

原 著

投球動作時の姿勢筋の疲労回復にともなう姿勢協同筋活動の経時的変化

The time course of postural synergistic activities during recovery from fatigue of the postural muscles on throwing movement in a standing position

伊東太郎¹⁾ 南本裕介¹⁾ 渡邊完児²⁾ 井上芳光³⁾ 山下謙智⁴⁾

Taro Ito¹⁾ Yusuke Minamoto¹⁾ Kanji Watanabe²⁾ Yoshimitsu Inoue³⁾ Noriyoshi Yamashita⁴⁾

Abstract

The purpose of the present study was to elucidate the time course of changes in task performance and electromyographic (EMG) activities of postural synergistic muscles involved in the anticipatory postural adjustments (APA) associated with a task of throwing a 2-kg load underhanded as fast as possible during recovery from postural muscle fatigue. Eleven healthy adults performed throwing movement before and after concentric-eccentric contractions (30% MVC weight) of the bilateral tibialis anterior muscles (TA) sustained to exhaustion. The throwing velocity and EMG amplitudes of the postural synergistic muscles (TA, long head of m. biceps femoris (BF), and m. erector spinae at the level of L4 (ES)) in the APA were recorded to assess APA recovery from fatigue using a recovery-time histogram every 45 sec. EMG activity of the TA muscle immediately after dorsiflexion sustained to exhaustion disappeared during the throwing movement. In contrast, the EMG activities of ES ($P = 0.007$) and BF ($P = 0.272$) increased with TA muscle inactivity. After 45-sec recovery, these EMG discharge patterns and amplitudes were restored to those of the control trials without performing a fatigue protocol. The reduced throwing velocity returned to the non-fatigue level 225 sec after the termination of the fatigue protocol. These findings indicated that this specific muscle activation pattern between postural synergistic muscles, i.e., alternate muscle activity, compensated for the impaired TA muscle activity. In conclusion, these results suggested that the central nervous system had the ability to inactivate exhausted postural muscles and selectively recruit other postural synergistic muscles in order to maintain high-level task performance and postural stability.

キーワード 先行随伴性姿勢調節、投球動作、姿勢協同筋、疲労回復、経時的変化

Anticipatory postural adjustments, Throwing movement, Postural synergist, Recovery from fatigue, Time course

1) 大阪青山大学 健康科学部 健康栄養学科

Department of Health Sciences, Osaka Aoyama University

2) 武庫川女子大学 文学部 健康・スポーツ科学科

Department of Health and Sports, Mukogawa Women's University

3) 大阪国際大学 人間科学部 スポーツ行動学科

Laboratory for Human Performance Research, Osaka International University

4) 運動科学研究所

Institute of Movement Science

1. 緒言

野球の試合中、スピードボールを投じて次々と三振を取っていくピッチャーが、攻守交代し自らの打席でヒットを打ち全力疾走をした後、次のインニング投球時でのボールスピードの低下あるいは制球の乱れから逆にバッターに打ち込まれるという場面がよくみられる。この事例は、投球パフォーマンスには上肢および上肢帯筋群の主動筋活動だけでなく、体幹および下肢筋群の姿勢筋活動も深く関与していることを示唆していると考えられる。

安静立位姿勢から片上肢アンダーハンドでの素早い前方挙上運動あるいは投球運動を開始すると、主動筋である三角筋前部の筋活動開始に先行して、両側の前脛骨筋 (Crenna and Frigo, 1991)、挙上肢と同側の大腿二頭筋および対側の脊柱起立筋などの体幹・下肢筋群 (Belen'kii et al., 1967) の活動が出現する。この筋活動は、上肢の運動で生じるであろう重心動揺を上位中枢が見積もって先に抑える、先行随伴性姿勢調節 (anticipatory postural adjustments; APA) に参画するものと解釈されている。そして、この姿勢筋のAPA活動にはパフォーマンス自体を増大させる効果もあることが指摘されてきた (Lee et al., 1987; Massion, 1992; 伊東たち, 1997; Ito et al., 2004; Azuma et al., 2007; 東たち, 2008)。

姿勢筋を疲労させてAPA活動の変化をみた研究は多い (Allison and Henry, 2002; Morris and Allison, 2006; Bove et al., 2007; Kanekar et al., 2008; Strang et al., 2008; Yiou et al., 2009)。例えば大腿二頭筋あるいは脊柱起立筋の姿勢筋を疲労させてから片上肢挙上運動を実施した場合、疲労した姿勢筋のAPA活動は、より早期から活動を始めることが報告されている (Kanekar et al., 2008)。しかし、疲労運動終了後の回復時間を正確に明記した研究や回復過程を経時的に追究した研究はみあたらない。また、疲労させた姿勢筋活動を疲労前と比較する研究が多くみられるが、疲労していない他の姿勢筋の活動様相、すなわち姿勢協同筋間の相互作用 (postural synergy) には焦点が当てられていない。また、姿勢筋の疲労を考察する上で必要となる、動的

運動中の姿勢筋の代謝動態についてはほとんど解明されていない。

本研究では、被験者に姿勢筋である両側の前脛骨筋を疲労困憊まで至らせた後、立位から踵を前方へ全力投球させた際の投球パフォーマンスと主動筋ならびに姿勢協同筋のAPA活動の回復過程を検討しようとした。また、回復過程から姿勢筋の代謝特性を論議しようとした。

