

平成 22 年 4 月 30 日現在

研究種目：特定領域研究  
 研究期間：2005～2009  
 課題番号：17022036  
 研究課題名（和文）  
 神経回路の動態に基づく大脳皮質－大脳基底核機能連関の計算論的理解  
 研究課題名（英文）  
 Computational understanding of the cortico-basal ganglia interplay through dynamical network behavior  
 研究代表者  
 深井 朋樹 (Fukai Tomoki)  
 独立行政法人理化学研究所・脳回路機能理論研究チーム・チームリーダー  
 研究者番号：40218871

## 研究成果の概要（和文）：

興奮と抑制がバランスしているシナプス入力を受ける大脳皮質ニューロンや神経回路が、入力の揺らぎを利用して情報を表現したり伝達したりする理論的方法を示した。また入力の揺らぎを利用して、完全時間積分を行う意思決定回路を提案した。報酬依存の意思決定の大脳基底核メカニズムを定式化し、マッチング行動の情報理論的起源を明らかにした。大脳皮質の視覚経験依存の回路形成において、抑制回路の可塑性が果たす役割を、実験と理論で明らかにした。多電極記録のデータから多細胞のスパイク列を正確に分離する新しい数学的方法を考案し、ソフトウェアを供給した。

## 研究成果の概要（英文）：

We proposed theories to reveal how cortical neurons and networks receiving balanced synaptic input represent or transmit information. Perfect temporal integration of correlated spike input was proposed for a network mechanism of decision making. We formulated the basal ganglia mechanism of reward-driven decision making and clarified the information theoretic basis of matching behavior. We experimentally and theoretically revealed the essential role of inhibitory circuit plasticity in ocular dominance column formation. We proposed an accurate spike sorting method for multiunit recordings and provided it with an open software package.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	11,500,000	0	11,500,000
2006年度	11,100,000	0	11,100,000
2007年度	8,900,000	0	8,900,000
2008年度	10,000,000	0	10,000,000
2009年度	11,200,000	0	11,200,000
総計	52,700,000	0	52,700,000

研究分野：脳の高次機能学

科研費の分科・細目：神経科学一般

キーワード：神経回路モデル、意思決定、完全時間積分、シナプス可塑性モデル、興奮と抑制のバランス、マッチング行動、多細胞記録

## 1. 研究開始当初の背景

近年、脳の高次機能の発現メカニズムを、神経回路レベルから理解しようという機運が高まりつつある。とりわけ大脳皮質-大脳基底核ループ神経回路は狭い意味での運動生成のみならず、広範な認知的機能において重要な役割を果たしていると考えられている。その仕組みの解明は動物や人間の正常な認知・運動機能の理解だけでなく、パーキンソン病など大脳基底核由来の運動疾患の機序を明らかにし、治療への道を開くことにも貢献する。

神経回路の機能を明らかにするためには、単一ニューロンの活動を観察するだけでは不十分で、神経集団のスパイク活動を記録することが必要になる。そのためにこの10年間に、多細胞記録や光計測の技術が創出され、発展を遂げてきた。さらにさまざまな遺伝子操作の手法などが開発され、特定のシナプス伝達をブロックしたり、細胞の種類を同一化したりすることが可能になりつつある。しかし神経回路は膨大な数のニューロンが、複雑に絡み合ったネットワークを形成しており、実験的手法だけで情報処理メカニズムを解明することは不可能であり、計算モデルや理論による解析が不可欠である。

大脳皮質の情報表現には未だ謎が多い。しかし大脳皮質のニューロンやシナプスについて、近年、さまざまな知見が得られたことも事実である。たとえばシナプス可塑性は、脳の学習機能の神経基盤であると考えられているが、90年代後半に、大脳皮質の興奮性シナプスが、シナプス前ニューロンとシナプス後ニューロンのスパイク発火の時間差によって調節されることが明らかにされた（スパイク時間依存のシナプス可塑性：STDP）。STDPの機能的役割については、膨大な実験的あるいは計算論的研究が為されている。また大脳皮質ニューロンの相互結合（リカレント結合）の重要性に関する理解も進んできた。例えば徐波睡眠状態では、脳波はゆっくりした振動状態を示すことが知られていたが、この状態では大脳皮質ニューロンは、発火を伴うUP状態と発火しないDOWN状態間を自発的に遷移していることや、UP-DOWN状態遷移が大脳皮質のリカレント神経回路の働きで起こることなどが明らかにされた。さらにUP-DOWN状態遷移が長期記憶の固定化に関与していることも示唆された。しかし、この状態遷移を生み出す回路メカニズムや、海馬から大脳皮質への情報伝送と固定化のメカニズムについては、まだ解っていない。

