

中京大学博士審査学位論文

大学院体育学研究科

反応者の運動制御の背景にある動き出しと情報伝達の仕組み

The mechanisms for initiation of movement and information transfer
behind motor control of the reactors

2021年 3月 19日 学位授与

中京大学大学院体育学研究科体育学専攻

若月 翼

目 次

第1章 緒言	1
1.1. 序論 反応者は先導者に勝利し得るか	1
1.2. 文献研究	4
1.2.1. 対人動作における動き出し（観点1）	5
A. 手部運動と全身運動の違い（問題点1）	5
B. 動き出しの定義（問題点2）	8
1.2.2. 先導者-反応者間における情報伝達（観点2）	10
A. 運動共感という概念の導入	10
B. 引き込みとは異なる二者間の同期	11
1.3. 検討すべき課題と研究目的	15
 第2章 全身運動におけるボーアの法則とその生成メカニズム	 17
2.1. 目的	17
2.2. 方法	19
2.2.1. 実験対象者	19
2.2.2. 実験内容	19
A. 実施タスク	19
B. 条件と手順	20
C. データの取得	22
2.2.3. 分析方法	22
A. サイドステップのパフォーマンス変数	22

B. 統計処理	23
2. 3. 結果	24
2. 3. 1. エラー試技	24
2. 3. 2. サイドステップ動作	24
2. 3. 3. サイドステップのパフォーマンス変数	26
2. 4. 考察	30
2. 4. 1. サイドステップにおけるボーアの法則	30
2. 4. 2. 力発揮パターンの違い	30
2. 4. 3. ボーアの法則を構成する3つの局面	32
2. 4. 4. 両動作の運動制御様式	34
2. 5. 本章の結論	35
第3章 運動共感の発生に伴い自己-他者間で伝達される運動情報	37
3. 1. 目的	37
3. 2. 方法	40
3. 2. 1. 実験参加者	41
A. 実験対象者	41
B. 実験協力者（モデル）	41
3. 2. 2. 実験内容	42
A. 試技の種類	42
B. 条件と手順	42
C. データの取得	44
3. 2. 3. 分析方法	44
A. 分析の流れ	44

B. 類似性の評価方法と定義	44
C. 算出項目	45
3. 3. 結果	46
3. 3. 1. 跳躍高の変化パターン	46
3. 3. 2. 調整局面に関与する仕事率	48
A. 力波形から推定する跳躍高の調整局面	48
B. 調整局面に関与する関節	50
3. 3. 3. 跳躍高の変化パターンと類似する関節	51
3. 4. 考察	53
3. 4. 1. 動きの生成レベルで発生する運動共感	53
3. 4. 2. 自己と他者をつなぐ力学的運動情報	55
A. 自己-他者間で伝達される運動情報	55
B. 仕事率における正負の解釈	56
C. 仕事率と親和性の高い動き	56
3. 5. 検証実験（実験2）	56
3. 5. 1. 方法	57
A. 実験対象者	57
B. 実験内容	57
3. 5. 2. 結果	58
A. 跳躍高の変化パターン	58
B. 最大仕事率の変化パターン	59
3. 5. 3. 考察	60
3. 6. 本章の結論	62

第4章 総括	63
4.1. 動き出しと情報伝達の観点からみた反応者の運動制御	63
4.2. デジタルデータを扱うボタン押し実験の再考	66
4.3. 反応者が先に運動を完了させる仕組みの概念形成	69
4.4. 本研究の限界と今後の課題	73
第5章 結論	75
論文の構成	76
謝辞	77
文献	80

第1章 緒言

1.1. 序論 反応者は先導者に勝利し得るか

量子力学の父として知られ、1922年にはノーベル物理学賞も受賞したニールス・ボーア (Niels Bohr, 1885–1962) は、自身の好んだ西部劇における銃決闘シーンから、ある興味深い仮説を導いた。それは、先に動き出す悪党をヒーローが打ち負かす特徴的な描写は映画を面白くするための単なる演出ではなく、人間が有する何らかの運動特性によって引き起こされる必然的な事象であろう、というものである。つまり、決闘シーンを、人間の特性をうまく表現している描写と洞察したのである。そして実際に、ボーアは当時の同僚であったジョージ・ガモフ (George Gamow, 1904–1968) と玩具の拳銃を用いて簡易実験を行い、ヒーロー、すなわち反応者として全ての決闘に勝利したことが、Cline (1987) によって紹介されている。

ボーアによる仮説の提唱からおよそ100年、Welchman et al. (2010) はこの仮説を、「自身のタイミングで動き出す運動（意図的動作）と外部刺激に反応して動き出す運動（反応的動作）の運動時間の違いに関する問題」と捉えて西部劇の決闘をボタン押し実験に簡略化し、両者の運動時間（movement time: MT）を測定することで仮説の検証を試みた。この実験では、向かい合った2名の対象者がそれぞれの手元に設置された3つのボタンを順に、できるだけ速く押していく（図1-1a）。両者共、ボタン1を押した状態から試技を開始させ、1→2→3→1とボタン1に戻ってきた時点でその試技は終了となる。その際、Initiator (player 1, 先導者) が先に動き出し、それに反応してReactor (player 2, 反応者) が動き出す。図1-1bは実験の時間的概念図であり、この図では、両者のボタンの状態が0と1のデジタル信号によって表されている。ボタンが押されている状態を1、押されていない状態が0で表されているた

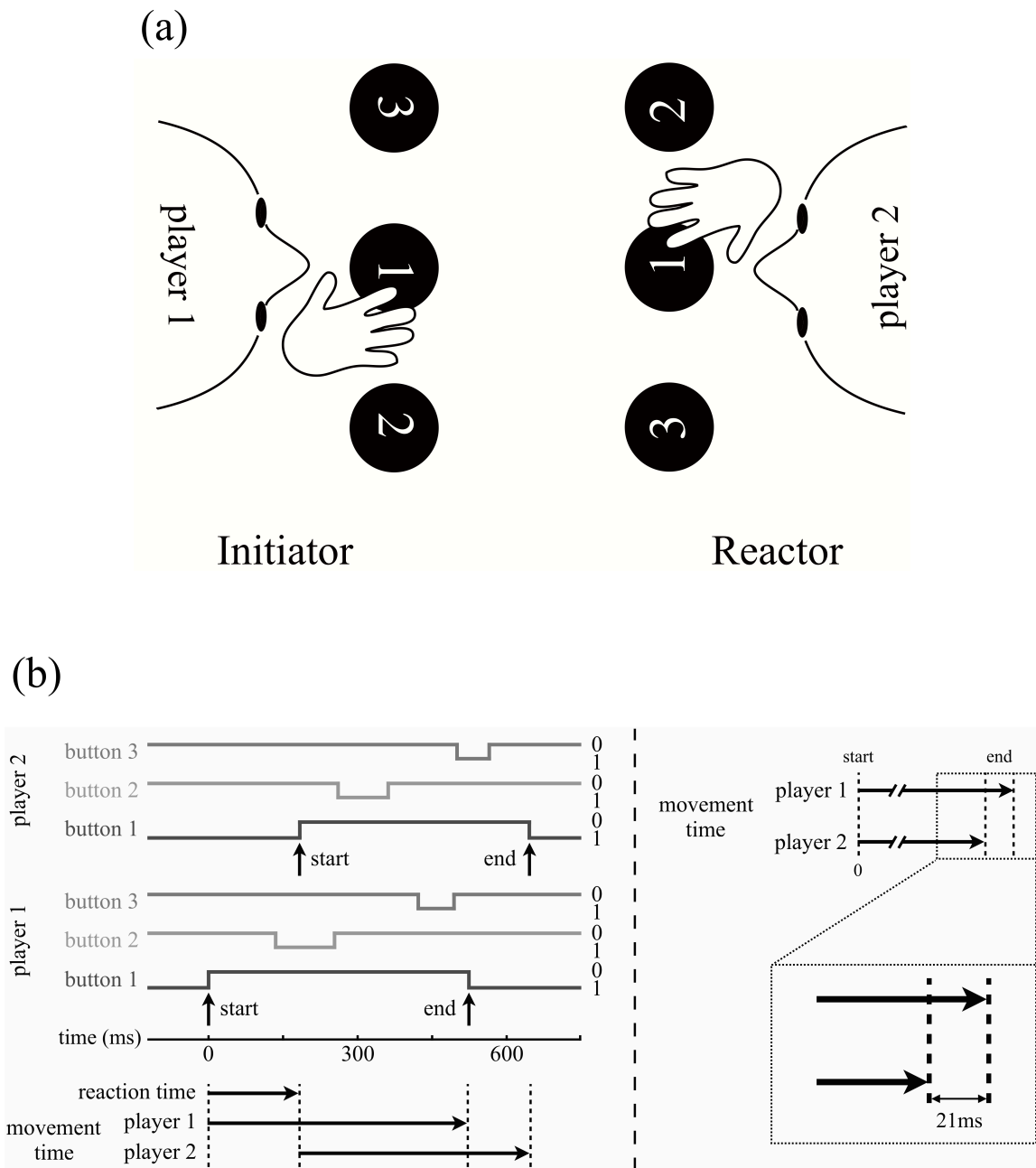


図1-1. (a) 実験のイメージ図. 向かい合った2名の対象者は、手元に設置された3つのボタンをできるだけ速く、1→2→3→1の順に押していく（ボタン1を押した状態から開始）. Reactor（player 2, 反応者）はInitiator（player 1, 先導者）が動き出したことに反応して動き出す. **(b) 実験の時間的概念図.** ボタンが押されている状態を1, 押されていない状態を0で表し、下のパネルは両者の運動時間（MT）と反応者の反応時間（RT）を矢印の長さで表している. MT自体は反応者の方が短い、約200msのRTが影響して先に試技を完了させているのは先導者であることが分かる（Welchman et al., 2010を改変）.

め、ボタン1が0を示す時間（startからendまで）がそのままMTとして検出される。この実験の結果、先導者の動きに反応して動き出す反応者のMTは、自身のタイミングで動き出す先導者のMTよりも有意に短いことが確認された。図1-1bの右図は、矢印の長さで示された両者のMTのstart時点を0msに揃え、その差を示したものである。この図からも分かるように、両者のMT間には平均して21msの差が生じている。一見、これでボーアの仮説が支持されたように思われるが、ここで重要なのはMTの定義である。MTは、動作自体が開始してから完了するまでの時間であるため、これには反応者側が負う反応時間（reaction time: RT）が含まれていない。図1-1bの左図下部のパネルでは、両者のMTおよび反応者のRTがそれぞれ矢印の長さで表されている。RTは、先導者の手がボタン1を離れてから反応者の手がボタン1を離れるまで（player 1のstartからplayer 2のstartまで）であるが、これが平均207msあったと報告されている。つまり、反応者がMTに21ms程度のアドバンテージを得たとしても、その約10倍に値するRTはカバーしきれない。よって彼らは、西部劇のように、悪党の動きを視覚的に捉えてから動き出すヒーローが勝利を収めるという結末は滅多にあり得ることではない、と結論付けるに至った。つまり、意図的動作のMTよりも反応的動作のMTの方が短くなるという重要な知見は得たものの、ボーアの仮説自体は退ける結果となった。

さて、Welchmanらが行った実験のような先導者と反応者という対人関係は、スポーツにおける1対1の状況に置き換えることができる。そしてそこでは、反応者が先に運動を完了させる場面もしばしば観察される。その代表例が、ボクシングにおけるカウンターパンチや剣道における出鼻技である。これらの技は先導者よりも反応者の方がより早く運動を完了させることにより生じるが、もしWelchmanらの示した結論に従うとすれば、先に攻撃を仕掛けた方、すなわち先導者が必ず勝利を収めることになる。しかし実際の選手達による振る舞いを観察していると、彼らは小さなジャブを入れながら相手の様子を伺い、むやみやたらに攻撃

を仕掛けず静かな駆け引きから始める。このことは、1対1の攻防が専門的な技術や身体的特徴の優劣関係だけでなく、意思決定（Cañal-Bruland, 2009; Tsutsui et al., 2019）や欺瞞（Brault et al., 2010, 2012），そして予測（Savelsbergh et al., 2005; Fujii et al., 2014）等の認知的要因がいくつも関与する複雑な営みであることを示唆している。つまり、彼らは相手に情報を与えると同時に相手の動きから情報を獲得するといった情報の伝達を絶え間なく行っていると言える。よって、このような複雑な営みにおいては、ボタン押しに簡略化されて導き出されたWelchmanらの結論が必ずしも当てはまるとは限らない。

本研究では、この複雑な対人関係をなす1対1の攻防が成り立つ仕組みの一端を明らかにするために、対人スポーツにおける反応者の運動制御の背景にある2つの観点——対人動作における動き出しと先導者-反応者間における情報伝達——に焦点を当て、それらの観点に関連する先行研究の現状を明らかにする。次に、それらの先行研究から明らかにされた問題点をもとに検討課題を導出し、第2章および第3章にてそれらの課題を実験的に検証する。そして第4章では、それらの実験結果をもとに、先導者よりも先に運動を完了させる反応者の運動制御に関する総括を行う。

