

原著論文

非利き足趾の「後出し負けじゃんけん」は、左の背外側前頭前野と右の後部島皮質領域、右の角回、右の補足運動野を賦活させる

牧野 均・生駒 一憲*

(2024年2月16日受稿)

抄録：今回我々は非利き足趾と利き足趾の脳皮質レベルで認知機能の差を比較検討するために、認知的葛藤を含む後出し負けじゃんけんを用いてfMRI測定を行った。対象は右利き足趾の男女10名である。多重補正の結果、非利き足趾である左足趾後出し負けじゃんけん課題を行った場合、利き足趾である右足趾後出し負けじゃんけん課題を行った場合と比較して、左の背外側前頭前野と右の後部島皮質領域、右の角回、右の補足運動野が有意に賦活した。これらの部位は互いに連携して、非利き足趾での高負荷な認知的葛藤課題を伴う運動課題を行ったと考える。このことは左右どちらの脳に障害が生じたとしても運動課題や認知課題を含む動作が困難になることを示唆する。つまり、左前大脳動脈領域が障害を受けても左下肢の運動課題や認知課題を含む動作が困難となり、右中大脳動脈領域が障害を受けても左下肢の運動課題や認知課題を含む動作が困難となることが示唆され、歩行での足趾での細かな動作や利き手交換の治療に対し再検討が必要と考える。

キーワード：後出し負けじゃんけん、左背外側前頭前野、右後部島皮質領域、右角回、右補足運動野

I. はじめに

じゃんけんは、古くから中国に伝わる拳遊びを基に江戸時代に日本で考案された「三すくみ」を構成することで勝敗を決める方法である¹⁾。一方、後出し負けじゃんけんは認知的葛藤を含むため左前頭葉が重要である²⁾。我々は先行研究において右利き群と左利き群の比較において利き側と非利き側の比較を行った³⁾。しかし、それぞれの特徴は示したものの利き側と非利き側の明確な差異を認めることができなかった。利き手と非利き手の研究では、脊髄レベルでは利き手は同側の脊髄のみ活性化するが非利き側では対側の脊髄も活性化し⁴⁾、利き側と非利き側の違いが示されている。そこで本研究では、「後出し負けじゃんけん」の課題を単純化することにより利き側と非利き側の認知的活動の差を明確にすることとする。

II. 対象と方法

1. 対象

神経学的既往のない健常な成人男女10名（男性5名、女性5名、平均年齢21.5±0.7歳）が参加した。視力の悪い被験者に関してはMRI検査用メガネを着用し、視力を0.7以上に矯正した後に撮像を行った。全例、事前にチャップマンの利き手利き足テストを行い、手足共に右利き者のみ右下肢を用いて測定に参加した。

すべての被験者は、北海道大学医学研究科・医学部「医の倫理委員会」の審査に基づくアンケート調査と十分な説明の後、同意書に署名の上、ボランティアとして今回の測定に参加した。

2. 方法

課題はブロックデザインとし、MRI装置の中から背臥位にてプリズムメガネにてスクリーン上に投影された足趾動作のじゃんけん映像をみて、指

示された課題に従うこととした。スクリーン上に投影される映像は、対面する第三者が足趾でジャンケンを提示する場面を想定した。

課題提示はブロック課題とした。1ブロックを15秒とし、固視課題・右足趾後出し負けじゃんけん課題・左足趾後出し負けじゃんけん課題を組み合わせて、1セッション4分として計測を行うこととした(図1)この設定の上で、利き足趾である右足趾後出し負けじゃんけん課題と非利き足趾である左足趾後出し負けじゃんけん課題の比較を行った。

3. fMRIデータの測定と解析

fMRIの撮影は、北海道大学医歯学総合研究棟MRI室GE製MRIスキャナSigna Lightning (1.5T)を用いた。撮像パラメータはTE 40ms, TR 3000ms Flip Angle 90 Slice Thickness 4.0mm gap 1.0mm voxel size 2mm, スライス枚数22である。

解析は、MathWorks社製数値計算ソフトMatlabとSPM12を組み合わせで行った得られた

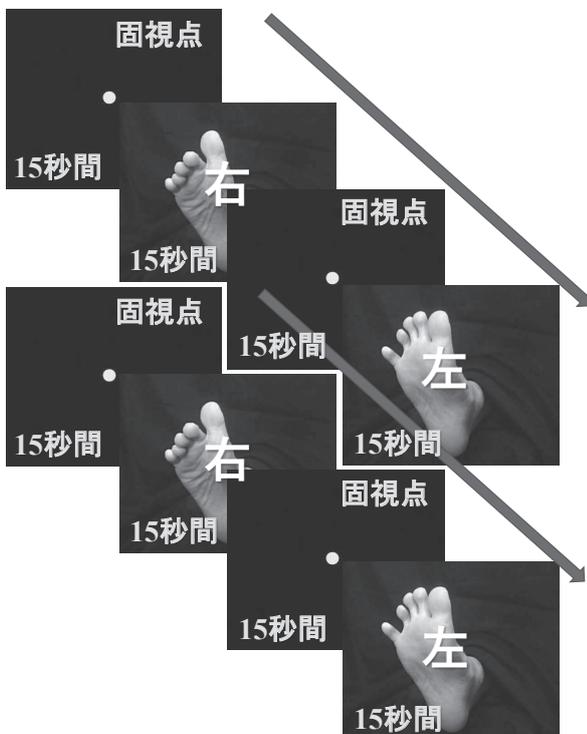


図1 課題提示

各ブロック15秒で計4分間1session(上図を2回繰り返す)

fMRIデータは、SPM12上にて頭部の動きを補正するためのrealignmentを行った後、Slice timing correction及びCoregistrationを行い、Montreal Neurological Institute(以下MNI)標準脳に変形するためのNormalisation, 空間的平滑化を行うSmoothingを8mmとして前処理を順次行った。前処理したfMRIデータを個人解析した後、集団解析を行った。