意思決定についても多くの研究が為され、大脳皮質や大脳基底核の本質的関与が明らかになってきた。動物の行動選択の統計的ルールについては、60年代から多くの行動実験

が為されてきたし、80年代に提案された強化学習の時間誤差学習理論（TD学習）によって、行動選択課題を遂行する際に見られるドーパミン細胞の活動が、うまく説明できることもわかってきた。また、感覚入力 of 識別課題では、決定の根拠になる証拠集めに関与すると思われるニューロン活動が、前頭皮質や頭頂皮質などで報告されている。しかし神経回路レベルでの意思決定メカニズムの理解はほとんど進んでいない。

## 2. 研究の目的

大脳基底核は大脳皮質、特に運動関連の前頭皮質領域と連携して、目的に沿った運動の計画、学習、生成などに従事することが知られている。とくに大脳基底核のドーパミン系は、報酬に依存する意思決定において本質的な役割を果たすことが最近の研究によって明らかになっており、ドーパミン細胞の活動は強化学習の時間誤差信号として、うまく解釈できることも示されている。しかし大脳皮質や大脳基底核が意思決定に関わるさまざまな情報を表現したり操作したりする方法や、お互いに連携して行動学習や選択を行うための神経回路メカニズムについては、あまりよくわかっていない。そこで本研究では、領域内外の実験グループと協力しながら、大脳皮質-大脳基底核ループ神経回路の動態に基づく行動学習の計算論的モデルの構築を目指した。また単一ニューロンの発火や、ニューロン集団の活動が表現している情報を読み解くための、強力な数学的手法の構築も行った。特に今まであまり研究されてこなかった、層特異的な大脳皮質ニューロンの性質や神経回路構造に着目し、層依存の計算機能の解明を視野に入れた研究を展開した。

## 3. 研究の方法

当初は大脳皮質と大脳基底核にほぼ等分に比重を置く研究計画を立てたが、大脳皮質について、より大きな進展が望めそうなことがわかってきたため、後半では大脳皮質神経回路の情報処理機能の解明に重点を置き、研究期間を有効に利用することに努めた。

## 4. 研究成果

本研究で得られた主要な結果は以下のとおりである。

(1) 時間積分のための神経回路メカニズムの提案先に述べたように、意思決定では入力情報の時間積分が必要になる。これは外部からの入力を時間積分することで情報を蓄積し、蓄積量がある閾値を越えた時点で、意思決定が為されるという仮説に立っており、この仮説は電気生理実験のデータからも支持されている。ある心理実験の結果から、脳の時間積分の計算精度は極めて高いことが示唆されるが、今までに提案された時間積分の神経メカニズムでは、この性質がうまく説明できなかった。そこで、大脳皮質ニューロンの不規則発火の性質に着目し、興奮性シナプスによって相互に結

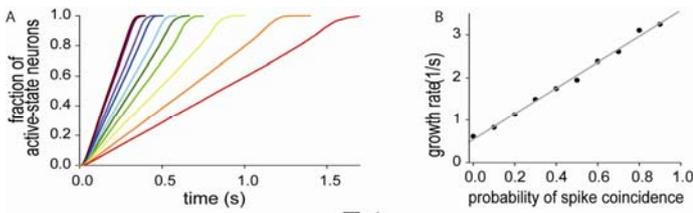


図 1

合する双安定な神経細胞の集団活動を確率過程として定式化し、高精度な積分を行う新しいメカニズムを提案した。このメカニズムでは、各ニューロンの発火状態への遷移は不規則に起こるが、相互シナプス結合の効果で、回路全体ではほぼ一定の遷移率が保たれるため、神経回路全体の活動は、時間に正確に比例して上昇する (図 1A)。しかも回路へのシナプス入力の変動を、スパイク同期の強さによって制御してやると、活動の上昇率が変動の大きさに正確に比例して変化することが理論的に予言された (図 1B)。この結果は、大脳皮質の神経コードにスパイク同期が積極的に関与している可能性を強く示唆する。なお、サルの帯状皮質の神経活動を解析し、モデルの仮定である神経活動の双安定性を確認する結果を得た。