1. 2. 文献研究

ボーアが提唱した仮説をきっかけとして始まった先導者と反応者の対人関係に関する検討は、Welchman et al. (2010) の実験的な検証により、反応者が勝利を収めることは困難であるという結論で収束を迎えようとしていた。しかし、複雑な対人スポーツの場面においてはこの結論が当てはまらない、すなわちボーアによる仮説を肯定する事象がしばしば観察される。本節では、この実験によって導かれた結論と実場面との間にある矛盾に着目し、反応者の

運動制御の背景にある対人動作における動き出し（観点1）と先導者-反応者間における情報伝達（観点2）という2つの観点に関する先行研究を概観することで、それらの先行研究から問題点および検討課題を導出する。

1. 2. 1. 対人動作における動き出し（観点1）

Welchman et al. (2010) により反応者のMTが先導者のそれよりも短くなることが報告されて以来、この運動特性は“ボーアの法則 (Bohr's law)”と名付けられ、その後も本特性が発現する条件 (Pinto et al., 2011) や対象動作の熟練度による違い (Martinez de Quel & Bennet, 2014) といった様々な観点から検討がなされてきた。しかし、それらの研究によって報告された知見を対人スポーツという複雑な営みに焦点を当てた本研究に適用させるためには、解決すべき問題点がいくつかある。本項では、それら先行研究に共通する2つの問題点を明らかにする。

A. 手部運動と全身運動の違い（問題点1）

実験心理学における運動制御に関する実験は、できる限りの抽象化が求められ、その要求は多くの場合、手を伸ばすリーチング運動、いわゆる“手部運動 (upper-limb movement)”を用いることにより満たされている。この運動は、身体重心に対する相対運動とも言い換えることができ、ボーアによる仮説をボタン押し実験で検証したWelchman et al. (2010) も、この運動により前述した結果を得たと言える。手部運動による実験は、実験室という厳密な環境で実施することができ、さらに一度に取得できるデータの量という点でも大変優れた実験タスクである。しかし、これによって得られた結果を、全身運動 (whole-body movement) を基本とするスポーツ動作にそのまま適用させるのは不適切であると考えられる。その最も大きな理由として、空中局面を伴う全身運動では、速度と正確性のトレードオフ関係が成り立た

ない場合がある，ということが挙げられる．運動の速度を増加させるとその正確性が損なわれ，逆に正確性を増加させるとその速度が損なわれる，という人間の運動特性を表す速度-正確性のトレードオフは，Woodworth（1899）が提唱して以来，Fitts（1954）により数理モデル化され（フィッツの法則），最も基本的で重要な一般概念の一つとして認められるに至っている．この法則によれば，たとえ針の穴のように小さな目標であっても，速度を極限まで減少させれば（もしくは動きを止めてしまえば）正確性を維持できるとされる．しかしながら，ランニングや跳躍運動のように両足が離地する局面（空中局面）を伴う動作の身体重心は，一度離地すると放物運動，すなわち等加速度運動に切り替わる．つまり，空中では最低限の速度が必要となるために静止することができず，ある境界を超えると速度-正確性のトレードオフが適用されない可能性が高いのである．また，動作自体には空中局面を伴わなくても，投球動作のように物体に初速を与えなければならない動作でも同様のことが言えよう．中尾ら（2018）は，バスケットボールのスリーポイントシュートにおける運動時間を長く（運動の速度を低く）設定したからといってシュート成功率が向上しなかったことから，スポーツの動作では必ずしも速度と正確性がトレードオフの関係にあるとは言えないと述べ，熟達したスポーツ選手には個々に最適な運動時間（ここでは速度と同意）がある，と認知的な観点から考察をしている．しかしその理由に加えて，ボールに初速を与えるための一定の運動速度を要するため，といった力学的制約に由来する理由もあると考えられる．

他にも，手部運動と全身運動の違いはいくつかある．第一に，運動の自由度に関する違いである．運動の自由度を考える際，まずはその動作に関与する関節の数に着目する．手部運動（手を伸ばすリーチング運動）は上肢による運動であるため動作に関与する関節が少なく，多く関与したとしても，手関節に加えて肘関節と肩関節までである．身体運動における関節の自由度は，デカルト座標系（ x , y , z の3軸からなる座標系）における可動軸の数と言い換え

ることができるため（山田, 1997b）, 1つの関節が持つ自由度は最大でも3となる. これを3つの関節が関与する手部運動で考えると, 可動軸を2つ持つ手関節の自由度は2, 肘関節は1, 肩関節は3, そして前腕の1（捻る動き）が加わり, これらを合計すると手部運動の自由度は7と求まる. それに対して, 全身運動は下半身を含む全ての関節が関与するため, およそ100の自由度を持つとされる. そして, これらの関節を動かす筋, さらにそれらの筋を動かすために動員されるニューロンの数は膨大なものとなる. ゆえに, この自由度の違いは運動制御の困難度に影響を与える（Bernstein, 1967）. これに関連して, Oulasvirta et al. (2013) は, 全身運動の制御は手部運動の制御よりも処理しなければならない情報量が多くなるという観点から, 手部運動によって検討されてきたフィッツの法則を全身運動で検討している. このように, 自由度が高くなると運動制御の困難度は増加するが, その一方で素早く移動するための様々な戦略を用いることが可能となる. さらに, 動作に関与する関節の数の違いは必要とする力の大きさにも違いを生じさせる. 手部運動は動作に関与する部位の質量が小さいがゆえに必要とする力も小さいが, 全身運動は重心そのものを移動させるため, より大きな力が必要である.

続いて, 身体重心が移動しない手部運動は外力ではなく, 内力のみで成り立つという特徴を持つ. 内力とは物体の内部で作用する力のことであり, 身体運動における筋力である. 一方, 外力は物体の外部から加わる力のことであり, 重力や地面反力を意味する（深代ら, 2003）. イメージとして, 時計を用いると分かり易い. 時計は, 箱の内部でぜんまいばねなどの動力源があり針を動かしているが, その動力源によって時計自体の位置に変化を与えることはできない. この針を動かすことこそ身体運動における手部運動であり, 時計自体を動かすことこそ身体重心の移動を伴う全身運動であると言える. つまり, 身体重心そのものを動かそうとすれば, 身体の外部にある何らかの物体に力を加え, 作用・反作用の法則（運動の

第3法則)より, 加えた力と同じだけの力を得る必要がある. 言い換えれば, 手部運動が空中からでも行える運動であるのに対して, 空中局面を伴う全身運動は接地した状態から開始し, 外部の物体, 主に地面との相互作用を要するのである. Miura et al. (2011) は, 手指運動を主とした部位運動において確かめられてきた“引き込み”と呼ばれる現象 (詳しくは1.2.2のBを参照) を, 立位における膝関節の屈伸運動に適用させた. これは一見些細な違いのように思われるが, この運動は地面との相互作用により生じさせた力および重力, すなわち外力によって自身の身体重心を上下に動かす全身運動と言い換えることができ, 手部運動と区別できることがオリジナリティの一つとして評価されている.

以上のように, 手部運動とスポーツ動作が基本とする全身運動には根本的な相違点が多く, 困難度は高いが素早く移動するための様々な戦略を用いることのできる全身運動では, 手部運動における結果とは異なる結果が得られる可能性がある. よって, これまで手部運動のみで検討されてきたボーアの法則を身体重心の移動および空中局面を伴う全身運動で再検討する必要がある (課題1) .

B. 動き出しの定義 (問題点2)

運動時間を算出する際, その運動が開始された時点, すなわち動き出し時刻をより適切に検出することは最重要かつ困難な作業の一つと言える. その作業を容易にする代表的な手段がボタン押し実験であり, この実験を用いれば, デジタル信号のONとOFFで機械的に動き出しを検出することができる (図1-1bを参照) . ボーアの法則に関するほとんどの研究でも, この方法を用いて動き出し時刻を定義している. しかし, 動き出し (データの立ち上がり) の検出方法については問題提起やそれによる新たな方法の開発が盛んに行われていることから (Hodges & Bui, 1996; Panagiotacopoulos et al., 1998) , 細心の注意を払って検討すべきと考えられる. 例えば, Koike & Yamada (2007) は, 筋に伸張反射が生じた際の筋活動量

(EMG) データの立ち上がりをより厳密に検出するために、それまで多用されていた検出方法を見直し、離散ウェーブレット変換とスミルノフの棄却検定を組み合わせる新たな方法を考案している。そして、同じ試技のEMGデータの立ち上がりを従来の方法と新たな方法で検出し、両者を比較した結果、後者の方が $4 \pm 28\text{ms}$ 早く、すなわちより敏感に立ち上がりを検出できたと報告している（小池・山田, 2007）。

以上を踏まえ、改めて動き出しをデジタル信号で検出する方法は適切であろうか。前提として、“動き”はデジタルでなくアナログであり、0か1かという2つの状態で表せるほど単純なものではない。さらに、運動の時系列は加速度（力）、速度、位置の順に立ち上がり、位置と速度の間には $1/2\pi$ 、そして位置と加速度の間には π だけの位相ズレ、すなわち遅延が生じる。なぜなら、動きとして現れる速度と位置はそれらを生成する力の積分値であり、積分の伝達関数 $1/s$ は全ての周波数を半周期遅らせるという周波数特性を有するからである（山田・若月, 2018）。つまり、ボタンを押すことを表す位置の変化はその動作に関与する力によって決定される最終的な結果であり、動きそのものはこれまで定義されてきたボタンを押して信号が切り替わる瞬間よりも前に開始されているのである。参考として、100分の1秒を争う陸上競技の短距離種目における反応時間の算出やフライングスタートの判定は、位置や速度の変化ではなく、スターティングブロックに加わる力によってなされている（Otsuka et al., 2017）。時間に最も厳しいとも言えるこの現場において、動き出しの検出に力の立ち上がりが採用されていることは、人間の動きにおける力の重要性を強く伺わせる。

以上のように、ボタン押し実験では力がボタンに作用してから手がボタンを離れるまでの時間と動態が分析から除外されてしまうことから、動きを生成する力のデータから動き出し時刻を定義し、より高い精度でMTを算出し直す必要がある（課題2）。

1. 2. 2. 先導者–反応者間における情報伝達（観点2）

観点1では，対人動作における動き出しの観点から，ボーアの法則を検討してきた先行研究に共通する問題点を2点示し，新たに検討すべき課題を導出した．この観点は，両者の運動時間（MT）に着目したWelchman et al.（2010）と同様の着想と言えるが，前述したように，反応者にとってより重要な課題はボーアの法則によって短縮されるMTよりも大きな反応時間（RT）の影響であると考えられる．そこで本項では，先導者と反応者の対人関係に，情報伝達形態の一つである運動共感という考え方を導入し，RTが短縮される可能性を検討していく．

A. 運動共感という概念の導入

刺激や信号が発せられてからその刺激に対する反応が生じるまでの時間と定義されるRT（Brebner & Welford, 1980）に関する研究は，19世紀初頭から始まり（大山, 1985），刺激の種類や実験方法，そして実験対象者などを変え，現在でも行われている．ゆえにRTを完全に特定することは困難であるが，仮に20–29歳を対象として光刺激に対するボタン押し課題で測定された単純反応時間であれば，およそ180–200msとされる（Galton, 1899; Fieandt et al., 1956）．そして，この時間には生理学的な限界がある，すなわちこれ以上の短縮は見込めない時間として扱われているが，運動学と呼ばれる分野で盛んに研究が行われている運動共感の概念を導入することで，RTが短縮される可能性がある．

まず，運動学とは旧東ドイツの体育教師であったクルト・マイネル（Kurt Meinel, 1898–1973）が自身の指導経験から発展させた研究分野であり，運動共感（Mitvollziehen der Bewegung）およびそれを生じさせる能力は，彼の上梓した『運動学』において指導者に不可

欠な資質の一つとして紹介されている (Meinel, 1960) . 運動共感とは、運動実施者の運動を一人称的に観察することで、あたかもその観察対象に乗り移って自己が運動しているように感じる感覚のことであり、本書の訳者である金子は、これなしには単なる空虚な指示語による指導となってしまう、としている (金子, 1981) . それではなぜ、指導者に必要とされる運動共感がRTを短縮させる可能性に関与すると考えられるのかと言え、この感覚が運動実施者との時間遅れなしに生じるという特徴を有するからである (山田, 2011) . この興味深い特徴は骨格筋に生じる弱いインパルスによって確認することができ、このことから自己と他者に生じる同時体験とも定義される (金子・朝岡, 1990) . つまりこれは、運動実施者による運動と観察者による仮想的な自己運動が同期する仕組みであり、外部刺激が与えられてからボタンを押すといった刺激提示媒体と被提示媒体の位相が同期しない刺激反応型とは異なる、対人動作特有の情報伝達形態と言える. そこでここからは、観察対象の運動と自己の仮想的な運動が同期するという運動共感の特徴に着目し、他者との動きの同期に関するいくつかの先行研究を振り返り、そこから問題点と検討すべき課題を明らかにする.

