プロボクサーの試合前後における脳密度変化と脳ネットワーク解析：スポーツ脳科学研究

群馬大学大学院　荻　野　祐　一
（共同研究者）同　川　道　拓　東
同　齋　藤　　繁
帝京大学大学院　古　井　　滋

Sports Brain Science: Structural and Functional Analysis Before and After Match in Professional Boxers

by

Yuichi Ogino,
Hiroaki Kawamichi, Shigeru Saito
Department of Anesthesiology,
Gunma University Graduate School of Medicine
Shigeru Furui
Department of Radiology,
Teikyo University School of Medicine

ABSTRACT

Over months, prior to the weigh-in（24h before the match）, professional boxers（Boxers）typically keep training and reduce their body mass empirically to gain a strength/size advantage over opponents. Using voxel-based morphometry（VBM）, resting-state functional magnetic resonance imaging（rs-fMRI）, we included twenty male licensed Boxers（26.7±4.0years）in the time point of one-month before match（Term1, mean body mass index [BMI]: 22.0±1.3）in comparison to seventeen age-sex-BMI matched controls（27.8±3.7years, BMI: 21.5±1.6）. Then we longitudinally

followed the Boxers at the time point of within-one week before the match（Term2, BMI: 20.6±1.3）and one-month after the match（Term3, BMI: 22.4±1.3）. In Term1, Boxers presented significant higher gray matter density compared to controls, in bilateral anterior insula（AI）（left: p<0.001; right p=0.023）, cluster level FWE [family wise error] corrected）, generally representing sensory integration. In Time2 and Time3, Boxers' posterior cingulate cortex represented correlated gray matter densities with BMI change. In rs-fMRI analysis seeding the AI clusters, significantly lower FC were found with precuneus（p=0.031）in Boxers. No significant FC were found in Term3. These findings suggest the bilateral AI represented specific structurer in Boxers, and the posterior cingulate cortex represented BMI change before and after the match. Because the posterior cingulate cortex has the pivotal role in adopting for the surrounding environments, the functional plasticity in Boxers that lower connectivity in precuneus which is a part of posterior cingulate cortex, suggests their specificity that they have to reduce their weight regardless of their environments.

要　旨

ボクシングは体重階級のあるスポーツであり，選手は経験的に試合前に急激な減量を行う．それは常人の減量のような倫理的ハードルを越え，人間生理の限界状態を体現している．しかし，科学的根拠は薄弱で，脳における構造と機能の動態も明らかではない．我々は職業的ボクシング選手（プロボクサー）20 人と，年齢－性別－ BMI（body mass index）を合わせた健常者 Control の 17 人を対象に，頭部 MRI を撮影し，Voxel-Based Morphometry（VBM）解析と resting-state functional MRI（rs-fMRI）解析を施行し，それぞれ脳灰白質密度と機能的結合を比較した．プロボクサーにおいては，試合 1 ヵ月前（Time1）から試合直前（Time2），試合後 1 ヵ月（Time3）の時系列を追って縦断的動態を追った．その結果，健康被験者と比較して，ボクサー（Time1）は両側島前部が大きかった．また，BMI 変化率（%）に後帯状回サイズとの相関が Time2 と Time3 で観察された．機能的には，Time1 時点で，島部と楔前部（けつぜんぶ）の機能的結合が Control よりボクサーで低かった．島はあらゆる感覚情報の統合中枢であり，後帯状回・喫状部は環境モニタリングに関する中枢である．日頃の鍛錬によるトップアスリート特有の脳構造は島にあり，減量による構造変化は後帯状回に表象された．島と後帯状回の機能的結合性は，ボクサーで低かったことから，プロボクサー達は，それぞれの環境適応とは関係なく，運動感覚統合を発達させ減量を行っているものと示唆する．

緒　言

脳可塑性はヒトの脳が本来的に持ち合わせている性質である．脳可塑性は，内的・外的環境に合わせて，脳の解剖学的構造と機能に及ぶ性質で，構造が変われば機能が変化し，その逆に，機能が変化すれば構造も変化するというように，お互いが影響し合っている[1)]．特に，トップアスリートのように，何年にもわたるトレーニングの末，得意な能力を持ち合わせたスポーツ選手の脳で，どのような脳可塑性を表象しているのかは，ヒト神

