

PET によるこころの研究

2004年3月13日発行本「潜在能力の科学」からの転載
肩書き等は当時のものです。

第3章 PET によるこころの研究

東北大学サイクロトロンRIセンター核医学研究部
教授 伊藤 正敏 医学博士

脳機能の画像化法を研究しているうちに、瞑想法等のアジアの精神的財産を科学技術で研究することが日本の研究所の役割と考え、気功、ヨガ等の脳に対する効果を画像化することを開始した。

2000-2002年度山本幹男博士が主宰する科学技術振興事業団の「新パラダイム創成に向けての試行的研究プログラム」に参加。

国際総合研究機構（*IRI*）の東北支部を分担している。

〒981-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉
電話：022-217-7801 FAX：022-217-3485
E-mail：itom@cyclic.tohoku.ac.jp

1 こころと脳

世界保健機構（WHO）は、1998年憲章の中で健康を“Health is a dynamic state of complete physical, mental, spiritual and social well-being and not merely the absence of disease or infirmity.”つまり、「健康は、身体、こころ、魂、及び社会的に良い状態であって、単に病気に罹っていないことではない」と定義した。人間の要素を身体、こころ、魂、及び社会的存在と表現したのである。しかし、こころと魂とは、何であるかを皆が認める定義は、存在しない。こころの要素は、「知・情・意」と表現されることもある。漢字を見ると、この3要素の中で「情」と「意」には、文字の構成要素に「心」を持っているが、「知」には、ない。漢字を作り出した昔の中国人は、こころの基本要素は、情と意であると考えていたことがわかる。知は、感覚と認知、記憶などで後天的に獲得したものである。これらは、こころの本質ではなくこころを修飾する要素である。P.マックリーンは、人間の脳が三層構造を基本にして、それぞれが重要な役割を果たしているという観点から、Triune theory（三位一体説）を提唱した¹⁾。三位一体とは、キリスト教の教義で神が「聖霊、父、子」の三つの姿を持っていることをさす。マックリーンは、脳の最も深層に反射脳があり、それを囲んで辺縁脳が、最上層に理性脳があるとした。同時に、これらの抽象的分類に形態的脳構造を割り振った。即ち、大脳基底核を頂点とし、中脳、脳幹以下を含む反射脳、これは、攻撃、退避を主体とする思考を伴わない原始的な神経機構で本能や原始的な学習と記憶に基づいた型にはまった行動を発生する。爬虫類がこの段階にとどまることから、爬虫類脳、または、R-複合体と呼んだ。次に、反射脳を縁取る辺縁脳、これは、情動や内

2004年3月13日発行本「潜在能力の科学」からの転載
肩書き等は当時のものです。

臓神経を制御する部分で、扁桃体、海馬の一部、視床下部を含む大脳辺縁系に相当する。最後に、哺乳類で発達した大脳新皮質が辺縁脳を覆い、これを新哺乳類脳、または、理性脳と呼んだ。

2 意識とこころ

意識とこころとは同義ではないが、意識はこころの重要な要素である。フロイト及びユング以来、意識には、我々が通常、知ることがない、ないしは、特殊な状況（例えば、夢）でのみ知ることができる隠れた部分（意識下）があることが知られていた。我々が認知する感覚は、理性脳に届くことで意識される。辺縁脳のはたらきも喜びや悲しみなどの感情として意識できるが、好きとか嫌いとかのようにどうしてなのか説明ができなかったり、意識的にこれらの感情を変えることができないことが多い。つまり、辺縁脳の一部は意識の範囲にあるが、一部は、意識下にある。まして、反射脳は、意識の届かない世界である。我々が意識する脳活動は、脳の働きのほんの一部であり、意識下の脳は、広大で我々が知らない、または、利用していない能力があるのである。睡眠は、脳が休息する時間であるが、最近の計測によれば、睡眠中であっても、脳血流は、30%程度しか低下しない。つまり、意識に関与する脳は、30%程度しかないのである。従って、意識下の脳は、非常に重要である。これを活用することで、よりよく生きられるし、もっと大きな力を得ることができる。その例が潜在能力である。潜在能力とは、顕在化していない、すなわち、本人でさえも持っていることを意識していない力のことを意味している。しかし、潜在能力は、必ずしも稀な現象ではない。筋肉を例にとると、通常、最大筋力が発揮できないようにリミターが存

