

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25年 4月30日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22500283

研究課題名（和文） ゲーム遂行における行動の階層的脳内表現と臨床応用

研究課題名（英文） Hierarchical neuronal representations of behavior during game-playing and their clinical applications

研究代表者

坂本 一寛 (SAKAMOTO KAZUHIRO)

東北大学・電気通信研究所・助教

研究者番号：80261569

研究成果の概要（和文）：ゲームは古くから人々に楽しまれてきた。読み・予測が当たり外れ、認知や動作の空間性等は、ゲームの楽しさの重要な要因である。本研究では、サル神経細胞活動記録より、背側運動前野が潜在的にとりうる行動の多重的な予測に、補足眼野がよい／悪い出来事の予測および予測と結果の差に関与することを示唆する結果を得た。また、“楽しみ” “空間” “予測” を備えた障害者用の訓練ゲーム及び文字入力デバイスを開発した。

研究成果の概要（英文）：Prediction-outcome and spatial aspects in cognitive behavior are important factors of funs in games. Here, we obtained neuronal activities suggesting that dorsal premotor area is involved in multiple predictions of possible behaviors, whereas supplementary eye field is related to prediction of positive and negative outcomes and detection of surprising outcomes. We also developed a training game and a character input device providing “funs”, “special aspects” and “predictions” for physically challenged people.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：脳神経科学・神経科学一般

キーワード：行動神経科学、前頭葉、障害者用インターフェース

1. 研究開始当初の背景

ゲーム等で複雑な行動を遂行する際、前頭葉の諸領域の神経活動は、例えば、前頭前野は行動のルールを、補足運動野等は個々のアクション間の関係を、といった具合に意味的階層性を示すと考えられている(cf. Tanji et al,2007)。この階層的脳活動を更に解明し、それを臨床応用できれば、肢体不自由患者等の生活の質をより向上できると考えられる。

例えば、前頭葉脳活動の階層的行動表現をBCI(brain-computer interface)等に応用できれば、これまでの第一次運動野一辺倒のものより、より患者の意図をくみ取ることができるインターフェース/デバイスを構築できると期待される。このようなねらいを持ち、研究を開始した。

2. 研究の目的

ところが、分担者・橘の障害者、特に若年の脳性麻痺児等の訓練および予備的な研究に基づく当研究グループ内の議論から、患者は潜在的に高い運動能力を持ち、それをうまく引き出すことが重要かつ先決である、という考えに至った。

そこで、当研究グループは、ゲームの持つ“楽しさ”に着目し、ゲーム課題遂行中のサル前頭葉脳活動の機能分化の解明、及び、楽しく身体を使うことにより訓練効果の向上を目指す障害児向けデバイスの開発の二つを目的に据え、研究プロジェクトを再構築した。特に、“楽しさ”のカギとして、例えば、モグラたたきゲームに含まれるような“空間と予測”に焦点を当て、研究を開始した。

3. 研究の方法

サルの前頭葉における神経活動は、以下の二つの課題で検討した。

その一つ、経路探索課題(図1)では、動物は画面に提示された格子状経路中の最終目標(Final Goal)に向けてカーソルを動かすことを求められる。まず、格子の隅に最終目的地が提示される。カーソルの経路は、遅延期間の途中に一部遮断される場合がある。以上の行動準備期間が終了すると、ゴー信号が提示され、行動実行期間が始まる。1回のゴー信号ではサルは開始点周辺の4つの交差点から1つを選んで即時目標(immediate goal)としてカーソルを動かす。最短で3手で最終目的地に到達するが、手数に制限はない。また経路ブロックが経路途中に提示されることもあるし、されないこともある。サルは状況により常に複数の選択肢から行動を選択することになる。

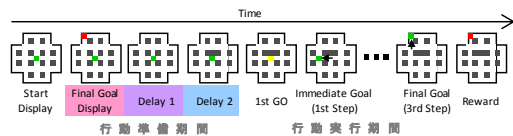


図1 経路探索課題

もう一つは、視覚探索課題と呼ばれる(図2)。サルは、Go信号が出ると、固視点(赤)周囲に提示される4つのターゲット(白)のうちひとつに視線を移す(固視した点は赤に変化)。そのターゲットが正解ならば(赤から緑に変化)報酬が与えられる(図2a)。ある期間では、4つのターゲットのうち隣接する2つの点が交互に正解となる(これをターゲットペアと呼ぶ)。ターゲットペアは一定期間ごとにサルに教示されることなく切り替わる(図2b)。よって、切り替り直後は、サルは探索と正誤を通じて新たなターゲットペアを発見しなくてはならない。

