

I-29	自然な歩行～お手本はマサイ族!?～	160
I-30	「歩く」と「走る」はどこで切り替わる?	162
I-31	ハイハイで世界観が変わる赤ちゃん	164
I-32	低強度でトレーニングするなら超ゆっくり!	166
I-33	筋肉の質に対するアンチエイジング	168
I-34	振動刺激でカラダが鍛えられる?	170
I-35	固有感覚は運動で改善するのか?	172
I-36	バランス能力は遺伝的なもの? 環境因子によるもの?	174
I-37	いかにバランスを崩せるか!それがバランスの決め手	176
I-38	高齢者が苦手なバランスと得意なバランス	178
I-39	転倒を防ぐ「とっさの1歩」	180
I-40	筋力をつけると転びにくくなる?	182
I-41	加齢とともに運動がイメージしにくくなる	184
I-42	腕が痛い イメージもしにくい	186
I-43	できないことをできるようにする～繰り返すことの重要性～	188
I-44	寝る子は育つ～睡眠依存性運動学習～	190
I-45	年をとれば筋肉痛は遅れて出る?	192
I-46	疲労の原因は乳酸?	194
I-47	前十字靭帯損傷～予防への道～	196
I-48	足関節捻挫～予防への道～	198
I-49	ハムストリングスの肉離れ、 なぜ大腿二頭筋に生じやすいのか?	200
I-50	運動により尿漏れの予防と治療は可能か?	202
	索引	204

## [O] 運動の制御・スポーツ科学編

Oda Lab.

小田 伸午研究室

## 打つべきか否か バッターの迷い ベンチの迷い

ボールが投手の手元を離れてホームプレート上を通過するまでわずか0.5秒。文字通り、“あっ”という短い間にも、野球には多くのドラマが詰まっている。週刊誌の連載マンガでは、たった1球の出来事で1話となる場合もある。これまでの苦しい練習シーンや試合展開のふり返り、駆け引きなどが頭の中を一気に流れて…、となるのだろうが、実際の場面では少なくとも、インコースかアウトコースか、ストレートかカーブか、打つか打たないかなどを判断しなければならない。野球ではストライクゾーンからはずれる投球には“見逃す”，すなわち“スイングしない”ことで打者に有利となる。野球の打撃のように、“打つ”か“打たない”かという選択をする運動をGo/Nogo課題と呼ぶ。Go/Nogo課題は選択反応課題の一種であるが、「反応しないこと」を選択するのであるから“Nogo反応”というのは少々特別な判断といってい

だろう。判断は、その素早さと正確さによって評価される。判断の素早さは、反応時間という客観的なデータを用いて示され、認知や運動に関わる中枢神経系の情報処理の早さの指標とされる。野球選手を対象として、反応時間を測定した研究(1)によると、図に示したように単純反応課題では競技レベルの差はみられなかったが、Go/Nogo課題では競技レベルが高いほど、反応時間が早くなることが分かった。さらに、プロ選手では単純反応時間とGo/Nogo課題の反応時間との間に非常に高い相関があり、技量レベルの高い野球選手では、素早く打つか打たないかの判断ができる可能性を示している。

打つか打たないかの判断は、投球のコース(ストライク・ボール)以外にも様々な要因が絡んでいる。例えば、ボールカウント、0ストライク3ボールのケースを考えてみよう。もしボールを見逃せば、四球となり、出塁することができる。かといって、投手もストライクを取りたいであろうから、ヒットにしやすい甘いボールが来るかも知れない。何とも悩ましい状況である。2005年のプロ野球全試合全打席のデータを使ったカウント別の打撃成績(2)をみると、0ストライク3ボールからヒットにいった場合の打率は.407、長打率は.854であり、見逃した場合も含めた出塁率は.937であった。さて、このデータをどう解釈しようか。全てのカウントでの平均は、打率.268、長打率.412、出塁率.330である。打率、長打率ともにノースリーの方が遙かに上回っており、打たなきゃ損のような気もする。一方、もしも見逃して、1ストライク3ボールになった場合を考えると、打率.363、長打率.611、出塁率.699となる。ワンズリーになっても7割の確率で出塁することができる。ノースリーから打ったとしても、ヒットになる確率が高々4割程度ということを考えれば、1球見逃すこともよい手だといえよう。

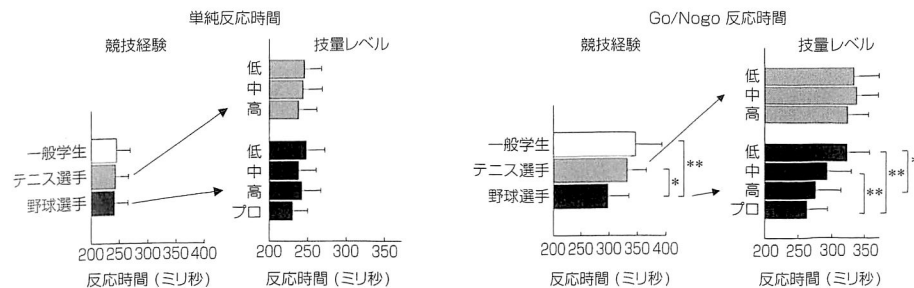


図 単純反応時間では競技種目、レベルに違いは見られなかったが、Go/Nogo課題では、競技レベルが高くなるにつれて、反応時間が早い値であった。

1 Kida N et al. Intensive baseball practice improves the Go/Nogo reaction time, but not the simple reaction time. Brain Res Cogn Brain Res. 22: 257-264, 2005. を改変引用)

次は無死走者1塁のケースである。この場面では、バントで走者を確実に2塁へ送った方が良いのだろうか、それとも、ヒッティングで一気呵成にたたみかけた方が良いのだろうか。2005年から2007年までの夏の甲子園、4大会分の記録をまとめた興味深いデータがある(3)。無死1塁という状況のうち、68.9%の場面でバントを仕掛けていた。そして、バントしたケースのうち、得点できたのは38%であった。なかなか高い確率である。しかし、強攻策であるヒッティングであっても、得点できた確率は38%と全く同じであった。高校野球の場合、強攻策を選択するということは、その選手の打撃能力がかなり可能性もあり、一概にはいえないかも知れないが、送りバントでも強攻策でも得点の可能性はそれほど変わらなさそうである。

野球という競技は、監督も選手と同じユニホームを着て試合に臨む。当たり前のように感じるが、実は監督と選手が全く同じ姿をする競技は非常に珍しい。監督も選手と共に戦うチームの一員であり、選手だけでなく、監督も一瞬一瞬の状況に応じた判断力が要求される。その点にも、野球の面白さがあるのだろう。

[来田 宣幸]

### ■参考図書

Jアルバート, Jベネット. メジャーリーグの数理科学(上)(下). シュプリンガー・フェアラーク東京, 2004.

### ■引用文献

- (1) Kida N et al. Intensive baseball practice improves the Go/Nogo reaction time, but not the simple reaction time. Brain Res Cogn Brain Res. 22: 257-264, 2005.
- (2) 加藤英明, 山崎尚志. 野球人の錯覚. 東洋経済新報社, 2008.
- (3) 川村 卓, 中村 計. 甲子園戦法. 朝日新聞社, 2007.

## スポーツ選手における眼と手の反応の早さ

百話あるヒトの動きの中でも、今回は最も速い部類の動きに注目してみよう。その1つにあげられるのが実は眼球運動である。眼球運動にはさまざまな種類がある（O-08パーゼンスの項参照）が、その中でも最も速いのは、サッケード眼球運動（Saccadic eye movement）であり、その速さはピーク時で毎秒約700°以上にもなる。

眼球運動を司っている脳の部位は、主に中脳の上丘（Superior colliculus）、および前頭眼野（Frontal eye field）や補足眼野（Supplemental eye field）であるといわれており、眼球運動は反射的な経路と随意的な経路によって駆動されると考えられている（図1）。視野の周辺部に何か光が現れたとき、そちらのほうについて目を向けてしまった、という経験をした方もいるだろう。このような、光が点灯した方向と同じ方向に素早く目を向ける眼球運動をプロサッケードといい、反射的に駆動されることの多い眼球運動である。一方で光の点灯方向と逆方向への素早い眼球運動をアンチサッケードといい、より随意的に駆動される眼球運動である。反射的な眼球運動では上丘が、随意的な眼球運動を行う際には前頭眼野や補足眼野が活動しており、眼球運動に関わる神経経路は複数存在するといわれている。

さて、スポーツ選手は動体視力が良いといわれているが、スポーツ選手の眼球運動の反応はどれくらい速いのだろうか。卓球選手を対象に眼球運動を行わせたとこ、プロサッケードでは差は見られなかったが、アンチサッケードでは卓球選手のほうが一般成人に比べて反応時間が短かった（1）。このことから、素早い目の動きが必要とされる球技選手は随意的に眼球運動を素早く動かす能力が高い可能性が示唆されている。また、クレ射撃の選手は眼球を静止させる能力が高く、サッケード反応時間も早く、さらにサッケード反応時間がトレーニングにより早くなった一例も示している（2）。これらの研究は、スポーツ選手の眼球運動特性がトレーニングによって向上する可能性を示している。

では、目と手の反応をあわせた場合の反応時間に関してはどうだろうか。2つの反応を合わせて行う時には、それぞれの反応を単独で行う時よりも反応時間が長くなる「干渉効果」が起こる（3）。著者らは、周辺視野の視覚刺激に対して、プロサッケードとキー押し反応をそれぞれ単独で行う（Single）条件と、両反応をあわせて行う（Dual）条件での各動作の反応時間を測定し、大学バレーボール選手と一般大学生との間で比較を行った。その結果、サッケード反応時間は両グループともにSingle-Dual条件間で差は見られなかった（図2A）。一方、両グループに共通して、キー押し反応時間がSingle条件よりもDual条件で長くなり、その遅延の大きさは一般大学生に比べバレーボール選手で小さかった（図2B）。これは、手指の運動指令が眼球運動指令による干渉を受けた可能性を示唆しており、またこの干渉の程度は、バレーボールな

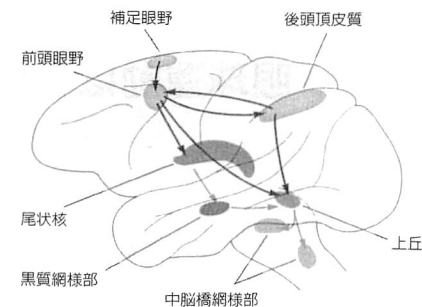


図1：眼球運動における神経経路の図。上丘を通る経路と、前頭眼野・補足眼野を通る経路がある。（Kandel ER et al. Principles of neural science: Fourth Edition. p793, 2000.を改変引用）

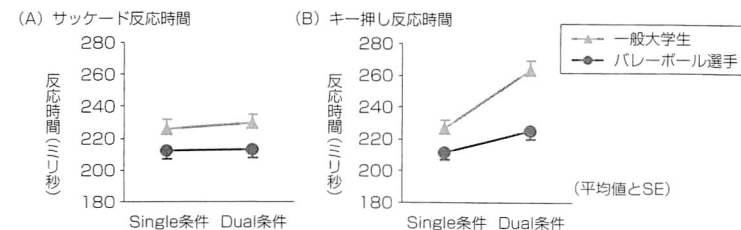


図2：眼と手の干渉作用。バレーボール選手ではDualタスクにおけるキー押し反応時間の遅延量が小さくなった。

（Kokubu M et al. Interference effects between saccadic and key-press reaction times of volleyball players and nonathletes. Percept Mot Skills, 103: 709-716, 2006.を改変引用）

どの球技経験を積むことで小さくなる可能性を示した（4）。眼球運動と手の運動を司る部位には共通した部分があるといわれており、球技経験を積むことで、より干渉の起こりにくい神経経路を用いることができるようになるのではないかと推察される。

一方、スポーツにおいて、ハードウェアとしての眼球運動の特性自体にはあまり差はないのではないかという意見もある。つまり、眼球運動により得られる視覚情報はそれぞれのスポーツに特有の状況において有用であるに過ぎない、という考え方であり、これに関しては議論が分かれるところである。眼球運動特性のトレーナビリティに関しては、今後スポーツの世界で解決されるべき研究課題となるであろう。

【國部 雅大】

### 引用文献

- (1) Lenoir M et al. Are better eye movements an advantage in ball games? A study of prosaccadic and antisaccadic eye movements. Percept Mot Skills, 91: 546-552, 2000.
- (2) Di Russo F et al. Fixation stability and saccadic latency in elite shooters. Vision Res, 43: 1837-1845, 2003.
- (3) Pashler H et al. Saccadic eye movements and dual-task interference. Q J Exp Psychol A, 46: 51-82, 1993.
- (4) Kokubu M et al. Interference effects between saccadic and key-press reaction times of volleyball players and nonathletes. Percept Mot Skills, 103: 709-716, 2006.

## 眼球運動は手の到達運動をガイドする

先日、図書館の地下書庫にて、今から約100年以上前に出版された本を手にする機会があった。ヒトの到達運動を研究したWoodworthが1899年に書いた博士論文の本(1)である。さすがに100年も経つと、使われている紙自体がもろくなっているため、袋に入った形で今も大切に保存されていた。この本は我々にいかなるメッセージを伝えているのだろうか。

Woodworthはこの本で、目の前にある目標物へ向かって行われる手を伸ばす到達運動(リーチング)における手の軌道観察をもとに、到達運動が運動初期の「弾道運動フェーズ」と運動終盤の「修正運動フェーズ」の2つのフェーズに分けられて制御されていると主張した。つまり、到達運動を行う際には、まず弾道運動により手を目標物の近くまで素早く近づけ、その後手の速度を落としながら正確に目標物に到達しようとするのである。この研究は、到達運動を研究する多くの論文に引用されており、後に行われる多くの実験の礎となっている。その後現在に至るまで、到達運動の正確性を高める上でどのような要素が寄与しているのかについて研究が行われ、視覚や自己受容感覚などが重要であることが指摘されてきた。

さて、ここでは特に視覚および眼球運動が到達運動に与える貢献について考えてみよう。多くの研究者が到達運動中の眼球運動を測定し、その時空間的特徴を記述してきた。それによると、眼球運動の開始は手の到達運動の開始に先行し(図1)、到達運動が開始される前後の時刻にはすでに目標物に注視が向けられているということが示されている(2)。つまり、運動の終盤である修正運動フェーズにおいては、目標物を視野の中心で捉えた状態であり、その視覚情報をもとに正確な運動が実現されているのである。

それでは、到達運動の正確さ(エラー)に関しては、眼球運動や注視による影響はみられるのであろうか。正確な到達運動の計画や実行には、「参照枠(Frame of reference)」つまり座標系が用いられており、網膜(中心)座標系、頭部座標系、肩座標系、身体中心座標系などを元に、体に対する目標物の位置情報を把握していると考えられている。どの枠組みを用いて到達動作を行っているのかについては、研究によって見解が異なる。近年、自己中心座標系だけでなく、眼球中心座標系(Gaze-centered representation)が到達運動を行っているという主張(図2)も起こってきている(3)。さらに、Admiraalらは、注視位置がばらつくことと到達運動もばらつくことを示しており(4)、このことから眼球中心座標系が正確な到達運動に重要であることが示唆される。このように、到達運動における視覚フィードバック、および手の運動をガイドする眼球運動の重要性が、さまざまな観点から明らかにされてきている。

近年Elliottらは「Woodworthの研究から100年後」というタイトルのレビューを発

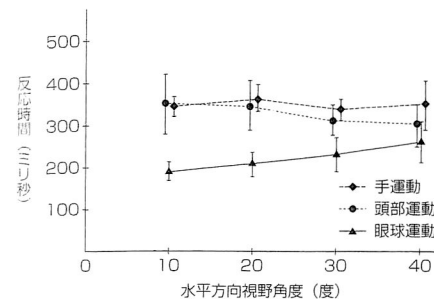


図1 眼の動きは手の動きに先行している。(Biguer B et al. The coordination of eye, head, and arm movements during reaching at a single visual target. *Exp Brain Res*, 46: 301-304, 1982.を改変引用)

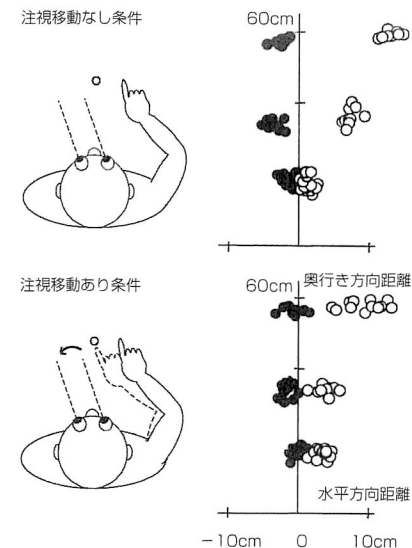


図2: 眼球中心座標系。途中で注視の移動が行われた場合(移動あり条件)、到達位置のエラーは移動後の注視方向を基準にした分布をとる。(Crawford JD et al. Spatial transformations for eye-hand coordination. *J Neurophysiol*, 92: 10-19, 2004.のFig.1B, Cを改変引用)

表した(5)。Woodworthの研究成果に改めて注目し、この100年間における到達運動研究の進歩を振り返っているのである。この例は、眼が手をガイドするという到達運動に関する知見が、先人の記した研究成果によるガイドがあってこそそのものなのだ、ということを我々に教えてくれている。まさに温故知新が体現されている例である。

さて、この本は100年後の読者にいかなるメッセージを伝えることになるのだろうか。 [國部 雅大]

### ■参考図書

乾 敏郎編. 認知心理学1 知覚と運動. 東京大学出版会, 1995.

### ■引用文献

- (1) Woodworth RS. The accuracy of voluntary movement. *Psychol Rev*, 3 (3, Suppl. 13), 1-119, 1899.
- (2) Starkes J et al. A ménage à trois: the eye, the hand and on-line processing. *J Sports Sci*, 20: 217-224, 2002.
- (3) Crawford JD et al. Spatial transformations for eye-hand coordination. *J Neurophysiol*, 92: 10-19, 2004.
- (4) Admiraal MA et al. Interaction between gaze and pointing toward remembered visual targets. *J Neurophysiol*, 90: 2136-2148, 2003.
- (5) Elliott D et al. A century later: Woodworth's two-component model of goal-directed aiming. *Psychol Bull*, 127: 342-357, 2001.

# 癖を見抜け なくて七癖あって四十八癖

2003年7月31日、1人のプロ野球関係者がこの世を去った。名前は井上浩一、享年64歳。『監督刑事』（小林信也著、東京書籍、2000年）のモデルともいわれた井上さんは、近畿日本鉄道に入社後、近鉄バファローズ、読売ジャイアンツなどでスコアラーを務めた。プロ野球選手としての経験はなかったものの、単にスコアを付けてデータを収集・整理するだけでなく、ビデオを使った分析を導入したり、読唇術を試みたり、監督が出すブロックサインを見抜いたり、スコアラーとしてチームの勝利に貢献し、「球界の007」と呼ばれた。今でこそ、どれも当たり前のように行われていることだが、時代に先駆けて導入したその存在は、現代野球へ大きな影響を与えたひとりである。

井上さんは、投手の癖を見抜くことも武器のひとつとしていた。ボールを握るときに、顔をしかめたらフォークボールだという野球コントの定番ネタもあるが、「なくて七癖あって四十八癖」といわれるように、誰にでも隠せない癖が1つや2つはあるものだ。たとえば、ピッチャーが振りかぶったときの肘の曲がり具合で球種が分かるであるとか、セットポジションの姿勢で、牽制球を投げるか、打者に投げるかが分かるであるとか、ちょっとした動きの違いも見逃さない、牽制球がないと分かれば、盗塁の成功率はぐっと高まる。

打撃で結果を残すためには、スイングスピードを上げることや変化球にうまく対応する技術を磨くことは当然大切である。しかし、投手の癖を見抜いて、球種やコースがもし分かれば、ヒットにできる確率はかなり高くなるであろう。表面からは見えない部分での努力も重要であり、バッターボックスに入る前から、スイングを開始する前から、すでに勝負は始まっているといえる。多くの可能性（球種、コース、スピード）の中から、相手の出方をできるだけ早く正確に予測する、この駆け引きも野球の醍醐味である。

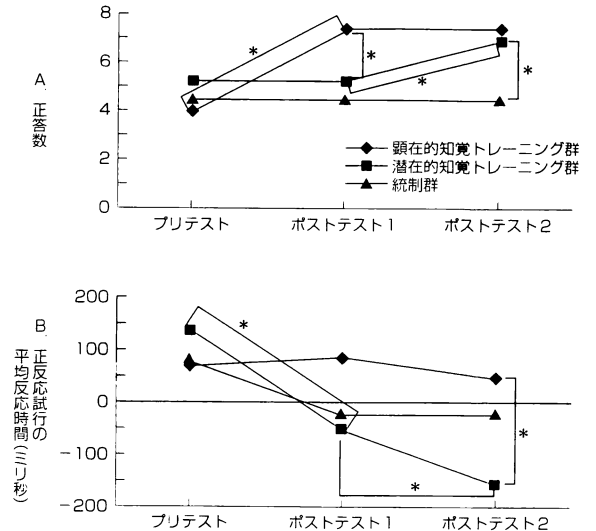
最近、次の一手を予測する力を鍛えるトレーニング法が盛んに研究されている。知覚トレーニング、あるいは認知トレーニングと呼ばれ、選手の視線から撮影した映像を見ながら結果を予想したり、映像を途中でストップさせて、その先の結果を予想したりするものである。中学野球選手を対象とした研究(1)では、投手がボールをリリースしてから200ミリ秒後までの映像を見せて、球種、コース、タイミングを予測するトレーニングを1日50球、4日間実施した。その結果、予測の正確性だけでなく、打撃パフォーマンスも向上し、知覚トレーニングの効果が認められている。

テニスのサービスリターンを題材として、知覚トレーニングの際、映像を見るポイントをどのように教示すると良いかという実験もなされている(2)。テニスの場合、腰の回転角度でサーブのコースが分かる。腰の回転角度とサーブコースの関係を具体

図1 コース・球種予測

潜在的知覚トレーニング群は、顕在的トレーニング群より遅れて正答数は向上する(A)。一方、反応時間は顕在的トレーニング群よりも有意に早い反応ができるようになった。

羽島真紀ほか、テニスのサービスリターンの知覚トレーニングにおける予測手掛かり教示の有無とトレーニング期間の効果。広島体育学研究、26:51-58, 2000より)



的に教示した場合と腰周辺に注目させただけの場合で比較したところ、後者の方がサーブのコース予測の学習に有効であった。視線や注意を向ける先についてある程度の情報を与え、その中で自由に探索し、学習することを発見学習といい、はっきりした答えを与えるよりも、知覚トレーニングの効果がありそうだ。

また、全くヒントを与えずに知覚トレーニングさせる場合は、潜在的学習といい、図に示したようにトレーニング効果がより大きいという報告もある(3)。ヒントも与えられず、ポイントも明示的に「分かっていない」のに、「予想できる」状態である。現在進行形で研究が進んでいる分野なので、今後の展開から目が離せない。水面下の戦いこそ、もっともスリリングで、ドキドキハラハラさせられるものかも知れない。舞台の下での勝負にも目を向けると、ますますスポーツが面白くなるかも知れない。

[来田 宣幸]

### ■参考図書

ひぐちアサ、おおきく振りかぶって、講談社（『月刊アフタヌーン』にて連載中）

### ■引用文献

- (1) 中本浩揮ほか、知覚トレーニングが初級打者の予測とパフォーマンスに与える影響。体育学研究、50: 581-591, 2005.
- (2) Williams AM et al. Anticipation skill in a real-world task: measurement, training, and transfer in tennis. J Exp Psychol Appl, 8: 259-270, 2002.
- (3) 羽島真紀ほか、テニスのサービスリターンの知覚トレーニングにおける予測手掛かり教示の有無とトレーニング期間の効果。広島体育学研究、26: 51-58, 2000.

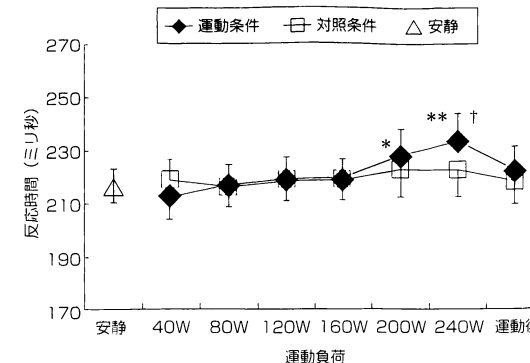
## 運動中に“周りが見えなくなる”のか？

最初にサッカーの試合でみられるある場面を思い浮かべてほしい。味方のフリーの選手がゴール前の絶好の位置でパスを待っている。しかし、ボールを持った選手はパスを出さずに、自分でドリブルをしてボールを取られてしまいサポーターの歓声がため息に変わる…。そんな時、その選手は“周りが見えていない”といわれるだろう（誰もが認めるストライカーなら許されるのかもしれないが）、サッカーやバスケットボールなどの球技では“周りがよく見えている”、“視野が広い”などという表現がよく用いられる。このことは、スポーツにおいて周囲の状況をいかに把握するかがパフォーマンスに影響を与えることを示唆している。それでは運動中に周りが見えなくなるのだろうか？

我々の目の前にあるものは、光の情報として目の網膜に届き、網膜の視細胞で電気信号に変換される。そして、その信号は網膜から脳に伝達され階層的に処理される。視野とは、我々が目の前の一点を注視した時に見えている範囲のことである。網膜の中心窩とよばれる中心部付近でみる視野を中心視野といい、網膜の周辺部でみる視野を周辺視野という。中心視野では物体の色や細かい形状を見分けることができるが、周辺視野でははっきりと見ることはできない。むしろ周辺視野は眼の前の空間を把握する役割を果たしており、中心視野と周辺視野はそれぞれの特徴をいかにしながら視野を構成しているといえる。

スポーツの現場で“周りを見る能力”を定量的に評価することは難しいかもしれないが、実験室で行われる実験では周辺視野での反応の早さを反応時間という客観的評価の可能な指標で検討している。自転車エルゴメータを用いて、最高酸素摂取量の65%の強度での運動中に中心視野と周辺視野の反応時間を測定したところ、中心視野での反応の早さは運動中と安静時で差がみられなかったのに対して、運動中の周辺視野での反応の早さは安静時と比べて低下した(1)。このことは、周辺視野での反応の早さが中心視野での反応の早さと比較して運動の影響を受けやすいことを示している。また、運動強度を徐々に上げながら周辺視野の反応時間を測定したところ(図)、換気量が急激に増加し始める換気性作業閾値を越える高強度での運動中に周辺視野の反応時間の増加がみられた(2)。さらに、運動中の周辺視野での反応は脳の組織酸素飽和度が低下すればするほど遅くなり(3)、高酸素環境下では、周辺視野での反応の早さは高強度での運動中にも安静時と差はみられなかった(4)。これらの結果は、運動中にいかに酸素を利用できるかが周辺視野での反応の早さに影響を与えている可能性を示唆している。

実際のスポーツの場面では、実験室での実験とは比べ物にならないほど複雑な状況下での知覚・判断が要求されることはいうまでもない。実験室での単純な実験におい



図：安静時と漸増負荷運動中の周辺視野反応時間。\* $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.01$  安静時との比較。† $P < 0.05$  対照条件との比較。対照条件の運動負荷は10W。(Ando S et al. Increase in reaction time for the peripheral visual field during exercise above the ventilatory threshold. Eur J Appl Physiol. 94: 461-467, 2005.を改変引用)

ても高強度での運動中に周辺視野での反応の早さが低下することを考えると、より複雑なスポーツの場面では“視野の中にあっても見えていない、意識に上らない”という状況に陥ることは十分にありそうである。周りのことに気を取られて肝心なおろそかになってはいけないが、どんなときも周囲の状況を把握できるようにしたいものである。 [安藤 創一]

### ■参考文献

李坂直行. 心と脳の科学. 岩波ジュニア新書, 1998.  
Schmidt RA 著, 調枝孝治監訳. 運動学習とパフォーマンス 第3版. 大修館書店, 2003.

### ■引用文献

- (1) Ando S et al. Effects of acute exercise on visual reaction time. Int J Sports Med. 29: 994-998, 2008.
- (2) Ando S et al. Increase in reaction time for the peripheral visual field during exercise above the ventilatory threshold. Eur J Appl Physiol. 94: 461-467, 2005.
- (3) Ando S et al. Reaction time to peripheral visual stimuli during exercise under hypoxia. J Appl Physiol. 108: 1210-1216, 2010.
- (4) Ando S et al. Reaction time to peripheral visual stimuli during exercise under normoxia and hyperoxia. Eur J Appl Physiol. 106: 61-69, 2009.

## ミスと成功を分けるもの

「注意一秒、ケガ一瞬」というように、一瞬の不注意がミスやエラーにつながる。しかし、いくら注意をしても失敗してしまう面白い実験がある。急速反復書字と呼ばれ、連続して同じ文字を、できるだけ早くたくさん書く課題である。たとえば、「お」という平仮名を書いていると、途中で全く異なる文字を書いてしまう。単に字が汚くて「お」と読めないのではなく、「あ」や「む」、「す」、「み」など、少し似てはいるものの、全く違う文字を書いてしまうのである。間違えないようにどれだけ注意していても、自分の手が自分の意志に逆らって勝手に違う字を書いてしまう。

一般に、意図していなかった動作をしてしまうミスをアクションスリップ (Action slip) と呼ぶ。これに対して、認識や判断の部分でのミスをミステイク (Mistake) という。アクションスリップとは、行おうとした動作は正しかったのに、その動作がうまくできなかったミスであり、ミステイクとは、やろうとしたことがそもそも間違っていたミスといえる。「お」と書こうと思っていたにもかかわらず、「あ」と書いてしまうのは書字スリップと呼ばれるアクションスリップの1つである。文字を書く運動の記憶は、1文字ずつ独立して存在しているのではなく、ネットワークのように階層構造の形で相互に結びついていると考えられている。したがって、あるひとつの運動が活性化されると、それと関連のある運動も同時に活性化されて、いくら意識して注意していても間違った文字を書いてしまう (1)。

動作だけでなく、瞬時に素早い判断が迫られる環境では、どうしてもミスやエラーが発生しやすくなる。1死ランナー3塁。ホームまではおよそ25m。わずか3秒の勝負である。内野手の間を抜ける安打であれば、ゆっくりスタートしても問題ないが、内野ゴロであれば、0.1秒でも素早く反応してホームに突っ込みたい (Go 試行)。少しでもスタートが遅れてしまえば、ホームでアウトになってしまう。しかし、打者がライナーを打ったり、空振りをしてしまったら、スタートしてはいけない (Nogo 試行)。打球に対して、素早く、正確に判断をして、スタートを切る難しい決断が要求される。Go/Nogo 課題を使った反応時間とエラーの研究によると、本当はボタンを押してはいけない Nogo 刺激に対して間違っただけで反応してしまったときと比べて、正しく反応したときの方が、反応するまでの時間は長い傾向にあった (2, 3)。慎重に判断をする分だけ、1歩目が遅くなってしまおうといえよう。

2008年のプロ野球で、一瞬の判断が日本シリーズの行方を大きく左右するシーンがあった。ジャイアンツが先に3勝2敗と王手をかけ、そこからライオンズが追いつき3勝3敗で迎えた第7戦。1-2でジャイアンツがリードした8回表、ライオンズの攻撃である。先頭の片岡が死球で出塁し、次打者の初球に見事盗塁に成功。送りバントで3塁へ進塁。1点ビハインドの1死3塁である。まさに素早さと正確さが判断に要求



図：ホームに突入するライオンズ片岡選手 (2008年の日本シリーズ)  
<http://sankei.jp.msn.com/photos/sports/baseball/081109/bbl0811092336023-p1.htm>

される場面である。そのような状況の中、続く中島の内野ゴロに対して、片岡は判断良くホームに突っ込み、ノーヒットで同点に追いついたのである (図)。その後、勢いはとまらず、逆転し、4年ぶり13回目の日本一の栄冠に輝いたのである。

一般的に、このような場面では「ゴロゴロー」と呼ばれる、打球がゴロであればスタートを切るという判断がなされる場面である。しかし、ライオンズベンチのサインは「ギャンプルスタート」であった。「当たりゴロー」とも呼ばれ、バットとボールが当たった瞬間にスタートを切るものである。「ゴロゴロー」ではホーム封殺されていたかもしれないほどの、きわどいプレーであった。ランナーの判断だけでなく、ベンチの判断とその勇氣、そして、この場面のためにしっかりと準備してきたチーム全体の勝利であったともいえよう。

[来田 宣幸]

### ■参考図書

佐伯 胖, 佐々木正人編. アクティブ・マインド. 東京大学出版会, 1990.  
 丸山 正, 丸山康則編. ヒューマンエラーの科学. 麗澤大学出版会, 2004.

### ■引用文献

- (1) Nihei Y. Experimentally induced slips of the pen. In Kao HSR, Hoosain R (eds). Linguistics, psychology, and the Chinese language. University of Hong Kong, pp.309-315, 1986.
- (2) Kiehl KA et al. Error processing and the rostral anterior cingulate: an event-related fMRI study. *Psychophysiology*, 37: 216-223, 2000.
- (3) Menon V et al. Error-related brain activation during a Go/Nogo response inhibition task. *Hum Brain Mapp*, 12: 131-143, 2001.