2004年3月13日発行本「潜在能力の科学」からの転載
肩書き等は当時のものです。

在している。また、緊張等の心理的要因により筋の作業は、制限を受ける。このような制限が取り除かれたとき、予想もしない力を発揮することがある。「火事場の馬鹿ちから」とは、そのようなことを言うのである。我々は、潜在能力の発揮に関係すると予想される意識下の脳活動を脳機能画像法（PET）を用いて画像として捉えることを試みている。

3 脳画像診断法の進歩

1979年に Godfrey N. Hounsfield により X 線 CT（コンピュータ断層法）が開発された。これは、X 線を細いビームにして脳を通過させることにより、脳の各部分の X 線吸収を計算し、結果を画像化することである。今までの X 線をフィルムに当てて感光させる技術に変わり、X 線をデジタル化しコンピュータで処理させる方法である。この結果、造影剤を使うことなしに脳の内部を初めて画像化することに成功したのである。Hounsfield は、この業績によりノーベル医学生理学賞を授与された。以来、脳画像化技術は、格段の進歩を遂げてきた。特に、最近のハイテク脳画像化技術により、1 ミリ以下の解像力で生きている人の脳の精細な構造を見ることができるようになった。また、脳機能の画像化技術も進歩して、脳の活動自体を三次元的に観察可能となってきた。何らかの活動を行なうと、これに関係する脳部位が、コンピューター・スクリーンの上に現れてくるのである。特定の感覚や運動にかかわる脳部位は、これらの画像化技術により比較的容易に同定される。このような画像化技術の研究対象は、次第に情動に拡がり、とうとう、曖昧模糊としているところを画像として脳の解剖図の上に浮かび上がらせることを模索している。このような画像化技術の研究対象は、感覚や運動、言語、

2004年3月13日発行本「潜在能力の科学」からの転載
肩書き等は当時のものです。

記憶などであったが、最近では、我々の感情に関連する脳部位の画像化が試みられてきている。感情は、意識と並んでこころの重要な要素であるので、こころの一部を覗く試みが始まったといっただけであろう。極端に言えば、心理学を始め、宗教、哲学という形而上の問題が、形而下にある脳画像技術と接点を持ち、その間にトンネルが開こうとしている。もちろん、このような技術によるこころの全解明は、おそらく不可能とは思われるが、こころの部分部分をひとつひとつ記録する価値はあると思われる。

4 PET

PET（ポジトロン断層法）とは、血流、ないしは、代謝を介して測定を目的とする臓器に滞留する薬剤を放射性同位元素で標識（トレーサー化）して、この体内動態を画像化し、トレーサーの動態でもって臓器の機能を測定するものである。我々は、ブドウ糖を半減期 2 分の短寿命放射性核種である ^{18}F （物理的半減期 110 分）を用いて標識した [^{18}F]デオキシ・グルコース（FDG）をトレーサーとして、その脳内集積を指標として脳活動の検出を企画した。この方法を FDG-PET 法と略す。脳におけるエネルギー取り出しがブドウ糖に依存している関係で、FDG の脳内集積は、脳局所におけるエネルギー消費、即ち、脳活動、より厳密な意味では、神経シナプスでの活動（情報伝達）量に比例することが知られている。近年、英国の Friston K.らにより開発された統計的画像解析法（SPM）技術を利用すると脳の活動部位を三次元的に同定できるようになっている²⁻³。なんらかの課題遂行状態と安静時で別々の PET 画像を撮影し、二つの状態での画像間に統計的な判定を加

2004年3月13日発行本「潜在能力の科学」からの転載
肩書き等は当時のものです。

えることにより活動部位を明らかにするものである。このため、個々の被検者の脳画像を標準アトラスにのっとった標準画像に変形させる技術(3D-warping)が開発された。この結果、脳の高次機能の研究が加速度的に発展してきている。脳におけるエネルギーの取り出しは、ほぼ、ブドウ糖を介してのものであるので、PET によってブドウ糖の消費量を画像化することにより脳の機能レベルを評価することができる。

