

平成25年度「海外渡航助成」

ヒトの高次認知機能及び意識経験を生み出す脳の情報処理ネットワークの解明

笹井俊太郎

東京大学 大学院教育学研究科 身体教育学コース

【研究の目的】

ヒトの脳で発見された機能的結合ネットワーク上での脳活動が、主観的経験の豊かさを反映するか否かを明らかにすることが、本研究の目的である。

【背景】

ヒトはその取り巻く環境から多様な入力を受け取り、それぞれの入力に対して多様な意識経験をします。例えば映画を見る時、各シーンそれぞれで豊かな経験をします。一方でアナログテレビの受信不良による画面のスノーノイズ(砂嵐)を見ていても、映画のような豊富な経験をすることはできません。留学先のウィスコンシン大学マディソン校のトノーニ研究室における研究で、この経験の豊富さが脳活動の複雑さと相関することが明らかにされた(Boly et al., submitted)。これは、映画の各シーンが他のシーンとは異なる脳の活動パターンを引き起こし続ける一方で、砂嵐は映画と同じ時間見ている、似通った活動パターンを誘導し続けることを示している。

ヒトの脳活動パターンは空間的な特徴をもつ。脳は環境との相互作用とは独立に自発的に活動しており、ある領域の自発活動は特定の別の領域の自発活動と強く相関している。このような活動相関を辺として見立てることにより、脳には特定領域間が活動相関で結合されたネットワークが存在することが示されている(Bullmore and Sporns, 2009)。また様々な課題を遂行する際にもこのネットワークは存在し、異なる課題間ではネットワーク全体における活動相関の変化が見られることから、自発活動だけでなく課題に誘導される活動も同じネットワークを介して相互作用していると考えられている(Cole et al. in press)。

「赤いリンゴを見た」という経験は、「赤を見た」と「リンゴを見た」という経験にはわけられない。言い換えれば主観的経験はその構成要素に分離不可能である。しかし脳では「赤」や「リンゴ」といった異なる構成要素は異なる脳領域の活動を誘導することから、異なる脳領域間の情報の統合が主観的経験に必須であると考えられる(Tononi, 2004)。先述の通り、映画のような豊富な経験を伴う環境入力は、より複雑な脳活動パターンを示す。このような複雑な活動は、脳にとってより多くの情報をもたらすだけでなく、多くの脳領域間での情報統合を引き起こすと考えられる。そこで本研究では、活動相関ネットワーク上での主観的経験に伴う統合情報量が、経験の豊富さに応じて変化するという仮説を立て、実験データを用いて検証を行った。

【方法】

6名の研究協力者が3種類の映像を見ている時の脳活動を、機能的磁気共鳴画像法(fMRI)を用いて取得した。映像は、①4分間の無声映画、②①の各フレームを時間的にシャッフルさせて文脈情報を壊したもの、③①の各フレームの全ピクセルを空間的にシャッフルさせて作成したスノーノイズの3通りである。

ヒトの脳における活動相関ネットワークの頂点となる脳領域群は、先行文献に掲載された2種類のセットを使用した。第1のセットは複数の課題を用いて同定された、特定の種類の課題時に賦活する領域のセットである(Dosenbach et al., 2010)。第2のセットは活動相関マップの境界線を用いて定義された領域のセットである(Power et al. 2011)。