2. 方法

被験者は、運動習慣のない健康な大学生11名 (男性5名・女性6名) とした。被験者の身長は 164.1 ± 9.1 (mean \pm SD) cm、体重は 59.4 ± 8.6 kgであった。被験者全員とも神経・筋系、循環器系および消化器系に関する疾病および既往症は全くなかった。被験者には実験の趣旨から実験の安全性まで、また個人情報保護を含めた実験データの取り扱いなど詳細な文書資料を基にした約1時間の説明会を実施した上で、実験に参加してもよいとする者を対象とし、同意書にて承諾をとった。

2.1 実験前のトレーニングと予備実験

投球実験内で課す、疲労運動課題 (図1参照) に慣れさせるため、本実験開始2週間前から、被験者には隔日の頻度で前脛骨筋の疲労困憊までの運動を経験させた。実験前の疲労運動課題は、器具 (レッグ・ディベロッパー, ALEX社) を用い、被験者の筋力に合わせて5~10kgの負荷で、足背屈-底屈動作を繰り返させ、前脛骨筋を疲労困憊に至らせた。また、実験1週間前に、本実験と同様に筋電図や床反力などを記録する予備実験を実施し、全被験者ともに投球動作 (試行数は約50本) に慣れさせた。同じく、実験1週間前に、被験者には長座位姿勢で足関節角度90度での等尺性の最大足背屈筋力 (maximal voluntary muscle contraction; MVC) を測定した。投球実験本番では、各被験者の約30% MVCの負荷をレッグ・ディベロッパーに取り付けて、被験者に足背屈-底屈運動を繰り返させ、前脛骨筋を疲労困憊に至らせた (図1)。

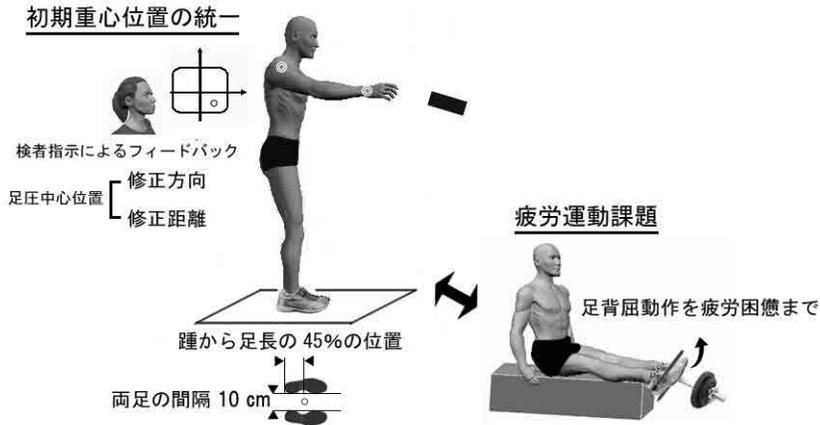


図1：投球動作（左）および疲労運動課題（右）における実験設定図

2.2 食事操作手順と体調管理

動的運動中の姿勢筋の代謝動態について論議を進める上で、特に筋グリコーゲン貯留量は食事内容によって大きく左右される (De Bock et al., 2007)。したがって、被験者には管理栄養士の指導のもと一定のPFC比 (総摂取エネルギーに占める、たんぱく質、脂質、炭水化物のエネルギー構成比) の食事を投球実験までの5日間にわたり摂取させた。熱量は被験者の身体活動レベルを男子はⅠ、女子はⅡに設定して、日本人の食事摂取基準2005年版に準じて身体活動レベルと個々の体重により推定エネルギー必要量を算出した。PFC比は、たんぱく質12%・脂質20%・炭水化物68%の食事が供給された。このPFC比は、前もって実施した食物摂取頻度調査 (FFQ) より被験者の日常の食事内容に配慮したため、日本人の平均値 (たんぱく質13.0%・脂質28.9%・炭水化物58.1%：農林水産省「食料需給表：国民1人・1日当たり供給熱量及びPFC熱量比率の推移 (2009年8月公表)」) より、脂質を減らし炭水化物を多く摂らせる設定となった。ビタミン・ミネラル・食物繊維は日本人の食事摂取基準の目安量に準じて算出した。また、ビタミンとミネラルの摂取量について、1日ごとに栄養計算で摂取量を算出し、不足している日は目安量を上回るようにサプリメントを摂取させた。サプリメントについては、マルチ

ビタミン・鉄・カルシウム (いずれも大塚製薬) の錠剤を経口摂取させた。

食事の提供方法について、朝食は前日に被験者に材料を渡したうえ指定したレシピとメニューどおりに自宅で調理させ、昼食、夕食と間食は大阪青山大学の集団給食経営管理実習室で検者が調理したものを提供した。また、前述のとおり被験者の普段の食事内容を把握するためFFQを実施し、普段の食事の偏りあるいは嗜好を考慮し、被験者に負担のかからないよう献立を作成した。