B. 引き込みとは異なる二者間の同期

他者との動きの同期現象を捉える研究は、これまで生理学、心理学、そしてスポーツ科学の分野を中心に行われてきており、それらの研究はいずれも、自然界における自己組織化理論を基本原理としている. 自己組織化 (self-organization) とは、システムのマクロな秩序生成が制御系からの指令によってなされるのではなく、システムを構成する自律性を持つ複数の要素の相互作用によって自然発生的に生成されることである (山田, 1997a) . そして、その特徴的な物理現象として、相転移 (phase transition) が挙げられる.

まず、Kelso (1984) は、身体運動の制御に自己組織化理論でアプローチする先駆的な実験を行った. 彼は、被験者に左右の腕または人差し指を180度の位相差で連続的に動かしてもら

い、徐々に動かす周波数を増加させていくと、ある周波数で位相差が0度になる、すなわち逆位相から同位相への相転移が生じることを示した。このように、周期的な運動に秩序が生じて運動の位相が同期することを、“引き込み”という。

この引き込みによる各身体部位の同期現象は、個人内における協調性をモデル化しただけでなく (Haken et al., 1985) , 個人間における動きの協調性にも積極的に応用され (Richardson et al., 2007; Okazaki et al., 2015; Okano et al., 2017) , 特にスポーツ科学の分野では、近年のトップトピックの一つにまで発展してきた。例えば、剣道における駆け引き中の二者間の距離で同期パターンを分類した研究 (Okumura et al., 2012) や、陸上競技100m走の同じレースにおけるウサイン・ボルトとタイソン・ゲイのピッチに断続的な同期局面があることを報告した研究 (Varlet & Richardson, 2015) (図1-2) は、競技スポーツで観察される二者間の同期を非線形振動子の引き込みとしてうまくモデル化した研究と言える。しかしその一方で、これらの研究対象はいずれも安定した周期運動であることを前提としており、自己組織化の特徴である相転移を用いてスポーツの一側面をモデル化したに過ぎないという見方もできる。モデルはあくまで対象の近似であり、それを構築する過程でいくつもの条件を設けたにも関わらず、一旦モデル化してしまうと、そのモデルを用いて全てを説明しようとする解釈がなされてしまう (山田・若月, 2018) 。身体運動の自己組織化モデルを競技スポーツにおける二者の対人関係に適用させ、対象を演繹的に観察する多くの研究は、この問題を抱えていると言える。Okumura et al. (2012) は同期パターンの不連続な変化に着目しているが、安定が基本であり、その安定の移り変わりが不連続とされている。勝敗に関わるほとんどの要素が動き出しの一瞬に集約されるとも言える競技スポーツでは、周期的で文脈のある状態で起こる同期ではなく、単発的で不連続な状態で起こる同期を検討すべきと考える。言い換えれば、相手を出し抜くことを目的とした状況においては同じ同期であっても、他者との協

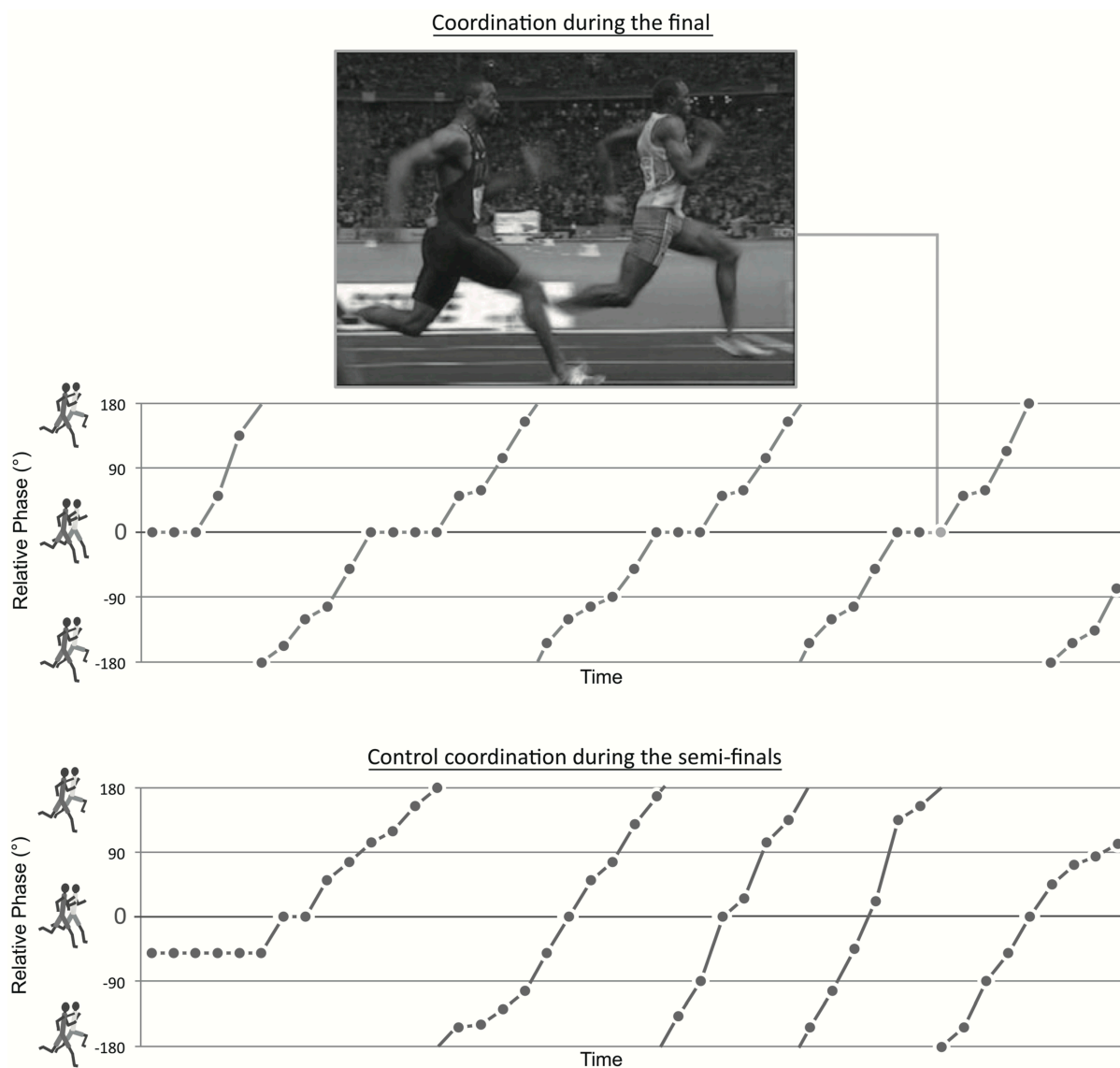


図1-2. 第12回IAAF世界陸上の100m決勝（上）および準決勝（下）におけるウサイン・ボルトとタイソン・ゲイのステップ間の時間の相対位相。縦軸の 0° 付近は両者のステップが時間的に同期していることを示している（上部の写真）。両者が同じレースで走った決勝では 0° 付近で位相のロックが発生しているが、両者が別のレースで走った準決勝ではそれが発生していないことが分かる（Varlet & Richardson, 2015）。

調 (coodination) ではなく競争 (competition) の中で生まれる同期, さらにはその同期が発生する瞬間や抜け出す瞬間に着目すべきであろうという問題提起である. そして, 前述した運動共感による二者の同期システムは周期運動を前提としないことから, この単発的な動き出しの同期を生み出すシステムに関与する可能性があると言え, 競争の中で同期が発生する瞬間の検討に適していると考えられる.

しかしながら, 前述したように運動共感は実際の指導現場から導き出された主観的な概念であるがゆえに, 自然科学として検討される機会が少なく, 実験的な検証がほとんどなされていないのが現状である. さらに, 運動共感が生じると, カーペンター効果 (別名, イデオモーター効果) (Carpenter, 1852) と呼ばれる生理現象に依拠して運動観察者の骨格筋に弱いインパルスが生じるとされているが (金子・朝岡, 1990), 筋が反応するだけでは動きを生成することはできない. したがって, 運動共感を情報伝達のシステムとして検討し, RTが短縮される仕組みとの関与につなげていくためには, 動きの生成レベルで運動共感が発生することを実験的に示し, その際に運動実施者-運動観察者間で伝達される運動情報を特定する必要がある (課題3) .

1. 3. 検討すべき課題と研究目的

本研究の目的は，反応者の運動制御を対人動作における動き出しと自己-他者間における情報伝達という2つの観点から検討し，1対1の攻防が成立するメカニズムの一端を明らかにすることであり，この目的にしたがって先行研究を概観した結果，以下に示す3つの課題が導かれた．

- 1) ボーアの法則を身体重心の移動および空中局面を伴う全身運動で再検討する必要がある（課題1）．
- 2) 運動時間の算出に関わる動き出し時刻の定義を見直し，より高い精度でボーアの法則を再検討する必要がある（課題2）．
- 3) 運動共感の発生を動きの生成レベルから検証し，反応時間の短縮に関与する他者の運動情報を検討する必要がある（課題3）．

以上の課題を検討するために，以下に示す2つの研究を行う．

研究1. 全身運動におけるボーアの法則とその生成メカニズム（課題1および課題2）

身体重心の移動および空中局面を伴う全身運動の例として複数歩を要するサイドステップ動作を扱い（課題1に対応），さらに地面反力の立ち上がりから動き出し時刻を求めることにより（課題2に対応），対象とする動作と運動時間の算出方法がボーアの法則に及ぼす影響を検討する．さらに，取得した地面反力および身体座標データを用いて動作を詳細に分析することにより，両動作の速度生成や力発揮のパターンの違いを含むボーアの法則の生成メカニズムを検討する．

研究2. 運動共感の発生に伴い自己-他者間で伝達される運動情報（課題3）

運動実施者の運動を一人称的に観察することでその対象と同期してあたかも自己運動をしているかのような感覚を生むことが知られており、この感覚は運動共感と呼ばれている。そこで本研究では、垂直跳びの跳躍高調整課題を用いて運動共感の発生を動きの生成レベルで実験的に検証し、さらにそれらの動作を詳細に分析することにより、その際に自己-他者間で伝達される運動情報、すなわち反応時間の短縮に関与する運動情報を検討する（課題3）。

以上の研究をもとに、対人スポーツにおける反応者の運動制御を実際の動きとその際に伝達される運動情報の観点から包括的に検討する。

第2章 全身運動におけるボーアの法則とその生成メカニズム

2. 1. 目的

人間の日常動作は、意図的動作（intentional movement）と反応的動作（reactive movement）に大きく分けることができる。前者は自身のタイミングで動き出す内発的な動作であり、後者は光や音などの外部刺激に反応して動き出す外発的な動作である。近年、これらの動作の違いに関する研究は多くの分野で行われており、特に生理学的分野からのアプローチが多い。例えば、神経生理学（Kurata & Tanji, 1985; Romo & Schultz, 1987; Mushiake et al., 1991; Maimon & Assad, 2006）、fMRI等を用いて脳機能に着目した脳神経科学（Deiber et al., 1999; Jenkins et al., 2000; Cunnington et al., 2002; Waszak et al., 2005）、EMGを用いて筋肉の活動に着目した電気生理学（Obhi & Haggard, 2004）、さらにはパーキンソン病患者に着目した医学研究（Jahanshahi et al., 1995; Siegert et al., 2002）などがその一部である。そしてこれらの研究は、これら2つの動作がそれぞれ異なる神経基盤を有していることを示唆している（Hughes et al., 2011）。例えば、前補足運動野は反応的動作よりも意図的動作の方がより早く、より広範囲に渡って活性化することが知られており（Cunnington et al., 2002; Soon et al., 2008）、このような神経基盤の違いは、動作自体にかかる時間（運動時間：MT）の非対称性にも影響を与える。

前章で述べたように、両動作のMTの違いに着目した実験心理学的研究の多くは、ノーベル賞受賞者であるニールス・ボーア（1885–1962）が提唱した仮説をきっかけとしている。この仮

説の検証に最も早く着手したWelchman et al. (2010) は、対人のボタン押し実験によって意図的動作のMTよりも反応的動作のMTの方が平均21ms短くなることを実験的に発見した。この運動特性はのちに“ボーアの法則 (Pinto et al., 2011)”や“ガンスリンガー効果 (La Delfa et al., 2013)”と名付けられ、現在も発現条件の検討を中心に研究が行われている。そして前章では、これらの先行研究に共通する問題点を2点明らかにした。

1つ目の問題点として、ボーアの法則に関する全ての研究はボタンを押す動作 (Welchman et al., 2010; Pinto et al., 2011; La Delfa et al., 2013; Roberts et al., 2017; Weller et al., 2018) や空手における突き動作 (Martinez de Quel & Bennett, 2014) といった身体重心に対する相対運動 (手部運動) を採用しており、フィッツの法則が適用されるか否か、また運動の自由度が大きく異なるといった理由から、手部運動によって得られた結果をスポーツ動作が基本とする身体重心の移動および空中局面を伴う全身運動にそのまま適用させることは不適切であることを指摘した。そして2つ目の問題点では、動き出し時刻をボタン押し実験から機械的に検出されるデジタル信号で定義している点を指摘した。空手の突き動作を採用したMartinez de Quel & Bennett (2014) は、唯一動きに着目してアナログデータを用いているが、手部の最大速度をもとに動き出しを定義している。速度は動きを生成する力から $\pi/2$ だけ遅れて立ち上がるため、デジタル信号による定義同様、動き自体はすでに開始されていると言える。