一方、臨床応用の面では、以下のことに取り組んだ。

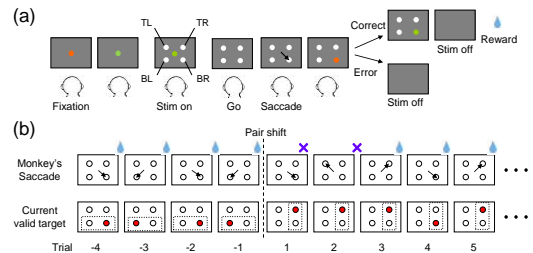


図2 視覚探索課題

脳性麻痺児ではしばしば“空間”が問題になる。字を鏡像に書いてみたり、線のある方向には描けるのに他の方向には描けなかったり。では、そのような空間性の認知・運動訓練を機械的に行うことができるかということ、単調な訓練では子供はモチベーションが上がらず、訓練の効果も上がらない。そこで、視覚探索課題で取り扱った確率・ギャンブル的な“楽しさ”を交え、“空間”的な認知・行動訓練を行うゲームとして、あっちむいてほいゲームを構築することにした。

一方、インターネット等、情報技術の発達は逆に、健常者と障害者の間に“情報格差”と呼ばれるものをもたらしている。インターネット等に強い興味を持っていても、それを操作するデバイス、特に、指の細かい動きが困難な障害者にとって、通常のキーボードによる文字入力には大きな困難が伴う。また、障害のあり方は千差万別であり、デバイスも、体の可動域に合わせたものが必要である。そこで、フレキシブルにキーを空間配置することが可能なボタン型の大きな文字入力装置を構築することにした。

4. 研究成果

経路探索課題遂行中のサル背側運動前野からは多重な行動準備に関わると思われる神経細胞が見つかった(図3)。例えば、図3Aの細胞は、最終ゴール左下が提示されると活動を開始するが、ブロック提示により、DLL(下左左)という経路以外が取れなくなると活動は停止する。一方、図3Bの細胞では、最終ゴールが左上の場合に活動を開始する。経路によらず、つまり ULU(上左上)か LUU(左上上)かによらず L(左カーソル運動)開始直前まで活動を持続する。これらの細胞は、背側運動前野が、与えられた最終ゴールにおいて、取り得る行動の準備(取りえない、ないしはやり終えると、活動は終了)を多重に行っていることを示唆している。このような活動は、前頭前野の細胞活動、特に、最終ゴール位置に応じて、具体的な行動手順の策定に関わる細胞活動と対照的である。つまり、状況に応じ能動的に意思決定する前頭前野に対し、背側運動前野は最終ゴール位置から予測される様々な可能性にある意味受動的

に備えているように見える。このように、行動決定において前頭前野と運動前野は相補的な役割を果たしていると考えられる。

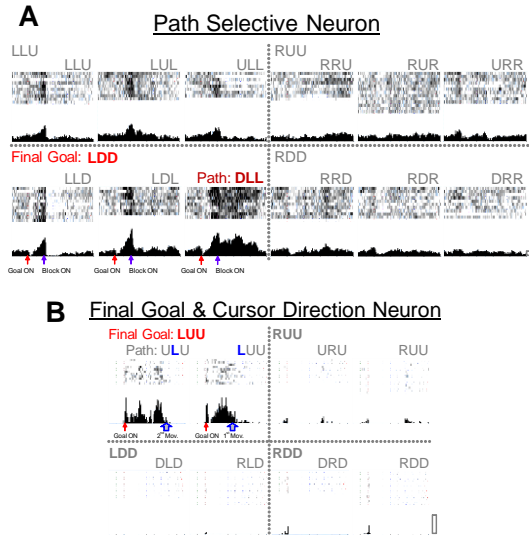


図3 サル背側運動前野の細胞活動例

一方、視覚探索課題遂行中のサル補足眼野からはサプライズ(予想外の出来事)に応じ活動が変化する細胞が記録された。ターゲットペアが切り替わった直後は、これまで不正解と予想された (Prediction of Negative Outcome) ターゲットが予想外に正解になることを発見したり (Detection of Positive Outcome with Surprise)、逆に、これまで正解と予想された (Prediction of Positive Outcome) ターゲットが予想外に不正解になることを発見したり (Detection of Negative Outcome with Surprise) する。今回、このようなポジティブな結果、ネガティブな結果の予想、およびそれらの発見の合計4種類の細胞が、発見された(図4)。更にこれらの細胞活動とサルの行動との関係を解析すると、これらの細胞は探索行動(exploration)や維