5 脳活動の抽出法の実際

PET で用いる放射性トレーサーは、 ^{18}F を用いて標識したブドウ糖 (FDG) と ^{15}O を用いて標識した注射水を用いての脳血流の測定が一般に用いられる。脳活動の検出は、刺激負荷の際の脳画像と対照の脳画像間での画素毎の統計的検定により行った。これは、以下の手順からなる。

- 1) 形態的脳標準化。これは、画像間演算が可能となるように個々人の脳画像を基準画像にあわせるものである。基準画像は、左右の脳を結ぶ繊維束である前交連と後交連を基準点（前者を原点とする）として、右、前、頭頂を正の方向とする座標系であり、脳外科領域での三次元定位脳手術に使用されている。基準画像は、Talairach⁴⁾らの提案を元に、多数の正常人PET画像を平均化することにより作成され、SPM9に収載されている³⁾。この基準画像に対して個々人の脳画像を三次元アフィン変換(数学的な画像変換技術)により変形する²⁾、最後に、基準画像との微妙な差異を補正する目的で非線形のマッピングを行なう。
- 2) 機能的脳標準化。PET脳画像は、投与されたFDGの脳内集積を

2004年3月13日発行本「潜在能力の科学」からの転載
肩書き等は当時のものです。

放射能として計数したものである。従って、投与放射能、被検者の体格、腎機能等の影響を受ける。計数のバラツキは、統計計算に影響を及ぼすことから、全脳計数が一定の値、例えば100となるよう線形に補正する。

統計的検定は、student の t 検定（ある状態で得られた値と他の状態で得られた値の間の差を偶然で説明するべきか本当に差があるといえるかを判断するための統計的手法のひとつ）を用いて画素毎に差が有意とみなせるかを検定する。有意水準は、原則として0.001としている。

6 感情と脳

神経の主たる機能は、異なる細胞間の情報の伝達である。細胞間の情報伝達は、（1）細胞と細胞が接触することで、（2）ホルモン等の液性因子を血液中に放出することで行われる。（1）の亜形として細胞の一部が線維を形成して遠くの他の細胞に接触するものが神経である。ホルモンとは異なり、情報を伝える細胞が明確となること、情報伝達速度が速いことが特徴である。このような神経連絡が複数の細胞間で結ばれたとき、結ばれている細胞群が、一つの機能単位として働くことになる。

神経系の最も単純なものが反射回路である。例えば、熱いものに手が触れたとき、熱いと思う前に手が動く。これが反射で、脳が関与することはない。次に複雑な過程は条件反射である。バブロフがイヌに胃瘻を作って実験したところ、食べ物を見せるとイヌの胃から胃液が流れることを発見した。これは、視覚という神経系と胃液を流す自律神経系が結合した条件反射である。

2004年3月13日発行本「潜在能力の科学」からの転載
肩書き等は当時のものです。

反射は、概して単純なものである。食べ物に飛びかかったり、危険物から逃げる。動物の中には、これだけで生きているものが多い。「飛んで火にいる夏の虫」といわれるように昆虫は、火の色を見て飛び込んで行く。このような反射的反應や呼吸、循環等の制御は、高等動物では脊髄から中脳にかけて行われる。これらの脳が、反射脳または、自律脳と呼ばれている由縁である。魚類や爬虫類では、大脳が未発達で、最高位中枢は、大脳基底核である。

このような反射を主体とした単純行動は、生存にかならずしも有利とはいえない。前述のように火に飛び込んだり、わなに簡単にかかってしまうのである。そこで、反射行動を遅らせたり、時に止めさせる機構が付け加わった。得られた情報を解釈し、自己の生存に適した信号は、快、喜びと感じ、反対の情報は、不快と感じる仕組みである。不快が長く続いたり、非常に強い場合、悲しみとなり、更に続くとうつになる。このように、反射脳が得た情報の性状や、反射脳の反應を修飾する（強めたり止めたりする）脳内機構として上位の機構が発達してきた。このような作業が感情の基本である。このように解釈すると、感情の坐は、マックリン・モデルから自ずと決定される。つまり、反射脳を取り囲む脳、すなわち、大脳辺縁系である。

