

原 著

テキストマイニング手法の脳部位間有効結合モデル推定への応用

森田 尚亨^{1*}

要約：近年，ヒトの脳は，特定の機能を持つ部位間で相互に情報をやり取りしながら，協働的に働く機能統合システムとしてとらえられるようになった。そしてヒトの意識や行動決定などの認知活動も，脳部位間の結合による機能的なネットワークから生み出されると考えられるようになってきている。筆者と専攻科生は，2020年度の専攻科修了研究において，研究対象者の脳波データを用いて，対象者ごとにこの協働的な脳部位間のもっともらしい有効結合モデルを推定し，その結合モデルを視覚的に理解できるようにグラフィック化した。しかしながら，脳波には個人差があるため，このグラフィック化された結合モデルからは，対象者に共通する一般的な結合パターンは見出せなかった。今回，「グラフィック化された結合モデルから一般的な有効結合パターンを見出す」という課題の解決に，テキストマイニングを適用したところ，その有用性が認められた。

キーワード：有効結合モデル，グラフィック表現，テキスト表現，テキストマイニング，KH Coder

1. はじめに

1.1 背景

ヒトの脳は特定の機能を持つ部位間の結合によって，さまざまな情報を処理していることが知られている¹⁾。筆者は高知学園短期大学専攻科応用生命科学専攻の修了研究において，ほぼ10年来学生たちと共に，臨床脳波計を用いてヒトの認知活動に関連する脳部位間結合性を推定する研究を行っている。2020年度の研究では，3次元図形認識と言語認識（日本語・英語の単語の意味理解）を課題として，課題遂行中の脳波データを分析し，その脳波データが得られるためにもっともふさわしい脳部位間の有効結合モデルの推定を行った。しかしながら，脳波には非常に個人差があり²⁾，同一な課題を遂行するために活動する脳部位にも

個人差がある³⁾ため，研究対象者に共通する一般的な結合パターンは見出せなかった。このことを解決するために，今回，筆者は，上記3次元図形認識時の研究結果に対して，テキストマイニング手法を適用した。

1.2 3次元図形課題

2020年度修了研究において使用された3次元図形課題は，図1に提示するような以下の2種類である。① ヒトが濃淡差や照度差によって陰影を感じるにより立体認識を得ていると思われる図形，② ①の図形の輪郭を抽出した線画図形（輪郭線によって立体感を得る図形）。

¹高知学園大学 健康科学部 臨床検査学科 *Email: morita@kochi-gu.ac.jp



図1. 3次元図形課題の例 (文献⁴⁾より引用し再編)

我々が3次元である外界を2次元である網膜像として受け取った時点で、奥行き情報は失われている。それにも関わらず我々は3次元物体を認識できる。そのようなことができるのは、我々の知覚が網膜像から3次元的な知覚世界の構築を行っているからである⁵⁾。また図1の①②はともに平面図であるが、奥行きを感じることができる。我々は②の平面図から無意識に直線や楕円曲線、すなわち複数の線の位置関係を検出して、脳内で立体感を構築していると思われる⁶⁾。また①では、「絵画的手がかり」と呼ばれる光による陰影を感知する感覚ともいえる脳が持っている知識、先入観によって立体感が得られているという⁷⁾。筆者は「①ではヒトが濃淡差の境界線を無意識に抽出して認識し、②のような位置関係を構築しているのではないか」と考えている。

1.3 脳波データと脳部位間有効結合モデルの推定

筆者らは臨床用デジタル脳波計(日本光電 EEG-1200)と国際10-20法に従う脳波用電極キャップ(19電極)を使用し、3次元図形認識時の脳波データ(事象関連電位(ERP))を取得している。ERPは、外的あるいは内的な事象に時間的に関連して生じる脳の一過性の電位変動であり、ヒトの認知活動を反映すると言われている^{8),9)}。

有効結合モデルの推定は以下のように行われる。3次元図形課題を視覚提示された際に生じる電位変動を加算して電極ごとのERPを求め、全電極のERPデータに対してStatistical Parameter Mapping version 12^{10),11)}(SPM12)を適用し課題認識時の脳活性部位を抽出する。抽出された複数の活性部位の座標データを用いて、それら部位間の有効結合モデルをSPM12が持つ機能である

Dynamic Causal Modelling¹²⁾(DCM)を活用して推定する。この推定の際、文献^{11),13)~20)}を参考にして複数の結合モデルを設定し、それらモデルに対してDCMのオプションであるベイズモデル選択²¹⁾(BMS)を適用する。BMSにより、実測されたERPデータを最も高い確率で発生させると考えられる結合モデルが統計的に推定される¹¹⁾。なお、筆者らが行ったデータ収集および解析の詳細については、文献⁴⁾に記載されている。表1に、SPM12によって抽出され、有効結合モデルで使用された脳部位を提示する。

表1. 有効結合モデルで使用された部位 (文献⁴⁾より引用し再編)

IOG (下後頭回: 一次視覚野 V1)
ITG (下側頭回)
STG (上側頭回)
SFG (上前頭回)
MFG (中前頭回)
T-IFG (三角部-下前頭回)
AOrG (前眼窩回)

1.4 推定されたもっともらしい結合モデルの例

文献⁴⁾に記載されている有効結合モデルの例を図2、図3に示す。なお、文献中、脳部位の位置は結合に関する情報の表記のため幾分移動させており、必ずしも正確ではない。

図2、図3において、有効結合は矢印線で描写されており、矢印は脳内情報処理時に情報の送信元である部位から出て、受信先の部位に入る方向を示す。矢印の辺に示されている数値は、図2では「図形課題①に対する部位間の有効結合の相対強度およびその値の推定信頼度(%)」を表している。また図3における2種類(実線および破線)の矢印は「図形課題②に対する脳部位間の有効結合が、課題①に対する有効結合に比べて、どのように変化したか」を弁別している。実線は課題①と

比べて結合強度が強化された結合であり、また破線は結合強度が弱化された結合である。各線の数値は「課題①のときの各有効結合の強度を1と基準にしたときの課題②の相対強度とその推定信頼度(%)」である。したがって、実線では1より大きい値、破線では1より小さい値となっている。さらに図3では、課題②において、課題①と比べてその部位内のニューロン群の結合性が変化した(強化または弱化した)特定部位を“Intrinsic (内在性)”として色分けした枠で示している。

1.5 視覚における2つの経路と視覚ワーキングメモリとForward, Backwardの関連について

文献¹⁾によれば、一次視覚野(V1)は視覚にとって必要不可欠だが、物体の知覚や風景全体の知覚などはそこで生じているわけではない。私たちが物体や風景全体を知覚するには、V1の何千ものモジュールからの情報が結合されなければならない。その結合は視覚連合野で行われている。さらに視覚連合野は背側経路(dorsal stream)と腹側経路(ventral stream)の2つの流れを含んでいる。2つの流れは二次視覚野(V2)より後の

段階で分かれている。背側経路はV2から後頭頂葉の中のさまざまな領域(頭頂連合野)へと至っている。腹側経路はV2から四次視覚野(V4)を経て下側頭葉の中のさまざまな領域に至っている。背側経路は視覚対象がどこにあるのか(where)、そしてそれが運動しているならば動きの速さと方向を認識している。一方、腹側経路は視覚対象が何か(What)、そしてどんな色をしているのかを認識している。このように、視覚連合野の背側および腹側経路には視覚情報処理において、明確に異なる役割を果たしている。背側経路の行動に果たす主な機能は、物体に対する操作や熟練した運動を誘導するための視覚情報を提供することであるのに対し、腹側経路は物体の大きさ、形、色、表面の状態に関する情報を提供することである。

また文献²²⁾によれば、視覚ワーキングメモリは後頭葉視覚野を源として背側ストリーム(whereの知覚)と腹側ストリーム(whatの知覚)の2つの処理の流れを持つ。背側ストリームは頭頂葉を経て前頭前野外側領域(DLPFC)に至る。腹側ストリームは側頭葉を経て前頭前野腹外側領域