個人解析は各々「右足趾後出し負けじゃんけん課題vs.固視課題」,「左足趾後出し負けじゃんけん課題vs.固視課題」,「右足趾後出し負けじゃんけん課題vs.左足趾後出し負けじゃんけん課題」,「左足趾後出し負けじゃんけん課題vs.右足趾後出し負けじゃんけん課題」を行った。

統計処理は、SPM12上の多重比較補正であるfamily wise error(以下FWE)を用いpeak levelにて $p < 0.05$ で統計的推論を行った。また、関心領域(Region of interest:ROI)を、設定し解析を行った(ROIの設定にはWFU_PickAtlas_3.0.5bを用いた⁵⁷⁾。集団解析は、各課題にて行った。ROIの設定は各課題でのone-sample t-testによる集団解析の統計処理後SPM12上のuncorrectedで統計的推論を用いて $p < 0.001$ を有意水準として行い賦活部位を確認したうえでROIを設定し、SPM12上の多重比較補正であるFWEを用い、統計的推論を行った。

脳賦活部位の同定は、SPM12で出力される標準脳のMNI座標系をMATLAB上でmni2talにて変換し、その後Talairach Daemon ClientにてTalairach座標に変換して脳活動部位の決定を行った⁵⁸⁾。

Ⅲ. 結果

1. 右足趾後出し負けじゃんけん課題vs.左足趾後出し負けじゃんけん課題

右足趾で後出し負けじゃんけんを行った場合、左足趾で後出し負けじゃんけんを行った場合と比較して賦活した部位について、

uncorrectedにて $p < 0.001$ を有意水準として賦活

部位を確認した。左半球の運動野、感覚野、補足運動野、ブロードマン9野（以下BA9、背外側前頭前野（dorsolateral prefrontal cortex, 以下DLPFC））ブロードマン42野（以下BA42、横側頭回、Transverse temporal gyrus : TTG（上側頭回 Superior temporal gyrus : STG））の活動が増加した（図2）この結果をもとに、BA9・DLPFC、BA42に対し、WFU Pick Atlasにてmask処理を行いSPM12上の多重比較補正であるFWEを用い、cluster levelにて $p < 0.05$ で統計的推論を行ったところ賦活する部位はなかった。

2. 左足趾後出し負けじゃんけん課題vs.右足趾後出し負けじゃんけん課題

左足趾後出し負けじゃんけん課題を行った場合、右足趾後出し負けじゃんけん課題を行った場合と比較して賦活した部位について。

uncorrectedにて $p < 0.001$ を有意水準として賦活部位を確認した。右半球の運動野（BA4）、感覚野（BA1-2-3）、補足運動野（BA6）、角回（BA39、angular gyrus、以下AG）、上側頭回（STG）、左半球のBA9・DLPFCの活動が増加した（図3）。また、右半球のBA13・島後部領域（posterior

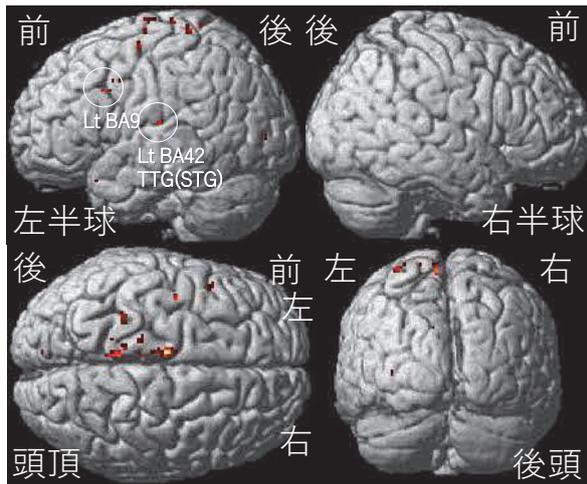


図2 右足趾課題 vs. 左足趾課題
level $p < 0.001$ (uncorrected)

右足趾で後出し負けじゃんけんを行った場合、左足趾で後出し負けじゃんけんを行った場合と比較した賦活部位。左半球の運動野、感覚野、補足運動野、ブロードマンエリア9野（BA9:DLPFC）、42野（横側頭回、TTG（上側頭回、STG））の活動が増加した。

insula, 以下PI) の活動が増加した（図4）。

この結果をもとに、AG、BA9・DLPFC、PIに対し、WFU Pick Atlasにてmask処理を行いSPM12上の多重比較補正であるFWEを用い、peak levelにて $p < 0.05$ で統計的推論を行った。

その結果、左足趾後出し負けじゃんけん課題を

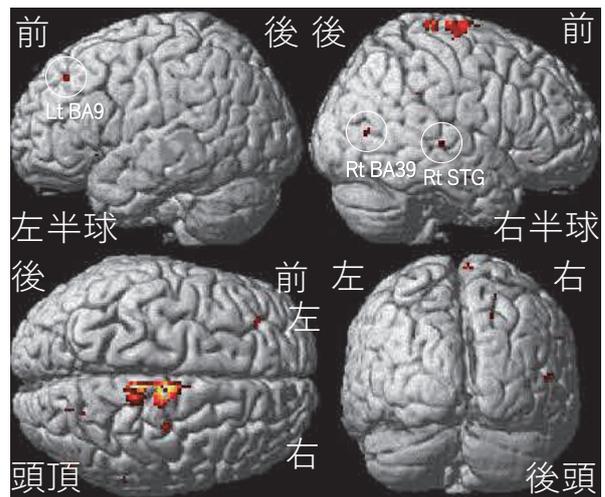


図3 左足趾課題 vs. 右足趾課題
level $p < 0.001$ (uncorrected)

