

## 運動が計算課題遂行に及ぼす影響と 脳機能計測法によるメカニズムの検討

大森 肇\*1・澤入正通\*2・窪田辰政\*3・村上 繁\*4

### Influence of exercise on performance of calculation task and study of mechanism by brain function measurement

Hajime OHMORI, Masamichi SAWAIRI, Tatsumasa KUBOTA and Shigeru MURAKAMI

#### Abstract

Those results cannot necessarily be consistent though a lot of relations between physical activity and mental activity have been studied. In this text, we paid attention to the calculation task as a representative cognitive task, and reviewed the previous studies about the effects of physical exercise on the performance of calculation task and the clarification of those mechanisms by the method of brain function measurement.

These contents were as follows.

1. The effects of physical exercise on the performance of calculation task
  - 1) The relationship between exercise intensity and calculation result
  - 2) The relationship between exercise duration and calculation result
  - 3) The relationship between fitness level and calculation result
2. The effects of exercise-induced brain awakening on mental activity
  - 1) Reverse-U hypothesis
  - 2) Excitation level of cerebrum
3. The neuron activity and brain hemodynamics with exercise and calculation task
  - 1) Brain hemodynamics to the neuron activity with calculation task
  - 2) Brain hemodynamics to the neuron activity with exercise

In the multipoint measurement simultaneously to a wide area including the prefrontal region by using optical topography (NIRS topography system), the development of a further study about the influence of physical exercise on a higher-order control of the brain and its mechanism is expected in the future.

#### はじめに

大脳皮質の領域の1つに前頭連合野がある。前頭連合野とは前頭葉から運動関連領域を除いた残りの部分であり、ヒトではこの部分が他の動物より絶対的に大きい。大脳皮質全体の約30%を占めるこの前頭連合野の代表的な機能の

1つは、精神機能への関与である。精神機能には、認知、記憶、思考、言語、感情などさまざまな機能が含まれている。

運動すると気分がリフレッシュされ爽快感を感じるといったポジティブな効果を持つことや、運動し過ぎると逆に疲労を感じるといったネガティブな効果を持つことを我々は経験的に知っている。このことは身体活動と精神活動の

2007年9月21日受理

\*1 筑波大学大学院人間総合科学研究科 (Graduate School of Comprehensive Human Sciences, University of Tsukuba)

\*2 静岡県磐田市立豊田中学校 (Toyoda Junior High School, Iwata, Shizuoka)

\*3 静岡産業大学経営学部 (Faculty of Management, Shizuoka Sangyo University)

\*4 東海大学海洋学部 (School of Marine Science and Technology, Tokai University)

間に何らかの因果関係が存在することを示している。このような事から、身体活動と精神活動の関係性が数多く研究されてきたが、被検者、認知課題、運動形態、実験手順などが異なっており、それらの結果もさまざまである (Tomprowski and Ellis, 1986)。

本稿では代表的な認知課題の1つとして計算課題に着目した。身体運動が計算課題遂行にどのように影響するかに関するこれまでの知見をまとめ、脳機能計測法によるメカニズムの検討について概観した。

## 1. 身体運動が計算課題遂行に及ぼす影響

メタ分析によって180編の研究結果を統計的にまとめた Kavale and Mattson (1983) は、知覚運動トレーニングは、学力、認知、あるいは知覚運動のパフォーマンスを改善するための効果的な手段ではないとしている。一方、Etnier *et al.* (1997) が近年やはりメタ分析によって134編の論文について検討した結果、運動が認知に対して小さなポジティブ効果を持つことを示唆している。このようにメタ分析の結果にも不一致が認められているが、Etnier *et al.* (1997) の報告は Kavale and Mattson (1983) の結果を結論とすることに異議を唱えたものであると言えよう。Kramer *et al.* (1999) は60~75歳の座業者をウォーキング(有酸素運動)とストレッチと重量上げ(無酸素運動)の2群に分けてトレーニングを行った。その結果、計画立案や段取り、自制、作業記憶といった高次の制御を司る前頭前野や前頭野の機能を反映する課題成績がウォーキング群で改善された。このことは身体活動が前頭前野や前頭野領域の機能の老化をくいとめる可能性を新たに示しており、身体活動と精神活動の関係を追究する今後の研究の方向性を指し示すものであると考えられる。

精神活動を評価する課題には多くの種類が存在するが、本稿で主に取り上げる計算課題は作業記憶に分類されるものである。作業記憶とは長期記憶と短期記憶を組み合わせて作業する時に使われる記憶のことであるが、この場合、計算方法という長期記憶と目の前に提示された数字という短期記憶を組み合わせることを意味する。