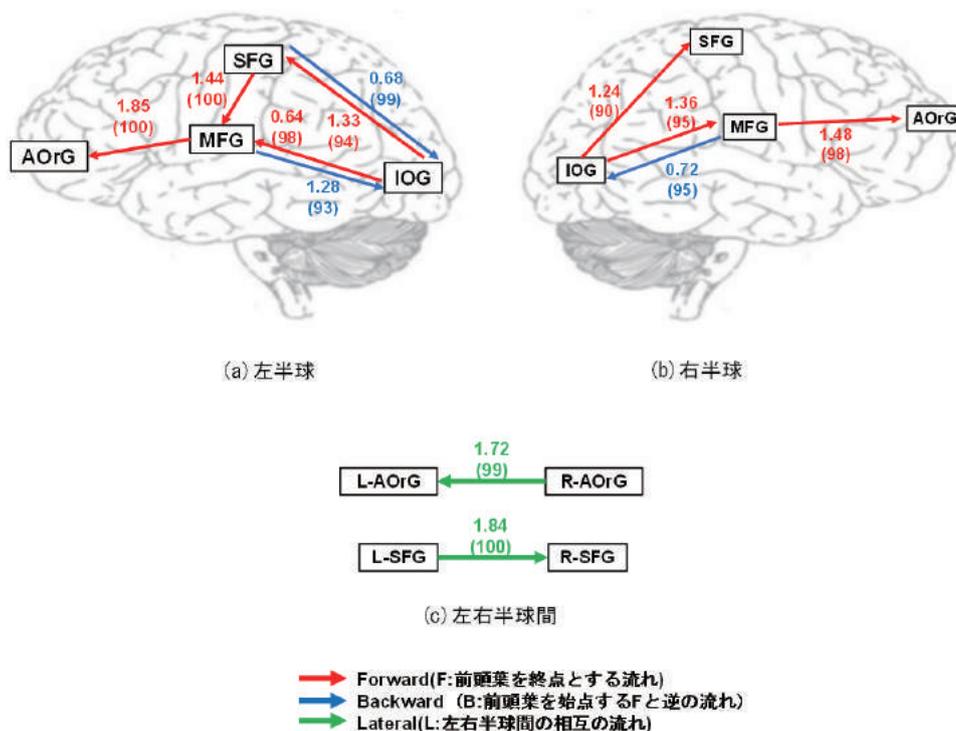


図2. 課題①(3次元濃淡図形課題)提示時の最尤結合モデルの例(文献⁴⁾より引用し再編)

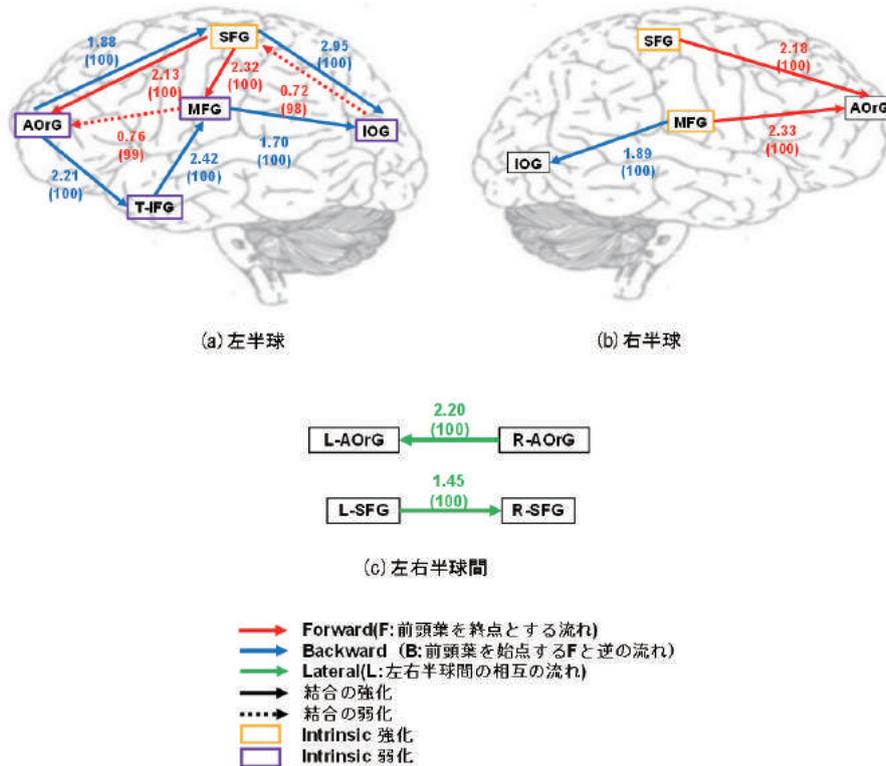


図3. 課題②（線画図形課題）提示時の最尤結合モデルの例（文献⁴より引用し再編）

(VLPFC) に至る。いずれも前頭前野領域や特定の対象へ向ける注意と関わる前部帯状回と関わりを持っている。

図2, 3では、以上述べた前頭前野領域に向かう視覚情報処理の流れをForwardとし、その逆方向をBackwardとし、両半球間の連係をLateralとしている。

さらに文献⁵によれば、V1から出力された情報の多くは視覚連合野の一部である視覚前野内のV2に送られる。またV2からV1への強いフィードバックの連絡もある。V2の多くのニューロンは主観的輪郭（illusory contour）の方位にも応答する。主観的輪郭とは物理的には存在しないが周りの刺激の布置によって知覚されている輪郭のことである。またV2は面と面との境界がどちらの面の輪郭であるかによって選択性を持つニューロンが多い。この事項のような部位内のニューロン群に関連するのが図3のIntrinsicである。

1.6 判明した問題

文献⁴の著者である2020年度専攻科生の鮫島

は、修了研究において、右利きの9名（21～22歳：男性2名、女性7名）を研究対象者として、図2, 図3のような有効結合モデルを導出し、分析・考察した。その結果、課題②は①に比べ、全脳的に結合が強化され、また右半球に比べ左半球で推定信頼度の高い有効結合が多く検出された。しかし、結合部位は研究対象者ごとに異なり、共通する結合は明瞭ではなく、個人差があることが考えられると鮫島は結んでいる。このことより、図2, 3のように脳部位間の結合性をグラフィック化すると、各々の結果は視覚的に理解しやすいが、多くの対象者の結果を総括する際は、グラフィック化が仇となって定量的な扱いが難しく、客観的に共通要素などを発見することが容易でないことが判明した。

1.7 目的

この修了研究において判明した問題を解決するためには、グラフィック表現を定量的に扱えるような形式に変換する必要がある。そこで筆者は、その解決策としてグラフィック表現をテキスト表

現に変換し、テキストマイニングを行うことを考察した。本論文では、その有効性を検討した結果を提示する。

なお、テキストマイニング・ツールとしては、高機能かつマニュアル本²³⁾も充実しており、本学でも多くの教員が研究に使用しているKH Coder²⁴⁾を使用した。

2. 方法

2.1 グラフィック表現からテキスト表現への変換

テキスト表現では、「AからBへ○○がある」、「AからBへの○○が強化・弱化した」を基本的な「表現ルール」として、文献⁴⁾中の全ての有効結合をテキスト変換した。以下の“L-Hemi”, “R-Hemi”, “Int-Hemi”, “Fwd”, “Bkwd”, および“Ltrl”は、それぞれ左半球, 右半球, 左右半球間, Forward, Backward, Lateralの略語である。

課題①に関して得た図2(a)のIOGからSFGに向かうForward結合(赤色の矢印線)を(L-Hemiで)「L-IOGからL-SFGへFwdがある」というテキスト表現に変換する。図2(b)のMFGからIOGに向かうBackward結合(青色の矢印線)は(R-Hemiで)「R-MFGからR-IOGへBkwdがある」と変換する。また図2(c)の左右半球間のR-AOrGからL-AOrGに向かうLateral結合(緑色の矢印線)は(Int-Hemiで)「R-AOrGからL-AOrGへLtrlがある」と変換する。なお、()内の語句はKH coderで「共起ネットワーク」を分析する際には、分析結果を見やすくするために省いた。同様にして図2内のすべての矢印線をテキスト表現に変換する。