経科学分野で急速な関心を集めている[2]．しかし，ボクシングにおいては，その競技の性質からか，慢性外傷性脳障害や認知障害に関する研究はあるものの，ボクシング特異的な脳構造や機能について調べた研究はない．

ボクシングは体重階級のある競技であり，選手達は，日頃のトレーニングに加え，およそ試合1ヵ月前から，試合24時間前の計量をめがけて，本格的に減量を始める．減量をする理由は，厳しい基準体重をクリアし，相手よりも大きい体で闘うためとされるが，科学的根拠に乏しく，経験則に基づいている．我々は，先行研究[3]において，健康被験者の24時間の絶飲絶食が，感覚刺激（痛覚刺激）が脳活動に及ぼす影響を報告したが，倫理的ハードルにより，平均640gの減量による効果しか見ることが出来なかった．

しかし，プロフェッショナルボクシング選手（プロボクサー）における試合前の減量調整であれば，ヒト運動生理の限界状態を体現していると言える．試合前の減量とトレーニングにより，心身を極限状態におき，試合後は一気に弛緩し，普段の体重に戻る．つまり，試合前後の月単位の時間軸で，脳内神経変性が惹起されると考えられる．その神経変性は，個々の領域における変化に加え，領域間の相互作用に基づく統合的な変化（ネットワーク変化）も影響を与えていると考えられるので，機能的結合（connectivity）に関わる解析の必要性も増している．

本研究では，プロボクサーの試合1ヵ月前（Time1），試合直前（Time2），試合から1ヵ月後（Time3）の3つの時系列でプロボクサーの頭部脳磁気共鳴画像（MRI: magnetic resonance imaging）を取得し，試合周期の脳構造と機能変化を観察する．同時に，Time1におけるボクサーと年齢・性別・BMI [Body mass Index: 体重（Kg）/身長（m）^{2}] を合わせた健康被験者の頭部MRIも取得し，比較することによって，プロボクサー特異的な脳構造と機能を調査する．さらに，プロボクサーの試合前の減量が脳構造と機能にどのような影響を与え，どのような科学的意義を有するのか，を明らかにすることが本研究の目的である．

1．研究方法

本研究は，倫理性の担保および被験者の安全性確保のために，臨床試験審査委員会（倫理委員会）の審査を受け，公的研究情報ネットワークに登録（UMIN000017635）したのち開始した．プロボクサー20人（全員男性，26.8±4.1才）は，全員日本プロボクシングコミッション（JCB）のボクサーライセンスを取得した，試合を予定している選手が登録された．プロボクサーは，試合1ヵ月前（Time1），試合直前（試合前1週間以内）（Time2），試合から1ヵ月後（Time3）と縦断的に頭部MRI撮影した（帝京大学病院放射線科に設置の3T scanner（MAGNETOM Skyra; ドイツ国Siemens社製）．Control群として，Time1のプロボクサーに年齢・性別・BMIをマッチングさせた健康被験者17人（27.8±3.7才，BMI：21.5±1.6）は，公募により登録され，一度のみ頭部MRI撮影を，同MRIを用いて実施した．全ての被験者は書面による同意を得た後，金銭的報酬を受けている．拘束時間は身体測定とMRI撮影（30分）を含めて45分ほどであった．プロボクサーの試合結果は7段階で評価を行った（KO/TKO勝ち（5R以内）：7; KO/TKO勝ち（6R以降）：6; 判定勝ち：5; 引き分け：4; 判定負け：3; KO/TKO負け（6R以降）：2; KO/TKO負け（5R以内）：1）．Dataは平均 ± 標準偏差で示している．

1．1　構造画像取得とVBM（Voxel-based morphometry）解析

全脳を含む，magnetization prepared rapid acquisition gradient echo（MP-RAGE）を用いた，高解像度T1強調画像（TE=2.28 ms; TR=2,300

ms; FOV=256mm×256mm; FA=9°; matrix size=1×1×1mm; and slice thickness=1mm; slice numbers=240 coronal slices）を取得した．解析は，SPM（Statistical Parametric Mapping）8 revision 4667（Wellcome Department of Cognitive Neurology, UK, implemented in Matlab 2013a, Math Works, Inc.）を使用し，各被験者の画像は，配置計算（Realign，Slice timing），非線形の空間的標準化（Coregister, Normalization）を経て，8mm FWHM の Gaussian kernel に平滑化（Smoothing）を施された．そののち，2nd level アナリシスとして two-sample t-test を，年齢の影響を排除して（年齢を effects of no interest として）群間比較を行った．結果２．２探索的全脳解析以外，次の機能的結合性解析（１．２）を含めて，統計の閾値は“uncorrected p<0.001 at voxel level and FWE corrected p<0.05 at cluster level”で統一した．

