

上肢運動学習が自律神経系に与える影響

Effect of the autonomic nervous system onto the upper limb motor learning in humans

三好扶^{1,2}, 工藤悠太郎², 小池飛鳥², 萩原義裕¹
Tasuku MIYOSHI^{1,2}, Yutaro KUDOH², Asuka KOIKE², Yoshihiro HAGIHARA¹

¹岩手大学 工学部 機械システム工学科 バイオ・ロボティクス部門

²岩手大学 工学部 福祉システム工学科 福祉基盤工学分野

¹Department of Mechanical Engineering, Iwate University

²Department of Welfare Engineering, Iwate University

キーワード : mono-articular muscle, bi-articular muscle, activity level, recruitment pattern, preferred direction

連絡先 : 〒020-8551 盛岡市上田 4-3-5 岩手大学工学部機械システム工学科
三好扶, Tel&Fax: 019-621-6357, E-mail: tmiyoshi@iwate-u.ac.jp

1. はじめに

オリンピックゲームなど対戦者・試合に勝利するには、競技力向上のための運動学・運動力学に関するパフォーマンス向上と、精神（メンタル）活動とが関与することは疑いない。パフォーマンス向上は、例えばデルフィリン欠損ラット小脳では、運動学習が短時間で亢進することを報告している¹⁾。一方、精神活動は情動が関与するため、大脳皮質以下の扁桃核・視床下部の働きに寄与するところが大きいため、その活動動態を精査することが極めて困難である。競技力向上に向けた運動学習における精神活動動態は、学習者本人にとって精神的なストレス、つまり、精神活動そのものがストレスとなり得る。何より、精神活動が非言語的活動であることから、動物実験によって得られる物質や経路、またはその働きがそのまま人間に当てはまるのか？という疑問が生じる。

ストレス反応系は(1)副腎皮質ホルモンを介する HPA 系(hypothalamic-pituitary-adrenocortical system)と、(2)ノルエピネフリンを介する SAM 系(sympathetic-adrenal-medullary axis)の 2 系統が担う。運動学習とストレス反応系の関係について、Miyata らはラットの実験により運動学習中に HPA 系の最終端である副腎皮質を刺激するよう、CRH (コルチコトロピン放出ホルモン)

が不可欠であることを報告している²⁾。CRH は下垂体前葉にて ACTH(副腎皮質刺激ホルモン)の分泌を促し、最終的に副腎皮質を刺激する。従って、HPA 系の最終分泌物であるグルココルチコイドが運動学習において何らかの影響を持つことが予想される。もう 1 つのストレス反応系である SAM 系では、アドレナリン、ノルアドレナリンなどの神経伝達物質が分泌され、心拍や血圧が上昇する(運動学習で心拍が上昇する)。これら一連のストレス反応は唾液中に分泌される アミラーゼと強い相関を持つことが報告されている³⁾。

そこで、本研究では上肢運動学習中における唾液アミラーゼ、コルチゾールの 10 分間隔での含有量変化(急性変化)と、80 分間にわたる含有量変化(準急性変化)について調べ、ヒト上肢運動学習にストレス反応系が関与するか否かについて、実験的に検証する。

2. 方法

2.1 被験者

右利きの健常男性被験者 9 名を対象とし、上肢運動学習課題として 3 個のボールを左右交互に投げ上げるカスケードスジャグリングを実施した。なお本実験は岩手大学倫理審査委員会にて承認を得、各被験者には実験趣旨を文書・

口頭で説明し、実験参加の同意を得た。

なお、実験開始前に被験者9名中4名はカスケードトスジャグリングを30秒以上実施できることが確認されたことから、この4名については1分間以上連続してカスケードジャグリングが達成できた場合にのみ成功報酬を渡すことで運動学習に対する動機付けを行なった。

2.2 実験プロトコル

唾液検体は摂取物の影響を、また自律神経系の活動は睡眠時間など日常生活の影響を強く受ける。そこで実験日の前日19:00までに夕食を摂り、夕食後から就寝までは水のみ摂取、23:00就寝、当日7:00起床、8:00朝食、9:30実験準備(安静座位)、10:00実験開始とした。実験開始時に唾液検体を採取し、これをコントロールとしてその後の解析を実施した。1回の運動学習時間を10分、1回の休憩時間を10分とし、これを休憩、学習の順に3セット、最後に休憩10分で終了とした。唾液検体は各学習、休憩時間の終了直後の計8回採取した。