そこで本章では、身体重心の移動および空中局面を伴う全身運動としてサイドステップ動作を採用し、さらに地面反力から動き出し時刻を定義することにより、対象とする動作と運動時間の算出方法がボーアの法則に与える影響を検討する。そして、取得した身体座標および地面反力データを用いて動作を詳細に分析することにより、ボーアの法則の生成メカニズムを力の発生から動作の変化までを含めて検討する。困難度は高いが素早く移動するための様々な戦略を用いることのできる全身運動では、手部運動における結果とは異なる結果が得

られる可能性があり，さらに意図的動作と反応的動作では神経基盤が異なる（Hughes et al., 2011）という示唆から，初速（両脚の離地速度，最大速度）の違いがボーアの法則の生成に大きく関与していると考えられる．

2. 2. 方法

2. 2. 1. 実験対象者

本実験には，健康な男性10名（年齢：22.0 ± 1.1歳，身長：176.5 ± 8.3cm，体重：73.9 ± 10.0kg）が対象者として参加した．参加者全員が，サイドステップを頻繁に用いるバスケットボール，ハンドボール，サッカーのうちいずれかの経験者であったため，本動作に慣れていた（経験年数：10.6 ± 2.1年）．表2-1に，対象者別の身体的特徴を示す．

本実験は，中京大学大学院体育学研究科倫理審査委員会の承認を得て行われた（承認番号：2017-11）．なお，実験開始前には参加者に対して本研究の目的と実験内容を説明し，書面によるインフォームドコンセントを得た．

2. 2. 2. 実験内容

A. 実施タスク

実験対象者は，少なくとも2歩以上のステップが必要なサイドステップタスクを実施した．採用されたサイドステップタスクは2歩以上を要し，垂直跳びなどの単発的な動作ではない点でWelchman et al.（2010）の実験タスクと類似している．

本タスクは，実験室内の地面に埋め込まれた2枚のフォースプレートに片足ずつ乗って構えた状態から，対象者自身の身長と同距離に引かれた目標線までできるだけ速く移動するとい

うものであった。なお、できるだけ速く移動することを重視するため、対象者に対して動作や姿勢（歩数や関節角度等）に関する指示は行わなかった。

B. 条件と手順

本実験では、上記のサイドステップタスクを以下に示す2つの条件で実施した。

- (1) 意図的動作条件（IMC）：実験者による合図後、対象者自身のタイミングで動き出す。
- (2) 反応的動作条件（RMC）：前方に設置されたLEDによる視覚刺激に反応して動き出す。

最低5回の練習試技を行った後、両条件を交互に10試技ずつ、計20試技実施した（IMC1→RMC1→IMC2→RMC2...IMC10→RMC10）。また、疲労の影響を排除するため、試技間には2分以上の休憩時間を設けた。図2-1に実験のセットアップを示す。

表2-1. 実験対象者の身体的特徴

Participant ID	Age (years)	Height (cm)	Weight (kg)	Specialized sports	Years of experience
1	24	170.5	54.1	Football	10
2	24	178.2	83.2	Basketball	16
3	22	162.3	58.7	Basketball	8
4	21	174.5	87.7	Handball	11
5	21	178.6	75.9	Handball	11
6	22	177.6	72.3	Handball	11
7	21	168.0	79.1	Handball	11
8	21	177.5	76.3	Handball	8
9	22	183.2	71.0	Basketball	10
10	22	194.2	80.5	Basketball	10
Total (mean ± SD)	22.0 ± 1.1	176.5 ± 8.3	73.9 ± 10.0		10.6 ± 2.1

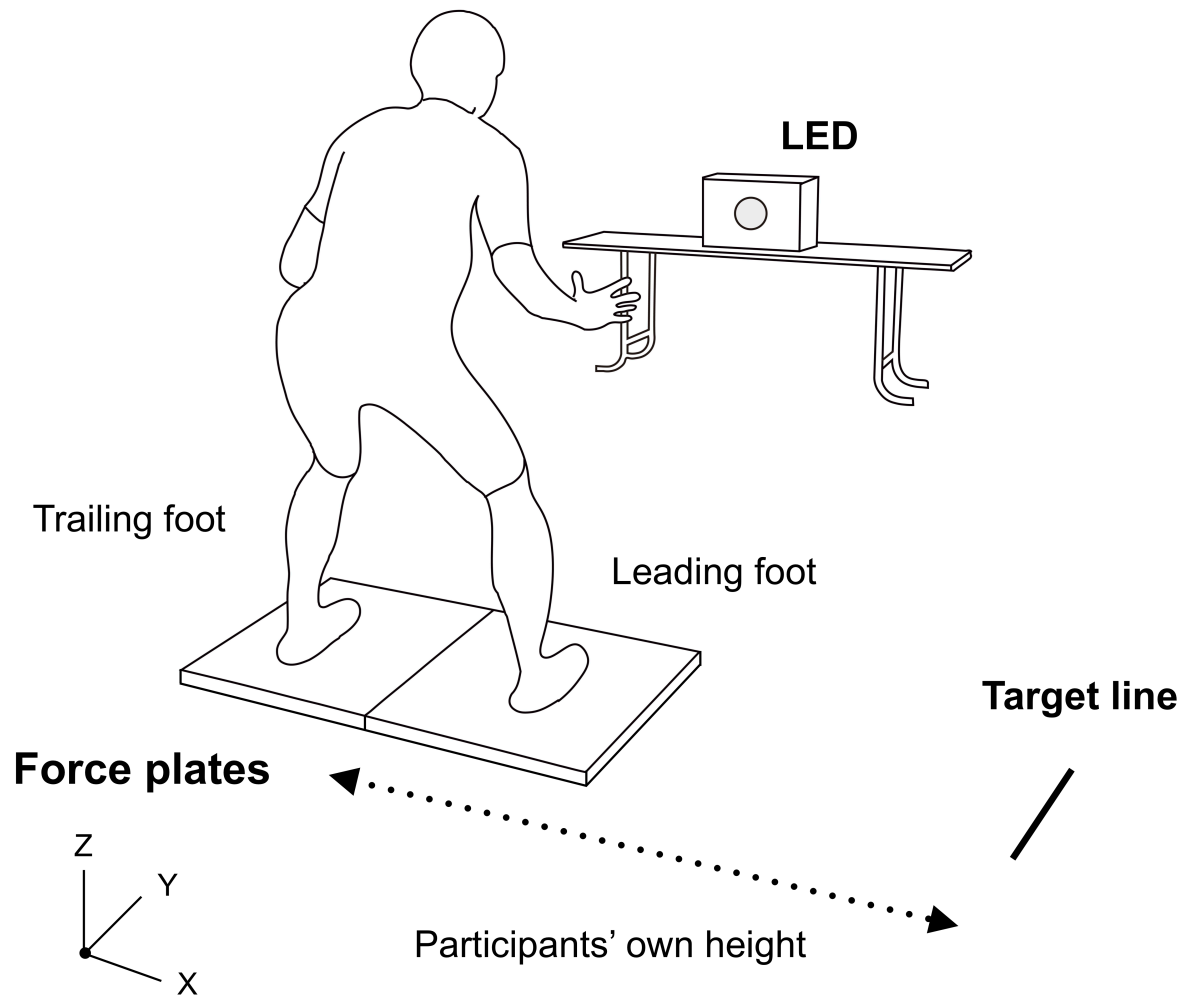


図2-1. 実験のセットアップ. 対象者は、2枚のフォースプレートに片足ずつ乗って待機している。その後、右方向へサイドステップを踏み、自身の身長と同距離にマークされた目標線までできるだけ速く移動する。なお、前方に設置されたLEDは反応的動作条件（RMC）でのみ点灯する。

C. データの取得

10台の光学式動作解析装置（Vicon MX, Vicon Motion Systems社製, 250Hz）および2枚のフォースプレート（9287C, Kistler社製, 1000Hz）を用い, 全身20ヶ所（頭頂×1, 耳×2, 胸骨上縁×1, 肩峰×2, 肘関節×2, 手関節×2, 大転子×2, 膝関節×2, 足関節×2, 踵×2, 爪先×2）に貼付した反射マーカの3次元座標データおよび両脚の地面反力データを取得した. 取得した全ての座標データは4次のバターワースローパスフィルタを用いて平滑化し, カットオフ周波数は25Hzとした. また, 座標データのサンプリング周波数は250Hzであったため, 地面反力データのサンプリング周波数である1000Hzに線形補間し, 両データを同期した.

2. 2. 3. 分析方法

A. サイドステップのパフォーマンス変数

分析対象としたサイドステップのパフォーマンス変数は, 以下の4変数である. なお, 質量中心位置の算出には, 日本人アスリートの身体部分慣性係数（阿江ら, 1992）を用いた.

(1) 運動時間（MT）：動き出してから目標に到達するまでの時間であり, 到達時刻から動き出し時刻を減じることで算出される. その際, 動き出し時刻はその動作の特徴から, 追従脚（図2-1中のtrailing foot）の鉛直方向の地面反力（ F_z ）が静止時平均から10%増加した瞬間, もしくは進行方向脚（図2-1中のleading foot）の F_z が静止時平均から10%減少した瞬間のうち, どちらか早い方と定義した. さらに, 到達時間はサイドステップの移動時間を算出している先行研究（Fujii et al., 2013）を参考にして, 胴部の質量中心（CoM）が対象者自身の身長60%を通過した時刻と定義した.

(2) 横方向の最大速度（以下, 最大速度）：胴部CoMの横方向速度（x成分）の最大値.

(3) 最大速度までの時間：動き出してから最大速度に到達するまでの時間であり，最大速度への到達時刻から動き出し時刻を減じることで算出される（動き出し時刻の定義はMTの項目を参照）．

(4) 水平方向の最大地面反力（以下，最大地面反力）：1歩目における追従脚の水平方向地面反力（x成分）の最大値．

B. 統計処理

各対象者内でMTが平均 ± 2 SDを超過した試技や地面反力の動揺により動き出し時刻の検出が困難であった試技は，エラー試技として分析対象から除外した．また，全参加者で分析対象とする試技数を揃えるために，残りの試技数が最も少ない（エラー試行が最も多い）参加者の試技数を採用した．これらの試技における4つのパフォーマンス変数については，Kolmogorov-Smilnov検定を用いて正規性を検討し，正規性が確認されたデータについては対応のあるt検定を，確認されなかったデータについてはMann-WhitneyのU検定を用いて全体および対象者内で比較した．なお，統計分析にはプログラミング言語Mathematica 10（Wolfram Research, IL, USA）を用い，有意水準は5%未満とした．次節の結果では，t値とp値に加えて，効果量（Cohen's d）もd値として明記する．これは両条件の平均値の差をプールした標準偏差で除して標準化した値であり，条件間の平均値がどれだけ離れているかを示す．判断の目安としては，0.2で小，0.5で中，そして0.8で大とされる（Cohen, 1988）．また，対象者内の比較でp値およびd値が複数ある場合は， p_s および d_s と複数形で記述する．

2. 3. 結果

2. 3. 1. エラー試技

各条件における100試技（10試技×10名）のうち、IMCでは10試技、RMCでは6試技のエラー試技が確認され、残りの試技数が最も少ない対象者の試技数は7であった。よって、各対象者の最初の7試技を分析対象試技として採用し、それ以外の試技は分析対象から除外した。その結果、最終的な分析対象試技数は各条件70ずつ（7試技×10名）となった。

2. 3. 2. サイドステップ動作

動き出し時刻は、追従脚の加重もしくは進行方向脚の抜重のうち、どちらか早い方と定義された（2.2.3を参照）。実際に、対象者がどちらの動き出しパターンを実行していたかを確認すると、IMCでは8割の試技（56/70試技）で進行方向脚の抜重が先に行われていた（残りの2割は追従脚の加重を先に行った試技）。一方RMCでは、同時刻であった1試技を除き、5割に分かれた。また、対象者別に結果を確認すると、条件によってこれらの動き出しパターンを使い分けている者、一貫して同様のパターンを実行している者、そして条件を問わずランダムに実行している者が混在していた。しかしながら、IMCでは全対象者に共通して、進行方向脚の抜重を先に行う試技が過半数（7試技中4試技以上）を占めていた。

図2-2は、サイドステップ動作の典型例を示している。上から、横方向地面反力、鉛直方向地面反力、横方向速度、そして横方向位置である。FP1（黒）は準備の段階で追従脚を乗せたフォースプレート、FP2（グレー）は進行方向脚を乗せたフォースプレートであり、地面反力データから抽出した特徴的な4つの局面のうち、Aは準備局面、Bは進行方向脚の離地局面、Cは追従脚の最大地面反力到達局面、そしてDは進行方向脚の着地局面を示している。CとDの