大脳辺縁系とは、脳の内部から底部にまたがる比較的広い領域で、主な構造に海馬・歯状回・帯状回（前部）・扁桃核・梨状葉・中隔部などがある。また、島・前障・側坐核・帯状回（後部）・視床の一部・視床下部（とくに乳頭体）上側頭回などは、旁辺縁系領域と呼ばれ、辺縁系と密接に結合している。

扁桃核は、側頭葉の深部前方にある胡桃のような構造で、身体に対する危険を感知する部位でもある。ここが刺激されると動物では、恐怖や不安を感じ、逃げるか戦うかのどちらかの行動を選択する。海馬は、

PET によるこころの研究

2004年3月13日発行本「潜在能力の科学」からの転載
肩書き等は当時のものです。

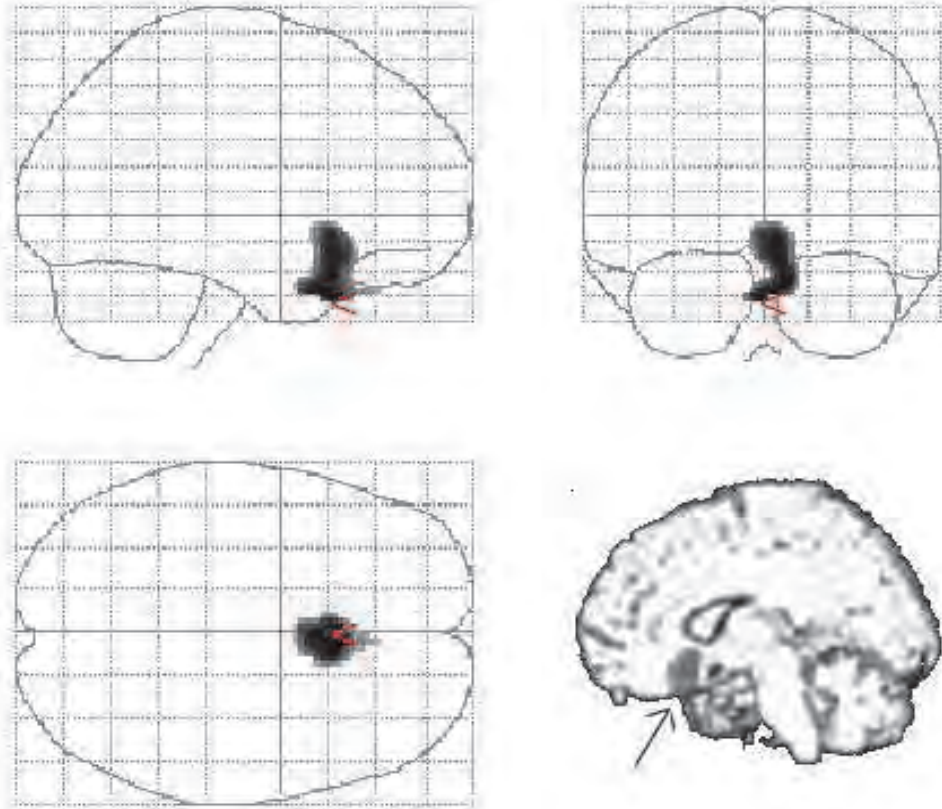


図1 うつ症状と相関して機能が低下した脳部位

機能低下部位を左右、前後、上下方向の投影図、及び、大脳内側面画像の上に示す。

記憶を強化するのに重要な役割を果たし、視床下部は、快、不快、笑いなどに関係するとともに、下垂体を介して全身の内分泌環境を調節する。

前部帯状回、内側前頭葉、視床は、悲しみと関係している。また、辺縁系の一部である梁下野は、うつ病と関係があるとされる。躁と鬱の2相性の患者ではこの部位の活動が亢進し、うつ病では、機能低下が見られるという。うつと密接に関係した脳部位を図1に示す。

一方、喜びに関係した脳内ネットワークを報酬系と呼ぶ。Oldsは、ラットの中隔野という正中部にある大脳辺縁系の一領域に電極を刺すとラットがいつまでもレバーを押して、自己の脳に電流を流しつづけることを見出した。これが脳内自己刺激行動で、中脳の腹側被蓋野(VTA)