(2) 大脳皮質ニューロンの同期発火の性質を詳細に調べるために、実験および理論による解析を行った。まず 2/3 層と 5 層の大脳皮質ニューロンの位相応答曲線を、細胞内電極記録法によって測定し、層による同期発火性の違いを調べた。その結果、同期発火の周波数が 30Hz ぐらいのときに層による違いが最も顕著であること、またそのとき 2/3 層の錐体細胞にはタイプ I の位相応答曲線を示すものが多く、5 層の錐体細胞にはタイプ II の位相応答曲線を示すものが多いことがわかった。このことは上層の神経回路はガンマ周波数帯で同期発火を好み、深層の神経回路は非同期発火を好む傾向があることを示唆している。さらに実験で示された多様な位相応答をもつ神経集団で起こる同期発火の相転移現象を、振動子の理論的モデルを構築して明らかにした。

(3) 大脳皮質神経回路の自発発火活動のベキ統計から、神経回路の構造を推定した。Plenz らは、ラットの大脳皮質スライス標本から多電極アレイを用いて自発的神経活動を記録し、成熟した大脳皮質 2/3 層の神経回路では同期神経活動の生成と伝播が繰り返され、さらにこれらの同期伝播活動の規模の

分布が、ベキ則分布に従うという興味深い結果を報告した。この現象は Neuronal avalanche と名付けられ、皮質 2/3 層の神経回路に固有の現象であることが報告されている。そこで同期発火伝播のベキ則分布を生み出す神経回路を、活動度依存に生成する配線規則を理論的に考案した。この配線規則は様々なサイズの興奮性細胞のセル・アセンブリを生成し、埋め込み可能なアセンブリの数には理論的上限が存在する。

(4) 大脳皮質ニューロンが不規則なスパイク発火によって情報を表現するメカニズムを、情報幾何学的手法で解明した。スパイク列の不規則性が大きくなればなるほど、発火率情報を読み取ることが難しくなる。しかしスパイク列がガンマ分布に従う場合、揺らぎと発火率変動が情報空間内で直交し、発火率変動に無関係に揺らぎの度合いを判定することが可能になる。逆に揺らぎの度合いが一定に保たれると仮定できれば、スパイク列から発火率を推定することが容易になる。ダイナミック・クランプを用いた実験によって、ニューロンがバランスしたシナプス入力を受けている場合に、まさにそのような情報表現が実現されることを示した。

(5) 不規則な入力スパイク列に対する大脳皮質ニューロンの応答は、高い再現性を示すことが知られている。不規則入力に対する神経振動子の応答メカニズムを理論的に明らかにし、その結果を拡張して、応答の再現性は神経回路レベルでは必ずしも保たれないことを証明した。これらの解析では、ニューロンは振動子とみなされているが、結果はニューロンモデルの詳細にほとんど依存しないことを、数値シミュレーションによって確認した。

(6) 大脳皮質の視覚野の局所回路モデルを構築し、臨界期における視覚野神経回路の形成において、抑制性神経回路が担う決定的な役割を明らかにした。ヘンシュ班員らは、抑制性神経細胞に引き起こされる眼優位性応答は、単眼遮蔽により、最初、遮蔽眼側に強くシフトした後、開眼側にシフトすることを発見した。この変化のパターンは興奮性細胞には見られず、我々の予期に反する結果であった。そこで、神経回路モデルを構築して生物学的メカニズムを探ったところ、抑制性ニューロンに投射する興奮性シナプスに、図 2 のような可塑性規則が働いていれば、パラドクシ的な眼優位性応答の変化が、うまく説明できることが明らかになった。実際、別の研究者の実験によって、類似の可塑性規則が報告されている。この結果は Nature に掲載された。