### (1) 運動強度と計算成績

Gutin and DiGennaro (1968b) は72人の学生を対象に、安静後とトレッドミル上で疲労困憊にいたるまでランニングした後に4分間の加算課題を行わせ、課題を遂行する速さと正確さを比較した。その結果、疲労は課題を遂行する正確さに有意なネガティブ効果を持ち、課題を遂行する速さには影響しなかった。一方、松田ら (1973) は仰臥位の自転車エルゴメータを用いた漸増負荷運動の前後で計算課題を遂行する速さがどのように変化するかを調べた。その結果、疲労困憊の状態でも課題を遂行する速さがただ安静にするよりも有意に高まることを示した。

Reilly and Smith (1986) は自転車こぎ運動の0, 25, 40, 55, 70, 85%  $\dot{V}O_2\max$  の運動強度と運動時に行った計算課題成績の間に逆U字の関係があり、その至適強度は44%  $\dot{V}O_2\max$  であると指摘している。松田ら (1973) の研究では用いている運動形態が仰臥位の自転車エルゴメータであり、しかも手で上体を支える事もしていない。実際、データからすると身体能力が最大限まで引き出されていないことが考えられ、それゆえ疲労困憊後にも解答速度が速まった可能性も考えられる。

### (2) 運動継続時間と計算成績

Szabo and Gauvin (1992) は20人の男子学生に40% maximal reserve heart rate で15分間自転車こぎ運動を行かせた後、引き続き60% maximal reserve heart rate で10分間運動を行かせた。計25分間の運動中および運動後の計算成績に有意な変化は認められず、促進効果がなかったとしている。また、一過性運動と認知機能に関する27編の論文を運動の時間と強度で分類してレビューした Tomporowski and Ellis (1986) は、10分間以下の短時間運動は計算成績に影響せず、10分間以上の運動後には計算成績が低下するとしている。権藤 (2002) は10分間のジョギングと30分間のジョギングでは後者の方が疲労感をもたらし、計算効率を減少させたと考えている。

一方で柏原ら (1999a, 1999b) は、運動前後での計算効率の変化は運動継続時間と運動強度の両方の影響を受け、5分間の運動では10分間の運動より強い負荷強度が必要であると指摘している。

### (3) 体力レベルと運動時の計算成績

Gutin and DiGennaro (1968a) は20インチのベンチを用いた踏み台昇降運動を約8週間トレーニングした23人の被検者とトレーニングしていない32人の被検者を安静群、1分間の踏み台昇降運動群、5分間の踏み台昇降運動群にランダムに分け、7分間の試技前後に5分間の単純加算課題を行かせた。7分間の試技は7分間のマット上での安静と、6分間のマット上での安静に続く1分間の踏み台昇降運動、2分間の安静に続く5分間の踏み台昇降運動からなる。その結果、トレーニングした被検者では1分間の踏み台昇降運動群と比較して、5分間の踏み台昇降運動群と安静群で有意に加算速度が速かった。安静群で加算速度が速まった理由として、最初の課題時から高いレベルの活性状態だった者が7分間の安静条件で影響を受けなかったからかもしれないと考察しているが、明確な結論とは言えないであろう。しかしながら、5分間の踏み台昇降運動群ではトレーニング群と非トレーニング群で課題を遂行する正確さにおいて異なる傾向が認められた。このことは、被検者の体力レベルが脳皮質の担う高次機能の効率に影響するかもしれないことを示唆している。

Sjoberg (1980) は24人の心理専攻の男子学生 (unfit)

と24人の体育専攻の男子学生 (fit) を対象に最大作業能力の25, 50, 75%の自転車エルゴメータを用いた身体運動を行わせ、その運動中に3桁の数字を用いた複雑な計算課題 (課題1) と記憶課題 (課題2) を、運動後に2桁×1桁の計算課題 (課題3) を行わせた。その結果、運動中の課題1, 2の成績にはグループ間で有意な差は認められず、強度間にも有意な差は認められなかった。しかしながら、運動後の課題3の成績において、心理専攻の男子学生と比較して体育専攻の男子学生で有意に高まったことを報告している。

Heckler and Croce (1992) は18人の成人女性を呼吸循環機能を基に2群に分け、トレッドミル上で20, 40分間の70% 予測最高心拍数レベルのウォーキングあるいはジョギングを行わせ、その直後、5分間後、15分間後に20間の課題を解く速度と正確さを調べた。その結果、20分間の運動後には体力レベルに関係なく有意に課題解答速度が速くなったが、40分間運動後では体力に優れた女性のみで速度が増す事を示した。また正確さには有意な変化は認められなかった。

このような体力レベルの影響は、運動のもたらす促進効果の差というよりも疲労に対する耐性の差という側面から考えたほうが良いと思われる。しかしながら、権藤 (2002) は日頃運動をしていない被検者を対象にした場合の運動による計算成績の促進効果を示した。このような不一致は体力レベル以外の要因が関与している事を推察させるが、その詳細は現在のところ不明である。