PET によるこころの研究

2004年3月13日発行本「潜在能力の科学」からの転載
肩書き等は当時のものです。

からの大脳基底部の側坐核への投射神経が関係している。麻薬様物質であるエンケファリンを VTA に注入したり、アンフェタミンを側坐核に注入することで自己刺激行動を増強できる。前頭前野も脳内自己刺激行動に重要であるが、この部位は、コカインの作用点と考えられている。これらは、神経伝達物質としてドーパミンが関与していることを示すが、サブスタンス P やセロトニンも関係しているという。PET を用いたドーパミン D2 受容体を用いた画像的計測によれば、報酬を伴うテレビゲームで遊んでいるとき脳内のドーパミン分泌が増加していることが報告されている。

MRI によるマッピングを用いて Borsook らは、側坐核が快い刺激に反応すること、しかも、この同じ部位が痛み刺激にも反応することを報告した。これは、痛みと快感が極めて密接した脳領域で感じられていることを示す興味ある報告である。

感情は、感覚的側面と同時に外部に表現される。感情表出は、言葉、身振り、顔つき、相手との距離を変えるというようなある程度意識的にできる様式のほかに、瞳の大きさ、発汗、立毛、涙を流すといった自律神経反応が加わる。自律神経は、内臓器官などの平滑筋、血管、分泌線に分布し、呼吸、循環、消化吸収、代謝等の生存に関係した機能を調節している。自律神経には、交感神経と副交感神経があり、互いに拮抗することで臓器の機能レベルを調節する。交感神経は、脊髄から出て神経節を形成後標的器官に線維を送る。交感神経の亢進状態では、瞳孔散大、唾液の分泌、立毛、発汗のような危険に対する準備状態、ないしは、攻撃前の威嚇状態となる。副交感神経は、延髄の迷走神経核から出て、迷走神経を形成するもの、脳神経に随伴して瞳孔、涙腺、唾液腺に直接線維を送るものがある。迷走神経の活動状態は、身体を休息させる方向となる。

2004年3月13日発行本「潜在能力の科学」からの転載
肩書き等は当時のものです。

自律神経は、延髄以外に橋(延髄の上方にある部分)、視床下部その他の脳部位から投射を受けている。扁桃体、中隔、梨状葉などの大脳辺縁系から、視床下部を介して交感、副交感神経に線維が送られている。自律神経を意思的に支配することは困難であるが、ヨガ、禅、気功のような瞑想法では、脈拍や血圧のある程度のコントロールが可能とされる。これは、大脳新皮質から大脳辺縁系、視床下部を介する自律神経系の制御と考えられる。

7 瞑想と脳

瞑想法には、ヨガ、禅、気功等多種類あるが、共通するところは、意識の集中から無意識(無念無想)の世界に入っていくことのようなのである。ここでは、雑念から離れ沈静化し自律神経のバランスも整えられる。真の世界を知ることができ、一段上の意識レベル(悟り)に至る。通常は、一つの言葉や、景色、ないし、呼吸に集中することで始まる。瞑想の中では、外界の出来事も感覚を呼び起こすことなく、ここでは、何も思い浮かべることもない。「心頭滅却すれば火もまた涼し」という快川国師の言葉は、まさにこれを表現しているが、涼しいという感情もそこにはない。瞑想は、自己の内的体験であるので、それを他人が伺うことは難しい。そこで脳機能画像を用いて瞑想を観察することにした。

図2は、8年以上のヨガ経験者7名で行った瞑想中の脳活動を画像化した結果である(仙台市 堀真由美氏グループの協力による)。被験者には、約1時間に渡ってヨガ(厳密には、ハタ・ヨガ)のさまざまな体位を実行してもらった。ヨガに入る前に放射性のブドウ糖(^{18}F -FDG)を経口投与し、この薬剤が、ヨガを行っている間、次第に

