

# 教育講演

---

教育講演

## 生体内部の画像化に関する最新情報 -バイオメカニクス領域における超音波法、MRI 法の利用方法-

福永哲夫（早稲田大学スポーツ科学学術院）

キーワード: MRI 法、超音波法、筋形状

近年、生体内部を画像化する手法の進歩は著しい。特に、リアルタイム超音波法による収縮中の筋線維や腱組織の動態を定量する技術の開発は様々な新しい事実を生み出してきた。例えば、関節角度を固定しての筋活動は”等尺性筋活動”と定義され、筋線維はその長さを変えないで収縮すると説明されてきた。しかし、超音波法により”等尺性筋活動”中の筋線維をリアルタイムで観察すると、筋線維は短縮することが明らかになり、それは腱組織の伸張によるものであった (Ito et al J Appl Physiol 1998)。また、MRI 法を用いれば筋が活動するときどの部位の筋線維が収縮するのかを定量することが可能になった。例えば、図 1 は足底屈筋力を連続して発揮したときの MG (Gastrocnemius Medialis) の 3 次元 MRI 画

像である。変色している部分が筋線維が活動した部分を表していると考えられている。この結果によると、足底屈の主動筋と考えられる MG においてもその部位により筋線維の活動状態が異なる事が目視できる。また、図 2 は足関節を固定しての等尺性足底屈筋力発揮時の MG の 3 次元超音波画像である。安静時に比較して筋活動時に筋線維がその長さを短くする様子が観察される。以上のように、MRI 法や超音波法を用いることにより、筋収縮中の活動部位とか、筋線維や腱組織の長さ変化を定量出来るようになった。本教育講演ではこのような映像技術を用いて、様々な動作中の筋と腱の相互作用について解説する。



図 1  
足底屈動作により活動した MG 線維  
(Kinugasa et al. Magnetic Resonance Imaging  
2006)

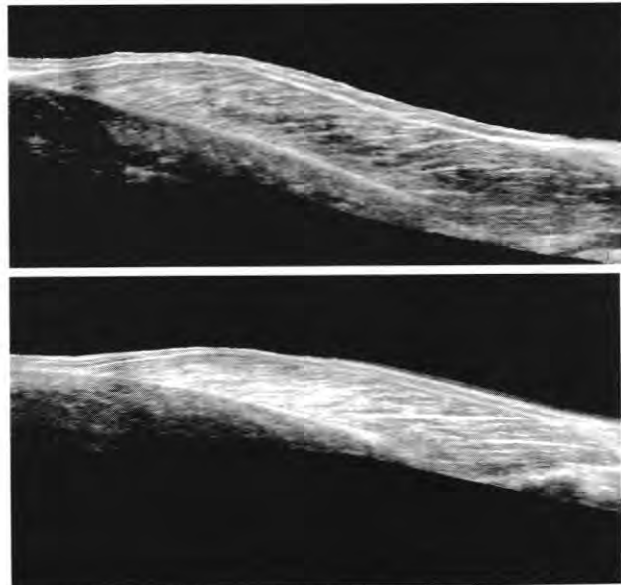


図 2  
足関節を固定しての等尺性筋活動時の MG 筋線維  
長の変化 (Kurihara et al. Int J Sport Health Sci 2006)

## ヒトの動きのしくみを考える：筋腱複合体から身体運動まで

深代千之 (東京大学大学院情報学環)

キーワード:逆ダイナミクス、シミュレーション、筋腱複合体、SSC、研究の応用

【はじめに】そもそも、私がスポーツ科学の世界に入った発端は、跳躍でどうしたら遠くへ跳べるかということであった。しがたって、私の興味の底辺には今も跳躍があり、それにこだわり続けるのは、跳躍が筋の出力形式からみて最もダイナミックな運動で、跳躍のメカニズムがわかれば、様々な運動の解明に通じるからである(深代 1993)。もちろん、跳躍以外に、基礎的運動として椅子からの立ち上がりや階段昇降、歩行や走行の解析も行い、それらの研究成果の応用についても、慎重に行ってきた。様々なヒトの動きのしくみを解明し、それを応用することで、人間の生活環境をより豊かにできると考えて研究を続けている。この教育講演では、私の研究史を振り返りながら、バイオメカニクス研究の可能性と限界について述べてみたい。

【研究の方法】身体運動の構築は筋収縮によるので、日常生活動作からダイナミックなスポーツ動作まで、筋腱複合体:MTCの動態を定性的・定量的に知ることを目指してきた。特に、腱に注目するという視点は私のオリジナルである。具体的な変数として、MTCの「力と長さ変化」をなるべく精度よく測定あるいは推定することにこだわった。もちろん、MTCを制御するのは高次の脳機能であるが、パフォーマンスは出力器である筋・骨格系の特質に大きく依存するという考え方である。これまで用いてきた方法は、動作解析からMTCの動態を観察する「逆ダイナミクス」と、MTCを活動させて運動をシミュレートする「順ダイナミクス」である。

【逆ダイナミクス】身体運動の逆ダイナミクス解析では、通常、身体的位置座標は動作解析から身体への外力はフォースプレートから得る。この測定システムから関節の発揮トルクを求めることは頻繁に行われるようになり、走・跳・投などの様々な動きの定量的説明が可能となった(深代ら 2000)。さらに、関節トルクをモーメントアームで除すことによってMTCの張力を推定することができるが、そこには、共同筋と拮抗筋の問題がある。共同筋の場合は最適化法を用いて推定する方法が、一方、拮抗筋の場合は筋電図によって間接的に評価する方法が探られている(深代と Hay 2005)。この分野の研究が進み、各種動作の主働筋の張力が(もしリアルタイムで)わかれば、動作改善のためのコーチングに大きな効果をもたらすと考えられる。

【シミュレーション】逆ダイナミクス研究と平行して、シミュレーション研究を行っている。Hill型

MTCモデルに筋の長さ-速さ-力関係と腱の長さ-力関係を入力し、1個のモデルにおける腱の硬度・反動SSC・筋と腱の長さ比・モーメントアームなどの影響についての特質を定量的に検証している(Naganoら 2003)。そして、複数個のMTCモデルを骨格に取り付けて垂直跳や歩行などを具現させることも成功した(Yoshiokaら 2005, Naganoら 2005)。MTCモデルがどのくらい生体の挙動を反映したものであるか否かという問題もあるが、生体には到底不可能な設定を課すことができ、大きく発展する可能性をもっている。なお、人間の動きの本質を知ろうとする我々のシミュレーションは、映画やテレビゲームのCGとは似て非なるものである。

【研究の応用】スポーツ科学は応用科学であり、社会で活かされてこそ意味がある。しかし、役に立つ研究に行き着くまでには簡単ではない。私は最初に奉職した大学で陸上部を指導したが、大学院で学んだことを現場に応用することの難しさを知った。自身の研究レベルの未熟さもあったが、現場では体系的な示唆よりも時々刻々と変化する環境に最適な答えを常に予測して出さなければならないということに戸惑った。次に奉職した研究所では、様々なスポーツ種目の選手やコーチを科学的にサポートすることに挑戦した。今のJISSの原型がここにある。スポーツ選手やコーチをサポートするスポーツ科学は、その力量を上げることと同時に、真摯で謙虚で誠実でなければならないと実感した。

【スポーツ科学の可能性】我々のスポーツ科学あるいはスポーツバイオメカニクスの将来はどのようなものか? 21世紀は、身体や運動が見直される時代であり、身体と運動の科学に接近しようとしている分野は、医学・工学だけではない。我々は、スポーツ科学の国外の研究者と競い合い高め合うことと同時に、国内の他分野の研究者とも競い合い、あるときは共存・融合を模索しなければならない。最後に、私の現在の所属である、東京大学の最後の文理融合プロジェクト「情報学環」についても触れ、スポーツ科学の方向性についても考えてみたい。

【参考文献】1) 深代: 筋腱連合組織からみた跳躍動作のダイナミクス. 東京大学大学院博士論文 1993. 2) 深代ら: スポーツバイオメカニクス, 朝倉書店 2000. 3) Fukashiro, S., Hay, C. D., Nagano, A.: Biomechanical behavior of muscle-tendon complex during dynamic human movements. *J. Appl. Biomech.* 22: 131-147, 2006.