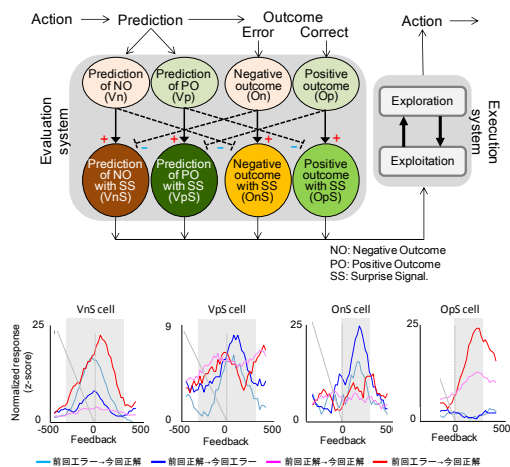


図4 補足眼野サプライズ細胞

持行動(exploitation)の切り替え(それぞれの開始や終了)に関与することが示唆された。我々の日常では、良い結果も悪い結果も同時に予想しながら視線を向け、その結果に応じてその後、異なる行動を取らねばならない場面が多々存在する。今回発見した4種類の細胞が独立したものとして脳に存在することは、結果を目で確認した後素早く異なる行動を取る上で有用であると考えられる。

一方、臨床応用面では、以下のような装置を構築した。

あっちむいてほいゲームでは、じゃんけんを必要とするが、俊敏な動作ができない脳性麻痺児はどうしても遅出しになり、ゲームが成立しない。そこで、図5の通り、じゃんけんの手を予め登録しておく方式を採用した。被験者の応答デバイスには現在はジョイスティックを使っているが、今後は、より大きな動作、様々な動作を用いることができるよう、Kinectの使用を検討している。

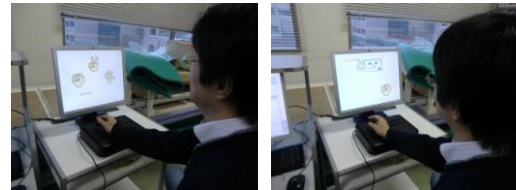


図5. あっちむいてほいゲーム

フレキシブルにキーの空間配置が可能なボタン型の大きな文字入力装置については、図6のようになった。丸い大きなボタンが、1つの文字入力キーである。それにはマグネットがついており、被験者の可動域に合わせて柔軟な空間配置が可能である。また、ボタンが光ることにより次に押すべきキーを支持することもできる。また、使用してみると“もぐらたたきゲーム”的な楽しみもあり、障害者、特に、若年障害者に利用の楽しみをもたらしつつ、運動の訓練にもつながる側面がある。

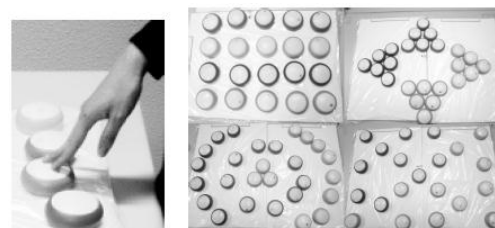


図6. フレキシブル・キー入力装置

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計28件)