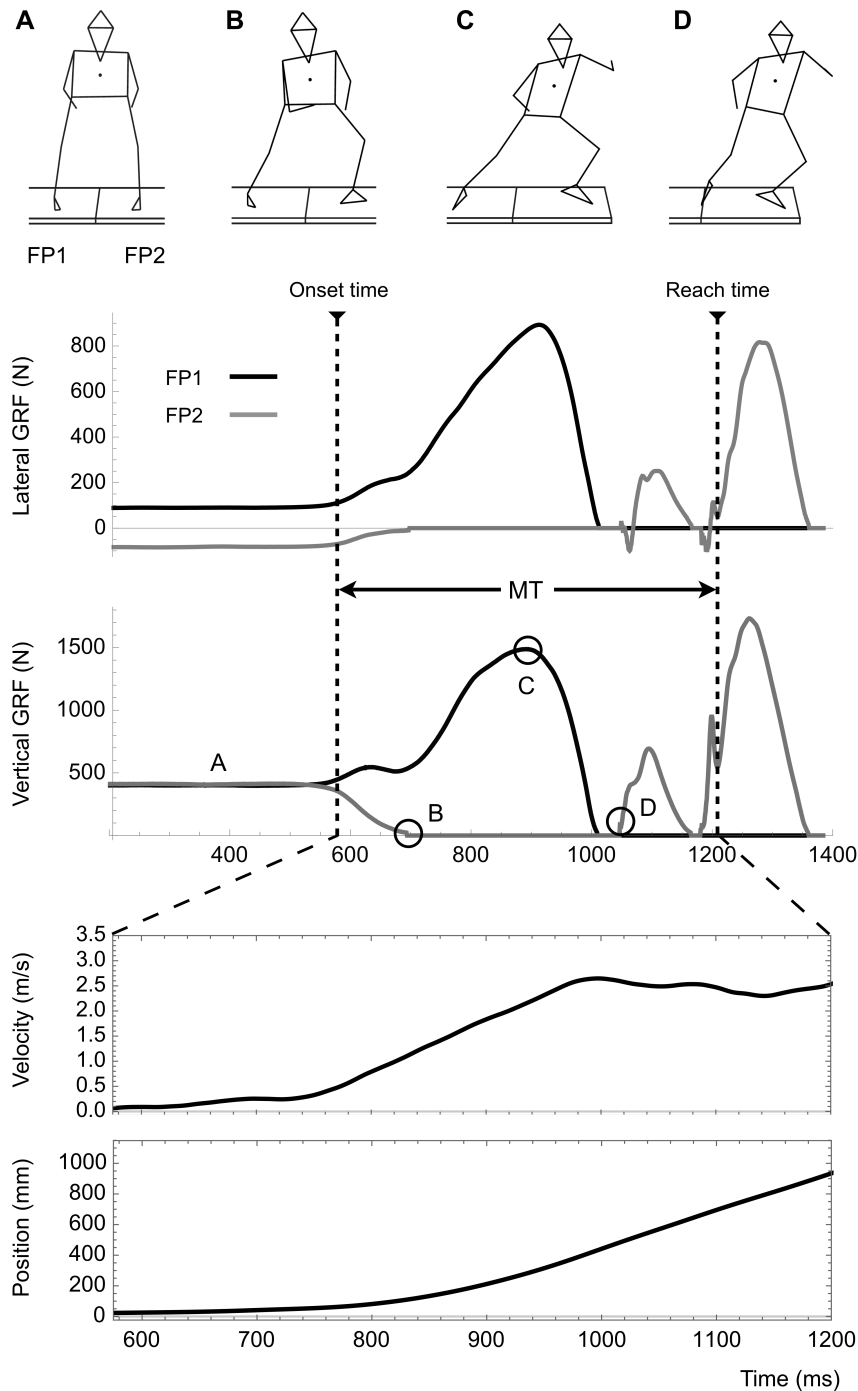


図2-2. サイドステップ動作の典型例. 上から，水平方向の地面反力 (F_x)，鉛直方向の地面反力 (F_z)，横方向の速度、横方向の位置と並んでいる．さらに，特徴的な局面として (A) 準備，(B) 進行方向脚の離陸，(C) 追従脚の地面反力が最大値に到達，(D) 進行方向脚の着地，の4局面を抽出した．新たに定義した動き出しの時点 (Onset time) では，速度と位置はまだ立ち上がっていないことが分かる．(Wakatsuki & Yamada, 2020を一部改変)

間には2枚のフォースプレートによる地面反力がゼロを示す両足の離地局面があり、これは1歩目と2歩目の移行を意味するとともに、1歩目の最大速度到達点（この典型例では1000ms付近）である。さらにこの図は、MTの算出に必要な動き出し時刻（Onset time）と到達時刻（Reach time）も示しており、地面反力の立ち上がりから求めた動き出しの時点では、速度と位置はまだ立ち上がっていない。進行方向脚の地面反力がゼロになる局面Bは、ボタン押し実験においてデジタル信号が切り替わる瞬間、すなわちボタン押し実験における動き出しに相当しており、この瞬間は地面反力から定義した動き出し時刻の100ms以上後に生じている。

2. 3. 3. サイドステップのパフォーマンス変数

表2-2は、算出した4つのパフォーマンス変数をまとめたものである（表2-3は対象者別）。

(1) 運動時間（MT）：IMCよりもRMCの方が有意に短く、その差の平均は57msであった（ $t_9 = 5.71, p = 2.9 \times 10^{-4}, d = 0.88$ ）。対象者内における比較では、10名中8名に有意差が認められ（all $ps < 0.05, ds > 0.8$ ），RMCがIMCを上回る対象者は確認されなかった（図2-3）。また、相対距離（身長60%まで）だけでなく絶対距離（50cmまで）におけるMTも比較した結

表2-2. サイドステップのパフォーマンス変数

Variables	Intention (n = 10)		Reaction (n = 10)		Significance
	M	SD	M	SD	
MT (ms)	772	72	715	56	***
Lateral peak velocity (m/s)	2.55	0.25	2.45	0.29	***
Time to lateral peak velocity (ms)	511	65	427	43	***
Lateral peak force (N)	747	126	731	129	n.s.

*** $p < .001$

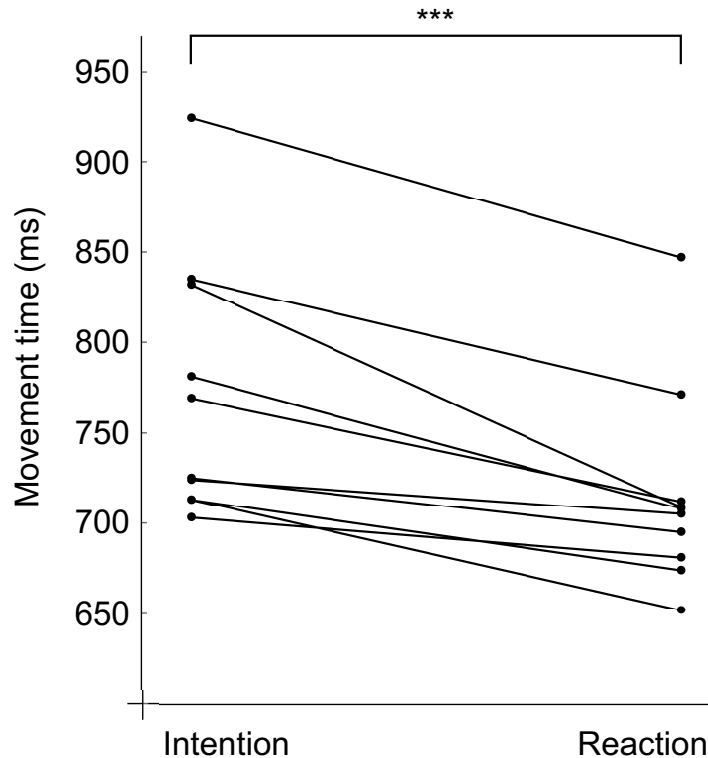


図2-3. 各対象者における運動時間の違い. 直線でつながれた点は, 各対象者における各条件の平均値である. 全対象者が反応 < 意図の関係にあり, 条件間には有意な差がある (** $p < 0.001$)).

果, ここでもMTの時間関係は維持された (537 ± 48 vs. 481 ± 37 ms, $t_9 = 6.28$, $p = 1.4 \times 10^{-4}$, $d = 1.31$). (2) 横方向の最大速度: IMCがRMCを有意に大きい ($t_9 = 6.74$, $p = 8.4 \times 10^{-5}$, $d = 0.37$). 対象者内における比較では, 有意な差が認められたのは10名中5名のみであったが, RMCがIMCを上回る対象者は確認されなかった (all $ps < 0.05$, $ds > 0.8$). (3) 最大速度までの時間: IMCよりもRMCの方が有意に短い ($t_9 = 8.44$, $p = 1.4 \times 10^{-5}$, $d = 1.5$). 対象者内における比較では, 全ての対象者に有意な差が認められた (all $ps < 0.05$, $ds > 0.8$). 興味深いことに, 最大速度までの時間の差は最終的なMTの差を上回っていた. 具体的には, 最終的なMTの

差が57ms（772-715ms），最大速度までの時間の差が84ms（511-427ms）であり，この傾向が対象者全員に確認された．図2-4は，横方向速度（ V_x ）の最大値とそれに到達するまでの時間との関係を示す典型例である．この図から，意図的動作（実線）は緩やかな曲線を描きながらゆっくりと最大値に到達しているのに対し，反応的動作（破線）は短時間で直線的に到達していることが分かる．さらに時系列で確認すると，立ち上がりからより大きな速度を生成していたRMCが先に最大速度に到達し，その後，徐々に速度を上げてきたIMCがRMCの速度を上回る，すなわち速度の大きさに逆転が生じていることが分かる．（4）横方向の最大地面反力：条件間に有意な差は認められなかった（ $t_9 = 1.61, p = 0.14, d = 0.13$ ）．

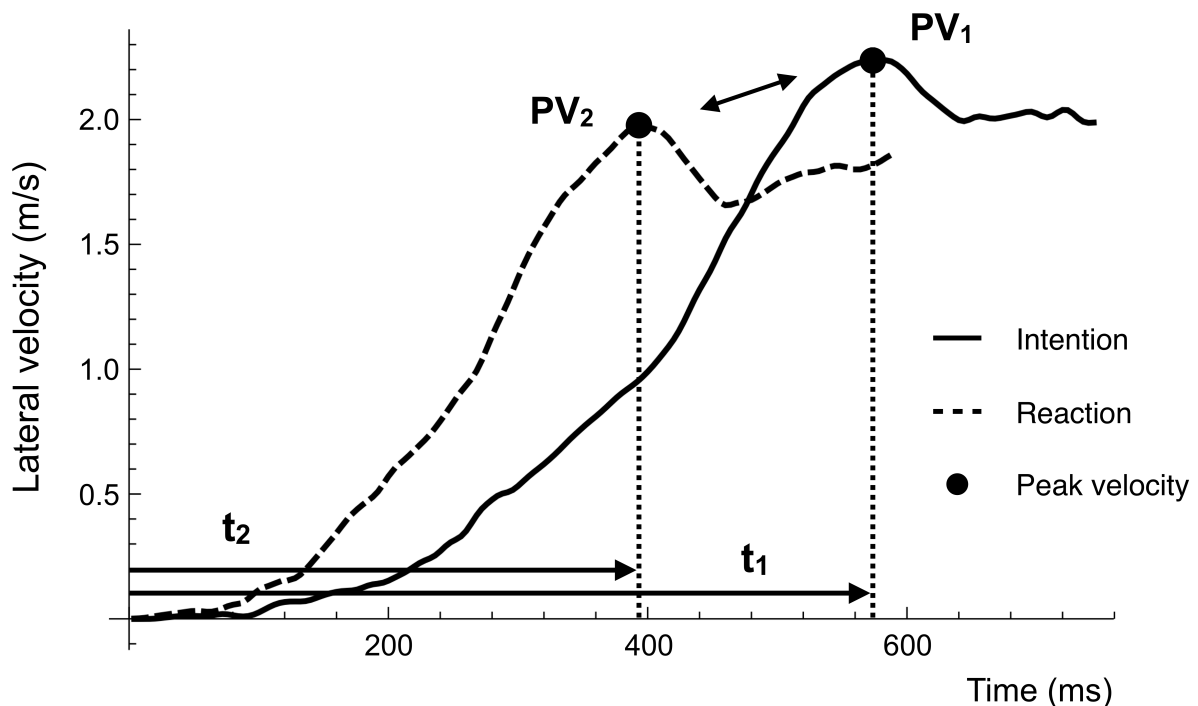


図2-4. 両条件における横方向の速度（ V_x ）の典型例．意図的動作（実線）は緩やかな曲線が描きながらピークに達するのに対して，反応的動作（破線）は直線的に達している．ピーク速度に達するまでに発生する時間差（ $t_1 - t_2$ ）は，最終的なMTの差に大きく関係している．（Wakatsuki & Yamada, 2020を一部改変）