## ロコモーションにおける反射の役割

中澤 公孝 (国立身体障害者リハビリテーションセンター研究所)

キーワード: 直立二足歩行、伸張反射

## 【はじめに】

人間や動物のロコモーションを司る神経機序はまだ不明な点ばかりである。これまで、Sherringtonによって確立された神経生理学的研究手法によって四足動物の歩行に関しては、それに関与する種々の神経経路の存在と機能が明らかとされてきた。しかし人間の二足歩行を成立させる神経機序については、そのほとんどが未解明といっても過言ではない。したがって、ロコモーションにおける反射の役割についても、特に人間の二足歩行に関しては、その答えを一言で集約することなど到底できない。そこで今回は特に、人間の二足歩行における足関節周りの筋をとり上げ、それらの筋に見られる脊髄反射の歩行位相依存性変動とその役割について論じてみたい。

## 【足関節周囲筋伸張反射の役割】

歩行時の下腿三頭筋 H-反射は立脚期に増強し、遊脚期には減弱あるいは消失する<sup>1</sup>。さらに特殊な装置を用いて誘発した伸張反射も H-反射とほぼ同様なふるまいを示す。これらは立脚期に下腿三頭筋の背景筋活動が増大するのと並行している。しかしながら、着目すべきはこの時の拮抗筋である前脛骨筋の伸張反射である。前脛骨筋は立脚期に背景筋活動がほぼ完全に消失するにもかかわらず伸張反射活動は著明に亢進する<sup>2,3</sup>。歩行の立脚初期に下腿三頭筋と前脛骨筋の伸張反射活動が同時に亢進することは、この時期に足関節周囲筋の応答性を高め、“接地から体重が一足に移行していく不安定期に、足部に加わる不意の外乱要素に対応する”という機能的役割があると考えられている<sup>2</sup>。しかしながら我々がふだん歩くときに前脛骨筋あるいは下腿三頭筋が個々に伸張されるような場面はほとんどなく、地面の凹凸や段差などの自然な外乱要素は脚全体に加わるものである。それでは立脚期に亢進している伸張反射経路はその

ような脚全体に加わる外乱に対して実際に応答するのであろうか？我々は歩行の立脚初期に路面をわずかに落下させる実験装置を作成し、この点を確認する実験を行った<sup>4</sup>。

## 【路面落下実験】

図1に示したように被検者は歩行路を歩き、その

途中に設置された路面落下装置が踵接地直後に落下する(10mm)。得られた反応の典型例を図2に示す。UPTとは外乱無し時の筋電図、PTは外乱が入った時の筋電図である。外乱が入ったときの5試行分の応答を示してある。その結果、落下刺激(斜め線の時点で入力)に対してほぼ一定の潜時で筋電図上の応答が出現した。特に内側腓腹筋と前脛骨筋に大きな応答が見られ、路面のわずかな落下刺激に対して短潜時の伸張反射成分と見られる応答が実際に誘発されることが明らかとなった。これらの結果は歩行の立脚初期に足関節伸筋および屈筋の伸張反射経路の興奮性はともに亢進し、この局面でおこる外乱要素に対して反射性に応答し、関節の固定を図る防御機能的役割を共同して演じていることを示唆する。このように伸張反射経路の興奮性は、当該筋の制御のみならずそれが支配する関節の安定性を運動の局面に応じて調節するように coordinate されている、とみることもできる。

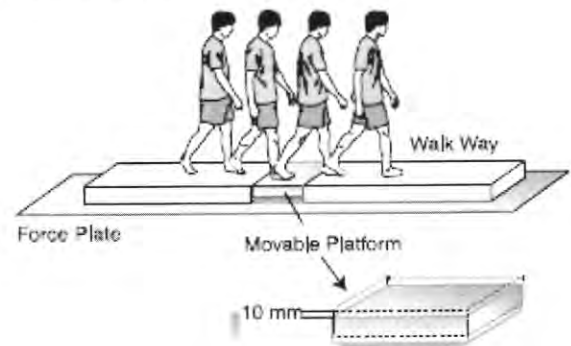


図1

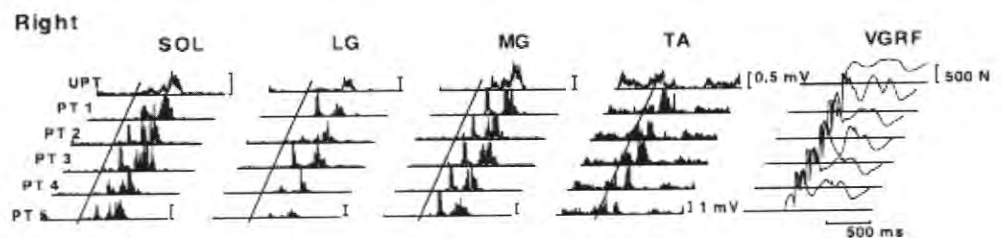


図2

## 引用文献

1. Capaday and Stein, J Neurosci 6, 1308-1313, 1986
2. Christensen et al., J Physiol 531 : 545-557, 2001
3. Christensen et al., Prog Neurobiol 62 : 251-272, 2000
4. Nakazawa et al., J Appl Physiol 96, 604-611, 2004

# シンポジウム

---

シンポジウム



## シンポジウム 1 反動動作のパワーアップメカニズム

### Muscle-tendon interaction in connection with performance enhancement

Masaki Ishikawa and Paavo V Komi

Neuromuscular Research Center, Department of Biology of Physical Activity,  
University of Jyväskylä

Key Words: Achilles tendon, elastic energy, ultrasonography, potentiation, gait

In human locomotion from slow walking to strenuous jumping exercises and running, the skeletal muscles of legs work in a stretch-shortening manner: eccentric stretching loads the spring system and probably activates the reflex loops, while during the following concentric phase of contact the stored elastic energy is utilized in producing impulse to the ground (Komi 2000). In order to produce the impulse as economically and effectively as possible, considerable efforts have been devoted to explain the stretch-shortening cycle (SSC) performance enhancement mechanisms performed both with isolated muscle preparations and in human experiments (see a review; van Ingen Schenau 1997). It is likely that several factors can influence the SSC performance potentiation by interacting elastic energy utilization and/or neural potentiation.

Direct *in vivo* recording of the tensile force (Komi et al 1996) combined with the fascicle length monitoring by the ultrasonography (see reviews; Fukashiro et al 2006, Fukunaga et al 2002) can increase our understanding of muscle mechanics in human locomotion. In this presentation, some of the recent studies will be highlighted to clarify the importance of the specific manner, in which the fascicle-tendinous tissues (TT: aponeuroses and the free length of the in series tendon) interaction influences the mechanical output and efficiency of the human skeletal muscle.

For example, it has been reported to utilize stretch reflex contribution due to the high stretch loads during the SSC movements (see a review; Komi and Gollhofer, 1997). However, several animal and human studies have reported that the fascicles of gastrocnemius muscle (GA) can shorten or behave isometrically during the braking phase even if the muscle-tendon unit (MTU) is being lengthened (see a review; Fukashiro et al 2006). This discrepancy may be related to the occurrence that the stretch reflex during running and hopping is easier to record in the soleus than GA muscle. However, the recent high-speed ultrasound measurements have demonstrated a clear fascicle stretching of the GA in a short duration during the very early phase of the ground contact (Ishikawa et al 2006). This is methodologically important for the identification of the beginning of the stretch reflex loop activation in the muscle.

For the utilization of tendon elasticity, it has been proposed that the concept of the concerted action (Hof et al 1983). In this concept, the contractile components just remain constant or even shorten during the course of the MTU stretch in concert with the increase of the imposed force. Several studies confirmed this behavior in GA during human SSC movements (Fukunaga et al 2002, Ishikawa et al 2006, Kawakami et al 2002). Fukunaga et al (2002) have suggested that in this concerted action, the fascicle contraction during human movements occurs around the plateau region of the force-length curve due to the advantages of the relatively larger force generation. However, we have further suggested that the working ranges of force-length curve during the ground contact of running may shift more to an ascending limb (shorter length) (Ishikawa et al 2006) as compared with walking. This shift in running may not favor for the muscle force production but for the effective TT stretching.

In SSC movements, the fascicle-TT interaction can be a key to clarify the roles of tendon elasticity and stretch reflex activities during SSC related to the enhancements of the power and efficiency of movements. We will present that these interactions between fascicle-TT during SSC movements can be modified by the fascicle stiffness regulation to utilize the TT elasticity effectively, depending on muscles, intensities as well as on movements (Ishikawa 2005).