左足趾で後出し負けじゃんけんを行った場合、右足趾で後出し負けじゃんけんを行った場合と比較した賦活部位。右半球の運動野、感覚野、補足運動野、角回（BA39:AG）、上側頭回（STG）、左半球のブロードマンエリア9野（BA9:DLPFC）の活動が増加した。

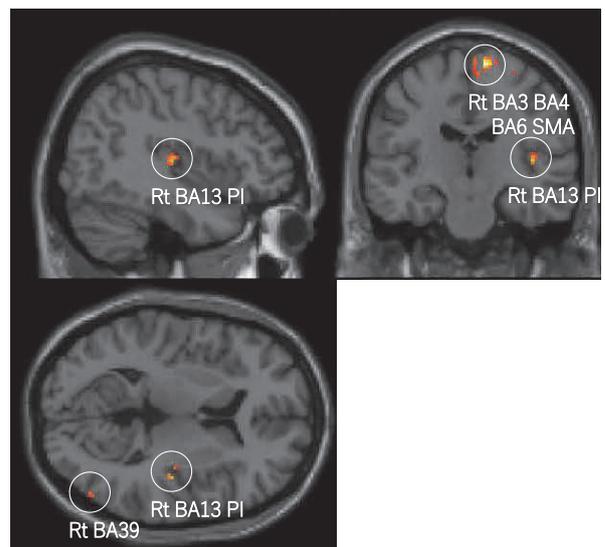


図4 左足趾課題 vs. 右足趾課題
 $p < 0.001$ (uncorrected)

左足趾で後出し負けじゃんけんを行った場合、右足趾で後出し負けじゃんけんを行った場合と比較した賦活部位。右半球のBA3、BA4、BA6 : SMA、BA39:AG、BA13・島後部領域（posterior insula:PI）の活動が増加した。

行った場合、右足趾後出し負けじゃんけん課題を行った場合と比較して、BA9・DLPFCの活動が増加した(図5, 表1) また、右半球のBA13・PIの活動が増加した(図6, 表2)。同じく、右半球のAGの活動が増加した(図7, 表3)。同じく、右半球のBA3・BA4・BA6:SMAの活動が増加した(図8, 表4)。

IV. 考察

左足趾後出し負けじゃんけん課題を行った場合、右足趾後出し負けじゃんけん課題を行った場合と比較して、FEWにおいて左BA9・DLPFC, 右PI, 右AGが有意に賦活した。

我々の先行研究では、右利き群の右側足趾の後出し負けじゃんけん時の脳活動は、両側のSMA, 左脳の左足趾運動野(BA4), 右脳の

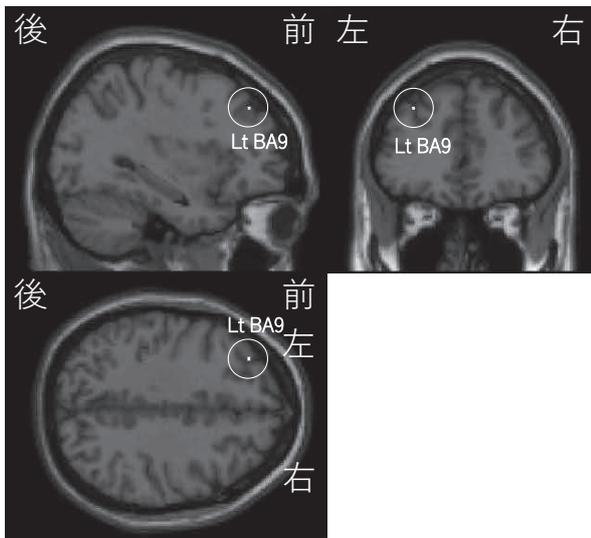


図5 左足趾課題 vs. 右足趾課題
peak level $p < 0.05$ (FWE)

左足趾で後出し負けじゃんけんを行った場合、右足趾で後出し負けじゃんけんを行った場合と比較して、左半球のBA9:DLPFCの活動が増加した。

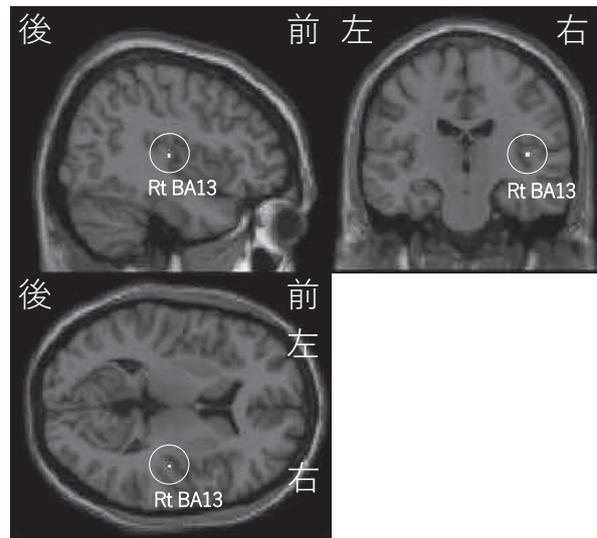


図6 左足趾課題 vs. 右足趾課題
peak level $p < 0.05$ (FWE)

左下肢で後出し負けじゃんけんを行った場合、右下肢で後出し負けじゃんけんを行った場合と比較して、BA13:右PIの活動が増加した。

表1. 左足趾課題時に特有の活動部位 左足趾課題 vs. 右足趾課題

Cluster size (mm ³)	MNI coordinates			Talairach coordinates			Z value	P value P _{FWE-corr}	Hem	Anatomical Region
	x	y	z	x	y	z				
8	-32	38	40	-32	39	35	4.52	0.006	L	MFG BA9 DLPFC

左下肢で後出し負けじゃんけんを行った場合、右下肢で後出し負けじゃんけんを行った場合と比較して、左中前頭回(MFG)・BA9の活動が増加した。脳活動部位の同定は、SPM12で得られたMNI座標系をMATLAB上でmni2talを用いて変換し、その後Talairach Daemon Clientで決定した(図5)。