## 2. 身体運動による脳の覚醒と精神活動への影響

Shinoda and Yoshida (1987) は、生理的覚醒を見る上で脳波および心拍数が有効な指標であるとしている。運動はその生体ニーズから必然的に心拍数の上昇をもたらすが、それは運動により覚醒水準の上昇をもたらされるということもまた意味するのである。運動が計算課題成績の向上をもたらす可能性についてこれまで言及してきたが、その生理的背景として脳の覚醒水準の上昇という観点は重要であろう。本節では、運動による脳の覚醒と精神活動への影響についてこれまでの知見を概観する。

### (1) 逆U字仮説

Yerkes and Dodson (1908) はマウスの明暗弁別学習において、失敗した時に与えられる刺激強度と学習速度の間に逆U字を呈するような関係を見いだした。この関係は覚醒水準の高まりに伴ってパフォーマンスが上昇するが、ある至適水準を越えてさらに覚醒が増すと逆にパフォーマンスが低下するという考えに応用され、“逆U字仮説”として理論化されてきている。

この覚醒という概念は心理的な動機の解釈の1つとして生まれ、覚醒は特に行動の強度レベルを表している。また

覚醒の概念はしばしば動因、緊張、活性といった強度に関連した用語に置き換えられ、これらは生体器官のエネルギー代謝の程度に関連している (Duffy, 1957)。Hebb (1955) は皮質シナプスの機能が覚醒システムからの広範囲の賦活によって促進されると仮説を立てた。しかし高覚醒状態では、多量の電位の発射が不適切な促進効果となり、手掛かり機能のような繊細な調節を妨害すると考えられている。また“逆U字仮説”の支持者である Malmö (1959) も神経心理学的な覚醒の様相は深い眠りからより多量の皮質電位活動によって示される興奮状態の尺度で表され、網様体賦活系から上行する皮質への電位発射の機能によって端的に示されるとしている。

さらに、情報の受容や処理がどのように認知や運動課題に影響するのかを説明するために、注意過程の理論が使われてきている (Tomprowski and ellis, 1986)。Easterbrook (1959) は覚醒の上昇が選択的なパフォーマンスを限定するような役割をもつ要因に対する注意を弱めるとしている。つまり低覚醒状態では知覚範囲が広く、課題を行うのに不必要な手掛かりと必要な手掛かりの両方を認知できるのでパフォーマンスは低くなる。中程度あるいは至適ポイントに覚醒が達するまでは不必要な手掛かりに対する知覚が選択的に減少することでパフォーマンスが高まるが、至適ポイントを超えて高覚醒状態に至ると必要な手掛かりに対する知覚も低下するためにパフォーマンスが低下してしまう。このモデルは情報を処理する課題に対して、運動課題で逆U字仮説が成立することと同じ形式のパフォーマンスが成立することを提案している。また、認知課題を行っている時の注意能力容量は身体覚醒レベルに影響される、という考えを支持する証拠も報告されている (Hasher and Zacks, 1979)。

“逆U字仮説”に対して Spence and Spence (1966) によって提出されたのが“動因説”である。この理論はパフォーマンス (P) が習慣 (H) と動因 (D) の掛け算として予想できるとした考え方 ( $P=H \times D$ ) で、技術が十分に習得されていない初期の段階では生理的な覚醒の増大はパフォーマンスを妨げるが、技術が十分に習得された状態では生理的な覚醒の増大によってパフォーマンスは直線的な関係で促進されるというものである。“逆U字仮説”と“動因説”の決定的な違いは、よく習得された課題パフォーマンスが“逆U字仮説”では高覚醒状態で低下するのに対し、“動因説”では高まることが予想される点である (Landers, 1980)。

### (2) 大脳の興奮水準

Magoun (1982) は脳幹についての研究をまとめ、感覚神経路を上行するインパルスが側副枝により脳幹網様体に入り、ついで大脳皮質の神経細胞の活動を亢進させて覚醒状態を保つので、脳幹網様体が意識レベルの決定に重要であるとした。このような研究は動物を用いて脳幹網様体に



直接電極を挿入したり、脳部位の破壊実験によって明らかになってきたことであり、人に応用することは難しいと考えられる。

脳の覚醒を客観的に表す一つの指標として考えられているのがフリッカー値である (Godefroy *et al.*, 2002)。フリッカーとは日本語でちらつきを意味し、ある周波数で点滅する光源のちらつきを認識する程度が脳の覚醒水準に依存すると考えられている。Godefroy *et al.* (2002) によれば、フリッカー値の上昇は覚醒水準の上昇を意味し、下降は中枢疲労に起因する覚醒水準の低下を意味する。