#### References

- Fukashiro S et al. *J Appl Biomech* 22:131-147, 2006.
- Fukunaga T et al. *Exerc Sport Sci Rev* 30:106-110, 2002.
- Hof AL et al. *J Biomech* 16:523-537, 1983.
- Ishikawa M. *Studies in Sport, Physical Education and Health* 107, 2005
- Ishikawa M et al. *Gait & Posture* 2006 (In press).
- Kawakami Y et al. *J Physiol* 540:635-646, 2002.
- Komi PV. *J Biomech* 33:1197-1206, 2000.
- Komi PV et al. *Eur J Appl Physiol* 72, 278-280, 1996.
- Komi PV & Gollhofer A. *J Appl Biomech* 13:451-460, 1997
- van Ingen Schenau GJ et al. *J Appl Biomech* 13: 389-415, 1997.

# シンポジウム1

## 反動動作のパワーアップメカニズム

### 反動動作中の筋腱複合体の動態

川上泰雄 (早稲田大学スポーツ科学学術院)

キーワード: 反動動作, ジャンプ, 筋腱相互作用, 筋活動

ジャンプやランニングなどの反動動作は、関節の動きを計測したり、関節トルク・パワーを推定したりすることによってそのメカニズムが推しはかれてきた。近年になって、動作にかかわる筋(群)の筋線維動態の生体計測を通じて、反動動作における筋腱相互作用の重要性が明らかになってきた。本シンポジウムでは、筋・腱のふるまいと反動動作のパフォーマンスとの関連性について、これまでの知見を概観してみたい。

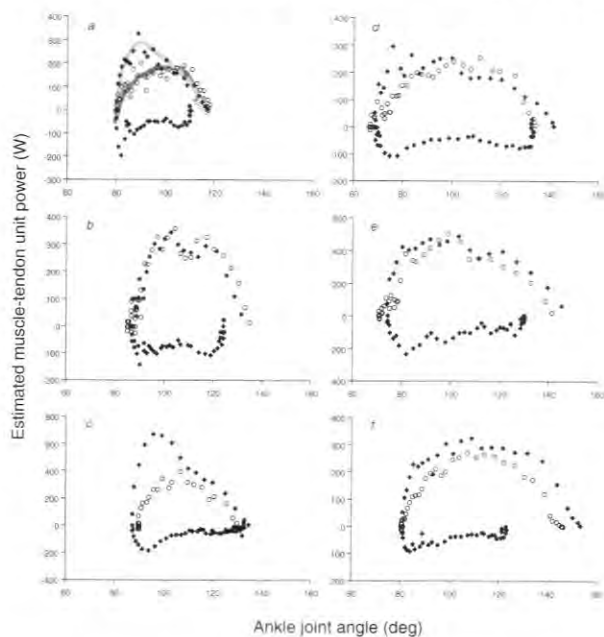
足関節のみを用いたジャンプ動作について、反動なしの条件と反動ありの条件における腓腹筋の筋線維動態を比較した研究(Kawakamiら, 2002)によって、反動ありの場合は筋腱複体の伸長の大部分を腱組織の伸長が担っていることが明らかになった。腱組織に蓄えられた弾性エネルギーが筋腱複体の短縮相において筋線維の短縮とともに利用され、大きなパワー発揮が可能になることが明らかにされ、これは動物実験の結果得られているジャンプやランニングの反動効果についての報告を人間において追認するものとなった。

その後の研究によって、反動ありの条件における筋線維のふるまいは運動強度や筋によって異なることがわかってきた。例えば、強度の高いドロップジャンプの場合、筋腱複体の伸长相において筋線維に伸張性収縮が認められる(Sugisakiら, 2005; Ishikawaら, 2003, 2004)。また、筋腱複体の伸长相に筋線維の短縮性収縮が生じる場合もある

(Kawakamiら, 2002)。こういった知見は、「反動効果は筋線維の等尺性収縮と腱の弾性エネルギー利用に起因する」という左記のメカニズムが常にあてはまるものではないことを示すものである。また、反動動作中の筋線維動態には個人差が存在し、反動によるパワー増強効果の大きい人と少ない人が存在する(図)。被験者による反動効果の違いは、腱組織の弾性の違いによって説明されている(柔らかいほど反動効果が高い)(Kuboら, 1999)。また、スプリンターの腱組織の弾性が一般人や長距離選手よりも低い(Kuboら, 2000)ことも指摘されている。しかし、反動効果は腱組織が柔らかいほどよい、というよりもむしろ、動作中の筋の活動状態、いわゆる「使い方」の善し悪しに関係するという意見もある(本大会において共同研究者が発表予定)。本シンポジウムでは、他の演者とともに反動動作のパワーアップメカニズムについて再考してみたい。

#### 参考文献

- Ishikawa, M. et al. *Acta Physiol. Scand.* 178: 205-213, 2003.  
 Ishikawa, M. et al. *J. Appl. Physiol.* 96: 848-852, 2004.  
 Kawakami, Y. et al. *J. Physiol.* 540: 635-646, 2002.  
 Kubo, K. et al. *J. Appl. Physiol.* 87: 2090-2096, 1999.  
 Kubo, K. et al. *Eur. J. Appl. Physiol.* 81: 181-187, 2000.  
 Kubo, K. et al. *Acta Physiol. Scand.* 168: 327-335, 2000.  
 Sugisaki, N. et al. *Int. J. Sport Health Sci.* 3: 235-244, 2005.



反動あり (●) となし (○) の条件による足関節ジャンプ動作中の筋腱複体のパワーと足関節角度の関係 (Kawakamiら, 2002)

# シンポジウム1

## 反動動作のパワーアップメカニズム

### 反動動作を用いた投運動における上肢のパワー発揮のメカニズム

田内健二 (早稲田大学スポーツ科学学術院)

キーワード: 伸張-短縮サイクル, 肩関節, キネマティクス, キネティクス, EMG

#### 【はじめに】

身体運動において反動動作を用いることによって、発揮されるパワーが増大することは良く知られている。これまで反動動作の効果とメカニズムは、主に下肢のジャンプ運動を用いて検討されることが非常に多く、上肢の運動を用いた研究は少ない。上肢の運動で最も典型的な投運動においても、動作パターンなどから反動動作の効果を利用しているであろうと指摘されることは多いが、実験的に検証されることは極めて少ない。上肢は下肢と比較すると構造的、機能的特性が異なることから、上肢に特有な反動動作によるパワー増大のメカニズムが存在することも考えられる。

そこで、本研究では投運動における上肢の発揮パワーに対する反動動作の効果およびそのメカニズムを明らかにすることを目的とした。

#### 【方法】

被験者には、日常的に運動を行っている健常男性13名(年齢:  $24.2 \pm 2.5$  歳, 身長:  $174.2 \pm 5.2$  cm, 体重:  $71.6 \pm 7.6$  kg)を用いた。被験者には、傾斜のあるベンチで仰臥位をとらせ、あらかじめボールを保持した状態から前方へ投げ出す運動(Concentric throw: CT), および検者が落下させるボール(2kg)をキャッチし、即座に前方へ投げ出す運動(Rebound throw: RT)を行わせた。前者のCTは反動動作なし、後者のRTは反動動作ありの投運動である。各試技中の動作を高速度カメラを用いて250fpsで撮影した。得られた画像を動作解析システムによってデジタル化し、ボールの速度、パワーおよび各関節の角度、トルク、トルクパワーなどを算出した。また、同時に、大胸筋、上腕三頭筋、三角筋、僧帽筋、広背筋の各筋からEMGを導出した。

#### 【結果】

主な結果は、以下の通りである。

- ① 上肢がボールに発揮した正の平均パワー(以下、ボールパワー)は、RTがCTと比較して有意に高値を示した(CT:  $243 \pm 73$  W, RT:  $314 \pm 94$  W)。
- ② ボールパワーの増加率と肩関節トルクパワーの増加率との間に有意な正の相関関係が認められた。
- ③ RTでは、肩関節屈曲局面においてトルクが増大し、伸展局面開始時のトルクがCTと比較して高値を示していた(Fig. 1)。その結果、肩関節伸展局面における平均肩関節トルクは、RTがCTと比較して有意に高値を示した。

