

有酸素運動がもつ小学生の 「認知能力向上効果」の脳科学的検証

長崎大学大学院 土居 裕和

Electrophysiological Examination of Facilitatory Effect of Aerobic Exercise on Cognitive Abilities of Elementary School Children

by

Hirokazu Doi
*Graduate School of Biomedical Sciences,
Nagasaki University*

ABSTRACT

The facilitatory effect of aerobic exercise on brain functions has been verified for adults, but it is still an open question whether aerobic exercise contributes to the development of cognitive abilities in elementary school children. To examine this issue, in the present study, we conducted two experiments. In experiment 1, the facial expression discrimination ability was compared between the elementary school children who periodically participate in aerobic activities and those who don't, but no significant difference was obtained between these groups. In experiment 2, the relation between maximum oxygen uptake ($\dot{V}O_2\text{max}$) and event-related potentials (ERPs) induced in Emotional Stroop task was analyzed. The results revealed a significant correlation between $\dot{V}O_2\text{max}$ and ERP component that presumably reflect face-specific processing. These results indicate the possibility that aerobic exercise influence elementary school children's cognitive abilities that promotes their adaptation to school environment.

要 旨

成人とくに高齢者を対象とした研究により、有酸素運動の励行が脳高次機能の向上に効果があることが明らかになりつつある。しかし、有酸素運動能力により、小学生の認知能力（社会的認知能力、自己統制能力）が向上するか否かは明らかではない。そこで、本研究では、定期的に運動プログラムに参加する小学生（運動群）と、参加していない小学生（非運動群）の表情認知能力を比較した。さらに、運動群の小学生を対象として自己統制能力課題である感情ストループ課題遂行中の脳機能活動と、有酸素運動能力の指標である最大酸素摂取量との関連性を検証した。その結果、表情認知能力には運動群と非運動群との間で差は見られなかったが、感情ストループ課題遂行中に誘発される事象関連電位成分 P210 の振幅・頂点潜時と最大酸素摂取量との間に正の相関が見出された。この結果は、有酸素運動の励行が、学校適応の基盤となる認知能力に影響を与える可能性を示唆している。

緒 言

近年、小学生の学力低下が大きな社会問題となっている。その原因に関しては様々な議論があるが、学習時間の短縮や学習内容の簡素化といった外的な環境要因に加え、「いじめ」「不登校」「ひきこもり」の増加に象徴されるような社会的認知能力の減退による学校不適応と、欲求を自制して価値のある目標実現（学習など）にとりくむ自己統制力（注意制御能力、衝動性抑制能力）の低下が一因となっている可能性が指摘されている¹⁾。これらを踏まえて、小学生の認知機能（社会的認知能力、自己統制力）向上を目的とし、医療臨床・教育現場等が一体となった学際的取り組みが数多く行なわれている。これらの試みは、臨床心理学的 SST（ソーシャルスキルトレーニング）

による社会的振る舞いの実践的指導から、バイオフィードバック法による脳の可塑性に着目した脳機能活動トレーニングプログラムまで多岐にわたる²⁾が、その効果には個人差があり、小学生の社会的認知能力・自己統制能力改善の処方箋が確立されているとは言い難いのが現状である。

成人とくに高齢者を対象とした研究により、有酸素運動の励行が脳高次機能の向上に効果があることが明らかになりつつある^{3,4)}。有酸素運動により影響を受ける機能は、記憶力・集中力から、衝動性抑制能力まで多岐に渡る。これらを踏まえると、有酸素運動の励行により、小学生の社会的認知・自己統制能力を促進し、ひいては、学力向上に繋がる可能性がある。しかし、第二次性徴がはじまる小学生高学年以降、身体は大きな変化を遂げるため、成人で得られた知見を小学生にそのままあてはめることはできない⁵⁾。一方、既に肥満児が運動プログラムに参加することで、衝動的な感情表出を抑制する能力に向上が見られたとの報告がある⁶⁾が、特殊な被験者群を対象とした研究であるため、この結果を一般化することは出来ない。