食事操作による体重変動等を管理するため、毎日同時刻に体重ならびに体組成についてインピーダンス式体組成計 (BC-118D, TANITA) を用い測定した。あわせて食事操作時の自律神経系活動の状態を間接的にみるために心拍変動 (heart rate variability: HRV) を測定した (SA-3000P, Medicore Co., Ltd., Korea)。HRVは、安静椅座位で3分間記録された指尖部脈拍のパワースペクトル分析により求め、HRV信号を構成する各周波数パワーのうち高周波数領域に対する低周波数領域のパワー比 (LF/HF) を算出し、交感神経機能の指標として用いた。投球実験当日まで食事操作によって、精神的あるいは身体的に体調の支障をきたさないことに万全の注意をはらった。

2.3 投球実験の手順とデータ記録

食事操作5日目に投球実験を実施した。実験は、食事終了から約2時間を空けて実施した。実験時の動作課題は、安静立位姿勢からできるだけ速く右上肢(利き手)を挙上し、2kgの錘玉(直径6cm×長さ15cmの円柱状のソフトアレイ, KENSHO)を約15試行(約15~20秒間隔)、アンダーハンドで前方へ全力で投げさせることであった。投球の各試行に先立ち、被験者を床反力計(OR6-6-2000, AMTI)の上に立たせ(足の位置は左右平行、間隔は10cm)、各試行前に必ず初期重心位置を一定の安静位(踵から足長の45%の位置; Murray 1975)に規定するよう、検者が足圧中心位置をX-Yプロッターで確認しながら指示した(図1参照)。一定の初期重心位置に静止してから、被験者自身のペースで錘玉を全力で投げさせた。3m前方に2m×2mの投球目標マットを設置したが、正確性よりも最大努力で投げることを優先するように指示した。

投球実験は、前脛骨筋の疲労前と後に実施した。疲労前後の実験間には5分の休憩がはさまれた。姿勢筋の一つである前脛骨筋は、前述した通り、被験者に約1Hzのリズムで随意で短縮-伸張性収縮を繰り返させ、疲労困憊に至らせた(疲労運動課題: 図1参照)。前脛骨筋の疲労は、オールアウト後すぐには立位姿勢を保てない状態であったが、オールアウト後15秒以内に検者の補助により床反力計上に立たせた。

筋電図(EMG)信号は、電極幅10mm・電極間隔10mmのプリアンプのついたパラレルバー式双極表面電極(NM-512G, 日本光電)を消毒用エタノールで脱脂した筋腹に貼付し、表面電極誘導法により右側の三角筋前部、前脛骨筋と大腿二頭筋長頭および左側の脊柱起立筋(L4レベル)から導出した。マルチテレメーターシステム(WEB-5500, 日本光電)で受信した信号はA/D変換器を経てパーソナルコンピューター(PC)に500Hzでサンプリングされた。

EMGとともに、発光ダイオードLEDを用いたポジションセンサ・カメラセット(C5949, 浜松ホトニクス)により、肩峰角(肩峰部)と橈骨

茎状突起(手根部)の水平・鉛直変位を500HzでPCに取り込んだ。

同時に床反力から3軸方向の力ならびにモーメントを記録し、水平軸周りのモーメントを鉛直方向にかかる力で除すことで、矢状方向の足圧中心位置(CoP)を算出しPCに500Hzで取り込んだ(図2参照)。

また、右手5指すべてと投球用錘玉であるソフトアレイとの接点がなくなった瞬間(投球時のリリース瞬間)に電気信号を検出できるように、特製の手袋を用いて電気回路を作製し、リリース信号をEMG信号や足圧中心位置などと同期しPCに記録した。

2.4 データ解析

PCに取り込まれたEMG信号は、20-250Hzのバンドパスフィルターを施し、全波整流した後、筋放電量が分析された。

前脛骨筋、大腿二頭筋および脊柱起立筋のAPA時の筋放電量は、Latashグループの方法に準じ以下の通り算出した(Aruin and Latash, 1995)。

1. 主動筋である三角筋前部の放電開始を t_0 として、 t_0 の100ms前から t_0 の50ms後の150ms間のAPA局面における放電量を測定。
2. 背景筋電図について t_0 の650ms前から500ms前までの150ms間の持続放電量を測定。
3. 1から2の値を差し引き「APA筋放電量」として算出。

なお、APA筋放電量は、疲労前の投球時データのうち手根部速度の高い10試技をピックアップし、その平均筋放電量を100% controlとして正規化した。

主動筋である三角筋前部の筋放電量は、放電開始からリリースまでの放電量積分値を求め、疲労前の投球時における各被験者の最速の手根部速度を得た試技の筋放電積分値を100として正規化した。なお、三角筋のEMG活動の開始時点は、背景筋電図の持続放電量の1.5倍以上の筋放電を示した時とし、それを t_0 とした。

両側の前脛骨筋のEMGは疲労運動課題中も記録され、足背屈動作について開始3回（レップス）分と疲労困憊前3レップス分の前脛骨筋の筋放電量平均振幅と平均周波数（mean power frequency：MPF）を算出し、運動開始時と終盤とのデータ比較により疲労状況を検討した。MPFは高速フーリエ変換による表面筋電図周波数解析により算出した。なお、疲労困憊時の前脛骨筋放電終了から各試行のt0までを、回復時間（Rt）として測定した。