円田 (1972) は運動中のフリッカー値の測定のために直径 4.8cm の大きさの特別な刺激装置を製作してその光源を被験者の目の高さで 3m 前方に置き、トレッドミル上での 30 分間の歩行運動、30 分間の走行運動、60 分間の歩行及び走行運動の速度を変えて、運動前・中・後のフリッカー値の変化について上行及び下行値を各 2 回、計 4 回測定しその平均値を調べた。その結果、150m/min の速さでの走行運動がフリッカー値を最も上昇させることが明らかとなり、それは運動を 60 分間継続させても変わらなかった。これ以上の速さではフリッカー値が減少しており、末梢筋群などからの求心性のインパルスが脳に及ぼす影響は、150m/min 程度を限界として、それ以下の場合には興奮に、それ以上の場合には抑制に作用すると予想している。

Godefroy *et al.* (2002) は 6 人のトライアスロン選手を対象にフリッカー値の測定を行った。フリッカー値は 20~44Hz の範囲で上昇法と下降法にて運動前、運動後 5、20、60 分間後、および 1 日後に計測された。運動はトレッドミルでの最大酸素摂取量の漸増負荷試験を用いた。その結果、上昇と下降の両手法によって計測されたフリッカー値のすべての平均値には有意な変化は認められなかったが、上昇法と下降法のフリッカー値の差には有意な変化が認められた。つまり、すべてのフリッカー値を平均してしまうと運動が引き起こすフリッカー値の変化を説明することはできないが、上昇法と下降法の差は運動が引き起こす知覚反応の減少を示唆するとしている。

### 3. 身体運動ならびに計算課題遂行時の神経活動と脳の血液動態

権藤 (2002) は主観的に「楽である」と感じるジョギングを行わせた前後で計算効率がどのように変化するか検討した結果、10、30 分間安静に過ごすよりも、10、30 分間ジョギングを行った方が有意に計算効率が増加することを認めた。柏原ら (1997, 1999a, 1999b) も一過性の自転車こぎ運動の強度や時間などが運動前後に行った 5 分間の計算効率に影響することを確認している。しかしながら、実際の脳内メカニズムについては多くの課題が残されている。計算課題を遂行する部位であろうと考えられている前

頭前野が、これらの一過性運動後により活性化するという証拠はほとんど示されていない。

脳の機能的な活動に酸素とグルコースが必要なことから、それらを運搬する血流の増加が神経活動と関連すると考えられている (Lassen *et al.*, 1978)。このような脳の血液動態を特定する方法としては、陽電子断層撮像法 (positron emission computed tomography: PET) や機能的核磁気共鳴撮像法 (functional magnetic resonance imaging: fMRI) が存在する (小泉, 2000) が、運動時の脳における酸素化および循環動態を把握するためには、非侵襲的で測定時の身体動揺にかなりの程度対応できるという理由から近赤外分光法 (Near-infrared spectroscopy: NIRS) が使用されてきている (Ide *et al.*, 1999; Nielsen *et al.*, 1999)。しかしながら、多くの場合 NIRS では単一プローブを用いており、脳における活性部位を総合的に判断することは難しい。この問題に対して多点式プローブを採用した光トポグラフィーが開発され (小泉, 2000; 山下ら, 2000)、前頭前野などを含めた広い領域にわたり多点で同時計測することができるようになった。

#### (1) 計算時の神経活動に対する脳の血液動態

前頭前野は解剖学的に視床背内側核から線維投射を受けている大脳皮質と定義され、Brodmann の区分でいえば 8, 9, 10, 11, 12, 13, 44, 45, 46 野を含む広大な領域である (松波と内藤, 2000)。前頭前野の機能として、注意を集中したり暗算したりする脳の賦活化が Luria (1973) の臨床例から考えられており、計算課題を遂行するのにもこの前頭前野が大きく関わっていると考えられる。また計算という行為は数字という短期記憶と加算という長期記憶を駆使して遂行されると考えられる。このようなある活動や課題の遂行に必要な情報を必要な時間、能動的に保持するメカニズムは作業記憶、あるいはワーキングメモリーとして定義されており、この機能も前頭前野が大きく関与していると考えられている (松波と内藤, 2000)。

Lassen *et al.* (1978) は細胞レベルでの代謝に酸素とグルコースが必要なことから、脳の機能的な活動にそれらを運搬する血流の増加が関連することを説明した。この発見によって、それまでは脳疾患の臨床報告を中心としなければならなかったヒトの脳研究が、非侵襲的に測定する技法の開発とともに進歩してきた。

Hoshi and Tamura (1993) は 7 人の健康な男性を対象に NIRS を用いて視覚刺激、聴覚刺激に加えて計算課題に対する部位特異的なヘモグロビンの酸素化の変化を検出し、脳活動の機能的なマッピングに応用した。その結果、テキストを読んでいる時には後頭葉の第一視覚皮質の Brodmann の 17 野において oxy Hb と deoxy Hb の増加に伴う total Hb の増加が認められ、計算問題を解き始めると前頭葉の前頭連合野である Brodmann の 10 野と側頭葉の第一聴覚野である Brodmann の 41 野における total