上記のテキスト変換と同様に、課題②に関して得た図3(a)のIOGからSFGに向かうForward結合(赤色の破線矢印)を(L-Hemiで)「L-IOGからL-SFGへのFwdが弱化した」にテキスト変換する。図3(b)のMFGからIOGに向かうBackward結合(青色の破線矢印)は(R-Hemiで)「R-MFGからR-IOGへのBkwdが強化した」と変換する。また図3(c)の左右半球間のR-AOrGからL-AOrGに向かうLateral結合(緑色の矢印線)は(Int-Hemiで)「R-AOrGからL-AOrGへのLtrlが強化した」と変換する。

換する。さらに各部位内のIntrinsicな変化に関しては、図3(a)のSFGについて(L-Hemiで)「L-SFGのIntrcが強化した」と変換する。

2.2 KH coderによるテキストマイニング

KH coderでは、CSV形式またはExcel形式で分析データを入力できるが、Excel形式の分析データではA列に分析対象となるテキストを入力し、その他の列を外部変数としてテキストに関する情報を入力する必要がある。このことから、図2、図3のグラフィック表現の情報をすべてKH coderに入力するために、外部変数として、B列に「課題」(課題①, 課題②)、C列に「対象者」(A~H, J)、D列に「半球」(L-Hemi, R-Hemi, Int-Hemi)、E列に「有効結合」(Forward, Backward, Lateral, Intrinsic)、F列に「結合変化」(弱化, 強化)を設定した。課題ごとの分析データの作成では、まず、図2、図3のグラフィック表現を参照して外部変数を順次割り当てていく。そして、その割り当てに当てはまる「2.1で示したようなテキスト表現」をA列に入力していく。このようにして、研究対象者9名分のテキスト表現を含む分析データを作成した。

この分析データに対してKH coderを用いてテキストマイニングを行う。使用したKH coderの主なコマンドは「KWICコンコーダンスのコロケーション統計」と「共起ネットワーク」である。これらのコマンドは「語と語の結びつき、関連を探る」ために利用するものであり、「2つの部位間の有効結合を示す」テキストの分析に最も適していると考えた。そして、対象者9名分の分析結果として得られる「コロケーション統計」と「共起ネットワーク」は、文献⁴⁾によって得られた有効結合モデルに関する客観的で一般的な(共通する)傾向を表すものであると考えた。なお、上記2つのコマンドの詳細については、文献²³⁾を参照されたい。

また、再度、有効結合モデルをグラフィック表現する際には、「コロケーション統計」の結果を使用した。「共起ネットワーク」はグラフィック表

現から一般的な傾向を推定する際の参照として用いた。

3. 結果

3.1 KWICコンコーダンスの結果

KWICコンコーダンスのコロケーション統計の結果を左右の半球ごとにまとめたものを表2～5に示す。表は最上行の各脳部位を基点として、最左列の脳部位や項目との関連をまとめている。脳部位の名称は表1から流用した。また各脳部位の

最下行にある人数は、脳部位ごとに記入している数値・脳部位のいずれかに関係する対象者の人数を表しており、この人数が総数9名に近いほど、基点脳部位に関する結果は対象者に共通した傾向であると判断した。さらに6名以上であった基点脳部位の結果は、客観性・一般性がより高いと判断し、以後の分析で最重要視した。9名の過半数である5名では、やや客観性・共通性が高いと判断し、重要視した。表中、(F)(B)は脳部位からのFwd, および脳部位へのBkwdの意味であり、

表2 KWICコンコーダンスによる脳部位間の関連性のまとめ(課題①:左半球)

(左半球)

	L-AOrG	L-T-IFG	L-MFG	L-SFG	L-ITG	L-STG	L-IOG	合計
L-AOrG	/	4 (F1; B3)	7 (F3; B4)	3 (B)	1 (B)	/	/	15
L-T-IFG	4 (F1; B3)	/	5 (F2; B3)	/	1 (F)	/	5 (F2; B3)	15
L-MFG	7 (F3; B4)	5 (F2; B3)	/	5 (F)	4 (F2; B2)	/	9 (F3; B6)	30
L-SFG	3 (B)	/	5 (F)	/	/	/	8 (F3; B5)	16
L-ITG	1 (B)	1 (F)	4 (F2; B2)	/	/	/	4 (F3; B1)	10
L-STG	/	/	/	/	/	/	/	0
L-IOG	/	5 (F2; B3)	9 (F3; B6)	8 (F3; B5)	4 (F3; B1)	/	/	26
Fwd	4	6	15	8	6	/	11	50
Bkwd	11	9	15	8	4	/	15	62
Int-Hemi	R-AOrG	/	R-MFG	R-SFG	/	/	/	
	3 (R⇒L)	/	3 (L⇒R:2)	5 (L⇒R:3)	/	/	/	11
人数 (総数9名)	6	6	9	7	3	0	6	

表3 KWICコンコーダンスによる脳部位間の関連性のまとめ(課題①:右半球)

(右半球)

	R-AOrG	R-T-IFG	R-MFG	R-SFG	R-ITG	R-STG	R-IOG	合計
R-AOrG	/	2 (F1; B1)	6 (F3; B3)	3 (F1; B2)	/	/	/	11
R-T-IFG	2 (F1; B1)	/	2 (B2)	/	1 (B)	/	4 (F2; B2)	9
R-MFG	6 (F3; B3)	2 (B2)	/	3 (F3)	1 (F)	/	8 (F3; B5)	20
R-SFG	3 (F1; B2)	/	3 (F3)	/	1 (F)	1 (B)	5 (F2; B3)	13
R-ITG	/	1 (B)	1 (F)	1 (F)	/	/	2 (F1; B1)	5
R-STG	/	/	/	1 (B)	/	/	1 (B)	2
R-IOG	/	4 (F2; B2)	8 (F3; B5)	5 (F2; B3)	2 (F1; B1)	1 (B)	/	20
Fwd	5	3	10	7	3	/	8	36
Bkwd	6	6	10	6	2	2	12	44
Int-Hemi	L-AOrG	/	L-MFG	L-SFG	/	/	/	
	3 (R⇒L)	/	3 (L⇒R:2)	5 (L⇒R:3)	/	/	/	11
人数 (総数9名)	6	2	6	5	2	1	5	

表4 KWICコンコーダンスによる脳部位間の関連性のまとめ（課題②：左半球）

（左半球）

	L-AOrG	L-T-IFG	L-MFG	L-SFG	L-ITG	L-STG	L-IOG	合計
L-AOrG	/	5 (F1 ; B4)	6 (F2 ; B4)	6 (F1 ; B5)	/	/	/	17
L-T-IFG	5 (F1 ; B4)	/	4 (F2 ; B2)	/	1 (B)	/	5 (F3 ; B2)	15
L-MFG	6 (F2 ; B4)	4 (F2 ; B2)	/	6 (F)	5 (F2 ; B3)	/	8 (F4 ; B4)	29
L-SFG	6 (F1 ; B5)	/	6 (F)	/	2 (F1 ; B1)	/	7 (F3 ; B4)	21
L-ITG	/	1 (B)	5 (F2 ; B3)	2 (F1 ; B1)	/	/	4 (F2 ; B2)	12
L-STG	/	/	/	/	/	/	/	0
L-IOG	/	5 (F3 ; B2)	8 (F4 ; B4)	7 (F3 ; B4)	4 (F2 ; B2)	/	/	24
Fwd	4	6	16	11	5	/	12	54
Bkwd	13	9	13	10	7	/	12	64
強化	6	8	11	10	6	/	10	51
弱化	5	6	15	4	1	/	9	40
Intrinsic	6 (弱4)	5 (弱4)	8 (弱6)	4 (強3)	/	/	7 (弱6)	30
Int-Hemi (全て強化)	R-AOrG 2 (L⇒R:1)	/	R-MFG 1 (L⇒R)	R-SFG 4 (L⇒R:3)	R-ITG 1 (L⇒R)	/	/	8
人数 (総数9名)	8	6	9	7	3	0	8	