そこで、本研究では、有酸素運動の励行が小学生の社会的認知・自己統制能力ひいては学力向上に与える影響を検証する目的で、以下の2つの予備的研究を行なった。まず、研究1では、定期的に課外の陸上運動プログラムに参加している小学生（運動群）と、特別な運動プログラムに参加していない小学生（非運動群）を対象として、社会的認知能力の基盤をなす表情認知能力を比較した。両群の表情認知能力を比較することで、有酸素運動プログラムがもつ社会的認知能力向上効果を行動学的に検証した。次に研究2では、同運動プログラムに参加する小学生を対象に、感情ストループ課題⁷⁾と呼ばれる自己統制能力課題遂行中の脳機能活動測定と、運動負荷試験

による最大酸素摂取量測定を実施した。両データの関連性を分析することで、有酸素運動能力と自己統制能力との関連性を直接的に検証した。感情ストループ課題は、感情を掻き立てられ興奮している状態でも、自分の行動を冷静にコントロールする能力を測定するために用いられる課題である⁷⁾。課題では、画面上に表示された文字・色の識別など単純な認知課題が課される。これに加えて、課題とは無関係に表情などの感情誘発刺激が提示される。このような課題条件下では、認知課題に対して迅速に反応するために、感情誘発刺激に注意を逸らされないよう、自己の認知活動をコントロールする必要がある。

このように、本研究では、定期的に運動プログラムに参加する小学生と、参加していない統制群の表情認知能力を比較する。さらに、運動プログラム参加経験のある小学生を対象として自己統制能力課題である感情ストループ課題遂行中の脳機能活動と、有酸素運動能力の指標である最大酸素摂取量との関連性を検証した。これらを通じて、有酸素運動プログラムへの参加による有酸素運動能力向上が、学校適応および学力向上の基盤をなす社会的認知能力にもたらす影響を実証的に検証する。

1. 方法

1.1 研究1

1.1.1 被験者

運動群の被験者として、陸上競技クラブに参加する小学生男子9名(10.8±1.40歳)、女子4名(11.8±0.43歳)が参加した。本研究時点で実施した質問紙調査では、平日・休日を問わず、全員が2時間以上の運動を行っていた。非運動群としては、特別な運動プログラムには参加していない小学生男子9名(11.5±0.53歳)、女子9名(11.7±0.50歳)が参加した。

1.1.2 実験手続き

実験では、行動学的課題により表情認知能力評価を実施した。表情認知課題の刺激画面を図1に示す。図のように実験が始まると、画面に4つの顔画像が表示された。被験者の課題は画面中央の顔画像と同じ表情の顔画像を、画面下方の3つの表情画像から選択することであった。回答はキーボードで行い時間制限は設けなかった。

画面中央に表示される顔画像は表情(2)×表情強度(5)=計10種類の表情画像と無表情画像の計11種類であった。表情強度の異なる表情画像は、FUTONソフトウェアを用いたモーフィング加工⁸⁾により作成した。モーフィング加工は、2枚の顔画像から中間的な顔画像を生成する情報工学技術である。本研究では、モーフィング

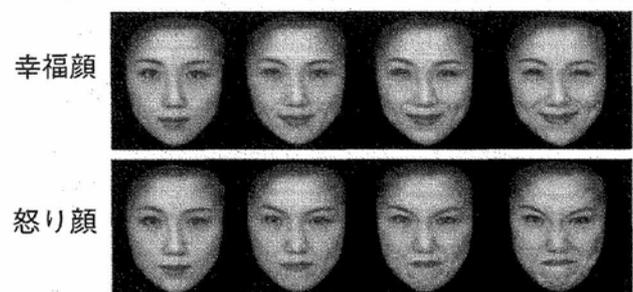
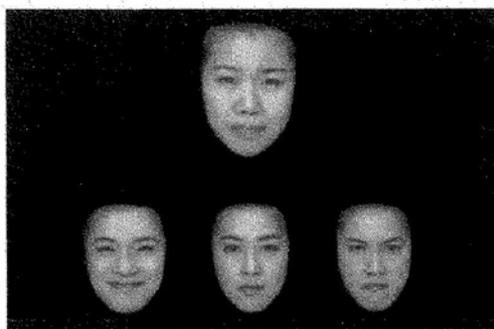


