

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：20103

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26540069

研究課題名(和文)共起語ネットワークを用いた記憶の神経回路モデルの構築と検証

研究課題名(英文)A neural network model of the episodic memory based on a word co-occurrence network

研究代表者

佐藤 直行 (Sato, Naoyuki)

公立はこだて未来大学・システム情報科学部・教授

研究者番号：70312668

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：複雑な意味を含む記憶がどのように脳内で表されるかは難しい問題である。本研究では大脳皮質に大規模言語コーパスに基づく単語共起ネットワークに類した神経構造があると仮定し、脳波計測実験および計算機シミュレーションを用いてその妥当性を検討した。結果では、同表現を仮定することで記憶関連脳波成分の抽出が可能で、また、海馬神経回路モデルでも文章列の記憶を説明できることを明らかにした。以上より、単語共起ネットワークは意味記憶の神経メカニズムの解明のための足がかりとなることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Neural representation of complicated experiences in daily life is a fundamental issue for the understanding of the episodic memory. In this study, a neural representation analogous to a word co-occurrence network in a large text corpus was hypothesized as a cortical representation and it was evaluated by electroencephalogram (EEG) experiment and neural modeling using computer simulation. Results indicated that the hypothesized representation was available for detecting memory-related EEG components and explaining the memory based on a hippocampal network. It was suggested that the word co-occurrence network can produce a clue for the understanding of the episodic memory.

研究分野：計算論的神経科学

キーワード：脳 神経科学 ニューラルネットワーク 認知科学 視覚 記憶

1. 研究開始当初の背景

脳の一つの部位である「海馬」を損傷しても言語や知識などの意味の記憶は保持されるが、個人的な経験に関する記憶の保持が特に困難になることから、海馬は経験の記憶を司ると考えられている。海馬は脳の中でも特に研究が進んでいる部位で、研究者の間でおよそ合意のとれた記憶の計算論が存在する。その一方、海馬は脳の深部に位置し、大脳皮質の多数の部位と相互に結合があるため、どのような情報が入力・記録されているのかについての議論が難しい。このため、経験の記憶がどのように表現・統合されるか、などの情報処理の側面がいまだ不明瞭である。

一方、近年、脳信号解読の研究が世界的に盛んであり、意味的な入力刺激に対する大脳皮質の活動パターンの報告をもとに海馬への入力表現の類推することが可能になりつつある。Michael ら (Science, 2008) は大規模言語コーパスの単語共起頻度に基づく線形和を用いて、新規な単語に対する大脳皮質の活動を予測できることを明らかにした。これは、2つの単語提示に対する大脳皮質の空間活動パターンの類似性がその共起頻度で線形近似し得ることを意味し、海馬に入力される神経活動の空間パターンのモデルとなりうる点で重要である。本研究ではこれを足がかりに記憶の神経回路モデルを構築する。

2. 研究の目的

共起語ネットワークによる脳内意味表現モデルが、経験の記憶メカニズムの理解にとって有効であることを示すことが目的である。そのため、まず、(1) 脳波計測実験により、長文読解時の脳波活動に共起語ネットワークモデルに関する成分が存在することを示す。さらに、(2) 共起語ネットワーク表現に基づく連想記憶回路を構築し、被験者の記憶成績を模擬できることを計算機シミュレーションにより示し、神経表現としての妥当性を示す。以上より、脳内意味表現メカニズムを、実験と数理の両面から明らかにする。

3. 研究の方法

共起語ネットワークによる意味の神経表現モデルを脳波計測実験及び神経回路モデルのシミュレーションにより検証する。

平成 26 年度は、長文読解時の視線および 32 チャンネル脳波を計測し、読後の記憶を要約書き下しにより調べる。視線計測は EyeLink CL (SR Research 社)、脳波計測は BrainAmp (BrainProducts 社) を用いる。文章は論理的で情動を喚起されづらいもの (約 3000 字の寺田寅彦の随筆 4 編) を用いる。解析では、現代日本語書き言葉均衡コーパス (国立国語研究所) より得た単語共起ネットワークを用いる。共起ネットワークの関数で記述した単語読みの時系列と、脳波周波数パワ・部位間コヒーレンスとの時間相関を調べ、文章記憶と関連した脳活動の有無を検証す

る。文章の相関はコーパスデータ及び統計的言語モデルにより得た 500 次元の単語特徴ベクトルにより算出する。データ解析では、被験者が読後に記述した長文の説明文と、読解した長文の各部分との単語特徴和の内積を算出し、各部分を読解中の脳波パワと比較した。