表2-3. 対象者別のパフォーマンス変数

Participant ID	Condition	Performance Variables					
		MT (ms)		Lateral peak velocity (m/s)		Time to lateral peak velocity (ms)	Lateral peak force (N)
1	Intention	835 ± 46	*	2.28 ± 0.10	***	538 ± 39	505 ± 38
	Reaction	771 ± 10		2.12 ± 0.09		422 ± 15	471 ± 19
2	Intention	713 ± 23	*	2.69 ± 0.06	n.s.	444 ± 25	911 ± 28
	Reaction	674 ± 14		2.59 ± 0.10		380 ± 17	902 ± 27
3	Intention	703 ± 28	*	2.55 ± 0.04	*	497 ± 31	610 ± 22
	Reaction	681 ± 14		2.39 ± 0.12		448 ± 13	588 ± 30
4	Intention	725 ± 23	n.s.	2.57 ± 0.08	n.s.	470 ± 26	782 ± 75
	Reaction	695 ± 38		2.51 ± 0.10		423 ± 29	800 ± 51
5	Intention	781 ± 24	***	2.93 ± 0.04	n.s.	572 ± 26	712 ± 18
	Reaction	708 ± 11		2.91 ± 0.04		475 ± 18	714 ± 28
6	Intention	713 ± 43	**	2.89 ± 0.04	*	502 ± 48	708 ± 25
	Reaction	652 ± 37		2.81 ± 0.08		421 ± 30	714 ± 48
7	Intention	769 ± 45	**	2.20 ± 0.13	*	468 ± 58	779 ± 46
	Reaction	712 ± 10		2.05 ± 0.08		386 ± 19	747 ± 31
8	Intention	724 ± 25	n.s.	2.37 ± 0.13	n.s.	416 ± 18	860 ± 53
	Reaction	705 ± 9		2.25 ± 0.10		365 ± 12	878 ± 47
9	Intention	832 ± 80	*	2.68 ± 0.08	n.s.	583 ± 82	891 ± 59
	Reaction	709 ± 41		2.61 ± 0.07		447 ± 48	801 ± 42
10	Intention	924 ± 43	**	2.33 ± 0.07	*	616 ± 44	713 ± 40
	Reaction	847 ± 22		2.25 ± 0.03		503 ± 32	693 ± 46

* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$

2. 4. 考察

2. 4. 1. サイドステップにおけるボーアの法則

ボーアの法則が適用されているか否かを確認する主な変数は運動時間（MT）であり、この変数は意図的動作条件（IMC）よりも反応的動作条件（RMC）の方が有意に短くなっていた。この結果から、ボーアの法則はボタンを押す動作や空手における突き動作のような手部運動だけでなく、サイドステップのような身体重心の移動および空中局面を伴う全身運動にも適用されることが確認された。また、この時間関係は相対距離だけでなく絶対距離で求めた際にも維持され、この補足的な結果は本法則の適用が身長とは無関係であることを示唆している。さらに本研究では、対象者自身が移動するために地面に加えた力、すなわち地面反力から動き出し時刻を定義している。この新しい定義の最も大きな特徴は身体座標の変位が始まる前にMTの測定が始まったということであり、この定義方法でボーアの法則が再確認されたことは、意図的動作と反応的動作が異なる神経基盤を有するという示唆をより強く支持する（Hughes et al., 2011）。

2. 4. 2. 速度生成および力発揮パターンの違い

意図的動作と反応的動作はそれぞれ異なる神経基盤を有するという示唆がなされていること（Hughes et al., 2011）、さらには本研究で採用したタスクのMTが1秒未満である上に選択過程のない単純な課題であったことから、最大速度の違いがMTの違いに大きく影響する、つまり、最大速度が大きいほどMTは短縮されるのではないかと考えられた。しかし実際の結果を確認すると、MTはIMCよりもRMCの方が短いにも関わらず、最大速度はRMCよりもIMCの方が大きくなっていた。

最大速度への到達時刻は両足が離陸した瞬間，すなわち両足の地面反力がゼロになる瞬間であり，これは図2-2における局面Cと局面Dの間に位置する．最大速度，すなわち離陸時速度は力積（力と時間の積）で決定するため，最大速度に有意差があるにも関わらず最大地面反力に有意差がないという結果は，地面に力を加える時間に差があることを示唆している．したがって，最大速度に到達するまでの力発揮パターンの違いがMTの非対称性（＝ボーアの法則）を生み出す要因になっていると考えられる．これを裏付けるように，RMCにおける最大速度までの時間は全対象者に共通してIMCにおけるそれよりも有意に短くなっており，この結果はMartinez de Quel & Bennett（2014）による報告と一致する．

この観点をより明確にするために，図2-4を用いて速度の生成パターンを検討する．この図から，意図的動作は緩やかな曲線を描きながら最大値（黒点）に到達するのに対して，反応的動作は短時間で直線的に到達していることが分かる．そして興味深いことに，最大速度までに生成される時間差は，常に最終的なMTの差を上回っていた．この結果は，最大速度到達後にはMTの差が生成されないこと，つまり動作の途中で意図的動作の速度の大きさが反応的動作の速度の大きさを逆転することを示唆している．この示唆は，ボーアの法則の発現条件を検討した研究（Pinto et al., 2011）において報告された，タスクの段階が増えると最終的なMTの差が減少するという知見を支持している．同様にWelchman et al.（2010）は，3つのボタンを用いた実験（図1-1を参照）において，第1段階（ボタン1→ボタン2）で生じたMTの差が第2段階（ボタン2→ボタン3）では減少し、さらに第3段階（ボタン3→ボタン1）では生じなかったことを報告している．このことは，第2段階における意図的動作と反応的動作の動きがより類似したものになったことで説明される可能性がある．

2. 4. 3. ボーアの法則を構成する3つの局面

前項では、反応的動作は最大速度を小さくする代わりにそれまでの時間を短縮させていること、そして動作の途中で両動作の速度の大きさに逆転が生じていることを確認した。つまり、動き出しで遅れながらもより大きな最大速度を生成する先導者は、動き出しを重視してより早く最大速度に到達した反応者との差を縮めていくものの、最大速度までの時間差が影響し、最終的なMTに差が生成される。

本項では、上記に示す両動作の特徴的な時間関係をもとに、ボーアの法則を構成する3つの局面を示す。まず第1局面では、動き出しを重視する反応者が最大速度に到達するまでに大きなMTの差を生成する（反応者の優位段階）。続いて第2局面では、速度の逆転現象により、先導者が移動距離の差を小さくする（先導者の優位段階）。そして最終局面では、反応者が第1段階で生成したMTの差を保持し、逃げ切る形で最終的なMTの差を生成する（先導者の未完了段階）。図2-5は、以上3つの局面に基づく時間関係の概念図である。この概念図は、ボーアの法則の時間的生成メカニズムを特徴付けている。

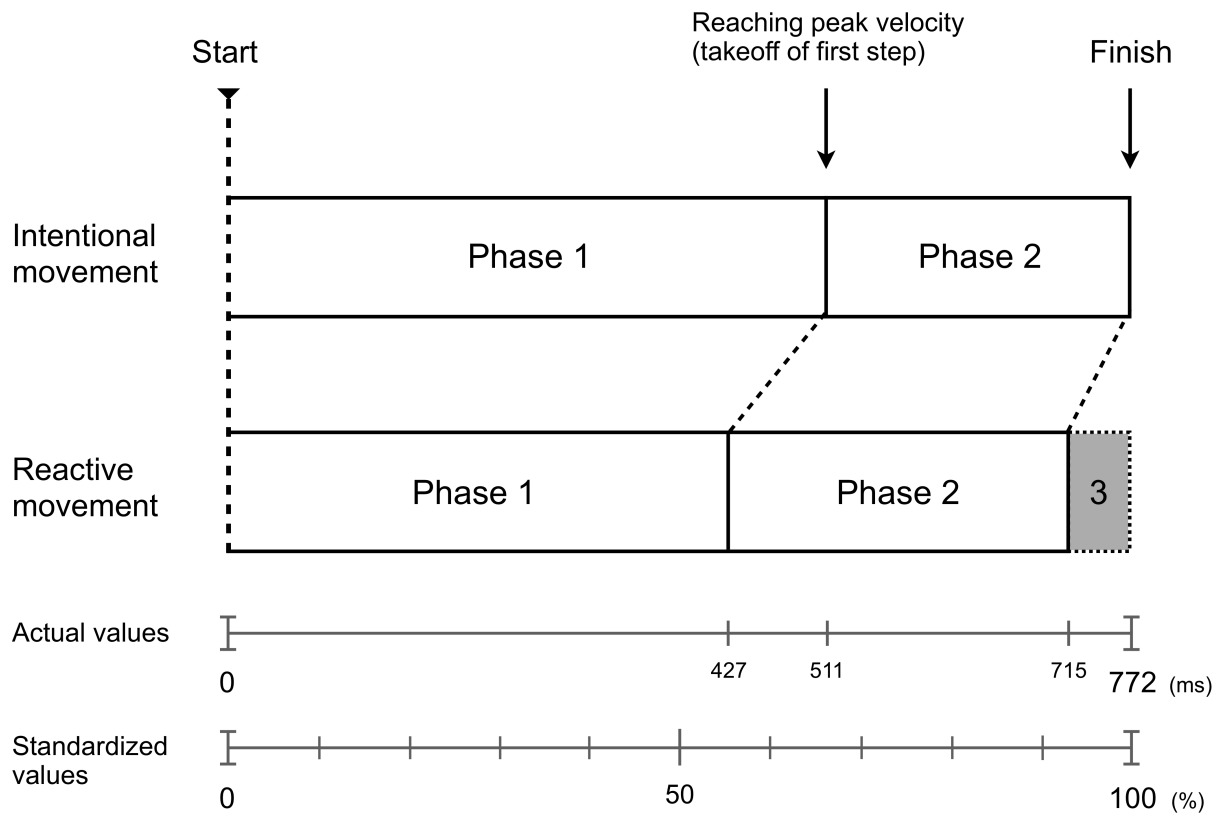


図2-5. 3つの局面に基づく時間関係の概念図。 第1局面：最大速度に到達するまでに反応的動作が意図的動作をリードし，MTの差を広げる．第2局面：反応的動作よりも大きな最大速度を生成させた意図的動作が追い上げ，移動距離の差を縮める．第3局面：第1局面で生成したMTの差を守りきる形で、反応的動作が最終的なMTに差が生じる．下部に示す2つのスケールは，実測値およびIMCのMTの平均（772ms）を100として標準化した際の割合である．

2. 4. 4. 両動作の運動制御様式

前項では、ボーアの法則の生成メカニズムとして3つの局面が特徴付けられた。これは、両動作の力発揮パターンの違いおよび速度の逆転現象から示唆されたものである。そこで本項では、動作途中で生じた速度の逆転現象を、運動制御様式の観点から考察する。

一般に、運動制御様式はフィードフォワード制御とフィードバック制御に分けられる。これらの制御様式についてはこれまで多くの研究がなされているが、その中でもWoodworth (1899) の研究が最も古典的であり、力発揮パターンという観点から2つの制御様式を考える上で重要な考え方である。彼は、提示されるリズムに合わせてペンで線を引いていく課題を用いて高周波運動と低周波運動の軌道を比較し、2種類の制御様式に区別した。これらはそれぞれ“初期インパルス (initial impulse)”および“カレント制御 (current control)”と名付けられ、これが現在のフィードフォワード制御とフィードバック制御の研究につながっている。

本研究におけるサイドステップタスクでは、フィードフォワード制御、すなわち初期インパルスを動き出しに用いていると考えられる。意図的動作と反応的動作の最も大きな違いは、最大速度に達するまでの第1局面（反応者の優位段階）にあり、反応的運動がより早く最大速度に到達することを確認した。意図的動作は対象者自身のタイミングで開始されるため、動き出しからタスクの完了まで緻密な運動計画を立てることができる。速度と正確性のトレードオフの関係 (Fitts, 1954) から、緻密な運動計画を実行するためには動き出しの速度を小さくする必要がある。これに対して、反応的動作はトリガーが外部にあるため、緻密な運動計画を立てることができない。したがって、反応的動作には粗雑な運動計画が立てられている可能性が高く、そこではできるだけ早く最大速度に到達することに集中することが潜在的に優先される。動き出しに集中した反応的動作は最大速度に到達した後、速度を低下させることで運動を調整するが、これが第2局面（先導者の優位段階）における速度の逆転現象に

由来していると考えられる。これに対して意図的動作は、動き出しの時点で緻密な運動計画を立てているために運動を調整する必要がなく、計画通りより大きな最大速度を生成することができる。このことから、本研究では目標への到達精度については検討していないものの、内発的な意図的動作と外発的な反応的動作という運動制御様式は、Woodworth（1899）が提唱した初期インパルスをさらに細分化する可能性がある。

上記の運動制御様式に関する説明は、対象者による動き出しパターン（2.3.2を参照）によっても補足される。先に進行方向脚を抜重させることは力の発揮よりも移動の準備を優先していること、その一方で、先に追従脚を加重させることはより速い動き出しに必要な力の発揮を優先していることを意味すると考えられる。本研究では、条件によってこれらの動き出しパターンを使い分ける対象者が3名確認され、IMCでは前者、RMCでは後者のパターンを実行する傾向を示した。少なくとも、全対象者において逆のパターンが確認されなかったことは大変重要な結果である。この結果は、初期インパルスが意図的動作と反応的動作によってさらに2つの運動制御様式に分けられるという上記の可能性を裏付けていると言える。