PET によるこころの研究

2004年3月13日発行本「潜在能力の科学」からの転載
肩書き等は当時のものです。

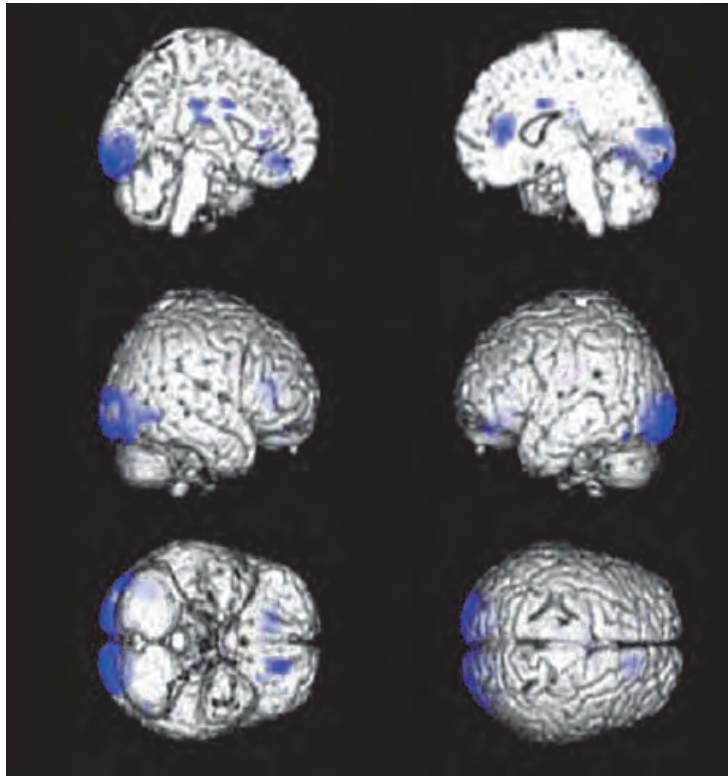


図2 ヨガにより活動が低下した脳部位

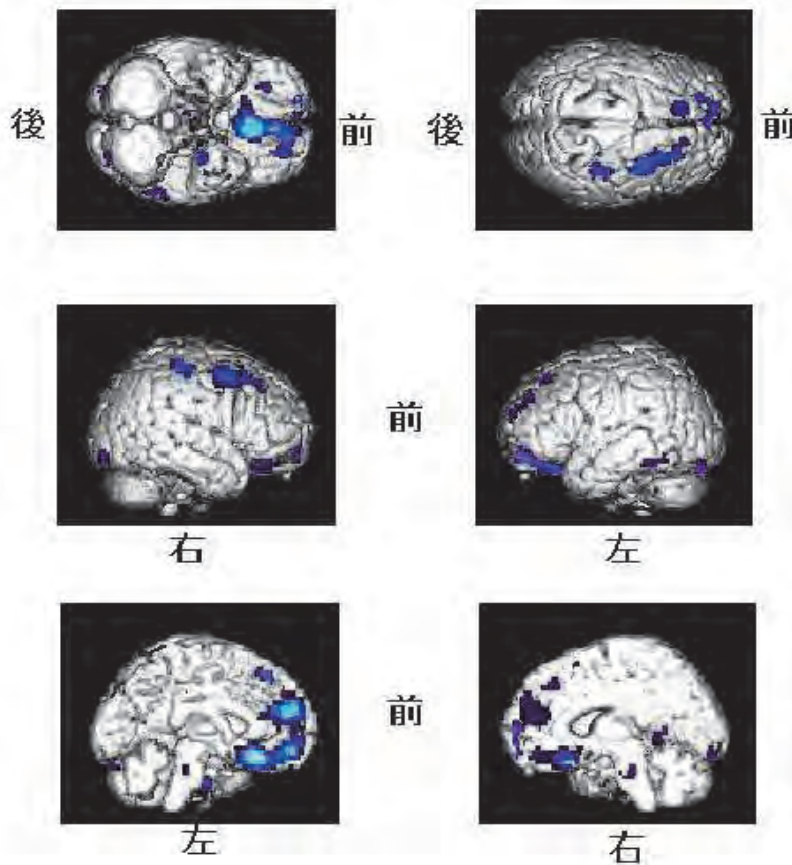


図3 気功により活動が低下した脳部位

2004年3月13日発行本「潜在能力の科学」からの転載
肩書き等は当時のものです。

吸収され脳に蓄積する。蓄積した後、しばらくは、脳にとどまるので、ヨガを終了した後にPETで撮影しても、ヨガ中の脳活動を反映した画像を得ることができる⁵⁾。

これを、同一被験者の安静時の脳画像と比較することで、統計的確かさでヨガが及ぼす脳への効果を画像化できる。ヨガによって、活動が高まった脳部位は、一次感覚野(中心後回、腰から足に相当する部分)、一次運動野(中心前回、手に相当)、前運動野、補足運動野、下頭頂小葉であった。これらは、運動の一次中枢と連合野である。一方、ヨガによって、活動が低下した脳部位は、帯状回、眼窩回などで、いずれも辺縁脳が中心であった。注目すべきは、後頭部の視覚連合野が広範に活動低下していたことである。これは、視覚情報へ注意が向いていないことを意味している。つまり、ヨガは、運動系をふかつすもの的大脑辺縁系を沈静化すると考えられる。脳幹、延髄等の変化も想定されるが、装置の解像力の関係から見ることはできなかつた。大腦辺縁系は、悲しみ、怒り、恐れなどで興奮する。このような感情は、意識を不安定にする。ヨガは、大腦辺縁系を抑制することができるようである。