平成 27 年度は、共起語の時系列を入力とした連想記憶回路を構築する。モデルは先行研究で提案した海馬の位相差による時系列圧縮を用いた連想記憶回路モデルを用いた。シミュレーションでは、被験者の読みの時系列をモデルの入力として与えたとき、その想起が被験者の読後の想起文と関連するかどうかを調べる。もしモデルに類したダイナミクスにより記憶が貯蔵されているならば、両者は相関するはずであり、もし相関しないならばモデルは棄却される。この手続きを繰り返しより妥当な神経回路モデルを構成することで、実験データに基づく神経回路モデルを得る。

4. 研究成果

平成 26 年度は、共起語ネットワークの脳内表現への寄与を定量的に明らかにするため、8名の被験者から長文読解時の脳波及び視線の計測を行った。計測データから眼球運動由来アーチファクトを除去し (図 1)、眼球運動が起こる -400 ~ 0 ミリ秒の区間を解析した。結果ではのちに想起され易い部分の読解中には、前頭部から頭頂部のシータ帯域 (4 ~ 8Hz) の脳波パワが増大すること、また、頭皮上の広い部位において、アルファ帯域 (9 ~ 13Hz) の脳波パワが減少することが明らかになった (図 2)。これらの結果は、これまでの単語や画像の記憶研究と同様に、長文読解においてもシータ帯域とアルファ帯域の脳波パワにより、のちの想起を予測できることを示す。

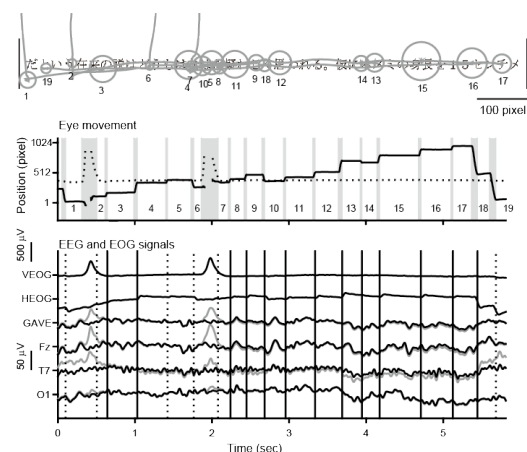


図 1 脳波及び眼球運動時系列データ。上図：提示刺激と眼球運動パターン。丸は注視点を示し、その大きさは注視時間を示す。中図：眼球運動の時間パターン。下図：脳波 (電極位置は後頭部 (O1)、側頭部 (T7) 及び前頭部 (Fz)) および眼電位 (水平 (HEOG) 及び垂直 (VEOG)) を示す。縦線は注視開始時刻を示す。

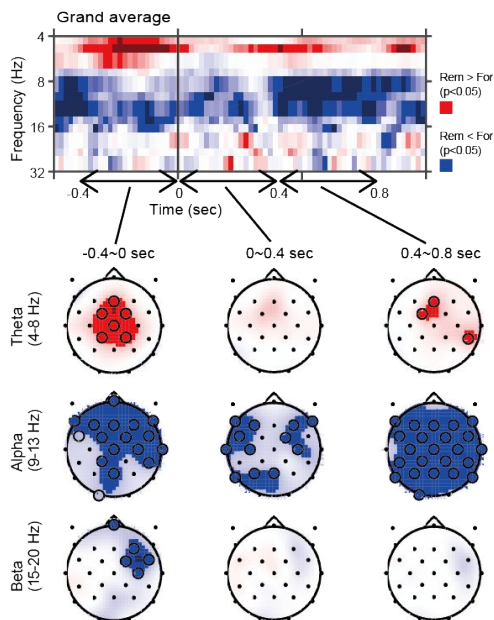


図2 記銘中の脳波パワの記憶依存性 (Sato, Human Brain Mapping 2015). 上図: 後から思い出す文章を読んでいる際の脳波パワと思い出さない文章を読んでいる際の脳波パワの差の検定値. 時間0は注視の開始時刻を表す. 下図: それぞれの時間・周波数区間における統計値の空間分布.

そこでクロスバリデーションを用いて, 同計測データから各個人の被験者の想起を予測を試みた. 結果として, 11名中7名の場合でのみ有意な予測が得られたことから, 被験者全体としては一定の傾向が認められる者の, 個人毎の記憶関連の脳波信号の強さにはばらつきあることがわかった (図3). 特に, 脳波シータと脳波アルファの想起との相関は個人毎で符号が異なるほどにばらつきがあるため, 個人毎に校正した特徴を用いると予測能力が向上することが期待される. 以上より, 共起ネットワークは脳波信号に含まれる記憶関連成分を検知するのに役立つことが示される.