2.3 データ解析

唾液アミラーゼは採取した唾液検体を遠心分離し(3000 rpm, 15 min)、上清をリン酸緩衝生理食塩水で100倍に希釈しエスパ AMY リキッド II (NIPRO株)と分析装置(Compolyse-450, NIPRO株)によって測定した。唾液コルチゾールは同様に上清をコルチゾール測定キット(Cortisol EIA Kit, Salimetrics LLC)と蛍光プレートリーダー(Wallac 1420ARVO MX/Light, パーキンエルマー・ジャパン株)を用い光学濃度450 nmによって測定した。なお、唾液コルチゾール濃度は式(1)より算出した。

$$OD = \frac{(2.19 - 0.0346)}{1 + (Cort./0.263)^{1.07}} + 0.0346 \quad (1)$$

($OD=450$ nm, $Cort.$: 唾液コルチゾール濃度)

唾液アミラーゼ、唾液コルチゾールそれぞれの急性変化、準急性変化を調べるため、急性変化については「(学習)/(直前の休憩)、(直後の休憩)/(学習)」における濃度変化を算出した。準急性変化については変動係数を算出し、実験開始時の変動係数に対しての変化を算出した。急性変化の差異は Student t-test により有意水準5%で検定した。

3. 結果と考察

Fig. 1は唾液アミラーゼ(A)、唾液コルチゾール(B)それぞれの急性変化の様子を(運動学習遂行時/直前の休憩時)(直後の休憩時/運動学習遂行時)として比率で示した。比率で示した意味は、唾液アミラーゼ、唾液コルチゾールが各被験者によって含有量あるいは相対的な濃度変化が異なることによる。

唾液アミラーゼ、唾液コルチゾールともに、休憩時に比べ課題遂行時には高い比率を示すことが予想されたが、実験の結果、唾液アミラーゼでは課題遂行時に有意に高い比率を示したことに対し、唾液コルチゾールでは有意な変化が認められなかった。このことから、運動学習における自律神経系の影響は、HPA系、SAM系それぞれに対し異なる効果を持つとわかり、実

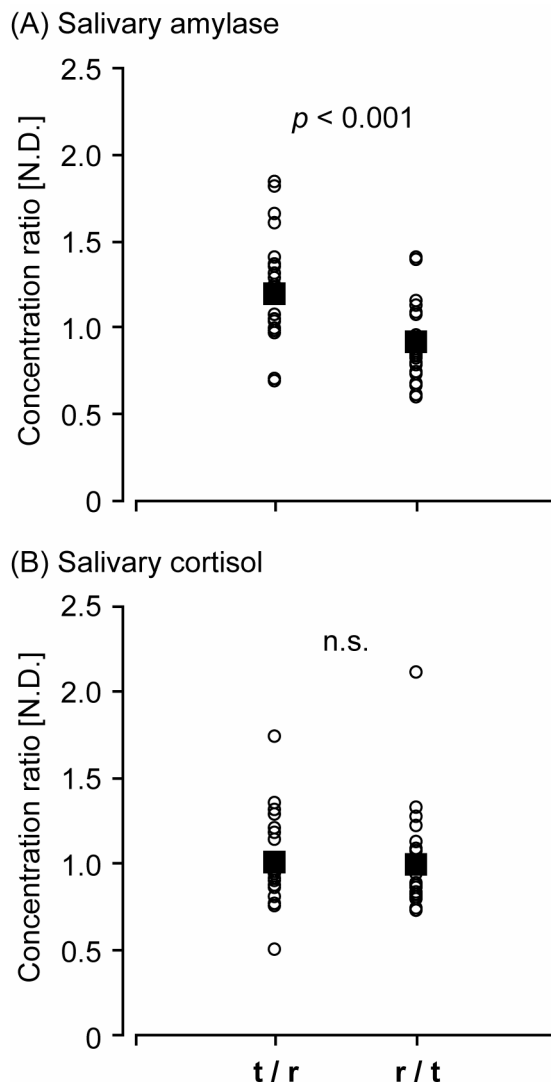


Fig. 1 Acute concentration changes in salivary amylase and cortisol between trial and rest phases.