アンダーハンド投球運動では主動筋活動に先行して後方へCoPが移動する（Crenna and Frigo, 1991）ため、CoP移動開始から三角筋前部の放電開始t0までのCoPの時間積分値をCoP活動量（図2の足圧中心位置の網かけ部分）として求めた。肩峰部LEDセンサーの位置を基準として、手根部のLEDセンサーのX方向（前後）とY方向（上下）の相対的な位相を合成し、上肢挙上開始から錘玉リリースまでの投球時の平均上肢挙上速度（手根部速度）を算出し、今回のパフォーマンスの指標とした。疲労後のCoP活動量、手根部速度とも、疲労前の投球時データのうち手根部速度の高い10試行の平均量を100% controlとして正規化した。

なお、APAは初期重心位置に応じて敏感に変化するため（Azuma et al, 2007）、APA開始直前に規定の初期重心位置を1cm以上逸脱したデータは棄却し、データとして採用しなかった。また、疲労後のデータはRtが225秒以内のデータのみを採用した。

2.5 統計処理

統計解析に関して、食事操作開始時と5日目における体重・体組成やHRVの差、あるいは疲労動作課題の開始直後と疲労困憊直前の前脛骨筋の筋電図変化は、paired T-testで検討した。筋疲労前後の投球動作時の手根部速度と三角筋前部の筋放電量積分値の差については、ノンパラメトリック検定法（Mann-Whitney U-test）を用いて検証した。前脛骨筋収縮終了後の疲労回復の時間経過Rtより、疲労困憊開始から45秒までの期間（Rt 45）、45秒を超え90秒までの間

（Rt 90）、90秒を超え135秒までの間（Rt 135）、135秒を超え180秒までの間（Rt 180）、そして180秒を超え225秒までの間（Rt 225）の各回復期間における、各変数データ（手根部速度、前脛骨筋・大腿二頭筋・脊柱起立筋のAPA筋放電量、およびCoP活動量）を45秒ごとにヒストグラム化した（図3）。これら5期間の変数データの経時的変動の有無は、一元配置分散分析（one-way ANOVA）とボンフェローニの多重比較検定を用い検討した。なお、いずれの統計値も有意水準は5%以内とした。

3. 結果

食事操作開始時と5日目の投球実験時の被験者の体重および体脂肪率の平均値に、有意差はみられなかった（paired T-test; それぞれ $P = 0.533, 0.867, n=11$ ）。HRVから求めたLF/HFは、食事開始時1.39に対し5日目では1.74に増加していたが有意差はこのようにみられなかった（paired T-test; $P = 0.323$ ）。

図2左に示すように、前脛骨筋の疲労前の投球動作時において、主動筋である三角筋前部が活動開始をする前に、同側の前脛骨筋、大腿二頭筋長頭および対側の脊柱起立筋の相動的な活動開始が認められた。また、これらの筋活動の結果として、足圧中心位置は後方へ移動した。

図2上は、疲労動作課題の足背屈動作開始時と疲労困憊直前の前脛骨筋の筋電図を示している。前脛骨筋の筋電図は、最初の足背屈-底屈動作3レップスのデータを100%として正規化すると、疲労困憊直前3レップスの筋放電量平均振幅は193.1%、MPFは79.2%（paired T-test：それぞれ $P < 0.001, 0.01, n = 11$ ）を示した。

前脛骨筋の疲労困憊直後の投球時には図2右のように、APA時に前脛骨筋の活動が消失することが観察された。この現象は全被験者にみられ、Rtの平均で63.1秒経過するまで、投球時の前脛骨筋のAPA活動は休止あるいは微弱な持続放電だけで、phasicな筋活動は出現しなかった。筋疲労によりAPAが休止した試行群の投球時の手根部速度は、疲労前1.76m/sに対し疲労後1.57