１．２　機能的結合性解析（rs-fMRI: resting-state functional MRI）

EPI（Echo Planar Imaging）画像（TE=30 ms; TR=2,500 ms; FOV=212×212mm2; FA=80°; matrix size=3.31×3.31×4mm; 40 slices; slice thickness=3.2mm; total number of volumes=150）を取得し，最初の４枚は磁場が不安定なので解析対象から排除した．個々人の構造画像に合わせて同様の processing を行ったのち，機能的結合性（functional connectivity）解析を SPM8 上で構築される CONN toolbox（version 15.h）を用いて施行した．これにより VBM 解析の結果で得られた両側の島前部 / 下眼窩前頭野を起点（Seed）とした，全頭の voxel の時系列 Data と Pearson 相関する領域を検出する, Seed-based 解析を施行した．

２．結　果

プロボクサーの BMI は Time1: 22.0±1.3kg, Time2: 20.6±1.3kg，Time3: 22.4±1.3kg と Time2（試合前１週間以内）の BMI が有意に減少した（p<0.0001 in repeated measures ANOVA, Bonferroni 補正を post-hoc 解析として用いた）．Time1 から Time2 にかけての減量（BMI 減少量）は -1.4±0.66 であった．BMI 減少量と試合結果は無関係であった（スピアマンの順位相関係数＝-0.09）．

２．１　Cross-sectional にプロボクサー（Time1）と Age-sex-BMI-matched Control 群を比べた場合，プロボクサーにおいて，両側の島前部 / 下眼窩前頭野（AI [Anterior Insula]/IOFC [Inferior Orbitofrontal Cortex]）の灰白質密度がより大きい（left p<0.001; right p=0.023）（図１）．

２．２　探索的全脳解析では，試合直前期（Time2）にほぼ全脳が有意に脳灰白質密度の減少（contrast [Time1+Time3>2×Time2]）（図２）（統計閾値を，全脳において voxel level FWE（Family wise error）p<0.05 と設置）．

２．３　Time2 と Time3 における後帯状回の灰白質密度が，BMI 変化（％）に相関（T2: cluster p=0.015; T3: cluster p=0.0182）（図３）．

２．４　減量程度（BMI 変化）と試合結果（7 段階評価）に相関は見当たらなかった（スピアマンの順位相関係数＝-0.09）．

２．５　機能的結合性解析（rs-fMRI）（２．１で得られた left AI cluster を seed とした）において，Time1 の時点で，楔前部（けつぜんぶ）の機能的結合が，プロボクサーでは Control より低下していた（図４）．

３．考　察

我々はプロボクサー特異的な脳構造と機能的結

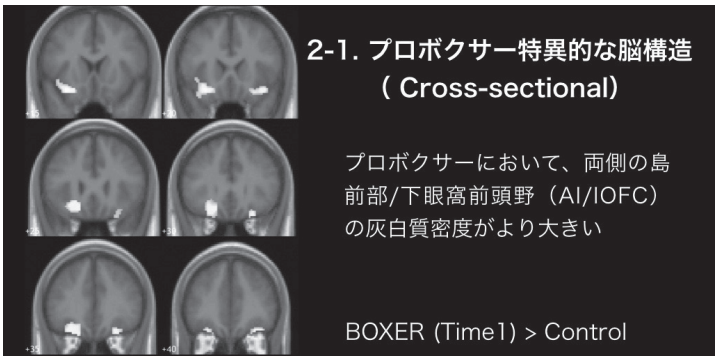

図1　（結果2-1）プロボクサー特異的な脳構造として，両側の島前部／下眼窩前頭野（AI/IOFC）の灰白質密度が，コントロール群より有意に大きかった．統計閾値は（結果2-2の探索的全脳解析以外）“uncorrected p<0.05 at cluster level”で統一した．A I: Anterior insula ; IOFC : Inferior orbitofrontal cortex.