Hbが増加した。しかしdeoxy Hbの変化は10野では減少したが、41野では増加した。続いて被検者が問題を聞き取って30問の計算課題を解く時には、total Hbとoxy Hbの段階的な増加が左側頭葉と両側の前頭葉で起こった。この結果から、計算をするためには前頭葉だけではなく、問題を認識する部位と実際に計算を行う部位が同時に活動しているということが明らかとなった。しかしNIRSは空間分解能が低いので、実際に脳のどの部位の反応なのかは結果からの推測に頼らざるを得ない。計算課題を解いている時の側頭葉の反応は、第一聴覚皮質というよりも聴覚連合野を近赤外光が透過して、問題を解くための言語的な想起が起きていると解釈している。

それに対して、空間分解能に優れたPETを用いたCritchley *et al.* (2000)の報告がある。Critchley *et al.*は6人の健康な右利きの男性を対象に、ハンドグリップを用いた困難なアイソメトリック運動と容易なアイソメトリック運動、複雑な計算課題、単純な計算課題という4つの課題を用いて、運動や精神的な努力が引き起こす覚醒状態の自動調節に共通した心拍数と平均血圧の変化に反応する脳部位を特定するために研究を行った。その結果、運動と精神ストレス課題でそれぞれコントロールと比較して心拍数と平均血圧は有意に増加し、両課題において有意な血流の増加が小脳虫部、脳幹、右前方帯状束で観察された。平均血圧に関係したのは小脳虫部、右前方帯状束、右島の脳血流であり、心拍数と関係したのは橋、小脳、右島の脳血流であった。また心循環の覚醒は前頭前野と側頭葉の中央における脳血流の減少と関係していた。このように運動や計算課題はストレスとなって心循環反応を促すが、中枢からの調節がどのような部位で行われるのかも明らかになってきている。しかしPETでは脳血流反応の部位を特定することには優れているが、この反応が経時的にどのようなネットワークで調節されるのかを研究するには限界がある。

## (2) 運動時の神経活動に対する脳の血液動態

運動時の血液動態も研究されてきており、指のタッピング(Obrig *et al.*, 1996)、座位エルゴメータ(Christensen *et al.*, 2000)などの運動課題が多く用いられてきている。これらの研究はまず第一にPenfieldが示した運動野と体性感覚野の体部位再現(Lassen *et al.*, 1978)を脳血流の反応から再現することができるのか確かめることであり、このことは運動野を含む研究では立証されている(Obrig *et al.*, 1996; Christensen *et al.*, 2000)。

Christensen *et al.* (2000)は7人の健康な右利きの若者を対象に座位エルゴメータを用いて、安静と随意的な自転車こぎ、受動的な自転車こぎ、運動イメージの4つの条件を用いて運動時の脳活動をPETで観察した。その結果、安静と比較して随意的な運動では両側の第一次感覚皮質、第一次運動皮質、補足運動野、小脳前部が有意に活性

化していた。安静と比較して受動的な運動でも同様な部位が活性化していた。随意的な運動で活性化した部位から受動的な運動で活性化した部位を差し引くと第一次運動皮質の脚部位と楔前部で有意な活性化が認められ、第一次感覚野には有意な差は認められなかった。この第一次運動皮質の活性化には随意的な運動のペダル回転数との間に有意な正の相関があった。また運動のイメージと安静を比較した場合では両側の補足運動野が活性化していた。このような反応から第一次運動皮質、補足運動野、小脳を含む高次の運動中枢は自転車こぎ運動のようなリズムミカルな運動課題の操作と発生に関与することが示唆された。

またほぼ同じような手順での歩行に特異的な脳の活性化が認められるか調べた研究もある(Miyai *et al.*, 2001)。歩行では頭部の動きが生じるためPETでは測定することができない。しかしながら近年開発されたNIRS topography systemが測定を可能にした。その結果、両側の正中矢状面付近の第一次体性運動野と補足運動野でのtotal Hbとoxy Hbの増加が歩行と関係していた。座位姿勢での足部の底屈と背屈では同じ部位が活性化したが、活性化する部位が狭くなっており、歩行のイメージでは補足運動野の尾側が活性化する。このように行動を形作る神経ネットワークの役割が徐々に解明されてきている。

## おわりに

これまで身体活動と精神活動の関係性が数多く研究されてきたが、それらの結果は必ずしも一致するものとは言えない(Tomprowski and Ellis, 1986)。本稿では代表的な認知課題の1つとして計算課題に着目して、身体運動が計算課題遂行にどのように影響するかに関するこれまでの知見をまとめ、さらに脳機能計測法によるメカニズムの検討について、以下の構成で概観した。