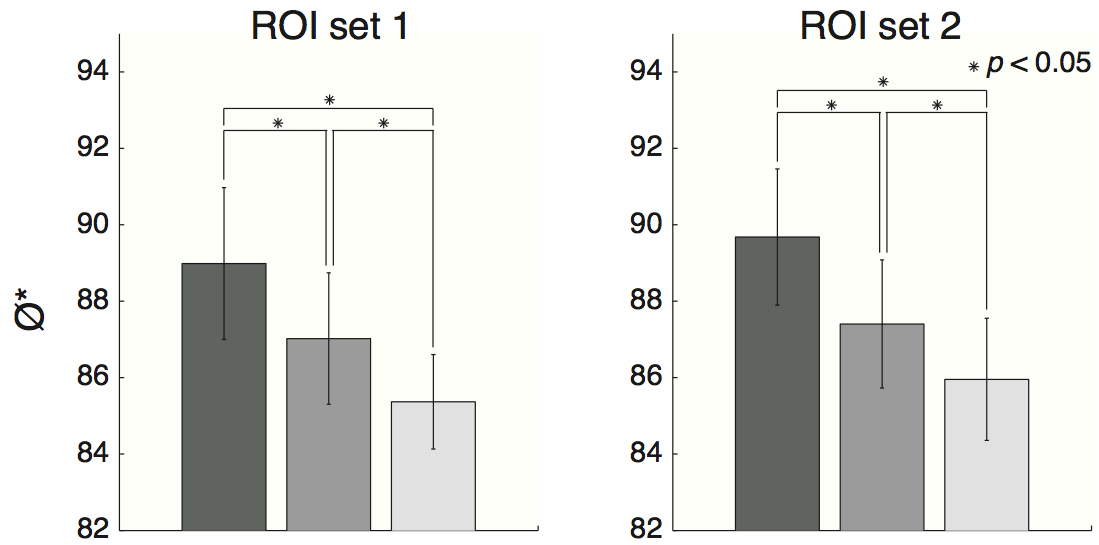
統合情報量 ϕ は、現在の脳活動が、過去や未来の脳に対してどのくらいの統合された情報を持つか、を定量する尺度である(Tononi, 2004)。現在の脳活動が過去や未来の脳に対して持つ情報量は、現在と過去、または現在と未来の脳活動の相互情報量で推定できる。この相互情報量が脳の領域間の相互作用を失った場合どのくらい減少するか、を評価することで、現在の脳活動の持つ情報がどのくらい脳全体で統合されているのかを定量することができる。本研究では先述の2つの脳領域セットについて、Oizumi et al. (2012)で紹介された実験データから計算可能な統合情報量 ϕ^* を計算し、条件間で比較した。

【結果】

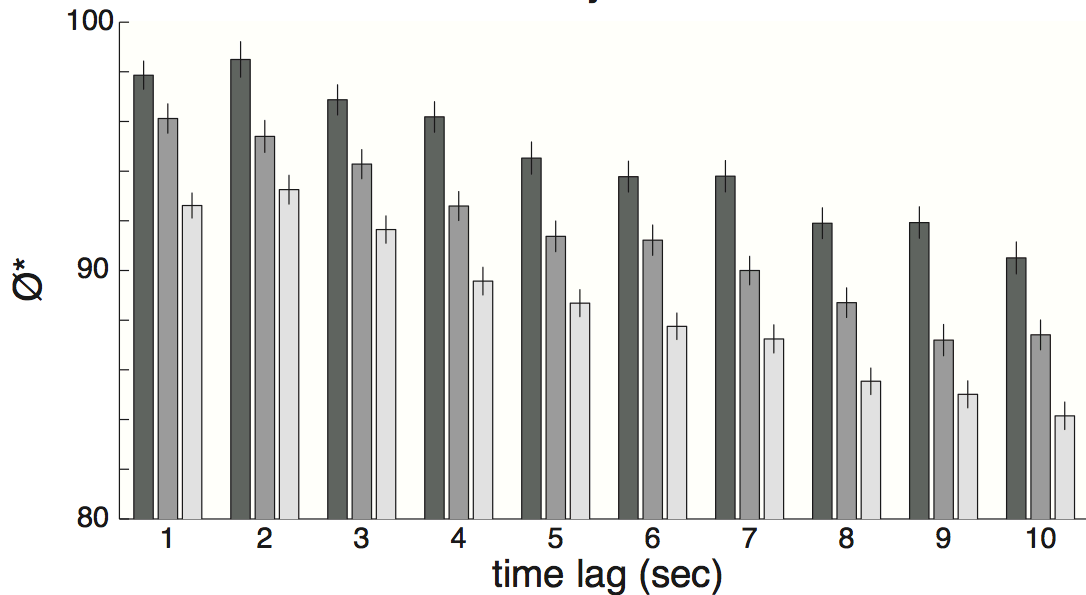
統合情報量 ϕ^* を計算したところ、映画を見ている時の ϕ^* が最も高く、次いで文脈情報を壊した動画を見ている時の ϕ^* が高く、スノーノイズを見ている時の ϕ^* が最も低いことが明らかになった。この結果は異なる脳領域セットを用いても一貫して得られた。また、 ϕ^* は現在と過去、あるいは現在と未来の間の量であるので計算する際に特定の時間差を使用する必要があるが、上で述べた結果は使用された時間差に関わらず一貫して得られることが確認された。