## あなたの“利き目”はどこを見るかで 変わりうる

「あなたは、どちら利きですか？」そう聞かれると、多くの人は自分の利き手がどちらか答えるであろう。しかし、ご存じのようにヒトの体には利き手だけでなく利き足、利き目といったものも存在する。球技スポーツ選手の中にも、自分の利き目を知った上でボールを捉える戦略を立てている、という人もいます。ここでは「利き目とは何か」について少し考えてみることにしよう。

あなたは、自分の利き目 (Dominant eye) がどちらかご存じだろうか？利き目を判定する方法としては、まず目の前で少し距離を離して (手や紙などで) 輪を作り、それを通して何か遠方の対象物を見る。そして、片目ずつ閉じたときに、どちらの目を開けているときにより輪の中心に対象物が入っているかによって、利き目を判定する (図1)。1度、あなたの利き目はどちらであるか調べてみてほしい。

しかし、利き目をはっきりとどちらか一方に決めきれなかった、という人もいますであろう。もちろん、利き手と同様に利き目にも程度が存在する可能性がある。はっきりと決まらない人は、両利き目であるといえるかもしれない。しかし、利き目が定まらないのにはもう1つの可能性がある。なんと、興味深いことに、頭部に対する視線の方向によって利き目は変わりうるという可能性が示されている。KhanとCrawfordは、物体が視野内左右方向のどの位置にあるかによって、主にどちらの目を用いて対象物を見ているかが変わるのではないかと考えて実験を行った (1)。その結果、左視野でとらえた物体は主に左目を用いて、右視野でとらえた物体は主に右目を用いて見るようになることを示した (図2)。つまり、先ほどのテストで調べたあなたの利き目は、円をつくっている左右方向が変わると、変わってくる可能性があるのだ。このことからわかるように、利き目は利き手ほどその判断基準がはっきりとは確立されているわけではないといえる。

それでは、利き目は非利き目に比べて機能的に何らかの優れた特性を持っているのだろうか？と考えたくなる。しかしMappらによると、利き目は単眼視で到達運動などを行う時に主に用いられる目ではあるが、非利き目と利き目の間には運動速度などの運動機能的な面での差異は観察されなかったという報告がなされている (2)。また、利き手と利き目の対応関係についても、パフォーマンスとの関連性はあまり見られないことが報告されている (3)。むしろ、非利き目は距離感覚をはかることで奥行き知覚に貢献していると考えられ、球技では利き目と同様に有効に利用されている可能性が高いのではないだろうか。今後さらに利き目・非利き目に関する機能や役割に関する研究が行われることで明らかになっていくと考えられる。

今までに明らかにされている知見から考えられるのは、日常生活やスポーツにおいて、見る方向や距離によっては、主に非利き目が用いられている局面もあるのではな

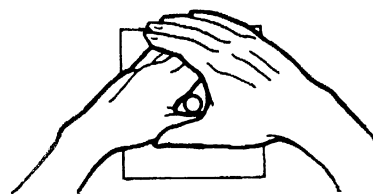


図1：利き目の判定法

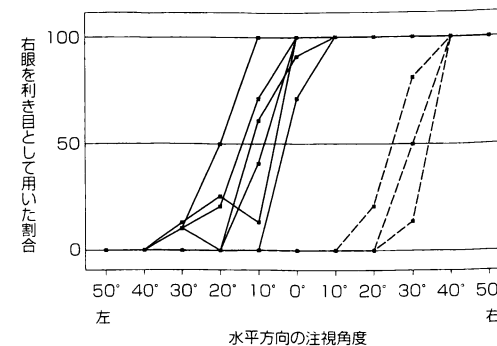


図2：右目利きの被験者 (実線) は、0度の注視方向ではほとんど右目を用いているが、左方向を注視しているときは右目を用いる割合が大きく低下している。一方、左目利きの被験者 (点線) は、0度の注視方向では左目を用いているが、右方向を注視しているときに右目を用いる割合が高くなっている。つまり全体として、左方向では左目を、右方向では右目を用いる割合がより高くなっている。(Khan AZ, Crawford JD. Ocular dominance reverses as a function of horizontal gaze angle. Vision Res. 41: 1743-1748, 2001. の Fig. 2a を改変引用)

いかということである。特にスポーツにおいては、状況に応じてどちらの目を主に用いるかを切り替えるという、「適材適所」ならぬ「適眼適所」が重要であるといえよう。

[國部 雅大]

### ■参考図書

前原勝矢. 右利き・左利きの科学. 講談社ブルーバックス, 1989.

磯田 陽. あなたの利き目をこう活かす! 出版文化社, 1992.

### ■引用文献

- (1) Khan AZ, Crawford JD. Ocular dominance reverses as a function of horizontal gaze angle. Vision Res. 41: 1743-1748, 2001.
- (2) Mapp AP et al. What does the dominant eye dominate? A brief and somewhat contentious review. Percept Psychophys. 65: 310-317, 2003.
- (3) Laby DM et al. The effect of ocular dominance on the performance of professional baseball players. Ophthalmology, 105: 864-866, 1998.



## 両方の目を逆方向に動かす難しさ

今読書をしているあなたの両眼は、どのように動いているだろうか。左右の眼はおそらく同じ方向に（主に右方向に、そして時折左方向に）動いて文字を追っているだろう。しかし、一息ついて遠くの景色を眺めようとするときには、遠方に焦点を合わせるために左右の眼は逆方向に（この場合は外向きに）動くであろう。このような例を考えると、ヒトは見る方向および距離に応じて両目の動く方向を巧みに切り替えていることがわかる。

眼球運動における両眼の動きを考えたとき、両方の眼が同じ方向へ移動する共同性（または共役）眼球運動と、両方の眼が異なる方向へ移動する非共同性（または非共役）眼球運動の2種類に分けられる。共同性眼球運動は、バージョン（Version）とも呼ばれ、その中には高速のサッケード眼球運動（O-02サッケードの項参照）や追従性のパスト眼球運動などがあげられる。一方、非共同性眼球運動は、バーゼンス（Vergence）とも呼ばれ、奥から手前へと注視距離を移動させる輻輳眼球運動（コンバーゼンス）、逆に手前から奥へと注視距離を移動させる開散眼球運動（ダイバーゼンス）があげられる（図1）。動体視力をはかる際には、左右方向に水平に動くものを捉えるDVA（Dynamic Visual Acuity）では主にサッケード眼球運動が、奥から接近してくる物体を捉えるKVA（Kinetic Visual Acuity）では主にバーゼンス眼球運動が貢献していると考えられる。

実は、バージョンとバーゼンスの間には、両眼運動の方向性の違いだけでなく、眼球運動の移動速度においても大きな差異がみられることが報告されている。例えば、YangとKapoulaは、左右方向へのサッケード眼球運動と奥行き方向へのバーゼンス眼球運動を行う際の運動特性を比較し、バーゼンス眼球運動のピーク速度がサッケード眼球運動のピーク速度よりも遅いことを示した（1）。つまり、両目を逆方向に動かすときの速度は遅いのである。さらに興味深いことに、バーゼンス眼球運動の中でも、輻輳眼球運動が開散眼球運動よりもそのピーク速度が速いことを報告している（図2）。これは言い換えると、奥から手前に近づく方向の眼球運動のほうが、手前から奥へ遠ざかる方向への眼球運動よりも速いということを意味する。

では、なぜサッケード眼球運動はバーゼンス眼球運動よりも速く、また輻輳眼球運動は開散眼球運動より速いのだろうか？その理由の1つは、脳内における眼球運動をつかさどる部位のニューロン活動にあると考えられている。例えばMaysは、奥行き方向の注視距離に対応して発火するニューロンの存在をサルの中脳にて観察し、これらが輻輳および開散のバーゼンス眼球運動に関与している可能性を示した（2）。眼球運動をつかさどる中脳のニューロンの中でも、サッケードとバーゼンスに共通して発火するものとサッケードまたはバーゼンスのみで発火するものがあり、それらのバ

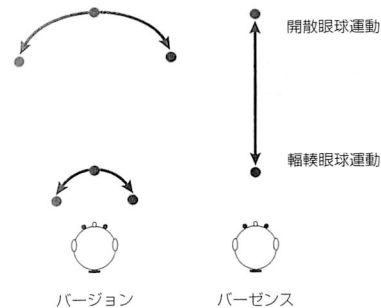


図1：バージョンとバーゼンスの概念図。（Yang Q, Kapoula Z. Saccade-vergence dynamics and interaction in children and in adults. Exp Brain Res. 156: 212-223, 2004.のFig. 1を改変引用）

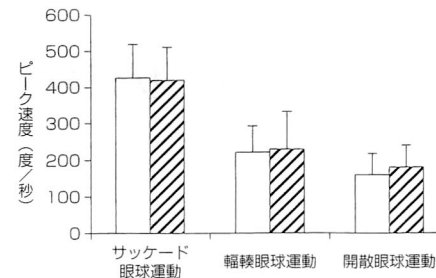


図2：バーゼンス速度のピーク速度はサッケードのそれよりも遅くなり、また開散が輻輳のピーク速度より遅くなっている。4歳半~12歳の子供（グラフの白色）と成人（縞色）とに共通してみられた。（Yang Q et al. The latency of saccades, vergence, and combined eye movements in children and in adults. Invest Ophthalmol Vis Sci. 43: 2939-2949, 2002.のFig. 3Cを改変引用）

ーストニューロンの発火の度合いが眼球運動の速度を決定していると考えられている。

もう1つの可能性として、日常生活において開散よりも輻輳が、またバーゼンスよりもサッケードのほうが頻繁に用いられるため、という理由も示唆されている。実際、バーゼンスの動的特性はサッケードの動的特性よりも遅くの年齢から発達するともいわれている（3）。したがって、バーゼンスをトレーニングすることにより、速くや近づくの物体に焦点を合わせる能力が向上し、例えば球技スポーツなどを行う際においてもより素早く視覚情報を得ることができるのではないだろうか。テレビ映像が3次元化されているこの時代、我々の注視も3次元的に鍛えていく必要があるかもしれない。

[國部 雅大]

### ■引用文献

- (1) Yang Q, Kapoula Z. Saccade-vergence dynamics and interaction in children and in adults. Exp Brain Res. 156: 212-223, 2004.
- (2) Mays LE. Neural control of vergence eye movements: Convergence and divergence neurons in midbrain. J Neurophysiol. 51: 1091-1108, 1984.
- (3) Yang Q et al. The latency of saccades, vergence, and combined eye movements in children and in adults. Invest Ophthalmol Vis Sci. 43: 2939-2949, 2002.

## 優れた状況判断を下す目使い

欧州において「世界で2番目に好きなクラブチーム」といわれるFCバルセロナ(注: 1番好きなチームは、サッカーファン各々の地元のクラブチームである)は、08/09シーズンに国内リーグ、国内カップ戦、チャンピオンズリーグを制し、三冠という偉業を達成した。敵の意表を突くパスやドリブルを使い、敵の激しいプレスをかわす、その変幻自在の攻撃は、観る者を魅了した。サッカーのゲーム中において、プレーヤーには、ボールや味方、敵の動きなど時々刻々と変化する状況に対応して、瞬時に最適なプレーを選択し、実行することが求められる。観る者を魅了するプレーは、巧みな動作だけでなく、周囲の状況に応じて様々な選択肢の中からその動作を実行しようと下した「状況判断」があってこそ成し遂げられる。ボールゲームにおける状況判断とは、「外的ゲーム状況を選択的に注意してから、ゲーム状況を認知、予測し、遂行するプレーに関して決定を下すこと」であると定義されている(1)。すなわち、状況判断は、選択的注意、認知、予測、意思決定の4つの構成要素から成り立っている。ゲーム中の状況を考えると、正確かつ迅速に状況判断を行うことが重要だといえる。状況判断を行うためには、周囲の状況に関する視覚情報を得なければならない。優れた状況判断と視線の動かし方はどのような関係にあるのだろうか？

Williamsらは、2群(熟練者群および非熟練者群)のサッカー選手を被験者とし、被験者に対してサッカーの試合の映像を呈示し、パスの方向を予測させた(2)。また、映像呈示時の被験者の視覚探索について調査した。その結果、熟練者群が非熟練者群と比較して、有意に早くパス方向の予測を行っていた。さらに、視覚探索の結果を表に示す。熟練者群は、非熟練者群と比較して、有意に平均注視時間が短く、注視回数が多く、注視した場所が多かった。すなわち、熟練者群は、1カ所を長い時間見続けるのではなく、より頻繁に注視場所を変更し、広い範囲にわたり注視を行っていた。

また、注視を行う順番に関して、試行中に「ボールあるいはボール保持者」→「その他の場所」→「ボールあるいはボール保持者」と注視を移す回数を分析したところ、熟練者群が非熟練者群よりも多かったと報告した。

上記の研究は、パスの方向を予測するというディフェンスの立場での状況判断の課題といえる。では、オフenseの立場での状況判断については、どうであろうか？ Vaeyensらは、様々な技量レベル(地方チームからユースナショナルチームまで)の13歳から15歳の65名のサッカー選手を被験者とし、様々な状況下(2(攻撃側の人数)対1(守備側の人数)、3対1、3対2、4対3、5対3)の映像を被験者に見せ、パス、シュートおよびドリブルのいずれかを判断させるタスクを行った(3)。状況判断のスコアが高かった20名の被験者群(高得点群)と低かった20名の被験者群(低得点群)に分けたところ、高得点群が低得点群と比較して判断するまでの時間が有意に短かつ

表：視覚探索の結果。

(Williams AM et al. Visual search strategies in experienced and inexperienced soccer players. Res Q Exerc Sport, 65: 127-135, 1994.より改変引用)

群		注視した場所の数	注視1回当たりの平均時間(ミリ秒)	注視回数
熟練者群	平均値	4.40	933.94	10.30
	標準偏差	0.25	99.34	0.97
非熟練者群	平均値	3.87	1,163.16	8.72
	標準偏差	0.39	206.26	0.94

た。また、視覚探索に関して、高得点群が低得点群と比較して有意に注視回数が多く、「ボールあるいはボール保持者」→「その他の場所」→「ボールあるいはボール保持者」という順番で注視を移す回数が多かった。

以上のように、サッカーの試合中において、ディフェンス、オフenseのどちらであれ優れた状況判断を行うためには、注視回数を多くすること、および「ボールあるいはボール保持者」→「その他」→「ボールあるいはボール保持者」と注視を移す回数を多くすること、という視線の動かし方が重要であるといえる。 [桜場 厚浩]

### ■引用文献

- (1) 中川 昭. ボールゲームにおける状況判断研究のための基本概念の検討. 体育学研究, 28: 287-297, 1984.
- (2) Williams AM et al. Visual search strategies in experienced and inexperienced soccer players. Res Q Exerc Sport, 65: 127-135, 1994.
- (3) Vaeyens R et al. Mechanisms underpinning successful decision making in skilled youth soccer players: an analysis of visual search behaviors. J Mot Behav, 39: 395-408, 2007.

# 口ではいえないが体は知っている

「私たちは動くために知覚するが、知覚するためには、また動かさなければならない」これは生態心理学の創始者、ギブソンの言葉で、知覚 (perception) と行為 (action) が相互に影響を与える関係であることを主張している。この「知覚と行為の循環」は実際のスポーツ場面においてよく見られる。対人スポーツの多くは、相手の動きや周囲の状況を知覚し、それを基に動作を行う。例えば、テニスでは、相手の打つボールのコースや球種を予測し、その予測を基に移動および打動作を行う。このとき、予測することと動作することは独立して行われているのだろうか？それともギブソンがいうようにお互いに影響を与える関係にあるのだろうか？

Farrowらは予測することと動作することの関係を調べるために、テニスのサーブが左右のどちらの方向に来るかを予測させる実験を行った (1)。実験はテニスコート上で行い、上級者と初級者に対して2つの条件を設定した。1つ目はラケットを持ってリターン動作を行う条件 (coupled 条件) で、2つ目はその場で動かずに口頭によって左右の方向を答える条件 (uncoupled 条件) である。この結果、口頭で答える条件では上級者と初級者の予測の正答率に大きな違いはなかったが、実際にリターンする条件では上級者と初級者の予測の正答率に大きな違いが見られた (図1を参照)。つまり、実際に行う動作を伴って初めて上級者と初級者の予測能力の違いが表れたのである。

予測をはじめとする知覚行為は主に視覚情報をもとに行われる。視覚情報は目の網膜を通り、大部分が脳の一次視覚皮質に入力される。そこからさまざまな領域に連絡する多くの経路に分かれる。その多数の経路には、主として背側経路と腹側経路の2つの経路があり (図2)、背側経路と腹側経路では異なる視覚機能を有しているといわれている。運動を制御するために視覚情報を処理する際は背側経路を經由し、どのような大きさ・形をしているかなど物体の詳細な特徴を知覚する際は腹側経路を經由している。最近の研究によると、知覚と運動が自然な関係で結びついている反応 (coupled 反応) で反応時間が短くなるのは背側経路を經由しているからで、知覚と運動が自然に結びついていない反応 (uncoupled 反応) で反応時間が長くなるのは腹側経路を經由しているからであると考えられている (2)。そこで、この説に基づき上記の実験結果を考えてみると、上級者は背側経路を經由する情報処理が初級者よりも優れており、実際のテニスに近い状況、すなわち知覚と運動が結びついている状況の方が予測の正答率が高くなったと考えられる。

スポーツをするうえでは相手の動きや周囲の状況を知覚するだけではなく、知覚した情報を基に適切に体を動かさなければならない。したがって、知覚と運動が結びついている反応での処理を素早くすること、すなわち「口ではいえないが、体は知って

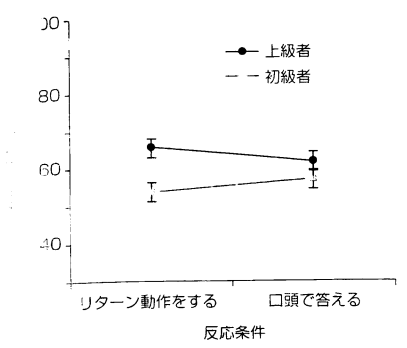


図1: サーブの方向の予測の正答率を条件ごとに上級者と初級者と比較した。縦軸は予測の正答率 (%) を表し、横軸は反応する条件を表す。

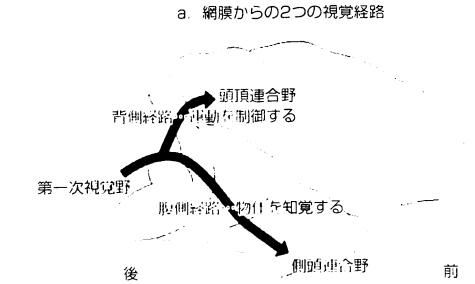
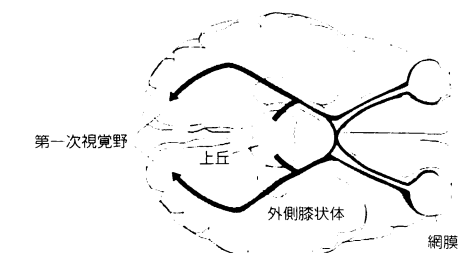


図2: 視覚情報が通る経路。上図は網膜から外側膝状体を通り第一次視覚野まで到達する経路を表す (一部上丘を經由する)。下図は第一次視覚野を通った後、2つの経路に分かれる流れを表したものである。

いる」という状態にすることが重要ではないだろうか。そのためには日々の練習の積み重ねによって動作を体に覚えこませていくしかない。 [亀谷 亮輔]

### ■参考図書

Pinel J著、佐藤敬ほか訳、ビネルバイオサイコロジー、西村書店、2005。  
樋口貴広、森岡 周、身体運動学、三輪書店、2008。

### ■引用文献

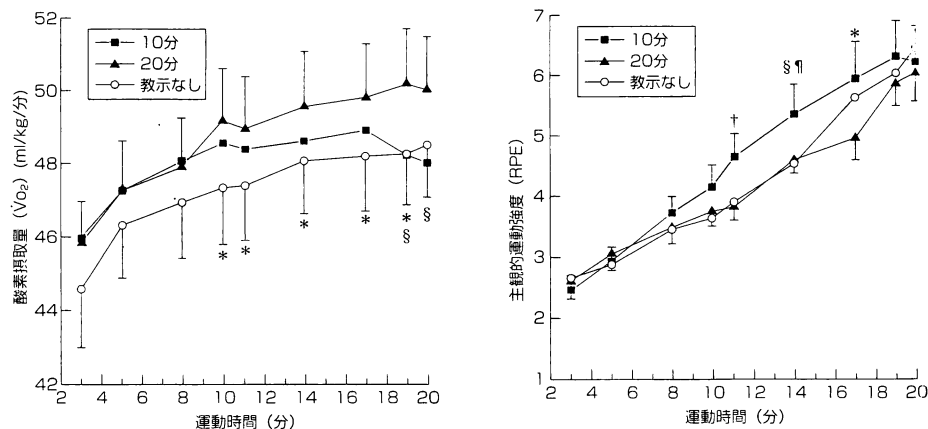
(1) Farrow D, Abernethy B. Do expertise and the degree of perception-action coupling affect natural anticipatory performance? Perception. 32: 1127-1139. 2003.  
(2) Milner DA, Goodale MA. The visual brain in action. Oxford: Oxford university press, 1995.

## 身体活動を測る ～主観・客観のずれ，客観測定間のずれ～

体操競技やフィギュアスケートなどでは、採点基準がその年代ごとに変化し、何が優れた演技であるかは、その都度変わらう。また、球技であれば、チームの優劣は得点によって決められるが、試合中のヒトの動きの優劣は、戦術や戦略の進歩によって変化するため、何が優れた動作であるかを一律に評価することは難しい。

それに比べると、各種身体活動の強度に関してはまだ比較しやすいかもしれない。身体活動の強度は、その研究の初期では労働科学の分野から発展してきた。過酷な肉體労働が健康を損なう可能性から、どのような動作が生理的にしんどい動作であるかを確かめる必要があった。運動中の主観的運動強度 (Borg スケール) を6-20で評価してもらおうと、運動中の心拍数や酸素摂取量と非常に高い相関を示し、さらにこの主観的運動強度の約10倍が心拍数におおよそ相当する。

一方、客観的に身体活動強度を評価する際にもっとも用いられるのは、呼気ガス測



図：トレッドミル走で運動の終了時間の指示だけ変えたときの酸素摂取量 ( $\dot{V}O_2$ ) と主観的運動強度 (RPE) の変化。実際にはどの条件も20分間同じ速度で走っているが、ランニングがどこまで続くか指示されない条件 (○) では、20分で終わると指示されていた条件 (▲) に比べて  $\dot{V}O_2$  が低値を示した (左図\*)。10分で終わると指示されていた条件 (■) では、10分後あと10分と指示されてから、 $\dot{V}O_2$  が少しずつ低下し、終了間際には20分条件に比べて低値を示した (左図§)。また、どの条件においても時間が経つにつれてRPEは増加していったが、10分で終わると指示されていた条件では10-11分の間にRPEが急激に増加し (右図†)、以降しばらく、他の条件よりも有意に高いRPEを示し (右図§\*)。  $\dot{V}O_2$  や心拍数、ストライドなどの変化とは全く異なる傾向を示した。(Baden DA et al. Effect of anticipation during unknown or unexpected exercise duration on rating of perceived exertion, affect, and physiological function. Br J Sports Med, 39: 742-746, 2005.より引用)

定である。この方法では、安静時代謝の何倍のエネルギー消費 (あるいは酸素摂取) をしているかを用いて、身体活動の強度を評価する。身体各部位の筋に酸素を供給するのは、心臓の重要な役割であるが、運動中には一回心拍出量とともに心拍数を高め、筋での酸素需要を満たそうとする。したがって心拍数を測定することでも、身体活動の強度をある程度評価できる。

身体活動の強度を動員された筋の大きさと考えるならば、筋電図や床反力計と映像を用いたバイオメカニクスの解析によっても、身体活動強度を評価できる (2, 3)。それだと非常に解析に時間がかかるため、簡便な方法として加速度計を用いることもある。身体活動は身体重心の移動を伴うことが多く、たとえ立位支持であっても重心はわずかながら振動している。この身体重心の変動量を加速度計で捉えることで、身体活動の程度の大きさを評価することができる (1)。

このように身体活動強度を評価する方法は様々なものがあるが、一般的な運動では、主観的運動強度、酸素摂取量、エネルギー消費量、心拍数、動員筋体積、力学的仕事、身体重心加速度変動の間に高い相関が認められる。これ自体とてもすごいことであるが、様々な条件下においては、各指標の間で乖離が生じる。例えば、肥満者や教育レベルの低い対象者などでは、心拍数や酸素摂取量に比べて高い主観的運動強度を示し、高齢者では歩行中の力学的な仕事とエネルギー消費量が一致しない。また、同じ主観的運動強度で実施された坂道歩行と平地ジョギングでは、平地ジョギングのほうが高い酸素摂取量を示す (2)。さらに、最初に20分と運動時間が決められて実施した場合と、時間を指示されずに走った場合 (図) では、走速度、心拍数やストライドには変化がないにもかかわらず酸素摂取量が低下していた (3)。加えて、10分と指示されていたにもかかわらず運動終了間近にあと10分といわれた条件では、心拍数、ストライドなどには変化がなかったにもかかわらず主観的運動強度だけが増大した (3)。また、エネルギー消費で定義される運動強度と身体にかかる負荷の強さは直線関係ではなく、ある運動強度までは血圧や血中乳酸の上昇がなくても運動が可能であり、スポーツや運動療法の現場ではその乖離を利用した効率のよいトレーニングが求められる。

このような不一致を単なる誤差と捉えずに、そこに生理学的な意義を感じて、なぜこのような不一致が生じるかを考えることは、ヒトの動きの主観と客観のずれや動きの効率を考える上で面白いテーマではないだろうか。

[山田 陽介]

### ■参考文献

- (1) Yamada Y et al. Light-intensity activities are important for estimating physical activity energy expenditure using uniaxial and triaxial accelerometers. Eur J Appl Physiol, 105: 141-152, 2009.
- (2) Kilpatrick MW et al. Heart rate and metabolic responses to moderate-intensity aerobic exercise: a comparison of graded walking and ungraded jogging at a constant perceived exertion. J Sports Sci, 27: 509-516, 2009.
- (3) Baden DA et al. Effect of anticipation during unknown or unexpected exercise duration on rating of perceived exertion, affect, and physiological function. Br J Sports Med, 39: 742-746, 2005.

## 手を伸ばし物をつかむ

机の上のペンをとる、本をとる。このように手を伸ばして物体をつかむ運動、すなわち到達把持運動は、私たちの日常で頻出する運動のひとつである。そして通常、この運動の過程はほぼ無意識的であり、難なくこなされる場合がほとんどである。この到達把持運動は、私たちにとってはあまりにも日常的すぎて、その運動に特段の注意を置く読者はそう多くないであろう。

しかし実は、通常この無意識的な運動過程で、私たちは物体を把持するまでに、その形状や大きさに合わせて、また、その後の運動が適切に行えるよう手の形状を整えている。例えば、コップに入った水を飲もうと、それに手を伸ばす場合、その過程において私たちは、コップの形状に合わせて、把持しやすいように、さらには水を口へ運びやすいように、掌を徐々に形作っている。このような、手を伸ばす間に、把持対象の形状や次なる運動に応じて手の形を準備することをプリシェイピング (preshaping) という。このプリシェイピングには、まず指を開き、その後、物体サイズへ一致するまで指を閉じる局面があり、その間の、親指先端と人差し指、あるいは中指先端とを結んだ距離の最大値は、最大指間距離 (maximum grip aperture) と呼ばれる。

この到達把持運動に影響を与える要因のひとつに視覚がある。Randらは、完全な暗闇の中で、被験者の親指と人差し指に暗闇で光る布を被せるか否か、物体を光らせるか否かで視覚条件を設定し、それら諸条件下で親指と人差し指による到達把持運動実験を行った (1)。被験者は前方あるいは左45度方向に置かれた物体に対して、ピー音の合図で到達把持を開始するのであるが、音が鳴るまでの1~2秒間、物体は光った状態が続く。したがって、物体が見えない条件は、音の合図と同時に物体の灯りが消される設定となる。図2に、最大指間距離および運動時間 (運動開始から把持終了までに要した時間) に対する、物体が見えるか否か、手が見えるか否かの効果を示した。

物体が見えなかった時、最大指間距離および運動時間は、見えた場合よりも大きな値を示した (図1と図2)。また、手についても、手が見えなかった時に最大指間距離と運動時間は大きな値であった。さらにこの実験では、運動時間を指が開いていく局面 (運動開始時点から最大指間距離を迎える時点まで) と閉じていく局面 (最大指間距離の時点から把持終了時点まで) に分けて分析しており、後者の指が閉じていく局面で、物体が見えなかった時、手が見えなかった時に有意な時間延長が認められた。そして主としてその局面の延長が原因で、運動時間は延長した。指を閉じる局面の制御には、物体と手の視覚情報のオンライン処理、すなわち眼で見えるか否かが重要になることが示唆される。

さて、このような結果から、視覚が到達把持運動に大きく影響を与えることが理解

図1 最大指間距離に対する、物体または手の可視・不可視の効果。(平均値+標準誤差) (\*\*:  $P<0.01$ ) (Rand MK et al. Role of vision in aperture closure control during reach-to-grasp movements. Exp Brain Res. 181: 447-460. 2007. より著者作図)

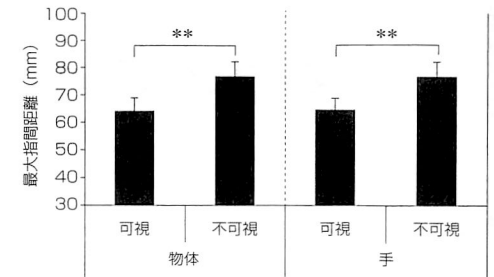
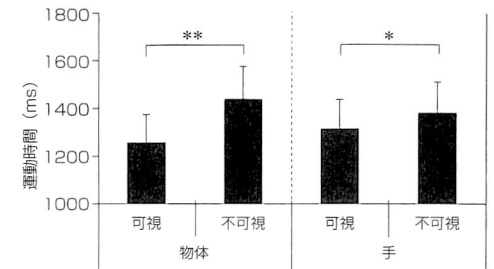


図2 運動時間に対する、物体または手の可視・不可視の効果。(平均値+標準誤差) (\*:  $P<0.05$ , \*\*:  $P<0.01$ ) (Rand MK et al. Role of vision in aperture closure control during reach-to-grasp movements. Exp Brain Res. 181: 447-460. 2007. より著者作図)



できる。物体や手が見えないために、手をより大きく開くとともに、運動時間を延長させる (より長い時間をかける) というこれら一連の過程は、より安全、確実に到達把持運動を遂行するための方略であると考えられる。人間が慎重になる現れといえるかもしれない。

普段、特別な注意を要することのない、この手を伸ばし物体をつかむという運動は、一見すると単純な運動のようであるが、このように複雑なメカニズムを有している。本話を読みおえた読者には、それらを考えながらさっそく近くの物体に手を伸ばしてみてほしい。

[山本 真史]

### ■参考文献

Jeannerod M, Marteniuk RG. Vision and Motor Control. Chap.9. Functional characteristics of prehension: From data to artificial neural networks. pp.197-232. Elsevier Science Publishers B.V., 1992.

長崎 浩. 文献研究 リーチ&グラスプ動作. リハビリテーション科学: 東北文化学園大学医療福祉学部リハビリテーション学科紀要, 2 (1): 3-18, 2006.

### ■引用文献

(1) Rand MK et al. Role of vision in aperture closure control during reach-to-grasp movements. Exp Brain Res. 181: 447-460. 2007.