表2. 左足趾課題時に特有の活動部位 左足趾課題 vs. 右足趾課題

Cluster size (mm ³)	MNI coordinates			Talairach coordinates			Z value	P value P _{FWE-corr}	Hem	Anatomical Region
	x	y	z	x	y	z				
8	42	-18	8	40	-17	11	4.32	0.015	R	BA13 PI

左下肢で後出し負けじゃんけんを行った場合、右下肢で後出し負けじゃんけんを行った場合と比較して、BA13:右PIの活動が増加した。脳活動部位の同定は、SPM12で得られたMNI座標系をMATLAB上でmni2talを用いて変換し、その後Talairach Daemon Clientで決定した。

DLPFC:BA46が賦活した。また、右利き群の左側足趾の後出し負けじゃんけん時の脳活動は、両側のSMA右脳の左足趾運動野 (BA4)、左脳のDLPFC:BA46が賦活した。

1. DLPFCについて

BA9とBA46は背外側前頭前野 (DLPFC) である^{5) 6)}。DLPFCは、ワーキングメモリ課題遂行時に例外なく活性化し⁷⁾、ワーキングメモリ

課題の負荷が高くなるとより活性化が高まる⁸⁾。ワーキングメモリとは、理解、学習、推論など認知的課題の遂行中に情報を一時的に保持し操作するためのシステムである^{9) 10)}。

DLPFCは、複数課題の切り替えに関与し¹¹⁾、活動が顕著な参加者ほど記憶の修正能力が高く¹²⁾、攻撃性のコントロールに重要である¹³⁾。また、食欲の抑制にも関与し¹⁴⁾、DLPFCは感情を抑制す

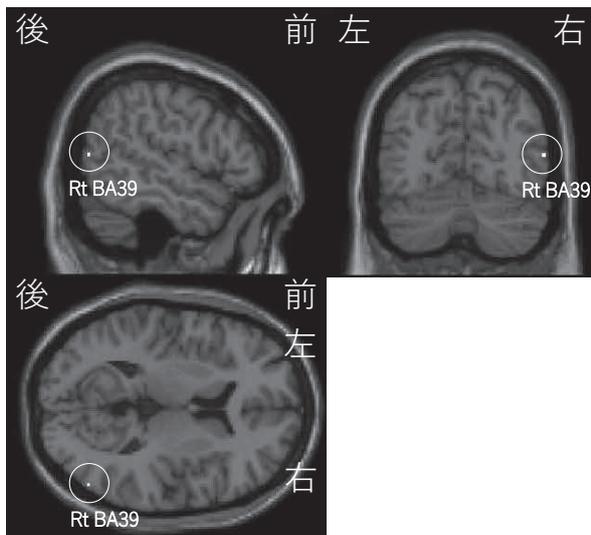


図7 左足趾課題 vs. 右足趾課題 peak level $p < 0.05$ (FWE)

左足趾で後出し負けじゃんけんを行った場合、右足趾で後出し負けじゃんけんを行った場合と比較して、左BA39:AGの活動が増加した。

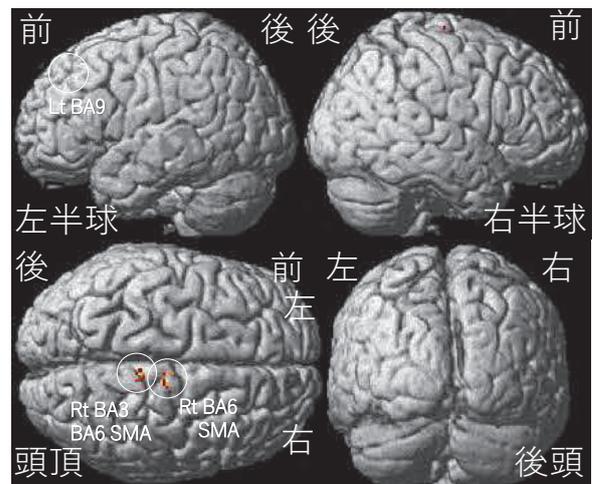


図8 左足趾課題 vs. 右足趾課題 peak level $p < 0.05$ (FWE)

左足趾で後出し負けじゃんけんを行った場合、右足趾で後出し負けじゃんけんを行った場合と比較して、右BA3・BA6:SMAの活動が増加した。

表3. 左足趾課題時に特有の活動部位 左足趾課題 vs. 右足趾課題

Cluster size (mm ³)	MNI coordinates			Talairach coordinates			Z value	P value P FWE-corr	Hem	Anatomical Region
	x	y	z	x	y	z				
8	54	-70	10	54	-67	13	3.73	0.039	R	BA39 AG

左下肢で後出し負けじゃんけんを行った場合、右下肢で後出し負けじゃんけんを行った場合と比較して、右BA39:AGの活動が増加した。脳活動部位の同定は、SPM12で得られたMNI座標系をMATLAB上でmni2talを用いて変換し、その後Talairach Daemon Clientで決定した。

表4. 左足趾課題時に特有の活動部位 左足趾課題 vs. 右足趾課題

Cluster size (mm ³)	MNI coordinates			Talairach coordinates			Z value	P value P FWE-corr	Hem	Anatomical Region
	x	y	z	x	y	z				
88	10	-18	72	10	-14	67	5.27	0	R	BA6 SMA
56	6	-34	72	6	-30	68	5.11	0.001	R	BA6 SMA
16	10	-36	70	10	-32	66	4.58	0.015	R	BA3
16	6	-16	74	6	-12	69	4.51	0.021	R	BA6 SMA

左下肢で後出し負けじゃんけんを行った場合、右下肢で後出し負けじゃんけんを行った場合と比較して、右BA6:SMAと感覚野(BA3)の活動が増加した。脳活動部位の同定は、SPM12で得られたMNI座標系をMATLAB上でmni2talを用いて変換し、その後Talairach Daemon Clientで決定した。