表5 KWICコンコーダンスによる脳部位間の関連性のまとめ（課題②：右半球）

（右半球）

	R-AOrG	R-T-IFG	R-MFG	R-SFG	R-ITG	R-STG	R-IOG	合計
R-AOrG	/	2 (F1 ; B1)	4 (F1 ; B3)	4 (F1 ; B3)	/	/	/	10
R-T-IFG	2 (F1 ; B1)	/	1 (F)	/	2 (F1 ; B1)	/	2 (F1 ; F1)	7
R-MFG	4 (F1 ; B3)	1 (F)	/	3 (F)	1 (F)	/	5 (F1 ; B4)	14
R-SFG	4 (F1 ; B3)	/	3 (F)	/	1 (B)	2 (B)	4 (B)	14
R-ITG	/	2 (F1 ; B1)	1 (F)	1 (B)	/	/	4 (F3 ; B1)	8
R-STG	/	/	/	2 (B)	/	/	2 (B)	4
R-IOG	/	2 (F1 ; B1)	5 (F1 ; B4)	4 (B)	4 (F3 ; B1)	2 (B)	/	17
Fwd	3	4	7	4	5	/	5	28
Bkwd	7	3	7	10	3	4	12	46
強化	4	2	9	10	6	4	8	43
弱化	4	2	5	1	1	/	11	24
Intrinsic	4 (弱)	/	5 (弱3)	5 (強4)	1 (強)	2 (強)	7 (弱4)	24
Int-Hemi (全て強化)	L-AOrG 2 (L⇒R:1)	/	L-MFG 1 (L⇒R)	L-SFG 4 (L⇒R:3)	L-ITG 1 (L⇒R)	/	/	8
人数 (総数9名)	6	2	7	6	2	2	7	

それらの右の数字はFとBの数である。基点脳部位ごとのFとBの合計は最左列の項目FwdおよびBkwdに集計している。また、項目“Int-Hemi”の内容で脳部位は関連している脳部位である。L⇒Rは左半球から右半球への流れを示し、その右の数値はその個数である。よって、総数からこの個数を差し引いたものが、R⇒Lの流れの個数となる。また個数のない箇所は記載されている流れのみであることを意味している。

さらに表6には、表4、5の強化・弱化についてForward結合(Fwd)とBackward結合(Bkwd)ごとに、その内訳を示した。表6で抽出語として記載されている脳部位は基点脳部位であり、送信元に記載されている脳部位は基点部位へ情報を送信する脳部位であり、その数字は出現回数である(出現回数1は省略)。そして、強化と弱化の両方がある場合には、出現回数がより多い変化が優勢

であるとして、それを太字で示している。再度、有効結合モデルをグラフィック表現する際には、この太字で示した有効結合が課題②で変化した結合であると判定して、それらを描画した。

表2～6の結果をもとに、再度、有効結合モデルをグラフィック表現したものを図4、5に示す。図中、矢印の太さは表2～5のFおよびBの数に比例して太くして、情報の流れの出現頻度を視覚化している。なお、課題②のグラフィック表現である図5では、図3と同様に、強化・弱化した有効結合を描画し、変化しなかった有効結合は描画していない。

図4より、課題①(3次元濃淡図形課題)に対して、全体的には両半球の活動は類似している。背側経路^{25)~27)}上に位置するIOG→ITG・STG→SFG→MFG→T-IFG→AOrGでは、左半球が右半球に比べて、やや活発であるように見え、腹

表6 表4、5の強化・弱化の内訳

(強化)

抽出語	合計	送信元
Fwd	25	
L-MFG	6	L-SFG(4) , L-IOG(2)
L-T-IFG	4	L-IOG(3) , L-MFG
R-MFG	4	R-IOG , R-ITG , R-SFG(2)
L-AOrG	3	L-SFG , L-MFG, L-T-IFG
R-AOrG	3	R-SFG , R-MFG , R-T-IFG
R-ITG	2	R-IOG(2)
L-ITG	1	L-IOG
L-SFG	1	L-IOG
R-T-IFG	1	R-IOG

(弱化)

抽出語	合計	送信元
Fwd	16	
L-MFG	6	L-IOG(2), L-ITG(2) , L-SFG(2)
L-SFG	3	L-IOG(2) , L-ITG
R-T-IFG	2	R-MFG , R-ITG
L-AOrG	1	L-MFG
L-ITG	1	L-IOG
L-T-IFG	1	L-MFG
R-ITG	1	R-IOG
R-MFG	1	R-SFG

(強化)

抽出語	合計	送信元
Bkwd	40	
L-IOG	9	L-MFG(4) , L-SFG(3) , L-T-IFG, L-ITG
L-ITG	5	L-MFG(3) , L-T-IFG , L-SFG
L-SFG	5	L-AOrG(5)
R-IOG	5	R-SFG(3) , R-MFG, R-T-IFG
L-MFG	3	L-AOrG(2), L-T-IFG
L-T-IFG	3	L-AOrG(3)
R-SFG	3	R-AOrG(3)
R-ITG	2	R-T-IFG , R-SFG
R-MFG	2	R-AOrG(2)
R-STG	2	R-SFG(2)
R-T-IFG	1	R-AOrG

(弱化)

抽出語	合計	送信元
Bkwd	15	
R-IOG	7	R-MFG(3) , R-STG(2) , R-ITG , R-SFG
L-IOG	3	L-T-IFG, L-SFG, L-ITG
L-MFG	3	L-AOrG(2), L-T-IFG
L-T-IFG	1	L-AOrG
R-MFG	1	R-AOrG

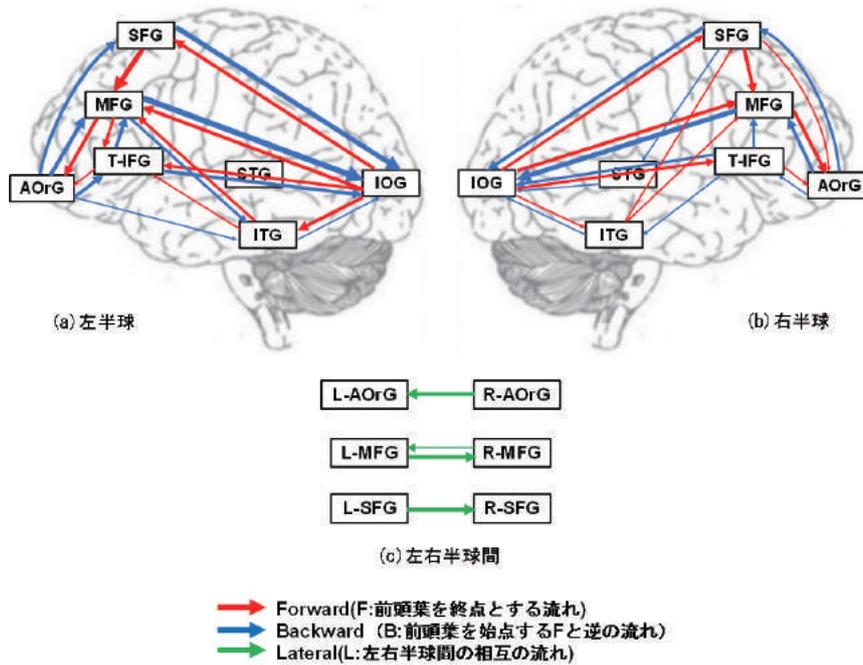


図4 課題①に対して推定される有効結合モデル (テキストマイニングより得られた結果)

