

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26242088

研究課題名(和文) 視覚からコミュニケーションへ：皮質脳波法で読み解く大脳神経回路の情報流

研究課題名(英文) Neural mechanisms of visual communications revealed with electrocorticography.

研究代表者

長谷川 功 (Hasegawa, Isao)

新潟大学・医歯学系・教授

研究者番号：60282620

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,500,000円

研究成果の概要(和文)：種々の空間スケールで計測した皮質脳波信号の2次元格子パターンから視覚的コミュニケーションを担う階層的・分散的な大脳の情報流を定量化する手法を開発した。マカクザル下側頭皮質では視覚刺激提示後に順行性と逆行性の情報流が交互に現れ、トポロジーの分離・統合が起こることを見出した。内側頭葉では図形の記憶がシータ波の空間パターンとして分散し、記憶の形成に伴って再編されることを示した。前頭皮質でも記号の変換に関わるシータ波信号の流れを同定し、また時空間二次元フーリエ変換により、ラット視覚野の周辺抑制の時空間特性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We developed a method to quantify the information flow of the cerebral cortex as the local transfer entropy from the spatial pattern of the electrocorticographic signals with various dimensions. With this approach, we identified repetitions of forward and backward waves in the macaque inferior temporal cortex following visual stimulation with dynamic topological changes. Next we found that spatial patterns of theta-band powers spanning a wide area in the medial temporal lobe can represent associative memory, which is reorganized through associative learning. In the prefrontal cortex, we identified flows of theta-band powers associated with symbolic conversion and construction. Finally, microstructure of surround suppression was revealed with spatiotemporal two-dimensional fast Fourier transformation of visually evoked signals in the rat visual cortex.

研究分野：脳科学

キーワード：皮質脳波 視覚 前頭葉 信号伝搬

1. 研究開始当初の背景

記号や文字の使用、イメージの想起等、視覚の活用により表現や理解の奥行きは深まる。しかし、視覚を高次機能につなぐ脳の情報処理の流れを生理学的に特定することは容易でない。視覚連合野の階層性の根拠とされている皮質間結合の層特異性と応答潜時の違いは、高次の連合野に進むほど不明瞭であり、再帰的な信号の流れも無視できない。脳という複雑系の動作を説明するには、階層的な信号の流れの実体を捉える測定法と解析法の確立が不可欠である。従来のシステム神経科学の標準的手法である微小電極法は、定点観測ゆえ広域の信号流の把握が難しい。その一方で fMRI は、時間分解能が秒単位と低い。そこで本研究では、脳の広域からミリ秒の時間分解能と 0.1mm ~ 数 10mm の空間分解能で電場電位を高感度計測することのできる、皮質脳波法 ( ECoG: electrocorticography ) に着目した。

2. 研究の目的

本研究では、マカクザルやラットの大脳において皮質脳波 ECoG を様々な空間スケールで等間隔多点計測し、記録された信号の時空間パターンから視覚的コミュニケーションを担う階層的/再帰的な大脳神経回路における情報表現と伝播を明らかにすることを目標とした。

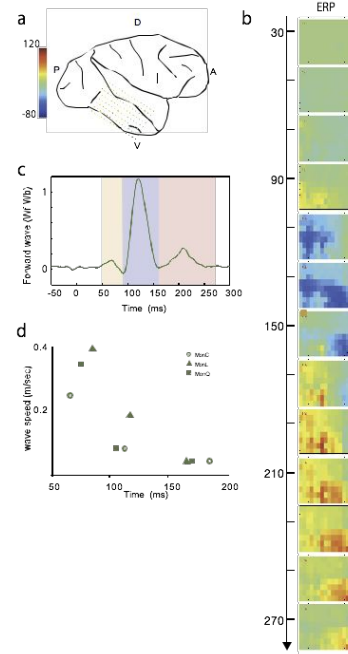
3. 研究の方法

上記目標のため、A マカクザル下側頭葉における局所伝達エントロピー ( Local Transfer Entropy: LTE ) の定量化、B 視覚野微視的皮質回路における周辺抑制の再帰的信号処理、C 記号の分節化を担う前頭前野の機能分化と情報処理の流れ、D 社会認知における脳内の情報流、E 視覚イメージ想起における側頭葉と前頭葉の信号の分散表現と階層の流れ、という 5 つの下位目標を設定し、各下位目標に沿って、霊長類・齧歯類を対象とした実験と解析を進めた。A では、マカクザル下側頭葉 IT 野に 2.5 mm 間隔で二次元格子状に留置した電極から、情報流の向きを LTE として定量化した。B では、0.1mm 間隔の ECoG でラット 1 次視覚野から超高密度記録したデータに時間-空間 2 次元フーリエ変換を行った。C では、記号の分節化を担う前頭前野の機能分化と、階層的信号の流れを、覚醒下のマカクザル慢性標本を用いて電気生理学的に調べた。D では、視線の認知に関する非言語的社会行動課題を開発して小児を対象とした実験を行った。E では、サルの側頭葉のうち記憶をコードするニューロンが局在することが分かっていた 36 野を中心として、TE 野、海馬傍皮質、及び嗅内皮質の一部を含むように 128 チャンネルの ECoG 電極を設置し、サルに記憶した図形を見せた時に生じる脳活動の空間パターンを調べた。さらに、視覚イメージ想起における側頭葉と前頭葉の信号