## 変化に動じないために

テニスの世界ランキング1位（2009年9月現在）のロジャー・フェデラーはショットの緩急をつけることがとても巧みな選手である。一方、フェデラーの最大のライバルであり、何度も接戦を演じてきたラファエル・ナダル（2009年9月現在世界ランキング3位）はどんなボールにも追いつき、リターンやグラウンドストロークでのミスが極端に少ない選手である。ミスの数が勝敗を決めるスポーツといわれるテニスにおいて、ミスの数を少なくすることは誰もが目指すところである。そこで、ミスを減らすために必要な能力の1つであるタイミングを一致させる能力について考えてみたい。

テニス熟練者と未熟練者のタイミングを一致させる能力の違いを調べるために、Runigoらは発光ダイオード（light-emitting diode: LED）が連続的に光る装置を用いて実験を行った（1）。実験の課題は奥から手前に向かって点灯してくるLEDがターゲットに到達するタイミングに一致させるように、左から右に向かって手でカートがターゲットまで移動させる（図1）。その際、一定速度でLEDが点灯してくる条件とターゲットに到達する直前でLEDの点灯が加速または減速する条件がある。そして、LEDがターゲットに到達する時間とカートがターゲットに到達する時間のずれをタイミングのずれとして求め、熟練者と未熟練者で比較した。この結果、一定速度で点灯してくる条件ではテニス熟練者と未熟練者でタイミングのずれの大きさに違いは見られなかったが、加速および減速した条件では熟練者の方が未熟練者に比べてタイミ

図1：実験の様子。奥から手前に向かってLEDの点灯がターゲットに到達するタイミングに合わせて、左から右に向けてカートを動かす。

(Le Runigo C et al. Perception-action coupling and expertise in interceptive actions. Hum Mov Sci, 24: 429-445, 2005)

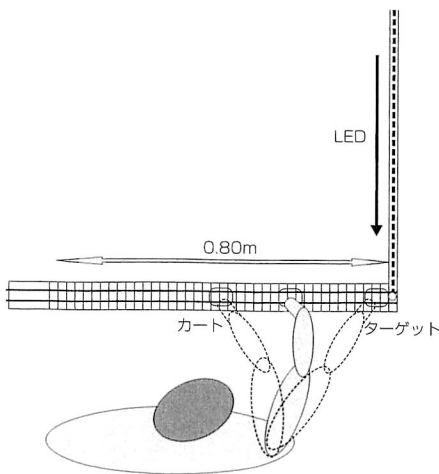
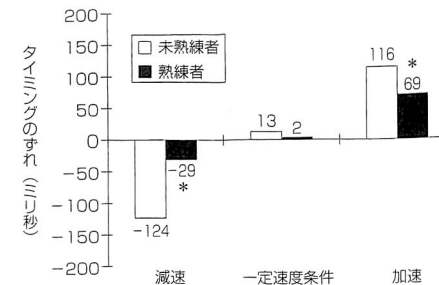


図2：各条件（減速、一定、加速）でのテニス熟練者、未熟練者のタイミングのずれ。縦軸はLEDが到達するタイミングとカートが到達する時間のずれを表し、負の値はLEDよりもカートを先に到達させたことを意味し、正の値はLEDの方がカートを先に到達させたことを表す。

(Le Runigo C et al. Perception-action coupling and expertise in interceptive actions. Hum Mov Sci, 24: 429-445, 2005)



ングのずれが小さかった（図2参照）。

では、なぜテニス熟練者の方がタイミングのずれを小さくすることができたのだろうか？これを説明する指標として視覚性運動の時間的遅れ（visuomotor delay: VMD）が挙げられる。これは環境が変化してから、それに対応した運動の修正を開始するまでに要する時間である。上記の実験では、LEDが直前で加速あるいは減速してからカートを加速、減速させるまでに要する時間を意味する。したがって、VMDが短いほど、運動を修正する時間をより長くとることができるので、タイミングのずれを小さくすることができる。テニスでは回転や空気抵抗などの影響で常に速度が変化するボールを適切なタイミングで打つ能力が求められる。ゆえに、長年テニス経験を積んだ熟練者はVMDが短くなるので、タイミングのずれを小さくすることができると考えられている。また、VMDは加齢により長くなるが、テニスをプレーしている人の方が加齢の影響を受けにくいことも報告されている（2）。

さらに、Runigoらと同様の課題を扱ったTeixeiraの実験結果によると、タイミングのずれを小さくするためには運動の修正を開始するまでの時間が短いだけではなく、修正を開始してからどの程度修正を行えたかも重要であることがわかった（3）。

実際のテニスの場面では、コートの種類は芝や砂、コンクリートなど様々であり、また球の回転、スピードなどは1球ごとに変化している。このような多様な環境の中で適切にボールを打ち返していくためには、まずこれらの変化を数多く経験していくことが必要である。

【亀谷 亮輔】

### ■引用文献

- (1) Le Runigo C et al. Perception-action coupling and expertise in interceptive actions. Hum Mov Sci, 24: 429-445, 2005.
- (2) Lobjois R et al. Aging and tennis playing in a coincidence-timing task with an accelerating object: the role of visuomotor delay. Res Q Exerc Sport, 76: 398-406, 2005.
- (3) Teixeira LA et al. Reprogramming of interceptive actions: time course of temporal corrections for unexpected target velocity change. J Mot Behav, 38: 467-477, 2006.

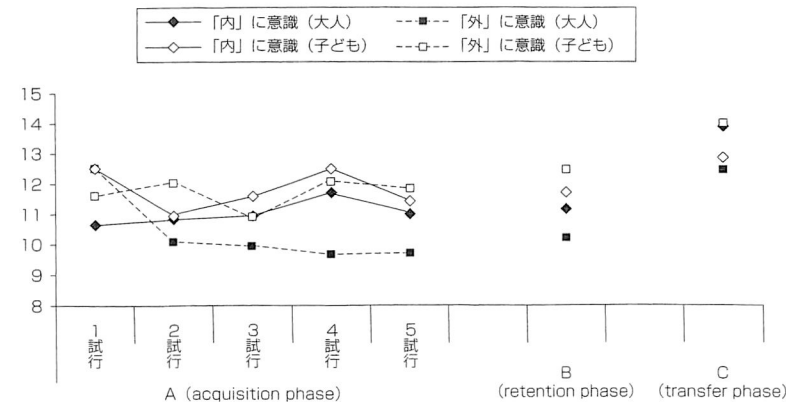
## 「内」に目を向けるか、「外」に目を向けるか？

スポーツをしている以上、上手になりたいって思うことは当然である。そのため指導する者も、少しでも上達させたいと思っているはず。しかし、どのように指導すればいいのか、自分自身も考えさせられることがある。特に、初心者を教える場合、例えば、投げる動作を教える際に、投げる動作自体のアドバイス（「右腕を高く上げる」等）が果たして良いのかという問題がある。意識が右腕だけに向けられてしまい、動作全体の改善にならないことがある。指導する者としては、「どこに意識を向けさせて練習させれば効率よく改善できるのか」というのは難しい問題である。

実際、意識の向け方にも2種類ある。1つは、動作者の「内」に意識を向けること（internal focus）。もう一方は、動作者の「外」に意識を向ける（external focus）こと。例えばバランスディスク上で、立位姿勢を保持する際、自分の足に意識を置かせる指導が、internal focusで、何か目の前のものを見るように指導するのがexternal focusと呼ぶ。「内」と「外」、意識をどちらに向けるとより効果的な影響が得られるのか。

「意識の方向性」が運動学習やパフォーマンスに与える効果に関して、多くのスポーツで、外へ注意を向けた方がパフォーマンスが良いと報告した研究が多い。その理由に関して、意識を外に向けることで、動作制御を自動的に行った結果、効率的な運動学習ができると述べている。一方、意識を内に向け、意識的に体の部位を制御すると、通常運動における自動的な運動制御を阻害してしまう可能性があるとして述べている。この見解を支持する研究として、Wulfら（1）は、バスケットボールでのフリースローをtaskとして、スローの正確性と共に、筋活動を測定した。結果、外に意識を向けた方が正確性は高く、低い筋活動を示した。また、興味深いことに、「手首」に意識をおいたこと（internal focus）で、手首以外の意識していない部位（上腕二頭筋、上腕三頭筋）においても高い筋活動を示し、動作の効率が悪くなったと述べている。「外」に意識を向けた方が、低い筋活動動作効率がよく、より正確性の高いスローが行えたと結論付けている。ただ、意識を外して運動すると、逆に力も抜けて良いパフォーマンスが発揮できた経験をしたことがある人は少なくないであろう。

ただ、誰にでも意識を「外」に向けた指導の方がよいとは限らない。Michalら（2）は、子どもと大人での意識の方向性がダーツの正確性学習の保持効果に与える効果を検討し、大人と子どもとでは、教示の違いでパフォーマンスへの効果の違いがあることを報告している。retention phaseやtransfer phaseにおいて、大人は「外」に意識を向ける方がパフォーマンスは良いが、子どもは「内」に意識を向ける教示をした方がパフォーマンスは良い結果を示した（図）。その理由としては、運動体験とリンクする自動的な運動制御が、子どもは大人に比べて発達していないからではないかと考えられている。また子どもだけでなく、競技未熟者においても「内」に意識を向ける



図：大人と子どもに「内」（手・指）に意識と「外」（ダーツの矢）に意識を向けるように教示を与え、ダーツの矢の中心からの到達距離の平均値（cm）。A：1日で1試行10投を5試行行う。B：Aの1日後に20投行う。C：Aの1日後にA、Bのtrialよりも遠い距離で10投行う。

教示の方がパフォーマンスは良いと報告している研究がある。

つまり、指導する初期段階では、動作自体に関しての具体的な指導を行う方がより効果が出るのではないだろうか。そして、経験をつみ熟練度が増していくにつれて、意識を「外」に向けるような指導へと変えていくことで、より効率的な指導が出来るのではないだろうか。 [荒木 真徳]

### 引用文献

- (1) Zachry T et al. Increased movement accuracy and reduced EMG activity as the result of adopting an external focus of attention. *Brain Res Bull.* 67: 304-309, 2005.
- (2) Emanuel M et al. Effect of focus of attention and age on motor acquisition, retention, and transfer: a randomized trial. *Phys Ther.* 88: 251-260, 2008.

## ボールに気持ちを込める～意識の置き所～

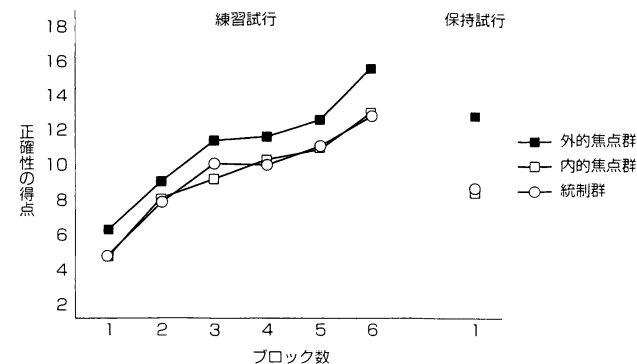
あなたは、今、サッカー選手として、ピッチの上でプレーしている。試合は、0対0と両チーム無得点のまま時間が過ぎ、後半ロスタイムに突入。すると、自チームに絶好のチャンスが訪れる。あなたはゴール前にフリーでいる。そして、サイドをドリブル突破した味方から絶妙なパスが…。これを決めたらヒーローになれる。ゴールキーパーの位置を確かめ、シュートの狙いを定める。あとは、狙った位置へとボールを蹴るために動作を行うだけ。どうやって動作をするか、自らの身体へ意識を集中させる。そして、脚を振る。しかし、ボールの当たった感触がない。そう、あなたは空振りをしてしまった。

このような場面のように、スポーツにおいて動作の実行中に、過剰に自分の身体を意識した経験はなかろうか？意識の置き所（attentional focus）は大きく2つに分けることができる。1つは、身体に意識焦点を当てる内的焦点（internal focus）、もう1つは、身体の外部に意識焦点を当てる外的焦点（external focus）である。

スポーツのパフォーマンスに関して、身体の内外部のどちらに意識焦点を当てた方が優れているのかを比較した研究は数多くみられる。例えば、バスケットボール経験者を被験者とし、フリースローの正確性に関して調査した研究（1）がある。被験者は、手首のスナップ動作を意識する内的焦点条件とリングを意識する外的焦点条件の2つの条件でフリースローを20試行ずつ行った。その結果、内的焦点条件と比較して外的焦点条件において、被験者はフリースローを正確に行っていたことが示された。

次に対象を経験者から初心者に移して考えたい。初心者がより効果的に学習するためには、どのような指導がよいのだろうか？この点について意識焦点の面から考えた。ゴルフのパッティングの課題を用いて、初心者の学習効果に関して調査した研究（2）がある。まず、被験者全員は、クラブの握り方、スタンス、姿勢に関しての指示を受けた。その後、クラブを振る腕を意識させる指示を行う内的焦点群、クラブを振り子のように動かすことを意識させる指示を行う外的焦点群、そして何も指示しない統制群と被験者を3群に分けた。被験者は、1日目に10試行×6ブロックの合計60試行の練習試行を行い、1日空け、保持試行を10試行行った。保持試行は、練習試行によって、パッティングの技術が定着したかどうかを調べるために行われた。その結果、練習試行において、群間に差はみられなかったが、保持試行において外的焦点群が内的焦点群、統制群と比較して、パッティングを正確に行っていた（図）。つまり、外的焦点群に高い学習効果がみられた。

著者は、昔サッカーの練習中に「ボールに気持ちを込めろ」と指導者の方に教わったことがあった。当時、ボールに気持ちを込めた場合、うまくボールを蹴ることがで



図：縦軸がブロック（1ブロックを10試行とする）ごとの正確性の得点を表す。数値が高いほど、正確なパッティングを行っていたことを示す。横軸がブロックを表し、左側の1～6が練習試行を6つのブロックに分けて表し、右側が保持試行を1つのブロックとして表す。（Wulf G et al. An external focus of attention enhance golf shot accuracy in beginners and experts. Res Q Exerc Sport, 78: 384-389, 2007. より改変引用）

きたような印象を持った。「ボールに気持ちを込める」とは、身体外部のボールに意識焦点を置かせるための指導言語であり、指導者の経験知とこれまでの研究から得られた知見とが見事にマッチしているといえよう。

身体の内外部という大きな分け方から身体の内外部、外部の中のさらに細かい部分（パッティングを例に挙げれば、外的焦点といっても、クラブ、ボール、カップなど様々にある）に関しての研究が進んでいけば、よりスポーツ現場に貢献できるであろう。 [桜場 厚浩]

### ■参考図書

麓 信義編. 運動行動の学習と制御. 杏林書院, 2006.

### ■引用文献

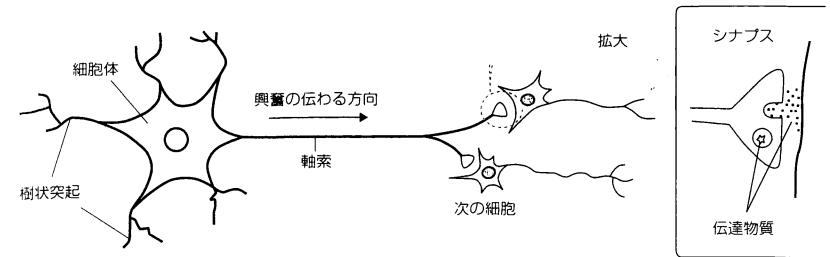
- (1) Zachry T et al. Increased movement accuracy and reduced EMG activity as the result of adopting an external focus of attention. Brain Res Bull, 67: 304-309, 2005.
- (2) Wulf G et al. An external focus of attention enhance golf shot accuracy in beginners and experts. Res Q Exerc Sport, 78: 384-389, 2007.



## 鍛えれば変わる神経のネットワーク

“鉄は熱いうちに打て”という言葉があるが、ヒトが新しい言語を覚えたり、楽器を習ったりするには、いったいつが“熱い”のであろうか？大人の皆さんには少し残念な結果かもしれないが、幼い頃から母語に加えて第二言語を学んだバイリンガルは、母語と第二言語を脳の同じ領域で処理しているが、第二言語を遅くに習得した場合は母語と第二言語は脳の異なる領域で処理されることが知られている(1)。つまり、ある時期を過ぎてしまうと脳では第二言語を母語と異なる別の言語として処理しており、このことが成長してからの第二言語の習得を困難にしているのかもしれない。また、プロのキーボード奏者はアマチュアのキーボード奏者や楽器の経験がない人と比べて、運動や感覚情報の処理に関する脳の領域が広い(2)。これは幼いころからの長期にわたる音楽経験がもたらした結果であると考えられる。サッカーなどのスポーツでも12歳くらいまでの年齢はゴールデンエイジと呼ばれており、この時期までの指導は技術の獲得に主眼が置かれている。どうやら大方の予想通り、何事も早い時期から始めるのに越したことはなさそうである。確かに多くのトップアスリートも幼いころから英才教育を受けてきているだろう。だからといって、小学生までにあるスポーツの技術を身につけておかなければ、そのスポーツを楽しむことはできないのだろうか？もし本当にそうであるなら、スキーやスノーボードは冬の定番スポーツにはならないであろうし、高齢者向けの〇〇教室なども流行らないだろう。

ヒトのさまざまな身体活動を制御しているのは神経系である。神経系の最小単位は神経細胞(ニューロン)であり、神経系は1000億個以上のニューロンからなっている。そしてニューロンとニューロンはシナプスと呼ばれる1万分の1ミリ程度のわずかな隙間でつながっている(図)。この隙間をシナプス間隙といい、シナプス間隙ではニューロンが興奮を伝達するために神経伝達物質が重要な役割を果たしている。1つのニューロンは数千から1万のシナプス、つまり他の1万近くのニューロンとつながっており、脳全体で考えると途方もない数のニューロンがネットワークを形成していることがわかる。実は脳のさまざまな機能を決定しているのは、このニューロン同士で形成される神経のネットワークである。この神経のネットワークは生まれてすぐの状態では遺伝子に組み込まれたプログラムによって形成されるが、その後は周囲の環境や経験によって決まる。つまり、使えば使うほど新しいネットワークが形成されていき、使われなければそのネットワークは壊れていく。このことは経験によってシナプスのつながりが変化することを意味しており、この性質をシナプスの可塑性という。そして、このシナプスの可塑性が我々の学習や記憶などの基となっていると考えられている。シナプスの可塑性は若年のときほど著しいが、ニューロンの数が加齢とともに減少しても、どうやら可塑性そのものは失われないようである。シナプスの可塑性



図：ニューロンとシナプス  
(田中越郎、好きになる生理学、講談社、2003より)

から神経系を概観すると、“何事も早く始めるのに越したことはない”と感じると同時に、“何かを始めるのに遅すぎるといことはない”と思えてくるから面白い。近年の非侵襲的な脳機能イメージングや電気生理学的手法の発展により、脳や脊髄の神経ネットワークの機能的な変化を直接モニターすることが可能になりつつある(3)。

スポーツ選手や音楽家の超人的なパフォーマンスを支えているのは優れた神経系の働きであるが、それらは日々の鍛練の賜物である。鍛えれば神経のネットワークは変わっていく。だから右手でトランペットを弾きながら、左手でピアノを演奏するなんていう芸当も可能になるのである。もちろん人並み外れた訓練が必要であることはいうまでもない。

[安藤 創一]

### ■参考図書

井原康夫編著、脳はどこまでわかったか、朝日新聞社、2005。  
松村道一ほか編著、脳百話一脳の仕組みを解き明かす一、市村出版、2003。

### ■引用文献

- (1) Kim KH et al. Distinct cortical areas associated with native and second languages. Nature, 388: 171-174, 1997.
- (2) Gaser C, Schlaug G. Brain structures differ between musicians and non-musicians. J Neurosci, 23: 9240-9245, 2003.
- (3) Nielsen JB, Cohen LG. The olympic brain. Does corticospinal plasticity play a role in acquisition of skills required for high-performance sports? J Physiol, 586: 65-70, 2008.

## 動いて覚える

自分の部屋の蛍光灯のスイッチのある位置は地上何cmのところにあるか覚えているだろうか。あなたのお気に入りの小説は本棚の何段目の右から何冊目にあるか覚えているだろうか。こういった運動を実行するためには外部のモノの位置を覚えていなければならないのだが、こういった情報は目で見ただけでは十分に記憶することができない。一度、実際に電気をつけて本を取り出してみると、しっかりと体で覚えることができるだろう。恋人の家の台所でほとんど無意識的に食器を取り出すことができたり、暗闇の中でスムーズにトイレに行けたりしたときに、つきあひも長くなったのだなあとしみじみ感動を覚えた方も多いのではないだろうか。

直感的には当たり前のようにも思えるこの現象を科学的に示すのは非常に難しい。視覚による情報だけではなく、運動した経験によって、記憶されることを示せばよいのだが、仮にスイッチをどれくらい正確に押ことができるかでスイッチ位置の記憶を確かめるとしよう。条件1ではスイッチを目で見て覚える、条件2ではスイッチを目で見た上で押して位置を覚える。おそらくスイッチを1度押したことがある条件の方が成績はよくなるだろうが、これがスイッチの位置を覚えたことを意味するのか、それともスイッチを押すという運動コマンドそのものを覚えたことを意味するのかを区別することは困難だろう。覚えるための運動と覚えているかどうかを確かめるための運動を同じものにしてしまうと、目で見ただけの条件と比較するときに、運動コマンド自体を体験したことがある条件とない条件を比較することになり公平な評価ができないのである。

McVeaとPearsonはとてもうまい実験系を考えだした。彼らは、ネコに3m程度の歩行路を歩かせた。歩行路の途中には障害物があって、ネコはそれを目で見て足をあげて乗り越える。ここで大切なのは、ネコは前足だけでなく後ろ足も障害物を越えなければならないという点である。ネコの頭の位置からして、前足で障害物を越える直前からは障害物を見ることはできない。つまり、後ろ足で障害物を越えることができるというのは、障害物の位置を覚えていることに他ならない。ネコを障害物が見えなくなる位置まで歩かせた後、しばらくその場所にとどまらせることができる。どれだけ時間、ネコが障害物の位置を記憶しているかを調べることができる。彼らは、餌の入ったシャーレをネコの口元に差し出した。するとネコは大好きな餌を夢中になって食べる。しばらくの時間をおいたあとシャーレを前に移動させてやると、ネコは餌を追いかけてくるのだが、ここで障害物の位置を覚えていたならば、後ろ足も障害物を越えることができる。万が一障害物につまずいてしまうと、その後実験を続行する上で不都合なので、障害物はネコが餌を食べている間に取り除いてやる（彼らはネコが怪我をしないような配慮も忘れない心やさしい学者なのだ）。障害物が取り除か

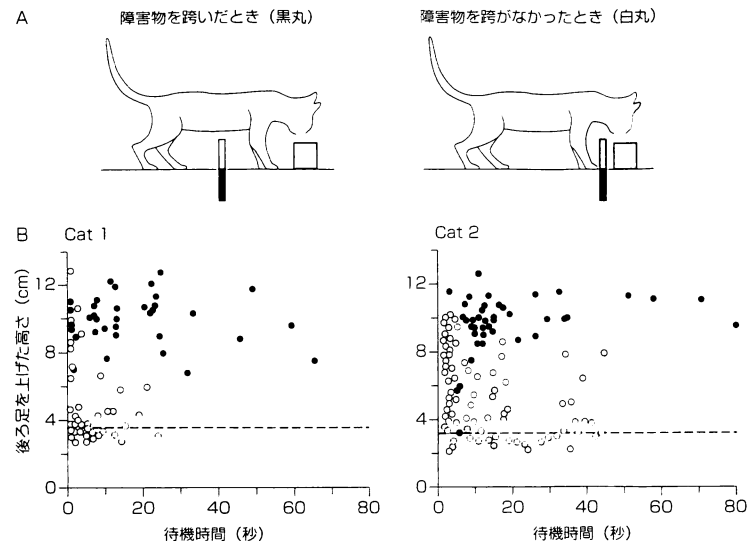


図1 (McVea DA, Pearson KG. Stepping of the forelegs over obstacles establishes long-lasting memories in cats. *Curr Biol*. 17: R621-623, 2007. より改変引用)

れていても後ろ脚が障害物を乗り越えるのに十分なくらい高い位置に上がっていれば、それは障害物の位置を覚えていたということの意味する。

彼らは餌を与える位置を2種類用意した。つまり、障害物を前足で跨いだ後(図左)と跨ぐ直前(図右)である。横軸に障害物を見ずに留まっていた時間を、縦軸に後ろ足の上上がった高さをプロットすると、障害物を前足で越えた後であれば1分たっても十分に高い位置(水平の点線は障害物がない通常歩行の際の足の上がる高さを示している)まで後ろ足を上げていることが分かる(黒丸)。それに対して、障害物を跨がずに留まっていた時は、障害物の位置を覚えている試行もあるものの数秒ですっかり忘れてしまう試行もあることがわかるだろう(白丸)。おそらく障害物を越える際の運動コマンドのコピーが、目で見ることによって得た障害物の位置情報の記憶を固定化するのに役に立っているものと考えられる。その仮説が正しいのかどうか、ネコに聞いても教えてくれないので、研究者は今日も実験を続けている。 [進矢 正宏]

### 引用文献

- (1) McVea DA, Pearson KG. Stepping of the forelegs over obstacles establishes long-lasting memories in cats. *Curr Biol*. 17: R621-623, 2007.

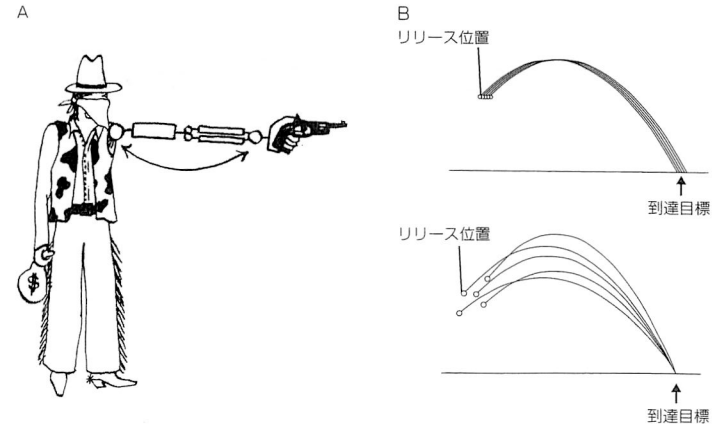
## 変わらないために変わり続ける身体

私の好きなラーメン店のコンセプトに「変わらないために変わり続ける」というものがある。これは「変わらぬ味といわれるためには、常に味を向上させるよう変化しなければならない」ということを表した言葉らしい。「変化すること」と「変化しないこと」は一見相反する現象に見えるが、ヒトの営みにはこの2つが同居しているところがある。実はこのようなことが、ヒトの身体の動きの中にも存在している。

例えば、あなたが西部劇に出てくる伝説のガンマンになったとしよう。そして前方にある的を狙って銃を構えている(図A)。このときあなたの身体はどのように動いているだろうか。Arutyunyanという研究者は、射撃者が的に向かって狙いを定めているとき、どのような身体の動きをしているかについて興味深い報告をしている(1)。なんと射撃者は、手先の安定を達成するために、絶対動かないように全身を固定するのではなく、逆に多数の関節を揺らがせ、それらの関節間に機能的な協調関係を持たせることで、全体として手先を安定させているというのだ(図A)。常に化する揺らぎに対して、そのつど適応的に関節間に協調関係を持たせることで、確実な手先の安定性が得られるという。

またKudoらは、的をめがけたボールの下手投げ動作について興味深い報告をしている(2, 3)。下から投げるボールのリリース位置と軌道を機械のように毎回同じにすれば、当然ボールの最終到達位置も毎回同じになる(図B上)。一方で、常にボールのリリース位置や軌道は異なるが、ボールのリリース変数(ボールのリリース位置、初速度、投球方向)に機能的な関連性を持たせることで、最終的にボールの到達位置を安定させることもできる(図B下)。Kuroらは、ヒトが実際に下手投げ動作を学習しているときのボール軌道を観測し、ヒトは後者のようにリリース変数間の機能的関連性を学習することでボールの到達位置を安定させていることを明らかにした。また、最終的にボールの到達位置が最も正確になった人は、各リリース変数のばらつきが最も小さかった人ではなく、リリース変数間の協調関係が最も高い人だったという。

図B下に描かれたボール軌道を眺めていると、一流サッカー選手の華麗なループシュートが思い浮かぶ。ディフェンダーやキーパーの頭上を軽やかに越えて、ボールが弧を描きネットを揺らす。観客が思わず息を飲む瞬間だ。この鮮やかなループシュートを見ていると、ゴールを決める方法はひとつではなく無数にあることに気付く。たとえ練習で機械のように毎回同じシュートが打てるようになったとしても、実際の試合では練習と全く同じ状況がやってくることはほとんどない。グラウンド状態や対戦相手の動きといった外部環境は試合の度に異なる。また健康状態や怪我の有無、関節の柔軟性など自分自身の身体の内部環境も毎回異なっている。一流選手はこのように多様に化する環境の中で、状況に応じた多様な動作を実現することで、安定したパ



図：(A) 射撃者は関節間に機能的な協調性を持たせることで手先を安定させている。(Tuller B et al. The Bernstein perspective II. The concept of Muscle Linkage or coordinative structure. In Kelso JAS (ed), Human motor behavior: An introduction. Lawrence Erlbaum Associates. p.255, 1982.)

(B) 安定してボールを目標へ到達させる2つの方法。上段：ボールのリリース位置と軌道を毎回全く同じにすることによって、最終到達点を安定させる方法。下段：ボールのリリース位置や軌道を毎回変化させながらも、リリースパラメータ間に機能的な連関を持たせることによって、最終到達点を安定させる方法(Kudo K, Ohtsuki T. Adaptive variability in skilled human movements. Information and Media Technologies. 3: 409-420, 2008より改変引用)。

フォーマンスを発揮しているのだ。

スポーツだけではなく、ジャズなどの音楽の即興演奏でも同じようなことがある。個人練習時に行っていたのと全く同じ演奏を、アンサンブル時に行ってもスイングしない。仲間の演奏や聴衆の雰囲気を感じ取り、その場で柔軟な判断を行いながら多様な演奏をすることが、変わらない最高のパフォーマンスへとつながるのではないだろうか。“変わらないために変わり続ける”ヒトの身体のすごさに、著者は改めて感動している。 [藤井 進也]

### ■参考図書

籠 信義編。運動行動の学習と制御。杏林書院、2006。

### ■引用文献

- (1) Arutyunyan GH et al. Investigation of aiming at a target. Biophysics, 13: 536-538, 1969.
- (2) Kudo K et al. Compensatory coordination of release parameters in a throwing task. J Mot Behav. 32: 337-345, 2000.
- (3) Kudo K, Ohtsuki T. Adaptive variability in skilled human movements. Information and Media Technologies. 3: 409-420, 2008.
- (4) Tuller B et al. The Bernstein perspective II. The concept of Muscle Linkage or coordinative structure. In Kelso JAS (ed), Human motor behavior: An introduction. Lawrence Erlbaum Associates. p.255, 1982.

## 腕の動きより姿勢調節が先

知っている方も多いかもかもしれないが、ちょっとした遊びを紹介しよう。椅子に座っている人の額を正面から押さえ、立ってもらうように指示する。すると、たとえば1本で押さえても全く立てなくなる。なかには催眠術にかかったような感覚に陥る人もいだろう。その後、指を離して立ってもらうとよくわかるが、立つためには姿勢を安定させなければならず、上体をかなり前傾させてからでないと立てないのである。これほどの大きな姿勢調節さえも意識していないのだから、ヒトはなんて自分の身体に無頓着なのだろうとつくづく思う。

次に、「気をつけ」の姿勢から「前へならえ」の動作をしてほしい。その際、自分では上肢だけを動かしているつもりなのに、動かす前に体が若干後ろに傾いたのがわかるだろうか？このような随意運動中に意識せずとも行われる姿勢調節機能は、「予測的姿勢調節機構（Anticipatory Postural Adjustments: APA）」と呼ばれている（詳しくは参考図書も参照のこと）。この機構は姿勢動揺を補償する反応であり、椅子から立ち上がる動作や前へならえの動作開始時、そしてつま先立ちや歩行の開始時など、さまざまな動作の開始時にみられる。

では、「前へならえ」のような動作では、具体的にどのような姿勢調節が観測されるのであろうか？ Wolfらは、両手を肩の高さまで急速に挙上する課題において、セルフペースで挙上を開始する条件（セルフペース条件）とランプが点灯したらできるだけ早く挙上を開始する条件（単純反応条件）を比較した（1）。セルフペース条件では上肢挙上筋（三角筋）より50-100ミリ秒前に姿勢筋（脊柱起立筋や大腿二頭筋）に筋放電が現れた（図）。また足圧中心点は、上肢動作開始前に前方へ移動していた。つまり体を後傾させて次に起こる姿勢の動揺を補償していたのである。それに対して単純反応条件では、姿勢筋と上肢挙上筋の筋放電開始時刻の差はセルフペース条件よりも短くなり、反応時間（上肢挙上開始時間）が早い者では両筋がほぼ同時に筋放電を開始していた。このときの足圧中心点は、上肢挙上とほぼ同時に後方へ移動したあと、急激に前方へ移動していた。

Slijperらはセルフペース条件と単純反応条件に加え、4方向のランプのうち点灯した方向に上肢を動かす条件（選択反応条件）を用いて、上肢動作と姿勢調節のタイミングについて検討した（2）。ランプ刺激から上肢動作開始までの反応時間は、選択反応条件では単純反応条件より約50ミリ秒遅くなったが、選択反応条件の筋放電パターンはセルフペース条件と類似しており、上肢動作の50-100ミリ秒前に姿勢調節が発現した。つまり、単純な刺激からできるだけ早く上肢動作をすると、姿勢調節は上肢動作と同時に発現するが、セルフペースや刺激の種類に合った上肢動作をしなければならぬ場合には、先に姿勢調節が発現すると考えられている。

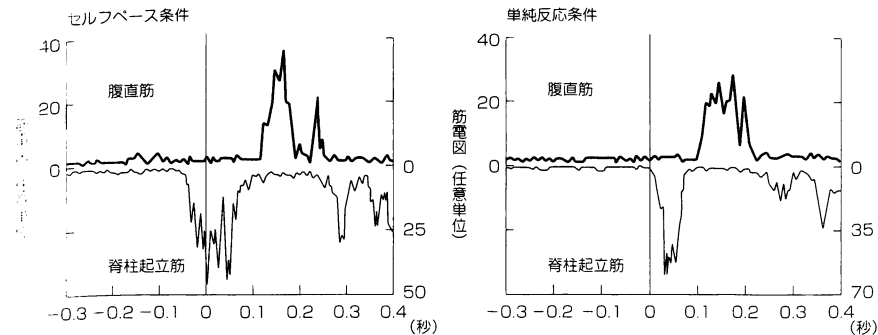


図1 セルフペース条件（左）と単純反応条件（右）での筋放電パターン。横軸の0は三角筋の筋活動開始時刻。セルフペース条件では三角筋（上肢挙上筋）の筋活動前に脊柱起立筋が活動しているが、単純反応条件では三角筋と脊柱起立筋の筋放電がほぼ同時になっている。両条件とも、上肢動作開始後に姿勢を安定させるために腹直筋が活動している。（Slijper H et al. Anticipatory postural adjustments under simple and choice reaction time conditions. Brain Res. 924: 184-197, 2002より改変引用）

上記の研究を知って、著者はヒトの身体の巧妙さに感動を覚えた。時間に余裕があれば、身体は無意識のうちに、主動作よりも先に姿勢調節を行っているのだ。

このような姿勢調節は無意識であるために自分ではわからないが、相手からは見えるという点で、対人競技では特に注意しなければならない。「なぜか動きが読まれる」、「ほんやりと相手を見ていたらなんとなく動き出しがわかる」という感覚は、無意識の姿勢調節が原因であるかもしれない。伸張反射などのように、無意識の身体内部の動きを有効利用することが大切だとO-22で述べたが、無意識の姿勢調節を抑制することも大切なのである。

[山下 大地]

### ■参考図書

Leonard CT 著、松村道一ほか監訳、ヒトの動きの神経科学、市村出版、2002。  
矢部京之助ほか編著、入門運動神経生理学、市村出版、2003。

### ■引用文献

- (1) Wolf SD et al. Anticipatory postural adjustments during self-paced and reaction-time movements. Exp Brain Res. 121: 7-19, 1998.
- (2) Slijper H et al. Anticipatory postural adjustments under simple and choice reaction time conditions. Brain Res. 924: 184-197, 2002.