- ④ RTの主動筋である大胸筋および上腕三頭筋のEMG活動は、肩関節屈曲局面においては非常に低く、肩関節伸展局面においてはCTと同程度であった(Fig. 1)。

#### 【考察】

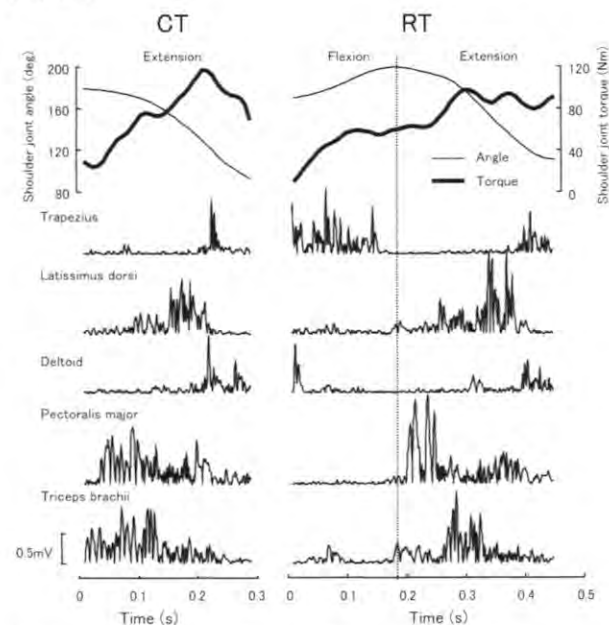


Fig. 1 Shoulder joint angle, torque and EMG of muscles around shoulder joint for a representative subject in concentric throw (CT) and rebound throw (RT).

本研究の結果から、投運動においても反動動作を用いることによって、上肢全体が発揮したパワーは増大し、それは主に肩関節トルクパワーの増大によるものであることが示された。そこで、RTの肩関節に着目すると、肩関節屈曲局面ではトルクは増大するが、主動筋である大胸筋および上腕三頭筋のEMG活動は非常に低いものであった。このことは、反動動作時における肩関節伸展筋群は、伸張性収縮というよりは、むしろ受動的に伸張されており、トルクの増加は主に肩関節の構造(靭帯、関節包膜などの硬組織、関節の可動制限など)に由来する受動的トルクによるものであることが考えられる。そして、続く肩関節伸展局面では、主動筋が急激に活動し始め、それまでに高められたトルクに能動的なトルクを付加することによって、肩関節トルクを増大させたものと考えられる。このことは、これまで報告された下肢の反動動作のメカニズムとは異なる結果であり、上肢の構造的、機能的特性、および末端部分の速度を高めるという投運動の特性などが影響しているものと考えられる。



## シンポジウム1 反動動作のパワーアップメカニズム

### 反動動作を用いた跳躍における左右不均衡の影響 パフォーマンス、仕事量および運動能率の解析

Dean Hay<sup>1,2</sup>、玉置龍也<sup>1</sup>、深代千之<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院総合文化研究科、<sup>2</sup> 国立身体障害者リハビリテーションセンター

キーワード: 反動動作、不均衡、逆ダイナミクス、パフォーマンス、仕事、運動能率、フィードバックトレーニング

#### 【はじめに】

身体運動における左右不均衡は、パフォーマンスに大きく影響すると考えられている。しかし、この現象に関する先行研究の多くは、単関節運動のような自由度の少ない条件での運動が用いられており、多関節で複雑な運動を対象に、左右不均衡、パフォーマンスそして運動能率（総仕事量あたりのパフォーマンス）の関係を質的に明らかにしようとした研究は殆どみられない。さらに、身体を均衡にしようとするトレーニングが、左右不均衡、パフォーマンスそして運動能率に与える影響を詳細に研究したものはない。本研究の目的は、1. 反動動作でのパフォーマンス、仕事量および運動能率に対する左右不均衡の影響を評価すること、2. バイオフィードバックトレーニングが、左右不均衡を減少させることやパフォーマンスおよび運動能率を改善することに及ぼす影響を調べることの2つであった。

#### 【方法】

左右不均衡なスポーツ（剣道、フェンシングなど）を定常的に行っている女子競技選手17名を対象に、立位姿勢での片側および両側の反動垂直跳においてパフォーマンスや運動能率に対する左右不均衡について検討した。具体的には、モーションキャプチャシステムとフォースプレート2台から求めた位置および力データを基に、3次元逆ダイナミクスを用いて、下肢3関節の角速度、トルク、パワー、仕事を算出した。これらのデータから不均衡係数を計算し、左右不均衡の程度を比較した。パフォーマンスは、垂直跳の跳躍高と定義した。

次に、計12名の被験者を3群、つまり、4名のコントロール群と、4名ずつの2群のトレーニング群（視覚フィードバック群と非フィードバック群）に

分け、トレーニング群には7週間のプライオメトリックトレーニングを課した。トレーニング群の1つであるフィードバック群は、すべてのトレーニングにおいて、左右不均衡を補正するように、床反力を視覚的にフィードバックしながら運動を行った。もう1つのトレーニング群である非フィードバック群は、フィードバック群と同様のトレーニング内容を、視覚フィードバックを用いずに行った。トレーニング実施中は床反力の左右不均衡関数を測定した。そして、トレーニング前後で、垂直跳のパフォーマンスと運動能率などを統計的に比較した。

#### 【結果】

その結果、床反力、関節トルク、最大パワー、総正仕事量において、有意な左右差が観察された。しかし、左右不均衡とパフォーマンス、左右不均衡と運動能率の間には有意な相関関係はみられなかった。以上より、大きな左右不均衡は、垂直跳のパフォーマンスに対して負の影響を与えることはないことが示された。

フィードバック群は、非フィードバック群に比べて、両側の均衡性は改善したが、パフォーマンスの改善には至らなかった。また、不均衡係数とパフォーマンスと運動能率の間に有意な相関関係はみられなかった。

#### 【結論】

本研究から得られた主な知見は以下の3点である。1: 左右不均衡の存在が、パフォーマンスと運動能率にマイナスに影響することはなかった。2: 視覚フィードバックトレーニングは両側の均衡性を改善するが、パフォーマンスには影響がみられなかった。3: 不均衡の度合いに関連した個々の動作ストラテジーが、跳躍高を最大化するために利用されていた。

## シンポジウム2

### 動作分析を現場に生かす

### 小学生の短距離走の指導に生かす動作分析

加藤謙一 (宇都宮大学), 宮本 純 (宇都宮大学大学院)

キーワード: スタンディングスタート, 疾走速度, 2次元 DLT, 観察的評価, 動作得点

#### 【はじめに】

短距離走の練習やトレーニングの効果をみた研究は、疾走動作の変容を通してバイオメカニクスの観点から多く行われている。これらの研究は、動作を定量化することで、客観的にその特徴をとらえており、有益な知見を得ることができる。しかしその一方で、実際の指導や教育の現場では応用することが難しいという指摘がある。指導場面では指導者や教師は、選手や児童・生徒の動作を主観的に観察評価し、より望ましいものへ修正できるよう指導を行うことが求められる。

小学生の指導では、陸上競技の専門的知識を持たない指導者が指導にあたるのが少なくない。そうした場合、観察の評価基準は妥当性や信頼性に問題がないか問われることになる。対象となる動作の観察評価の着眼点や基準は、パフォーマンスの向上に関連し、かつ客観的な根拠が示される必要があろう。これまで走・跳・投などの基本的な動作を評価するために観察的な観点をもとにその基準を示したものはあるが、それらは定量的なものではなく、おもに定性的なものに依拠していた。

本研究の目的は、5年生を対象にスタンディングスタートの練習を計画、実施し30m走中の速度、ピッチおよびストライドの変化や、スタートダッシュ動作の観察的評価を通してスタートの練習効果を明らかにすることと、その観察的評価の基準をキネマティなデータをもとに明らかにすることであった。

#### 【方法】

##### 1. 被験者および実験手順

被験者は5年生(男子9名, 女子10名)であった。練習では、スタンディングスタート(以下「SS」と略す)の指導を主に実施した。指導は、陸上競技の短距離走を専門とする大学教員1名と男子学生2名に加え、実験協力校の教諭1名の計4名で行われた。練習は約3週間にわたり、平日の授業開始前の40分間(14回)および休日の午前中90分間(3回)の、計17回行われた。