る能力との深い関連が示唆されている。今回の研究においても「後出し負け」という状況下、課題を切り替え攻撃性や感情を抑制したと考える。

一方、左DLPFCは、主観的な幸福感に関連し達成感により活動性が増加するとの報告もある¹⁵⁾。非利き手による「後出し負け」という課題遂行に対する達成感が活動性を増加させたと考える。

今回の研究では、左足趾後出し負けじゃんけん課題にて左BA9・DLPFCの活動が増加した。非利き足趾による「後出し負け」という状況下、課題を「負ける」ことに切り替え攻撃性を抑制し達成感を得るといった総合的な環境においてより負荷がかかりBA9の活動が増加したと考える。

2. 島について

大平は、「脳には身体全体の状態を常にモニターしている領域がありその最高次の部位が体性感覚皮質と島である」としている¹⁶⁾。

島皮質は脳の外側面の奥に位置している後背側部の顆粒細胞から前腹側部の無顆粒細胞まで変化する細胞構築を持つ¹⁷⁾。

島は意思決定に関わり、特に前部島皮質領域は不活性化によりリスク選考が減少¹⁸⁾、機能不全によりリスク行動に偏りが生ずる¹⁹⁾。しかし今回の研究では、「後出し負け」により後部島皮質領域が活性化した。

前部島皮質と後部島皮質の機能の違いが報告されている。前部島皮質は認知機能に関係²⁰⁾、後部島皮質は温痛覚に関与する²¹⁾。しかし、痛みに関する予測制御に関しては前部島皮質が関係する²²⁾。後部島皮質に関しては、嫌悪的な内部状態を検出すると行動戦略を変更²³⁾、ラットの研究では手がかり恐怖記憶の固定化に必要な部分であるとの報告がある²⁴⁾。今回の研究においても非利き手による「後出し負け」という行動戦略の変更と固定化に関与したと考える。

左右の島の働きの違いについての報告もある。左島皮質は記憶障害と関連がある²⁵⁾。算術と代数の研究では、算術において左島皮質が活性化した

²⁶⁾。一方、右島皮質の研究では、右島皮質は持続時間の識別に関係する²⁷⁾。また、右島皮質が空間的注意に関与する²⁸⁾。今回の研究でも、非利き手による「後出し負け」という時間的なずれと注意が関係したと考える。

また、心不全の研究では、右島状皮質は交感神経活動と関連し左島皮質は副交感神経の制御と関連することが示唆されている²⁹⁾。課題遂行により交感神経系も関与したことが考えられる。

運動による島の血流量の変化についても報告がある。Williamsonは、一連の報告で左右の島皮質と運動の質に関して報告している^{30) 31) 32)}。これらの報告では、運動の質や方法で左右の島皮質の活性が変わり活性化は筋肉の求心性フィードバックに無関係であるとし、ハンドグリップの静的運動では右下後島皮質と左下前島皮質の局所脳血流量は増加したとしている³³⁾。

今回の我々の非利き足趾による「後出し負け」じゃんけんの課題では、右後部島皮質の活動が増加した。このことは、「負ける」という行為と「後出し」による戦略の変更と時間的なずれ、「後出し負け」という課題による交感神経系の活動と運動による局所脳血流量の増加が複雑に関与したと考える。

3. AGについて

角回（以下AG）はBA9にあたり、縁上回と合わせ下頭頂小葉と呼ばれ上頭頂小葉と頭頂連合野を形成する。その下部は上側頭回後部と側頭頭頂接合部を構成する。

AGは、認知や言語など多数の処理に関わっている。

視覚情報は、V1からMT野へ行き背側経路と腹側経路に分岐する。背側経路は、さらに背 - 背側経路と腹 - 背側経路に分岐する。背 - 背側経路は頭頂間溝に投射し行動の制御を行う。マカクザルでは腹 - 背側経路は下頭頂小葉後半部（PG野）に投射し行動の組織化と空間知覚や行動理解に重要な役割を果たす³⁴⁾。視覚情報は、MT野か

ら入力を得て両側の広い受容野を持つ³⁵⁾。また、下頭頂小葉後半部からDLPFCに出力される³⁶⁾。

ヒトの下頭頂小葉後半部に位置するAGは、他者を行為主体とみなした場合に強く活性化し³⁷⁾、さらに右角回は他者を行為主体とみなした場合に強く活性化する³⁸⁾。

今回賦活したAGは下頭頂小葉の下部は、側頭頭頂接合部 (Temporo-parietal junction, 以下TPJ) に近接する。TPJは、「心の理論」との関係も指摘されている。「心の理論」とは、David等が1978年に初めて使用した、他者や自己の心的状態を理解推測する能力である³⁹⁾。報告されている「TPJ」の活性化の大部分がAGまたは後頭外側皮質に存在する⁴⁰⁾。

Saxeは、右TPJが「心の理論」領域の一つであるとした^{41) 42)}。右TPJは競争相手との相互作用中に高い活性を示す⁴³⁾。また、右TPJの前後の細部分は共同作業で活性化しパートナーの出力に依って調整を行う⁴⁴⁾。

他者ボーナスの研究では、自己ボーナス提示では左DLPFCが活性し、他者ボーナスでは左DLPFCに加えて右TPJが活性化したとの報告もある⁴⁵⁾。今回の研究でも他者ボーナスとして活性化したと考える。

我々の非利き足趾による「後出し負けじゃんけん」の研究でも右AGが活性化した。映像による他者のじゃんけんに対して、非利き足趾によりあえて「後出し負け」ることにより右AGが左DLPFCと連携して活性化したと考える。