## びっくりする話

あなたの友人はどうやらとても急いでいるようだ。横断歩道の前で信号が青になる瞬間を今か今かと待っている。あなたは静かに友人の後ろに近付いて、耳元で「わっっ!」と大きな声を出す。友人は驚いて車道に飛び出してしまう。「何や!びっくりした!」実はそんなに急いでもいなかったようだ。あなたを責める余裕はあるらしい。「何でこんなことすんねん!」あなたはなぜこのようなことをするのかを答える代りに、なぜこのようなことになるのかという神経メカニズムを説明する。

まずはプレプログラムと呼ばれる概念について知っておく必要がある。信号が青になる瞬間を待っているとき、中枢神経系は青になった瞬間できるだけ早く歩き出すべく準備をしている。歩き出す、という運動プログラムを歩き始める前に既に用意しているのである。間もなくして信号は赤から青に変わるだろう。このとき信号機から網膜に届いた青い光はトリガーとして機能する。歩き出す、という準備しておいた運動プログラムの引き金を引くのだ。これがプレプログラミング反応と呼ばれる現象である(プレプログラミング反応については『脳百話』も参照のこと)。

あなたが友人の耳元で発した大きな声は友人の中枢神経系に何をもたらしたのだろうか。ただ単にびっくりして筋を緊張させるといふ反射と、音を聞いてから何らかの反応をするという課題には何の関係もないと思われるかもしれないが、最近になってプレプログラム反応と大きな音という組み合わせの実験から面白い結果が得られることが分かってきた。Valls-Soleら(1)は視覚刺激に対する単純反応課題において、通常150ミリ秒以上かかる反応時間が視覚刺激提示と同時に大きな音が鳴らされた試行では70ミリ秒程度にまで短縮することを発見した。しかも、手首の屈曲とつま先立ちという全く異なるタスクにおいてタスクが要求するそのままの筋活動パターンが誘発された(図)。このような劇的な潜時の短縮は、複数の感覚系から大きな入力が入ったときに潜時が短縮する、いわゆる“intersensory facilitation”だけでは説明がつかない。これらの事実から推測できることは、皮質下に用意されている運動プログラムを大きな音が誘発している、というメカニズムの存在である(2)。

これはこのテクニックを用いれば、様々な反応タスクにおいて運動プログラムがあらかじめ皮質下に用意されているかどうかを実験できるということの意味している。たとえば、MacKinnonらは前方へのステップ動作にこの方法を適用し、足が離れずる前の先行随伴動作(0-37参照)が、Goシグナルが提示される少し前からプレプログラムされているということを示唆している(3)。Queraltらは歩行中に障害物を選けるという動作にも皮質下でのプレプログラムが関与している可能性を示している(4)。素早い反応を可能にするための無意識的な運動制御を、目に見える形で誘発することができるという研究手法なので、今後の発展が期待されることである。

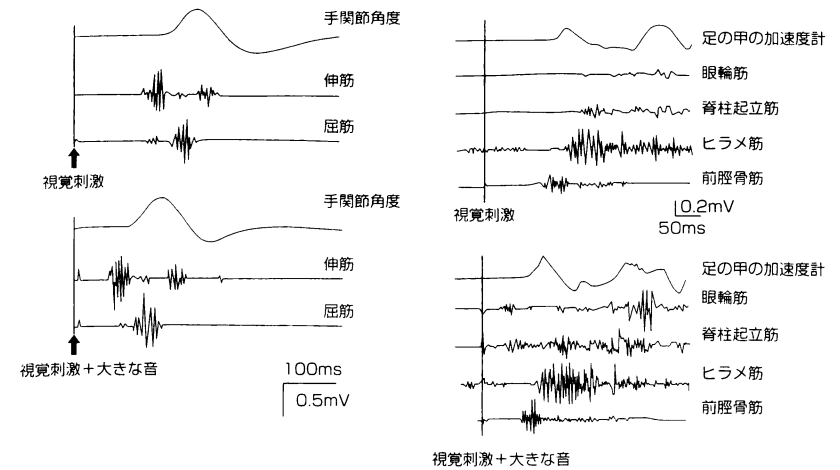


図 視覚刺激に対する通常の反応時間(上)と、視覚刺激と同時に大きな音を提示した際の反応時間(下)。手首屈曲タスク(左)とつま先立ちタスク(右)それぞれにおいて、Goシグナルとともに大きな音を鳴らすことによって反応時間が劇的に短縮する。(Valls-Sole J et al. Patterned ballistic movements triggered by a startle in healthy humans. J Physiol. 516: 931-938, 1999より改変引用)

まだまだ見つかったばかりの現象であり、そのメカニズムに関しても不明の点が多く残されているものの、賢明な読者の方は現段階でも2つほどの重要な知見が得られることにお気づきになられたことであろう。1つ目は、信号待ちをしている友人を大きな声で驚かすのはとても危ないということ。そして2つ目は、100m走のピストルを耳元でならせば少なくとも0.05秒ほどの記録更新の可能性があるということである。 [進矢 正宏]

### 引用文献

- (1) Valls-Sole J et al. Patterned ballistic movements triggered by a startle in healthy humans. J Physiol. 516: 931-938, 1999.
- (2) Valls-Sole J et al. Interaction between startle and voluntary reactions in humans. Exp Brain Res. 187: 497-507, 2008.
- (3) MacKinnon CD et al. Preparation of anticipatory postural adjustments prior to stepping. J Neurophysiol. 97: 4368-4379, 2007.
- (4) Queralt A et al. The effects of an auditory startle on obstacle avoidance during walking. J Physiol. 586: 4453-4463, 2008.

## 身体バランスの崩れによる素早い反応

読者の中で、電車やバスに乗車中、突然の揺れに対して、とっさに手摺や吊革をつかんだ経験をお持ちの方は少なくないであろう。実は、この身体バランスを崩されたことに対する、とっさに物体をつかむ（補償的把持反応（compensatory grasping reactions））といった上肢の素早い反応は、人間の驚くべき能力の現れである。

種々の方向へ移動する台の上で被験者を静止立位状態にし、台を動かすことで身体バランスを崩させた時の反応を調べた研究が種々ある（1, 2）。例えば、McIlroyとMakiは、11名の被験者を手摺の近い条件群と遠い条件群とに分け、台を前後左右いずれか1方向に、大小2種類の大きさで動かした時の腕と脚の反応を調べている（1）。その実験では、被験者には腕あるいは脚の動きについての特別な教示は行っておらず、被験者は台の動きに対して、手摺をつかんでも、ステップをしても構わない。

結果は、台の動く方向や手摺の遠近にかかわらず、概して台の加速開始から非常に早くに肩の筋活動が開始していた。図は、手摺が近い条件群の被験者1名の典型的データで、台が前方へ大きく動いた時のものである。台の加速開始から非常に早くに筋活動が生じたことがわかる。

台の動きに対してステップしないように配慮し、また手摺を把持することでバランスを回復するよう教示した条件下でも実験は行われた（2）。被験者の右手側（利き手側）に、手を伸ばして届く範囲内に手摺を設置し、足元を障害物で取り囲むという設定で実験は行われた。この実験では台は左右いずれか1方向に動くのであるが、その動きに対してステップはせずに、できうる限り素早く手摺をつかむことでバランスを回復するよう被験者には教示が与えられた。先の実験（1）とは測定部位が異なるものの、この実験でもまた、非常に早い上肢筋活動の開始が認められた。台の加速開始に対して、上腕二頭筋で平均98ミリ秒、三角筋前部で101ミリ秒であった。筋活動開始に続く動作の開始も平均126ミリ秒と非常に早かった。

MakiとMcIlroyは、台の動きに応じる椅子に被験者を座らせ、台の動きによる把持反応と光刺激（視覚刺激）による把持反応との比較を行った（3）。被験者には、台の動きまたは光刺激に対して、できうる限り素早く手摺を把持するよう教示が与えられた。結果は、光刺激に反応して動作を開始するよりも、台が動き身体バランスが崩されることで動作を開始した方がその開始は平均で130ミリ秒早かった。ちなみに、台の動きに対して、座った状態で反応する条件と立位状態で反応する条件との間の、筋の活動タイミング、活動パターンおよび把持反応の軌跡は非常に類似したものであった。

これらの知見から、冒頭に記した電車やバスでの揺れに対しても、同様のメカニズムで上肢の素早い反応が起こるものと示唆される。「身体バランスを崩される」とい

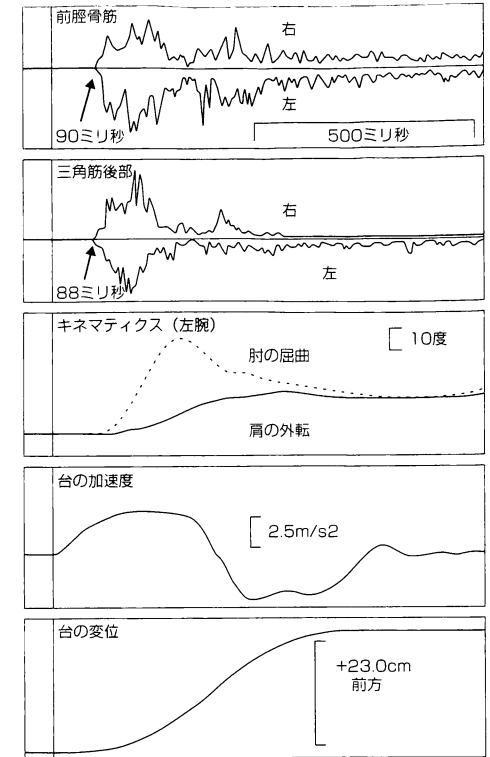


図1. 大きな前方への揺れに対する被験者1名（手摺の近い条件群）の典型的データ。前脛骨筋、および三角筋後部の筋電図波形は、反復4試行を平均した全波整流データである。左肢の筋電図は、右肢筋電図の下に反転して示している。また、肩の外転および肘の屈曲も同様に平均して示している。縦線は台の加速開始を表す。筋電図波形にある矢印は、（台の加速開始から測定された）平均筋活動開始潜時を示している。（McIlroy WE, Maki BE. Early activation of arm muscles follows external perturbation of upright stance. Neurosci Lett. 184: 177-180, 1995.より改変引用）

う言葉は、転倒につながりうるニュアンスを私たちに抱かせるが、バランスの崩れが身体の「より早い反応」を可能にするというエビデンスは、私たちが有する高い潜在能力の一端を示しているのである。 [山本 真史]

### ■参考文献

- (1) McIlroy WE, Maki BE. Early activation of arm muscles follows external perturbation of upright stance. Neurosci Lett. 184: 177-180, 1995.
- (2) Ghafouri M et al. Initiation of rapid reach-and-grasp balance reactions: is a pre-formed visuo-spatial map used in controlling the initial arm trajectory. Exp Brain Res. 155: 532-536, 2004.
- (3) Maki BE, McIlroy WE. The Role of Limb Movements in Maintaining Upright Stance: The "Change-in-Support" Strategy. Phys Ther. 77: 488-507, 1997.

## 外からではわからない動き

プロ野球中継を見ている時、「僕もこの投手のように速い球を投げたい」と思った人は多いだろう。著者は、毎日プロ野球中継に釘付けになった結果、胸を大きく張ってダイナミックな動作をすることが、速い球を投げるために大切なポイントではないかと考えた。果たして、その考えは正しいのだろうか？その胸の張りについて、筋の内部の世界から考えてみたい。

大きく胸を張るシーンでは、肩周辺の筋は伸ばされている。筋は伸ばされると、筋紡錘とよばれるセンサーが興奮し、その信号がIa求心性線維を伝達して脊髄内に入り、 $\alpha$ 運動ニューロンを介して筋を収縮させる。この現象は伸張反射と呼ばれる。筋は伸ばされると、意識せずとも勝手に収縮するのである。この場合、反射潜時（筋が伸張されてから筋収縮開始までの時間）は15～35ミリ秒と非常に短いことから、短潜時伸張反射と呼ばれる。また、Ia求心性神経は信号を脊髄より上位の中枢にも伝達し、それが脊髄に戻って筋収縮を生じさせる場合もある。これは反射潜時が長いことから、長潜時伸張反射と呼ばれる。

伸張反射の大きさは、さまざまな要因によって調節される。Ogisoらは、伸張される筋が予備緊張している時のほうが、脱力している時より短潜時の伸張反射は大きくなることを示した(1)。また、伸張反射の大きさは筋が伸張される長さではなく、伸張される速度に依存するという点に注意してほしい。Croninらは、予備緊張が強くなるにつれて筋のスティフネスが増大し、腱が伸ばされ、筋の伸張速度が遅くなることを報告した。それゆえ、予備緊張を徐々に強くしていくと、最初のうちは筋紡錘の感度が高まって短潜時の伸張反射が大きくなったが、その後筋の伸張速度の低下とともに反射は小さくなった(2)。結果としてCroninらは、予備緊張が最大の40%から60%の間で最も大きくなったと報告している(図)。

長潜時伸張反射の大きさの調節については多くの先行研究がある。YamamotoとOhtsukiは、肘を90度に曲げ、できるだけ脱力した状態から急におもりの負荷をかけて上腕二頭筋を伸張させ、それに対してできるだけ素早く肘を曲げる課題（屈曲課題：おもりを持ち上げる）と、筋が伸張されるのと同じ方向に肘を伸ばす課題（伸展課題：おもりを下ろす）を行った(3)。負荷がかかる瞬間を見ていた場合は見ていなかった場合に比べて、屈曲課題では上腕二頭筋の長潜時成分が大きくなり、逆に伸展課題では小さくなった。これは、筋が伸張されるタイミングを予測することによって、事前に高次中枢で運動準備が整い、次の随意運動が行いやすいように長潜時反射の調節がなされていることを示している。ただ、伸張反射によって生じる張力はそれほど大きなものではなく、随意的な筋収縮をするための「地ならし」として貢献している程度だと考えられている。

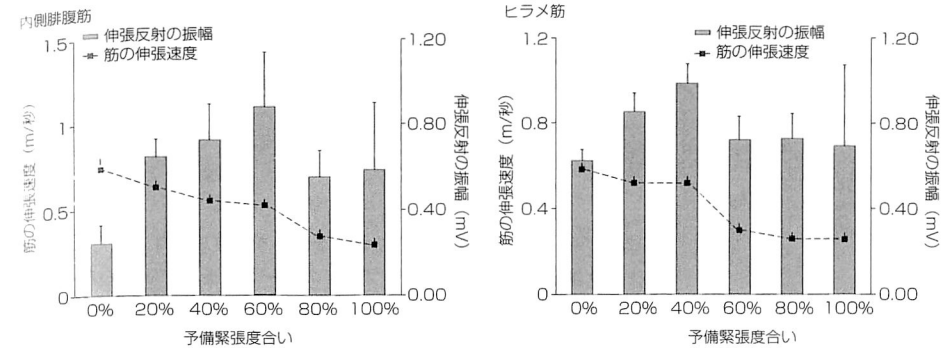


図1 内側腓腹筋（左）とヒラメ筋（右）の、予備緊張度合いに対する筋束の伸張速度と伸張反射の振幅。予備緊張の度合いが強まると筋紡錘の感度が高まるため、伸張反射の振幅は大きくなる。しかし50%あたりを過ぎると筋のスティフネスが増大して腱のほうが伸ばされ、筋の伸張速度が遅くなるため、伸張反射の振幅は小さくなる。(Cronin NJ et al. Effects of contraction intensity on muscle fascicle and stretch reflex behavior in the human triceps surae. J Appl Physiol, 105: 226-232, 2008.より改変引用)

これらの先行研究を踏まえて、もう一度投球動作中の胸の張りについて考えてみよう。体の回転によって引き伸ばされる肩まわりの筋に対して、さらに意識的に引き伸ばして大きく胸を張ろうとすると、(YamamotoとOhtsukiの伸展課題のような状況になってしまい)伸張反射による「地ならし」が不十分になり、全く逆効果になる可能性がある。引き伸ばされる大きさより、速さが大事なのである。見た目ではわからない身体内部の動き、つまり上手な人を見てもマネできない身体の仕組みが、巧みな身体運動の秘訣なのではないだろうか。 [山下 大地]

### ■参考図書

西平賀昭・大築立志、運動と高次神経機能。杏林書院、2005。

### ■引用文献

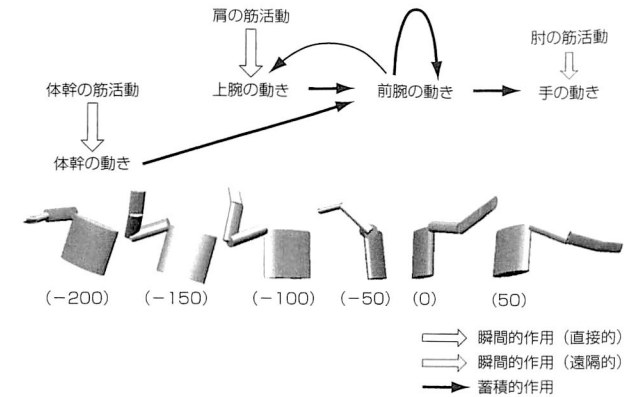
- (1) Ogiso K et al. Effects of effort and EMG levels on short-latency stretch reflex modulation after varying background muscle contractions. J Electromyogr Kinesiol, 15: 333-340, 2005.
- (2) Cronin NJ et al. Effects of contraction intensity on muscle fascicle and stretch reflex behavior in the human triceps surae. J Appl Physiol, 105: 226-232, 2008.
- (3) Yamamoto C, Ohtsuki T. Modulation of stretch reflex by anticipation of the stimulus through visual information. Exp Brain Res, 77: 12-22, 1989.

## ムチのようにしなる身体の動き

「ムチのようにしなる身体の動き」このような表現を耳にしたことがないだろうか、野球の投球動作やテニスのサーブなどスポーツの世界ではもちろん、ドラム演奏など音楽の世界でも、熟練者はムチのようにしなやかな動きを上手に使っているとよくいわれる。体幹に近い部位から身体が動き始め、手先の方へと次第に動きが移っていく。このような動作は「キネティックチェーン（運動連鎖）」などとも呼ばれ、多くの関節からなるヒトの動作（多関節動作）にみられる特徴とされてきた。スポーツの実践者や指導者、そして研究者が最も知りたい点のひとつは、このムチ動作の発生メカニズムであろう。この発生メカニズムに迫るには、筋肉の活動により関節トルク（関節回転軸まわりの力のモーメント）が発生したとき、その結果としてどのような身体動作が生じるのか、というヒトの多関節動作における力と運動の因果関係を解明することが必要不可欠といえる。

2008年にHirashimaらは、投球運動にみられるヒトの3次元的な上肢多関節動作の発生メカニズムを解明した(1, 2)。この研究はJournal of Biomechanics誌のTop 25 Hottest Articlesにも選ばれた、今最もアツイ論文のひとつである。Hirashimaらは実験において、元プロ野球選手を含むピッチャーにすばやいボールを投げさせ、その動作を3次元解析した。（この3次元投球動作をJournal of Biomechanicsのウェブページ上で観ることができる。とても美しいのでぜひ見て欲しい。）このとき、時間の経過を追った投球動作の成り立ちをまとめてみると、図1のようになるという。まず、下肢や体幹の大きな筋群が活動することにより、体幹自体に動き（体幹の前進や左回旋）が生じる。このとき、肩の筋群が活動することで、上腕は後方に取り残されず体幹と一緒に動いていく。このようにして体幹と上腕に発生した速度は、次に肘関節を加速させ前腕の動きを生じさせる。この前腕の速度は、ふたたび肘関節を加速させるとともに、手関節を加速させ、さらには上腕（肩の内旋）をも加速させる。またさらに、肘の筋肉を活動させ肘伸展にブレーキをかけることで、手はさらに加速される。このようにして“ムチのような”投球動作は実現されているのだ。

ここで、もう一度時間の流れに着目して投球動作を眺めてみよう。図に示されている“瞬間的作用”とはその名の通り、発生した瞬間に身体に作用する力を表している。この瞬間的作用には、“直接的作用”と“遠隔的作用”の2種類がある。例えば図1において、体幹や肩の筋活動は、発生したその瞬間に体幹や上腕、すなわち自身のセグメントの動きの発生に直接貢献している。このような作用を直接的作用と呼ぶ。また例えば、肘の筋活動は発生したその瞬間に、肘自身の動きではなく別の身体セグメントである手の動きを生じさせている。このような作用を遠隔的作用と呼ぶ。これらの直接的作用・遠隔的作用により発生した身体セグメントの速度は、それ自体がまた別



図：投球動作の成り立ち。（ ）内の数字は時刻（ミリ秒）を表す。0ミリ秒はリリース時刻を表す（平島雅也氏提供、全身多関節動作の運動制御、第16回日本運動生理学会シンポジウム発表資料より抜粋）

の身体セグメントを加速させる。コリオリ力や遠心力に由来した、速度に依存して発生するこのトルクは、“速度依存性トルク”と呼ばれている。ある瞬間の身体セグメントの速度は、その時点までに加えられた瞬間的作用のすべての時間的履歴を反映しているため、速度依存性トルクは“蓄積的作用”とも呼ばれる。すなわち、動作初期に体幹や肩の大きな筋群によって発生した瞬間的作用は、速度依存性トルクを介する蓄積的作用のループに残存し続け、遠位部の肘や手関節を加速させているのである。

動作初期における、近位部の大きな筋群の活動は、将来的に活躍する速度をつくる大事な準備段階である。眼には見えない、しかし力強い初期の力は、将来につながる大きな発展性を持った力である。熟練したヒトの3次元多関節動作に関する論文はまだ少ないが、非常に力強い内容であり、今後多様な分野に蓄積的な影響を与え続け、発展してゆくことになるだろう。

[藤井 進也]

### ■引用文献

- (1) Hirashima M et al. Kinetic chain of overarm throwing in terms of joint rotations revealed by induced acceleration analysis. J Biomech. 41: 2874-2883, 2008.
- (2) Hirashima M, Ohtsuki T. Exploring the mechanism of skilled overarm throwing. Exerc Sports Sci Rev, 36: 205-211, 2008.



## コーチングに不可欠なデータの活用

間もなく始まる日本選手権。メインプールでは、早朝から数多くの選手が入念にウォーミングアップを行っている。ダッシュコースには、本番さながらスタート合図に合わせて勢いよくプールに飛び込んで泳ぎ始めた選手がいた。25mを過ぎたあたりで止まると真剣な表情でコーチと話をしている。今も昔も変わらずよく見かける光景だ。

しかし、一昔前と少々違うのがコーチの行動である。以前は、選手をスタートさせた後、泳ぎを見ながらプール中央に移動し25mの記録を計測していた。25mを少し越えたあたりで止まった選手に記録を伝えてアドバイスを送るとというのが一般的であった。それが、今のコーチは実に慌ただしくなった。まず、スタートさせた後に素早く15m地点に移動し15mの通過時間を計測する。続いて25m地点に移動する間にピッチの速さを計り最後に25mの記録を計測する。もちろん、その間に泳ぎの観察も忘れていない。わずか10秒余りの間に、これほど多くの作業を行うのだ。なぜなら、コーチは選手の現状を詳細に把握して適確に助言し、万全の状態を作り出した上でレースに臨ませたいからである。

時に、選手の間接とコーチの見た目（主観）にズレが生じる。以前は、客観的なデータが少なくアドバイスも主観に頼らざるを得なかったために、そのズレが修正されずにレースを迎えることもあった。しかし、データを増やすことで短時間に選手の状態を掴むことができ、アドバイスも的確に絞れるようになった。例えば、25mの記録以外に15m通過やピッチを計測すると、記録が目標値よりも悪かった場合の原因がスタート局面にあったのか泳ぎにあったのかを瞬時に判断できる。泳ぎが遅かった場合、ピッチが速すぎて泳ぎが空回りしたのか、ピッチを抑え過ぎてスピードが出なかったのか、あるいはピッチは変わらないが泳ぎの技術に問題があり進んでいなかったのかが分かり、泳ぎを観察した時に得た情報と合わせて問題点を修正するための最適なアドバイスを考えることができる。

このようなコーチの行動は、ここ10年余りの間に見られるようになり、今では珍しくもなくなってきた。その背景には、日本水泳連盟医・科学委員会が実施している競泳のレース分析プロジェクトが指導現場で認知され写真に示したようにデータが有効活用されるようになったことが挙げられる。その結果、日頃からラップタイムや記録以外に15m通過やピッチを計測することの必要性を感じたコーチが増え始め、トレーニング中に計測し活用するようになってきた。つまり、その姿が大会会場でも見かけるようになったのである。さらに、医・科学委員会のプロジェクトでは機材の調達やスタッフの確保等、大がかりな準備が必要でありその実施は日本選手権や国際大会に限られていた。そのため選手権以外の大会でもデータを必要とするチームは、自前で簡易的にレース分析を行うようになった。チーム独自で実施できれば、いつでも



写真：試合会場でデータを説明する医・科学スタッフ（右）とコーチ（左）

スピーディーにデータを活用することが可能となる。日本代表チームでも、2002釜山アジア大会より簡易レース分析を導入し(1)、北京でも北島康介選手の快挙を後押しした。

北島選手が世界新記録で優勝した100m平泳ぎのレース前に、平井伯昌コーチが「勇気をもって、ゆっくり行け」といって送り出した話は有名であるが、これは準決勝後に修正した泳ぎのポイントを簡潔に表現したアドバイスであった。実は、他にもスタートについて決勝前に課題を修正していた(2)。準決勝の結果から、15m通過がアテネ大会よりも約0.2秒も遅いことが分かり、スタート動作での脚のスタンスや後ろ足の蹴り方等について改善した。その結果、決勝では入水地点が0.2m、浮き上がり地点が0.6m延長し15m通過で0.21秒も短縮した。正に、世界記録での優勝に欠かせない強力なサポートになったのである。

コーチには、選手を見る目や指導力が大切になることはいうまでもないが、このようにデータを活用するための手腕も重要になる。さらにいえば、より多くのデータを収集するためにフットワーク軽く動きまわる身体能力も必要とされるのである。

[生田 泰志]

### ■参考図書

財団法人日本水泳連盟編. 水泳コーチ教本 第2版. 大修館書店, 2005.  
平井伯昌. 見抜き力. 幻冬舎, 2008.

### ■引用文献

- (1) 立正 伸. 第14回アジア大会におけるレース分析報告. 水泳水中運動科学. 6: 45-47, 2004.
- (2) 岩原文彦. レース分析から見えてくる泳法分析とその改善. バイオメカニクス研究. 13 (1): 24-30, 2009.

## 泳ぐのは僕だ

「泳ぐのは僕だ」と書かれたTシャツ（写真）を着た北島康介選手がプールサイドに立った。ついに、この騒動に一石を投じたのである。

2008年初夏、日本中で大きな水着騒動が起こった。その水着とは、英国・スピード社製のLZR RACER（LR、レーザー・レーサー）のことである。その発端となった北京オリンピック代表選考会。この大会でLRを着用して泳いだ選手はごく一部であったが、その中の1人がオリンピック代表権を獲得したことからわかにLRに注目が集まり始めた。その後、たいした時間を要するまでもなく、その性能の高さが明らかになった。しかし日本水泳連盟は、従来と同様に水着等の物品提供について3社と契約しており、日本代表選手が北京で契約外であるLRを着用できないという問題が急浮上した。そのため、LRの使用可否についての動向に注目が集まり、その報道は日に日に過熱していった。

LRの騒動がピークになった6月のジャパンオープンで、ついにその威力が発揮された。LRを着用した北島選手が200m平泳ぎで世界新記録を樹立したのである。この記録を含む17個の日本新記録のうち、実に16個がLRを着用した選手によって生まれた。そして、大会後、日本水泳連盟は北京オリンピックでの水着選択の自由化を決定しLRの使用を認めた。オリンピックを2カ月後に控え、やっと水着騒動は一段落したのである。

ところで、これまでも水着の開発は行われてきたが、なぜ、急にLRが目ざされたのだろうか？従来、水着素材の開発は表面の摩擦抵抗の削減に主眼が置かれ、形状については1990年代後半までは身体を覆う面積が少ないものが主流であった。それが2000年のシドニーオリンピックに向けた開発で大きく変化した。腰から膝上までを覆うスパッツ型や足首までを覆ったロングスパッツ型（L）、さらには全身を覆ったフルボディスーツ（FB）が登場した。以降、腰部だけを覆った通常の水着（N）を着用して大会に出場する選手が減少したことから、新しい水着が競技力向上に貢献したことがわかる。実際に3種類の水着を比較した研究において、FBとLはNよりも25mから800mの記録測定で速く、受動抵抗の低減やエネルギーコストが軽減されることも明らかになった（1）。このように水着の効果はみられたものの今回のような騒動は起こっていない。つまり、LRは世間を大騒がせる程の画期的な水着であったのだ。そして、その答えは開発コンセプトにあった。

水泳中の泳者に働く主な抵抗には、圧力抵抗（形状抵抗）、造波抵抗、摩擦抵抗があるが、LRの開発では形状抵抗の削減に主眼が置かれた。LRは着用で20分も要するほど身体の締め付けが強く、それにより身体の断面積の縮小や筋肉の振動が抑えられ形状抵抗の低減が実現された。全抵抗に占める比率は圧力抵抗と造波抵抗が高く摩

I AM THE  
SWIMMER  
泳ぐのは僕だ  
是 我在遊泳

写真：北島選手が着用したTシャツ

擦抵抗は低いこと、さらに抵抗は速度の2乗に比例して増加することから、LRの着用による形状抵抗の低減がパフォーマンス向上に直結したことが容易に理解できる。すなわち、泳速度向上に限らず高速度が獲得できるスタート後やターン後においても威力が発揮されたのだ。実際にLRの前のモデルであるFS-PROで行った実験でも蹴伸びによる5m通過時間や50m記録測定等においてその優位性が認められている（2）。したがって、0.01秒の短縮に苦慮する選手にとってはLRが魔法の水着と化したのである。

残念ながら、LRの性能が明らかにされるに伴い、まるで選手の努力は二の次だといわんばかりの報道も多くなった。そのような中、北島選手は冒頭に紹介したような行動に出た。これまでの報道に対する強いアピールであった。そして迎えた北京オリンピック。北島選手は2大会連続で100m、200m平泳ぎを制覇する史上初の偉業を成し遂げた。この素晴らしい快挙に日本中が大きな感動に包まれたことが今も鮮明に蘇ってくる。いうまでもなく主役は北島康介選手でありLRは脇役として主役の活躍を支えた。もちろん、その報道では主役が脚光を浴び、やっと本来の姿に戻ったのである。

〔生田 泰志〕

### ■参考図書

高木英樹。人はどこまで速く泳げるのか。岩波書店、2002。

### ■引用文献

- (1) Chatard JC, Wilson B. Effect of fastskin suits on performance, drag, and energy cost of swimming. Med Sci Sports Exerc, 40: 1149-1154, 2008.
- (2) 伊藤慎一郎。市販低抵抗水着の性能。日本水泳・水中運動学会2008年次大会論文集, pp.35-38, 2008.

