

# Efficiency of a "Small-World" Brain Network Depends on Consciousness Level : A Resting-State fMRI Study

上原, 平

<https://hdl.handle.net/2324/1470538>

---

出版情報 : 九州大学, 2014, 博士 (医学), 課程博士  
バージョン :  
権利関係 : やむを得ない事由により本文ファイル非公開 (3)



氏 名：上原 平

論 文 名：Efficiency of a “Small-World” Brain Network Depends on Consciousness Level: A Resting-State fMRI Study (脳のスモールワールドネットワークの情報伝達効率は意識水準に依存する：安静時機能的 MRI を用いた検討)

区 分：甲

## 論 文 内 容 の 要 旨

【緒言】近年の安静時機能的 MRI (fMRI) 研究によって、機能的に関連のある脳領域は、特定の刺激や課題がなくとも、自発的に同期して活動していることが明らかになった。さらに、ネットワークの構造に着目した、グラフ理論解析によって、この自発性同期活動によって形成される脳機能的ネットワークは、スモールワールド構造を有することが明らかになった。スモールワールド構造は、情報伝達効率が高い（少ない処理過程で効率的に情報が伝達し得る）構造であり、脳領域間の情報統合を必要とする高次脳機能にとって有益であることが示唆されている。

しかしながら、脳の状態に応じたスモールワールド構造の変化、特に意識水準に応じた変化については十分に解明されていない。本研究では、脳波と安静時 fMRI の同時計測を行い、脳機能的ネットワークの情報伝達効率が、覚醒状態と睡眠段階 1 で、意識水準に応じて変化するかの検証を行った。

【方法】18 名の若年者（年齢  $25 \pm 5.4$  歳 [平均  $\pm$  SD]、男性 14 名、女性 4 名）を対象とし、3 テスラの MRI スキャナを用いて、安静時 fMRI を撮像した。MRI スキャナ内で使用可能な脳波計測システムを使用し、安静時 fMRI と同時に脳波記録を行った。脳波記録をもとに、睡眠段階を判定し、それぞれ 5 分間の覚醒状態と睡眠段階 1 の解析区間を抽出した。両方（覚醒状態と睡眠段階 1）の解析区間を抽出し得た 10 名（年齢  $25 \pm 6.1$  歳 [平均  $\pm$  SD]、男性 8 名、女性 2 名）を選択し、以下の手順で安静時 fMRI のグラフ理論解析を行った。1) 全脳の灰白質に、3781 カ所の関心領域 (ROI) を作成した (図 1A)。2) 安静時 fMRI データから ROI 毎の時系列信号を抽出した (図 1B)。3) 抽出した時系列信号間の相関係数をすべての ROI ペア間で算出した (図 1C)。4) 算出した相関係数に閾値を設け、ROI をノード、閾値上の相関係数をノードを結ぶエッジとし、全脳機能的ネットワークをモデル化した「グラフ」を作成した (図 1D,E)。5) グラフから、ネットワーク全体の情報

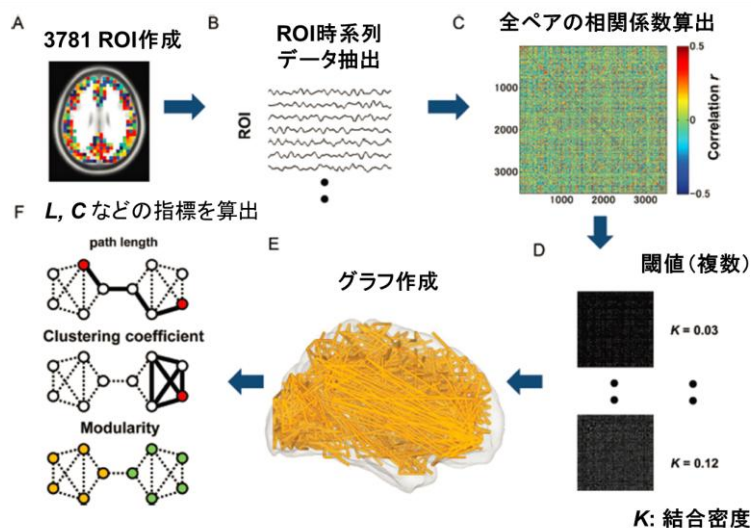


図 1：安静時 fMRI グラフ論解析の手順

伝達効率の指標である平均経路長  $L$  や、各ノードの情報伝達効率の指標であるノード効率性  $E_i$  などの定量的指標を算出した (図 1F)。6) 被験者ごと、解析区間ごとに 2)～5) の手順で解析を行い、得られた定量的指標を、覚醒状態と睡眠段階 1 で比較した。

【結果】 全般的な情報伝達効率の指標である、平均経路長 ( $L$ ) 及び標準化  $L$  ( $\lambda$ ) は、覚醒状態に比べ、睡眠段階 1 で有意に上昇していた ( $L: P = 0.0059$ ,  $\lambda$  :

