability testing in spinal root-intact rats: Dissociating peripheral afferent and efferent volleys generated by intraspinal microstimulation. *J. Neurophysiol*, 117(2): 796-807, 2017
12. Naito E, Morita T, Saito DN, Ban M, Shimada K, Okamoto Y, Kosaka H, Okazawa H, Asada M, Development of right-hemispheric dominance of inferior parietal lobule in proprioceptive illusion task, *Cerebral Cortex*, 27(11):5385-5397, 2017.
13. Morita T, Saito DN, Ban M, Shimada K, Okamoto Y, Kosaka H, Okazawa H, Asada M, Naito E, Self-face recognition shares brain regions active during proprioceptive illusion in the right inferior fronto-parietal superior longitudinal fasciculus III network. *Neuroscience*, 348, 2017, 288-301
14. Ikegami T, Ganesh G, Shared mechanisms in the estimation of self-generated actions and the prediction of other 's actions by humans, *eNeuro*, 4(6), 2017, 0341-17 DOI: <https://doi.org/10.1523/ENEURO.0341-17.2017>
15. Ishikawa T, Tomatsu S, Izawa J, Takei S. The cerebro-cerebellum: Could it be loci of forward models? *Neurosci Res* 104:72-79, 2016.
16. Tomatsu S, Ishikawa T, Tsunoda Y, Lee J, Hoffman DS, Takei S, Information processing in the hemisphere of the cerebellar cortex for control of wrist movement. *Journal of Neurophysiology*, 115:255-270, 2016.
17. Amemiya K, Naito E. Importance of human right inferior frontoparietal network connected by inferior branch of superior longitudinal fasciculus tract in corporeal awareness of kinesthetic illusory movement, *Cortex*, 78, 2016, 15-30.
18. Naito E, Morita T, Amemiya K, Body representations in the human brain revealed by kinesthetic illusions and their essential contributions to motor control and corporeal awareness, *Neuroscience Research*, 104, 2016, 16-30 査読有 DOI: 10.1016/j.neures.2015.10.013
19. Naito E, Ota J, Murata A, Body representation in the brain, *Neuroscience Research*, 104, 2016, 1-3 査読無 DOI: 10.1016/j.neures.2015.12.014
20. Yaguchi H, Takei T, Kowalski D, Suzuki T, Mabuchi K, Seki K: Modulation of spinal motor output by initial arm postures in anesthetized Monkeys. *Journal of Neuroscience*, 35(17): 6937-6945, 2015. DOI:[10.1523/JNEUROSCI.3846-14.2015](https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3846-14.2015)
21. Hirose S, Nambu I, Naito E, An empirical solution for over-pruning with a novel ensemble-learning method for fMRI decoding. *Journal of Neuroscience Methods*, 239, 238-245, 2015. 査読有 DOI: 10.1016/j.jneumeth.2014.10.023
22. Nambu I, Hagura N, Hirose S, Wada Y, Kawato M, Naito E Decoding sequential finger movements from preparatory activity in higher-order motor regions: an fMRI multi-voxel pattern analysis. *European Journal of Neuroscience*, 42(10): 2851-2859, 2015.

[学会発表](計 129 件)