##### 2. 測定項目およびデータ分析

練習期間の前後に、被験者に対してSSによる30m走を行わせ、疾走動作を被験者の右側方30mから撮影した。得られた画像データから30m走タイム、速度、ピッチおよびストライドを算出した。また、スタート動作を被験者の右側方30mから撮影し、得られた画像データからスタート動作を2次元DLT法によって分析した。またSSの観察的な評価基準を作成した。その観点は構え(5点)、スウィング脚(3点)、始動脚(3点)であり、それらを得点化し、スタートダッシュ動作得点(満点11点)を算

出した。図1に、SSの構えの観察的評価基準を示した。練習効果を調べるために各測定値について練習前後の値を対とする対応のあるt検定を行った。また、スタートダッシュ動作得点と0-5m区間の速度との相関係数を算出した。

#### 【結果および考察】

##### 1. スタートダッシュ能力の練習効果

練習前後において30m走タイムは、6.22秒から6.07秒へ有意に短縮した。0-5m区間の速度は、有意な増加が認められ、同区間においてストライドは0.89mから0.95mへ有意に増加し、ピッチは3.06Hzから3.12Hzへ、増加傾向を示した。

##### 2. スタートダッシュ動作の練習効果

練習前後においてスタートダッシュ動作得点は、7.56から8.89へ有意に増加した。観察の観点ごとにみると、構えは2.56から3.78へ有意に増加したが、スウィング脚と始動脚には有意な変化がみられなかった。またスタートダッシュ動作得点と0-5m区間の速度との相関係数は0.340から0.568へ増加傾向を示した。このことはスタートダッシュ動作得点とスタート速度との関係が強くなり、スタート動作が指導によって望ましいものへと変容したことが示唆される。すなわち、練習によってスタートダッシュ動作、特にスタートの構えが改善されたと考えられた。このことから、スタート動作の指導においては特に構えを重視することが、パフォーマンスの向上に有効であると考えられる。本研究では、こうした観察的な動作観点の基準についても合わせて発表したい。

得点	構え	特徴と観察のポイント
5		・素早く力強いスタートができる姿勢で構えている 上体がよく前傾している 前脚の膝がよく前傾している
4		・素早くスタートするための構えがとれている 前脚と反対の腕を前に出して構えている 前脚、後脚とも膝がよく屈曲している
3		・前足でキックできる構えがとれている 前後の脚が開きすぎている 前脚と同側の腕が前に構えられている
2		・不安定なスタート姿勢である 上体の前傾、膝の屈曲はみられるが、 腰がひけている
1		・スタンディング姿勢がとれていない 上体の前傾や膝の屈曲がみられない

図1 SSにおける「用意」の構えの観察的評価基準

## シンポジウム2

### 動作分析を現場に生かす

## 国立スポーツ科学センターにおける動作分析の活用事例

高松潤二 (国立スポーツ科学センタースポーツ科学研究部)

キーワード: 動作分析, 競技スポーツ, 定量的・定性的比較

### 【はじめに】

国立スポーツ科学センター(以下、「JISS」という。)は、我が国の競技スポーツにおける国際競技力の向上を科学・医学・情報の各側面から支援することが期待されて、5年前に設立された機関である。科学・医学・情報の各研究部及び事務機能を有する運営部の4部からなる組織体制のもとで、各種の事業を組織横断的に推進している。筆者は科学研究部のバイオメカニクスグループに所属しており、動作分析に関する各種の業務は主にこのグループが担っている。

筆者がJISSで関わっている事業は、大きく分けて、スポーツ医・科学に関する研究をプロジェクト的に行う事業(スポーツ医・科学研究事業)と、研究によって得られた成果をもとに競技者やコーチングスタッフを支援するための事業(トータルスポーツクリニック事業)の2つである。ここでは、特に、後者のトータルスポーツクリニック事業において筆者が関わった動作分析の活用事例を紹介したい。

### 【動作分析のとらえ方】

事例紹介の前に、いくつかの点について明確化しておきたい。

競技スポーツにおいて動作分析を現場に生かすという場合、2つの側面が考えられる。1つは、優れた競技者の動作を力学の方法によって分析し、そこに内在する原理・原則を究明・一般化すること、そしてその結果として「良い動き」に関するバイオメカニクスの知識体系に貢献するという側面(特にトップ競技者の場合、ヒトとしての身体運動の究極性が高いと考えられるので、より価値が高いと考えられる)、もう1つは、動作分析の過程で用いられる手法を選手強化の各局面で活用するという側面である。JISSのこれまでの活動を振り返ると、後者が圧倒的に多いようである。

次に、動作分析という用語の定義であるが、一般的には、何らかの計測手法によって身体運動を数値化し、被験者間の比較等を通して動作の評価や診断に役立てることとして理解されているであろう。ここでは、もう少し広義に、ビデオカメラ等で撮影した映像をもとにして観察者が定性的に実態を把握して評価・診断するということまでを含めて動作分析として定義しておきたい。

### 【比較のための動作分析】

動作分析の強みは、ある動作を何らかの方法で記録しておくことによって、別の動作と簡便に比較で

きることにある。比較の仕方に着目すると、動作分析は以下の3つに分類できると考えられる。即ち、①動作分析の結果得られた数値データの大小や変化パターンをもとにして詳細な比較・検討をしようとするもの(定量的比較)、②主として各種の映像機器を用いて動きをとらえ、観察者のイメージとのズレを抽出したり他の映像と見比べる等によって動きの比較をしようとするもの(定性的比較)、③動作分析の過程で得られる床反力等の定量的データを何らかの方法で即時的に視覚化し、競技者・指導者の運動感覚や観察力を補完・強化することに役立てようとするもの(「半」定量的比較とも言えよう)である。

### 【動作分析の事例】

上記のような3つの比較の仕方に従って、JISSにおいて筆者が行っているいくつかの事例を以下に挙げる(内容の詳細についてはシンポジウムにおいて報告する)。

①定量的比較の例: トライアスロン競技では、日本で開催されるワールドカップ等の国際大会におけるラン種目のピッチとストライドを定量化している。この分析により、日本選手と世界のトップとの違いを明らかにした上で、コーチングスタッフによって問題点の仮説設定が行われ、現在、その解決のために実験的なラン動作の2次元分析を行っているところである。

②定性的比較の例: ウィンドサーフィン競技において、洋上での定量的動作分析が現状の技術では困難であったため、後方から各選手の映像を収録・加工し、コーチの観察による定性的な分析を実施した。

③「半」定量的比較の例: 陸上競技やアーチェリーでは、トレーニングでの試技中に計測した床反力データを別途撮影した映像上にスーパーインポーズして表示(視覚化)することによって、観察のみでは把握しにくい力のデータを直観的に把握できるようにしている。

### 【おわりに】

競技スポーツにおける選手強化の諸局面において動作分析を直接的に活用する場合、ここで述べた「半」定量的な手法、即ち定量的データの効果的な可視化は、ますます重要になると思われる。近年、各種の計測デバイスが小型化する等、テクノロジーの進化が著しいことから、現場の真の課題を拾い上げ、簡便にパフォーマンスの評価ができるようなシステムの迅速な構築がこれから重要になろう。



## シンポジウム2

### 動作分析を現場に生かす

#### 動作解析からわかる高齢者の運動動作の衰退、維持および改善

湯 海鵬 (愛知県立大学)

キーワード: 動作解析、高齢者、歩行動作、体操トレーニング、階段昇降トレーニング

##### 【はじめに】

高齢者の歩行動作および下肢動作を動作解析法を用いて明らかにしようとしてきた。この発表は、以下の4つの動作解析によって構成されている。

##### 【動作分析1 死亡一年前の歩行動作の衰退】

縦断追跡研究中に、不幸にして2名の被験者が死亡した。その2名の被験者の最終歩行テストの検討から、死亡約1年前の高齢者の歩行動作の衰退様式を考察した。死亡約1年前の歩行動作は、歩行速度を始めとする動作の顕著な衰退傾向が認められた。約1年間における歩行速度、歩幅及びつま先の垂直変位の低下率については、死亡した2人の値は、今まで報告された一般高齢者の低下率より大きかった。また膝の伸展力の低下についても、先行研究で報告された一般高齢者の平均値より大きかった。