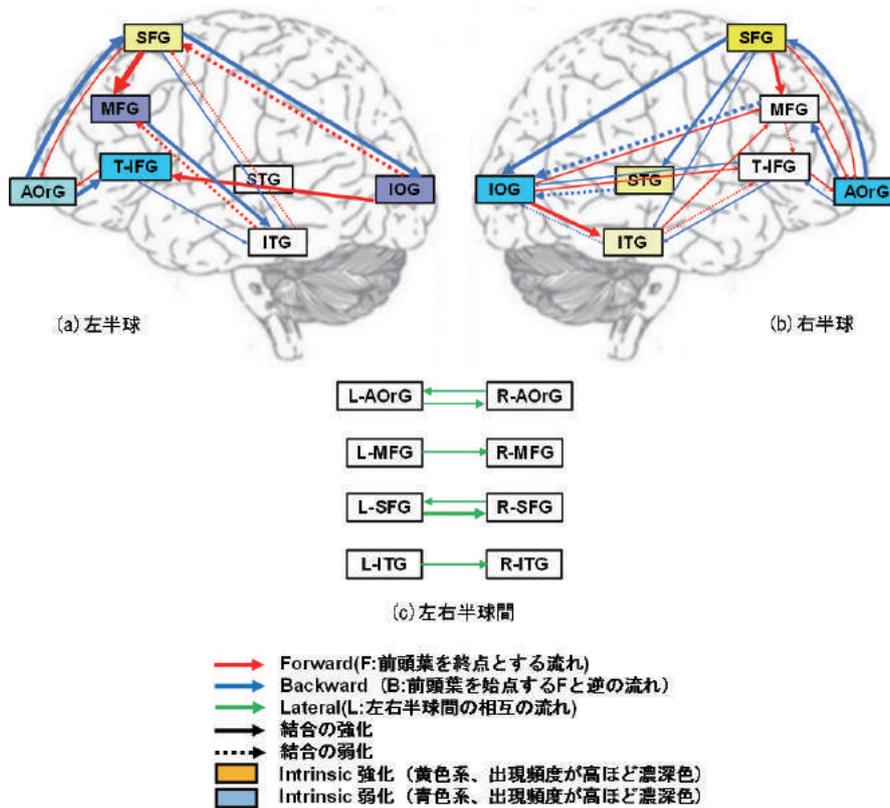


図5 課題②に対して推定される有効結合モデル (テキストマイニングより得られた結果)

側経路^{25)~27)}上に位置するIOG → ITG → MFG → T-IFG → AOrGでも、同程度に左半球が活発であるように見える。また、背側経路(IOG → (ITG・STG) → SFG → MFG)と腹側経路(IOG → ITG → MFG)の情報の流れの出現頻度(矢印の太さ)を比較すると、両半球とも背側経路の出現頻度が大きいことから、両半球とも背側経路の方が優勢であることが示唆される。その結果、IOG, SFG, MFG, T-IFG, AOrGの活動性が他の部位に比べて高いことがわかる。また少数の対象者では、腹側経路に関わるITGの活動性は、左半球が右半球よりも高くなっている。

さらに背側経路に関係するSFG, MFG, そしてAOrGでは左右半球間の関係がみられる。

図5より、課題②(線画図形課題)に対しては、背側経路上に位置する左右のSFG, およびR-STG, R-ITGにおいてIntrinsicが強化し、左右のIOGとAOrG, およびL-MFG, L-T-IFGではIntrinsicが弱化したことがわかる。

全体的には右半球の有効結合が左半球に比べ多く変化し、Forward, Backwardともにより強化されている。弱化された結合は、ForwardではL-IOG → L-SFG, L-ITG → L-MFG, およびR-MFG → R-T-IFGであり、BackwardではR-MFG → R-IOG, R-STG → R-IOGである。以上のことから、課題①に比べ、課題②では右半球が左半球よりも活発に活動していることが示唆される。

また、課題②では、課題①で関係していたSFG, MFG, AOrGに新たにITGを加えた4部位において、左右半球間の関係が強化することが示唆される。

3.2 共起ネットワークの結果

表2~5の内容に対応する共起ネットワークを作成するにあたって、すべての語と語の共起関係のネットワークを描画すると、語と語を結ぶ線(共起関係を表す)が多くなり、また線上に表示される相関係数も重なり易くなるため、解釈し難くなる。そのためオプションの「最小スパニング・ツリーだけ描画」を設定し、重要な共起関係を選択的に描画することにした。

課題①(3次元濃淡図形課題)に関する共起ネットワークを図6および図8に、課題②(線画図形課題)に関する共起ネットワークを図7, 図9, および図10に示す。図6と図7は、左半球, 右半球, 左右半球間による共起の違いを探索する目的で、外部変数として「半球」(1:L-Hemi, 2:R-Hemi, 3:Int-Hemi)を選定した共起ネットワークである。またそれら図の中で、“degree”は、いくつの外部変数とつながっているかを表す。その値が小さいほど特定の外部変数に特徴的な語である可能性がある。“Frequency”は出現頻度であり、円の大きな語ほどその頻度は大きい。正方形で表された外部変数から円に伸びた線上に記載されている数値は、外部変数とその円に記載されている語との相関係数である。すなわち、この値が大きいほど、たとえば左半球での出現頻度が高いということになる。図8と図9は、有効結合の違いによる共起の違いを探索する目的で、外部変数として「有効結合」(1:Forward, 2:Backward, 3:Lateral, 4:Intrinsic)を選定した共起ネットワークである。図10は課題①に比べて課題②で有効結合が強化したのか、弱化したのかの違いを探索する目的で、外部変数として「結合変化」(1:弱化, 2:強化)を選定した共起ネットワークである。

3.2.1 左右半球に関する共起結果(図6, 7)

課題①(3次元濃淡図形課題:図6)では、左半球と活性化部位の関連性は、L-IOG > L-MFG > L-AOrG > L-SFG ≒ L-T-IFG > L-ITGの順に高い。右半球と活性化部位の関連性は、R-IOG > R-MFG > R-SFG > R-AOrG > R-ITG = R-T-ITG > R-STGの順に高い。またL-SFGは、とりわけ半球間の関係が高い可能性がある。さらに、有効結合では、Forward結合は右半球との関連性が高い。Backward結合は左右両半球と関連性が高いが、左半球の方がやや関連性が高い。以上のような解釈が可能である。

課題②(線画図形課題:図7)では、左半球と活性化部位の関連性は、L-MFG > L-IOG > L-

AOrG ≡ L-SFG > L-T-IFGの順に高い。右半球と活性化部位の関連性は、R-IOG > R-MFG > R-SFG > R-AOrG > R-ITG > R-STG > R-T-ITGの順に高い。またR-SFGは、とりわけ半球間の関係が高い可能性がある。有効結合では、Forward結合は左半球と関連性が高く、Backward結合は右半球との関連性が高い。さらに、結合変化では、強化された結合は左右両半球とも関連性があるが、左半球の方がやや多い。弱体化された結合は右半球との関連性が高い。Intrinsic変化は左半球との関連性が高い。以上のような解釈が可能である。

R-ITG > R-T-IFGの順に高い。Backward結合と活性化部位の関連性は、R-IOG > L-IOG > L-AOrG > R-MFG > L-T-IFG > R-AOrG > R-STG > L-ITG = R-SFGの順に高い。課題②では課題①に比べて、Backward結合と関連する部位が倍増している。Lateral結合は、R-SFGとの関連が示唆された。さらに結合変化では、弱体化された結合はIntrinsicと関連が高いことが示唆された。一方、強化された結合は、ForwardとBackwardの両結合、およびIntrinsicと関連があることが示唆された。

3.2.2 有効結合に関する共起結果 (図8, 9)

課題① (3次元濃淡図形課題：図8) では、Forward結合と活性化部位の関連性は、L-MFG = R-MFG > L-SFG > L-ITG > R-ITG = R-T-IFGの順に高い。Backward結合と活性化部位の関連性は、L-IOG > R-IOG > L-T-IFG ≡ L-AOrG > R-STGの順に高い。Lateral結合はL-SFGとR-SFG、およびR-AOrGとの関連が示唆された。