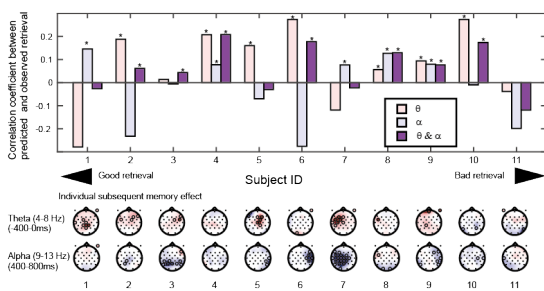


図3 記銘中の脳波パワの記憶依存性 (Sato, Society for Neuroscience meeting, 2015). 上図は記銘中の脳波パワからどの部分の文章を後に思い出すかの予測値と実際の想起の相関係数を表す. 赤がシータ波のみ, 青がアルファ波のみ, 紫両脳波パワを用いた場合を示す. 横軸は被験者 ID である. 下図は, 記憶関連のシータ波パワとアルファ波パワに関する統計値の頭皮上マップを示す. 赤と青はそれぞれ有意な増大と減少を表す.

平成27年度は確率的言語モデルに基づく単語表現を海馬神経回路モデルの入力とした場合に, 同表現が長文読解の記憶に寄与するかどうかを計算機シミュレーションにより調べた. モデルへの入力には, 被験者実験で得られた眼球運動時系列を用いた. モデルではシータ位相歳差と呼ばれる時間圧縮メカニズムを導入し, 約数百ミリ秒間隔で変化する単語時系列を, シナプス可塑性を促すのに最適な時系列 (数ミリ~数十ミリの時間変化) に変換して, 海馬連想記憶回路に記憶貯蔵した (図4 a b). 結果として, 長い文章列を記憶貯蔵するためには, 逐次入力される単語特徴の他に, 時間経緯を表す内因的な入力が必要であることがわかった. この内因的な入力を導入した場合には, 約千ユニットからなる神経回路モデルにおいて, 6分程度の単語列の記憶貯蔵および想起が可能になることを明らかにした (図4 c d). 得られた神経回路では, 時間経緯ユニット同士, 時間経緯ユニットから単語特徴ユニット及び, 頻度の高い単語特徴から低い単語特徴への結合が一方的に強まることがわかった (図4 e). これは, 単語列のような複雑な構造を持った記憶から, 秩序だった想起パターンを得るために必要な構造だと考えられた. 以上の結果は, 単語共起ネットワークが長文記憶の神経ダイナミクスを明らかにするための有効な神経表現モデルとなり得ることを示す.

先行研究では記銘時のシータ波及び海馬活動の増大は単語, 写真などの独立性の高い記憶対象について示されている. しかし, 上記のモデルで仮定したように, 文章読解における記憶が実際に海馬に依存しているのかわくは, モデルの仮定に関わる重要な問題である. そこで, 当初の研究計画を超えて機能的脳画像計測によりこれを検証した. 実験計測は, 京都大学の水原講師との共同研究として行い, 実験参加者 19名の計測を京都大学こころの未来研究センターで行った. 予備的な解析結果では, 文のレベルの記憶については左下前頭回及び左下頭頂小葉の活動の増大が, 段落レベルの記憶については左海馬および両側の紡錘状回の活動の増大と関連があることが示された. これらの結果は, 先の脳波研究の結果との対応により, 脳波シータ波の増大と海馬活動の増大が同時に起こることが想定され, 単語や写真の記憶についての先行研究とも合致する結果である.

以上の脳波計測実験, 神経回路モデルの計算機シミュレーション及び機能的脳画像計測実験より, 共起語ネットワークによる脳内意味表現モデルが, 経験の記憶メカニズムの理解にとって有効であることを示した. 本研究で用いた理論と実験の融合的な研究アプローチは, エピソード記憶の表現素の問題のみならず, 思考や判断など他の高次機能への適用も期待できる方法である. 脳の意味情報処理メカニズムの全貌の解明へ向けた足がかりとしても重要な成果である.