一方、気功では、脳活動のふかつと抑制が認められた。後部帯状回と運動野の活動の上昇が認められたが、これは、気功に伴う運動を反映していると考えている。実験での気功は体動を伴うものではなかつたが、体動をイメージすることによる脳活動と考えている。活動の低下部位としては、帯状回、直回、内側前頭回などであった(図3)。帯状回は、学習、注意、痛みなどに関係し、大腦辺縁系に属している。内側前頭回、直回は、情動、特に、悲しみに関係し、前頭葉の中でも辺縁系との関係が強い部位である。脳梁の下の部分(梁下野)は、うつ病と関係があるとされる。これらの部分の血流が低下したことは、こころが安定化していることを意味しているものと考えている。これらの結果で問題点とし

2004年3月13日発行本「潜在能力の科学」からの転載
肩書き等は当時のものです。

て、本研究は、数人の被験者に瞑想を行なってもらいその結果を平均化して安静状態と比較したものであることである。気功の流儀は、各個人で異なるので、個人特有の脳活動は、反映されていない。

8 おわりに

安静時の全身代謝マップを図4に示す。安静状態では、内臓臓器のエネルギー代謝が最小レベルにあることが分かる。この状態で機能しているのは、脳と心臓、そして腎臓である。脳は、安静時において身体全体が消費するブドウ糖の1/10を消費している。重量比では、約2.5%程度であるので、エネルギー要求性は、極めて高い。当然、意識的活動は、エネルギー消費を伴うが、既に述べたように無意識の脳活動が圧倒