課題② (線画図形課題：図9) では、Forward結合と活性化部位の関連性は、L-MFG > L-SFG >

3.2.3 結合変化に関する共起結果 (図10)

弱化した結合の関連性は、Intrinsicが最も高く、活性化部位ではL-IOG = L-MFG > R-IOG > R-MFG > L-T-IFGの順で高い。強化した結合と活性化部位の関連性は、L-SFG > R-SFG > L-MFG > L-AOrG > R-AOrG > R-ITG > L-ITG ≡ (R-STG = R-T-IFG) の順に高い。また、強化した結合はBackward > Forward > Lateralの順に高い可能性が示唆された。

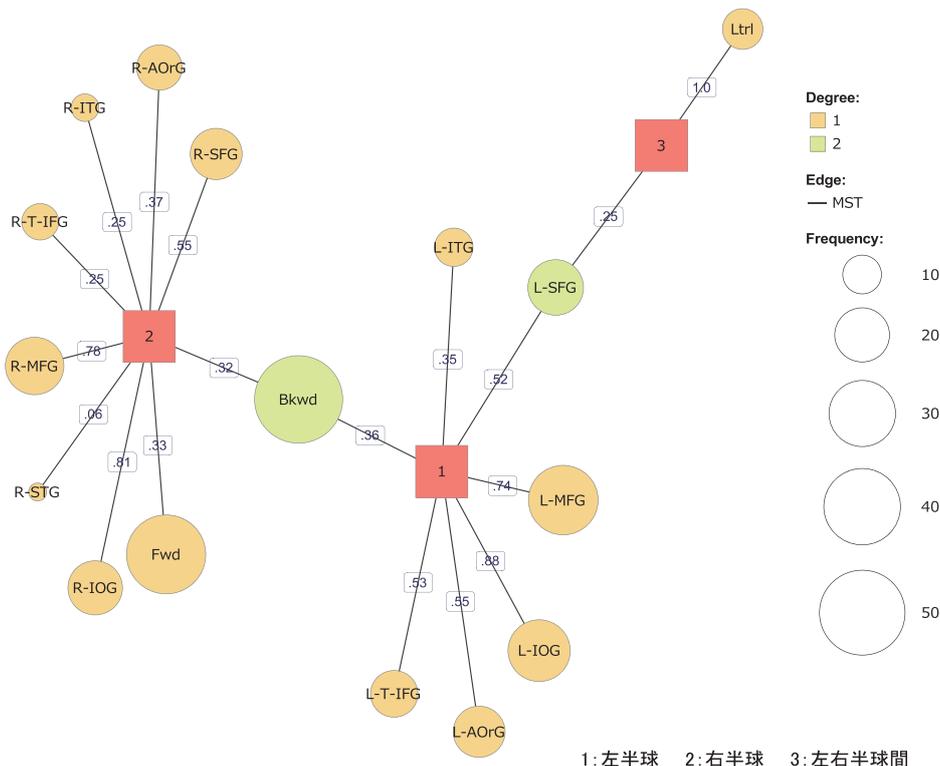


図6 課題①の共起ネットワーク (外部変数：半球)

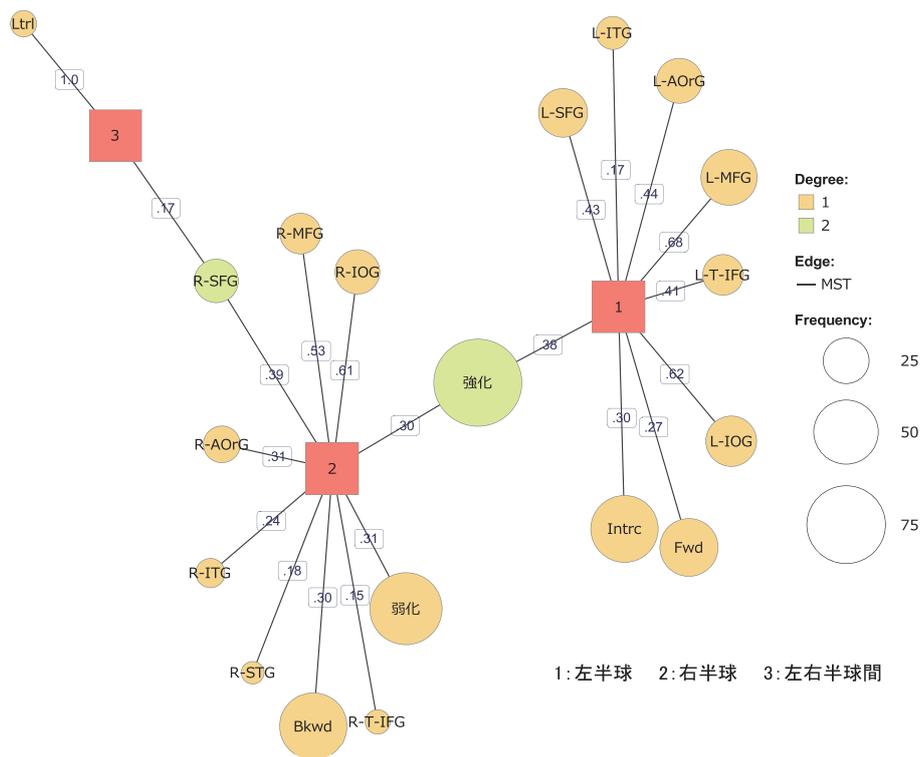


図7 課題②の共起ネットワーク（外部変数：半球）

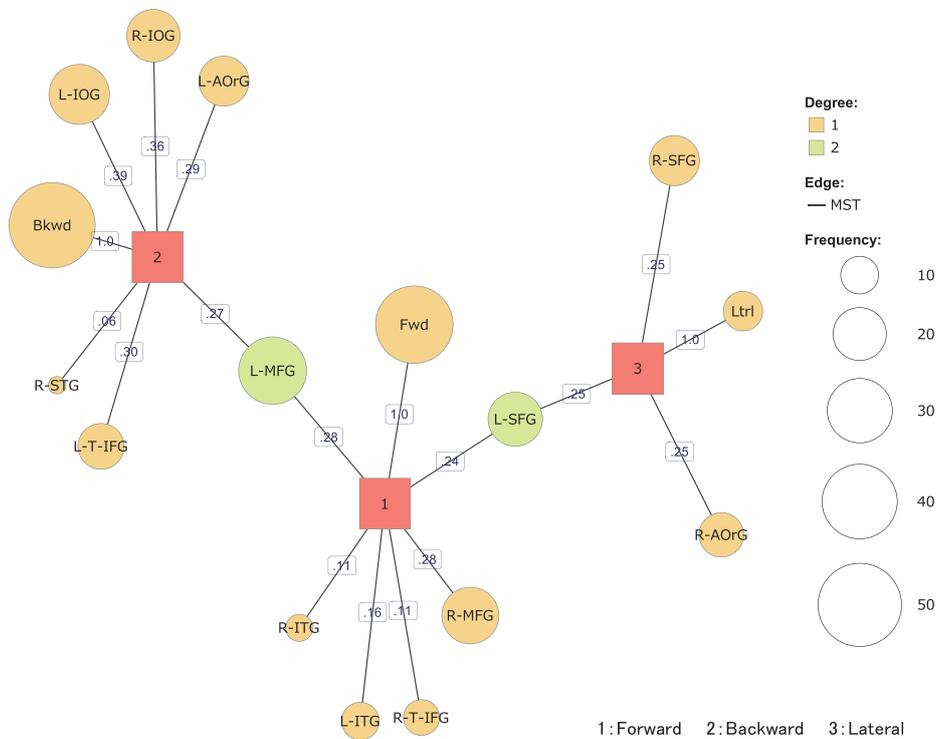


図8 課題①の共起ネットワーク（外部変数：有効結合）

4. 考察

4.1 KWICコンコーダンスの結果に対する考察

KWICコンコーダンスのコロケーション統計を用いた結果、鮫島⁴⁾が行った9名の研究対象者に関する課題①および課題②の図形認識時の脳内活動の推定を客観的に分析・整理することができた。そして、これら課題に対する9名の対象者に共通する脳内活動の傾向を推定することができたと考ええる。