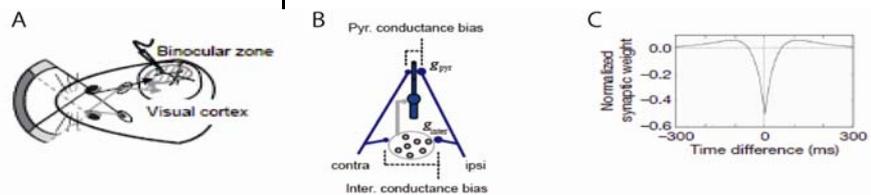


図 2

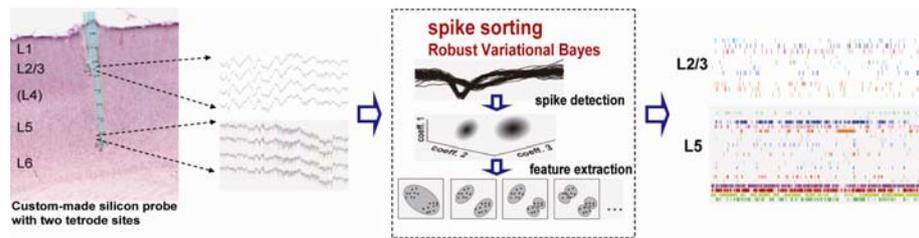


図3

(7) 大脳皮質の神経回路モデルを構築して、UP-DOWN 状態間の自発的遷移が STDP により自己組織化されるメカニズムを提案した。さらに、自己組織化された回路では、ミリ秒精度の正確さをもつ UP 状態遷移の時系列が、繰り返し生成されることを見出した。この精緻な時系列は興奮性のシナプス伝達と H 電流由来の自発的な UP 状態遷移が協調することで生成されることを明らかにした。同様の神経活動は実験においても報告されている。

(8) 動物の確率的な意思決定においては、しばしばマッチング行動という選択行動が観察される。マッチング行動では、ある行動を選択する確率は、その選択肢から過去に得られた報酬の量に比例して決まる。強化学習理論でよく利用される Actor-Critic システムでは、それが最適行動でなくても、常にマッチング行動が実現されることを明らかにした。また行動を最適化する学習モデルを利用していても、真の最適化に必要な環境の変数（例えば自己の選択行動が報酬確率に与える影響）を正しく見積もれないような状況下では、最適行動ではなくマッチング行動が現れることを、理論的にはじめて示した。ここで明らかにしたことは、最適化アルゴリズムの詳細に依らず、きわめて一般的に成り立つ結果であり、マッチング行動が最適行動になっていないような実験課題を用いれば、行動選択の計算論的ルールが心理実験によって確認できる可能性を示唆している。

(9) 大脳基底核への入力は大脳皮質局所神経回路の 5 層の錐体細胞から発生する。そのため大脳皮質局所回路の、層特異的な運動情報の表現と処理のメカニズムの解明は、大脳皮質—大脳基底核連関を明らかにするために特に重要になる。そこで磯村班員と協力し、随意運動をしているラットの脳から傍細胞記録と多細胞記録を実施し、運動の準備や開始、実行、停止に関する神経活動と層との関係を調べた。その結果、層特異的に担当する運動要素が異なるわけではなく、個々の運動要素は各層に分散して表現されていることが明らかになった。

またこの実験では、高速発火型抑制性ニューロンは運動の実行中のみ活動することが明らかになった。この結果は、このタイプの抑制性ニューロンは、運動実行に関係して興奮と抑制のバランスを調節する作業に携わっており、側抑制による運動の選択や、運動

の停止には関わっていないことを強く示唆している。

(10) 大脳皮質や基底核神経回路の働きは、多細胞の神経活動を記録することでしか理解できない。多細胞記録実験においては、記録した電気信号から多細胞のスパイク活動を分離する必要があるが、既存の方法は精度も低く、かなりの部分を人間の手作業によって補完する必要があった。また分離が不正確だと、神経集団の活動が表す情報を誤って読み取ることにもなり兼ねない。そこでロバスト変分ベイズ法に基づく強力なスパイク分離アルゴリズムを開発した(図3)。得られた方法を人工的なデータや、多細胞記録と細胞内記録の同時記録実験の公開データに適用し、我々の方法の高い性能を検証した。