1. Seki K: Sensory and motor gating at the primate spinal cord during voluntary movement: a neural correlate of muscle synergy and active inference. Common Lecture Series organized by the Werner Reichardt Centre for Integrative Neuroscience and other institutes/centres of the University of Tuebingen. 2018年.
2. Seki K: Sensory gating - origins, mechanisms, functions. Neural Control of Movement 2018.
3. Naito E, Morita T, Saito DN, Ban M, Shimada K, Okamoto Y, Kosaka H, Okazawa H, Asada M, Development of right-hemispheric dominance of inferior parietal lobule in proprioceptive illusion, Human Brain Mapping2018
4. Morita T, Saito DN, Ban M, Shimada K, Okamoto Y, Kosaka H, Okazawa H, Asada M, Naito E, Development of right-hemispheric dominance in self-body recognition tasks, Human Brain Mapping2018
5. Amemiya K, Morita T, Hirose H, Ikegami T, Hirashima M, Naito E, Sightedness and blindness influence subjective sensory experiences during motor imagery, Human Brain Mapping2018
6. Hirose S, Furuyama K, Naito E, Data glove to measure hand movement in 7-Tesla fMRI, EmboSS2018
7. Amemiya K, Morita T, Hirose H, Ikegami T, Hirashima M, Naito E, Sightedness and blindness influence subjective sensory experiences during motor imagery, Neuro2018
8. Takei S: Cerebro-cerebellar communication loop: its contribution to cognitive brain functions. The 75th FUJIHARA Seminar: "The Cerebellum as a CNS hub - from its evolution to therapeutic strategies", 2018年.
9. Takei S: Physiological basis of cerebellar ataxia. The 4th Taiwan International Congress of Parkinson's Disease and Movement Disorders, 2018年.
10. Seki K: Sensory gating during volitional movements: neuronal correlates at the cortical and subcortical levels. JSPS 2 国 間 セ ミ ナ - New Directions in Somatosensation. UCL Institute of Cognitive Neuroscience, 2017年.
11. Seki K: Sensory gating and presynaptic inhibition during voluntary movement. Neural Control of Movement 2017. Clayton Hotel Burlington Road, Dublin, Ireland, 2017年.
12. Takei S: New approaches to neuroinformatics. Advances in neuroinformatics, AINI 2017.
13. Takei S: Overlooked Holmes' clinical signs: reevaluation by recent physiological findings. Taiwan Society of Clinical Neurophysiology, 2017年.
14. Seki K: Voluntary movement and spinal interneuronal circuit: non-human primate study. Australasian Neuroscience Society Annual Scientific Meeting 2016.
15. Seki K: Sensorimotor regulation of limb movement and its disorder: insights from nonhuman primate studies. Department of Physiology, Monash University. 2016年.
16. Seki K: A neural basis of hand muscle synergy. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2016). Daejeon Convention Center, Korea, 2016年.
17. Seki K: "Exploring a neural correlate of muscle synergy in the spinal cord" Embodied-Brain: Perspectives from Motor Control and Muscle Synergies. Hotel Villa Diodoro, Italy, 2016年.
18. Seki K: Non-human primate research for elucidating sensorimotor function. Meeting at University Collage of London. University Collage of London, 2016年.
19. Naito E: Imaging human central motor system in children, ICONIP2016, 2016年.
20. Naito E: Elucidating the development of human central motor system, NTT sponsored symposium: Elucidating and improving the athletic brain: Synergy of cognitive neuroscience and information technology in ICP2016, 2016年.
21. Takei S: Dissociation and evaluation of outputs from predictive and feedback controllers for tracking movements in normal subjects and patients with neurological disorders. Advances in Neuroinformatics (AINI), 2016年.
22. Lee J, Takei S: Development and clinical application of a novel system to make quantitative evaluation of motor function using wrist movement. IGAKUKEN Summit for Japan and Korea Science Leaders, 2016年.
23. Ishikawa T, Hoffman DS, Takei S: Intrinsic movement representation in the cerebrocerebellum. 46th Annual Meeting of Society for Neuroscience, 2016年.
24. Ishikawa T, Takei S: The cerebrocerebellum contains a forward model to control voluntary arm movement. The 1st International Symposium on Embodied-Brain Systems Science, 2016年.
25. Seki K: Embodied-Brain Systems Sciences 37TH ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE IEEE Engineering in Medicine and Biology Society Milano, Italy 2015年.
26. Ishikawa T, Tomatsu S, Hoffman DS, Takei S: Disinhibition of dentate nuclear cells generates output from the cerebrocerebellum. 9th International Symposium of the

- Society for Research on the Cerebellum, 2015 年.
27. Honda T, Nagao S, Kakei S, Ito M: Roles of two types of internal models of the cerebellum in prism adaptation of hand-reaching movement. 9th International Symposium of the Society for Research on the Cerebellum, 2015 年.
 28. Seki K: Subcortical control of voluntary movement, 18th Thai Neuroscience Society Conference 2014 and 2nd CU-NIPS Symposium, Thailand, 2014 年.