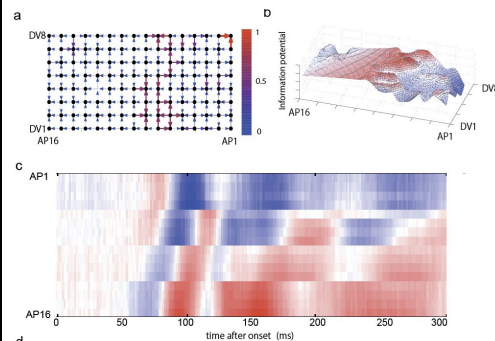
の流れを、覚醒下のマカクザル慢性標本を用いて電気生理学的に調べた。

4. 研究成果

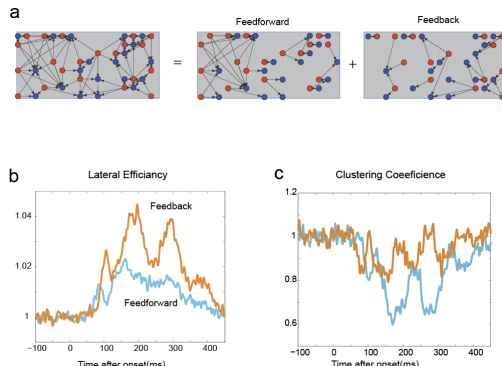
A マカクザル IT 野において、1-5ms ごとの 2.5 mm 間隔の 2 次元電位分布の差分 ( optic flow ) に基づいて電位の波を計算したところ、解剖学的な階層性に一致して IT の前後軸に沿っ



て、陽性波、陰性波、陽性波が視覚提示後に繰り返し現れることを発見した。さらに各波の中で、順行性の流れと逆行性の流れが交互

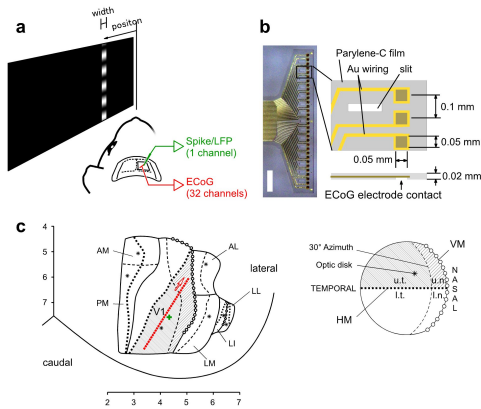


に現れること、LTE を用いた解析により、視覚情報処理にともなって、情報トポロジーや情報の分離と統合の仕方に順行波と逆行波

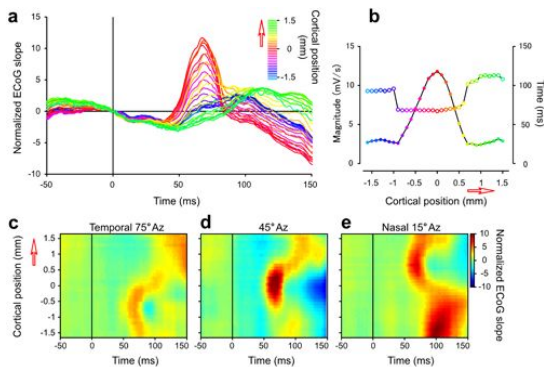


で違いがあることを明らかにした(Kawasaki et al *SFN 2015*; Kawasaki et al *Neuro2014*).