図1 実験1の刺激画面例(左)と刺激例(右)

技術を用いて無表情画像と表情画像を 80 / 20, 60 / 40, 80 / 20, 100 / 0 の割合で重ね合わせることで、感情強度が異なる表情画像を作成した。刺激として用いた表情画像例を図 1 に示す。

1.1.3 分析

分析では各表情に対する被験者の感受性を定量化する目的で、被験者の反応パターンをもとに、アンバイアスド・ヒット (以下, Hu) と呼ばれる指標を計算した。年少の児童を対象としてカテゴリ弁別反応を測定する場合、被験者の反応バイアスの影響が問題となる。表情カテゴリ弁別を取ると、被験者がどのような表情に対しても「怒り顔」であると回答する反応バイアスを示した場合、表情弁別が出来ていない場合でも怒り顔に対する正答率が不当に高くなることが予想される。Hu はこのような反応バイアスの影響を排除するために考案された指標⁹⁾であり、被験者のカテゴリ弁別能力を正答率よりも鋭敏に反応するといわれている。

1.1.4 結果

各被験者について、表情 (2) × 感情強度 (5) = 10 条件の Hu を算出した。各条件における Hu を図 2 に示す。これらの値を、運動プログラム参

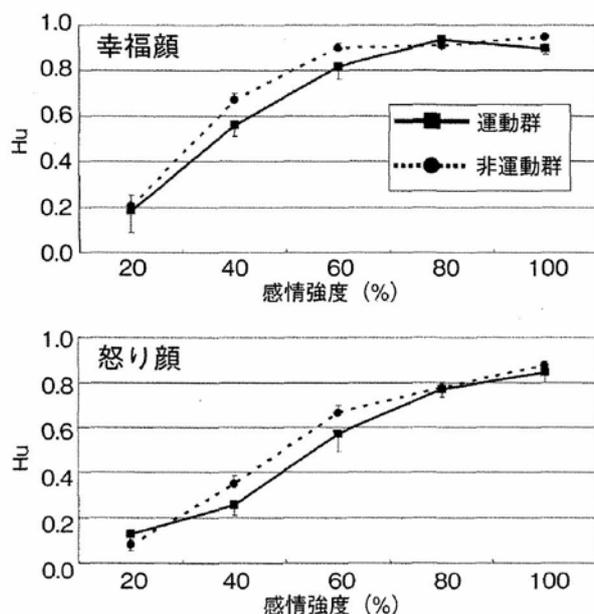


図2 各条件における運動群・非運動群のHu

加 (2) × 表情 (2) × 感情強度 (5) の 3 元配置分散分析で分析した結果、有意な効果は得られなかった, $p > .10$.

1.2 研究 2

1.2.1 被験者

陸上競技クラブに参加する男子 5 名 (10.8 ± 1.78 歳), 女子 3 名 (11.7 ± 0.56 歳)

1.2.2 実験手続き

実験では、運動負荷試験による有酸素運動能力測定と感情ストループ課題実施中の脳活動計測を実施した。各計測の詳細を以下に説明する。

1) 運動負荷実験 (最大酸素摂取量推定)

自転車エルゴメータと呼吸代謝測定装置 (VO2000, S & ME Inc, Tokyo JAPAN) を用いた運動負荷試験により被験者の最大酸素摂取量を測定した。被験者には、呼吸代謝測定装置に接続されたマスクと、無線心拍計を装着し、自転車エルゴメータを漕いでもらった。この間の呼気ガス組成と心拍数を 10Hz でサンプリングした。

運動負荷プロトコルを図 3 に示す。まず、ウォーミングアップのため、10~70watt の範囲内の楽な負荷で 3 分間エルゴメータをこいでもらった後、段階的に負荷を増加させていった (Phase1~Phase4)。負荷は、10watt からスタートして、3 分おきに 30watt ずつ増加させた。