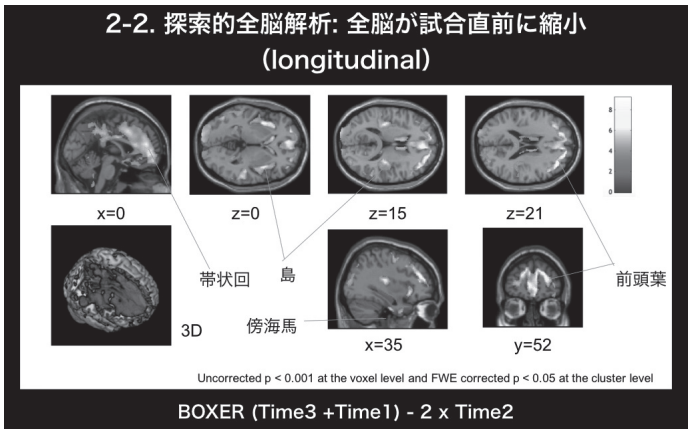

図2　（結果2-2）探索的全脳解析を施行〔統計閾値をvoxel level FEW（Family wise error）P<0.05と設置．Time2における，ほぼ全脳領域に渡る灰白質密度の縮小が認められた．

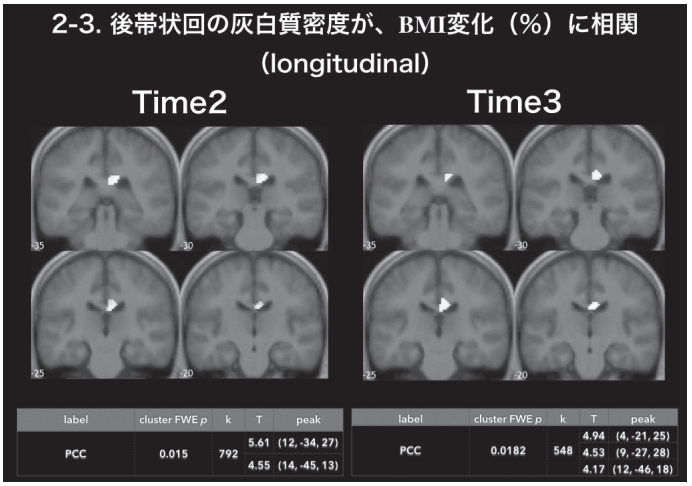

図3　（結果2-3）Time2とTime3における後帯状回の灰白質密度が，BMI変化（%）に相関（T2 : cluster P=0.015 ; T3 cluster P=0.0182）を示した．

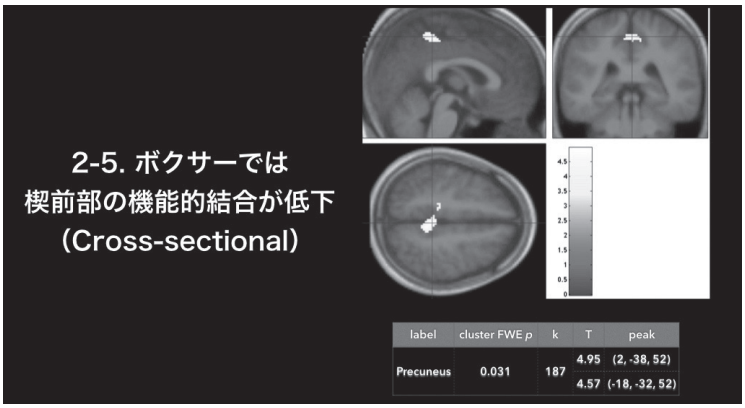

図4　（結果2-5）機能的結合性解析（rs-fMRIにおいて，Time1の時点で，島前部／下眼窩前頭野（AI/IOFC）と楔前部（けつぜんぶ）の機能的結合が，プロボクサーにおいて，低下が観察された．

合性を調査し，それらの試合周期における変化と減量の関係を調べた．その結果，プロボクサーでは，感覚統合を担う島（とう）皮質領域に有意な灰白質密度の増加が観察された．また縦断的には，試合直前と試合後１ヵ月において，後帯状回の灰白質密度がBMI変化率に相関して変化した．また，機能的結合性解析では，プロボクサーにおいて，後帯状回の一部分である楔前部（precuneus）と島の結合性が低下していた．島の灰白質密度増加は，エリートアスリートとして日々研鑽を積んでいるプロボクサーの特異的脳構造を表象し，“大脳ハブ（cortical hub）”[4] とも呼ばれる後帯状回がBMI変化に応じた構造変化を示す．機能的には，プロボクサーにおいて，楔前部と島の結合性が弱まっていることから，急激な環境変化にかかわらず，減量を敢行することが出来るプロボクサーの特異性を考察する．