以下、結果から筆者が考察した脳内活動について述べる。

(1) 課題①では両半球とも背側経路が腹側経路よりも優勢であったことについて

文献²⁷⁾によれば、背側経路は、知覚の対象物から反射する光などの視覚的な刺激によって引き起こされた信号をV1から側頭皮質に伝える。またこの経路は無意識的であり、行動を導く。例えば、飛んでくるものをよけるのに必要な視覚情報は全てこの経路をたどり、意識にはのぼらない。一方、腹側経路は意識的で、対象物を認識する。この経路は物の認識に関わる一連の領域をたどる。それぞれの領域で、形、色、奥行きなどの視覚認知にかかわる特別な観点が付加されていく。形成された粗い像は側頭葉の庭縁に運ばれ、ここで視覚的な記憶との照合や比較が行われ、認識される。一部の情報はさらにこの経路を進んで前頭皮質に運ばれ、そこで意味や意義が評価される。この時点で意識された知覚となる。

上記のことより、筆者は、我々にとって課題①の図形課題も日常的に見慣れた構造物からの視覚刺激と同じであり、光の明暗として無意識に認識されたと考えている。そして、課題①の提示時に、研究対象者の脳内では、文献²⁷⁾による背側経路を辿り、ITGから頭頂葉を経てSFG、MFGに至る視覚情報処理の流れが生じており、テキストマイニングによって得られた結果は、そのことを反映していると考えている。

(2) 課題①で少数の対象者で腹側経路に関わるITGの活動性が左半球優勢であったことについて

文献²⁶⁾によれば、下前頭回 (ITG) は腹側の注意機能ネットワークを構成し、入ってくる複数の空間情報に優先順位をつける。ただし、この文献は右前頭葉機能に関して述べている。他の文献²⁵⁾では空間性注意においては右半球優位であり、右にも左にも注意が向けられるのに対し、左半球は対側の右にしか注意が向けられないとしている。このことから、筆者は、少数の研究対象者では、課題図形を左半球優位で処理したのではないかと考えている。

(3) 課題①ではSFG, MFG, そしてAOrGでは左右半球間の係がみられることについて
筆者は、上述の空間性注意における左右半球の関わりがこれら3部位で見られたのではないかと考えている。

(4) 課題②で背側経路上に位置する左右のSFG, およびR-STG, R-ITGにおいてIntrinsicが強化し、左右のIOGとAOrG, およびL-MFG, L-T-IFGではIntrinsicが弱化したことについて

通常の脳波では安静閉眼時には α 波が出現し、開眼時には α 波は消失し β 波が顕在化してくるが、この変化はニューロン発火の同期性とその乱れによるとされている²⁸⁾。これと同様に、筆者はIntrinsicの強化はその部位内のニューロン活動の同期性（一律な活動性）が高まった結果であり、また弱化はその逆のニューロン活動の分散（多様な活動性）が高まった結果であると考えている。すなわち、課題②は以下の(5)(6)に述べるように、課題①に比べて、意識的に処理する情報が多くなる。そのために、情報処理の種類別に、それぞれに対応している脳部位において、Intrinsicの強化・弱化の違いが生じたと考えている。また結果からは、鮫島の行った実験⁴⁾の9名の対象者に関しては、課題②に必要な多様な処理は左半球が主役的に担っていることが推定される。さらに、文献²⁶⁾によれば、右前頭葉皮質のうち、背外側前頭前野、下前頭回そして前部帯状回は空間性作業記憶の中心的役割を果たす領域であり、近年、右前頭葉のなかでも各部位が空間性作業記憶の中

で果たす役割が異なることが明らかになってきた。このことと(2)で述べた下前頭回の機能を含めると、左半球と右半球の違いがあることが難点ではあるが、Intrinsicで弱化したと推定された部位は多様な処理を行っていることが想像され、その結果としての弱化であると考えてもよいかもしれない。

(5) 課題①に比べ、課題②では右半球が左半球よりも活発に活動していることについて

課題②は線画図形であるので、意識的に複数の直線に注意を向け、それら位置関係を検出する必要がある。文献²⁶⁾によれば、このように意識的に何かに注意を向ける「トップダウン型方向性注意」には前頭前野と背側頭頂皮質、特に頭頂間溝、皮質下では上縦束ⅡとⅢ、または側頭頭頂接合部が関与する。

また「ボトムアップ型方向性注意」には、中／下前頭回と上縦束Ⅲが関与する。ただし、この文献は右前頭葉機能に関して述べている。以上のことを念頭に図4をみていくと、SFGからIOG、STG、およびITGへのBackward結合の強化は、線画図形の認識に必要な「トップダウン型方向性注意」への対応の結果であると考えられる。

また、複数の直線から“形”を認知する必要があるため、課題①より腹側経路の活動性が上がると考えられるが、実際IOG、ITG、T-IFG、およびMFGの関係する結合はForward、Backwardとも、ほぼ強化されている。そして以上のような結合変化を生じた対象者の数も、IOG、SFG、およびMFGでは、6名以上となっている。このことから、いわゆる視空間認知機能における右半球優位が実証されたと考えられる。

(6) 課題②では、課題①で関係していたSFG、MFG、AOrGに新たにITGを加えた4部位において、左右半球間の関係が強化することについて

筆者は、(3)で考察したことに加えて、線画図形であるので複数の直線の位置関係を検出して、どのような図形であるか“形を認知する”必要があるため、腹側経路であるITGも左右関係が強化さ

れたのではないかと考える。

4.2 共起ネットワークの結果に対する考察

共起ネットワークによる分析結果は、コロケーション統計のような詳細な知見は与えてくれないが、コロケーション統計では見出すことが難しい、大まかな傾向を示唆していると考えられる。ただし、コロケーション統計の結果と、相反する結果もあるので注意が必要であることがわかった。このことから、共起ネットワークはコロケーション統計の結果を補足するために使用するとよいと考えられる。

以下、3.2共起ネットワークの結果で示された内容について考察する。

(1) 図6 (課題①：半球を基点として分析)

L-SFGがとりわけ半球間の関係が高い可能性がある。また、Forward結合は右半球との関連性が高い。すなわち、右半球はForwardの流れが優勢である。Backward結合は右半球よりも左半球との関連性がやや高い。すなわち、左半球ではBackwardの流れが優勢であることを示唆している。このことは、コロケーション統計の考察(5)に述べた、トップダウン型方向性注意とボトムアップ型方向性注意の優位性が左右半球で異なっていることを示唆していると思われる。

(2) 図7 (課題②：半球を基点として分析)

Intrinsic変化は左半球との関連が高い。このことは、図5に示した結果を補強するものである。

(3) 図8 (結合変化に関する共起)

課題②で強化した結合は、Backward > Forward > Lateralの順に高い可能性が示唆された。

このことは、課題②では「トップダウン型方向性注意」が優勢であることを示唆して、コロケーション統計の結果を補強するものである。

4.3 コロケーション統計と共起ネットワークの適用性に関する考察

今回、有効結合モデルの推定に対して「KWICコンコーダンスのコロケーション統計」と「共起ネットワーク」による2種類のテキストマイニン

グを行った結果、「KWICコンコーダンスのコロケーション統計」によるマイニングは非常に有用であると考えられた。それを適用することにより、グラフィック・データのみでは導き出すことが容易でない、一般性のある詳細な推定が可能になると考えられる。一方、「共起ネットワーク」によるマイニングでは、大まかな傾向を知ることしかできなかったため、単独のグラフィック・データへの応用には適さないが、補足的に注意して使用すると効果的であると考えられる。