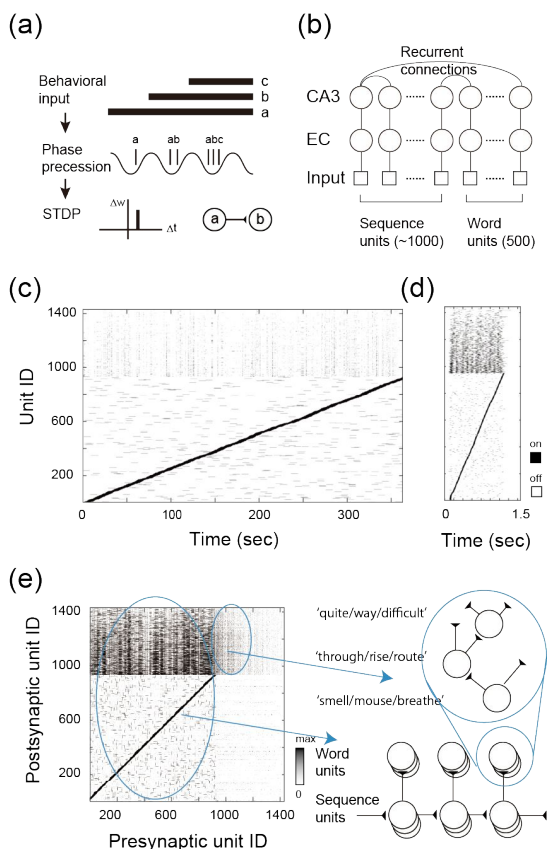


図4 海馬位相歳差モデルによる文章時系列の記憶 (佐藤, 日本神経回路学会, 2015). (a)位相歳差メカニズムによる時系列の時間圧縮表現. (b)海馬モデル. 入力層は入力時系列を表現, ECII層は位相歳差による時間圧縮時系列を表現, CA3層は時間非対称ヘブ則に基づく連想記憶回路である. (c) 入力層における記録中の入力時系列. それぞれのユニットの活動の時間発展をグレースケールで表す. (d) 想起時のCA3層のユニット活動. (e) 一度きりの記録後のCA3層ユニット内のシナプス結合強度行列.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 3件)

佐藤直行, 海馬認知地図の神経基盤 場所細胞とグリッド細胞, 岩波科学, vol.85, pp.82-84, 2014. (査読なし)

Naoyuki Sato. Spatial consistency of neural firing regulates long-range local field potential synchronization: a computational study. *Neural Networks*. 2014, doi: 10.1016/j.neunet.2014.07.004(査読有)

Naoyuki Sato. Coupling between spatial consistency of neural firing and local field potential coherence: a computational study. *Lecture Notes in Computer Science*, vol.8834, pp.167-174. Springer (2014) (査読有)

[学会発表](計 8件)

Naoyuki Sato, and Hiroaki Mizuhara,

Subsequent memory-dependent BOLD activation during the natural reading of literature. 22th Annual Meeting of the Organization for Human Brain Mapping, June 27, 2016, Geneva, Switzerland. (to appear)

佐藤直行, 脳大域回路の機能モデルの構築: 実験と理論の融合的手法, 東北大学通研共同プロジェクト「ブレインウェアシステム」研究会, 2015年12月21日, 東北大学(宮城県仙台市) (招待講演)

Naoyuki Sato, Predictability of subsequent retrieval after natural reading of literature: A scalp electroencephalogram study. Program No.171.23. 2015 Neuroscience Meeting Planner. Chicago: Society for Neuroscience, Oct 18, 2015.

佐藤直行, 海馬位相歳差モデルにおける文章列の記憶, 第25回日本神経回路学会全国大会(JNNS2015), 東京, 2015年9月2日, 電気通信大学(東京都調布市)

Naoyuki Sato. Memory formation during the natural reading of literature: an EEG study. 21st Annual Meeting of the Organization for Human Brain Mapping, Honolulu, US, June 15, 2015.

佐藤直行, 海馬から大脳へ: 記憶の計算モデル 2015年度日本人工知能学会全国大会, 2015年6月1日, 公立はこだて未来大学(北海道函館市) (招待講演)

Naoyuki Sato. Coupling between spatial consistency of neural firing and local field potential coherence: a computational study. *Proceedings of 21th International Conference Neural Information Processing*, Nov 5, 2014, Kuching, Malaysia.

佐藤直行, 海馬神経回路の機能ダイナミクス, 第3回全脳アーキテクチャ勉強会, 2014年4月22日, リクルートGINZA8ビル(東京都千代田区) (招待講演)

[その他]

ホームページ等

<http://www.fun.ac.jp/~satonao/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

佐藤 直行 (SATO, Naoyuki)

公立はこだて未来大学・システム情報科学部・複雑系知能学科・教授

研究者番号: 70312668