2. 5. 本章の結論

本章では、反応者の運動時間（MT）が先導者のMTよりも短くなるというボーアの法則を検討した先行研究の問題点を2点抽出し、スポーツで多用される全身運動であるサイドステップを対象にして本法則を再検討した。その結果、意図的動作のMTよりも反応的動作のMTの方が有意に短くなることが確認され、このことから、身体重心の移動および空中局面を伴う全身運動でもボーアの法則が適用されることが示された。

両条件における動作を詳細に分析すると、力発揮パターンの違いによって両動作の速度の大きさに逆転が生じることが示され、これによりボーアの法則の時間的な生成メカニズムを特徴付ける3つの局面が抽出された。また、動作中における速度の大きさの逆転は、動作時間が長くなればなるほど本法則の効果が消失していくことを示唆している。よって、いくつかの段階を成す動作よりも、素早く単発的な動作の方がより大きな効果を発揮することが期待できる。さらに本研究では、速度の逆転現象と動き出しパターンの違いから、両動作の運動制御様式の検討まで踏み込んだ。その結果、意図的動作と反応的動作は、Woodworth（1899）が提唱した2つの制御様式のうちの一つである初期インパルスを、さらに細かく二分する制御様式である可能性が示された。

第3章 運動共感の発生に伴い自己-他者間で伝達される運動情報

3. 1. 目的

他者運動の観察方法は、大きく二つに分類できる（山田, 2011）。一つは、運動実施者を外部から客観的に観察する、三人称的観察である（図3-1左）。この観察は、対象からデータを取得してその特徴を導出するような、自然科学研究で最も一般的とも言える方法である。そしてもう一つが、運動実施者本人になりきって観察する、一人称的観察である（図3-1右）。この観察は、Matsuno（1989）と郡司（1992）が提起した内部観測（internal measurement）とも同義であり、運動実施者とその観察者が共に存在することにより可能となる。主観的であるがゆえに自然科学として検討される機会は少なかったが、コーチング学や身体教育学等の分野では盛んに研究が行われている（渡辺, 1993; 太田・有川, 2003）。一人称的観察では仮想的に自己運動をしながら他者を観察するため、その時のリズムや力感が運動実施者と一致すると、あたかも他者の動きに移り移って自己が運動しているような感覚（共感）を生み、この感覚を運動共感と呼ぶ（山田, 2011）。例えば、スポーツを観戦している際、実際に運動している選手の動きに合わせて該当する筋（サッカーのシュートであれば、大腿四頭筋）が不随意に収縮するような現象も、これが原因であると考えられる。

さて、一人称的観察によって生じる運動共感は、共感細胞とも呼ばれるミラーニューロン（Gallese et al., 1996）に、その生理学的説明を求めることができよう。ミラーニューロンが発見されてから、運動観察には知覚系だけでなく運動系も関与していることが示され

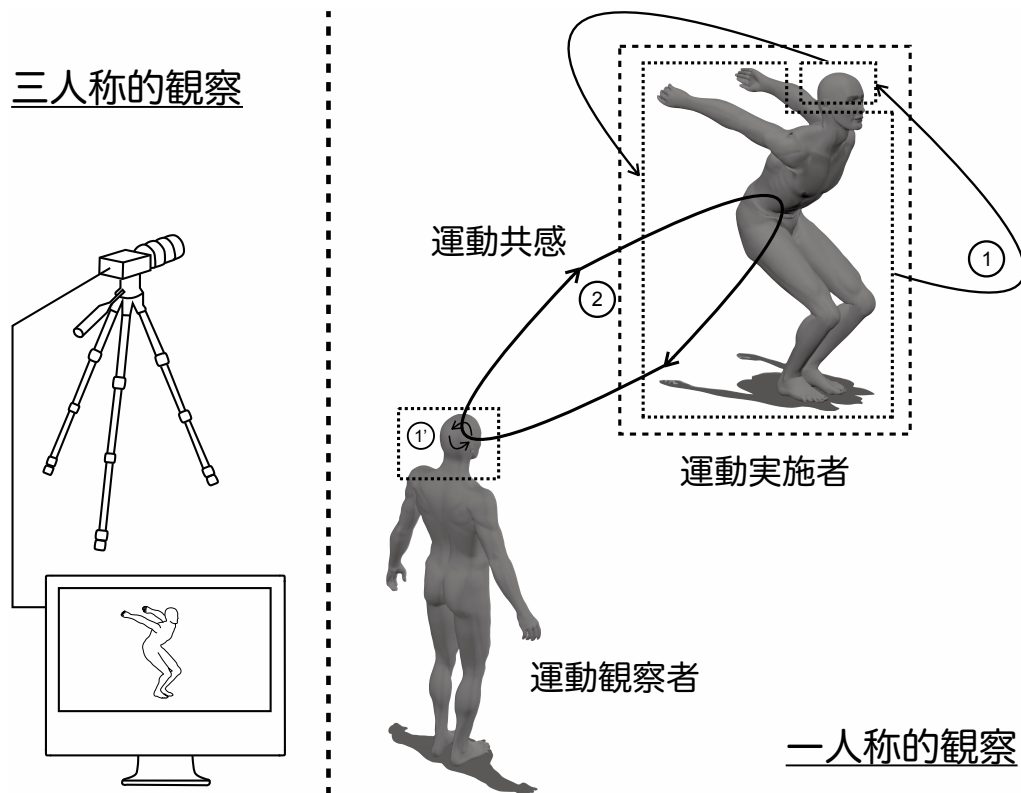


図3-1. 三人称的観察と一人称的観察，そして運動共感の概念図. 運動観察者は運動実施者の運動①を一人称的に捉え，仮想的に自己運動①'を行うことで，運動共感②を起こしている.

(Iacoboni et al., 1999; Buccino et al., 2004) , 他者による運動を見るだけで学習効果が得られる観察運動学習の基礎が築かれた. この学習法は，実際に自己の身体を動かし，それにより得られた結果の知識 (knowledge of results: KR) (Schmidt, 1975) から誤差を修正するような自己完結型の試行錯誤学習が基本とされてきた従来の学習理論に新たな可能性を見出し，今日までにもその学習効果に関する報告が数多くなされている (Heyes & Forster, 2002; Breslin et al., 2005, 2006; Horn et al., 2005; Badets et al., 2006) . しかしながら，それらの研究のほとんどが最終的にはミラーニューロンの活動という一点に帰着しており，それ以上のメカニズム

に迫るような動向が見られない。ここで重要なのは、ミラーニューロンは神経伝達物質によって情報が伝達されることで活動するということである。よって、運動制御レベルで他者とつながる、あるいは運動共感が生じる現象を検討するには、これらを筋骨格系の運動とそれに関与する情報といった両者から捉え、その際に伝達される運動情報とはいかなるものかを特定する必要がある。さらに、他者の運動に関するパフォーマンス予測や能力推定のために利用される運動情報はキネマティクス、すなわちフォームであると考えられがちだが（Aglioti et al., 2008; Ramenzoni et al., 2008）、あくまでフォームは運動の結果であるため、一人称的に動きを発現する情報としてはそのフォームを生み出す力やエネルギー、つまり運動力学量に着目する必要がある。

ところで、客観的な計測に基づく運動力学は、主観的な感覚の一種である運動共感を検討することができるのだろうか。一見、人間の運動感覚に力学が介入することは難しいように感じられる。しかし、質量をもつ物体としての身体が生成する運動は全て力学法則に従っていることを考慮すれば、それに伴って生じる運動感覚も力学をもって説明できるという論理は自然であると言える。つまり、我々の経験する運動感覚は、何らかの力学量で補足できる可能性が高い（山田, 2013）。さらにこの両者の関係を検討する上で参考になるのが、小中学校の理科や高校の物理で力学システムと電気システムの関係の説明のために用いられる、手回し発電機である。この教材では、ハンドルを回す際に必要な仕事率がハンドルを回す“手ごたえ”と表現されており、力学量である仕事率と心理量である手ごたえが何の疑いもなく結合されている（日高, 2008; 山本, 2012）。つまり、我々が運動を実施する際に感じるいわゆる手ごたえは仕事率に近く、これが運動調整に有用な運動情報の一つとして自己と他者をつないでいると考えられる（山田・若月, 2018）。よって本研究では、力学量である仕事率に着目することとする。

以上を踏まえ本章では、まず動きの生成レベルで他者とつながり合う現象を捉えるために、他者の動作に関する運動情報とそれにより出力された結果、すなわちKR情報を自己の身体に適応させ、運動調整に役立てることができることを実験的に示す。次に、そのメカニズムの検討として、自己と他者の間で伝達される運動情報を実験で取得した地面反力および身体座標データから算出した仕事率に着目して明らかにする。

3. 2. 方法

本研究で対象とする課題は、比較的一般的で専門性の低い運動でありながら、一定の難易度をもつ、垂直跳びの跳躍高調整である。垂直跳びは、運動エネルギーを位置エネルギーに変換する運動とも言え、それは以下の式で表される。

$$mgh = \frac{1}{2}mv_{off}^2 \quad (3-1)$$

ここで、 m は運動実施者の質量、 g は重力加速度、 h は跳躍高、そして v_{off} は鉛直方向の離地時速度である。よって、跳躍高 h は、

$$h = \frac{v_{off}^2}{2g} \quad (3-2)$$

となる。この式から、跳躍高は離地時速度の二次式で表され、跳躍高と離地時速度は直線関係にないことが分かる。さらに、この離地時速度は地面に作用する瞬間的な力ではなく力積（力と時間の積）で決定するため、地面に力を加える全時間に渡って発揮する力と作用する時間の両者を調整しなければならない。このことから、一見簡単なようにも思える跳躍高の調整課題は、一定の難易度をもつ複雑な課題であると言える。また、以上の力学的根拠に加

え、村木・稲岡（1996）は、全力試技で記録した跳躍高の50%の高さに調整しようとする、20%程度跳び過ぎてしまうことを実験的に示している。つまり、主観的な強度と客観的な出力にはズレが生じるのである。

本実験では、このズレを徐々に修正していく課題を1人で行う個人条件と4人1組で行うグループ条件に分けてそれぞれ実施した。

3. 2. 1. 実験参加者

A. 実験対象者

個人条件に12名、そしてグループ条件では実験対象者（以下、対象者）3名に全組共通の実験協力者1名（次項参照）を加えた4人グループを12組作成した。したがって、個人条件12名、グループ条件36名の計48名が本実験に参加した。対象者はいずれも20歳以上の健康な男子大学生および大学院生（身長 $173.5 \pm 5.9\text{cm}$ 、体重 $71.2 \pm 10.8\text{kg}$ ）であり、選考基準は前述した感覚と結果のズレに関する予備知識を持たない者とした。

本研究は、中京大学大学院体育学研究科倫理審査委員会の承認を得て行われた（承認番号：2018-33）。また、対象者には予め実験内容について説明を行い、インフォームドコンセントを得たが、結果を意識することによるバイアスの発生を防ぐため、研究の目的に関しては実験終了後に説明を行った。

B. 実験協力者（以下、モデル）

グループ条件における跳躍の順番はくじで決定したが、最初の試技者は、対象者に与える運動情報およびKR情報を統一するために全組共通のモデル（男子大学院生、身長 164.8cm 、体重 61.2kg ）を採用した。モデルの選考基準は、事前に行われた予備実験において村木・稲岡

（1996）の示した結果の通り，70%高程度で跳躍した者とし，実際の実験でもその予備実験と同様の跳躍をするよう教示された．

このモデルは全グループの1人目の試技者になるようにくじが操作され，他3名の対象者は，実験が終了するまでモデルの存在を知らされなかった．

3. 2. 2. 実験内容

A. 試技の種類

本実験で対象者が実施した垂直跳びの試技は，以下の2種類である．

- （1）全力試技：100%の努力度で跳躍する．
- （2）調整試技：全力試技で記録した跳躍高の50%の高さ（例えば，全力試技で50cmであれば，25cm）になるように跳躍する．なお，対象動作は腕振りおよび反動付きの一般的な垂直跳びであるため，大まかな見本を提示するだけで姿勢や関節角度等に関する教示は特に行わなかった．

B. 条件と手順

跳躍高調整課題では，試技毎にKR，すなわち出力された実際の跳躍高（cm）と全力試技で記録した跳躍高に対する割合（%）を得ながら目標跳躍高（50%高）に合わせていく．それにあたり，以下の2条件を設定した．なお，図3-2aは実験構成の概念図であり，図中のKRは結果の知識（出力された跳躍高），MS（Motor Sensation）は運動感覚，そしてMI（Motor Information）は運動情報を示している．

- (1) 個人条件（図3-2a左）：1人の対象者Aが4試技行う。
- (2) グループ条件（図3-2a右）：4人の参加者B（モデル）、C、D、Eがそれぞれ1試技ずつ行う。このとき、参加者は他者の試技を全力試技も含めて全て観察し、アナウンスされるKRも全員が共有する（図3-2b）。つまり、個人条件と同様に、BよりもC、CよりもDと試技順が進むにつれて得られる情報量も増えていく環境を構築した。なお、実験中は言葉や表情によるコミュニケーションを一切禁止した。また、対象者は他者の試技を観察した上で、自身の試技直前に視覚的評価スケール（Visual analog scale: VAS）を用いて「どの程度の努力感で出力すれば目標跳躍高に合わせられると思うか」を0-100の割合で実験者のみに申告した。