100watt の負荷で 3 分間エルゴメータをこぐ

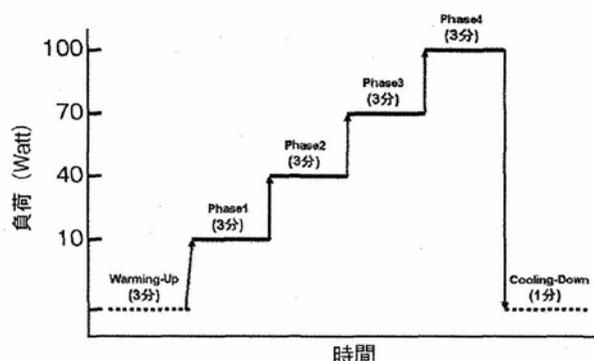


図3 運動負荷プロトコルの概略

Phase4 が終わった時点で測定は終了する。測定終了後は負荷をかけず、楽な速度で1分間クールダウンしてもらった。なお、測定中は、エルゴメーターの回転数を 50~60rpm の範囲に維持するよう教示を与えた。

2) 事象関連電位計測

(1) 感情ストループ課題

被験者は脳波計測用電極装着後、感情ストループ課題に取り組んだ。感情ストループ課題の刺激画面例を図4に示す。

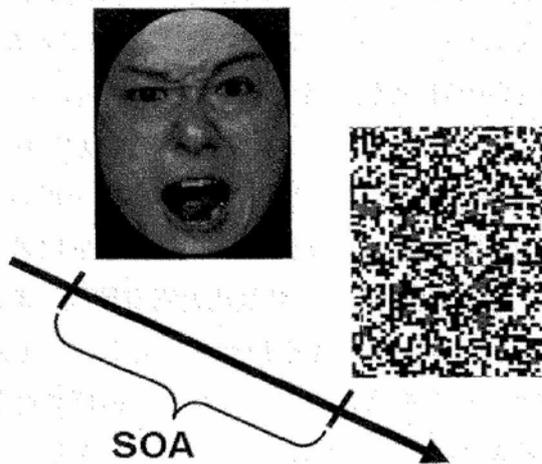


図4 感情ストループ課題の刺激例

課題が始まると、画面の中央に注視点（十字架）が表示される。注視点が表示された1秒後に同じ位置に表情画像（怒り顔、幸福顔、中性顔）が一定時間（SOA）表示される。表情画像は標準化された顔画像データベース DB99 に収録された成人男性3名女性3名の表情画像をもとに作成した。SOA は 17 ミリ秒もしくは 170 ミリ秒に設定されていた。SOA 経過後、顔画像の位置に同じ大きさのランダムドットマスクが1秒間表示された。このような刺激条件では、SOA が 170 ミリ秒の場合には刺激を意識的に知覚することが可能だが、SOA が 17 ミリ秒の場合には刺激は意識に上らない。これら表情 (3) × SOA (2) = 6 条件の実験トライアルを1ブロックの間に各 15 トライアル実施した。これを合計 2 ブロック

実施した時点で実験が終了した。

各条件の半数のトライアルでは、顔画像およびランダムドットマスクが緑色に、残りの半数のトライアルでは赤色に着色されていた。被験者の課題は、呈示される表情に関係なく、画像の色を手元のボタンで出来るだけ素早くかつ正確に回答することであった。なお、ボタンと回答（色）の対応関係は、被験者ごとにカウンターバランスをとって変化させた。

(2) 脳波計測

脳波の計測にはチャンネル脳波計 polymate (TEIAC 社製) を用いた。両耳朶平均基準により国際 10/20 法に従って配置された9つの電極 (F3/F4, C3/C4, P3/P4, Fz, Cz, Pz) から感情ストループ課題遂行中の EEG を計測した。各電極の相対的位置関係を図5に示す。