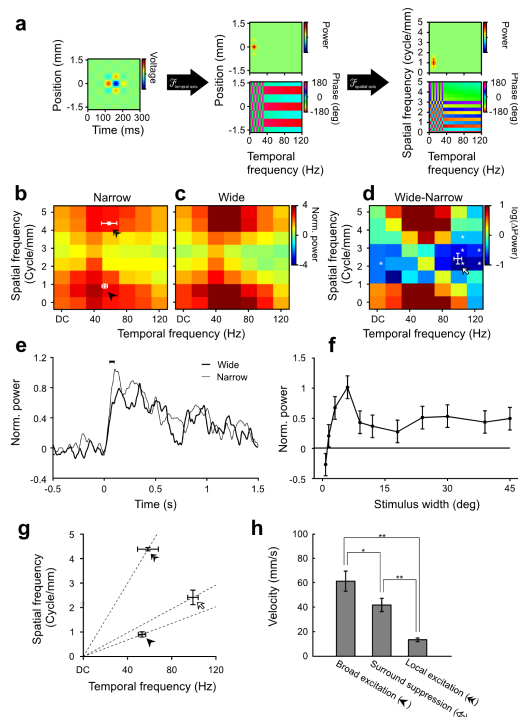
B では、ラット 1 次視覚野における大域的興



奮・局所的興奮とカラム大規模 (約 0.2mm)

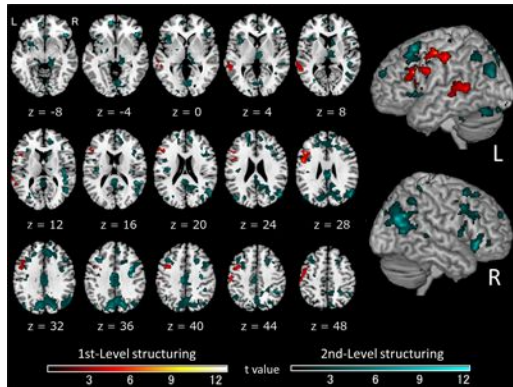


の周辺抑制に相当する電場電位を捉え、時空間二次元フーリエ解析により、その時間周波数、空間周波数、および皮質上での伝搬速度



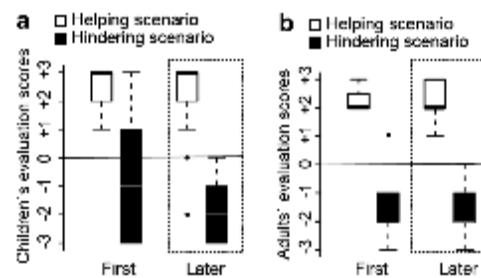
を特定した (Sawahata et al *submitted*).

C では、物を見てそれを表す記号を想起したうえでその記号を要素に分節化する課題を遂行中のマカクザルの前頭皮質において、物からそれを表す記号への変換や、視覚的に提示した記号の分節化(分解)に関わる低周波帯域の同期的神経活動、およびそれらの線形和では説明できない、二重文節化に関わる神経活動が誘発されることを見出した (Ohashi et al *Neuro2016*; Miyajima et al *Neuro2015*)。さらに健康なヒトを対象とした機能的磁気共



鳴画像法により、文字から単語と、単語から文への分節化に関わる脳領域を特定した (Okamoto et al *JMBE 2017*).

D では、定型発達の子供と成人を対象とした社会的事象の意味形成に関する認知課題を実施した。その結果、年齢が低いほど個々の事象は個別的に捉えられ少数から意味形成することは困難だが、な事象の集積としての意味形成は可能であり、一方、年齢が高いほど意味形成は少数事例でも可能だが、個別的な事象によってその意味を揺らがせる可能性があることが示された (Nishiyama et al *Art*



*Life Robot 2014*)

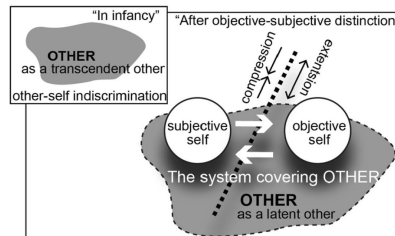
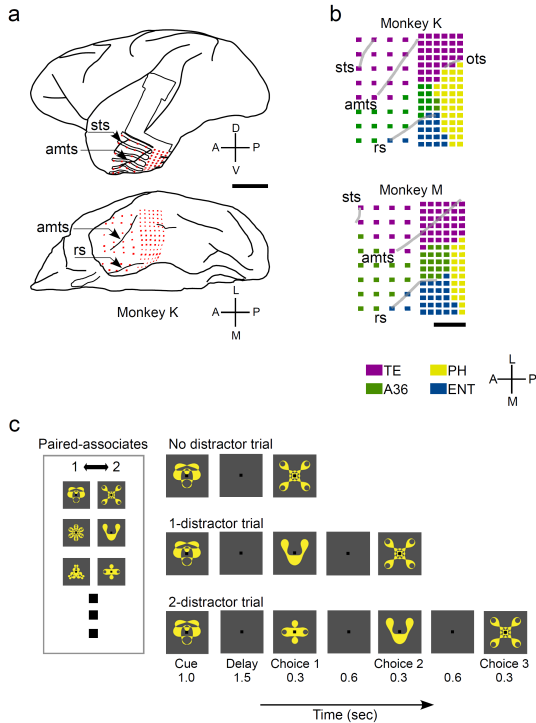