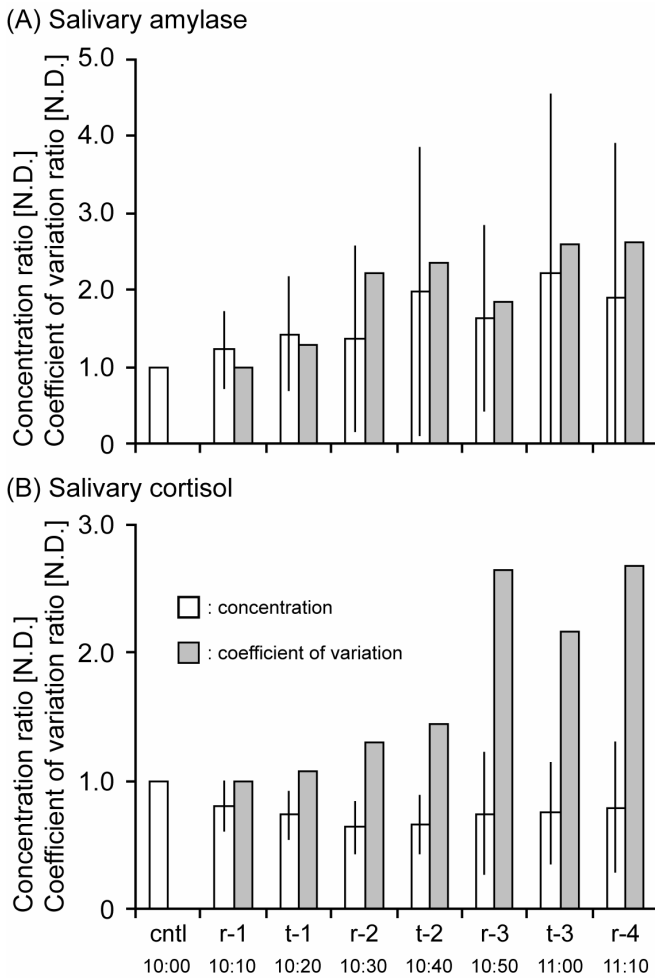


Fig. 2 Quasi-acute concentration changes in salivary amylase and cortisol compared with those of control variables (white bar), and phase-to-phase changes in coefficient of variation (gray bar).

際の経路も異なることから、ノルエピネフリンを介する SAM 系は運動学習における急性期での修飾効果を示し、HPA 系に対しては運動学習による急性変化が与える効果は小さいと言える。

Fig. 2 は唾液アミラーゼ、唾液コルチゾールの濃度変化について、運動学習時および休憩時それぞれの計測値をコントロールに対する相対値として経時変化（準急性変化）を示した。また、変動係数は最初の休憩時（r-1）に対する相対変化として示した。唾液アミラーゼは濃度変化が経時的に増大傾向にあるが、唾液コルチゾールは実験開始後 30 分まで減少し、その後若干の増大傾向にあるものの全体を通してコントロールまで戻ることにはなかった。一方、唾液アミラーゼ、唾液コルチゾールともに標準偏差は増大傾向にあり、特に実験開始後 20-30 分を境界とし飛躍的に増大する傾向が認められた。この様子は変動係数にも表れており、実験開始後 30

分、r-1 から見ると 20 分後より変動係数は顕著に増大していることが分かる。

唾液アミラーゼについて、Van Stegeren らは SAM 系には(1)ノルアドレナリンからの直接修飾を受け唾液アミラーゼを分泌する経路と、(2)副腎髄質でのノルエピネフリン分泌を受けて唾液アミラーゼを分泌する 2 系統の活動動態が報告している⁴⁾。それぞれの経路について、唾液アミラーゼの濃度変化が表出するには、直接修飾経路で 1-10 min、副腎髄質を介する経路で 20-30 min である。本実験結果について、Fig.1A に示した運動学習と休憩時との変化率は直接修飾経路での反応時間と合致し、Fig.2A に示した実験開始後 20-30 分での唾液アミラーゼ濃度の標準偏差の急激な増加に合致する。

唾液コルチゾールについて、Chatterton らは HPA 系での唾液コルチゾール濃度変化経路は 20-30 min を要することを報告した³⁾。本実験結果より、Fig.1B に示した運動学習と休憩時との変化率は 10 分間での急性変化であり、この時定数は唾液コルチゾール分泌に影響を与えないと理解され、一方、Fig.2B に示した実験開始後 20-30 分での唾液コルチゾール濃度の標準偏差の急激な増加が副腎皮質を介した活動動態となる。従って、運動学習では SAM 系の 2 系統、および HPA 系の自律神経系活動あるいはストレス反応が惹起されると理解され、運動学習効果の向上にストレス系反応あるいは精神活動が強く影響すると示唆される。

3.3 今後の展望

近年、カスケードトスジャグリングの習熟により大脳皮質灰白質領域の構造的変化が生じることが報告された^{5,6)}。ここで、灰白質領域の構造的変化とは MRI 画像中に占める灰白質領域の面積が増大した結果を指すが、一般に脳細胞数は増加することはないため、灰白質領域の面積増大は細胞数の増加ではなく、自律神経系のシナプス結合あるいは軸索の延伸によると想定できる。

一方、カスケードトスジャグリングは上肢によって達成される運動課題であるが、このとき下肢の働きに焦点を当てると、カスケードトスジャグリングの習熟により、因果関係は不明ではあるものの、立位姿勢能の向上が報告されている⁷⁾。下肢が抗重力を達成しつつ上肢は独立な運動課題を達成するとき、この状態はデュアルタスクと呼ばれるが、下肢は地球の重力に抗