4. SMAに関して

SMAは自発的運動の開始に寄与し⁴⁶⁾、運動のイメージ生成や順序動作に関係する⁴⁷⁾。

福永の負けとあいこを指示するじゃんけんの研究では⁴⁸⁾、右利きの被験者に左手じゃんけんを指示した場合に左SMAを抑制する機能を示唆している。今回の我々の研究においても、左足趾「後出し負けじゃんけん」課題は右足趾「後出し負けじゃんけん」課題と比較して右SMAのみ活性化

した。SMAは運動の順序制御に不可欠な部位で⁴⁹⁾、対側の手の複雑な運動に関与する^{50) 51)}。

算数障害のある子どもの研究では、左DLPFCとSMAが活性化し、DLPFCの活性化は記号処理の困難の指標になる⁵²⁾。また、インターネットゲーム障害においても左DLPFCとSMAの機能不全が示唆されている⁵³⁾。今回の研究でも「後出し負け」というゲームの複雑な処理で活性化したと考える。

今回、非利き足趾である左足趾の「後出し負け」じゃんけんで、利き足趾である右足趾「後出し負け」じゃんけんと比較して、左DLPFCと右PIと右AGと右SMAが賦活した。

運動イメージ生成に関する我々の一人称イメージを用いた非利き足趾と利き足趾の研究では、非利き足は、利き足と比較して、有意に賦活する部位はなかった⁵⁴⁾。しかし、三人称イメージとして提示された「後出し負け」課題では有意に賦活する部位が存在した。

利き手と非利き手の研究では、非利き手で書字する際に前頭部の脳活動は活性化し⁵⁵⁾、非利き手での運動中の方が脳での感覚情報を処理する時間が長い⁵⁶⁾ことが示唆されている。

今回の研究でも、非利き足趾の「後出し負け」課題時に左DLPFCが活性化した。また、感覚野に隣接するSMA活性化が非利き足趾の課題時の方が大きかったことにより、脳での処理に負担がかかったと考える。

5. リハビリテーションへの応用について

中大脳動脈領域に何らかの障害が生ずるとAGやinsula等広い範囲で影響を受ける。また、前大脳動脈領域に何らかの障害が生ずるとDLPFCやSMA等広い範囲で影響を受ける。しかし、今回の研究で両半球が対側で密接に繋がっていることが示唆された。つまり、左前大脳動脈領域が障害を受けても左下肢の運動課題や認知課題を含む動作が困難となり、右中大脳動脈領域が障害を受け

でも左下肢の運動課題や認知課題を含む動作が困難となることが考えられる。特に歩行での足趾での細かな動作や利き手交換の治療に対し再検討が必要と考える。

V. 結語

今回非利き足趾と利き足趾での後出し負けじゃんけんでの脳の賦活部位の差を検討した。非利き足趾での後出し負けじゃんけん課題は、利き足趾後出し負けじゃんけん課題と比較して左DLPFC・右PI・右AG・右SMAが活性化した。歩行での足趾での細かな動作や利き手交換の治療に対し再検討が必要と考える。

文献

- 1) 山田泰子, 鈴鹿有子, 樋口正法: 脳磁図を用いた左右脳半球の機能分析に関する研究. 金沢医科大学雑誌. 30: 235-244, 2005.
- 2) Omori M, Yamada H, Murata T, Sadato N, Tanaka M, Ishii Y, Isaki K, Yonekura Y: Neuronal substrates participating in attentional set-shifting of rules for visually guided motor selection-A functional magnetic resonance imaging investigation. *Neurosci Res*, 33: 317-323, 1999.
- 3) 牧野均, 生駒一憲: 右利きと左利きにおける後出し負けじゃんけんでの脳活動の比較研究. 北海道文教大学研究紀要, 40: 13-29, 2015.
- 4) Takasawa E, Abe M, Chikuda H, Hanakawa T: A computational model based on corticospinal functional MRI revealed asymmetrically organized motor corticospinal networks in humans. *Commun Biol*. 5: 664. 2022.
- 5) Okamoto M, Dan H, Sakamoto K, Takeo K, Shimizu K, Kohno S, Oda I, Isobe S, Suzuki T, Kohyama K, Dan I: Three-dimensional probabilistic anatomical cranio-cerebral correlation via the international 10-20 system oriented for transcranial functional brain mapping. *Neuroimage*, 21: 99-111, 2004.
- 6) Muzur A, Pace-Schott EF, Hobson JA: The prefrontal cortex in sleep. *Trends Cogn Neurosci*, 6(11): 475-484, 2002.
- 7) Cabeza R, Nyberg L: Image cognition: An empirical review of PET studies with normal subjects. *J Cogn Neurosci*, 9: 1-26, 1997.
- 8) Cohen JD, Perstein WM, Braver TS, Nystrom LE, Noll DC, Jonides J, Smith EE: Temporal dynamics of brain activation during a working memory task. *Nature*, 386: 604-608, 1997.
- 9) Baddeley AD, Hitch GJ: Working Memory. *Psychol Learn Motiv*, 8: 47-90, 1974.
- 10) Baddeley AD, Logie R, Bressi S, Della Sala S, Spinnler H: Dementia and working memory. *Q J Exp Psychol*, 38A: 603-618, 1986.
- 11) Fitzsimmons SMDD, Douw L, van den Heuvel OA, van der Werf YD, Vriend C: Resting-state and task-based centrality of dorsolateral prefrontal cortex predict resilience to 1 Hz repetitive transcranial magnetic stimulation. *Hum Brain Mapp*, 41(11): 3161-3171, 2020.
- 12) Klüen LM, Dandolo LC, Jocham G, Schwabe L: Dorsolateral prefrontal cortex enables updating of established memories. *Cerebral Cortex*, 29(10): 4154-4168, 2019.
- 13) Achterberg M, van Duijvenvoorde ACK, van IJzendoorn MH, Bakermans-Kranenburg MJ: Eveline A Crone Longitudinal changes in DLPFC activation during childhood are related to decreased aggression following social rejection. *Proc Natl Acad Sci USA*, 117(15): 8602-8610, 2020.
- 14) Kohl SH, Veit R, Spetter MS, Günther A, Rina A, Lührs M, Birbaumer N, Preissl H, Hallschmid M: Real-time fMRI neurofeedback training to improve eating behavior by self-regulation of the dorsolateral prefrontal