Fig. 5 The system covering OTHER in person's brain is called self  
また、二ホンザルにも潜在的に心の理論が存在することを動画観察中の眼球運動計測により明らかにした (Hayashi et al *in*

preparation), さらに眼球運動課題を遂行中のサルの前頭葉内側部からの ECoG 計測と同時に視床枕から微小電極法による計測を行って、社会認知に伴う前頭葉内側部-視床枕間の情報流の解析を試みた。

E では、シータ帯域 (4-8Hz) の周波数を持つ脳活動の空間パターンが図形の記憶をコードしうること、この空間パターンは 36 野から TE 野、海馬傍皮質の一部にまで広がって



いることを明らかにし、内側側頭葉の広域の領野間に広がるメソスコピックな神経回路の再編が記憶痕跡の形成に重要であること

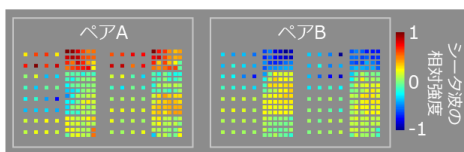


図3：図形の連合記憶を表現するシータ波の空間パターンの例。図形ペアAとBそれぞれの図形を手がかり図形として提示した時のシータ波応答の空間パターンを示す。ペアとして記憶した図形は互いに類似した空間パターンを生じさせることがわかる。

を示唆した (Nakahara et al *Nat Commun* 2016)。また色の想起課題の遅延期間中の前頭葉の ECoG 信号の分布から想起すべき色の情報が有意に復号化できることを明らかにし、側頭葉から前頭葉への情報の流れを特定した (Tanigawa et al *SFN* 2016; Sasaki et al *Neuro*2016)。

期間中の研究成果は *Nature Communications*, *Cerebral Cortex*, *Frontiers in Human Neuroscience*, *Neuroimage*, *BMC Genomics*, *Scientific Reports*, *Journal of Neurosurgery* 誌を始めとする英文誌に計 36 報の原著論文として報告し、また北米神経科学大会や日本神経科学大会を中心に計 66 題の学会発表を行っ

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 36 件)

Nakahara K<sup>1</sup>, Adachi K<sup>1</sup>, Kawasaki K, Matsuo T, Sawahata H, Majima K, Takeda M, Sugiyama S, Nakata R, Iijima A, Tanigawa H, Suzuki T, Kamitani Y, Hasegawa I. Associative-memory engrams emerge as shared spatial patterns of theta activity spanning the primate temporal cortex. *Nature Communications* 7, 11827, 2016. 査読有 1: equal contribution. doi: 10.1038/ncomms11827

Takemiya M, Majima K, Tsukamoto M, Kamitani Y. BrainLiner: A neuroinformatics platform for sharing time-aligned brain-behavior data. *Frontiers in Neuroinformatics*, 2016 Jan 26. 査読有 doi: 10.3389/fninf.2016.00003

Matsuo T, Kawasaki K, Kawai K, Majima K, Masuda H, Murakami H, Kunii N, Kamitani Y, Kameyama S, Saito N, Hasegawa I. Alternating zones selective to faces and written words in the human ventral occipitotemporal cortex. *Cerebral Cortex* 25, 1265-1277, 2015 査読有 doi: 10.1093/cercor/bht319

Majima K, Matsuo T, Kawasaki K, Kawai K, Saito N, Hasegawa I, Kamitani Y. Decoding visual object categories from temporal correlations of ECoG signals. *Neuroimage* 90, 74-83, 2014 査読有 doi:10.1016/j.neuroimage.2013.12.020

Nishiyama Y, Kato K, Kawasaki K, Nagasawa M, Hasegawa I. Developing a system to cover OTHER via rudimentary objective...subjective distinction. *Artificial Life and Robotics* 19(2), 181-185, 2014 doi:10.1007/s10015-014-0147-z

他 31 件

[学会発表](計 66 件)

Tanigawa H, Majima K, Takei R, Kawasaki K, Sawahata H, Nakahara K, Suzuki T, Kamitani Y, Hasegawa I. Decoding recalled color imagery using



ECoG signals in macaque inferior temporal and prefrontal cortices. Neuroscience2016, 2016.11.12-16, San Diego (U.S.A)