5. まとめ

今回、9名の研究対象者から得られた“個人差のある脳内部位間有効結合モデル”の共通パターンを見出すために、全くの思い付きでテキストマイニングの手法を取り入れてみようとした研究が始めたが、結果的にその有用性を見出すことができた。非言語・非数値であるデータは、一般的にそのままの形式では、整理して分析することが容易でない。しかし、本研究によって、“一定の表現ルール”に則ってテキスト表現に変換しテキストマイニングを行うことで、それらデータが内含している意味・特徴を抽出して分析できる可能性を実証できたと考えている。

今回、筆者が用い作成した有効結合モデルのグラフィック表現は、認知活動中の脳内活動を理解する上で視覚的・直感的に理解しやすいものである。そのため、今後も有用なツールであると思われるが、さらにテキストマイニング手法を組み合わせると、より一般性の高い研究が可能になると考えられる。今後の修了研究、将来の臨床検査学科での卒業研究などでも、有効結合モデルとテキストマイニング手法を組み合わせ研究していきたい。また、脳波データに基づくこのようなハイブリッド手法は、対象者に提示する課題を変える（例えば言語課題を用いた言語理解能力の検証や、人物写真の提示による記憶力の検証など）ことによって、早期認知症の評価などにも応用できるのではないかと考えている。しかしそのためには、多数の健常者のデータに基づく正常な結合パター

ンの同定、正常パターンからの逸脱度の定量化（たとえばスコア化など）、そしてこの逸脱度と症状との関連性の検証など、解決すべき課題は多い。

なお、非言語・非数値であるデータへのテキストマイニング手法の応用は、例えば、音符の分析など、さまざまな分野でも可能と思われる。

利益相反

本論文に関して、開示すべき利益相反関連事項はない。

引用・参考文献 (References)

- 1) 泰羅雅登, 中村克樹 (監訳). 第4版カールソン神経科学テキスト—脳と行動—. 丸善出版, **2015**, 747p.
- 2) 森田尚亨, 柳瀬香南. 脳波データを用いた精神状態の推定および分類について. 高知学園短期大学紀要. **2005**, 36, p.49-73.
- 3) 入野野宏. 事象関連電位入門. <https://cplnet.jp/wp-content/uploads/2020/12/erp.pdf> (参照2021-09-23).
- 4) 鮫島広大.“3次元認識に必要な要素を処理する脳活動の推定～事象関連電位を用いた研究～”. 令和2年度専攻科応用生命科学専攻修了論文集. 高知学園短期大学, **2021**, p.117-172 (図1 : p.170-171, 図2 : p.133, 図3 : p.134, **1.6判明した問題**の記述内容 : p.167-168).
- 5) 村上郁也 (編). イラストレクチャー認知神経科学 第4章視覚. オーム社, **2014**, p.54-70.
- 6) 杉原厚吉.“1 立体をどうとらえるか”. 数理工学への誘い. 東京大学工学部計数工学科数理情報工学コース編. 日本評論社, **2002**, p.1-10.
- 7) 富永裕久 (著). 茂木健一郎 (監修). “視覚① = 立体感はなぜ生まれるか”. 目からウロコの脳科学—心と脳はここまでわかった!. PHP研究所, **2009**, p.154-155.
- 8) Steven J. Luck and Emily S. Kappenman (ed.). The Oxford Handbook of Event-Related Potential Components. Oxford University Press, **2013**, 641p.

- 9) Steven J. Luck. An Introduction to the Event-Related Potential Technique. 2nd ed., The MIT Press, **2014**, 406p.
- 10) University College London. “Statistical Parameter Mapping”
<https://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/>, (参照 2021-09-23).
- 11) The FIL Methods Group (and honorary members). SPM12 Manual.
<https://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/doc/>, (参照2021-09-23)
- 12) DCMに関する文献へのアクセス。
<https://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/doc/biblio/Keyword/DCM.html>, (参照 2021-09-23).
- 13) 田邊宏樹. 機能分化と機能統合からシステムとして脳をとらえる. 基礎心理学研究. **2009**, 28(1), 72-78.
- 14) 田邊宏樹. 脳機能イメージングとモデル構築—Dynamic Causal Modelingを中心に—. 神経心理学. **2018**, 34, 192-199
- 15) V. Litvak; J. Mattout; S. Kiebel. et al. EEG and MED Data Analysis in SPM8. Computational Intelligence and Neuroscience. **2011**, Volume 2011, Article ID 852961, 32p.
- 16) K. J. Friston; L. Harrison; W. D. Penny. Dynamic Causal Models. NeuroImage. **2003**, 19(4), 1273-1302.
- 17) D. David; S.J. Kiebel; L.M. Harrison. et al. Dynamic causal modelling of evoked responses in EEG and MEG. NeuroImage. **2006**, 30, 1255-1272.
- 18) J. Daunizeau; S.J. Kiebel; J. Friston. Dynamic causal modelling of distributed electromagnetic responses. NeuroImage. **2009**, 47, 590-601.
- 19) S. J. Kiebel; M. I. Garrido; K. J. Friston. “6 Dynamic Causal Modeling for Evoked Responses”. Brain Signal Analysis. Todd C. Handy, ed. The MIT Press, **2009**, p.141-169.
- 20) S. Heim; S.B. Echoff; A.K. Ischebeck. et al. Effective Connectivity of the Left BA44, BA45, and Inferior Temporal Gyrus During Lexical and Phonological Decisions Identified With DCM. Human Brain Mapping. **2009**, 30, 392-402.
- 21) BMSに関する文献へのアクセス。
<https://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/doc/biblio/Keyword/BAYESIAN.html>, (参照 2021-09-23).
- 22) 亭阪直行.“意識とワーキングメモリ”. 別冊数理科学SGCライブラリ24 脳の謎に挑む—ブレイクスルーへの胎動—. 茂木健一郎編著. サイエンス社, **2003**, p.126-134.
- 23) 樋口耕一. 社会調査のための計量テキスト分析—内容分析の継承と発展を目指して 第2版. ナカニシヤ出版, **2020**, 264p.
- 24) KH Coder:計量テキスト分析・テキストマイニングのためのフリーソフトウェア。
<https://kncoder.net/>, (参照2021-09-23).
- 25) 内山由美子：注意障害の臨床～Attention, please!～. 神経心理学. **2018**, 34, 155-162.
- 26) 中島理帆, 中田光俊：右前頭葉機能の高次脳機能ネットワーク. ウェルネス・ヘルスケア学会論文誌. **2019**, 43(1), 1-9.
- 27) 養老孟司 (監訳). ブレインブック みえる脳. 南江堂, **2012**, 256p.
- 28) 大熊輝雄, 他. 臨床脳波学 第6版. 医学書院, **2016**, 724p.

受付日：令和3年10月6日

受理日：令和4年1月26日

Original Paper

An application of text mining techniques to the model estimation of inter-regional effective connectivity in the human brain

Naoyuki MORITA^{1*}

Abstract: The human brain has come to be understood as a functional integration system with mutual exchange of information among coactive regions that have their own specific functions. It is now thought that such cognitive phenomena as human consciousness and behavioral decision-making are generated by functional integrative processes. In the course of studying for completion of advanced course in applied life sciences in 2020, the author and a student in this advanced course conducted research where the most likely effective connectivity model for the above-mentioned coactive brain regions for each human research subject was estimated using the brain wave data from each subject, and these connectivity models were then graphically depicted in an easy-to-understand fashion. However, the graphical connectivity models were unable to show a common connectivity pattern among subjects, because that the brain waves differed in fundamental ways between individuals. Text mining techniques were applied to resolve the question of how to identify common connectivity patterns from those graphical connectivity models. In this paper, the effectiveness of the application of text mining techniques to the answering of this question is presented.

Key Words: effective connectivity, graphic description, text expression, text mining, KH coder

¹ Kochi Gakuen University, Faculty of Health Science, Department of Medical Laboratory Science, *Email: morita@kochi-gu.ac.jp