- ① 坂本一寛, 虫明元, 行動の計画と前頭前野ダイナミクス, 日本神経回路学会誌,

- 査読無, 20 卷, 2013 年, 37-41 <https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jnns/-char/ja>
- ② 橘香織, 石田菜月, 相楽未由樹, 久保田蒼, 金井欣秀, 青柳亜希, 齋藤由香, 六崎裕高, 和田野安良, 水上昌文, 車いすバスケットボール初級教室への参加が障がい児・者の身体機能及び競技パフォーマンスに及ぼす影響, 茨城県立医療大学紀要, 査読無, 18 卷, 2013 年, 25-32 http://ci.nii.ac.jp/vol_issue/nels/A110564928_jp.html
- ③ Sakamoto K, Yamamoto K, Saito N, Aihara K, Tanji J, Mushiake H, Neuronal synchrony during the planning and execution period in the prefrontal cortex, *Advances in Cognitive Neurodynamics*, 査読有, 2012 年, 331-338 http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-007-4792-0_45
- ④ Kawaguchi N, Sakamoto K, Furusawa Y, Saito N, Tanji J, Mushiake H, Dynamic information processing in the frontal association areas of monkeys during hypothesis testing behavior, *Advances in Cognitive Neurodynamics*, 査読有, 2012 年, 691-698 http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-007-4792-0_92
- ⑤ Mushiake H, Shima K, Sakamoto K, Katori Y, Aihara K, Dynamical neuronal representation in the prefrontal cortex, *Advances in Cognitive Neurodynamics*, 査読有, 2012 年, 9-15 http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-007-4792-0_2
- ⑥ Sakamoto K, Kawaguchi N, Mushiake H, Is advance planning of sequential movements reflected in the behavior of monkeys?, *The 22th Annual Conference of the Japanese Neural Network Society*, 査読有, 2012 年, P3-19 <http://jnns.org/conference/2012/JNNS2012-program.pdf>
- ⑦ Katori Y, Sakamoto K, Mushiake H, Aihara K, Dynamical reorganization of attractor structure in neural network model with dynamic synapses, *The 22th Annual Conference of the Japanese Neural Network Society*, 査読有, 2012 年, P3-11. <http://jnns.org/conference/2012/JNNS2012-program.pdf>
- ⑧ Sakamoto K, Saito N, Mushiake H, Are synchronous neurons in the cortex unique? *IEEE SCIS-ISIS*, 査読有, 2012 年, T1-55-3 <http://scis2012.j-soft.org/download/Oral-Sessions-T1.pdf>
- ⑨ Fukudome M, Wagatsuma H, Tachibana K, Sakamoto K, Neurocognitive rehabilitation approach for cerebral palsy syndrome by using the rhythm-based tapping tool to extend fields of perception and motion, *Proceedings of 9th International Conference on Disability, Virtual Reality and Associated Technologies (ICDVRAT 2012)*, 査読有, 2012 年, 451-454 http://www.icdvrat.reading.ac.uk/2012/papers/ICDVRAT2012_SP09_Fukudome_etal.pdf
- ⑩ Sone M, Wagatsuma H, Tachibana K, Sakamoto K, Robotic rehabilitation tool supporting up and down motions in the bathroom - analyses of the catapult-assisted taking-off mechanism, *Proceedings of 9th International Conference on Disability, Virtual Reality and Associated Technologies (ICDVRAT 2012)*, 査読有, 2012 年, 511-514 http://www.icdvrat.reading.ac.uk/2012/papers/ICDVRAT2012_SP24_Sone_etal.pdf
- ⑪ Wagatsuma H, Fukudome M, Tachibana K, Sakamoto K, Extending the world to sense and behave: a supportive system focusing on the body coordination for neurocognitive rehabilitation. *The Fourth International Conference on Advanced Cognitive Technologies and Applications COGNITIVE*, 査読有, 2012 年, 171-174 <http://www.aria.org/conferences2012/ProgramCOGNITIVE12.html>
- ⑫ 六崎裕高, 橘香織, 清水如代, 堀田和司, 和田野安良, 車椅子バスケットボール選手の二次的障害の調査, *リハビリテーションスポーツ*, 査読無, 31 卷, 2012 年, 70-73 http://ci.nii.ac.jp/vol_issue/nels/A11656087_ja.html
- ⑬ Sakamoto K, Katori Y, Aihara K, Mushiake H, Changes in firing variability depend on network resilience, *The 21th Annual Conference of the Japanese Neural Network Society*, 査読有, 2011 年, P2-45 http://www.jnns.org/conference/misc/technical_programs.pdf
- ⑭ Katori Y, Sakamoto K, Saito N, Tanji J, Mushiake H, Aihara K, Representational