- cortex—A randomized controlled trial in overweight and obese subjects. *Neuroimage*, 191: 596–609, 2019.
- 15) Katsumi Y, Kondo N, Dolcos S, Dolcos F, Tsukiura T: Intrinsic functional network contributions to the relationship between trait empathy and subjective happiness. *NeuroImage*, 5(227): 117650, 2020.
 - 16) 大平英樹: 感情的意思決定を支える脳と身体の機能的関連. *心理学評論*, 57: 98–123, 2014.
 - 17) Mesulam MM, E J Mufson EJ: Insula of the old world monkey. I. Architectonics in the insulo-orbito-temporal component of the paralimbic brain. *J Comp Neuro*, 212(1): 1–22, 1982.
 - 18) Ishii H, Ohara S, Tobler PN, Tsutsui K, Iijima T: Inactivating anterior insular cortex reduces risk taking. *J Neurosci*, 32(45): 16031–16039, 2012.
 - 19) Clark L, Bechara A, Damasio H, Aitken MRF, Sahakian BJ, T W Robbins TW: Differential effects of insular and ventromedial prefrontal cortex lesions on risky decision-making. *Brain*, 131(5): 1311–1322, 2008.
 - 20) Cauda F, Costa T, Torta DME, Sacco K, D'Agata F, Sergio Duca, Geminiani G, Fox PT, Vercelli A: Meta-analytic clustering of the insular cortex—characterizing the meta-analytic connectivity of the insula when involved in active tasks. *Neuroimage*, 62(1): 343–55, 2012.
 - 21) Stephani C, Fernandez-Baca Vaca G, Maciunas R, Koubeissi M, Lüders HO: Functional neuroanatomy of the insular lobe. *Brain Struct Funct*, 216: 137–149, 2011.
 - 22) Shih YW, Tsai HY, Lin FS, Lin YH, Chiang CY, Lu ZL, Ming-Tsung Tseng MT: Effects of positive and negative expectations on human pain perception engage separate but interrelated and dependently regulated cerebral mechanisms. *J Neurosci*, 39(7): 1261–1274, 2019.
 - 23) Gehrlach DA, Dolensek N, Klein AS, Chowdhury RR, Matthys A, Junghänel M, Gaitanos TN, Podgornik A, Black TD, Vaka NR, Conzelmann KK, Gogolla N: Aversive state processing in the posterior insular cortex. *Nat Neurosci*, 22: 1424–1437, 2019.
 - 24) de Paiva JPQ, Bueno APA, Corrêa MDS, Oliveira MGM, Ferreira TL, Fornari RV: The posterior insular cortex is necessary for the consolidation of tone fear conditioning. *Neurobiol Learn Mem*, 179: 107402, 2021.
 - 25) Moore MJ, Demeyere N: Lesion symptom mapping of domain-specific cognitive impairments using routine imaging in stroke. *Neuropsychologia*, 167(12): 108159, 2022,
 - 26) Cheng D, Li M, Cui J, Wang L, Wang N, Ouyang L, Wang X, Bai X, Zhou X: Algebra dissociates from arithmetic in the brain semantic network. *Behav Brain Funct*, 18(1): 1–12, 2022.
 - 27) Mella N, Bourgeois A, Perren F, Viacoz A, Kliegel M, Picard F: Does the insula contribute to emotion-related distortion of time? A neuropsychological approach. *Hum Brain Mapp*, 40(5): 1470–1479, 2019.
 - 28) Ohgami Y, Kotani Y, Yoshida N, Akai H, Kunimatsu A, Kiryu S, Inoue Y: The contralateral effects of anticipated stimuli on brain activity measured by ERP and fMRI. *Psychophysiology*, 60(3): 14189, 2023.
 - 29) de Morree HM, Rutten GJ, Szabó BM, Sitskoorn MM, Kop WJ: Effects of Insula Resection on Autonomic Nervous System Activity. *J Neurosurg Anesthesiol*, 28(2): 153–158, 2016.
 - 30) Williamson JW, Nobrega AC, McColl R,