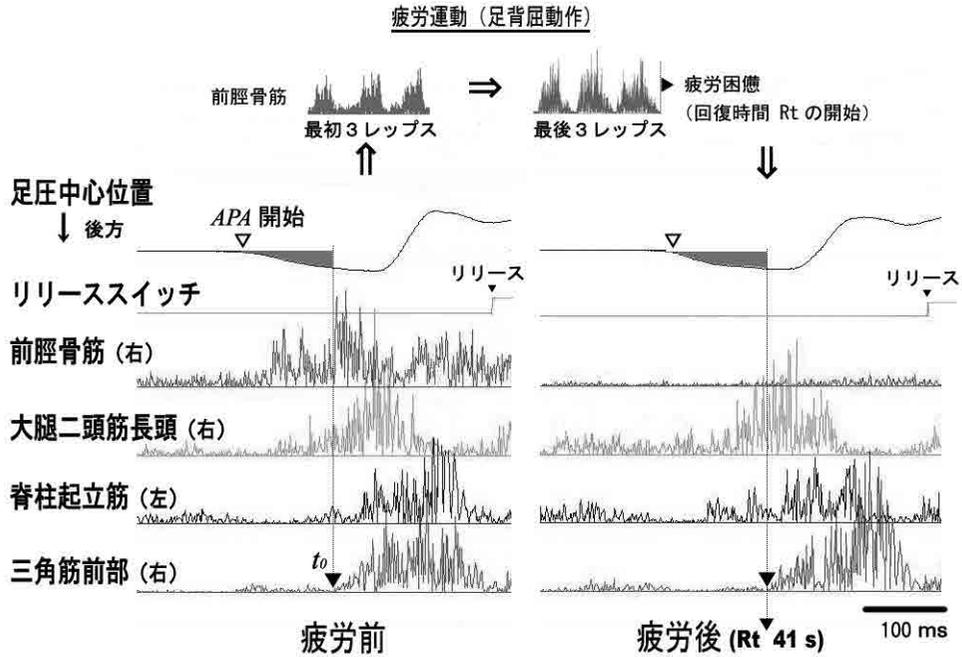


図2：投球動作時の足圧中心位置、リリース信号および下肢・体幹筋群（姿勢協同筋）ならびに上肢帯筋（主動筋）の筋電図について、疲労前（左）と疲労後（右）を比較したもの（同一被験者の代表例）。上図は、疲労運動課題中の前脛骨筋の筋電図変化を示したもの。

m/sであり、前脛骨筋のAPA活動消失にともない約10%低下した（Mann-Whitney U-test; $P < 0.01$, $n = 149$ ）が、主動筋である三角筋前部の筋放電量積分値は疲労の前後で有意差は認められなかった（ $P = 0.91$ ）。

図3は、疲労運動課題後の投球動作時の手根部速度および前脛骨筋・大腿二頭筋・脊柱起立筋のAPA筋放電量について、疲労回復後の経時的变化を45秒ごとにヒストグラム化したものである。前脛骨筋の疲労にともない低下した投球時の手根部速度は、Rt 225には有意に回復し（ANOVA; $P = 0.041$, $df = 4,148$ ）、疲労前の99.3%まで回復することを示した。前脛骨筋のAPA筋放電量はRt 45には疲労前の45.1%まで低下したが、それ以降は80%前後まで有意に増加したことを示した（ $P = 0.005$ ）。一方、脊柱起立筋のAPA筋放電量のRt 45値は疲労前の

126.3%まで有意に増加した（ $P = 0.007$ ）が、その後は100%前後にもどることを示した。大腿二頭筋のAPA筋放電量は、Rt 45値は疲労前の値を超える114.1%を示したが、いずれの期間も統計的に有意な変化は認められなかった（ $P = 0.272$ ）。

後方へのCoP活動量において、Rt 45の平均値（60.5% control）が疲労前より低下する傾向をみせたが、それ以後は100%前後に回復した。しかし、疲労回復にともなう経時の変動には統計的に有意差は認められなかった（ $P = 0.064$ ）。

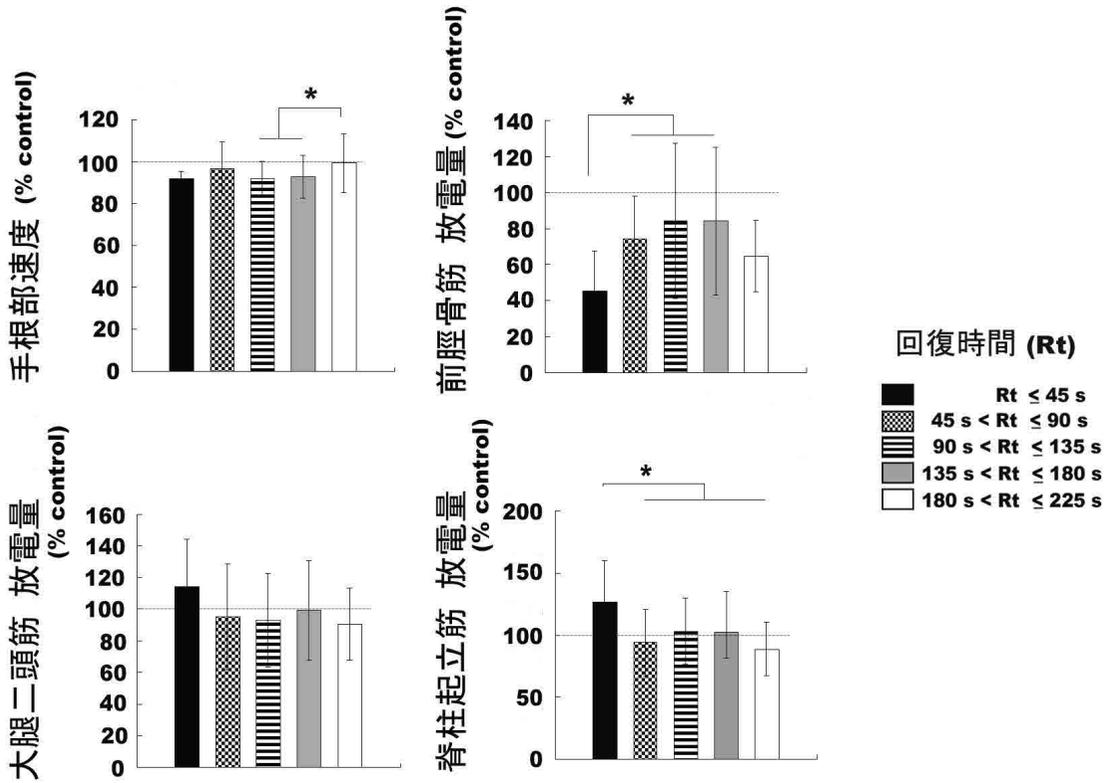


図3：手根部速度と前脛骨筋、大腿二頭筋および脊柱起立筋のAPA筋放電量における、姿勢筋疲労後の回復時間 (Rt) の経過にもなう変化。*; $P < 0.05$ (Bonferroni's multiple comparison test).