## 競泳の勝敗は泳ぎで決まるって本当?!

「競泳って何を競い合う競技だろうか?」

このような質問をされたら、あなたなら何と答えるだろう? ご承知のように、水泳は水の中という特殊な環境で行うためにプールで泳ぐ練習が極めて重要となる。そのため、選手やコーチ等、水泳関係者に聞いてみると「泳ぎの速さ」と答える方が多い。しかしながら、「タッチの差で勝った!」とか「スタートで出遅れた分、負けたなあ…」等、レース後に勝敗の原因が泳ぎ以外のことに及んだコメントを聞くことが意外にも少なくない。実際に、国際大会でもスタートしてから浮き上がった時に身体半分程度の開きを目にすることがあるが、その時間差が0.5秒程度になることも珍しくない。つまり泳ぎ以外の優劣が勝敗に影響を与えることが度々あるのだろう。実はその通りである。冒頭の質問に対して「泳ぎの速さ」と答えた場合、間違いでは無いが満点でもない。競泳は、スタート合図から選手がゴールタッチした瞬間までの所要時間によって勝敗が決するので正解は「記録」となる。記録の良し悪しを決めるには泳ぎの速さが多分に作用するものの、それ以外の要素も含まれるのである。

1980年代半ば、競泳の勝敗が泳ぎの速さにより決定するといった捉え方に疑問を持った2人の若手研究者がいた。2人はこのことを検証するためにレースを分解して計測することを計画し手弁当で研究を始めた。この新たな研究が、日本水泳連盟医学科学委員会が長年に渡り実施している「競泳のレース分析プロジェクト」に発展したのである。

競泳のレース分析は、レースをスタート、ストローク、ターンおよびフィニッシュの4局面に分類し、泳法別に各局面の区間を決めている。解析は観客席上段に設置したビデオカメラの映像を元に行う。スタート、ターンおよびフィニッシュ局面のように泳ぎの関与の少ない局面については、その所要時間からこれらのパフォーマンスが評価される。レース全体からこれら3局面を除いた部分が純粹に泳ぎだけを評価する局面(ストローク局面)となり、この局面では泳速度だけでなくピッチの速さ(ストローク頻度)や1ストローク・サイクルで進む距離(ストローク長)を求め、詳細に泳ぎの特徴を把握することが可能になる。さらに、このようなレース情報は、コーチングに役立てることを目的に、大会会場で選手やコーチに提供されている。

その成果として、1990年代には外国選手に比べて日本代表選手はスタートやターン局面に劣ることが明らかになった。その頃からレース分析の必要性が高まり始め、今ではトレーニング中からこれらのデータを測定し選手の指導に活用しているコーチも多い。2000年以降、国際大会での日本代表選手の活躍は目覚ましいが、その裏にはスタートやターン局面に優れていたことが好成績に繋がった選手も確認されるようになった(1)。図にシドニーオリンピック女子100m背泳で2位に入賞したMN選手

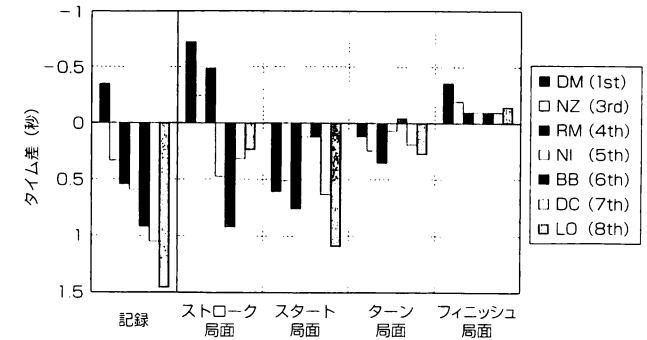


図: 女子100m背泳におけるMN選手と他の決勝進出者の比較

と他の決勝進出者の記録および各局面の所要時間の比較を示した。MN選手が他の選手よりも速い局面についてはX軸よりも下に、遅い局面については上に両者の差が示されている。MN選手は、ストローク局面では0.24秒から0.72秒下回る4位であったが、スタート局面は0.13秒から1.09秒も上回る1位であった。同様に、ターン局面についても1人を除く他の6名を上回っている。つまりMN選手のスタートおよびターン局面は、世界のトップレベルの中でも極めて優れており、その結果、泳ぎの遅れを補うことができたと考えられる。このように、日本選手が元来スタートやターンに劣っていたのではなく、トレーニングによっては世界のトップレベルに到達できることが示されたのである。その取り掛かりの根源が、2人の若手研究者が抱いた「競泳って何を競い合う競技だろうか?」といった素朴な疑問にあると思う。

競泳は、「記録」を競い合う競技である。これまで「泳ぎの速さ」だと捉えていた方は、少し考え方を変えてみてはどうだろうか?きっと、より効果的に競技力を高められるような新たなトレーニングのアイデアが芽生えてくるだろう。 [生田 泰志]

### ■参考図書

財団法人日本水泳連盟編。水泳コーチ教本 第2版。大修館書店、2005。

### ■引用文献

- (1) Ikuta Y et al. A comparison of Japanese finalists to other finalists in the 100m swimming races at the Sydney Olympic Games. Proceeding of SWIM Sessions. XIX International Symposium on Biomechanics in Sports. pp. 75-78, 2001.

## 浮いている時に体にかかっている いろいろな力

水泳中の泳者はまるで、水上をすべっているかのように進んでいる。泳者は、まきれもなく浮いている。水泳中の体にかかるすべての力の作用によって、泳者は浮くことができ、そして泳ぐことができる。水泳中の泳者にはいったいどのような力が作用し、沈むことなく浮き、そして泳ぐことができるのであろうか？

物体を水の中に沈めると、水を押しのけた分の重さと同じ分だけの力を鉛直上向きに受ける。これはアルキメデスの原理といわれており、広く知れわたっている。この上向きの力のことを浮力という。浮力が、物体自身の重さよりも大きい場合には物体は浮く。水の密度が $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ であることより、それよりも小さな密度の物質であれば、水に浮く物質であり、それよりも大きな密度の物質であれば、水に沈む。海水の比重は約 $1.03\text{g}/\text{cm}^3$ であり、淡水にくらべて、物質を沈めた時に浮きやすいという性質を持っている。そのため、プールで浮かんでいる時よりも、海で浮かんでいる時の方が断然に浮きやすい。平均的な体格の人の密度は一般に $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ より大きい。しかし、肺に大きく息を吸い込んだ状態での密度は $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ を下回り、人は浮くことができるのである。

人は、体を伸ばした状態で泳いでいる。この状態で水中に沈んでいる分だけ体全体に浮力がかかっているわけであるが、体全体にかかっている浮力の合力の作用点を浮心という。浮心には鉛直上向きの力がかかっている。一方、地球からの重力の重さが体全体にかかっており、重力の合力の作用点を重心という。重力がかかっている向きは鉛直下向きである。人が水に浮かんでいる時は、鉛直上向きの浮力と鉛直下向きの重力が体にかかっている。この2つの力の合力の作用点と同じ、つまり重心と浮心の位置が同じであり、かつその大きさが同じ場合に、人はその場にとどまることができる。つまり浮くことができるのである。しかしながら、人の体の重心と浮心の位置関係は、体を伸ばした状態においては同じ位置になく、浮心が重心に比べて頭側に数センチずれている。この数センチのズレによって、人の体は足が沈む方向に回転する(図

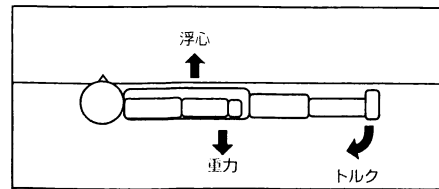


図1：体にかかる浮力と重力の関係

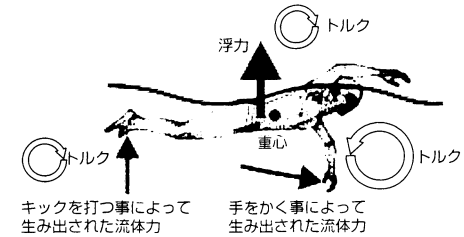


図2：クロール遊泳中に身体に作用する力とそれらが生む身体重心まわりのモーメント (Yanai T. Rotational effect of buoyancy in frontcrawl: Does it really cause the legs to sink? J Biomech. 34: 235-243. 2001.より改変引用)

1)。つまり、体を伸ばした状態で浮いていると、足から沈んでくる。クロール泳中の浮力と重力の関係についてYanaiは研究しており、その研究において、泳者はリカバリー（手をかき終えてから空中に出て入水するまで）のときには手、腕、肩、および頭の一部を空中に出しており、浮心が重心より足側に位置することとなる。つまり、浮心と重心の作用によって、足が浮く効果を得られることを報告している。また、泳いでいる人の体に作用している浮くことに関する力は、浮力と重力だけではなく、手と腕をかくことと、キックを打つことによって得られる流体力も関与していることを報告している。腕をかくことと、キックを打つことは、推進力を得るために行っている動作と思われるが、腕をかくことによって得られる流体力は足を沈める効果を生み出し、キックによって得られる流体力は足を浮かせる効果を生み出すことが報告されている(1)。人は泳いでいる時に、腕をかくことによって生み出される足が沈む効果を、浮力の作用とキックの足を浮かせる効果によって打ち消すことによって、水平位置を保ったまま泳ぐことができると考えられている(図2)。

人が水にただ浮いているだけでも、様々な力が複雑に作用している。人は頭で考えてそれらの力を調節しているのではなく、今まで経験した感覚をもとに、無意識のうちにそれらの力の調整を行いうまく浮くことができているのである。人の運動制御がいかに素晴らしいものであるかが改めて感心させられるものである。【松田 有司】

### ■参考図書

金子公寿、福永哲夫編。バイオメカニクス。杏林書院、2004。

### ■引用文献

- (1) Yanai T. Rotational effect of buoyancy in frontcrawl: Does it really cause the legs to sink? J Biomech. 34: 235-243. 2001.

## セカセカ泳ぐか、スイスイと泳ぐか

北京オリンピック競泳競技において日本チームは金メダル2個、銅メダル3個を獲得する好成績を取めた。なんといってもその主役は、2大会連続金メダルを獲得した北島康介選手であることは間違いのないであろう。200m平泳ぎは2位に1.24秒もの大差をつけての優勝であり、100m平泳ぎにおいては58.91秒の世界新記録達成での優勝であった。北島選手の泳ぎは、大きなストロークが特徴である。他の選手に比べ、1かき1かきの時間がゆっくりにあり、スイスイと雄大な泳ぎであり、その泳ぎに芸術性すら感じずにはいられない。スイスイと雄大な泳ぎで泳ぐことによって、すべてのスイマーが北島選手のように速く泳ぐことができるのであろうか？

ストロークを1分間あたりに何回行っているのかを表した指標をストローク頻度という。また、1かきでどれだけの距離を進んだかをストローク長という。スイスイという泳ぎはストローク頻度が低く、ストローク長が大きい泳ぎであるといえる。泳速度はストローク頻度とストローク長の積であらわされる。北島選手のようなスイスイと泳ぐ泳ぎは、ストローク頻度は低いが、ストローク長が大きいので、大きな泳速度を発揮することができる。また、セカセカと腕をまわす泳ぎ、つまりストロ

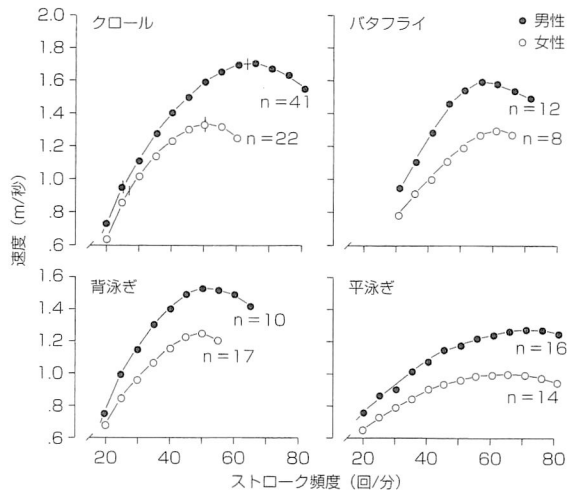


図1 泳速度とストローク頻度の関係 (Craig AB Jr, Pendergast DR. Relationships of stroke rate, distance per stroke, and velocity in competitive swimming. Med Sci Sports, 11: 278-283, 1979.より改変引用)

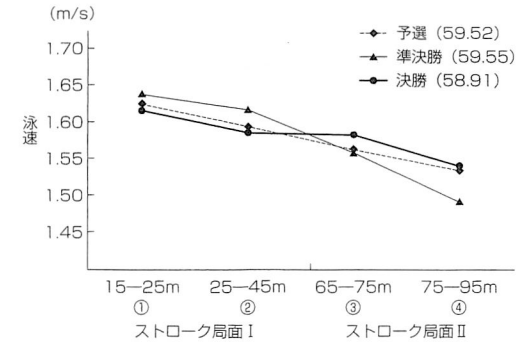


図2 各ストローク局面の平均泳速度 (岩原文彦. レース分析から見える泳法分析とその改善. バイオメカニクス研究, 13: 24-30, 2009.)

ーク頻度を高い泳ぎをすることによっても当然泳速度を向上させることができる。どちらの方が競技力の高い泳ぎであるか、このことについては明らかにされていない。これまでの研究でわかっていることは、各個人に適した泳ぎが存在し、その泳ぎをすることが必要であるということである。Craigらは、個人のストローク頻度とストローク長の関係において最適の関係が存在し、その関係を崩した状態で泳ぐと泳速度が低下してしまうことを報告している (1) (図1)。つまり、セカセカと泳ぐ泳者がスイスイと泳ぐと、泳速度が低下して競技記録が悪くなるのである。実際の例として北島選手は北京オリンピックにおいて、100m平泳ぎ準決勝の前半50mのストローク数を19回で泳ぎ、決勝において前半50mのストローク数を16回で泳いだ。準決勝の記録は決勝の記録に比べて0.61秒も遅いものであった。これは、準決勝において、レース前半にストローク頻度を高くし、自身の泳ぎとは異なる効率の悪い泳ぎをしてしまったために、その影響が疲労となり後半の泳速度の大きな低下を招いたのではないかと考えられている (2) (図2)。オリンピック優勝者においても、泳ぎのリズムを崩すことがあり、自身の最大のパフォーマンスを発揮することができないということは驚きであり、レースにおいていかに自身の泳ぎのリズムをコントロールすることが難しいかを物語っている。

競技記録を向上させるためには、セカセカ泳ぐか、スイスイと泳ぐかは問題ではなく、個人に適したストローク長、ストローク頻度でレースを行うことが必要であるといえる。普段の練習から自身のストロークのタイプを熟知し、それをレースで再現することが好記録を出すためには必要であろう。しかし、実際のレースにおいて、普段どおりの泳ぎでレースをすることは非常に困難であり、技だけではなく、心の鍛錬も重ねて必要であるといえよう。

[松田 有司]

### 引用文献

- (1) Craig AB Jr, Pendergast DR. Relationships of stroke rate, distance per stroke, and velocity in competitive swimming. Med Sci Sports, 11: 278-283, 1979.
- (2) 岩原文彦. レース分析から見える泳法分析とその改善. バイオメカニクス研究, 13: 24-30, 2009.

# 無駄なく手をかく

「クロールの時の手のかき方は、S字を描くようにするのよ。」「いやいや、手は後方にまっすぐにかいたほうが速く泳げるって教えてもらったよ。」このような会話のように、どうすれば速く泳げるようになるのかを考えた時に、泳者はついついどのように手をかければ大きな推進力を得られるか？ということに注意が偏りがちになる。これは、速く泳ぐためには、大きな推進力を得ることが貢献しており、泳いでいる時にその必要性を直接的に体で感じることができるからであろう。しかしながら、大きな推進力を得るだけで速く泳げるかといえば、そうではない。例えば手のかきのタイミングをよくすることも速く泳ぐための重要な課題の1つといえる。近年クロールの手のかきのタイミングが定量化され、手のかきのタイミングをどのように変化させることで、速度を大きくすることができるのか、また速く泳ぐことができる泳者はどのような手のかきのタイミングをしているのかが明らかになってきた。キーワードとなるのは、無駄なく手をかくことである。

泳者はクロールで泳ぐ際に、左右の手と腕を交互に動かし、推進力を得ている。腕のかきは4つのフェーズに分類され、それぞれentry and catch フェーズ（手が入水して後方にかきはじめるまで）、pull フェーズ（手が後方にかき始めてから、手かきの垂直下にくるまで）、push フェーズ（手が肩の垂直下にきてから、出水するまで）、およびrecovery フェーズ（手が出水してから入水するまで）と定義される。pull と push フェーズは手が推進力を得ている期間と、entry and catch と recovery フェーズは推進力を得ていない期間と定義される。Cholletらはこれらのフェーズ分けを用い、1ストローク中に推進力を得ている期間、もしくは推進力を得ていない期間か

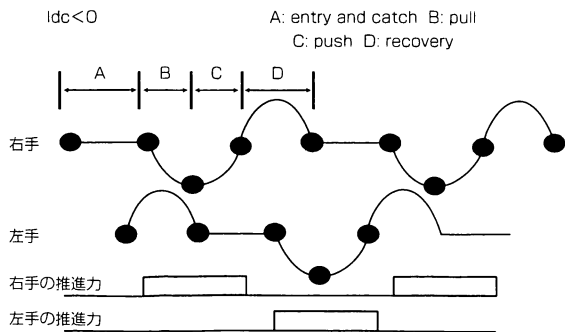


図1: Idcの概念図 (Idcが負の場合)

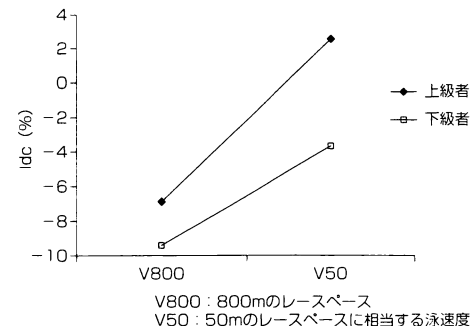


図2: 50mと800mにおける上級者と下級者のIdc (Chollet D et al. A new index of coordination for the crawl: Description and usefulness. Int J Sports Med. 21: 54-59, 2000.より改変引用)

の程度存在するかを解明するために、Idc (Index of coordination) という指標を開発した (1)。Idcが0を示すときは、一方の手がかき終わると同時に他方の手をかき始めることを意味する。Idcが負の値を示すときは、一方の手がかき終わってから、しばらく推進力を得ていない期間が存在したのち、他方の手をかき始めることを意味する (図1)。Idcが正の値を示すときは、一方の手がかき終わる前に他方の手をかき始めることを意味する。例えば上級者は、遅い速度で泳ぐ時にはIdcは負の値を示し、速度をあげていくにつれてIdcが正の値を示すようになる (図2)。泳者は推進力の大きさだけでなく、手のかきのタイミングを制御することで、速度を調節しているのである。高い泳速度を発揮するためには、推進力を得ていない期間を少なくする、つまり無駄なく手をかくことが重要であるといえる。

また、上級者と下級者のIdcを比較した結果、上級者が下級者に比べて大きなIdcを示すことも報告されている (図2)。上級者は良い手のかきのタイミングをすることによって、高い泳速度を発揮できていたといえよう。世界トップ選手の柴田亜衣選手 (アテネオリンピック800m自由形金メダリスト)、L・マナドウ選手 (アテネオリンピック400m自由形金メダリスト)、および佐藤久佳選手 (北京オリンピック日本代表) が、一方の手がかき終わる前に他方の手をかき始めている動作をしていることも報告されている (2)。速く泳ぐためには、大きな推進力を生み出す為の動作を行うことも重要であるが、無駄を少なくする運動制御を行うことも重要な課題の1つであるといえよう。 [松田 有司]

■引用文献

- (1) Chollet D et al. A new index of coordination for the crawl: Description and usefulness. Int J Sports Med. 21: 54-59, 2000.
- (2) 野口智博. The technical focus 佐藤久佳のクロール. Swimming Magazine. (2) : 17-21, 2008.

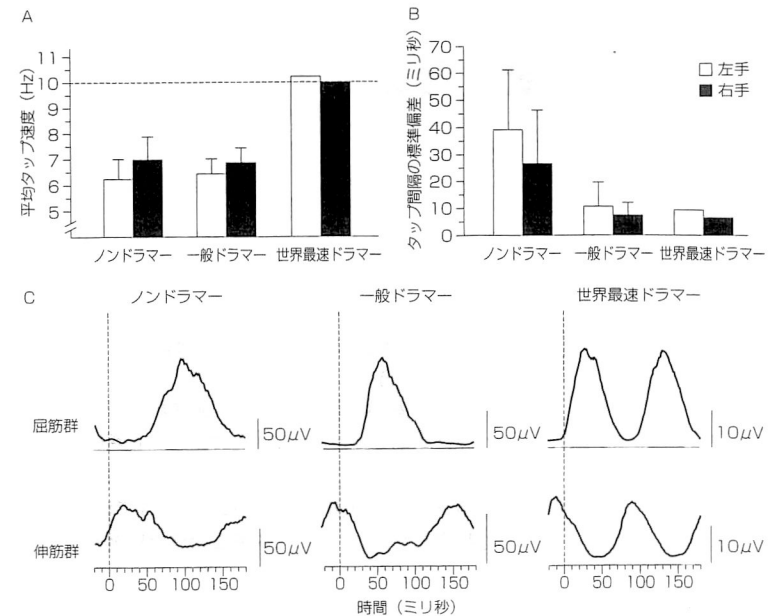
## 世界最速ドラマーの筋活動

2009年世界陸上ベルリン大会男子100m競技。ジャマイカのウサイン・ボルト選手が9秒58という驚くべき記録で“世界最速の男”となったのは記憶に新しい。スポーツの世界だけでなく、音楽の世界にも“世界最速”を決定する国際大会が存在する。それが世界最速のドラマーを決定する、その名の通りの「世界最速ドラマーコンテスト」である。大会参加者は両手にスティックを持ち、60秒間に両手でできるだけ多くの回数ドラムを叩くことを要求される。あなたなら60秒間に何回くらい叩けるだろうか？実際にこの大会に参加したと思って、試してみたい。

この世界最速ドラマーコンテストの2006年大会の優勝者の名は“マイク・マンジーニ”。彼はエクストリームというアメリカのハードロックバンドのドラマーとして活躍した後、現在も精力的に活動しながら、ボストンのパークリー音楽院の准教授として後進の指導も行っている有名ドラマーである。彼はなんと、60秒間に両手で1,247回叩くという世界記録を持っている。これは片手あたり1秒間に10回（両手で20回）叩くことを60秒間続けることに相当する。実際にこの動作を想像してみると、いかにすばやい動作かがよくわかる。では、世界最速ドラマーはどのような筋肉の使い方を、この信じられないほどすばやいパフォーマンスを実現しているのだろうか？またこのすばやい速度下であっても、安定したタイミングで叩いているのだろうか？世界最速ドラマーコンテストでは60秒間のタップ回数しか測定されていない。そこで著者らは、世界最速ドラマーが来日した際に実験協力の承諾を得て、実際にその手首の筋肉の活動パターンとタップタイミングの安定性を測定した。ここではこの最新の研究成果についてご紹介しよう(1)。

われわれは研究を遂行するにあたり2つの仮説を立てた。1つ目の仮説は「世界最速ドラマーは、手首の筋肉を力ませた状態で叩いている。そしてスピードは速いがタイミングはバラバラに叩いている。」という仮説である。2つ目の仮説は、「世界最速ドラマーは、手首の筋肉をリラックスさせた状態で叩いている。そして世界最速スピード下でも安定したタイミングで叩いている。」という仮説である。この2つの仮説のどちらが正しいかを検証するため、世界最速ドラマーに「10秒間にできるだけすばやく片手で叩く」という片手最速ドラミング課題を行ってもらい、課題中のタップ速度、タップタイミングのばらつき、そして手首筋活動を測定した。また比較対象のために、非ドラム奏者と一般ドラム奏者のデータも測定した。

実験の結果として、世界最速ドラマーはこの片手最速ドラミング課題でも驚くべきことに10Hz（1秒間に10回のタップ）速度を実現していた(図A)。そして、世界最速ドラマーのタップ間隔はノンドラマーに比べて非常に安定しており、一般ドラマーと同程度の値であった(図B)。手首筋肉の活動パターンも解析したところ、世界最



図：ノンドラマー（23名）、一般ドラマー（44名）、および世界最速ドラマーの10秒間の平均タップ速度（A）およびタップ間隔の標準偏差（B）。標準偏差の値が小さいほどタップ間隔が安定している。（C）手首筋活動の典型例。タップの瞬間（0ミリ秒）を基準とした筋電図の加算平均波形が示されている（灰色は被験者内標準偏差）。世界最速ドラマーは、屈筋群と伸筋群が明確に交互収縮しており、同時収縮水準が極めて低い。（Fujii S et al. Tapping performance and underlying wrist muscle activity of non-drummers, drummers, and the world's fastest drummer. *Neurosci Lett.* 459: 69-73, 2009. より改変引用）

速ドラマーは手首を曲げる筋肉と伸ばす筋肉の同時収縮水準が低く、手首の筋肉がリラックスした状態であることがわかり(図C)、これらの実験結果は第2の仮説を支持するものであった。

そういえば陸上競技の世界でも、世界最速のパフォーマンスを発揮する選手は力が抜けてリラックスしており、走っている最中は顔がブルブルと揺れると聞いたことがある。世界最速のパフォーマンスを発揮するには、力むのではなくリラックスすることが重要になってくるのだろう。

[藤井 進也]

### 引用文献

- (1) Fujii S et al. Tapping performance and underlying wrist muscle activity of non-drummers, drummers, and the world's fastest drummer. *Neurosci Lett.* 459: 69-73, 2009.

## 眼で聴く音楽

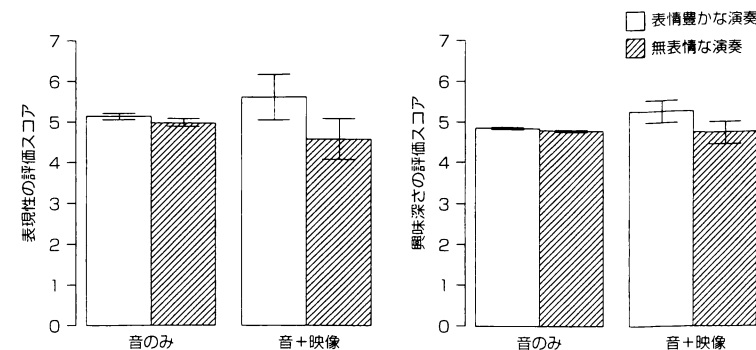
「音楽は音による芸術だ」といわれることがある。音がわれわれの耳を通して知覚認知されるとすると、「音楽は耳で聴くものだ」と考えるのは当然のことであろう。ところが、プロドラマーのつのだ☆ひろ氏はとある雑誌のインタビューで「音楽は耳で聴くよりも、眼で観るものだ」と語っている。音楽を耳で聴くよりも眼で観るとは一体どういうことであろうか。

近年の音楽知覚認知研究は、演奏者の身体の動きを眼で観ることが音楽の演奏評価に及ぼす影響について研究している。BroughtonとStevensは、ある1人のプロのマリンバ奏者に対して、1つの楽曲を「無表情な演奏 (deadpan条件)」と「表情豊かな演奏 (projected条件)」の2つの条件で演奏させ、録音すると同時にその演奏動作を撮影した(1)。そして録音した音だけを一般の人々に聴かせ、2つの演奏のうちどちらの表現性 (expressivity) が高いか、また興味深いか (interest) を評価させた。すると、音を聴かせただけでは「無表情な演奏」と「表情豊かな演奏」の2つの演奏評価の間に明確な差がみられなかったのに対し、音と映像の両方を見せて評価させると、「表情豊かな演奏」は圧倒的に「無表情な演奏」よりも高い評価を得ていたという(図)。この実験結果は、音楽家の身体の動きを眼で観ることが聴衆の演奏評価に多大なる影響を与えることを如実に示している。耳で聴いただけでは演奏の印象に差がなかったとしても、眼で観ると大きく演奏の印象が違ってくるということがあるのだ。

またDahlとFribergは、プロのマリンバ奏者が「喜び」「悲しみ」「怒り」「恐怖」など複数の感情表現で演奏を行っている様子を撮影し、一般の人々に対して、演奏音は聴かせずその映像だけを見せて、マリンバ奏者がどのような感情表現をしているのかを判別させた(2)。するとマリンバ奏者の身体の動きだけでも、「喜び」「悲しみ」「怒り」などの感情表現を判別可能だったという。(ちなみに「恐怖」についてはあまり正しく判別できなかったらしい。)すなわち、眼で観た情報だけでも、音楽家の感情表現はある程度他者に伝わっているといえる。

これらの研究結果を知って、眼で演奏者の身体の動きを見ることが、いかに音楽にとって大切なものであるかを改めて考えさせられた。映像メディアとともに音楽を鑑賞したり、ライブコンサートに足を運んで生の音楽を楽しんだりしていると、眼で観ることが音楽に多大なる影響を与えていることを確かに実感することができる。ヘッドホンだけでは得られない感動が確かにそこにあるのだ。

またミュージシャンは音楽だけではなく、ファッションやメイクなどにもこだわりを持っている。それらは音楽が登場した時代を超えて、たくさんの人々に影響を与え社会現象にまで発展することがある。身体の動きではないが、自身のスタイルを提することにより、音楽の印象が全く変わるということもあり得るだろう。



図：音のみに基づいた演奏評価と、音+映像に基づいた演奏評価 (Broughton M, Stevens K. Music, movement, and marimba: an investigation of the role of movement and gesture in communicating musical expression to an audience. *Psychology of Music*, 37: 137-153, 2009. より改変引用)。  
左は表現性 (expressivity) の評価スコア、右は興味深さ (interest) の評価スコアを表す。白バーは表情豊かな演奏 (Projected) 条件、斜線バーは無表情な演奏 (Deadpan) 条件を表す。音のみでは2つの演奏評価に差が見られないが、映像が加わると2つの演奏評価に顕著な差がみられる。

音楽演奏者の立場からすると、音楽の音の部分だけではなく、身体の動きや音楽を提示するスタイルなど、眼で見える部分についても常に意識しなくてはならない。「音楽は聴衆に聴かせるものであるだけでなく、見せる (魅せる) ものであるな」と改めて身体の動きの重要性を実感するのだ。

[藤井 進也]

### ■参考図書

重野 純. 音の世界の心理学. ナカニシヤ出版, 2003.

### ■引用文献

- (1) Broughton M, Stevens K. Music, movement, and marimba: an investigation of the role of movement and gesture in communicating musical expression to an audience. *Psychology of Music*, 37: 137-153, 2009.
- (2) Dahl S, Friberg A. Visual perception of expressiveness in musicians' body movements. *Music Perception*, 24: 433-454, 2007.



# 身体という楽器

もう少し高い声がかうまくできれば歌える曲のレパートリーが増えるのに…と、感じることはないだろうか。高い声を出すときは低い声を出すときと比べて、身体のとどの部位の動きがどのように異なるのであろうか。

歌うことは複雑な身体制御によって達成される運動の1つである。声を出すには、呼吸、声帯、声道の制御が必要であり、このうち声の高さの調節には呼吸と声帯がかかわっている。

声の高さは声帯の張力（弾性）と厚み（線密度）によってほとんどが決まり、その関係は弦の張力と音の高さの関係によく似ている。声帯をピンと張って薄く長い状態で息を流せば、周波数が大きくなるために高い声が出る。逆に、声帯を緩めて厚く短い状態で息を流せば周波数は小さくなり、低い声が出る。弦が長くなると伝搬速度が落ちるから振動数が小さくなって音は低くなるのではないか、という反論がありそうだが、これは引き伸ばされる長さよりも張力の影響の方が大きいのである。詳しく知りたい方は参考図書にもある“音声生成の科学”を参照してほしい。ただし、実際の声帯はもっと複雑な動きをしていることを断わっておく。声帯の長さや発声周波数の関係を実際に調べた研究があり、図1が6人の話者の結果を示したものである（1）。声帯が引っ張られるにつれて発声周波数が上がっているのがよくわかる。そして、この声帯の張力を変化させているのは、声帯の周辺にある輪状甲状筋をはじめとした喉

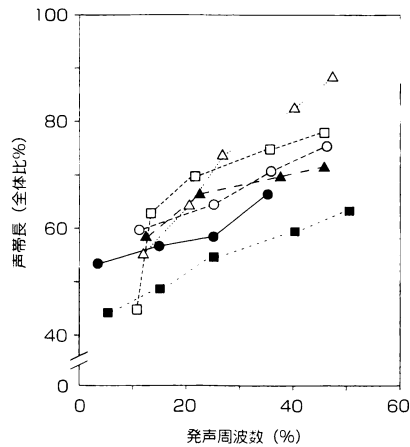
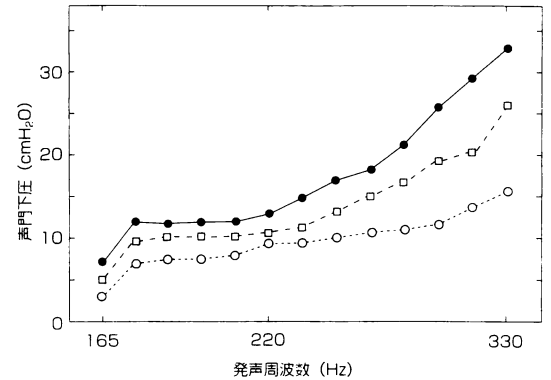


図1. さまざまな発声周波数において観察された声帯長。6人の話者の結果を示している。(Hollien H et al. Measurements of the vocal folds during changes in pitch. J Speech Hear Res. 3: 157-165. 1960より改変引用)

図2. テノール歌手が、E3からE4（約165～330 Hz）まで半音階で、弱く（○）、普通に（□）、強く（●）発声をしたときの声門下圧。  
Cleveland T. Sundberg J. Acoustic analysis of three male voices of different quality. STL-QPSR, 24: 27-38. 1983より改変引用)



頭筋群といわれる筋群であり、私たちの意思で制御できる運動と意思では制御できない反射がある。

呼吸は、声帯を弾くという役割を果たし、声門下圧と呼ばれる（声門は両側声帯の間の空間を指す。声門下圧は声門より下の空間の圧力のこと）。声門下圧が大きくなるということは弦を強く弾くことになり、声帯を引っ張る張力が上がるために、喉頭筋群の作用ほどではないが、音の高さが上がることになる。Clevelandら（2）は発声周波数と声門下圧との関係を調べるために、テノール歌手にミからミまでのオクターブを半音階ずつ発声させた。その結果の一部が図2であり、発声周波数が大きくなると声門下圧も大きくなることが明らかになった。声門下圧を制御することは呼吸を制御することであるが、歌声の高さを調節するためだけに、生まれてから現在までに慣れ親しんだ呼吸を意識的に制御するのはなかなか難しい。呼吸は肺の弾性を利用して行われており、また自律神経によっても制御されているため、自発的に制御しようと思うと、随意筋である呼吸補助筋（腹直筋、胸鎖乳突筋など）を頼ることになる。歌手は積極的に呼吸補助筋を使用することで呼吸を制御している。声帯、呼吸をうまく制御できるようになるとプロ歌手のように安定した音程で歌えるようになるであろう。

あるプロの指揮者が、「ひとの身体ほど素晴らしい楽器はない」といっている。声帯、声道、それらを制御する筋群、どれをとっても誰一人、同じ人はいない。そう、自分の身体という楽器は世界に1つしかない。こう考えると、この貴重な楽器を使って今すぐにでも歌ってみたいにならないだろうか。  
[鈴木 茉莉緒]

### ■参考図書

- ヨハン・スンドベリ著、榎原健一監訳、歌声の科学、東京電機大学出版局、2007。
- Titze IR 著、新美茂二監訳、音声生成の科学、医歯薬出版、2003。

### ■引用文献

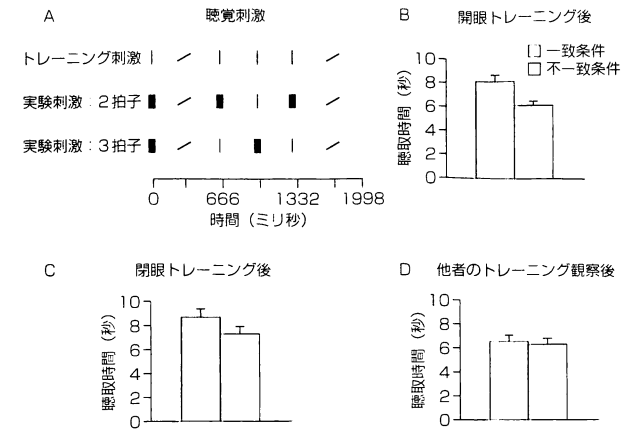
- (1) Hollien H et al. Measurements of the vocal folds during changes in pitch. J Speech Hear Res. 3: 157-165. 1960.
- (2) Cleveland T. Sundberg J. Acoustic analysis of three male voices of different quality. STL-QPSR, 24: 27-38. 1983.