1. 身体運動が計算課題遂行に及ぼす影響
  - (1) 運動強度と計算成績
  - (2) 運動継続時間と計算成績
  - (3) 体力レベルと運動時の計算成績
2. 運動による脳の覚醒と精神活動への影響
  - (1) 逆U字仮説
  - (2) 大脳の興奮水準
3. 運動ならびに計算課題遂行時の神経活動と脳の血液動態
  - (1) 計算時の神経活動に対する血液動態
  - (2) 運動時の神経活動に対する血液動態

これまで、計算課題を遂行する部位であろうと考えられている前頭前野が一過性運動後により活性化するという直接的な証拠はほとんど示されてこなかった。筆者らは、1) 自転車エルゴメータによる運動は加算作業の効率を改善す



る可能性があり、その至適強度に関しては個人差が大きいこと、2) また被検者個人内で見ると、加算作業の効率を改善する運動条件が左前頭前野の oxy Hb と total Hb の増加が見られた運動条件と一致するという興味深い知見を得ている (未発表資料)。今後は、光トポグラフィー (NIRS topography system) を用いて前頭前野などを含めた広い領域にわたり多点で同時計測することで、Kramer *et al.* (1999) の示した脳の高次制御に及ぼす運動の影響とそのメカニズム解明についてのさらなる研究の発展が期待される。

### 参考文献

荒井弘和, 竹中晃二, 岡浩一郎. 一過性運動研究に用いる感情尺度開発の試み. 日本健康心理学会12回大会発表論文集. 98-99 (1999).

荒井弘和, 竹中晃二, 岡浩一郎. 一過性の有酸素運動が感情に与える影響—運動条件および読書条件における経時変化の比較—. スポーツ心理学研究. **28**(2), 9-17 (2001).

Chih, C., Lipton, P., and Roberts, E. L. Jr. Do active cerebral neurons really use lactate rather than glucose? *Trends Neurosci.* **24**(10), 573-578 (2001).

Christensen, L. O. D., Johannsen, P., Sinkjar, T., Petersen, N., Pyndt, H. S., and Nielsen, J. B. Cerebral activation during bicycle movements in man. *Exp. Brain Res.* **135**, 66-72 (2000).

Critchley, H. D., Corfield, D. R., Chandler, M. P., Mathias, C. J., Dolan, and R. J. Cerebral correlates of autonomic cardiovascular arousal: a functional neuroimaging investigation in humans. *J. Physiol.* **523**(1), 259-270 (2000).

Duffy, E. The psychological significance of the concept of "arousal" or "activation". *Psychol. Rev.* **64**(5), 265-275 (1957).

Easterbrook, J. A. The effect of emotion on cue utilization and the organization of behavior. *Psychol. Rev.* **66**(3), 183-201 (1959).

Eklblom, B., and Goldbarg, A. N. The influence of physical training and other factors on the subjective rating of perceived exertion. *Acta Physiol. Scand.* **83**, 399-406 (1971).

円田善英. 運動と頭脳明晰度との関係(1) 運動中のフリッカー融合閾値の変動. 日本体育大学紀要, **2**, 19-28 (1972).

円田善英. 運動と頭脳明晰度との関係(2) 運動中における選択反応時間の変動. 日本体育大学紀要, **3**, 119-144 (1973).

Etnier, J. L., Salazar, W., Landers, D. M., Petruzzello, S. J., Han, M., and Nowell, P. The influence of physical fitness and exercise upon cognitive functioning: A meta-analysis. *J. Sport Exerc. Psychol.* **19**, 249-277 (1997).

Fox, P. T., Raichle, M. E., Mintun, M. A., and Dence, C. Nonoxidative glucose consumption during focal physiologic neural activity. *Science.* **241**, 462-464 (1988).

Friedman, D. B., Friberg, L., Payne, G., Mitchell, J. H., and Secher, N. H. Effects of axillary blockade on regional cerebral blood flow during dynamic hand contractions. *J. Appl. Physiol.* **73**(5), 2120-2125 (1992).

福田将史, 長田一臣. 運動中の覚醒水準が精神作業に及ぼす影響—フリッカー値とタイミング・コントロールを中心として—. 日本体育大学紀要. **15**(1), 1-5 (1985).

Godefroy, D., Rousseu, C., Vercruyssen, F., Cremieux, J., and Brisswalter, J. Influence of physical exercise on perceptual response in aerobically trained subjects. *Percep. Moto. Skills.* **94**, 68-70 (2002).

権藤雄一. 「楽である」と感じるジョギングが連続加算作業に及ぼす影響. 筑波大学大学院体育研究科修士論文. 2002.

Gutin, B. Exercise-induced activation and human performance: A review. *Res. Q.* **44**(3), 256-268 (1973).

Gutin, B., and DiGennaro, J. Effect of one-minute and five-minute step-ups on performance of simple addition. *Res. Q.* **39**(1), 81-85 (1968a).