〔図書〕(計 13 件)

1. 関和彦、内藤栄一ほか、東京大学出版会、身体性システムとリハビリテーションの科学 1 運動制御 第 2 章「運動制御の脳科学」 太田順、内藤栄一、芳賀信彦編、2018 年 11 月 20 日、pp. 43-74、ISBN-10: 4130644017; ISBN-13: 978-4130644013
2. 関和彦、内藤栄一ほか、朝倉書店、手の百科事典 II 機能編 3 章「筋骨格制御系」、4 章「感覚統合」 伊藤宏司編集幹事 バイオメカニズム学会編、pp. 107-116、2017 年 6 月 25 日、ISBN978-4-254-10267-3
3. 内藤栄一、朝日新聞出版、「運動がうまくなりたい！」 脳の神秘を探ってみよう 第 1-4 章 テルモ生命科学芸術財団協力、pp. 44-55、2017 年 3 月 30 日、ISBN-10: 4023315834
4. 守田知代、内藤栄一、金子書房、「Neuroimaging から見た発達研究」児童心理学の進歩 55、pp.274-298、2016
5. 内藤栄一、先端医療技術研究所、第 3 章「脳内身体表現の変容にフォーカスしたリハビリテーション 脳科学の立場から」先端医療シリーズ 47「臨床医とメディカルのための最新リハビリテーション」、pp.44-45、2016 年 9 月 30 日、ISBN-10: 4925089595; ISBN-13: 978-4925089593
6. 水口暢章、川人光男、内藤栄一、朝倉書店、「ブレインマシーンインターフェース」情動学シリーズ 5 情動と運動 -スポーツとこころ- 小野武年監修、pp. 40-54、2016 年 3 月 25 日、ISBN978-4-254-10695-4
7. 内藤栄一、ベースボールマガジン社、「イメージトレーニングで動作定着と向上を図ろう」特集 競技動作 & パフォーマンス向上プロジェクト Part4 コーチング・クリニック 9 月号、pp. 18-21、2016 年 7 月 27 日、ISBN-13: 4910137250598
8. 関和彦: 運動制御 脊髄レベル/末梢神経レベル 脳神経外科診療プラクティス 6 脳神経外科医が知っておくべきニューロサイエンスの知識. 文光堂 pp 55-70, 2015
9. 関和彦ほか: 運動に関わる下行路と脊髄神経回路 神経科学の最前線とリハビリテーション-脳の可塑性と運動- 医師薬出版株式会社 pp 9-15, 2015
10. 内藤栄一、南部功夫、廣瀬智士、真興交易医書出版部、「脳内表現」ニュー運動生理学 (I) 宮村実晴編 第 1 章 運動と中枢神経、pp. 26-37、2014 年 9 月 25 日、ISBN-10: 4880038865; ISBN-13: 978-4880038865

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名: 内藤 栄一

ローマ字氏名: (NAITO, eiichi)

所属研究機関名: 国立研究開発法人情報通信研究機構, 脳情報通信融合研究センター

部局名: 脳情報通信融合研究室

職名: 研究マネージャー

研究者番号 (8 桁): 1028329

研究分担者氏名: 笥 慎治

ローマ字氏名: (KAKEI, shinji)

所属研究機関名: 公益財団法人東京都医学総合研究所,

部局名: 運動・感覚システム研究分野

職名: プロジェクトリーダー

研究者番号 (8 桁): 40224365