##### 【動作分析2 下肢の体操トレーニング】

高齢者の下肢筋力の顕著な衰退が見られた結果から、高齢者の筋力トレーニングを試みた。脚力の弱い高齢者に簡単な脚の体操トレーニングを39日間行い、脚力への影響を足踏み運動と歩行動作から検討した。動作解析と筋力測定の結果から、低下傾向にあった股関節屈筋力は、体操トレーニング後、平均値において10.1%の増加、膝上距離が伸び、膝上速度とパワーも増加した。歩行動作についても、歩行速度と歩幅の増大が見られた。高齢者の脚力は、低負荷であっても積極的に、自主的に日々継続して取り組めば強化され、歩行能力の維持に貢献できるのではないかと考えられる。

##### 【動作分析3 歩行動作における縦断的測定】

歩行動作の加齢による退行を追跡的に検討するために、高齢者の自由歩行動作に与える8年間という時間的影響を明らかにしようとした。養護老人ホームに居住する男女高齢者9名を被験者とし、膝伸展力、歩行速度、ステップ長、歩調、着地時間要素などを計測し、8年間変化を中心に検討した。さらに歩行能力と日常生活との関連性を調べるために、各被験者の生活様式に関する直接聞き取り調査を行った。測定と調査した結果から、一部

の縦断的および横断的先行研究が指摘した歩行速度の顕著な減少は見られず、半数以上の被験者の歩行速度の増加が見られた。その増加に、ステップ長と歩数の両方の貢献が見られた。また、歩行速度の増減と関係なく、歩調の増加、膝動作域、片脚支持時間および両脚支持時間の占めた割合の低下が見られた。このような歩行動作の変容、また改善された結果は、各々の被験者が養護施設で実践した階段昇降、散歩、ゲートボール実施が歩行能力維持に何らかの影響を与えたもの推察される。これらのことから、高齢者の歩行能力の低下防止に、日常的に行われる下半身の身体活動は有効であると考えられる。

##### 【動作分析4 階段昇降トレーニング】

動作解析3から、階段昇降、散歩やゲートボールなどは、高齢者の歩行動作の維持に効果がある結果が得られている。この実験は、高齢者歩行能力の改善を目的とした階段昇降トレーニングの有効性を確かめるものである。5人の被験者に週2回、約4週間の階段昇降のトレーニングを行い、トレーニング前後の歩行動作を記録する同時に股関節屈曲力も測定した。階段昇降のトレーニング後は、5人に4人の股関節屈曲力、自由歩行および全力歩行の速度が増加し、階段昇降のトレーニング量と歩行速度の改善率との相応関係が見られた。ステップ長と歩調の両方がほぼ同じ程度で高齢者の歩行速度の改善に貢献したが、ステップ長の増加した被験者の方がやや多かった。また、爪先の垂直変位の改善がみられ、高齢者特有のつまずきや転倒の防止の可能性が示唆された。但し、トレーニング量と逆に筋力の増減した個体と筋力の増加量と逆に速度の増減した個体が存在し、高齢者の階段昇降トレーニングにおける大きな個人差が見られた。

##### 【文 献】

湯海鵬ら：高齢者歩行動作—死亡一年前の歩行動作の退行について—、バイオメカニズム研究 26:40-43, (2002)  
 豊島進太郎・湯海鵬ら：高齢者の脚力について—膝上上体操トレーニングの足踏み運動への影響—社会福祉研究 6:26-34, 2004  
 湯海鵬：階段昇降トレーニングが歩行の能力に及ぼす影響。体育の科学 56-8(印刷中) 2006



## シンポジウム3 スポーツスキルのニューロサイコバイオメカニクス

### 眼球運動と全身移動動作との協応からフェイント動作を再考する

木島章文 (福山平成大学健康スポーツ科学科)

キーワード; cut maneuvers, frame of reference, 弾道制御, フェイント動作の空間問題

#### 【はじめに】

フットボールやバスケットボールなど身体接触を伴うボールゲームでは、攻め手が敵陣にボールを持ち込む一方で、守り手は攻め手によるボールの持ち込みを阻止する。攻め手はフェイント動作で守り手に誤った予測をさせ、その裏をかくて相手を抜く。このとき攻守が共にとりうる全身移動の方略: 全身回旋の軸足と対側に切り返す open cut maneuver (以下, オープン) と同側に切り返す crossover cut maneuver (以下, クロス) の制御方略を検討した。結果から見通される知覚-運動制御系の仕組みから、攻め手がフェイントで相手を抜くうえで充足すべき相手との位置関係を提案する。

#### 【方法】

被験者: 大学院生 4 名 (男性)

方向転換課題: 床に貼ったフロアテープにそって左足から 2 歩歩かせ、3 歩目 (左足) で左右 60° 及び正面においた 3 枚のマットのうち 1 枚を踏ませた。全身回旋の軸足となる 2 歩目は右足で踏むことになるので、左へのステップは軸足と対側方向へのオープン、右へのステップは軸足と同側方向へのクロスとなる。あらかじめ指定した回旋軸足の接地点を中心として被験者の目線に吊るした半径約 90cm の円弧上に 16 個の LED を配置し、左 8 個の点灯で左へ、右 8 個の点灯で右へ、正面 8 個の点灯で正面へ、それぞれ 1 歩踏み出させた。スタートから 1 歩目の踵を着地した時点で LED を点灯した。提示される方向を 1 試行ごとに乱順化した。各条件ともに 3 方向ごとに 8 試行ずつ、合計で 24 試行行わせた。

視線強制の手続き: 課題遂行中に回旋方向へと視線を強制させた。そのために左右 8 個の LED のうち切り返し方向 (60°) に最も近い 2 つの LED を、刺激呈示の時点 (i. e. 1 歩目を踏み込んだ時点)、及び刺激呈示から 0.5 s 経過した時点で明滅させた。左右の切り返しと平行して 2 個の LED がどのようなパターンで明滅したかを判断させ、各試行終了直後に報告させた。この手続きにより刺激呈示から 0.5 s 時点で切り返し方向に注視させた。

従属変数: 眼球と頭部の水平面回旋角度の和をとることで算出した視線角度、肩 (肩峰) の水平面回旋角度、両肩峰の中心と両大転子の中心とを結ぶ線 (体軸) の前額面回転角度。

#### 【結果 (Fig.1)】

オープンとクロスとで、従属変数間の時系列を比較した (図中実線)。視線強制を施した場合、オープンでは眼球運動がある程度全身動作と独立して回旋しうる。そして切り返し方向に体軸が倒れないため、全身回旋の軸足を接地した後も比較的柔軟に進行方向を変更させることが明らかとなった。一方、クロスでは、眼球運動

と頭部との協応を通して視線の定位が行われ、その後に肩の回旋と体軸の倒れ込みとを利用して全身の移動方向が切り返されることがわかった。

#### 【考察】

制御方略: クロスで観察された視線-頭部の先導回旋は、全身移動の制御に関する参照枠 (frame of reference: Grasso et al. 1998 etc.) が頭部で構築され、それを頂点としたトップダウン式の制御を中枢神経系が行っている可能性を示す。この制御系では、軸足接地後、特に全身の倒れ込みがなされた後に方向を変更することは困難である。こういった弾道制御機構は力学研究 (e.g. Patla et al., 1991) の結果からも推察される。一方のオープンでは参照枠が眼球-頭部協応以外の手段を通して構築されうる。また体軸の倒れ込みが不要であることから、環境変化に対して移動方向を柔軟に変更できると考えられる。フェイント動作の空間問題: フェイントにつられた受け手が誤動作を開始する時点から、正動作を起こすまでの切り換え時間を手がかりとして、「いつ」フェイントをかけるべきか検討されてきた。この切り換え時間は守り手の姿勢に大きく依存する。守り手がクロスで踏み出さざるをえないような位置関係は、攻め手が仕掛ける場合に有利である。「いつ」を時間問題とすれば、攻め手にとっての空間問題は、この位置関係をいかに作り出すかであるといえる。時間問題を検討する上で心理学実験・理論は多いに貢献してきた。今後、空間問題の解法を検討する上では、力学に加え知覚-運動制御研究の観点から、攻守動作の時系列的対応を検討することが必要となる。

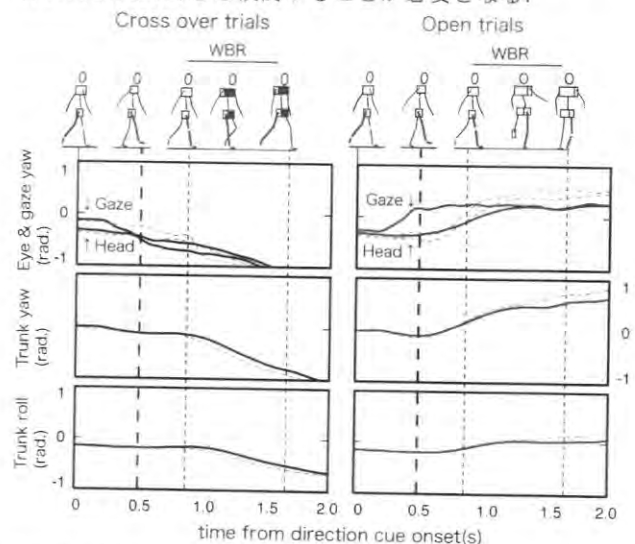


Fig.1 Angular displacements of gaze-head yaw (top), trunk yaw (middle), trunk roll (bottom).