Gutin, B., and DiGennaro, J. Effect of a treadmill run to exhaustion on performance of long addition. *Res. Q.* **39**(4), 958-964 (1968b).

Hasher, L., and Zacks, R. T. Automatic and effortful processes in memory. *J. Exp. Psychol.: General.* **108**(3), 356-388 (1979).

Hebb, D. O. Drives and the C.N.S (conceptual nervous system). *Psychol. Rev.* **62**(4), 243-254 (1955).

Heckler, B., and Croce, R. Effects of time of posttest after two durations of exercise on speed and accuracy of addition and subtraction by fit and less-fit women. *Percep. and Moto. Skills.* **75**, 1059-1065 (1992).

Hoshi, Y., and Tamura, M. Dynamic multichannel near-infrared optical imaging of human brain activity. *J. Appl. Physiol.* **75**(4), 1842-1846 (1993).

Ide, K., Horn, A., and Secher, N. H. Cerebral metabolic response to submaximal exercise. *J. Appl. Physiol.* **87**(5), 1604-1608 (1999).

Ide, K., Schmalbrunch, I. K., Quistorff, B., Horn, A., and Secher, N. H. Lactate, glucose and O<sub>2</sub> uptake in human brain during recovery from maximal exercise. *J. Physiol.* **522**(1), 159-164 (2000).

Ide, K., and Secher, N. H. Cerebral blood flow and metabolism during exercise. *Prog. Neurobiol.* **61**, 397-414 (2000).

池上晴夫. 運動処方 理論と実際. 東京, 朝倉書店, 1982. p.98-99.

Isobe, K., Kusaka, K., Nagano, K., Okubo, K., Yasuda, S., Masatoshi, K., Itoh, S., and Onishi, S. Functional imaging of the brain in sedated newborn infants using near infrared topography during passive knee movement. *Neurosci. Lett.* **299**, 221-224 (2001).

Jasper, H. H. Das 10-20-Electrodensystem der internationalen Föderation. *EEG-Labor.* **2**, 143-149 (1980).