$P = 0.0059$ ) (図 2A)。エッジ

の平均物理的距離 ( $D$ ) は、覚醒状態に比べ、睡眠段階 1 で有意に短縮していた ( $P = 0.0019$ )。ノードごとの情報伝達効率の指標である、ノード効率性 ( $E_i$ ) は、以下の 6 つの領域において、睡眠段階 1 で有意に低下していた (図 3)。1) 後部帯状回、楔前部を含む両側内側頭頂葉 ( $P = 0.0019$ )、2) 両側内側前頭前皮質 ( $P = 0.0107$ )、3) 主に縁上回からなる右外側頭頂葉 ( $P = 0.0127$ )、4) 角回と上頭頂小葉からなる左外側頭頂葉 ( $P = 0.0136$ )、5) 角回と上頭頂小葉からなる右外側頭頂葉 ( $P = 0.0166$ )、6) 右外側前頭前皮質 ( $P = 0.0166$ )。これらのノードは、多くがデフォルト・モード・ネットワーク (Default-mode network; DMN) に属しており、睡眠段階 1 で  $E_i$  が低下したノードと DMN の重複は、期待値より有意に大きかった ( $Z$  スコア = 11.83,  $P = 3.0 \times 10^{-31}$ )。

【考察】 本研究では、安静時 fMRI のグラフ理論解析を行い、自発性脳活動における脳の機能的ネットワークの構造が、覚醒状態と睡眠段階 1 で異なることを明らかにした。主な結果は下記の

通りである。第 1 に、経路長で評価される、全脳の機能的ネットワークの情報伝達効率が睡眠段階 1 で有意に低下していた。第 2 に、大脳連合野の特定の脳領域において、情報伝達効率が睡眠段階 1 で有意に低下していた。第 3 に、これらの特定の脳領域は有意に DMN と重複していた。これらの結果は、脳機能的ネットワークの構造は、脳の状態に応じて動的に変化しており、意識水準が高い覚醒状態では、情報統合に適した構造に保たれていることを示唆した。また、DMN が、意識に必要な脳領域間の情報統合に重要な役割を担っていることが示唆された。

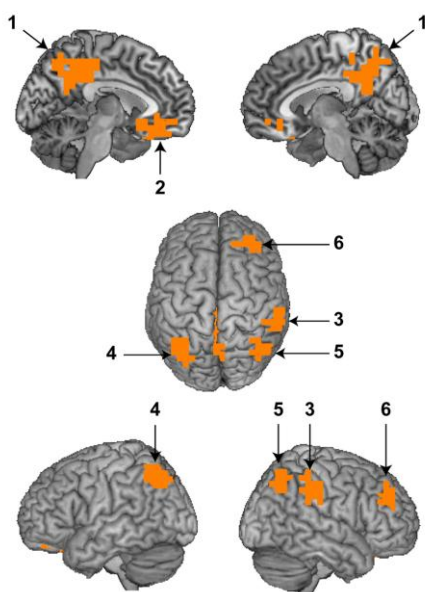


図 3 : 睡眠段階 1 で  $E_i$  が低下した脳部位

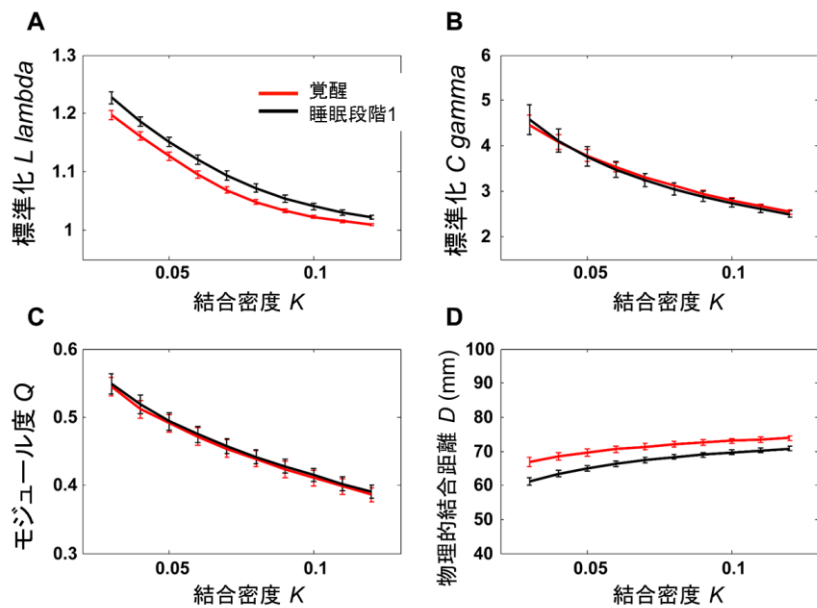


図 2 : ネットワークの各指標に対する睡眠の影響