1. 2. 3 分析

1) 最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_2\max$) 分析

運動負荷試験によって得られた呼気ガス分析データと、心拍数データをもとにして、各被験者の最大酸素摂取量を推定した。心拍数と酸素摂取量に比例関係があることを利用して、外挿法により最大酸素摂取量を推定した。具体的には、まず、各負荷 (10, 40, 70, 100watt) をかけた3分間の最後の1分間における心拍数と酸素摂取量を計算する。これら4組の心拍数・酸素摂取量データを基に回帰直線を引く (図6)。一方、被験者の最大心拍数は次式により計算される。

$$\text{最大心拍数} = 220 - \text{年齢}$$

得られた回帰直線から、被験者の最大心拍数に対応する酸素摂取量を読み取り、これを最大酸素摂取量とした。

2) 事象関連電位分析

事象関連電位分析には EEGLab ソフトウェアを用いた。0.1~30Hz のバンドパスフィルタでノイズを除去した後、眼球運動アーチファクトを

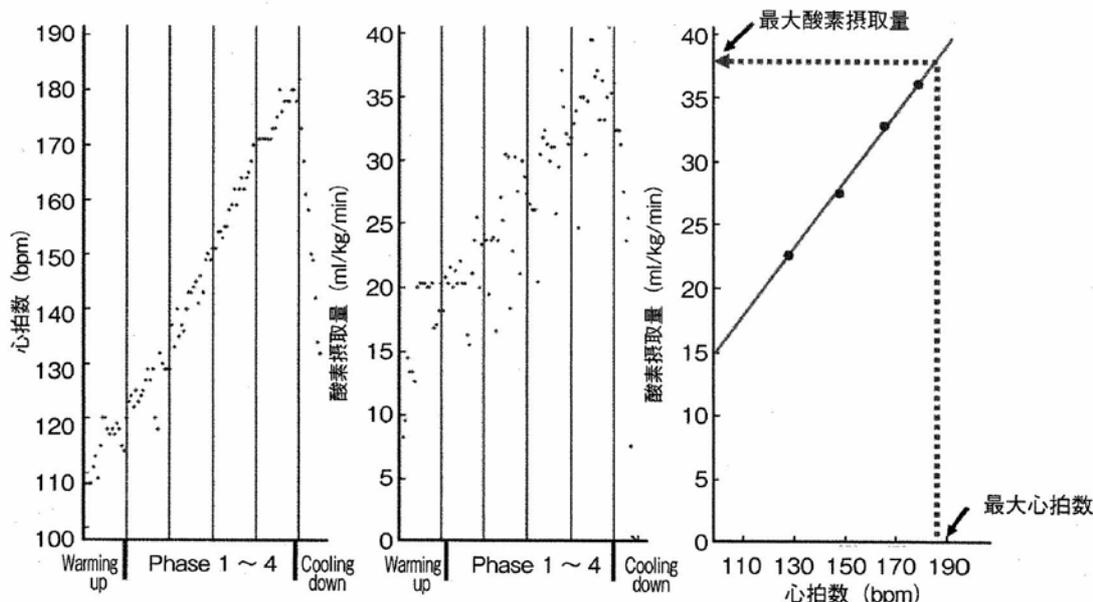


図5 外挿法による最大酸素摂取量推定の概略

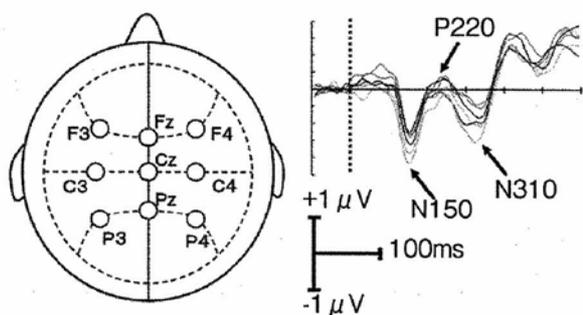


図6 電極の配置と事象関連電位波形

除去した。処理後の EEG データを基に、刺激呈示前 100ms をベースラインとした加算平均処理を行い、各条件における事象関連電位波形を算出した。

2. 結果

事象関連電位分析の結果、Fz 電極を中心として、刺激提示後 150ms 付近に頂点をもつ陰性電

位成分（以下、N150）、220ms 付近に頂点をもつ陽性電位成分（以下、P220）、310ms 付近に頂点をもつ陰性電位成分（以下、N310）からなる事象関連電位波形が得られた。Fz で記録された事象関連電位の総平均波形を図 5 に示す。