## 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 25 件)

- 1) Takekawa T, Isomura Y, Fukai T. Accurate spike-sorting for multiunit recordings. *European Journal of Neuroscience* 31, 263-272 (2010). 査読有
- 2) Yazaki-Sugiyama Y, Kang S, Câteau H, Fukai T, Hensch TK. Bidirectional plasticity in fast-spiking GABA circuits by visual experience. *Nature* 462, 218-221 (2009). 査読有
- 3) Isomura Y, Harukuni R, Takekawa T, Aizawa H, Fukai T. Microcircuitry coordination of cortical motor information in self-initiation of voluntary movements. *Nature Neuroscience* 12, 1586-1593(2009). 査読有
- 4) Takekawa T, Fukai T. A novel view of the variational Bayesian clustering. *Neurocomputing* 72, 3366-3369 (2009). 査読有
- 5) Okamoto H, Fukai T. Recurrent network models for perfect temporal integration of fluctuating correlated inputs. *PLoS Comput. Biol.* 5(6) e1000404 (2009). 査読有
- 6) Teramae J, Fukai T. Temporal precision of spike response to fluctuating input in pulse-coupled networks of oscillating neurons. *Phys Rev Lett* 101, 248105 (2008). 査読有
- 7) Sakai Y, Fukai T. When does reward maximization lead to matching law? *PLoS ONE* 3(11), e3795(2008). 査読有
- 8) Teramae J, Fukai T. Complex evolution of spike patterns during burst propagation through feed-forward networks. *Biological Cybernetics* 99 (2), 105-114 (2008). 査読有

9) Cateau H, Kitano K, Fukai T. Interplay between a phase response curve and spike-timing-dependent plasticity leads to wireless clustering. *Physical Review E* 77, 051909 (2008). 査読有

10) Sakai Y, Fukai T. The actor-critic learning is behind the matching law: Matching versus optimal behaviors. *Neural Comput.* 20, 227-251 (2008). 査読有

11) Kang S, Kitano K, Fukai T. Structure of spontaneous UP and DOWN transitions self-organizing in a cortical network model. *PLoS Comput. Biol.* 4(3), e1000022 (2008). 査読有

12) 深井朋樹、姜時友、北野勝則、寺前順之介「大脳皮質神経細胞集団の形成：シナプス可塑性とその先」*BRAIN and NERVE: 神経研究の進歩* 60, 763-770 (2008). 査読無

13) Teramae J, Fukai T. Sequential associative memory with non-uniformity of the layer sizes. *Physical Review E* 75, 011910 (2007). 査読有

14) Fujiwara-Tsukamoto Y, Isomura Y, Imanishi M, Fukai T, Takada M. Distinct types of ionic modulation of GABA actions in pyramidal cells and interneurons during electrical induction of hippocampal seizure-like network activity. *Eur J. Neurosci.* 25, 2713-2725 (2007). 査読有

15) Teramae J, Fukai T. Local cortical circuit model inferred from power-law distributed neuronal avalanches. *J. Comput. Neurosci.* 22, 301-312 (2007). 査読有

16) Tsubo Y, Takada M, Reyes AD, Fukai T. Layer and frequency dependences of phase response properties of pyramidal neurons in rat motor cortex. *Eur J. Neurosci.* 25, 3429-3441 (2007). 査読有

17) Okamoto H, Isomura Y, Takada M, Fukai T. Temporal integration by stochastic recurrent network dynamics with bimodal neurons. *J. Neurophysiol.* 97, 3859-3867 (2007). 査読有

18) Takekawa T, Aoyagi T, Fukai T. Synchronous and asynchronous bursting states: Role of intrinsic neural dynamics. *J. Comput. Neurosci.* 23, 189-200 (2007). 査読有

19) Kitano K, Fukai T. Variability v.s. synchrony of neuronal activity in local cortical network models with different topologies. *J. Comput. Neurosci.* 23, 237-250 (2007). 査読有

20) Tsubo Y, Teramae J, Fukai T. Synchronization of excitatory neurons with strongly heterogeneous phase responses. *Physical Review Lett.* 99, 228101 (2007). 査読有

21) Miura K, Tsubo Y, Okada M, Fukai T. Balanced excitatory and inhibitory inputs to cortical neurons decouple firing irregularity from rate modulations. *J. Neurosci.* 27, 13802-13812 (2007). 査読有