- switching by dynamical reorganization of attractor structure in a network model of the prefrontal cortex, *PLoS Comput. Biol.*, 査読有, 7 巻, 2011 年, e1002266.
<http://www.ploscompbiol.org/article/info%3Adoi%2F10.1371%2Fjournal.pcbi.1002266#close>
- ⑮ Saijo N, Shikata J, Ishizuka T, Uezawa Y, Suemitsu M, Mushiake H, Sakamoto K, A background correction method for Raman spectra of mixed neurotransmitters: Toward a new label-free imaging technology of brain activity, *Neurosci. Res.*, 査読無, 71 巻, 2011 年, Sppl 205
http://www.sciencedirect.com/science?_ob=PublicationURL&method=list&hubEid=1-s2.0-S0168010211X00093&auth=y&version=1&refSource=toc&pubType=J&PDF_DDM_MAX=20&cid=271175&md5=cf8794a6580341020541a9be25fe2b1c&chunk=7&view=c&go=next&count=1808&pdfDownload=&count=1808&PREV_LIST=6&NEXT_LIST=Y
- ⑯ Toyoshima M, Shibata Y, Sakamoto K, Saito N, Tanji J, Mushiake H, Neuronal activity in the dorsal premotor cortex during a path-planning task, *Neurosci. Res.*, 査読無, 71 巻, 2011 年, Sppl 250
http://www.sciencedirect.com/science?_ob=PublicationURL&method=list&hubEid=1-s2.0-S0168010211X00093&auth=y&version=1&refSource=toc&pubType=J&PDF_DDM_MAX=20&cid=271175&md5=cf8794a6580341020541a9be25fe2b1c&chunk=9&view=c&go=next&count=1808&pdfDownload=&count=1808&PREV_LIST=8&NEXT_LIST=Y
- ⑰ 坂本一寛, 脳信号計測法新時代への黎明, *電気学会誌*, 査読無, 131 巻, 2011 年, 822-826
https://www.jstage.jst.go.jp/article/ieejjournal/131/12/131_12_822/_pdf
- ⑱ 橘香織, 金井欣秀, カナダ・アルバータ大学における障害児・者向けスポーツ関連プログラムーステッドワードセンターを訪問して-, 茨城県立医療大学紀要, 査読無, 16 巻, 2011 年, 93-98
<http://ci.nii.ac.jp/naid/110008464710>
- ⑲ Sakamoto K, Kumada T, Yano M, A computational model that enables global amodal completion based on V4 neurons, *LNCS*, 査読有, 6443 巻, 2010 年, 9-16
http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-17537-4_2
- ⑳ Katori Y, Sakamoto K, Mushiake H, Aihara K, Transition of information representation in a multi-stable attractor model of the prefrontal cortex, *Neurosci. Res.*, 査読無, 68 巻, 2010 年, Sppl 1 e324
http://www.sciencedirect.com/science?_ob=PublicationURL&method=list&hubEid=1-s2.0-S0168010210X00128&auth=y&version=1&refSource=toc&pubType=J&PDF_DDM_MAX=20&cid=271175&md5=16380c26da156775051398103695735f&chunk=13&view=c&go=next&count=2007&pdfDownload=&count=2007&PREV_LIST=12&NEXT_LIST=Y
- ㉑ Sakamoto K, Kumada T, Yano M, A neurocomputational model for amodal completion in ambiguous figures, *Neurosci. Res.*, 査読無, 68 巻, 2010 年, sppl 1, e217
http://www.sciencedirect.com/science?_ob=PublicationURL&method=list&hubEid=1-s2.0-S0168010210X00128&auth=y&version=1&refSource=toc&pubType=J&PDF_DDM_MAX=20&cid=271175&md5=16380c26da156775051398103695735f&chunk=8&view=c&go=next&count=2007&pdfDownload=&count=2007&PREV_LIST=7&NEXT_LIST=Y
- ㉒ 橘香織, 坂本由美, 篠崎真枝, 松田智行, 岩本浩二, 大橋ゆかり, 浅川育世, 水上昌文, 本学における OSCE の取り組みと課題, 理学療法いばらき, 査読無, 14 巻, 2011 年, 37-42
<http://mol.medicalonline.jp/library/archive/search?jo=cw2ptiba&ye=2011&vo=14&issue=2&UserID=130.34.173.69>
- ㉓ 橘香織, 水上昌文, 和田野安良, 車椅子バスケットボール競技における慢性関節痛の発生状況, 茨城県立医療大学紀要, 査読無, 15 巻, 2010 年, 26-33
<http://ci.nii.ac.jp/naid/110008464189>
- [学会発表] (計 14 件)
- ① 和田野安良, 池田英治, 六崎裕高, 清水如代, 橘香織, 深谷隆史, 唐澤幹男, 堀田和司, 車椅子バスケットボール男子日本代表選手のメディカルチェック, 第 22 回日本障害者スポーツ学会, 2013 年 1 月 30 日, 和歌山県和歌山市
- ② 唐澤幹男, 六崎裕高, 清水如代, 和田野安良, 橘香織, 深谷隆史, 堀田和司, 池田英治, 男子車椅子バスケットボール日本代表選手における WUSPI について, 第 22 回日本障害者スポーツ学会, 2013 年 1