して立位姿勢を安定に保持しつつ、上肢では全く別の課題を行うことになる。先行研究^{5,6,7)}より、仮に上肢運動課題における操作感覚などの体性感覚フィードバックを賦活する、つまり生体情報を力覚フィードバック制御系のパラメータとして利用することができれば、大脳皮質灰白質の構造的変化が期待でき、認知症予防や関節拘縮予防につながるシステム構築ができると示唆される。同時に、運動神経系と自律神経系の制御機序を解明することにもつながるシステムとなり得る。

この観点に立ち、現在我々はヴァーチャルリアリティ技術援用を基本とした、マスタースレーブシステムによってデュアルタスク課題の操作感覚のみを高齢者らにフィードバックするシステムを構築している (Fig. 3)。今後更なる研究は必要であるが、このシステムでは実際にデュアルタスク課題を習熟していなくても立位姿勢能の向上が期待でき、以って高齢者の QOL、ADL 向上を促しつつ高齢化社会環境の改善・充実を図ることが期待される。

4. まとめ

上肢運動学習に対するストレス応答系の自律神経系活動を唾液アミラーゼ、唾液コルチゾールによって実験的に調べた結果、SAM 系、HPA 系の自律神経系活動が運動学習効果の向上に必要となることが示された。また、運動学習に必要な CRH から ACTH、最終到達点である副腎皮質の経路がラットだけでなくヒトでも賦活されることが示された。

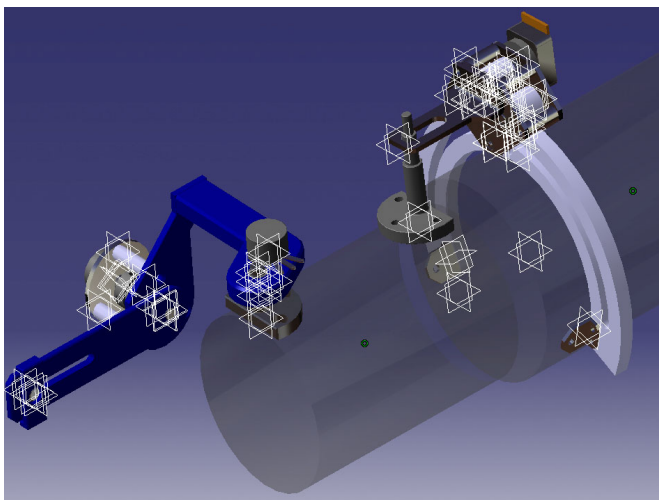


Fig. 3 Master-slave system for dual task motor learning in upper limb.

神経制御系の時間遅れ要素を考慮しても、本実験結果で得られた唾液アミラーゼ、唾液コルチゾール濃度変化は妥当であり、運動学習効果の向上にストレス系反応あるいは精神活動が強く影響すると示唆された。

謝辞

本研究の一部は、財団法人日揮・実吉奨学会平成 21 年度研究助成金によって実施した。記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 平野丈夫, 小脳による学習機構についての包括的研究, 戦略的創造研究推進事業 C R E S T 研究領域「脳の機能発達と学習メカニズムの解明」研究終了報告書, (2009).
- 2) M. Miyata, D. Okada, K. Hashimoto, M. Kano, and M. Ito: Corticotropin-releasing factor plays a permissive role in cerebellar long-term depression. *Neuron*, 22(4), 763/775, (1999).
- 3) R.T.J. Chatterton, K.M. Vogelsong, Y. Lu, A.B. Ellman, and G. A. Hudgens: Salivary alpha-amylase as a measure of endogenous adrenergic activity. *Clinical Physiology*, 16, 433/448, (1996).
- 4) A.H. Van Stegeren, O.T. Wolf, M. Kindt: Salivary alpha amylase and cortisol responses to different stress tasks: Impact of sex. *International Journal of Psychophysiology*, 69, 33/40, (2008).
- 5) B. Draganski, C. Gaser, V. Busch, G. Schuierer, U. Bogdahn, A. May: Neuroplasticity: changes in grey matter induced by training. *Nature*, 427(6972), 311/312, (2004).
- 6) J. Driemeyer, J. Boyke, C. Gaser, C. Buchel, A. May: Changes in gray matter induced by learning—revisited. *PLoS ONE*, 3(7), e2669, (2008).
- 7) D. Leroy, R. Thouvaecq, G. Gautier: Postural organisation during cascade juggling: influence of expertise. *Gait Posture*, 28(2), 265/270, (2008).