22) Takekawa T, Aoyagi T, Fukai T. Synchronization property of slow cortical

oscillations. *Progress of Theoretical Physics Supplement* 161, 356-359 (2006). 査読有

23) Sakai Y, Okamoto H, Fukai T. Computational algorithms and neuronal network models underlying decision processes. *Neural Networks* 19, 1091-1105 (2006). 査読有

24) Okamoto H, Isomura Y, Takada M, Fukai T. Combined modeling and extracellular recording studies of UP and DOWN transitions in awake or behaving monkeys. *Basal Ganglia VIII Advances in Behavioral Biology* 56, 555-561 (2005). 査読有

25) Teramae J, Fukai T. A cellular mechanism for graded persistent activity in a model neuron and its implications in working memory. *Journal of Computational Neuroscience* 18, 105-121 (2005). 査読有

[学会発表] (計 124 件)

1) 竹川高志、磯村宜和、深井朋樹「神経細胞集団のスパイク時系列からの情報抽出」日本物理学会第 65 回年次大会 2010.3. 岡山

2) 坪泰宏、深井朋樹「神経細胞のスパイク時系列が示すべき則の生成機構」日本物理学会第 65 回年次大会 2010.3. 岡山

3) 寺前順之介、深井朋樹「皮質神経回路網の低頻度安定発火状態」日本物理学会第 65 回年次大会 2010.3. 岡山

4) Kang S, Kimura R, Matsuki N, Ikegaya Yi, Fukai T. Functional changes induced by multiple plasticity rules in the hippocampal circuit: simulation and experiment. *Asia Simulation Conference 2009 (JSST 2009)* 2009.10. Kusatsu, Shiga Pref. Japan

5) Teramae J, Fukai T. Trade-off between cell-to-cell synchronization and trial-to-trial reliability in recurrent networks of spiking neurons. *39th Annual Meeting of the Society for Neuroscience (Neuroscience 2009)* 2009.10 Chicago, USA.

6) 寺前順之介、深井朋樹「皮質ニューロン回路網における細胞間同期発火と試行間再現性の相反関係」第 32 回日本神経科学大会 2009.9 名古屋

7) 坪泰宏、磯村宜和、深井朋樹「皮質神経細胞の不規則発火時系列が示唆する条件付エントロピー最小化原理」第 32 回日本神経科学大会 2009.9 名古屋

8) 中江健、伊庭幸人、青柳富誌生、坪泰宏、深井朋樹「位相応答曲線のベイズ推定」2009 年度統計関連学会連合大会 2009.9 京田辺

9) 深井朋樹「神経回路の動態に基づく大脳皮質-大脳基底核機能連関の計算論的理解」平成 21 年度文部科学省特定領域研究「統合脳」夏のワークショップ平成 21 年度文部科学省特定領域研究「統合脳」夏のワークショップ 2009.8 札幌

10) Isomura Y, Harukuni R, Takekawa T, Aizawa H, Fukai T. Different functional diversity of excitatory and inhibitory neurons across cortical layers in voluntary movement. *36th International Congress of Physiological Sciences (IUPS2009)*. 2009.7 Kyoto

11) Fukai T, Kitano K, Nambu A.

Dopamine-dependent dynamical state changes in network models of subthalamic nucleus and globus pallidus. *36th International Congress of Physiological Sciences (IUPS2009)* 2009.7. Kyoto

12) Teramae J, Fukai T. Reliability of response spike timings in pulse-coupled networks of neurons. *18th Annual Computational Neuroscience Meeting (CNS2009)*. 2009.7. Berlin, Germany

13) Fukai T. Decision-making computations with coincident spikes in recurrent neuronal networks. *Beijing International Symposium on Computational Neuroscience 2009*. 2009.7 Beijing, China.

14) 寺前順之介、深井朋樹「神経細胞リカレントネットワークにおける細胞間同期発火と試行間応答再現性との相反関係：非線形システム間のノイズ同期によるアプローチ」ニューロコンピューティング研究会 2009.7 生駒

15) 坪泰宏、磯村宜和、深井朋樹「皮質神経細胞の不規則発火時系列が示唆する条件付エントロピー最小化原理」ニューロコンピューティング研究会 2009.7 生駒

16) 深井朋樹 Information coding with excitation-inhibition balance. システム生物学スプリングスクール 2009.2009.3 京都

17) 深井朋樹 Self-organization and developmental models of cortical networks. ブレインインフォーマティクス研究体講演会 2009.2 横浜

18) Teramae J, Fukai T. Temporal precision of spikes in pulse-coupled networks of oscillating neurons. *6th Meeting Computational and Systems Neuroscience (COSYNE 2009)* 2009.2 Salt Lake City, USA.