\*WBR: Whole body rotation phase.

## シンポジウム3 スポーツスキルのニューロサイコバイオメカニクス

### 運動イメージとスポーツトレーニング効果との相互関係

高橋 真 (国立身体障害者リハビリテーションセンター研究所)

キーワード: 運動イメージ, メンタルトレーニング, 運動技能, 運動学習

#### 【はじめに】

近年、スポーツを始めとした様々な分野で、実際に運動は行わず、運動を思い描く「運動イメージ」を用いた「メンタルトレーニング」が注目されている。勿論、スポーツ熟練者などにみられる巧みな動作は、繰り返しの練習によって身につくものであり、身体練習が不可欠である。しかしながら、身体練習とメンタルトレーニングを組み合わせることで効果的に運動技能を向上させることができることが報告されている。また、実際のスポーツ場面では過度の緊張や不安などから、練習で身につけた実力を十分に発揮できないことがあるが、この問題の対応策としてもメンタルトレーニングが活用されている。本シンポジウムでは、特にメンタルトレーニングを用いた運動技能の学習効果について、我々の研究成果を交えて、最近の知見を紹介する。

#### 【運動イメージの神経機構】

運動イメージ中には、運動のプランニングに関わる脳領域（前頭前野、後頭頂野）や運動の遂行に関わる脳領域（運動野、補足運動野、運動前野、小脳、大脳基底核）において、実際の運動遂行時と同様の活動が生じることが明らかとなってきた。したがって、原理的には、身体運動を伴わない運動イメージの繰り返し、すなわちメンタルトレーニングによって、運動学習を促進できると考えられる。さらに、PETを用いた研究により、メンタルトレーニングによる運動系列学習時には、実際の身体運動による学習時と同様の脳血流変化が起こることが報告されている。このような研究結果は、メンタルトレーニングを運動学習に応用する際の理論的根拠となる。

#### 【運動イメージ想起の戦略】

運動イメージの想起は、自分が運動している感覚をイメージする内的イメージ（一人称的イメージ, Kinesthetic motor imagery）と、他人が運動しているのを観察していることをイメージする外的イメージ（三人称的イメージ, visuo-motor imagery）に分類することが可能であるが、メンタルトレーニングにおいて、どちらが効果的であるかについてはさまざまな議論があり、まだ結論は得られていない。一般的に、イメージする運動技能の熟練者では内的イメージを、未習熟者では外的イメージを想起しやすい。例えば、剣道の面打ち動作において、未習熟者では、視覚手がかりがない場合ではイメージの想起が困難であり、面打ち動作のビデオを見ながらの方

が容易であることが、経頭蓋磁気刺激によって得られる運動誘発電位を指標に明らかにされている。

#### 【メンタルトレーニングで運動技能は向上する？】

単関節の単純な運動から実際のスポーツ動作まで幅広いレベルで、メンタルトレーニングによって運動技能が向上するという証拠が蓄積されつつある。例えば、小指外転筋の等尺性収縮課題を用いた研究では、実際の筋収縮を行った群では勿論のこと、メンタルトレーニングのみを行った群でも有意に筋力が増大した。同様の結果は、足関節の底・背屈筋においても報告されている。これらの結果は、筋肥大の前の筋力増加の神経科学的な基盤であることが示唆される。また、ピアノを弾くという複雑な指の運動や、輪投げやバスケットボールのフリースローなど実際のスポーツ場面に近い運動などにおいても、メンタルトレーニングのみを実施することで、運動技能が向上することが報告されている。

一方、前述のように、運動イメージ、特に内的イメージに関しては、どのようなイメージでも自由に想起できるというわけではない。すなわち、内的イメージを用いたメンタルトレーニングによって全く新しい運動技能を学習することは困難であることが予想できる。事実、足の親指をある程度外転させることができる者はメンタルトレーニングによって、外転運動技能が向上したが、全く外転ができない者では、メンタルトレーニングによって運動技能の向上がみられないことが報告されている。したがって、メンタルトレーニングを運動学習に用いる際には、未習熟の段階では見取り稽古に代表されるような外的イメージを用いたり、身体練習と併用したりするなど、メンタルトレーニングの限界を認識し、活用することが重要である。例えば、ゴルフの初心者において、アプローチショットの運動技能は、実際にショット練習のみを行う場合より、メンタルトレーニングと組み合わせることで、より運動技能が向上することが報告されており、身体練習とメンタルトレーニングを組み合わせることで、より効果的に運動学習を促進できることが示唆される。

#### 【さいごに】

メンタルトレーニングは、スポーツ分野に限らず、運動機能障害後のリハビリテーションなどへも応用可能であり、メンタルトレーニングの効果検証を始め、身体練習との相互関係などの研究は、今後益々重要になってくると考えられる。

## シンポジウム3 スポーツスキルのニューロサイコバイオメカニクス

### 正確さを意識した投球動作における相互作用トルクの機能的役割

平島雅也 (東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻)

キーワード: 投球、正確さ、ノイズ、筋トルク、相互作用トルク、3次元動作

#### 【はじめに】

投球動作などのスポーツ動作では、高速な動きを正確に遂行する必要がある。しかし、一般的に動作の速度を増すと正確性は落ちるため、速さと正確さを両立することは難しい(speed-accuracy tradeoff)。この現象は、「筋出力の増大に伴い、運動指令に混入するノイズが増大する」という生体の神経生理学的特徴に起因すると考えられている(Harris and Wolpert 1998)。このような制約の中、スポーツ選手はどのようにして高速かつ正確な動作を遂行することができるのだろうか。

多関節動作では、関節の回転は、筋トルク、重力トルクだけではなく、セグメント間の相互作用によって生じる相互作用トルクの影響も受ける(Hollerbach and Flash 1982)。本研究は、熟練投球動作で見られる肩内旋、肘伸展、手屈曲の大きな角速度が、これら3つのトルクによって生み出されるメカニズムを検討し、高速かつ正確な動作の制御方略を明らかにすることを目的とする。

#### 【方法】

野球経験者(男性)7名に、9m離れた的を狙って野球ボール(135g)を投げる動作を行わせた。球速条件は遅、中、速の3種類とし、各3試行をランダムに行った(合計9試行)。6台のハイスピードビデオカメラ(HAS-200R, Ditect)を用いて、毎秒200コマで動作を計測した。得られた運動データに逆動力学計算を適用し、肩、肘、手関節の筋トルク、相互作用トルクを算出した(重力トルクは他の2つに比べて非常に小さいので省略する)。筋トルクと相互作用トルクによって生み出された肩内旋、肘伸展、手屈曲のボールリリース時の角速度を算出した(Hirashima et al. in press)。

#### 【結果】

肩内旋(図1C)では、筋トルクと相互作用トルクの両方を用いてボールリリース時の大きな角速度を得ていた。また、動作速度を増すために、両方のトルクを増加させていた。

一方、肘伸展(図1B)、手屈曲(図1A)では、もっぱら相互作用トルクを利用して、ボールリリース時の大きな角速度を得ていた。また、動作速度を増すために、相互作用トルクを増加させていた。