## 身体の動きでリズムを感じる

太鼓のリズムに合わせ、弾けるように躍動する身体。獣のようなバネとうねりを持ち、その身体には、まるで何者かが宿ったようである。これは著者がアフリカ人の友人と一緒にアフリカンダンスを踊ったときの感想である。特に驚いたのは、「全く同じ音が鳴っているにもかかわらず、自分と彼とではリズムの聴こえ方が全く違うのではないか」と感じた点である。日本人でありながらマイケル・ジャクソンとも競演したダンサー、七類誠一郎氏はその著書「黒人リズム感の秘密」の中で、「黒人ならではのと思われているリズム感は、後天的に身につけることができる」と述べている。そして、この「黒人リズム感」を身につけるためには、ハトのように首を振る動きが重要であるという。

2005年Science誌に「ビートを感じる：身体の動きが赤ちゃんのリズム知覚に影響を与える」というタイトルの論文が発表され話題を呼んだ(1)。この論文の実験では、まず図Aの上段のような聴覚刺激を生後7カ月の赤ちゃんに聴いてもらい、リズム知覚のトレーニングを実施する。縦線で示されているのはスネアドラム音であり、斜線で示されているのはドタバタ喜劇で使われる打棒音である(実際の音をScienceウェブサイトで入手できるのでぜひ聴いてほしい)。赤ちゃんを2群に分けて、片方の群の赤ちゃんは2拍毎に身体をバウンスさせながら(お母さんが赤ちゃんを抱えて上下に揺らしながら)この音を聞く。もう片方の群の赤ちゃんは、3拍毎に身体をバウンスさせながらこの音を聞く。こうしてトレーニングを実施した後に、図Aの中段および下段のテスト聴覚刺激を赤ちゃんに聴いてもらう。中段の聴覚刺激は2拍毎にアクセントが置かれた2拍子のリズムであり、下段の聴覚刺激は3拍毎にアクセントが置かれた3拍子のリズムである。Phillips-SilverとTrainor(1)は、赤ちゃんが音源の方向に目を向けているときだけリズム音が鳴り続け、興味がなくなり頭をそらすと音が切れるような仕組みにより、トレーニング後の赤ちゃんが2つのリズムのうちどちらのリズムをより好んで聴取するかを測定した。その結果として、2拍毎にバウンスするトレーニングをした赤ちゃんは3拍子よりも2拍子のリズムを聴取する時間が長く、3拍子毎にバウンスするトレーニングをした赤ちゃんは2拍子よりも3拍子のリズムを聴取する時間が長かった(図B)。バウンストレーニング時に赤ちゃんに目隠しをさせても、この結果は変わらず観測された(図C)。しかしながら、他人がバウンスしている姿を赤ちゃんに眺めさせるトレーニングを実施しただけでは同様の結果は観測されなかった(図D)。これらの結果は、自分自身の身体が上下に揺れ動くことが、赤ちゃんのリズム知覚に大きく影響していることを示している。

Phillips-Silverはその後の研究で、同様の現象が大人でも見られたことを報告している(2, 3)。さらに興味深いことに、足などの身体を上下に揺らすだけではリズム



図：赤ちゃんのリズム知覚実験。(A) 聴覚刺激。(B) 眼を開けてバウンストレーニングした後のリズム聴取時間。(C) 目隠しをしてバウンストレーニングした後のリズム聴取時間。(D) 他人のバウンストレーニングを受動的に観察した後のリズム聴取時間。灰色バーはバウンストレーニング時の拍子と聴取実験時の拍子が一致している条件を表し、白バーは一致していない場合を表す(Phillips-Silver J, Trainor LJ. Feeling the beat: movement influences infant rhythm perception. Science, 308: 1430, 2005.より改変引用)。

知覚への影響が見られないのに対し、頭を上下に揺らした場合にはリズム知覚への影響が明確にみられ、前庭器官を外部から直接刺激するだけでも同様の結果が見られたという(3, 4)。すなわち、平衡感覚を司る前庭器官を刺激する運動は、ヒトのリズム知覚に大きく影響していると考えられる。

話は最初に戻るが、ハトのように首を振る動きは、前庭器官を刺激するには最適な身体の動きである。黒人リズム感の秘密は、前庭器官を刺激する身体の動きにあるのかもしれない。身体を揺らしながら今まで聴いていた音楽をもう一度聴き直してみよう。そうすれば、これまで聴こえてこなかった新しいリズムが聴こえてくるかもしれない。  
[藤井 進也]

### ■参考図書

七類誠一郎. 黒人リズム感の秘密. 郁朋社, 1999.

### ■引用文献

- Phillips-Silver J, Trainor LJ. Feeling the beat: movement influences infant rhythm perception. Science, 308: 1430, 2005.
- Phillips-Silver J, Trainor LJ. Hearing what the body feels: auditory encoding of rhythmic movement. Cognition, 105: 533-546, 2007.
- Phillips-Silver J, Trainor LJ. Vestibular influence on auditory metrical interpretation. Brain Cogn. 67: 94-102, 2008.
- Trainor LJ et al. The primal role of the vestibular system in determining musical rhythm. Cortex, 45: 35-43, 2009.

# 右手と左手はバラバラに動かせるか？

ショパンの代表作のひとつ、幻想即興曲をご存知だろうか。この曲の冒頭では、左手の伴奏が3つの音を弾く間に、右手のメロディは4つの音を弾かなくてはならない。3対4という割り切れない伴奏とメロディが絡まりあい、たたみかけるような激情を感じさせる名曲であるが、演奏者泣かせの難曲でもある(図1)。

では、このリズムを試してみよう。ここでは単純にするために、両手を机の上に置き、人差し指だけを使って机をトントンとタップすることでリズムを作ることとする。左人差し指で3つタップする間に、右人差し指で4つタップしてみよう。左の3つは等間隔、右の4つも等間隔。そして、左の1、2、3、1、2、3…と右の1、2、3、4、1、2、3、4…のうち両方の1のタップが必ず同時でなくてはならない。さて、できたでしょうか？ あなたが熟練した鍵盤楽器や打楽器の演奏者でない限り、あなたの右手と左手は混迷を深めるばかりだったことだろう。このように1サイクルの中で左手と右手が異なる数のタップを刻むリズムのことを、ポリリズムという。上の例は、3:4のポリリズムである。

ヒトが左右の手を使ってリズムを刻むとき最も安定しているのは、左右を同時にタップする1:1のリズムと、左右が互いにちょうど半拍ずれた交互タップである(1)。互いに割り切れないタップ数のポリリズムを左右の手で安定して行うことは困難で、多くの人はいずれかの手に反対の手が引きずられて、意図せず同時か交互のタップに切りかわってしまう。

それでは、この呪縛を解いてポリリズムを刻めるようになるには、どのような練習が有効なのだろうか。Summersらは、被験者に5:3のポリリズムを2種類の方法で練習させ、その成果を研究している(2)。練習には、1サイクルの間に右の5回と左の3回で異なる音を出す特殊なメトロノームが使われた。被験者の半分は、メトロノームの右または左の音に合わせて片手ずつ練習を行った。残りの半分は、両手を使い5:1と1:3のリズムでサイクルの頭のみ両手でタップする練習を行った。結果は歴然。両手練習をしたグループが全員曲がりなりにポリリズムをタップできるようになったのに対し、片手練習のグループでは、鍵盤楽器の未経験者は誰ひとりポリリズムをタップすることができなかった。つまり、片手練習はポリリズムの習得には無効ということである。

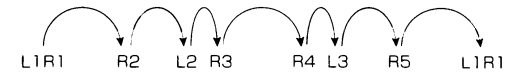
ポリリズムを正確に刻む鍵盤楽器奏者は、左右の手を独立して動かしているように見える。しかし実際には、速くタップするほうの手に注意を向けつつ、その間の適切なタイミングに遅いほうの手のタップをはさみこむことでポリリズムを作っている。だから、片手ではなく両手で練習しなくてはならないのだ(図2)。

もし左右の手がバラバラに脳から制御されているなら、片手練習は有効なはずだ。



図1 ショパン作曲 幻想即興曲 冒頭部

(1) 連鎖的制御



(2) 階層的制御



(3) 平行的制御



このポリリズムを刻むための3種類の戦略。2:3など、単な比のポリリズムでは、左右のタップを同時に揃って順番に並べる制御(1)が利用され、3:4など高い比のポリリズムでは、速いほうを基準にしてその間に遅い方のタップをはさみこむ制御(2)が利用される。左右をばらばらにコントロールする制御(3)は、ごく限られた非常にハイレベルのピアニストのみで見られたとの報告がある。(Summers J. Practice and training in bimanual coordination tasks: strategies and constraints. Brain Cogn. 48: 166-178. 2002より改変引用)

しかし、実際には左右の手はひとつの中核で制御されている。この制約のため左右をバラバラに独立して動かすことは不可能だが、だからこそ左右を協調させた動作が可能となる。そして日常生活の中では左右の独立性より左右の協調性が重要となる場面が多いことは想像に難くない。

ヒトに備わった左右の協調のしくみ、そしてその制約を超えようとする芸術の挑戦。次に幻想即興曲を聴かれるときには、そのせめぎあいを思い浮かべてみてはいかがだろうか。 [横山 慶一]

■引用文献

- (1) Yamanishi J et al. Two coupled oscillators as a model for the coordinated finger tapping by both hands. Biol Cybern. 37: 219-225. 1980.
- (2) Summers JJ, Kennedy TM. Strategies in the production of a 5:3 polyrhythm. Hum Mov Sci. 11: 101-112. 1992.

## 歩行のためのパターン発生器

歩行や走行といった移動するために行われる運動（ロコモーション）は動物にとって最も基本的で重要な運動であり、高度に組織化されている。脊髄を胸椎レベルで切断したネコの後ろ脚には、もはや脳からの指令は届かない。しかしこの脊髄ネコは、トレッドミル上を歩行することができ、後ろ脚は切断される前と同様の周期的な筋活動パターンを示す。周期的な筋活動パターンは、脊髄後根からの感覚入力を絶ったとしても発生することから、脊髄内に周期的な筋活動を出力する中枢パターン発生器（Central Pattern Generator: CPG。CPGに関しては脳百話でも触れられているので合わせて参照されたい）があると考えられている。

CPGは1つだけ存在してそれが左右交互に活動する筋活動を生成しているというわけではなく、どうやら左右の脚をそれぞれ担当するパターン発生器が存在して、それらが互いに協調して歩行様の筋活動パターンを生成しているらしいということが、ネコ・カメ・ウナギといった動物実験から明らかになってきた。次なる疑問はもちろん、意識的な制御の占める割合が大きくなっているだろうヒトにおいても、これらの動物と同様の左右別々のパターン発生器があるのか、という点である。

これを確かめるべく、Yangら（1）は生後5カ月～11カ月の45人もの幼児に実験室のトレッドミルの上に乗ってもらった。まだ四つん這いでしか歩けない幼児であっても、大人が腰あるいは脇を支えてあげて足をトレッドミル上に乗せると、トレッドミルの動きに合わせて歩いているかのような足の動きを見せる（これは原始歩行として知られている）。Yangの研究室のトレッドミルは少し特別で、2枚のベルトから構成されており、左足の下ベルトと右足の下ベルトをもし1つだけあるCPGが左右交互のパターンを生成しているのなら、2枚のベルトが同じスピードで動いた際には対応できても、2:1、3:1というように異なるスピードで動いた際にはどちらかベルトのスピードに固定された筋活動しか生成できない。ところが実際に観察されたのは、左足で1回ステップする間に右足で2回あるいは3回ステップするという、ベルトのスピードに依存した左右非対称な原始歩行であった（図1）。驚くべきことに幼児は、左右のスピードが異なる条件だけでなく、左右のベルトが逆方向に回転する（左のベルトが後ろ回りをしながら右のベルトが前に回る）という条件においても、器用な歩行様の足の運動を示した。

これらの結果は、生まれながらにして、左右の足を制御するパターン生成器が別々に存在することを示唆している。また、速いベルトにのった足のステップに要した時間は全て同じというわけではなく、遅いベルトにのった足が遊脚期にある際のステップだけ、ステップに要する時間が長くなっていた（図2）。そしてそのステップ時間の延長は遊脚期の延長によるものであった。この結果は、速い方の足のリズムが遅い

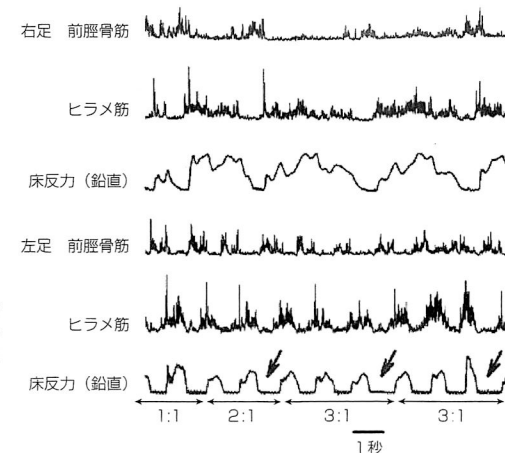


図1: 右足と左足が別々の速度で動くときの筋電図活動。(Yang JF et al. Split-belt treadmill stepping in infants suggests autonomous pattern generators for the left and right leg in humans. J Neurosci, 25: 6869-6876, 2005. より引用)

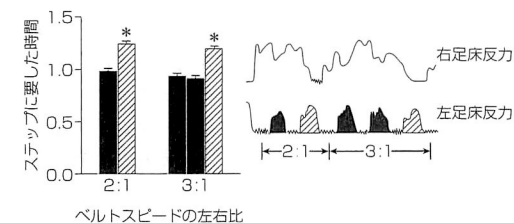


図2: 左足のステップに要する時間は、右足が遊脚期に当たる時(斜線)の方が、右足が立脚期に当たる時(黒)より長い。(Yang JF et al. Split-belt treadmill stepping in infants suggests autonomous pattern generators for the left and right leg in humans. J Neurosci, 25: 6869-6876, 2005. より引用)

方の足のリズムに引き込まれてしまっていることを示している。こういった互いに影響し合う左右の足を担当するCPGの存在が、つまずいたり滑ったりしたときに、どちらかの足のリズムをリセットしたり一時的に変更したりすることによる姿勢制御を可能にしているのだろう。

様々な感覚入力はどのようにCPGの働きに貢献しているのか、脊髄より上位に存在する脳はこのCPGをどのように乗りこなしているのか、外乱が加わった際にCPGはどのような対応を示すのか、CPGの利用は脊髄損傷患者のリハビリに活路を開くのか、などなど興味はつきないが、ひとまずは決して快適とはいえない反射マーカ―と筋電図を装着しながらこの困難なタスクをこなし、われわれに貴重な示唆を与えるデータを提供してくれた赤ちゃんたちに拍手を送りたい。 [進矢 正宏]

### ■参考文献

- (1) Yang JF et al. Split-belt treadmill stepping in infants suggests autonomous pattern generators for the left and right leg in humans. J Neurosci, 25: 6869-6876, 2005.

## 呼吸のリズムと動きのリズム、 切っても切れない関係

小学校の頃の2kmのマラソン大会。著者は当時は運動の苦手なひ弱な少年だった。最後尾に取り残され、聞こえるのは自分の荒い息づかいだけ。スッスッ、ハッハッ、スッスッ、ハッハッ……そのとき著者はふと自分が4カウントで呼吸をし、その呼吸が足運びに同調していることに気づいたのである。

この現象は、著者が2kmの道行きに苦しんでいたまさにその時代、海の方こうで locomotor-respiratory coupling（移動動作と呼吸の同調）として研究されていた。鳥の羽ばたき、犬や馬の駆け足、カンガルーのホップ、ヒトにおいては歩行・ランニング・ボート漕ぎ・自転車漕ぎ・車椅子漕ぎにいたるまで、サイクル的な移動動作と呼吸の同調が動物に広く見られることが分かったのである。

マラソンのように長時間にわたって走り続ける選手の多くは、この現象をごく当たり前前に利用している。走行中の足運びのリズムに同調した各人の呼吸のリズムがあり、そのリズムは、それ以外のリズムで呼吸をした場合に比べて楽に感じるはずである。しかし研究者の間では、このような同調が起こる理由もまだはっきりと分かっていないのである。

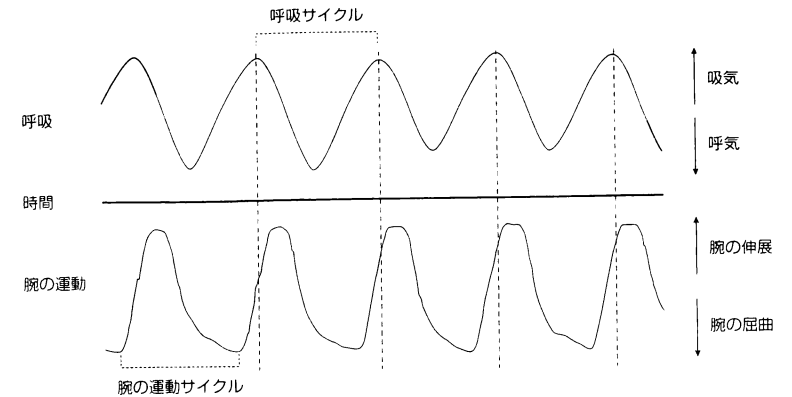
歩行や走行などのサイクル的な移動動作は、脊髄にある中枢パターン発生器（CPG: central pattern generator）によってコントロールされている(1)。CPGは多数の神経細胞のネットワークからできており、腕と脚の各筋肉に必要なタイミングでリズムカルに指令を送ることによって、移動動作のサイクルを達成している。おかげでわれわれは足の踏み出し方をいちいち考えなくても歩いたり走ったりできる。

一方、呼吸のリズムは、延髄にある呼吸リズム中枢で作られている。血中の酸素や二酸化炭素の濃度・肺の感覚神経など、全身からの情報をもとに、呼吸リズム中枢は最適リズムで呼吸筋を働かせ呼吸を行わせる。おかげでわれわれは呼吸のことを忘れても窒息することはないし、運動すれば呼吸は自然に速くなるのである。

この異なるリズムである移動動作と呼吸の同調について、ある研究者たちは、神経的な要因ではないかと考えている。歩いたり走ったりすると、足には着地の感覚や衝撃が左右交互に伝わる。このリズムカルな感覚が呼吸リズム中枢に伝わって呼吸を同調させるのではないかというのだ。

一方、物理的な問題だとする研究者もいる。四足歩行動物では、歩行の1サイクルの間に内臓が前後にピストンのように移動する。それにより肺や気管が押されたり引かれたりするので、それに呼吸リズムを合わせると呼吸の効率がよくなるというのである。直立して二足歩行するヒトで同様のピストン運動が起こるかどうかは議論の余地があるが、進化の名残と考えることもできるかもしれない。

それでは移動動作と呼吸が同調するのは、きつい運動を楽に行うためなのだろう



図：クロスカントリースキーヤーの呼吸曲線（上段）と腕の動き（下段）の同調。呼吸曲線は上が吸気、腕は上が伸展。(Fabre N et al. Neuro-mechanical and chemical influences on locomotor respiratory coupling in humans. *Respir Physiol Neurobiol.* 155: 128-136. 2007.より改変引用)

か。もしそうならば、運動がきつくなるほど同調が強くなり、起ころともよいはずである。ここにクロスカントリースキーヤーがポールをつく腕の動きとそのときの呼吸の同調を調べた研究がある(図)。これによると、手の動きが速くなると呼吸も速くなり、運動強度の上昇が確認できた。しかし、運動強度が上昇しても、同調が強くなることはなかった(2)。移動動作と呼吸の同調は、きつい運動を楽に行うためのしくみではなく、もっと根源的に身体に備わった現象であるらしい。そして、楽に感じる理由は別のところにあるようだ。

人と人にも目に見えないリズムがあるようで、リズムの合う相手と組んだ仕事は思いのほかはかどったりする。逆に2人のリズムが合わないと、同じ仕事がつらく長いものに感じることもある。移動動作と呼吸の関係もどこかそれに似ていないだろうか。2つのリズムを合わせて味方につければ、つらい運動も楽に感じられそうである。

[横山 慶一]

### ■引用文献

- (1) Dimitrijevic MR et al. Evidence for a spinal central pattern generator in humans. *Ann N Y Acad Sci.* 860: 360-376. 1998.
- (2) Fabre N et al. Neuro-mechanical and chemical influences on locomotor respiratory coupling in humans. *Respir Physiol Neurobiol.* 155: 128-136. 2007.

## 落とし穴に落ちたとき

昔を思い出して、あなたは今砂場において友達が作った落とし穴に引っかかった、という状況を想像しながら続きを読んでいただきたい。落とし穴に落ちた瞬間、穴の底まで落ちる前にきつとあなたは「やられた」と思うに違いない。しかしよく考えてみていただきたい。落とし穴に落ちた瞬間にそれに気づくということはどういうことなのか、不思議なことだとは思わないだろうか。

落とし穴について真面目に研究している人々がいる。落とし穴は歩行中の外乱の一種として研究されている。日常的に経験する外乱としては、頭を揺らされる、腰を押される、障害物につまずくといったものがある。押される、つまづくといった外乱であれば、皮膚感覚や固有感覚などの、直接的にその外乱を示す入力を得られる。ヒトの姿勢制御において、外乱に対する最もすばやい対応は、これらの直接的な感覚入力に対する反射である。たとえば、歩行中に膝関節を伸展させると、伸長反射が引き起こされ、膝関節を屈曲させる筋が活動する。腰を押された時や腕を引っ張られたときは、脊髓の介在ニューロンの働きによってもっと複雑な反射がおきる。

落とし穴はどうだろうか。穴に落ちた瞬間に、落ちたことを直接的に示す感覚入力は脊髓に入ってこない。直接的な感覚入力は底まで落ちて足を着いた瞬間に得られる(図B, 下)。実際に歩行中に6.5cmの段差を踏み外した時の筋電図のデータがあるので見ていただきたい(図A)。縦の実線は段差がなければ本来着地するはずだった瞬間で、点線は段差の底に着地した瞬間である。濃い線で示された波形が踏み外した際の筋電図で、縦の実線と点線の間、すなわち足がまだ空中にある段階で足先を下げる(足首を伸ばす)筋肉である腓腹筋・ヒラメ筋が活動していることが分かる(踏み外した瞬間から100ミリ秒以内で筋活動が始まる)。足先を上げる筋である前脛骨筋も着地と同時に活動を始めており、これも実際の着地の衝撃が引き起こした反射とは考えられない(着地の衝撃が筋活動を引き起こすにはもっとも早い単シナプス脊髓反射でも30ミリ秒以上はかかる!)。穴の底に落ちる前に何らかの筋活動が起きていたらそれは何を意味するのだろうか。研究者たちは、ヒトは着地の瞬間に得られるであろう感覚入力を予測しているのではないかと考えた(2)。そして予測された感覚入力と実際の感覚入力の差分を計算し(図B中)、その差分が閾値を超えた際にそれを外乱とみなしてバランスを回復するための筋活動を行う、というアイデアだ(1, 2)。しかもこの情報処理は大脳皮質を介しておらず(もし大脳皮質を介した反応ならば120ミリ秒以上は必要だろう)、脊髓や脳幹や小脳といった原始的な中枢神経系に自動的な姿勢制御機構があると想像される。

これらの筋活動はどのような意味をもつのだろうか。足首を伸ばす筋が働いて、その直後に足首を曲げる筋肉が働く、この活動パターンは高いところから着地する際に

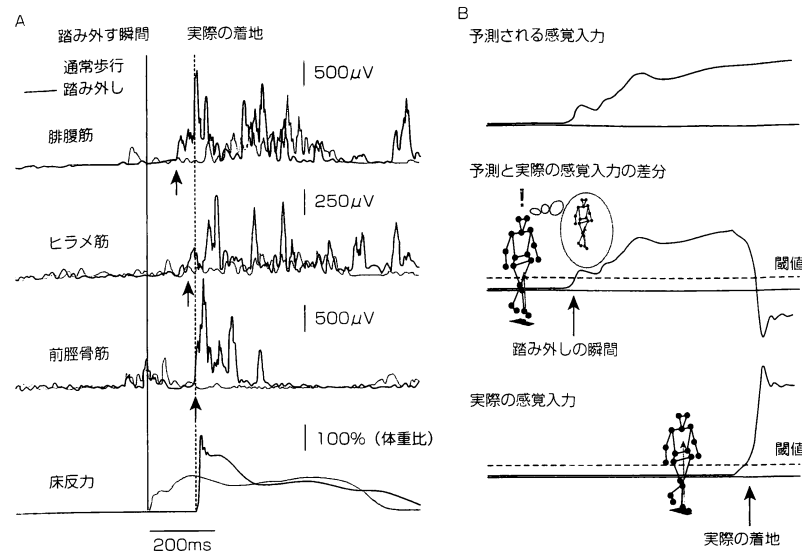


図 (Shinya M et al. Corrective postural responses evoked by completely unexpected loss of ground support during human walking. *Gait Posture*, 29: 483-487, 2009. より改変引用)

着地前に見られる活動パターンと非常に似ている(3)。着地するにはつま先から着地するわけだが、足首を伸ばす腓腹筋とヒラメ筋の活動はこの着地姿勢をとるために重要な役割を果たす。それに続く足首を曲げる前脛骨筋の活動は、足首を伸ばす筋肉の活動と併せて、足首を固定(完全に固めるという意味ではない)する役割を果たす。踏み外した際にも、足首を伸ばす筋と曲げる筋の両側を活動させて着地に伴う衝撃に負けない姿勢を作っているに違いない。何とよくできた素晴らしい姿勢制御ではないか。以上、世界一真面目に友人を落とし穴に落としてきた著者の独り言である。

[進矢 正宏]

### ■引用文献

- (1) Shinya M et al. Corrective postural responses evoked by completely unexpected loss of ground support during human walking. *Gait Posture*, 29: 483-487, 2009.
- (2) van der Linden MH et al. Muscle reflexes and synergies triggered by an unexpected support surface height during walking. *J Neurophysiol*, 97: 3639-3650, 2007.
- (3) Santello M. Review of motor control mechanisms underlying impact absorption from falls. *Gait Posture*, 21: 85-94, 2005.

## しなやかに歩いてみませんか

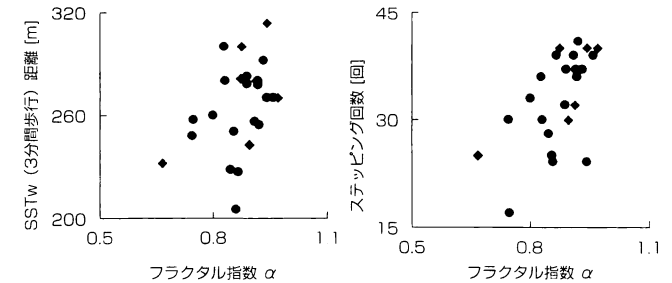
ピンピンコロリという言葉がある。ピンピンと元気で長生きし、周りも苦しめず自分も苦しまずコロリと亡くなりたいという意味だという。歳をとっても最期の瞬間まで自分の意志で自立した生活を送りたいと望まない人はいないだろう。そして、この自立した生活の鍵が歩行能力である。Shinkaiらは、日本のある町で6年間にわたり高齢者の生活動作能力の変化を追跡調査した。その結果、調査開始時点で歩行速度が遅かった高齢者ほど、6年後に洗顔・入浴・着替えといった生活動作の能力が低下していたことが分かった(1)。いまや、研究畑でも健康運動指導の現場でも、高齢者の歩行能力をどうやって維持するかが大きな関心事となっている。

老いは足から、といわれるように、加齢とともに下半身の筋肉量は低下していく。特に大腿の筋肉の萎縮が顕著である(2)。その結果、一歩一歩の歩幅も小さくなり、足も上がらないすり足歩行となる。また、不意のつまずきなどに対しすばやく踏みとどまることが困難になることから転倒の危険性が増大する。そこで、この筋量低下をくい止めることを目的に、高齢者に無理のない筋トレをしてもらおうという考え方が生まれ、最近では、デイサービスや入居型の高齢者施設で筋トレのマシンをよく見かけるようになった。

たしかに高齢者でも筋トレを行えば若齢者に匹敵する筋肥大の効果が得られる。それでは筋肉を増やせば十分かといえば、話はそう単純ではない。高齢者の運動教室を主宰しているトレーナーから聞いた話である。これまでその教室では筋トレに力を入れていたのだが、最近、「軽い負荷をできるだけ速く動かす」という運動を取り入れたのだという。すると、どうやらこのほうが参加者の運動能力を伸ばすのに効果が高いという感触を得たとのことである。重りを速く動かす能力は瞬発力であり、一気に筋肉を収縮させて力を発揮する能力であることから、神経の働きの影響が大きい。神経の働きがよくなることで、リズムカルに大きく一歩一歩を踏み出して歩けるようになるのかもしれない。ゆっくりと重りを上げ下げする筋トレでは、この神経の働きを十分に伸ばすことはできないのである。

さらに歩行にかかわる身体能力として、柔軟性やバランス能力も挙げられる。

木村らは、高齢者の体力測定データの詳細に検討し、安定した歩行に必要な身体能力を明らかにしている。6分間の歩行テストで安定性の高かった被験者は、開眼片足立ち・垂直跳び・ステッピング(注1)・チェアスタンド(注2)の成績がよかった(3)。開眼片足立ちはバランス能力、ステッピングは敏捷性を要する課題であり、垂直跳びやチェアスタンドは瞬発力を要する。つまり、安定した歩行には下半身の筋力だけでは不十分であり、バランス能力や敏捷性、さらには関節の柔軟性などの要素も必要となるのである(図)。



図：歩行の安定性の指標である $\alpha$ が高い高齢者ほど、3分間で歩行できた距離やステッピングの回数が高く、さまざまな身体能力が維持されている。●：女性 ◆：男性(木村みさかほか、Detrended Fluctuation Analysis (DFA) を用いて高齢者の歩調のゆらぎを測る(「しなやかさ・力強さ」指標から高齢者の歩行機能低下防止策を探る)。デサントスポーツ科学、29: 88-97、2008より改変引用)

もちろん従来の筋トレは効果がないというわけではない。負荷をかけて関節を動かすことで、実は筋力だけでなく関節の動きやすさも改善されるし、総合的な体力の向上にもつながる。だがそれだけでなく、日常生活の中で積極的に体を動かし、柔軟性やバランス能力・敏捷性などさまざまな体力要素をフルに活かして毎日を送ることが、歩行能力の維持に効果的といえるようだ。

そこで、あえて強さではなく、「しなやかさ」というキーワードを提案したい。強い木が風に折れてもしなやかな葦が生きのびるように、障害物や転倒の危険をかわして安定した歩調を続けられるような、そんなしなやかな歩みで末長く歩いてみませんか。 [横山 慶一]

### ■引用文献

- (1) Shinkai S et al. Walking speed as a good predictor for the onset of functional dependence in a Japanese rural community population. *Age Ageing*, 29: 441-446, 2000.
- (2) 山田陽介ほか。15～97歳日本人男女1006名における体肢筋量と筋量分布。 *体力科学*, 56: 461-472, 2007.
- (3) 木村みさかほか。Detrended Fluctuation Analysis (DFA) を用いて高齢者の歩調のゆらぎを測る(「しなやかさ・力強さ」指標から高齢者の歩行機能低下防止策を探る)。 *デサントスポーツ科学*, 29: 88-97, 2008.