- Mathews D, Winchester P, Friberg L, Mitchell JH: Activation of the insular cortex during dynamic exercise in humans. *J Physiol*, 503(2): 277-283, 1997.
- 31) Williamson JW, McColl R, Mathews D, Ginsburg M, Mitchell JH: Activation of the insular cortex is affected by the intensity of exercise. *J Appl Physiol*, 87(3): 1213-1219, 1999.
- 32) Williamson JW, McColl R, Mathews D, Mitchell JH, Raven PB, Morgan WP: Brain activation by central command during actual and imagined handgrip under hypnosis. *J Physiol*, 92(3): 1317-1324, 2002.
- 33) Williamson JW, McColl R, Mathews D: Evidence for central command activation of the human insular cortex during exercise. *Appl Physiol*, 94(5): 1726-1734, 2003.
- 34) Rizzolatti G, Matelli M: Two different streams form the dorsal visual system: anatomy and functions. *Exp Brain Res*, 153(2): 146-157, 2003.
- 35) Blatt GJ, Andersen RA, G R StonerGR: Visual receptive field organization and cortico-cortical connections of the lateral intraparietal area (area LIP) in the macaque. *J Comp Neurol*, 153(2): 146-157, 2003.
- 36) Kravitz DJ, Saleem KS, Baker CI, Mishkin M: A new neural framework for visuospatial processing. *Nat Rev Neurosci*, 12(4): 217-230, 2011.
- 37) Farrer C, Frith CD: Experiencing oneself vs another person as being the cause of an action: the neural correlates of the experience of agency. *Neuroimage*, 15: 596-603. 2002.
- 38) Farrer C, Franck N, Georgieff N, Frith, CD, Decety J, Jeannerod M: Modulating the experience of agency: a positron emission tomography study. *Neuroimage*, 18: 324-333, 2003.
- 39) David P, Woodruff G: Does the chimpanzee have a theory of mind ?". *Behav Brain Res*, 1(4): 515-526, 1978.
- 40) Schurz M, Tholen MG, Perner J, Mars RB, Sallet J: Specifying the brain anatomy underlying temporo-parietal junction activations for theory of mind—A review using probabilistic atlases from different imaging modalities. *Hum Brain Mapp*, 38(9): 4788-4805, 2017.
- 41) Saxe R, Kanwisher N: People thinking about thinking people—The role of the temporo-parietal junction in "theory of mind". *Neuroimage*, 19(4): 1835-1842, 2003.
- 42) Saxe R, Wexler A: Making sense of another mind—the role of the right temporo-parietal junction. *Neuropsychologia*, 43(10): 1391-1399, 2005.
- 43) Bitsch F, Berger P, Nagels A, Falkenberg I, Straube B: The role of the right temporo-parietal junction in social decision-making. *Hum Brain Mapp*, 39(7): 3072-3085, 2018.
- 44) Abe MO, Koike T, Okazaki S, Sugawara SK, Takahashi K, Watanabe K, Sadato N: Neural correlates of online cooperation during joint force production. *Neuroimage*, 191: 150-161, 2019.
- 45) Fukuda H, Ma N, Suzuki S, Harasawa N, Ueno K, Gardner JL, Ichinohe N, Haruno M, Cheng K, Nakahara H: Computing Social Value Conversion in the Human Brain. *J Neurosci*, 39(26): 5153-5172, 2019.
- 47) Roland PE, Larsen B, Lassen NA, Skinhøj E: Supplementary motor area and other cortical areas in organization of voluntary movements in man. *J Neurophysiol*, 43(1): 118-36, 1980.
- 48) 福永篤志 : 後出し負けじゃんけん時の補足運動野の役割. *高次脳機能研究*, 25: 242-250,

- 2005.
- 49) 丹治 順：補足運動野と手の運動の順序制御。神経進歩, 42: 29–38, 1998.
- 50) Shibasaki H, Sadato N, Lyshkow H, Yonekura Y, Honda M, Nagamine T, Suwazono S, Magata Y, Ikeda A, Miyazaki M, Fukuyama H, Asato R, Konishi J: Both primary motor cortex and supplementary motor area play an important role in complex finger movement. *Brain*, 116: 1387–1398, 1993.
- 51) Kawashima R, Matsumura M, Sadato N, Naito E, Waki A, Nakamura S, Matsunami K, Fukuda H, Yonekura Y: Regional cerebral blood flow changes in human brain related to ipsilateral and contralateral complex hand movements—a PET study. *J Neurosci*, 10: 2254–2260, 1998.
- 52) Üstün S, Ayyıldız N, Kale EH, Çalışır ÖM, Uran P, Öner Ö, Olkun S, Çiçek M: Children With Dyscalculia Show Hippocampal Hyperactivity During Symbolic Number Perception. *Front Hum Neurosci*, 15: 687476, 2021.
- 53) Dong M, Wang M, Zheng H, Zhang J, Dong GH: The functional connectivity between the prefrontal cortex and supplementary motor area moderates the relationship between internet gaming disorder and loneliness. *Progress in Neuro-Psychopharmacology and Biological Psychiatry*, 108:110154,
- 54) 牧野均, 生駒一憲：利き足と非利き足の運動イメージ生成に関する脳活動の相違に関して。北海道文教大学研究紀要, 42: 13–29, 2017.
- 55) 小林比出代：利き手・非利き手の違いによる書字活動時での脳血液動態の差異。信州大学教育学部研究論集, 16: 63–73, 2022.
- 56) Kirimoto H, Tamaki H, Onishi H: Difference in Cortical Relay Time Between Intrinsic Muscles of Dominant and Nondominant Hands. *J Mot Behav*, 49(4): 467–475, 2017.
- 57) NeuroImaging Tools & Resources Collaboratory : WFU_PickAtlas, https://www.nitrc.org/projects/wfu_pickatlas/ (最終アクセス日 : 2023年10月15日)
- 58) NeuroImaging Tools & Resources Collaboratory : Talairach Client, <http://www.talairach.org/client.html> (最終アクセス日 : 2023年10月15日)

Playing Rock-Paper-Scissors with non-dominant Toes Activates Left DLPFC, Right Posterior Insular Cortical Region, Right Angular Gyrus, and Right Supplementary Motor Area.

MAKINO Hitoshi and IKOMA Katsunori

Abstract: In this study, we conducted fMRI measurements using a rock-paper-scissors game with delayed outcome involving cognitive conflict to compare the difference in cognitive function between the dominant and non-dominant toes at the cortical level. The subjects were 10 right-handed men and women. As a result of multiple corrections, the left dorsolateral prefrontal cortex, right posterior insular cortical region, right angular gyrus, and right supplementary motor area were significantly activated when performing the rock-paper-scissors game with the non-dominant toes compared to the game with the dominant toes. These areas are thought to work together when performing a motor task involving high cognitive conflict with the non-dominant toes. This suggests that even if either side of the brain is damaged, movements involving motor tasks or cognitive tasks become difficult. In other words, if the left anterior cerebral artery region is damaged, movements involving motor tasks or cognitive tasks including the left lower limb become difficult, and if the right middle cerebral artery region is damaged, movements involving motor tasks or cognitive tasks including the left lower limb become difficult. Therefore, it is necessary to reconsider the treatment of fine movements of the toes during walking and switching the dominant foot.

Keywords: Rock-paper-scissors with non-dominant toes, the left dorsolateral prefrontal cortex, the right posterior parietal cortex, the right angular gyrus, the right supplementary motor area