Date H, Kawasaki K, Ozay M, Hongo T, Hasegawa I, Okatani T. Relationships between the internal representations of convolutional neural network and the space, time and frequency domains of ECoG signals on macaque inferior temporal cortex. Neuroscience2016, 2016.11.12-16, San Diego (U.S.A)

Tanaka S, Kawasaki K, Hasegawa I, Suzuki T, Sakagami M. Modulation of value information coded in the lateral prefrontal cortex by decode neurofeedback with electrocorticographic (ECoG) signals. Neuroscience2016, 2016.11.12-16, San Diego (U.S.A)

Toda H, Kawasaki K, Horie M, Nakahara K, Bepari K Asim, Sawahata H, Suzuki T, Takebayashi H, Hasegawa I. Direction-specific spectral shift of local field potentials in the rat visual cortices found by a combination of electrocorticogram and optogenetics. 第39回日本神経科学大会, 2016.7.20-22, パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市)

Ohashi K, Iijima A, Miyajima T, Iwata Y, Hasegawa I. Learning to signify objects by construction of visual double-articulated signs from elements in macaque monkeys(Macaca Fuscata). 第39回日本神経科学大会, 2016.7.20-22, パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市)

Sasaki H, Tanigawa H, Kawasaki K, Iijima A, Suzuki T, Hasegawa H. Directional influences through theta band activity between macaque inferior temporal and prefrontal cortices during memory retrieval. 第39回日本神経科学大会, 2016.7.20-22, パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市)

Date H, Kawasaki K, Ozay M, Hongo T, Hasegawa I, Okatani T, Correspondence between the representations of convolutional neural networks and the activities in inferior temporal cortex measured by electrocorticography. 第39回日本神経科学大会, 2016.7.20-22, パシフィコ

横浜(神奈川県・横浜市)

Suda Y, Tada M, Matsuo T, Kawasaki K, Suzuki T, Hasegawa I, Matsumoto K, Kasai K, Uka T. Mismatch negativity in macaque auditory cortex is composed of several components of auditory stimuli. 第39回日本神経科学大会, 2016.7.20-22, パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市)

Kawasaki K, Haruna T, Sawahata H, Tanigawa H, Iijima A, Suzuki T, Hasegawa I. Information flow dynamics in inferior temporal cortex involving visual object processing. Society for Neuroscience 2015, 2015.10.17-21, Chicago (U.S.A.)

Nakata R, Adachi K, Kawasaki K, Sawahata H, Matsuo T, Suzuki T, Tanigawa H, Iijima A, Hasegawa I, Nakahara K. Associative learning enhances cross-frequency coupling of ECoG activity in the monkey medial temporal lobe. 第38回日本神経科学大会, 2015.7.28-31, 神戸国際会議場(兵庫県・神戸市)

他 56 件

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕  
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長谷川 功 (HASEGAWA, Isao)

新潟大学・医歯学系・教授  
研究者番号：60282620

(2)研究分担者

神谷 之康 (KAMITANI, Yukiyasu)  
株式会社国際電気通信基礎技術研究所・  
脳情報研究所・室長  
研究者番号：50418513

鎌田 恭輔 (KAMADA, Kyosuke)  
旭川医科大学・医学部・教授  
研究者番号：80372374

河野 剛士 (KAWANO, Takeshi)  
豊橋技術科学大学・電気・電子情報工学系  
・教授  
研究者番号：70452216

奥田 修二郎 (OKUDA, Shujiro)  
新潟大学・医歯学系・准教授  
研究者番号：00512310

谷川 久 (TANIGAWA, Hisashi)  
新潟大学・研究推進機構・准教授  
研究者番号：40373328

中原 潔 (NAKAHARA, Kiyoshi)  
高知工科大学・総合研究所・教授  
研究者番号：50372363

北村 秀明 (KITAMURA, Hideaki)  
新潟大学・医歯学系・非常勤講師  
研究者番号：00361923

(3)連携研究者

鈴木 隆文 (SUZUKI, Takafumi)  
独立行政法人情報通信研究機構・脳情報通  
信融合研究センター・主任研究員  
研究者番号：50302659

戸田 春男 (TODA, Haruo)  
新潟医療福祉大学・視機能科学科・教授  
研究者番号：10217507

川崎 圭祐 (KAWASAKI, Keisuke)  
新潟大学・医歯学系・准教授  
研究者番号：60511178

飯島 淳彦 (IIJIMA, Atsuhiko)  
新潟大学・自然科学系・准教授  
研究者番号：00377186

西山 雄大 (NISHIYAMA, Yuta)  
大阪大学・産学連携本部・特任助教  
研究者番号：90649724