(注1) 椅子に腰かけ、足元に30cm間隔で引かれた2本の線を踏まないように両足を開閉する課題。20秒間に反復できた回数を結果とする。

(注2) 高さ43cmの台に腰かけた状態から、両手を胸の前に組み、反動を使わずに立って座る動作を繰り返す課題。30秒間でできた回数を結果とする。

## 妊婦の歩き方はアヒルに似ている？

妊婦の歩き方といえば、どのような歩行をイメージするだろう？ 一般的には、お腹を突き出し、ガニ股で、よたよた歩くというようなイメージが強いようである。このような歩容（歩き方）は、しばしばアヒルや皇帝ペンギンなどに例えられる。医学用語に Waddling Gait（アヒル歩行）という言葉があり、ステッドマン医学大辞典によると、「体重を支える股関節が安定しない横揺れる歩行。立脚側の股関節は外側に突き出て、遊脚側の骨盤は下がり、交互する側方体幹運動になる。中殿筋の筋力低下による。筋ジストロフィーや他の疾患で見られる」と定義されている（図1）。その他、先天性股関節脱臼の患者にも見られる歩行だといわれている。このような疾患による歩行障害を、妊婦の歩行になぞらえる見解があり、そのイメージが一般的にいつそうデフォルメされているのかもしれない。

妊婦歩行に関する先行研究は少なく、最初に三次元動作解析装置を用いて詳細な分析を行ったのは Foti ら（1）である。彼らは15名の妊婦を対象に、妊娠後期と分娩後においてそれぞれ歩行分析を行い、妊娠中のほうが片脚支持期が短く両脚支持期が長いこと（図2）、歩隔が広いこと、股関節外転モーメントが増加すること、骨盤前傾角度が増すことを示した。しかしそれらの僅かな差異のほか、著明な 'Waddling Gait' の特徴は見られなかったとしている。体調が不安定となりがちな妊婦を対象に十分なデータを収集し、彼らが示した結果は貴重である。

妊婦は妊娠中10kg程度の体重増加があるといわれている。約40週という短期間に起こる体型変化は一目瞭然であり、新たな生命を宿しているという事実も加味され、「大変そう、動きづらそう」と考えるのは著者に限ったことではないであろう。実際妊婦の身体には劇的な変化が起こっているのである。リラクシンホルモンの増加は関節を弛緩させ、腹部の組織量の増加による重心の前方変位を補償するために、体幹を軽度後傾させ立位を保たなければならない。そのため約半数の妊婦が腰痛に悩むともいわれている。

そのような著明な身体変化が起こっている割には、歩行中の運動学および運動力学的な変化は僅かなのである。この点にヒトの運動適応能力の一端が表れているのではないだろうか。ヒトの二足歩行は、周期的で自動的な運動であるといわれているが、自身の内なる、あるいは外部環境の変化にある程度対応する能力が備わっている点が、ロボットの二足歩行と大きく異なる点である。加齢とともに身体機能が低下することは周知の事実であるが、筋力の衰えや関節可動域制限がある程度進行したとしても、歩ける高齢者は多く存在する。高齢者の歩行速度の低下（2）を歩行能力の低下と捉える考え方もあるが、身体機能が低下した分ゆっくり歩くことで安定性や安全性あるいは持久性を確保し、動作の質を上げていると考えることもできる。

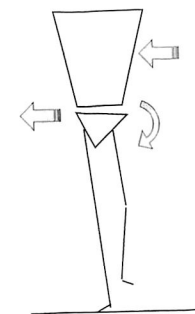


図1：Waddling Gait 模式図（ステッドマン医学大辞典編集委員会編、ステッドマン医学大辞典 改訂第5版、メジカルビュー社、2002.より青山作図）

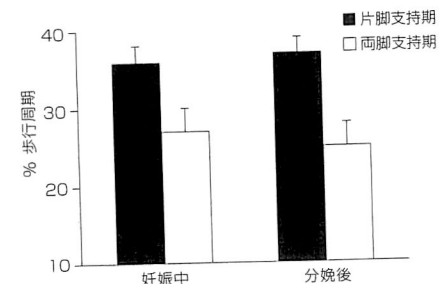


図2：一歩行周期における片脚・両脚支持期の割合。分娩後に比べ妊娠中のほうが片脚支持期が短く（ $p=0.019$ ）、両脚支持期が長い（ $p=0.020$ ）。(Foti A et al. A biomechanical analysis of gait during pregnancy. J Bone Joint Surg. 82: 625-632, 2000.より改変引用)

妊婦が全員、妊娠末期に歩けなくなるとすれば非常に不都合である。彼女たちも高齢者と同様に、歩行中のパラメータを少しずつ変化させることで、妊娠に応じた安定的な歩行をポジティブに行っていると考えられる。  
[青山 宏樹]

### ■参考図書

ステッドマン医学大辞典編集委員会編、ステッドマン医学大辞典 改訂第5版、メジカルビュー社、2002。  
灘本知憲、西川善之編、応用栄養学、化学同人、2003。

### ■引用文献

- (1) Foti A et al. A biomechanical analysis of gait during pregnancy. J Bone Joint Surg. 82: 625-632, 2000.
- (2) Murray MP et al. Walking patterns in healthy old men. J Gerontol. 24: 169-178, 1969.



## 高齢者の歩き方は効率的!?

最新の研究では、約700万年前の初期の人類がすでに直立二足歩行をしていたかもしれないという証拠が示されているが、現在のヒトの直立二足歩行は動物の様々な地上移動の中でも特に効率が良い、この歩行のエネルギー効率は、老化に伴って低下することが知られており、若者に比べて高齢者では15-40%エネルギー消費量が大きい(1-3)。しかし、高齢者が歩くときになぜエネルギー消費量が大きくなるのかについては、まさに議論の最中である。

高齢者は一般的に歩幅が広く、横方向の安定性が悪く、歩行中の横方向の動きのばらつきが大きい。横方向の不安定性はエネルギーコストを増大させることから、横方向にふらつくような歩行動作が動きの効率と関連している可能性が考えられる。ところが、2つの研究グループが下記に述べるような方法を用いて、高齢者の横方向の不安定性とエネルギーコストとの関連を調べているが両者で結論が全く異なっている。

トレッドミル上を歩くヒトの腰部に左右両方から伸縮性のひもを取り付け、左右方向の安定性を高めると、歩幅が減少し、同じ速度で歩いてもエネルギー消費量が低くなる。この装置を用いると高齢者でエネルギー消費量が小さくなることから、左右不安定性の増大が、高齢者のエネルギー効率低下の一因だとDeanらは指摘している(2)。一方で、Ortegaらは、この装置を用いた場合のエネルギー消費量の減少量は、若齢者でも高齢者でも全く同じであることから、加齢による歩行中のエネルギー効率低下の原因に左右方向の不安定性はあまり関係がないと結論づけている(3)。この左右方向の不安定性については、歩幅や歩幅変動の影響が大きいため、このあたりの影響を十分に加味した実験が必要とされる。

歩行中は身体重心が振り子状の運動をするが、このときに生じる力学的エネルギーと位置エネルギーの変換効率が悪くしたら、老化で変化するのかもしれない。しかし、下肢が重心に対して成す力学的な仕事効率は、若齢者と高齢者で差異がないばかりか、むしろ同じ歩行速度では高齢者が高かった(3)。つまり、単純な力学的な仕事効率を調べてみても、高齢者歩行のエネルギー効率低下の理由を説明できないのである。

Mianら(1)は、歩行中の大腿直筋と大腿二頭筋の筋活動を筋電図(EMG)で調べ、両筋の活動が同じ瞬間に起こる共収縮の時間割合が高齢者で長いことがエネルギー消費量を高めている可能性があることを報告している。高齢者では、本人も驚くほど、片脚立ちの能力が低下するため、片脚立ち中の体重心のバランスを維持するために、共収縮を起こして関節のスティッフネスを高めることが必要であると考えられる。

高齢者の腰背部の関節可動域がエネルギー消費量に影響を与えている可能性も考えられる。腰背部の伸展角度制限により、股関節伸展角度が十分に伸びない状態であ

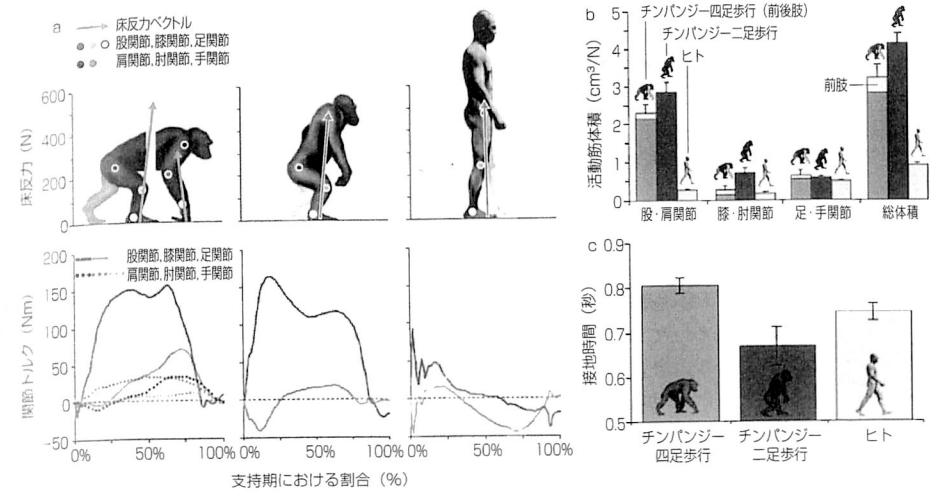


図1 チンパンジー(ナックルウォークと二足歩行)とヒトの歩行動作比較。(a) 床反力ベクトルと関節トルク。トルクの正は屈曲トルクを示し、負は伸展トルクを示す。チンパンジーでは二足歩行であっても股関節トルクが非常に大きい。(b) 歩行時における単位体重あたりの推定活動筋体積。(c) 歩行時の平均接地時間。(Sockol MD et al. Chimpanzee locomotor energetics and the origin of human bipedalism. PNAS, 104: 12265-12269, 2007.より引用)

ば、片脚期には必然的に膝を屈曲させた状態で体重を支持しなければならない。このときには、同じ体重支持であっても高い筋活動を発揮する必要がある。これについては、Sockolら(4)がチンパンジーの二足歩行とヒトの直立二足歩行を比べてその違いを明らかにしている(図)。チンパンジーの二足歩行は非常にエネルギー消費量が大きい、その理由は体重支持時に膝と股関節が屈曲していることによって、活動している筋が大きいことでは説明できる。

筋の活動を調べるとたしかに高齢者歩行のエネルギー効率は悪いのであるが、重心変位的位置エネルギーと力学エネルギーの変換効率は決して若齢者に劣らないばかりか、高齢者でより効率的である可能性もある。片脚立位バランス能力に優れた若齢者が高齢者歩行をまねして練習すれば、よりエネルギー効率に優れた歩行ができるかもしれない。90歳の高齢者は、歩行競技歴90年の超熟練者なのである。[山田 陽介]

### 引用文献

- (1) Mian OS et al. Metabolic cost, mechanical work, and efficiency during walking in young and older men. *Acta Physiol*, 186: 127-139, 2006.
- (2) Dean JC et al. The effect of lateral stabilization on walking in young and old adults. *IEEE Trans Biomed Eng*, 54: 1919-1926, 2007.
- (3) Ortega JD, Farley CT. Individual limb work does not explain the greater metabolic cost of walking in elderly adults. *J Appl Physiol*, 102: 2266-2273, 2007.
- (4) Sockol MD et al. Chimpanzee locomotor energetics and the origin of human bipedalism. *PNAS*, 104: 12265-12269, 2007.

## カバンと歩行

世には多くのカバンがある。ハンドバッグ、ショルダーバッグ、ウェストバッグ、ブリーフケース、ボストンバッグ、リュックサック、スーツケース等々、必要なものを詰め移動させるため、あるいはファッションアイテムとして、我々は用途に合わせてカバンを持つ。大きさや形状によって、手に持ったり、肩にかけたり、腰に巻いたり、背中に背負ったりする。かつては世界的に一般的であったとされる頭に荷物を載せる頭上運搬は、さすがに今日の日本で見かけることは稀有であるものの、人力運搬が主流である地域では現代でも行われている運搬方法である(1)。この頭上運搬時の重心について考えてみると、運搬物が頭上にあることで重心は上方へ変位する。重心位置が高くなるため、バランスを保持するにはある程度の訓練が必要であろう。しかし前後あるいは左右方向においては、もとの身体重心から大きく変位しないことが容易に想像される。多様なカバンが存在するなかで、このように身体重心と荷物の重心が水平面において一致するものは、なかなか思いあたらない。

普段使用している、手に持つカバンや肩にかけるカバンを思い起こしてほしい。その中身が重ければ重いほど、カバンと反対側に身体が傾くことは、多くの人が経験的に知っている。Neumannら(2)は、30名の健常大学生を対象に、片手で重錘を持ったとき、両手で重錘を持ったときの歩行動作における中殿筋の筋電図を記録・分析した。その結果、何も持たないときと比較して右手で重錘を持ったとき左中殿筋の筋活動量が増加するが、同じ重さの重錘を両手で持ったときは、右手のみで重錘を持ったときと比較して、左中殿筋の筋活動量が減少することを示した。両側上肢に負荷をかけることで負荷量は倍増するが、片側の中殿筋に着目するとその負担は軽減しているのである。日常生活でカバンを右手で持つ動作の場合、おそらく右手あるいは腕の疲労をまず感じるであろう。しかしカバンを持ちながら歩いているかぎり、左の中殿筋にも負担はかかっているのである。

では、前後方向(矢状面)で見るとどうであろう? Hongら(3)は、10歳前後の小学生男子に異なる重さのスクールバッグを背負わせ、その歩行を分析した結果、バッグが体重の20%の重さになると歩行中の体幹前傾角度が著明に増すことを明らかにした。またKinoshita(4)は、通常のリュックサック型であるバックパック方式と、身体の前後均等に負荷がかかる特殊なリュック型であるダブルバック方式による錘負荷時の歩行様式の差異を検証した。バックパック方式に比べダブルバック方式による運搬時の歩行は体幹前傾角度が小さく(図)、その他のパラメータにおいてもより通常歩行に近かったことから、ダブルバック方式のほうがより良い運搬方式であると述べている。身体の前と後ろに錘をぶら下げた状態は、両手に荷物を持つと同じ効果があると考えられる。つまり荷物を持って、新たな重心がもともとあった身体

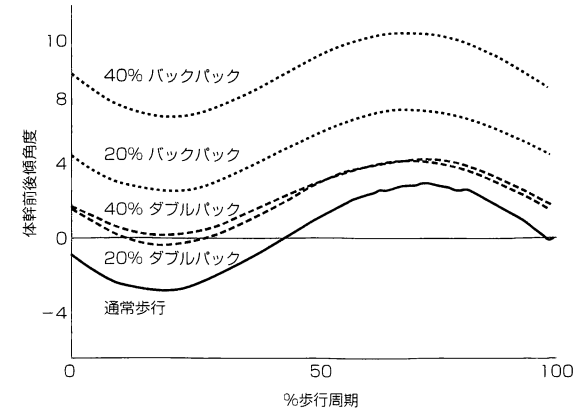


図1: 荷物運搬方式による体幹前後傾角度の違い (Kinoshita H. Effects of different loads and carrying systems on selected biomechanical parameters describing walking gait. Ergonomics, 28: 1347-1362, 1985. より改変)

重心からほとんど変位しない状態になっている。

アフリカの女性には荷物を頭の上に乗せる人々がいる。Maloiyら(5)は、東アフリカのLuo族やKikuyu族の女性たちを対象に、頭上運搬歩行にて重さを増加させたときの酸素消費量を測定した。その結果彼女たちは、体重の20%までなら頭に何も乗せない通常歩行と同じ酸素消費量で歩くことができるといふ、驚くべき結果を示した。例えば体重が50kgの人であれば、10kgの荷物を持ってエネルギー消費量が増えないのである。

近代社会において頭上運搬が流行しない理由が何であるか、著者は知る由もない。単にファッション性の問題か、他に重大な不合理性があるのか、それとも今後、頭上に載せる新たなカバンが開発され、再びブームが起こることもあり得るのだろうか?!

[青山 宏樹]

### ■引用文献

- (1) 佐藤弘明. コンゴ森林農耕民ボイエラの運搬活動. 浜松医科大学紀要, 18: 13-38, 2004.
- (2) Neumann DA et al. An electromyographic analysis of hip abductor muscle activity when subjects are carrying loads in one or both hands. Phys Ther, 72: 207-217, 1992.
- (3) Hong Y, Brueggemann GP. Changes in gait patterns in 10-year-old boys with increasing loads when walking on a treadmill. Gait Posture, 11: 254-259, 2000.
- (4) Kinoshita H. Effects of different loads and carrying systems on selected biomechanical parameters describing walking gait. Ergonomics, 28: 1347-1362, 1985.
- (5) Maloiy GMO et al. Energetic cost of loads: have African women discovered an economic way? Nature, 319: 668-669, 1986.

## 歩行速度を比べる

ガリバーは小人の国に行った。その住人の身長は45cm程度で彼の1/4ほどであった。小人の国の住人も我々と同じように歩き回る。ここで問題を1問、小人の国の住人の歩くスピードはどれくらいだろうか。サイズが違う者同士の歩くスピードを公平に比較するにはどうしたらよいのだろうか。

小学校で習った相似という概念を思い出してほしい。一辺が1cmの正方形と一辺が5cmの正方形は同じ形だ。縦と横の比はともに1だからだ。なぜ辺の長さの比をとるとは形を比べることができるだろうか。物理学でいう次元解析という考え方をご存じだろうか。物理量を質量 (M)、長さ (L)、時間 (T) の組み合わせで考えるやり方だ。馴染みがない方は単位とさせていただいてもかまわない。辺の比をとるということは、長さを長さで割るということなので無次元の (単位がない) 量をとることである。長さの次元をもたない値をとることによって、長さの次元に依存せず形を比較することができるのである。

では歩行速度は何で割ってやればよいのだろうか。まず思いつくのは、身長で割る、というアイデアだ。しかし歩行速度の単位は (m/s) で、身長は (m) である。形を比較する際は、単位をなくす (= 無次元化する) ことが重要なのであった。歩行速度/身長では時間のマイナス乗という次元が残ってしまう (単位は 1/s となる)。実はこの次元は重力加速度に由来するものである。歩行や走行は地球の重力に支配されているのだ。ということで、速度を無次元化する式は次のようになる。

$$Fr = \frac{v^2}{gl}$$

分子は速度の二乗なので ( $L^2T^{-2}$ ) の次元をもっている (単位は  $m^2/s^2$ )。分母の  $g$  は重力加速度で次元は ( $L T^{-2}$ ) であり (単位は  $m/s^2$ )、 $l$  は脚長で次元は  $L$  である (単位は  $m$ )。したがって分母の次元も ( $L T^{-2}$ ) となる (単位は  $m^2/s^2$  で分子と同じ) ので、この値はこれがフルード数 (Fr) と呼ばれている無次元量だ (文献1はフルード数を用いた歩行研究をわかりやすくまとめているレビューである)。無次元化することによって、体のサイズや重力の影響を受けることなく歩行速度を比較することができる。図 (左上) は子どもの月齢を横軸に、縦軸に無次元化した速度  $\beta = \sqrt{Fr}$  としたものである。60カ月、すなわち5歳くらいまでに歩行速度は収束していることが読み取れる。5歳の子どもの、体のサイズの違いを考慮に入れば、大人と同じ速度で歩いている。

フルード数を用いることでいろいろなことが分かる。重力が1/6になる月では分母が1/6となるので、同じ「形」で歩行すると (フルード数を一定に保つと) 歩行速度は地球の40%程度にまで低下してしまう。重力が10倍になる星に行けば (そんなメーガがあった気がする) 歩くスピードは3倍以上速くなるのである。ヒトと他の動物

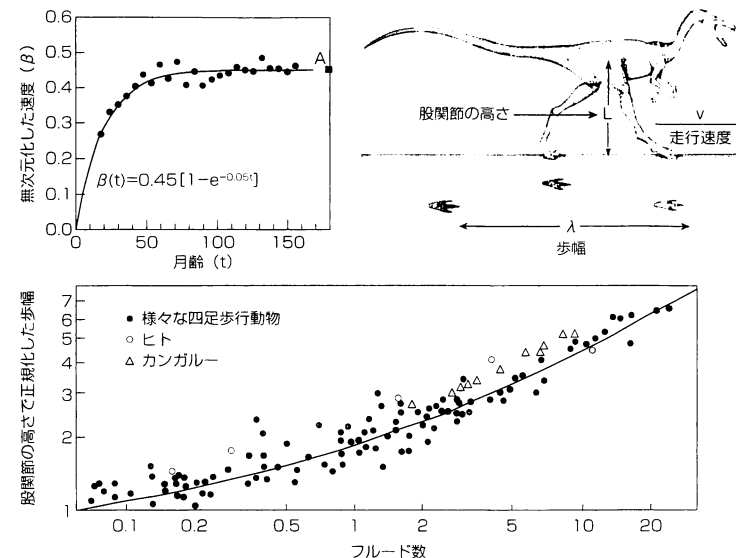


図1: (Vaughan CL, O'Malley MJ. Froude and the contribution of naval architecture to our understanding of bipedal locomotion. Gait Posture, 21: 350-362, 2005. より改変引用)

の比較もできる。横軸に歩行 (走行) 速度をとり、縦軸に歩幅をとれば (もちろん歩幅も無次元化する必要がある!)、驚くべきことに地球上の様々な生物が1つの曲線の上にプロットされる (図下)。恐竜が歩いていた速度だって分かる。歩幅も脚の長さも化石を調べれば分かるからだ (図右上)。

なお、フルードとは船が波を作ることによって生じる抵抗がこの値に依存することを見出した19世紀の船舶工学者の名前である。この発見によって実物大の船を作る前に小さな模型でシミュレーションができるようになり (その際に船のサイズと速度を同じ割合ではなく、この式に従うように縮小しなければならない)、巨大な船の建造が可能となったのだ。まったく関係ないと思われる分野と、突然繋がりが見えてくる。なんだかワクワクしてしまうのは著者だけだろうか。 [進矢 正宏]

### ■引用文献

- (1) Vaughan CL, O'Malley MJ. Froude and the contribution of naval architecture to our understanding of bipedal locomotion. Gait Posture, 21: 350-362, 2005.

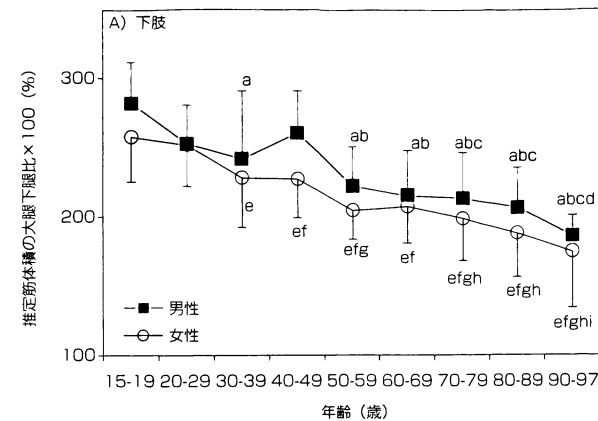
## 下肢のプロポーション

陸上の脊椎動物は進化の過程で身体形態を生活行動空間に合わせて自在に変化させてきたが、前後・左右に対をなす4つの肢の存在はほとんどの種で保守的に保存されている。種によって四肢の機能は異なるが、もっとも多くは脊椎動物に見られる四肢の機能は、移動 (“locomotion”) あるいは重力下での体重支持 (“weight bearing”) である。ちなみに、魚類以外に4つの肢を持たない脊椎動物としては、爬虫類のいくつかの種 (ヘビ目やトカゲ類の一部) と両生類の無足類、およびクジラ類 (クジラとイルカ) のみである。ヘビは、水中や地中で抵抗になる四肢を退化させ、体幹部そのものを移動や体重支持に用いている。水棲になったことで体重支持の必要性がなくなったクジラは後肢を退化させており (腰椎が痕跡的に存在)、尾びれが代わりに移動機能を果たしている。

ヒトは、直立二足歩行を獲得し、移動および体重支持の機能を後肢 (下肢) に任せたことで、前肢 (上肢) により高い自由度を得ることができた。さらに、二足歩行の獲得によって肺呼吸と四肢の動作の強い連関から解放され、より自由な動作が可能になったことで、両側同時運動や両側交互運動の他に、力強い一側単独運動も可能になった。さらには、脳の進化に伴って、後肢で物体を把持し (“keep”) 力を加え (“hit”) たり受け渡し (“pass”) たり、あるいは前肢のみで移動したり体重支持したりすることもできるようになった。このようにヒトは四肢の動作に高い自由度を獲得したため、立つ、歩く、走る、掴む、に加えて、蹴る、打つ、押す、投げるといった様々な動作が可能になり、数多くの文化的な創造を行って自ら生活行動空間の環境を変化させてきた。さらに、無数のスポーツ競技を生み出し、その競争的な過程の中で、ヒトの身体動作の可能性を常に更新してきた。

このようにヒトの四肢は他の動物に比べて非常に高い自由度を有しているが、それでもなおヒトの下肢の役割のほとんどは、体重支持と移動である (1)。四足動物においては、より体重支持の役割が高いものを抗重量型の動物 (例えばゾウなど)、より移動の役割が高いものを疾走型の動物 (例えばチーターなど) と分類することがあるが、ヒトにおいてはこの両者の役割のうち、どちらがより重要であるかについては、そのヒトの身体状態や生活行動環境によって異なる。筋の環境適応は非常に早いため、肢の筋量分布の特徴も抗重量型か疾走型によって異なるのではないだろうか。

肥満者においては、体重が重いために、歩行や日常生活活動中であっても体重支持の必要性が高い。その結果、特に足関節のスティッフネスを高めておく必要がある。肥満者の特徴としては歩行中に強い足関節トルクを使用するが、膝・股関節では非肥満者と同じトルク発揮であることが知られている。また身体不活動は下腿筋量よりも大腿筋量の大きな低下を惹起する。その結果、部位別生体電気インピーダンス法によ



図：日本人男女1006名の部位別生体電気インピーダンス法で推定した下肢の筋体積の大腿と下腿の比 (大腿/下腿) の加齢変化 (平均±標準偏差)。男性群において、aは15-19歳と比べて、bは40代と比べて、cは20代と比べて、dは30代と比べて有意に低いことを示している。女性群において、eは15-19歳と比べて、fは20代と比べて、gは30代と比べて、hは40代と比べて、iは50代と比べて有意に低いことを示している。(山田陽介ほか、15~97歳日本人男女1006名における体肢筋量と筋量分布。体力科学、56: 461-472, 2007.より引用)

って調べた下腿の筋量に対する大腿の筋量の割合は、肥満者で低値を示す (2)。また、この下腿の筋量に対する大腿の筋量の割合は、加齢によっても低値を示し (図)、この低下率は、移動機能の低下した要介護者でより大きい (3)。高齢者、特に要介護高齢者は身体活動が低下していると同時に、バランス機能の大きな低下が起こり、より体重支持に必要なコストが増大するが、このことが筋量の大腿・下腿比と大きな関連を示しているのかもしれない。

脚のプロポーションをみれば、どのような生活をしているか、どのような競技をしているのかがわかるような気がするが、それはあながち当てずっぽうではないのかも  
[山田 陽介]

### ■引用文献

- (1) Biewener AA. Biomechanics of mammalian terrestrial locomotion. Science, 250: 1097-1103, 1990.
- (2) Yamada Y et al. Proximal electrode placement improves the estimation of body composition in obese and lean elderly during segmental bioelectrical impedance analysis. Eur J Appl Physiol, 107: 135-144, 2009.
- (3) 山田陽介ほか、15~97歳日本人男女1006名における体肢筋量と筋量分布。体力科学、56: 461-472, 2007.

## なぜ陸上のトラックは左回りなの？

陸上競技のトラックがなぜ左回り（反時計回り）であるか、不思議に思ったことはないだろうか。どのような基準で、なぜ左と決められたのだろうか。実際、1912年に世界陸上競技連盟によって陸上のトラックを左回りに走ることが統一されたが、それより前は右回りの競走も行われていた。当時の人々は、ヒトが先天的に回りやすい方向を経験的に知っており、より良い記録を求めするために左回りを基準として採用したのかもしれない。考えてみると、スピードスケートや野球のダイヤモンドも左回りである。この考えを支持する研究はあるのだろうか。

この疑問に興味を持った研究者たちが、1920年ごろから様々な実験を行ってきた。研究者たちは、歩いた状態で障害物の周りを回ったり、T字路で曲がったりするヒトの行動を観察した。ヒトは左に回るのを好むのか、それとも右に回るのを好むのか、多くの研究が重ねられてきた。しかし、それらの研究では一致した見解は得られなかった。被験者が左を好んで回った研究もあれば、右を好んで回った研究もあったのである。これらの結果の多様性の原因として、課題がバラエティに富んでおり、個々の課題による結果への影響が大きかったからだとLenoirら（1）は考えた。どうやらあらゆる状況においてヒトが左に回るのを好むと断定することはできなさそうである。

それでは、陸上のトラックは左回りの方が走りやすいと主張することはできないのであろうか。歩く動作と走る動作で方向転換の好みの強さは異なると考えたLenoirら（1）は、107人の被験者に次のような課題を行わせた。歩いたり走ったりしながら約10mの走路の往復（180度の方向転換を12回以上）を行わせるといった課題である。その結果、歩行では59%、走行では71%の割合で左回り（反時計回り）の方向転換が行われた。Lenoirらは、この結果を説明する要因の1つとして、走る動作が、歩く動作よりも効率的に方向転換を行う必要性が強いからなのではないかと考えた。つまり、課題の時間や疲労、難しさなどが方向転換の好みをより顕著に引き出すと考えたのである。

もっと自発的な、走り始めにおける方向転換を観察した面白い実験がある。Toussaintらは、図1のような装置を用いて、被験者に5つのターゲットのうち、1つを見ながら直径4mの円の周りをできるだけ速く走らせるという課題を行わせた（2）。対称性を保持するために、スタート位置をL、C、Rの3カ所に設定した。結果、左回りのバイアスが確認された。スタート位置がCの時は被験者が左回りを選択した試行はチャンスレベル（50%）よりも有意に高かった。また、被験者はスタート位置がRの時はほぼすべて（平均95.4%）左回りを選択していたのに対し、スタート位置がLの時は、右回りを選択した試行は70.8%にとどまった。（図2）。

上の2つの研究から、どうやらヒトは左回りに走るのを好むといえそうだ。しかし、

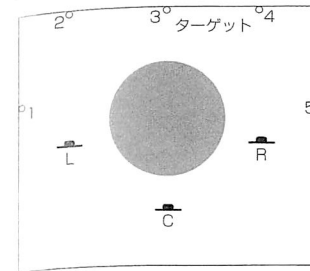


図1 Toussaintらの用いた実験の装置。L、C、Rの立ち位置から、壁に貼られた5つのターゲットのうちの1つを見ながら、右回りもしくは左回りですできるだけ速く1周する（Toussaint Y, Fagard J. A counterclockwise bias in running. Neurosci Lett, 442: 59-62, 2008より改変引用）。

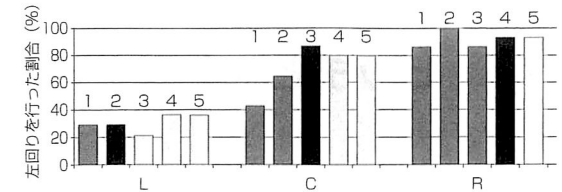


図2：被験者の注視の方向と、左回りの関係。図中の番号は図1のターゲットの番号を表す。5つのバーごとに左からL、C、Rの立ち位置での結果を示している。見た目にも明らかに左回りの平均が50%を超えている（Toussaint Y, Fagard J. A counterclockwise bias in running. Neurosci Lett, 442: 59-62, 2008より改変引用）。

少し立ち止まって考えてみてほしい。トラックの左回りが定められたのが1913年で、研究が始まったのが1920年ごろである。この事実からは、「陸上競技のトラックが左回りに定められたから、ヒトは後天的に左回りに走るのを好むようになった」という可能性も考えられないだろうか。つまり、ヒトが左回りに走るのを好むことを基準に、トラックの左回りを採用したわけではない可能性も考えられるのである。

走者の立場ではなく、観衆の立場から左回りの基準が定められたという説もある。左回りに走るのならば、観客から見れば左から右に走者が走ることになる。ヨーロッパにおける文字の読み方と同じで観戦しやすいというわけである。もしかすると観客の立場から左回りと定められたから、ヒトは後天的に左回りに走るのを好むようになったのかもしれない。

今のところどちらの説が正しいかはわからないが、実際トラックを右回りで走ってみると、その走りにくさを感じることは確かである。 [藤井 慶輔]

### ■参考図書

- 日本博学会倶楽部. スポーツの素朴な大疑問. PHP文庫, 2008.  
 岡尾恵市. 陸上競技のルーツをさぐる. 文理閣, 1996.  
 稲垣正浩, 谷釜了正編. スポーツ史講義. 大修館書店, 1995.