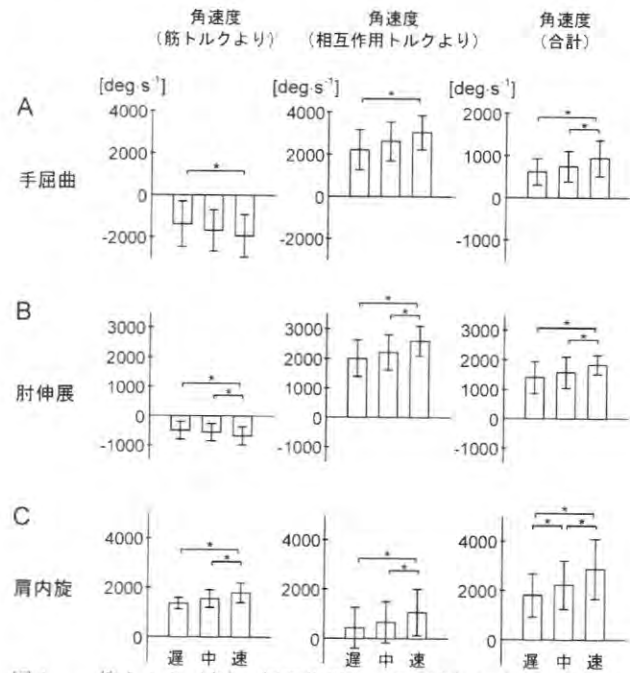


図1 筋トルク(左)、相互作用トルク(中)によって生み出された各関節回転のボールリリース時の角速度および、その合計値(右)。

#### 【論議】

ある関節の相互作用トルクの増加は、結局のところ他の関節の筋トルクの増加に起因している。つまり、肩、肘、手関節の相互作用トルクの増加は、体幹や肩の筋トルクの増加に起因していると考えられる。近年、ノイズ研究により、同じ筋力を出力するのであれば、MVC筋力が大きい筋を使った方が、変動が少なく済むことがわかってきた(Hamilton et al. 2004)。従って、高速な運動を行う際に、ノイズの影響が比較的少ない筋を持つ近位部では筋トルクに依存し、遠位部では相互作用トルクに依存するという熟練者の方略は、高速かつ変動の少ない動作を実現する上で有効な制御方略であると考えられる。

#### 【参考文献】

- Hamilton AF, Jones KE, and Wolpert DM. The scaling of motor noise with muscle strength and motor unit number in humans. *Exp Brain Res* 157: 417-30, 2004.
- Harris CM and Wolpert DM. Signal-dependent noise determines motor planning. *Nature* 394: 780-784, 1998.
- Hirashima M, Kudo K, and Ohtsuki T. A new non-orthogonal decomposition method to determine effective torques for three-dimensional joint rotation. *J Biomech* (in press).
- Hollerbach JM and Flash T. Dynamic interactions between limb segments during planar arm movement. *Biol Cybern* 44: 67-77, 1982.



## シンポジウム3 スポーツスキルのニューロサイコバイオメカニクス

### 心理的プレッシャーが打球動作の筋活動に及ぼす影響

松本直子 (株式会社アシックス スポーツ工学研究所)

キーワード: 心理的プレッシャー, 筋電図, 打球動作

#### 【はじめに】

本稿では、「課題を成功させなければならない」という心理的プレッシャーが打球動作に及ぼす影響を調べた筆者らの研究結果(3, 4)を紹介する。実験では、テニスのフォアハンドストロークに近い動作を、座位で、主に上肢を使って行う装置を作製し、課題を必ず成功するように指示した場合とそうでない場合の心拍数、筋電図(橈側手根屈筋、橈側手根伸筋、大胸筋、小円筋)などの違いを調べた。

【心理的プレッシャーが、打球の方向と距離の制御を必要とする打球動作に及ぼす影響】

被検者9名に、傾斜を転がってくるボールを打って箱に入れるという動作を行わせた。条件は2つで、PT(Pressure Trial:60 試行)では験者が被検者に「必ず成功するように」指示し、non-PT(180 試行)ではそのような指示は与えなかった。

心拍数は、non-PTよりもPTの方が有意に高かった。筋放電開始時刻までの「待機期間」、筋放電開始時刻から打球時刻までの「打球期間」、打球時刻後の「フォロースルー期間」の筋電図積分値を求めたところ、打球期間とフォロースルー期間では被検筋全てで、待機期間では拮抗筋の橈側手根伸筋と小円筋のみで、PTがnon-PTよりも有意に大きかった。

心理的プレッシャーが心拍数を上昇させることは、過去の研究で明らかになっており(1, 2, 5)、PTの心理的プレッシャーはnon-PTよりも高かったと考えられる。心理的プレッシャーが高いときに筋活動量が増す傾向にあったことから、交感神経系の活動が優位な状態にあると考えられる。また、心理的プレッシャーの筋への影響が、期間によって異なっていたのは、注意の配分が影響していると考えられる。つまり、待機期間には、心理的プレッシャーの影響を小さくするための注意の配分が多く、筋活動の増加は抑制される。しかし打球動作を行っている時には、打球動作そのものに注意を向ける必要があるため、心理的プレッシャーの制御に向けられていた注意が減り、筋活動の増加につながったと考えられる。

【心理的プレッシャーが、打球の方向と距離の正確な制御を必要とする打球動作に及ぼす影響】

被検者11名に、転がってくるボールを打ち、傾斜上に設けた円の内でボールが止まり転がり落ちてくるという正確性を要する課題を行わせた(図1)。4試行を1セットとし、4試行目で成功すればそれまでの成功試行分の得点を獲得できるが、4試行目で失敗すれば全く得点を獲得できない設定とし、4試行目をLT(Last Trial:56 試行)、前の3試行を

non-LT(168 試行)とした。そのときの心拍数、筋放電開始時刻から打球時刻までの筋電図積分値、ガイドレールの下端をボールが通過してから筋放電が開始するまでの筋放電潜時を求めた。

心拍数は、LTがnon-LTよりも有意に高かった。全ての被検筋で、LTの筋電図積分値がnon-LTよりも有意に大きかった。さらに、小円筋のLTの筋放電潜時が、non-LTよりも有意に短かった。

LTの心拍数がnon-LTよりも高かったことから、LTはnon-LTよりも心理的プレッシャーが高かったと考えられる。今回の実験結果より、心理的プレッシャーは、筋の活動開始のタイミングと活動量の両方に影響を及ぼすことが明らかになった。しかし、筋活動開始のタイミングへの影響は、筋活動量ほど顕著でなかったことから、筋活動のタイミングと力は独立に制御されており、力の制御はより心理的プレッシャーの影響を受けると考えられる。

#### 【文献】

- 1) 橋口泰武, 坂入保世 (1986): 運転免許仮検定時における受験者の心拍数と態度の関係. スポーツ心理学研究 13:56-59
- 2) 黒田一寿, 石井源信, 石川国広, 蝶間林利男 (1997): テニスのサービスにおける心理的ストレスの生体にも及ぼす影響. スポーツ工学シンポジウム講演論文集: 207-211
- 3) Matsumoto N, Yanase-Fujiwara M, Ohtsuki T (1997): Effects of psychological pressure on ball-stroking movements. Book of Abstracts, XVI Congress of the ISB, 112
- 4) Matsumoto N, Yanase-Fujiwara M, Ohtsuki T (2001): Effects of trial importance on the accurate ball-stroking movements. Book of Abstracts, XVIII Congress of the ISB, 246-247
- 5) Taggart P, Gibbons D, Somerville W (1969): Some effects of motor-car driving on the normal and abnormal heart. British Medical Journal 4: 130-134

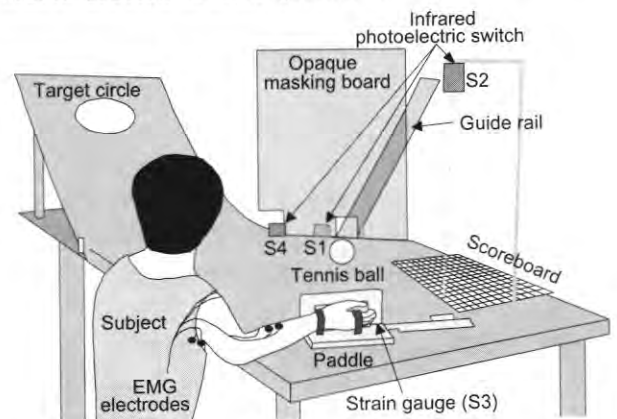


図1 実験装置