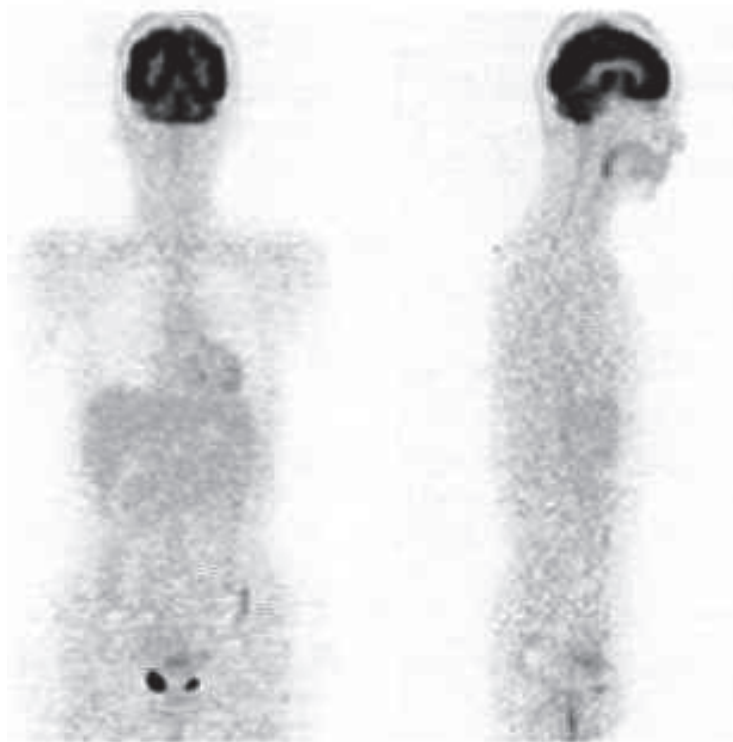


図4 全身のエネルギー代謝マップ

[¹⁸F]ブドウ糖の集積は、心臓（脂肪を利用）、膀胱（尿中排泄による）を除いてエネルギー消費を反映する。安静時においても脳が大量のエネルギーを消費していることがわかる。

2004年3月13日発行本「潜在能力の科学」からの転載
肩書き等は当時のものです。

的に多いのである。意識がすべての感覚信号に注意を向けていたならば、それに忙殺されて思考等はできないのである。つまり、脳の活動は、自立性を主体としている。ほとんどの情報処理系は、ほぼ、自立して働いている。それを調整する機構が脳の中にある。この調整も意識とは別のところにある。興奮したとき血圧が上がり、脈拍が高まる。興奮は、辺縁脳の働きであるので辺縁脳が自律脳を調整したのである。辺縁脳の更に外側に意識脳がある。しかし、意識脳は自律脳を直接制御できないようである。間にある辺縁脳の力が余りに強く、意識脳と自律脳は、分断されている。ところが、ヨガ、気功法などでは、血圧を自由に变化させる達人がいる。これは、辺縁脳を抑制することで達成されているに違いない。ヨガの研究結果は、それを裏付けている。つまり、辺縁脳が抑制されたとき、意識脳と自律脳との間に連絡チャンネルが開くと予想する。瞑想法が身体を健康にし、時に病気まで軽快するというのは、このような機構を使用しているのであろう。

それでは、意識脳と自律脳との間の連絡チャンネルは、どこにあるのか？可能性としては、意識脳と自律脳が共に関係している経路であろう。一つの可能性は、苦痛である。痛みは、辺縁脳に痛み感覚を与え、意識脳に痛みの場所の信号を送り、自律脳に反射的逃避を命令させる。ヨガでは、窮屈な体位をとり、禅では、同じ姿勢を長時間強いることは、偶然ではないであろう。次の可能性は呼吸である。呼吸中枢は、自律脳（延髄）にあるが、意識的にも呼吸を変えることができる。ほとんどすべての瞑想法で呼吸法を重視するのは、このためであろう。

脳機能画像研究は、こころの解明に乗り出している。しかし、こころは、膨大であり、様々な脳の部分の、様々な神経ネットワークの、様々な神経調節物質（脳内ホルモン）の制御下にある。それに、進化の過程で獲得されてきた本能が、無意識のうちに、決定的な役割を果たしてい

PET によるこころの研究

2004年3月13日発行本「潜在能力の科学」からの転載
肩書き等は当時のものです。

る。こころは、神経科学の領域でもあり、心理学、哲学、宗教学の領域でもある。現在、これらの科学は、互いに独立し異なる世界にいるが、心の解明は、これらの融合を必要としている。

参照文献

- 1) MacLean, P D. (法橋登 訳) : *三つの脳の進化*. 工作舎、1994.
- 2) Friston, K. J. Ashburner, J. Frith, C D., et al. : Spatial registration and normalization of images. *Human Brain Mapping*, 2(3) : pp. 165-189, 1995.
- 3) Friston, K J. Holmes, A. Poline, et al. : Detecting activations in PET and fMRI: 1 levels of inference and power. *Neuroimage*, 4 : pp. 223-235, 1996.
- 4) Talairach, J. Tournoux, P. : *Co-planar stereotaxic atlas of the human brain. 3-dimensional proportional system: An approach to cerebral imaging*. Thieme (Ruedigerstrasse)、1988.
- 5) 伊藤正敏、Singh L . N .、山口慶一郎、他 : ヨガによる脳活動の変化に関する脳画像的研究、*国際生命情報科学会誌*, 20(2) : pp. 473-479、2002.