スポーツ種目によって，要求される運動，認知能力は異なり，脳可塑性も種目によって異なってくる[5]．ボクシングは，唯一，合法的に相手の急性脳震盪を常に狙う格闘スポーツであり，身体的な持久力だけでなく，特異的な運動パターンと認知，感覚が要求される．一般的に大脳皮質密度・体積は欲求される能力に関連した増減を示すことが多く，細胞もしくはグリアレベルの神経増生・萎縮によるものとされている[1]．したがって，プロボクサー特異的な脳構造と機能的結合性が発達するであろうと容易に予想できる．なかでも島は，感覚－運動協調（sensory-motor coordination），運動技術学習（motor-skill learning）において枢要な役割を果たしている[6]．

探索的全脳解析において，ほぼ全脳において試合直前（Time2）に灰白質密度が減少したが，減量によるもの特に脱水による変化が推察される[7]．なかでも後帯状回は，有意にBMI変化率との相関を示した．後帯状回は，内側前頭前野と下頭頂葉とともに，default mode networkと呼ばれる意識や記憶・認知機能，情報統合，種々の精神機能との関連ネットワークの一部であり，環境変化に敏感に反応するハブ（Hub）としての機能を有している[4]．したがって，試合前後（Time2とTime3）に，後帯状回にBMI変化率に応じた構造変化をもたらすことは極めて合理的な表象と言える．

一方，横断的（Cross-sectional）調査における機能的結合性解析では，島をseedと後帯状回の一部分である楔前部との結合性低下がプロボクサーに見られた．このことは，プロボクサーの特

異性として，環境に依らず，厳しい減量を敢行することが出来る特性の表象かもしれない．

4. まとめ

プロボクサーの特異的脳可塑性として，感覚統合を担う島皮質領域の灰白質密度の増加，BMI 変化率に応じた辺縁系の中核的領域である後帯状回に構造変化が見られ，運動－感覚協調と激しい体重変化への環境適応が示唆された．島を seed とした機能的結合性解析では，プロボクサーにおいて，楔前部との結合性低下がみられ，プロボクサーの特異性として，環境変化によらない減量敢行という特性が示唆された．プロボクサー特異的な脳構造と機能，その減量との関係は，プロボクサー特異的な脳可塑性を示している．

謝　辞

本研究に対して助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に深く感謝いたします．研究原案と被験者募集に関わった滝沢大介先生（フレアボクシングジム取締役代表，三鷹市），被験者としてご協力頂きましたプロボクサーの皆様と健康被験者の皆様，MRI 撮影にご協力してくださった帝京大学附属病院放射線部，技師の皆様，この場をお借りして，深く感謝いたします．

文　献

1）May A., Experience-dependent structural plasticity in the adult human brain, *Trends in Cognitive Sciences*, 15, 475-82（2011）
2）Yarrow K., Brown P., Krakauer J.W., Inside the brain of an elite athlete: the neural processes that support high achievement in sports, *Nat. Rev. Neurosci*., 10: 585-96（2009）
3）Dehydration enhances pain-evoked activation in the human brain compared with rehydration. Ogino Y, Kakeda T., Nakamura K., Saito S., *Anesthesia & Analgesia*, 118: 1317-1325（2014）
4）Leech R., Sharp D.J., The role of the posterior cingulate cortex in cognition and disease. *Brain*, 137（Pt 1）:12-32. Review（2014）
5）Nakata H., Yoshie M., Miura A., Kudo K., Characteristics of the athletes'brain: evidence from neurophysiology and neuroimaging, *Brain Res. Rev*., 62: 197-211（2010）
6）Peters J., Dauvermann M., Mette C., Platen P., Franke J., Hinrichs T., Daum I., Voxel-based morphometry reveals an association between aerobic capacity and grey matter density in the right anterior insula, *Neuroscience*, 163: 1102-8（2009）
7）Streitbürger D.P., Möller H.E., Tittgemeyer M., Hund-Geargiadis M., Schroeter M.L., Mueller K., Investigeting brain change of dehydration using voxel-based morphometry, *PLoSOne*., 7: e44195（2012）