4. 論議

APAが動的運動中の姿勢補償だけでなく、パフォーマンス自体を増加させる機能を有することが報告されてきた (Lee et al., 1987; Massion, 1992; 伊東たち, 1997; Ito et al., 2004; Azuma et al., 2007; 東たち, 2008)。今回APAに参画する前脛骨筋を疲労困憊にさせて投球を全力で実施した結果、前脛骨筋の筋活動が休止あるいは減弱し、投球速度が約10%低下したことも、APAの運動成果への寄与という機能的意義の一つを証明していると考えられた。また、疲労困憊直後の前脛骨筋の活動低下に呼応するかのように、姿勢協同筋である脊柱起立筋の筋活動が有意に増加し、大腿二頭筋の筋活動も増加する傾向を示した。一方、これら姿勢筋のそれぞれのlocal APAに参画する筋活動を併せた、

統合的な外部出力であるglobal APAを示すCoP活動量は、疲労回復時間の経過にもない変動は認められなかった。以上のことは、姿勢平衡をはかるための外部出力を維持するため、疲労のため活動が低下した姿勢筋を他の姿勢筋群が協同で補償する、postural synergiesの機序が働いているものと考えられた。

運動で誘発される筋疲労は、随意での最大発揮筋力の減少をとめない、筋レベルでの末梢的变化だけでなく中枢からの下行信号にも影響が現れる (Gandevia, 2001)。また、単関節の運動課題で強度の高い等尺性 (Moritani et al., 1986) あるいは等張性 (Potvin, 1997) の筋収縮を続けると、それにもなう筋疲労により、筋電図の筋放電量は増加しMPFは低下することが報告されている。これは、筋線維の疲労にもかかわらず

ず単関節での発揮筋力を維持しようとするため、中枢から運動単位の動員recruitmentと運動単位へのインパルスの発射頻度rate codingの増加を図ることで筋放電量を増加させる一方で、中枢からの命令信号を同期化し各運動単位の力発揮を集中させるために周波数が低下することを示す現象と考えられた。今回の疲労運動課題の単関節運動における前脛骨筋の筋放電量増加とMPF低下も同様のメカニズムによるものと考えられる。しかしながら、ダイナミックな多関節運動において疲労した姿勢筋が休止する間、他の姿勢協同筋の活動が増加し疲労筋の作用を補うという、高強度負荷の単関節運動とは全く異なる運動制御を示した。このような疲労にともなう姿勢協同筋の補償現象を報告する研究は見当たらないが、2.5%MVC以内の低強度の膝関節伸展の単関節運動を1時間持続する運動課題では認められている (Kouzaki and Shinohara, 2006)。低強度の一定発揮力の継続中に、協同筋内での筋活動交替 (alternate muscle activity; Kouzaki and Shinohara, 2006) が生じ、その交替回数が多いほど疲労課題終了後におこなうMVCでの発揮力が高いことが示され、協同筋間のalternate muscle activityが疲労を軽減させることが示唆されている。複雑な多関節運動では、姿勢協同筋は様々な環境条件 (運動方向の微細な変化、被験者への指示等) によって組替わり、synergyの関係を特定することは困難である。しかし、協同筋間の補償作用は疲労を軽減しつつ発揮筋力を維持していく方策として、スポーツ科学あるいは労働科学の観点から必要な概念となろう。

筋疲労終了後の投球動作中に、消失あるいは減衰した前脛骨筋の筋活動は45秒、低下した手根部速度は225秒の回復時間で疲労前の値まで回復した。この結果は、疲労運動課題での主たる疲労要因が、姿勢筋活動を一時的に障害し機能低下に至らしめたことを示すとともに、急速な回復時間から姿勢筋の主たる代謝特性に関するpossible mechanismsを推測できるかもしれない。筋疲労に至らず要因は種々挙げられるが、

今回食事操作中のHRVに大きな変化はなく、実験期間中の慢性的な中枢性疲労の要因は除去してよいものと考えられる。末梢性疲労の要素の一つである筋グリコーゲン貯留量について直接測定していないが、今回5日間摂取した食事のPFC比を全被験者とも統一した上での結果である。

ダイナミックな運動において、末梢性疲労の要因として、筋細胞からのカリウム漏出 (loss of potassium; K^+ loss)、無機リン酸 (Pi) の蓄積による筋小胞体 (SR) の機能低下、クレアチン燐酸 (PCr) によるATP再合成の遅れ、筋グリコーゲン濃度の低下、乳酸の蓄積などが挙げられよう。