- 月 30 日, 和歌山県和歌山市
- ③ 我妻広明, 橘香織, 古茂田和馬, 福留麻理恵, 坂本一寛, 脳損傷片麻痺リハビリ支援に向けたオール漕ぎ課題からの検討ーグローバル・エンタテインメント再考ー, 第 33 回 バイオメカニズム学術講演会, 2012 年 12 月 15-16 日, 仙台市
- ④ 坂本一寛, 斎藤尚宏, 吉田隼, 香取勇一, 丹治順, 合原一幸, 虫明元, 前頭前野における情報の動的符号化と興奮・抑制バランスの時間発展 第 44 回東北生理談話会, 2012 年 10 月 27 日, 山形市
- ⑤ Fukudome M, Wagatsuma H, Tachibana K, Sakamoto K, A neurocognitive rehabilitation approach for cerebral palsy syndrome by using the rhythm-based tapping tool to extend fields of perception and motion, 9th International Conference on Disability, Virtual Reality and Associated Technologies, 2012 年 9 月 10-12 日, フランス・ラヴァール
- ⑥ Sone M, Wagatsuma H, Tachibana K, Sakamoto K, Robotic rehabilitation tool supporting up and down motions in the bathroom - analyses of the catapult-assisted taking-off mechanism, 9th International Conference on Disability, Virtual Reality and Associated Technologies, 2012 年 9 月 10-12 日, フランス・ラヴァール
- ⑦ Sakamoto K, Prefrontal dynamics during behavioral planning, Postech-Kyutech Joint Workshop on Neuroinformatics 2012, 2012 年 8 月 21 日, 北九州市
- ⑧ Wagatsuma H, Fukudome M, Tachibana K, Sakamoto K, Extending the world to sense and behave: a supportive system focusing on the body coordination for neurocognitive rehabilitation, The Fourth International Conference on Advanced Cognitive Technologies and Applications COGNITIVE, 2012 年 7 月 22-27 日, フランス・ニース
- ⑨ 橘香織, 金井欣秀, 青柳亜季, 齋藤由香, 水上昌文, 車いすスポーツを利用した地域における健康増進プログラムの展開ー参加者の運動能力に及ぼす影響ー, 第 47 回日本理学療法学会大会, 2012 年 5 月 25-27 日, 神戸市
- ⑩ 橘香織, 松田智行, 大仲功一, 伊佐地隆, 浅川育世, 水上昌文, リハビリテーション病院退院者の「スポーツ」へのニーズに関する調査, 第 15 回日本アダプテッド体育・スポーツ学会, 2011 年 12 月, 茨城県阿見町

- ⑪ Sakamoto K, Katori Y, Saito N, Tanji J, Aihara K, Mushiake H, The modulation of iring variability can be a measure for dynamical states in neuronal network, The 1st Tohoku International Symposium on Multidisciplinary Neuroscience, 2011 年 1 月, 仙台市
- ⑫ 橘香織, 水上昌文, 和田野安良, 車椅子バスケットボール選手と褥瘡, 第 19 回日本障害者スポーツ学会, 2011 年 1 月, 佐賀
- ⑬ 橘香織, 石田菜月, 相楽未由樹, 西本理紗, 金井欣秀, 及川晋平, 和田野安良, 水上昌文, 車椅子スポーツを通じた地域貢献と学生教育のシステム開発ー“IBARAKI Sports for Everyone!”の紹介ー, 第 14 回茨城県理学療法士学会, 2010 年 12 月, 茨城
- ⑭ 橘香織, 水上昌文, 車椅子バスケットボール選手における褥瘡の実態調査ー寝たきり・座りきりでなくても褥瘡はできるー, 第 29 回関東甲信越ブロック理学療法士学会, 2010 年 9 月, つくば市

〔図書〕(計 4 件)

- ① 橘香織, 医歯薬出版, 大橋ゆかり(編)「ビジュアルレクチャー 基礎理学療法学」, 2012, 64-111 ページ
- ② 橘香織, 学研メディカル秀潤社, 落合慈之(監修), 稲川利光(編)「リハビリテーションビジュアルブック」, 2011, 203-211 ページ
- ③ 橘香織, 鈴木匡子, 西村書店, 田川皓一 監訳 「臨床神経心理学ハンドブック」, 2011, 122-132 ページ
- ④ 橘香織, 鈴木匡子, 西村書店, 田川皓一 監訳 「臨床神経心理学ハンドブック」, 2011, 229-233 ページ

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.riec.tohoku.ac.jp/wsrr/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坂本 一寛 (SAKAMOTO KAZUHIRO)
東北大学・電気通信研究所・助教
研究者番号: 80261569

(2) 研究分担者

橘 香織 (TACHIBANA KAORI)
茨城県立医療大学・保健医療学部・助教
研究者番号: 80453025