各事象関連電位成分の振幅と頂点潜時を抽出し、被験者の最大酸素摂取量との相関を分析した。各指標と最大酸素摂取量との相関係数を表 1 に示す。

（表 1 挿入）

表から明らかなように、全ての条件で P220 の頂点潜時と最大酸素摂取量との間に有意な正の相関がみとめられた、 $p < .05$ 。一方、幸福顔 -17ms 条件における P220, N310 の振幅と最大酸素摂取量との間に有意な正の相関が得られた、 $p < .05$ 。

表 1 各成分の振幅・頂点潜時と最大酸素摂取量の相関

SOA 表情		17ms			170ms		
		怒り顔	幸福顔	中性顔	怒り顔	幸福顔	中性顔
N150	振幅	-0.08	0.36	0.04	0.29	0.31	-0.06
	頂点潜時	-0.22	-0.12	-0.03	-0.06	-0.08	0.26
P220	振幅	0.04	0.64*	-0.03	0.29	0.25	-0.11
	頂点潜時	0.81*	0.70*	0.82*	0.70*	0.83*	0.75*
N310	振幅	0.32	0.65*	0.21	0.49	0.32	0.23
	頂点潜時	0.31	0.41	0.01	0.42	0.22	0.36

* $p < 0.05$

3. 考 察

本研究では、有酸素運動プログラムへの参加による有酸素運動能力向上が、学校適応および学力向上の基盤をなす社会的認知能力・自己統制能力にもたらす影響を実証的に検証することを目的とし、2つの研究を行なった。研究1では定期的に運動プログラムに参加する小学生と、参加していない非運動群の表情認知能力を比較した。研究2では、運動プログラム参加経験のある小学生を対象として自己統制能力課題である感情ストループ課題遂行中の脳機能活動と、有酸素運動能力の指標である最大酸素摂取量との関連性を検証した。

研究1で、反応バイアスを除去した行動指標を用いて、両群の表情認知能力を比較した結果、両群で有意な差は見出されなかった。一方、研究2の相関分析の結果、有酸素運動能力の指標である最大酸素摂取量が大きな児童ほど、刺激提示後約180~220ms後に誘発される陽性成分P220の頂点潜時が増大していることが明かになった。顔画像刺激呈示後約170~220ms後に後側頭部電極で誘発される事象関連電位成分をN170¹⁰⁾と呼ぶ。一方、N170誘発時に、前頭正中部電極で陽性成分VPPが記録されることが知られている。VPPの発生源については、未だ議論に決着がつかないが、N170と同じく顔画像認知を司る側頭葉腹側部の活動を反映していると考えられている¹⁰⁾。本研究で最大酸素摂取量との関連性が確認された陽性成分P220は、空間的分布と潜時帯から成人のVPPに相当する事象関連電位成分であると考えられる。したがって、本研究の結果は、有酸素運動能力と顔画像認知を司る側頭葉腹側部活動の関連性を示唆していると考えられる。一方、VPPに続いて、刺激呈示後250~350ms後に誘発される陰性成分N310振幅と最大酸素摂取量は正の相関を示した。すなわち、

有酸素運動能力が高い児童ほど、N310振幅が減少する傾向にあった。この原因は定かではないが、有酸素運動能力の高い児童では、増大したVPP (P220) 振幅とN310振幅の重畳により、見かけ上のN310振幅減少が起こった可能性が考えられる。