柏原考爾, 室田真男, 清水康敬. 身体運動の負荷強度と時間が計算成績に及ぼす影響に関する検討. 電子情報通信学会

- 技術研究報告 教育工学. 98-140, 45-52 (1999a).
- 柏原考爾, 室田真男, 清水康敬. エアロバイク運動時の負荷強度と運動時間が計算成績に及ぼす影響に関する検討. 日本生理人類学会誌. 4(4), 173-180 (1999b).
- 柏原考爾, 佐藤幹寛, 室田真男, 清水康敬. 計算課題と記憶課題における身体運動と学習能率の関係に関する検討. 電子情報通信学会技術研究報告 教育工学. 97-87, 49-56 (1997).
- Kavale, K., and Mattson, D. "One jumped off the balance beam": meta-analysis of perceptual-motor training. *J. Learn. Disabil.* 16(3), 165-173 (1983).
- 小泉英明. 光トポグラフィーが拓く21世紀の脳機能研究—トランスディシプリナリな脳研究へのアプローチ—. 脳の科学. 22, 1243-1253 (2000).
- Kramer, A. F., Hahn, S., Cohen, N. J., Banich, M. T., McAuley, E., Harrison, C. R., Chason, J., Vakil, E., Bardell, L., Boileau, R. A., and Colcombe, A. Ageing, fitness and neurocognitive function. *Nature.* 400(29), 418-419 (1999).
- Landers, D. M. The arousal-performance relationship revisited. *Res. Q. Exerc. Sport.* 51(1), 77-90 (1980).
- Lassen, N. A., Ingvar, D. H., and Skinhoj, E. Brain function and blood flow. *Sci. Am.* 239, 50-59 (1978).
- Lollgen, H., Ulmer, H. V., and Nieding, G. V. Heart rate and perceptual response to exercise with different pedalling speed in normal subjects and patients. *Eur. J. Appl. Physiol.* 37, 297-304 (1977).
- Luria, A. R. "The frontal lobes and the regulation of behavior." *Psychophysiology of the Frontal Lobes.* Pribram, K. A. and Luria, A. R. ed. New York, Academic Press. 1973. p.3-26.
- Magoun, H. W. (時実利彦訳). マグーン 改訂新版 脳のはたらき, 第18刷. 東京, 朝倉書店. 1982.
- Malmo, R. B. Activation: a neuropsychological dimension. *Psychol. Rev.* 66(6), 367-386 (1959).
- 松田生米夫, 藤田信義, 渡辺 謙. 身体運動が計算成績に及ぼす効果. 体育学研究. 18(3), 135-143 (1973).
- 松波謙一, 内藤栄一. 最新 運動と脳—体を動かす脳のメカニズム—. 東京, サイエンス社. 2000. p.95-106.
- Miyai, I., Tanabe, H., Sase, I., Eda, H., Oda, I., Konishi, I., Tsunazawa, Y., Suzuki, T., Yanagida, T., and Kubota, K. Cortical mapping of gait in human: A near-infrared spectroscopic topography study. *NeuroImage.* 14, 1186-1192 (2001).
- Nielsen, H. B., Boushel, R., Madsen, P., and Secher, N. H. Cerebral desaturation during exercise reversed by O<sub>2</sub> supplementation. *Am. J. Physiol.* 277, H1045-H1052 (1999).
- Obrig, H., Hirth, C., Junge-hulsing, J. G., Doge, C., Wolf, T., Dirnagl, U., and Villringer, A. Cerebral oxygenation changes in response to motor stimulation. *J. Appl. Physiol.* 81(3), 1174-1183 (1996).
- Reilly, T., and Smith, D. Effect of work intensity on performance in a psychomotor task during exercise. *Ergonomics.* 29(4), 601-606 (1986).
- 齊藤 満. 循環システムの概観. 循環—運動時の酸素運搬システム調節—. 齊藤 満, 加賀谷淳子 編. 東京, ナッブ. 1999. p.1-40.
- Scheinberg, P., Blackburn, L. I., Rich, M., and Saslaw, M. Effects of vigorous physical exercise on cerebral circulation and metabolism. *Am. J. Med.* 16, 549-554 (1954).
- Shinoda H., and Yoshida T. (1987) Examination of arousal changes by physiological indexes during task performance. *Tsukuba Psychol. Res.* 9: 21-27.
- Sjoberg, H. Physical fitness and mental performance during and after work. *Ergonomics.* 23(10), 977-985 (1980).
- 外岡豊彦 監修, 日本・精神技術研究所編. 内田クレペリン精神検査・基礎テキスト. 第18刷. 東京, 金子書房. 2000. p.23-25.
- Spence, J. T., and Spence, K. W. The motivational components of manifest anxiety: drive and drive stimuli. *Anxiety and Behavior.* Spielberger, C. D. ed. New York and London, Academic Press. 1966. p.291-326.
- Szabo, A., and Gauvin, L. Mathematical performance before, during, and following cycling at workloads of low and moderate intensity. *Percept. Moto. Skills.* 75, 915-918 (1992).
- Tompsonowski, P. D., and Ellis, N. R. Effects of exercise on cognitive processes: A review. *Psychol. Bull.* 99(3), 338-346 (1986).
- Watanabe, E., Yamashita, Y., Maki, A., Ito, Y., and Koizumi, H. Non-invasive functional mapping with multi-channel near infrared spectroscopic topography in humans. *Neurosci. Lett.* 205, 41-44 (1996).
- Williamson, J. W., Friedman, D. B., Mitchell, J. H., Secher, N. H., and Friberg, L. Mechanisms regulating regional cerebral activation during dynamic handgrip in humans. *J. Appl. Physiol.* 81(5), 1884-1890 (1996).
- 山地啓司. 改訂 最大酸素摂取量の科学. 東京, 杏林書院. 2001. p.15-18.
- Yamashita, Y., Maki, A., and Koizumi, H. Measurement system for noninvasive dynamic optical topography. *J. Biomed. Opt.* 4(4), 414-417 (1999).
- 山下優一, 牧 敦, 山本 剛, 小泉英明. 光トポグラフィー技術の将来像. 脳の科学. 22, 1263-1268 (2000).
- Yerkes, R. M., and Dodson, J. D. The relation of strength of stimulus to rapidity of habit-formation. *J. Comp. Neurol. Psychol.* 18, 459-482 (1908).

## 要 旨

これまで身体活動と精神活動の関係性について数多くの研究がなされてきたが、それらの結果は必ずしも一致するものとは言えない。本稿では代表な認知課題の1つとして計算課題に着目し、身体運動が計算課題遂行に及ぼす影響と脳機能計測法によるメカニズムの解明に関するこれまでの知見をまとめ、以下の構成で概観した。

1. 身体運動が計算課題遂行に及ぼす影響
  - 1) 運動強度と計算成績
  - 2) 運動継続時間と計算成績
  - 3) 体力レベルと運動時の計算成績
2. 身体運動による脳の覚醒と精神活動への影響
  - 1) 逆U字仮説
  - 2) 大脳の興奮水準
3. 身体運動ならびに計算課題遂行時の神経活動と脳の血液動態
  - 1) 計算時の神経活動に対する脳の血液動態
  - 2) 運動時の神経活動に対する脳の血液動態

今後は、光トポグラフィー (NIRS topography system) を用いて前頭前野を含めた広い領域にわたり多点で同時計測することで、脳の高次制御に及ぼす運動の影響とそのメカニズムについてのさらなる研究の発展が期待される。