筋細胞からの K^+ lossは、30% MVCの間欠的で静的な膝伸展運動では、最初の数分で回復し始めるが完全回復には20分かかると報告されている (Verburg et al., 1999)。また、高強度の単関節運動によるSRからのカルシウム (Ca^{2+}) 放出と取り込みの低下 (Hill et al., 2001) は、ATP消費にともない増加したPiと Ca^{2+} の結合に起因 (Dutka et al., 2005) しており、SR Ca^{2+} 放出機能の全回復時間は7分 (Posterino and Fryer, 1998)、SR Ca^{2+} 取り込み速度の回復は遅筋線維において速筋線維よりも回復は早いものの15分要すること (三島たち, 2006) が報告されている。一方、ATP-CP系において、激運動時に消費されたPCrの1/2回復時間は、fast componentで21-22秒、slow componentは170秒と急速であることは、よく知られている (Harris et al., 1976)。Spriet (1995) は間欠的な30秒間の全力運動におけるATP消費量とATP供給系 (ATP-CP系、解糖系、酸化系) の貢献度を検討したが、全力運動間の休息時間2分の間に解糖系の筋グリコーゲンのみ回復が遅れるため、間欠的な全力運動が続くにしたがって解糖系のATP供給の貢献度が低下することを示している。また、乳酸の除去速度において、激運動後の筋内の水素イオン濃度の低下は6分以上かかることも報告されている (Forbes et al., 2008)。

以上の先行研究の知見から、前脛骨筋のAPA活動の回復の早さ (約45秒) からみて、動的姿

勢調節活動は、筋グリコーゲン減少からの回復が遅い解糖系よりも、ATP-CP系によるPCrの再合成速度に主に依存していることが示唆された。APA時の姿勢筋の代謝動態を推測させる研究報告はほとんどないが、Woollacott et al. (1984) は足底屈筋群である腓腹筋とヒラメ筋が姿勢筋となる、立位からのレバー牽引動作課題準備中に、主運動開始500 ms前には両筋とも準備のため脊髄 α 運動ニューロン興奮性が高まっていくが、運動開始直前にはヒラメ筋は興奮度が低下し、腓腹筋は興奮性を維持し続けることを明らかにしている。これは運動開始直前に中枢機構が、姿勢筋のうち、主として遅筋線維で構成されるヒラメ筋を抑制し、速筋線維の含有が多い腓腹筋の興奮性を保つことで、すばやくダイナミックな運動に付随する姿勢調節においてより大きなパワーを発揮できる速筋線維を選択的に動員したことを示唆していると考えられる。この姿勢筋の速筋線維の選択的動員は、本研究の姿勢筋の回復時間から推測した姿勢筋代謝におけるATP-CP系への依存性とも符合しているように考えられる。

APAに参画する筋群を疲労させて、その活動を疲労前と比較する研究は多いものの、回復時間を正確に記述しない研究が多い。しかし、Kanekar et al. (2008) は疲労回復時間10分以内あるいは30分以内でのAPAのEMG活動を測定し、脊柱起立筋や半腱様筋の姿勢筋を疲労させることで、立位姿勢からの前方上肢挙上運動時の姿勢筋のAPA活動の開始時間が早まることを認めている。このことから、姿勢筋の疲労回復の様相は時間経過にともない二峰性の変化をするものと考えられる。本実験の結果は、姿勢筋の疲労回復様相の二峰性変化のうちfast componentとして、回復開始直後における疲労姿勢筋の活動消失の現象をとらえたものと言える。

5. まとめ

姿勢筋への疲労運動実施により、回復開始直後には疲労した姿勢筋の活動の休止あるいは低下が認められた。しかし、疲労していない姿勢

協同筋群が疲労筋を補償することで運動成果が疲労前のレベルに保たれることが示された。上位中枢は、姿勢筋の筋疲労に応じて、疲労していない他の姿勢協同筋活動を賦活させ、運動成果を維持させているものと推察された。

本研究は、大阪体育学会第47回大会において発表した内容の一部に加筆したものである。

文 献

- Allison, G.T., Henry, S.M. (2002) The influence of fatigue on trunk muscle responses to sudden arm movements, a pilot study. *Clin. Biomech.*, 17 (5) :414-417.
- Aruin, A.S., Latash, M.L. (1995) Directional specificity of postural muscles in feed-forward postural reactions during fast voluntary arm movements. *Exp. Brain Res.*, 103 (2) :323-332.
- Azuma, T., Ito, T., Yamashita, N. (2007) Effects of changing the initial horizontal location of the center of mass on the anticipatory postural adjustments and task performance associated with step initiation. *Gait Posture*, 26 (4) :526-531.
- 東 隆史、伊東太郎、山下謙智 (2008) 運動開始前の初期重心位置の変化が先行随伴性姿勢調節と運動成果に及ぼす影響について. *大阪体育学研究*, 46:1-10.
- Belen'kii, V.E., Gurfinkel, V.S., Pal'tsev, E.I. (1967) Control elements of voluntary movements. *Biofizika*, 12 (1) :135-141.
- Bove, M., Faelli, E., Tacchino, A., Lofrano, F., Cogo, C.E., Ruggeri, P. (2007) Postural control after a strenuous treadmill exercise. *Neurosci. Lett.*, 418 (3) :276-281.
- Crenna, P., Frigo, C. (1991) A motor programme for the initiation of forward-oriented movements in humans. *J. Physiol.*, 437:635-653.
- De Bock, K., Derave, W., Ramaekers, M., Richter, E.A., Hespel, P. (2007) Fiber type-specific muscle glycogen sparing due to carbohydrate intake before and during exercise. *J. Appl.*