**group mean
(time lag = 4 sec)**

movie
 scrambled movie
 TV noise



Subject 1



(上) 各条件で計算された θ^* のグループ平均。 θ^* は時間差 4 秒を用いて計算された。条件間差は t-test を用いて定量された。(下) 代表的な研究協力者の結果。 θ^* は 1 ~ 10 秒の時間差で計算された。

【考察】

本研究では、視覚刺激に引き起こされる経験の豊かさと、脳の活動相関ネットワークにおける統合情報量とが相関することを明らかにした。この事実は、脳に内在的に備わる活動相関ネットワークを介した情報統合が、意識経験の多様性を生み出す基盤になっていることを示唆している。

複雑ネットワークの理論のツールを用いた研究によると、活動相関ネットワークは少数のハブと呼ばれる頂点と、コミュニティと呼ばれる頂点群を有することが知られている。ハブはネットワークの中でとりわけ多くの辺とつながっている頂点で、周囲の頂点に対して情報を伝播する役割を担うと考えられる。一方でコミュニティは、コミュニティ内部の頂点同士で密接に結合しつつ、外部との結合が疎であるような構造である。このような構造がある場合、コミュニティ間での情報の独立性が保たれることを示唆している。このような情報の統合と分離に関与する構造が、本研究で明らかにされたような主観的経験に伴う情報統合とどのような関係にあるのかはわかっていない。今後の研究ではこの関係を明らかにし、ヒトの主観的経験がどのようにして脳の内在的な動作機序に拘束されているかを検討することが必要である。

【参考文献】

Bullmore E and Sporns O (2009) Complex brain networks: graph theoretical analysis of structural and functional systems. *Nature Reviews Neuroscience* 10, 186-198.

Boly M, Sasai S, Gosseries O, Oizumi M, Casali A, Massimini M, Tononi G Stimulus set meaningfulness and neurophysiological differentiation: a functional magnetic resonance imaging study. *submitted*.

Cole M, Bassett D, Power J, Braver T, Petersen S Intrinsic and task-evoked network architectures of the human brain. *Neuron in press*

Dosenbach N, Nardos B, Cohen A, Fair D, Power J, Church J, Nelson S, Wig G, Vogel A, Lessov-Schlaggar C, Barnes K, Dubis J, Feczko E, Coalson R, Pruett J, Barch D, Petersen S, Schlaggar B (2010) Prediction of individual brain maturity using fMRI. *Science* 329, 1358-1361.

Oizumi M, Yanagawa T, Amari S, Tsuchiya N, Fujii N (2012) Measuring the level of consciousness based on the amount of integrated information computed from electrocorticogram (ECoG) recordings in monkeys before and after anesthesia. in *Neuroscience* (New Orleans, USA).

Power J, Cohen A, Nelson S, Wig G, Barnes K, Church J, Vogel A, Laumann T, Miezin F, Schlaggar B, Petersen S (2011) Functional network organization of the human brain. *Neuron* 72, 665-678.

Tononi G (2004) An information integration theory of consciousness. *BMC Neuroscience* 2004, 5. 42.