このように本研究では、定期的に運動プログラムに参加している児童において、有酸素運動能力と顔認知処理を反映する事象関連電位成分振幅との間に相関が見られた一方で、顔認知処理を含む表情認識課題においては、運動群と非運動群との間に差は見出されなかった。この一件矛盾する結果が得られた原因としては、行動指標と生理指標が反映する処理ステージの違いがあげられる。行動学的指標が、反応までに行なわれた一連の認知処理を総合的に反映した指標であるのに対し、事象関連電位成分は、反応生成までの各処理段階を個別に反映している。例えば、感情ストループ課題において、被験者が反応を行なうまでには、刺激の視覚認知処理、選択的注意、意思決定など複数の認知処理が行なわれるが、VPP (P220) が反映するのはこのうち視覚認知処理段階のみである。これらを踏まえて考えると、行動指標を用いた場合には、各処理段階に対する有酸素運動の効果が相殺されてしまうため、運動プログラム参加の効果が検出できなかった可能性がある。運動プログラム参加の効果が見られなかったもう一つの原因として、運動群と非運動群に含まれる被験者の不均一性が上げられる。今回の研究では、被験者に一定の運動プログラムを課し、その効果を継時的に観察する縦断的研究デザインではなく、定期的に運動プログラムに参加している運動群とそうでない非運動群の横断的比較を行なった。これは、児童に運動プログラムのプロトコルを継続的に守らせることが困難なため、既に運動プログラムに参加しており、運動経験の蓄積が

ある児童と非運動群とを比較することでより信頼性の高い知見が得られると判断したためである。しかし、横断的研究デザインを採用した結果、群間比較においては、運動プログラムの効果以外の要因が交絡する結果となった。これにより、本来得られたであろう運動プログラムの効果が検出できなくなった可能性がある。今回の研究1に運動群として参加した児童はその後にも継続的に同運動プログラムに参加している。研究1の被験者を対象に、再度表情認知計測を実施し、今回報告する研究の時点からの成績変化を群内で比較することで個体間要因を排除し、より詳細に運動プログラムの効果を検証する予定である。

総括

本研究では、有酸素運動プログラムへの参加による有酸素運動能力向上が、学校適応および学力向上の基盤をなす社会的認知能力・自己統制能力にもたらす影響を実証的に検証した。その結果、有酸素運動能力の向上が、顔認知を司る脳機能活動を特異的に向上させる可能性が示唆された。今後、本研究に参加した被験者の課題成績・脳機能活動を縦断的に追跡することで、有酸素運動の励行による社会的認知機能向上効果に関してより信頼性の高い知見が得られるものと期待される。

謝辞

ATR DB99 データベースは ATR Promotions の許諾を得て使用した。本研究に対して助成を賜りました財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。

文献

- 1) 櫻谷明美・澤井セイ子・桂田恵美子: 小学校5年生の向社会性と自己統制力の育成を目指した教育実践に関する研究. 秋田大学教育文化学部研究紀要 教育科学部門, 61, 1-8(2006)
- 2) Rueda M.R., Rothbart M.K., McCandliss B.D., Saccomanno L, Posner M.I.: Training, maturation, and genetic influences on the development of executive attention. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102, 14931-14936(2005)
- 3) Kramer A.F., Erickson K.I.: Capitalizing on cortical plasticity: influence of physical activity on cognition and brain function. *Trends in Cognitive Sciences*, 11, 342-348(2007)
- 4) Hillman C.H., Erickson K.I., Kramer A.F.: Be Smart, Exercise Your Heart: Exercise Effects on Brain and Cognition. *Nature Reviews Neuroscience*, 9, 58-65 (2008)
- 5) Best J.R., (in press) : Effects of physical activity on children's executive function: Contributions of experimental research on aerobic exercise. *Developmental Review*
- 6) Tkacz J., Young-Hyman D., Boyle C.A., Davis C.L.: Aerobic exercise program reduces anger expression among overweight children. *Pediatric Exercise Science*, 20, 390-401(2008)
- 7) Putman P., Hermans E., Van Honk J.: Emotional stroop performance for masked angry faces: It's BAS, not BIS. *Emotion*, 4, 305-311(2004)
- 8) Young A.W., Rowland D., Calder A.J., Etcoff N.L., Seth A., Perrett D.I.: Facial expression megamix: Tests of dimensional and category accounts of emotion recognition. *Cognition*, 63, 271-313(1997)
- 9) Wagner H.L.: On measuring performance in category judgment studies of nonverbal behavior. *Journal of Nonverbal Behavior*, 17, 3-28(1993)
- 10) Joyce C., Rossion B.: The face-sensitive N170 and VPP components manifest the same brain processes: The effect of reference electrode site. *Clinical Neurophysiology*, 116, 2613-2631(2005)