### ■引用文献

- (1) Lenoir M et al. Intrinsic and extrinsic factors of turning preferences in humans. Neurosci Lett 393: 179-183, 2006.  
 (2) Toussaint Y, Fagard J. A counterclockwise bias in running. Neurosci Lett, 442: 59-62, 2008.

## ピッチとストライド

速く走ることは人類にとって最大のテーマのひとつである。これまで、走ることに関する研究は様々な側面から数多くの研究がなされてきたが、本話では、走速度を構成するピッチとストライドに着目して「速く走れたときピッチやストライドはどうなっているのか」について紹介したい。

改めていうまでもないが、走速度はピッチ×ストライドで表される。ピッチとは1秒間に何歩進んだかを表し、ストライドは1歩で進んだ距離を表している。

トレーニングを積むと、ピッチにはそれほど変化がないがストライドが伸び、走速度が速くなったという報告がある。たとえば、日本の一流短距離選手である朝原選手や土江選手は、トレーニングによりピッチにはさほど変化がなかったが、ストライドの増大によって走速度が向上したことを報告している。これは、トレーニングにより、体組成や筋力、動作の改善などがみられ、結果的にストライドの増大につながったのではないかと考えられる。しかし、その日のうちで速く走れた時とそうでなかった時でも、ストライドが走速度に影響しているのだろうか。

Hunter (1) らは被験者に7本の全力疾走を行わせた。その中から、1番速かった試行と3番目に速かった試行を比較したところ、ストライドは変化がなかったが、ピッチは1番速かった試行が3番目に速かった試行よりも速かったと報告している。つまり、速く走れた時は、ストライドが伸びたのではなく、ピッチが速くなったために速く走れたということがいえる。Luhtanen ら (2) や Hay (3) の研究でも、走速度とピッチとストライドの関係において同様の結果が報告されている。

実は、ストライドは全力疾走の80%程度の速度でほぼ最大になり、それ以上の速度で走ってもあまり変わらないのである (4) (図1)。むしろ全力走ではストライドが短縮するという報告もある。一方、ピッチは走速度の増大とともに高まっていることが分かる (図2)。

以上の研究知見をまとめると、長期的視野に立てば、ストライドが増大するようにトレーニングを重ねていくことが、速く走る上で重要であると考えられる。一方、その日のうちで一番速く走りたいといった短期的視野においては、ピッチが速くなることが重要である。著者も100mの選手であるが、速く走れた時はピッチが速く、無理にストライドを伸ばそうとするとピッチが低下してタイムが遅くなってしまうことがよくある。しかし、無理矢理ピッチを速くしようとするとストライドが短くなってしまふ恐れがあるので注意が必要である。「ピッチが速くなっている」ということと「ピッチを速くしようとする」は必ずしも一致するとは限らない。

スタートラインに立ったら無心でゴールまで駆け抜けよう。ピッチが最高潮に達したとき、最高の結果があなたを待ち受けているかもしれない。 [片山 拓]

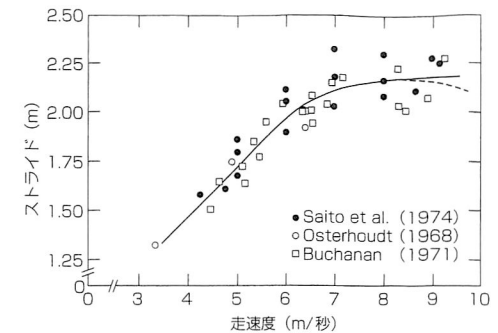


図1：走速度とストライドの関係（トレッドミル上を走行）  
(Dillman CJ. Kinematic analysis of running. Exerc Sports Sci Rev. 3: 193-218, 1975. より引用)

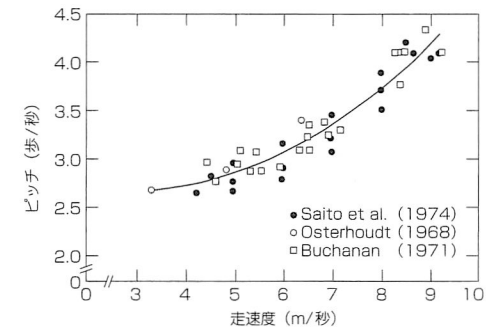


図2：走速度とピッチの関係（トレッドミル上を走行）  
(Dillman CJ. Kinematic analysis of running. Exerc Sports Sci Rev. 3: 193-218, 1975. より引用)

### ■参考図書

宮下充正, 小林寛道. 走る科学. 大修館書店, 1990.

### ■引用文献

- (1) Hunter JP et al. Interaction of step length and step rate during sprint running. Med Sci Sports Exerc, 36: 261-271, 2004.
- (2) Luhtanen P, Komi PV. Mechanical factors influencing running speed. In Komi PV (ed) Biomechanics VI-B, University Park Press, pp.23-29, 1977.
- (3) Hay J. Cycle rate, length, and speed of progression in human locomotion. J Appl Biomach, 18: 257-270, 2002.
- (4) Dillman CJ. Kinematic analysis of running. Exerc Sports Sci Rev. 3: 193-218, 1975.

## 脚全体の一つ先を行く、骨盤の動き

様々なスポーツにおいて股関節や骨盤の動きが重要だ。ランニング動作でも同様であるといわれている。ところで、股関節や骨盤を上手に動かした走りをするのと、骨盤からコンパスの脚であるかのように骨盤を前後に動かした走りをするのではないだろうか？ 高校時代、陸上部に所属していた著者も、股関節の重要性の話聞いてからは必死に骨盤を前後に大きく動かそうとしていたことを覚えている。

図1の太線を見て欲しい。これは人間の身体を上から見た時の骨盤の回転角度を示したものである。縦軸が0度の時、骨盤は進行方向正面を向いていることになる。まず歩行時の波形である(a)に注目する。波形が右足のものだとして考えてみよう。右足が接地した時、骨盤は内側に傾いている、すなわち右の腰が前に出ている。その後、右足で地面を蹴る動作に伴い、骨盤は外側に回転(右腰が後ろに動く)していく。右足が離地し地面を蹴る動作が終了すると、骨盤は内側に回転を始める(右腰が前に動く)。このように、歩行時において、骨盤は脚全体のスイングとほぼ同じような動きをしており、あたかも骨盤からコンパスの脚であるような動きをしている。

次に(b)を見て欲しい。同じく上から見た時の骨盤の回転角度であるが、これは走行時のものである。右足が接地した時、骨盤はすでに外側に傾いている、すなわち右の腰が後ろにある。その後、接地の中盤すなわち重心の真下を足が通過するあたりで右腰が最も後ろに下がる。そしてキック動作中なのにもかかわらず骨盤は内側への回転を開始する、すなわち脚の離地を待つことなく右腰は前に出て行くのである。抜

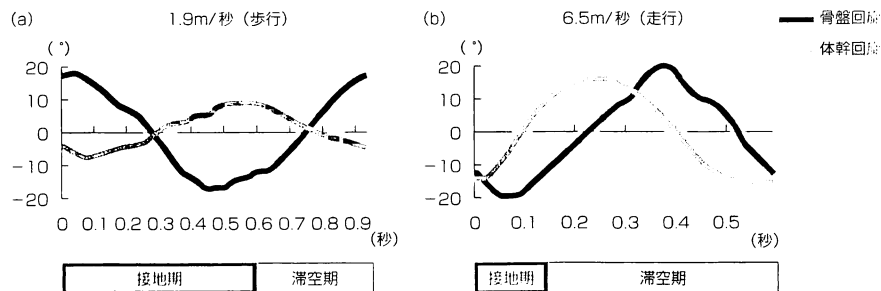


図1：歩行中(1.9m/秒：図の(a))と走行中(6.5m/秒：図の(b))の骨盤と体幹(左右の肩を結んだ直線)の回旋角度。回旋角度とは、人間の身体を上から見た時の骨盤と体幹の回旋角度で、進行方向に対して正対している時が0度、それよりも支持脚側の骨盤が前方にあるときが正の角度とした。

(西守 隆、伊藤 章、歩行と走行の移動変化における骨盤と体幹回旋の相互相関分析。理学療法学。33: 318-323, 2006.より引用)

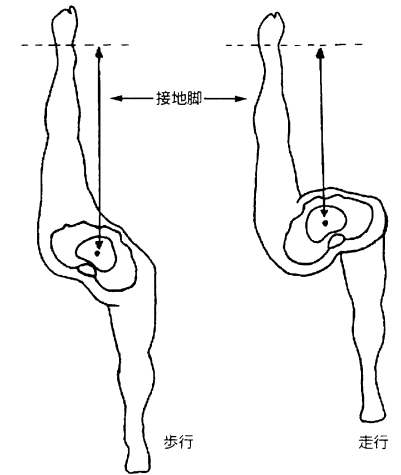


図2：接地の際に、接地脚側の骨盤が前にある歩行時の動き(左の図)よりも、接地脚側の骨盤が後ろに下がっているランニング時の動きの(右の図)ほうが、重心と接地点の水平距離を減らし、接地時のブレーキ力を小さくできるのという仮説が立てられている。

(Schache AG et al. The coordinated movement of the lumbo-pelvic-hip complex during running: a literature review. Gait Posture, 10: 30-47, 1999.より引用)

地期中盤から前方に動き始めた右腰は遊脚期中盤まで前方に動き続け、脚全体の後方スイングに先立って右腰は再び後ろに動き始める。つまり走行時は歩行時と違って、骨盤が脚全体のスイングをあたかも先するような動きをしているのである。

歩行とランニングの骨盤の動きで何故、このような違いがあるのかについては、はっきりとはわかっていない。1つの仮説として考えられているのは、接地の際に、接地脚側の骨盤が後ろに下がっていることで、重心と接地点の水平距離を減らし、接地時のブレーキ力を小さくしスピードの減速を抑えているのではないかと考えられている(図2)。

骨盤からコンパスの脚であるかのように骨盤を前後に動かそうとしていた高校時代の著者であるが、なかなか思うような結果が出なかった。ひょっとすると、脚全体を先導する骨盤の動きに敢えてブレーキをかけ、さらには接地時のブレーキまで大きくしてしまっていたのかもしれない、と今になって思うものである。

[岡本 英也]

### ■引用文献

- (1) 西守 隆、伊藤 章、歩行と走行の移動変化における骨盤と体幹回旋の相互相関分析。理学療法学。33: 318-323, 2006.
- (2) Schache AG et al. The coordinated movement of the lumbo-pelvic-hip complex during running: a literature review. Gait Posture, 10: 30-47, 1999.

# 長距離走、パフォーマンス向上のキー！？ ～筋線維と腱の効率的な動き～

もし筋線維と腱組織を協調させて効率よく力を発揮することが出来たならば、多くのスポーツ競技においてパフォーマンスが向上するだろう。特に、出来る限り効率的に力を発揮しながら走り続けねばならない長距離ランナーは下肢の筋線維と腱組織を協調させて効率よく力を発揮していることが予想される。しかし効率的に力を発揮するとはどのようなことをいうのであろうか？

骨格筋は収縮要素である筋線維と弾性要素である腱組織とを直列につないでモデル化される。張力を発生するのは収縮要素の筋線維である。弾性要素である腱組織はバネのようにふるまい、弾性エネルギーを貯蔵したり放出したりする。Arampatzisらの研究により、長距離走のランニング効率がよいランナーには、①弱い力に対して大腿四頭筋の腱がよく伸びる、②下腿三頭筋の腱が硬く、筋線維の発揮する張力が強い、という特徴があることがわかってきた(1)。では、このような特徴が何故、ランニング効率と関係するのだろうか？

AlbrachtとArampatzisはこの点に関して詳細な検討を行っている(2)。彼らはランニング効率のよいランナーと悪いランナーの筋腱の特性を反映した別々のモデル(図1)を用いてシミュレーションを行い、筋や腱の振る舞いにどのような違いがあるのか検討した。まず、大腿四頭筋についてみてみよう(図2(a))。効率のよいランナーでは弱い力に対し腱がより多く伸びる分、収縮要素である筋線維の伸び縮みする範囲が少なくなり、筋線維の収縮速度が低下する。筋線維は収縮速度が低いほど大きな力を出せるため、長距離走の時のような弱い張力に対して大腿四頭筋の腱がよく伸びるほうが効率的に大きな力を生み出すことができるのだ。次に下腿三頭筋につい

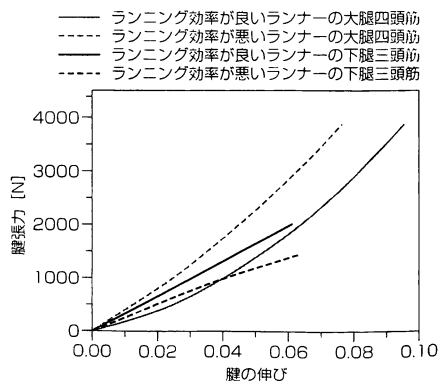


図1：腱組織の特性。大腿四頭筋(QF)ではランニング効率がよい選手(high)のほうが、弱い力に対してよく伸びる。一方で、下腿三頭筋(TS)ではランニング効率がよい選手のほうが、同じ力に対しても腱が伸びづらい(腱が硬い)(Albracht K, Arampatzis A. Influence of the mechanical properties of the muscle-tendon unit on force generation in runners with different running economy. Biol Cybern. 95: 87-96, 2006. より引用)

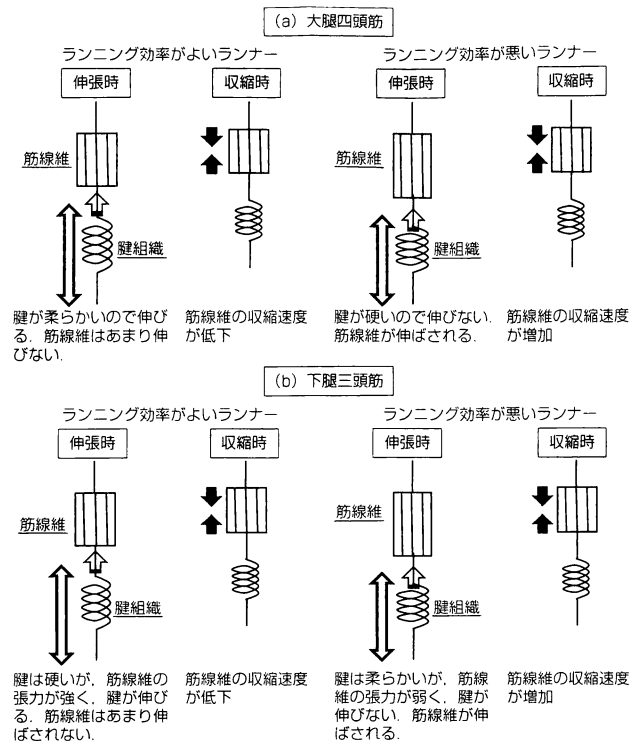


図2 ランニング効率がよいランナーと悪いランナーの大腿四頭筋および下腿三頭筋の伸張-収縮サイクルの模式図。

て見てみよう(図2(b))。大腿四頭筋とは逆に、ランニング効率のよいランナーは下腿三頭筋の腱が硬い。大腿四頭筋の時と同じように考えると、腱が硬いと筋線維の収縮速度が増加し、効率的に大きな力が出せないように思われる(実際、短距離走のように大きな力を発揮するとき(最大筋力発揮の60~100%)では、大腿四頭筋の腱が柔らかい方が効率的に力を発揮できる)。しかし、長距離走のように小さな力を発揮するときは少し事情が違う。ランニング効率のよいランナーには、下腿三頭筋の腱が硬いことに加え筋線維の発揮張力が大きいという特徴もあったことを思い出してほしい。ランニング効率のよいランナーは、硬い腱を筋線維が大きな力で引き伸ばし、腱組織が伸び縮みする分、筋線維の収縮が少なく済むため、筋線維の収縮速度が低下し、効率的に大きな力を発揮できるのだ。

ランニングの速度は上昇させても筋線維の収縮速度は上昇させない、このことが自己記録更新へのキーになるのかもしれない。 [岡本 英也]

■引用文献

- (1) Arampatzis A et al. Influence of the muscle-tendon unit's mechanical and morphological properties on running economy. J Exp Biol, 209: 3345-3357, 2006.
- (2) Albracht K, Arampatzis A. Influence of the mechanical properties of the muscle-tendon unit on force generation in runners with different running economy. Biol Cybern. 95: 87-96, 2006.



# 地面を強く蹴った方が速く走れる!?

## ～スプリンターの膝と足首の動き～

速く走るためには地面から大きな力をもらわなければならない。そのためには、膝や足首でしっかり地面を蹴らないといけないと考えるかもしれない。実際、つい最近までは、このような考え方が支持され、スポーツの現場などでも指導がなされてきたのだ。

しかし、伊藤らは速く走ることのできるスプリンターほど、膝や足首の伸展する速度が遅いという驚くべき結果を報告している(1)。図1のように、股関節の伸展角速度は疾走速度にかかわらずほぼ一定の値(もしくは、速い選手ほど股関節の伸展角速

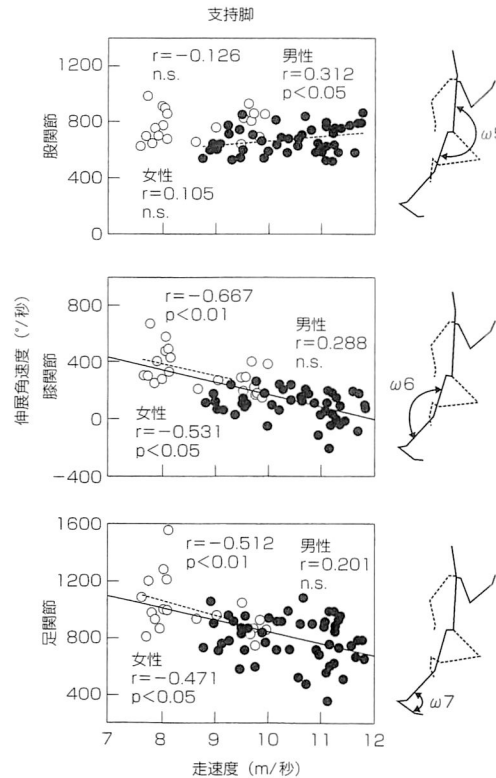


図1: 様々な競技レベルのスプリンターの全力疾走速度と股関節、膝関節、足関節の伸展角速度の関係を示す。全力疾走速度が速いスプリンターほど、膝関節、足関節の伸展角速度が小さいことがわかる。(伊藤章ほか、100m中間疾走局面における疾走動作と速度との関係、体育学研究、43: 260-273, 1998,より引用)

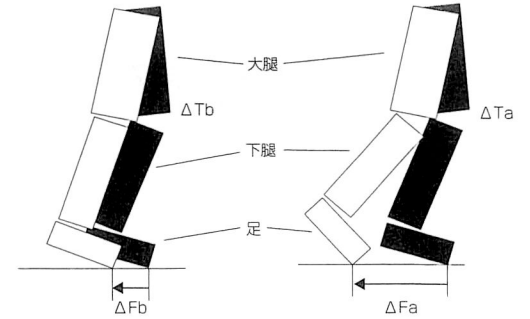


図2 股関節が同じだけ伸展しても、膝の伸展がない右の図のほうが、足先の移動距離が長い。右のキックの方が股関節の伸展速度を脚全体を後方へスイングする速度へ効果的に変換できる。(伊藤章ほか、100m中間疾走局面における疾走動作と速度との関係、体育学研究、43: 260-273, 1998,より引用)

度が速い傾向)を示すが、膝・足関節の伸展角速度は全体として走速度と有意な負の相関を示していることがわかる。これまでは「膝や足首でしっかりと地面を蹴る」という走り方が正しいと考えられてきたが、このような結果から考えると、速いスプリンターが膝や足首で地面を力強く蹴っているとは思えない。

図2は、接地期後半のキック動作を模式的に示したもので、濃い色の足から白い色の足へとキック動作が行われた様子を示している。左は膝関節を大きく伸展させたキック動作、右は膝の伸展がないキック動作である。股関節の伸展角度は左右の図とも同じになっている。これを見るとわかるように、右の方が足先の移動距離が長いことが分かる。つまり右側のキック動作のほうが、股関節の伸展を効果的に前方への移動に伝えられるのだ(1)。また、足関節の伸展動作は身体を前に進めるのではなく、上方に持ちあげてしまう作用があり、上下動につながると考えられている(2)。上下動が大きくなると、結果的にピッチが落ちてしまうのだ。また、足関節を固定させ、あそびをなくすことで、短い接地時間にも対応できているのだと考えられている。

近年の世界や日本のトップレベルスプリンターでは接地中に膝が伸展せず、逆に終始屈曲を続けるキック動作を行うようになってきたことも明らかになってきた(3)。今後、ひょっとすると、接地中に膝が屈曲し続ける走り方が世界の主流なキック動作となり、100mの記録もどんどん更新されていくかもしれない。 [岡本 英也]

■参考文献

金子公有、福永哲夫編、バイオメカニクス、杏林書院、2004。

■引用文献

- (1) 伊藤 章ほか、100m中間疾走局面における疾走動作と速度との関係、体育学研究、43: 260-273, 1998。
- (2) 伊藤 章、石川昌紀、短距離走におけるスナップの意味、バイオメカニクス研究、4 (2): 159-163, 2000。
- (3) 福田厚治ほか、男子一流スプリンターの疾走動作の特徴—世界陸上東京大会との比較から—、バイオメカニクス研究、12 (2): 91-98, 2008。

# 脚を速く動かしたら一流短距離選手になれるか？

オリンピックの花形種目といわれている陸上競技100m. 誰もが1度は一流短距離選手の走りを目にしたことがあるだろう。号砲が鳴ったら物凄い勢いで加速し、わずか10秒足らずでゴールを駆け抜ける。私たちは、一流短距離選手の走りを目の当たりにし、呆気にとられるだけであるが、もしあなたが一流短距離選手のように脚を速く動かすことができれば、彼らと同じような動きができるのだろうか。

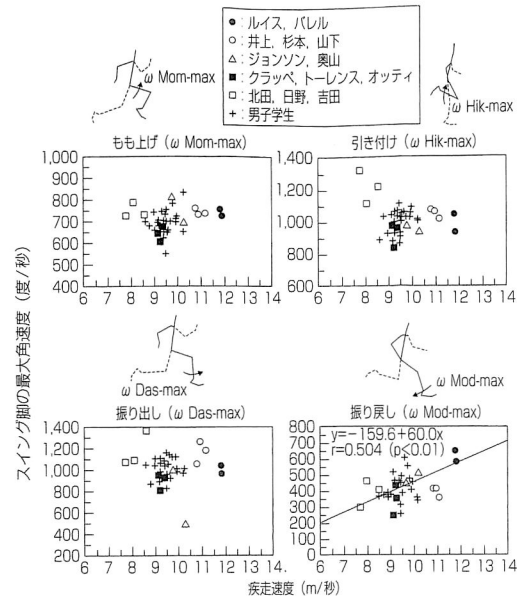
実は、単に脚を速く動かしたからといって、一流短距離選手と同じような動きになるとは限らない。一流短距離選手は一流たる所以の動きをしているのである。本話では、速い選手の脚の動きに着目して話を進めていきたい。

図は、中間疾走における疾走動作を引き付け、もも上げ、振り出し、振り戻しの4つの局面に分け、それぞれの局面における脚の最大スイング速度を様々なレベルの選手を用いて分析したデータである(1)。その結果、4つの局面の中で振り戻し局面の脚の最大スイング速度のみが疾走速度と関係があり、引き付け、もも上げ、振り出しの局面では脚の最大スイング速度と疾走速度との間に有意な相関関係はみられなかった。つまり、疾走速度の速い選手は、脚が速く動いているのは接地直前だけであり、脚を引き付ける局面やもも上げの局面では脚が速く動いたからといって疾走速度とは関係ないのである。

さらに驚くべきデータがある。伊藤ら(2)は、様々なレベルの選手の接地中における足関節および膝関節の最大伸展角速度を調べたところ、走速度の速い選手のほうが接地中の足関節および膝関節の最大伸展角速度が遅かったという結果が得られた。つまり、速い選手のほうが接地中に膝や足首がゆっくり伸びているのである。これに関してはO-48で詳しく紹介しているのでそちらを参照して頂きたい。

以上の結果より、疾走速度の速い選手は全ての局面の脚の動きが速いのでなく、速く動いているのは接地直前だけであり、接地中においては、疾走速度の速い選手のほうが膝や足首がゆっくり伸びているということが分かる。したがって、もしあなたが脚を速く動かしたとしても、一流短距離選手と同じような動きになっているとは限らず、動作の局面や身体部位によって脚が速く動いたり遅く動いたりしなければ速く走ることはいかない。

短距離選手は全力疾走ではなくても特異的な動きをしている。表は、短距離選手、長距離選手、一般人が一定速度(5.8m/秒)で走った時の動作データである(3)。短距離選手は、長距離選手や一般人に比べ、接地瞬間の重心とつま先の水平距離が短く、また、接地瞬間の両膝間の距離が短かった。これはつまり、短距離選手は、長距離選手や一般人に比べ、身体より近い位置で接地しており、接地の瞬間に逆脚がより前に振り出されていることを示している。長距離選手と一般人はそれほど変わらない動



図：全力疾走中の各局面における脚のスイング速度 (小林寛道.ランニングパフォーマンスを高めるスポーツ動作の創造.杏林書院, 2001より引用)

表：短距離選手、長距離選手、一般人が5.8m/秒で走行したときのキネマティック変数 (Bushnell T, Hunter I. Differences in technique between sprinters and distance runners at equal and maximal speeds. Sports Biomech. 6: 261-268, 2007.より引用)

	短距離選手 (A)	長距離選手 (B)	一般人 (C)
走速度 (m/秒)	5.81	5.81	5.78
最小膝関節角度 (°)	39	45	48
最小股関節角度 (°)	117 <sup>a</sup>	126	125
離地瞬間の膝関節角度 (°)	163	161	161
接地時間 (秒)	0.168 <sup>c</sup>	0.177	0.187
ストライド (m)	3.88	3.66	3.72
接地瞬間の大腿角度 (°)	5	7	8
接地瞬間の重心とつま先の水平距離 (m)	0.71 <sup>bc</sup>	0.76	0.76
接地瞬間の両膝間距離 (m)	0.46 <sup>bc</sup>	0.59	0.62

B, C, BCはそれぞれB群, C群, BおよびC群と有意差があることを示す。

きをしており、短距離選手だけが特異的な動きをしていたことがわかる。短距離選手は、全力疾走を日々の練習で繰り返している中で身につけた、全力疾走でより速く走るために適した動きをしているのではないだろうか。 [片山 拓]

■引用文献

- (1) 小林寛道.ランニングパフォーマンスを高めるスポーツ動作の創造. 杏林書院, 2001.
- (2) 伊藤 章ほか. 100m中間疾走局面における疾走動作と速度との関係. 体育学研究, 43: 260-273, 1998.
- (3) Bushnell T, Hunter I. Differences in technique between sprinters and distance runners at equal and maximal speeds. Sports Biomech, 6: 261-268, 2007.

## なぜ速く走るときは腕を振るの？

信号が赤になる前に、走って渡ろう。そう思ったとき、まず足を前に速く動かそうとするだろう。両足を交互にすばやく前に出すことで、つられて頭や胴体といった足以外の部分と一緒に移動する。多くの人は日常生活ではこのようなイメージで走っていることだろう。しかし、50m走のように、短い距離をできるだけ速く走らなければならないときは、ヒトは足を速く動かすことに加えて、腕を大きく速く振る。腕を振ることによって、より速く走れるというわけである。ところがよくよく考えてみると、ヒトが走るとき、腕は地面に接していない。つまり、腕振りの作用は決して直接的には速く走ることには結びついていないのだ。そもそも、どうして速く走るときは腕を振るのだろうか？

腕振りの作用を身をもって体験するために、腕組みをして腕を振れない状態にして速く走ってみるとどうだろう。実際にやってみるとわかるのだが、速く走れば走ろうとするほど、腰のあたりがねじれて上手く走れないのである。

この現象を運動制御の観点から説明してみよう。両足がそろった状態から右足をすばやく前に出すことにより、鉛直軸周りにおいて下半身には（頭から見て）反時計回りに大きな回転力が生じる。しかしそのままでは、一度反時計回りにまわった下半身は、すぐに時計回りに転じることができず、すばやく左足を出すことができない。腕が自由に振れる場合は、腕を振ることで上半身に時計回りの回転力を生じさせ（図1, 2）、下半身との回転力とのバランスをとって快適に走ろうとする。ところが、腕組みをして腕が振れない場合、上半身は1つの塊となるので、上半身全体を時計回りに回転させることでしか下半身の回転力とのバランスをとれないのである。腰がねじれるように感じるのはこういうわけなのだ。

以上の説明からわかることは、速く走るときには、下半身と上半身の鉛直軸周りにおける回転のバランスをとるために、腕振りが必要不可欠であるということである（1）。しかしだからといって、速く走るためには、腕を大きく、速く振れば振るほどよいというわけではないことは、ここまで読んでくださった読者の方ならお気づきのことだろう。速く走るための腕振りの重要なポイントは、下半身の回転力とのバランスをとるために、上半身の回転力を生み出すことなのである。

実際、腕振りが出来ない状況で速く走ろうとするためには、肩を垂直軸周りに大きく回転させることで、下半身の回転とのバランスを取ろうとする動作が確認されている。Fujiiら（2）は、バスケットボール選手にドリブル走と単純走を行わせた結果、単純走に比べドリブル走で肩の回転を大きくしたことを明らかにした。さらに、単純走に比べドリブル走で走速度が落ちない被験者ほど、肩を大きく回していたことが示された。バスケットボール選手は、速い走速度でドリブルをしたいのだが、同時に上

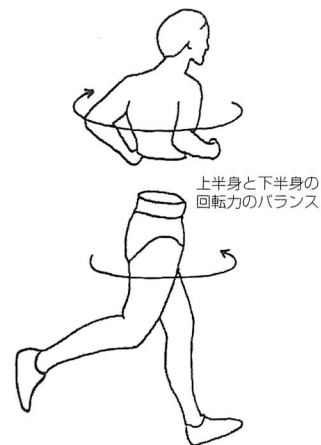


図1：走動作時における上半身と下半身の回転の概念図。下半身の回転力を打ち消すように、上半身は逆向きの回転力を生み出す。(Hinrichs RN. Upper Extremity Function in Running II: Angular Momentum Considerations. International Journal of Sport Biomechanics, 3: 242-263, 1987.より改変引用)

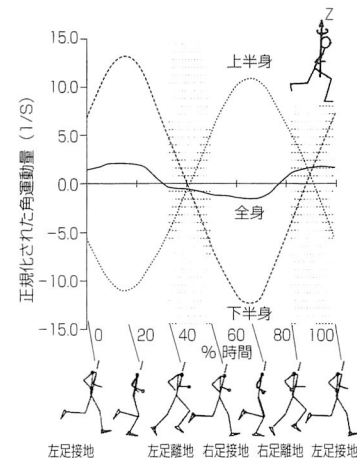


図2：走動作時における上半身と下半身、全身の角運動量（被験者の身長<sup>2</sup>と体重で割って正規化した）の時系列データ。図1を支持するように上半身と下半身の角運動量は逆位相である。(Hinrichs RN. Upper Extremity Function in Running II: Angular Momentum Considerations. International Journal of Sport Biomechanics, 3: 242-263, 1987.より改変引用)

肢で正確にボールをコントロールしなければならないため自由に腕が振れないのである。このジレンマを克服するために編み出されたのが、この肩を大きく回転させるという工夫なのかもしれない。

腕を振らなくても速く走ることのできる球技選手が存在することは、その球技の試合を見たことのある者ならだれもが納得することだろう。その事実から、腕振りの役割は下半身の回転力とのバランスをとることであり、速く走ようになるためには、自分の感覚の中で脚の動きとうまくバランスをとる（協調する）腕振りを習得できるように、繰り返し練習することが大切であるということがいえる。

とはいっても多くの人がいる交差点で、いきなり腕を大きく振って走り出すのは危ないからやめておくのが賢明であろう。

[藤井 慶輔]

### ■参考図書

金子公有、福永哲夫編、バイオメカニクス、杏林書院、2004。

### ■引用文献

- (1) Hinrichs RN. Upper Extremity Function in Running II: Angular Momentum Considerations. International Journal of Sport Biomechanics, 3: 242-263, 1987.
- (2) Fujii K et al. Skilled baseball players rotate their shoulders more during running while dribbling. Percept Mot Skills, 110: 983-994, 2010.