- Physiol., 102 (1) :183-188.
- Dutka, T.L., Cole, L., Lamb, G.D. (2005) Calcium phosphate precipitation in the sarcoplasmic reticulum reduces action potential-mediated Ca^{2+} release in mammalian skeletal muscle. *Am. J. Physiol. Cell Physiol.*, 289 (6) :1502-1512.
- Forbes, S.C., Raymer, G.H., Kowalchuk, J.M., Thompson, R.T., Marsh, G.D. (2008) Effects of recovery time on phosphocreatine kinetics during repeated bouts of heavy-intensity exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 103 (6) :665-675.
- Gandevia, S.C. (2001) Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. *Physiol. Rev.*, 81 (4) :1725-1789.
- Harris, R.C., Edwards, R.H., Hultman, E., Nordesjö, L.O., Ny Lind, B., Sahlin, K. (1976) The time course of phosphorylcreatine resynthesis during recovery of the quadriceps muscle in man. *Pflügers. Arch.*, 367 (2) :137-142.
- Hill, C.A., Thompson, M.W., Ruell, P.A., Thom, J.M., White, M.J. (2001) Sarcoplasmic reticulum function and muscle contractile character following fatiguing exercise in humans. *J. Physiol.*, 531 (3) :871-878.
- 伊東太郎、山下謙智、東 隆史 (1997) 各種動作時間での一歩踏み出し動作における見越し活動の様式について. 岡田守彦 (編) 「身体運動のバイオメカニクス」 第13回日本バイオメカニクス学会大会論集、筑波大学体育科学系発刊、167-172.
- Ito, T., Azuma, T., Yamashita, N. (2004) Anticipatory control related to the upward propulsive force during the rising on tiptoe from an upright standing position. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 92 (1-2) :186-195.
- Ito, T., Azuma, T., Yamashita, N. (2003) Anticipatory control in the initiation of a single step under biomechanical constraints in humans. *Neurosci. Lett.*, 352 (3) :207-210.
- Kanekar, N., Santos, M.J., Aruin, A.S. (2008) Anticipatory postural control following fatigue of postural and focal muscles. *Clin. Neurophysiol.*, 119 (10) :2304-2313.
- Kouzaki, M., Shinohara, M. (2006) The frequency of alternate muscle activity is associated with the attenuation in muscle fatigue. *J. Appl. Physiol.*, 101 (3) :715-720.
- Lee, W.A., Buchanan, T.S., Rogers, M.W. (1987) Effects of arm acceleration and behavioral conditions on the organization of postural adjustments during arm flexion. *Exp. Brain Res.*, 66 (2) :257-270.
- Massion, J. (1992) Movement, posture and equilibrium: interaction and coordination. *Prog. Neurobiol.*, 38 (1) :35-56.
- 三島隆章、山田崇史、坂本誠、和田正信 (2006) 高強度運動後の回復期における筋小胞体の Ca^{2+} 取り込み機能の変化-速筋と遅筋との比較-. *体力科学*, 55 (5) :503-512.
- Moritani, T., Muro, M., Nagata, A. (1986) Intramuscular and surface electromyogram changes during muscle fatigue. *J. Appl. Physiol.*, 60 (4) :1179-1185.
- Morris, S.L., Allison, G.T. (2006) Effects of abdominal muscle fatigue on anticipatory postural adjustments associated with arm raising. *Gait Posture*, 24 (3) :342-348.
- Murray, M.P., Seireg, A.A., Sepic, S.B. (1975) Normal postural stability and steadiness: quantitative assessment. *J. Bone Joint Surg. Am.*, 57 (4) :510-516.
- Posterino, G.S., Fryer, M.W. (1998) Mechanisms underlying phosphate-induced failure of Ca^{2+} release in single skinned skeletal muscle fibres of the rat. *J. Physiol.*, 512 (1) :97-108.
- Potvin, J.R. (1997) Effects of muscle kinematics on surface EMG amplitude and frequency during fatiguing dynamic contractions. *J. Appl. Physiol.*, 82 (1) :144-151.
- Spriet, L.L. (1995) Anaerobic metabolism during high-intensity exercise. *Human metabolism*. Ed: M. Hargreaves. Human Kinetics, Inc.

Champaign, p.p. 1-39.

- Strang, A.J., Choi, H.J., Berg, W.P. (2008) The effect of exhausting aerobic exercise on the timing of anticipatory postural adjustments. *J. Sports Med. Phys. Fitness*, 48 (1) :9-16.
- Verburg, E., Hallén, J., Sejersted, O.M., Vollestad, N.K. (1999) Loss of potassium from muscle during moderate exercise in humans: a result of insufficient activation of the Na⁺-K⁺-pump? *Acta. Physiol. Scand.*, 165 (4) :357-367.
- Woollacott, M.H., Bonnet, M., Yabe, K. (1984) Preparatory process for anticipatory postural adjustments: modulation of leg muscles reflex pathways during preparation for arm movements in standing man. *Exp. Brain Res.*, 55 (2) :263-271.
- Yiou, E., Heugas, A.M., Mezaour, M., Le Bozec, S. (2009) Effect of lower limb muscle fatigue induced by high-level isometric contractions on postural maintenance and postural adjustments associated with bilateral forward-reach task. *Gait Posture*, 29 (1) :97-101.