19) Tsubo Y, Isomura Y, Fukai T. Power-law distributions of inter-spike intervals in in vivo cortical neurons. *6th Meeting Computational and Systems Neuroscience (COSYNE 2009)* 2009.2 Salt Lake City, USA.

20) Isomura Y, Harukuni R, Takekawa T, Aizawa H, Fukai T. Functional and morphological identification of neocortical neurons in rodents performing operant motor task. *38th Annual Meeting of Society for Neuroscience (Neuroscience 2008)* 2008. 11 Washington DC, USA.

21) Takekawa T, Isomura Y, Fukai T. Accurate spike sorting of multiunit recording data based on the robust variational Bayesian clustering. *38th Annual Meeting of Society for Neuroscience (Neuroscience 2008)* 2008. 11 Washington DC, USA.

22) 深井朋樹「神経回路の動態に基づく大脳皮質：大脳基底核機能連関の計算論的理解」平成 20 年度文部科学省特定領域研究「統合脳」夏のワークショップサテライトシンポジ

ウム第 9 回夏のワークショップ「情動と意志決定」2008.8 札幌.

23) 深井朋樹「認知的機能の神経回路メカニズム」第 48 回生物物理若手の会夏の学校 2008.7 八王子、東京

24) 深井朋樹 Cortical network dynamics and computations with fluctuating inputs. 第 31 回日本神経科学大会(Neuroscience 2008) 2008.7 東京

25) 北野勝則、藤田大広、深井朋樹「ドーパミンによる細胞膜特性修飾作用が淡蒼球外節神経活動の同期特性を変化させる」第 31 回日本神経科学大会(Neuroscience 2008) 2008.7 東京

26) 竹川高志、姜時友、磯村宜和、深井朋樹「スパイク時系列の高次相関解析を可能にする高精度なスパイクソーティング法とその実装」第 31 回日本神経科学大会 (Neuroscience 2008) 2008.7 東京

27) Fukai T. Reliability vs. variability in spike responses of recurrent neuronal networks. *International workshop-school on Chaos and dynamics in biological networks*. 2008.5 Corsica, France.

28) 竹川高志、磯村宜和、深井朋樹 Robust variational Bayes with wavelet transform improves accuracy and efficiency of spike sorting. マルチニューロン研究会 2008. 2008.7 東京

29) 深井朋樹, 姜時友, 矢崎-杉山陽子, 加藤英之, ヘンシュ 貴雄「眼優位性可塑性における抑制回路の動的役割：発達過程における視覚皮質の回路モデル」第 30 回日本神経科学大会・第 50 回日本神経化学会大会・第 17 回日本神経回路学会大会 (Neuro2007) 2007.9 横浜

30) Fukai T, Sakai Y. Maximizing or matching: when does reward maximization lead to matching behavior in the reinforcement learning? 9<sup>th</sup> Triennial meeting of the international basal ganglia society (IBAGS 9). 2007.9 Egmond aan Zee, the Netherlands.

31) Fukai T, Okamoto H. Balanced synaptic input improves temporal integration performance of cortical network models. *International Symposium on Topical Problems of Biophotonics – 2007* 2007.8. Moscow, Russia.

32) Fukai T. Neuronal avalanches embedded in networks of excitatory and inhibitory neurons. *2006 Japan-Germany Symposium on Computational Neuroscience*. 2006.2. Wako, Japan.

〔図書〕(計 2 件)

1) 深井朋樹、東京大学出版会、シリーズ脳科学 1 脳の計算論(2009)、1-43, 253-267.

2) 深井朋樹、講談社、脳研究の最前線(上)脳の認知と進化(2007)、281-331.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

深井 朋樹 (Fukai Tomoki)

独立行政法人理化学研究所・脳回路機能理論研究チーム・チームリーダー

研究者番号：40218871