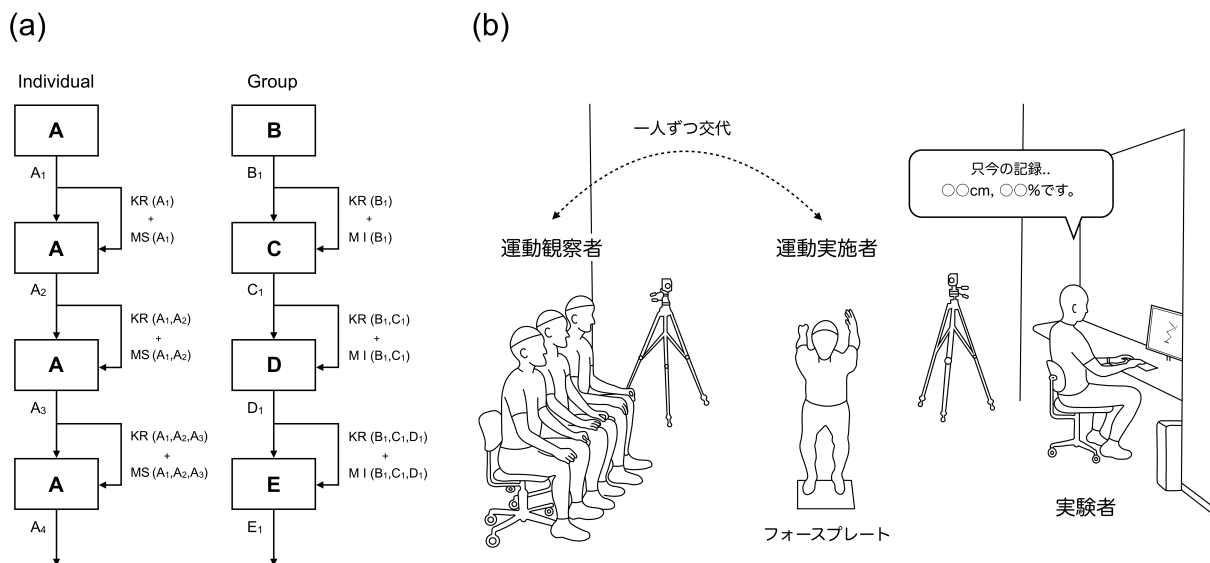


図3-2. (a) 実験構成の概念図. 左が個人条件、右がグループ条件である。なお、KRがフィードバック情報、MSが自己の運動感覚、そしてMIが他者の運動情報を示している。両条件ともに、試技（人）数が増えるにつれて得られる情報量も増えていくことが分かる。**(b) グループ条件の実験風景図.** 運動実施者がフォースプレート上で跳躍し、それを3名の運動観察者が観察している。跳躍後、実験者は地面反力データから跳躍高を算出し、4名全員にフィードバックを行う。この一連の流れを一人ずつ交代して行う。

C. データの取得

10台の光学式動作解析装置（MAC3D System, Motion Analysis社製, 200Hz）および1枚のフォースプレート（FP4060-10, Bertec社製, 1000Hz）を用い, 全身20ヶ所（頭頂×1, 耳×2, 胸骨上縁×1, 肩峰×2, 肘関節×2, 手関節×2, 大転子×2, 膝関節×2, 足関節×2, 踵×2, 爪先×2）に貼付した反射マーカの3次元座標データおよび地面反力データを取得した。

3. 2. 3. 分析方法

A. 分析の流れ

まず, 他者の運動情報およびKR情報を自己の運動調整に役立てられるかを検討するため, 個人条件とグループ条件における跳躍高の変化の仕方を比較し, 類似性を検討する。もしこれが似ていると判断できれば, グループ条件でも個人条件同様, 以前の試技（者）の情報を利用していると解釈する。

続いて, 自己と他者の間で伝達された運動情報を特定するため, 跳躍高の調整方法を関節に作用する仕事率に着目して検討する。そのために, まず全力試技と調整試技の地面反力の波形を比較し, 跳躍高の調整が行われている動作局面を推定する。そして, この調整局面に関与していながら, 跳躍高の変化の仕方と類似した変化を示す関節の仕事率を伝達された運動情報と判断する。ここで検討対象とする関節は, 垂直跳びに関するバイオメカニクス研究で多く用いられる, 肩関節, 股関節, 膝関節, 足関節の4関節である。

B. 類似性の評価方法と定義

前述したように, 本研究では, 跳躍高および仕事率の変化パターンの類似性を評価する。その類似性を定量的に評価する方法として, ロジスティック回帰および統計分析を用いることとした。すなわち, 個人条件における各被験者, グループ条件における各グループのデータを

以下の（3-3）式で表されるロジスティックモデルに、プログラミング言語Mathematica 10（Wolfram Research, IL, USA）のLogitModelFit関数を用いて近似した。

$$y(x) = \frac{1}{1 + e^{a+bx}} \quad (3-3)$$

そこから求まる各条件12ずつの回帰式の従属変数 x （跳躍回数）に関わる係数を用いて統計分析を行った。そして、その分析の結果、有意差が確認されないことをもって類似した変化パターンであると評価した。

跳躍高の変化パターンは2条件間の比較であるため、対応のない t 検定を用いた。結果では、 t 値と p 値に加えて、効果量（Cohen's d ）も d 値として明記する（ d 値の詳細は2.2.3を参照）。その一方で、仕事率の変化パターンは条件間だけでなく跳躍高とも比較するため、跳躍高2条件および仕事率2条件の計4群を対象とした一元配置分散分析を用い、主効果が認められた場合には、Bonferroni法により多重比較を行った。結果では、 F 値と p 値に加えて、効果量も η^2 値として明記する。これは、ある要因の平方和を全体の平方和で除した値であり、相関係数 r を2乗した r^2 と同等のものであると考えてよい（Field, 2005）。判断の目安としては、0.01で小、0.06で中、そして0.14で大とされる（水本・竹内, 2008）、なお、統計的な比較は全てKolmogorov-Smilnov検定を用いて正規性を確認した上で行われ、有意水準はいずれも5%未満とした。

C. 算出項目

跳躍高は、フォースプレートで得られた地面反力データから滞空時間を計算し、以下の（3-4）式を用いて求めた。ここで、 h は跳躍高、 g は重力加速度、そして t は滞空時間を示している。前述したように、跳躍高は離地時速度で決定するため（3-2）式で求められるが、滞空

時間を用いた（3-4）式でも同様の高さが求まり、さらに実際の実験では試技終了後、直ちに跳躍高をフィードバックする必要があるため計算が簡便な（3-4）式を用いた。

$$h = \frac{gt^2}{8} \quad (3-4)$$

仕事率は、単位時間あたりの仕事量（仕事の能率）を表し、それは力と速度の積と等しいことから、本研究では以下（3-5）式に示すように、各関節の仕事率を各関節の力のモーメントベクトル（ N ）と角速度ベクトル（ ω ）の内積で求めた。なお、この際に必要な身体係数は、Chandler et al.（1975）を用いた。

$$P = \vec{N} \cdot \vec{\omega} \quad (3-5)$$

3. 3. 結果

3. 3. 1. 跳躍高の変化パターン

個人条件とグループ条件における跳躍高の変化を図3-3aに示す。左図が個人条件、右図がグループ条件である。また、縦軸の跳躍高は全力試技に対する調整試技の割合であり、横軸は左から試技（者）順に並んでいる。さらに、全跳躍高をまとめてロジスティックモデルに近似させた曲線も両データに重ねており、その式はそれぞれの図中右上に記している。

この図から分かるように、両条件の平均跳躍高は試技（人）数を重ねる毎に目標跳躍高の50%（図中の破線）へと近づいた。横軸xの増加に関わるロジスティック回帰式の係数は個人条件が0.670、グループ条件が0.763であり、その差は0.1以下である。そして、個人条件における各被験者、グループ条件における各グループのデータをそれぞれロジスティックモデルに

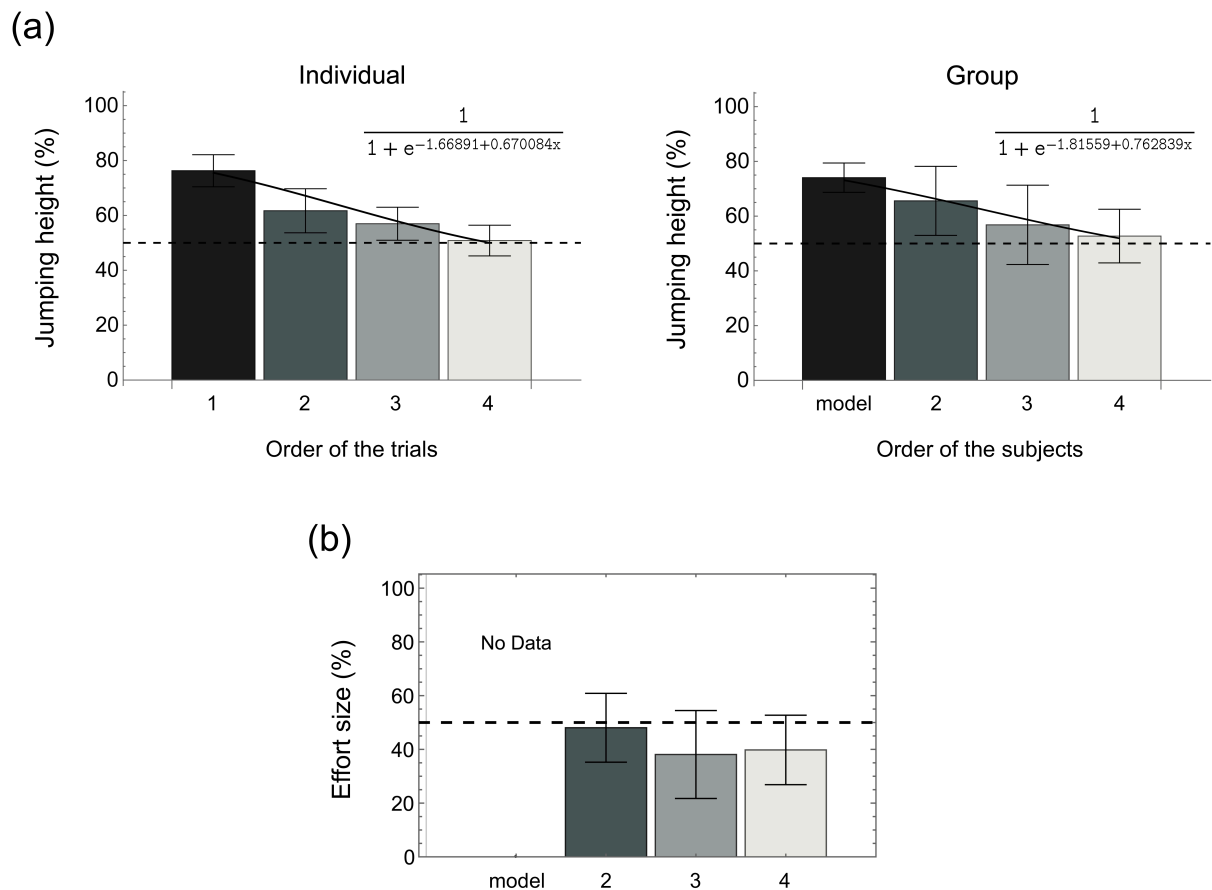


図3-3. (a) 両条件における跳躍高の変化とロジスティック曲線. 左図が個人条件, 右図がグループ条件であり, いずれも試技数もしくは試技人数を重ねる毎に(左から右へと)目標とする50%高に収束していることが分かる. **(b) グループ条件において跳躍直前に申告された主観的努力感.** 1人目はモデルであるため, 対象者である2から4人目のみのデータを示している. (若月・山田, 2020を一部改変)

近似させ、その回帰式の x に関わる係数について対応のない t 検定を行った結果、有意な差は確認されなかった（ $t_{22} = -0.002, p = 0.999, d = 0.001$ ）。このことから、両波形が非常に近い形をとっていることが分かる。なお、グループ条件における全グループの1人目として採用されたモデルは、 $74.05 \pm 5.36\text{cm}$ で跳躍している。個人条件の1回目が $76.28 \pm 5.84\text{cm}$ であったことを考慮すれば、標準偏差にほぼ差はなく、安定した跳躍を行ったと言える。

また、図3-3bには、グループ条件の対象者が自身の試技直前に申告した主観的努力感を示している。なお、1人目はモデルであるため、モデルを除く2から4人目のみのデータである。その結果、ばらつきは大きいものの全ての平均が目標とする50%を下回った。詳しい解釈については、考察（3.4.1）にて記述する。

3. 3. 2. 調整局面に関与する仕事率

A. 力波形から推定する跳躍高の調整局面

（3-1）式で示すように、跳躍高は離地時速度で決定し、またその離地時速度は地面にどれだけの力をどれだけの時間加えたかを示す力積（力と時間の積）で決定する。そのため、跳躍高を調整するには瞬時の力ではなく、その力をキックの時間中調整しなければならない。したがって、全力試技と調整試技の力波形を比較し、後者の方が力積を下げている局面が調整局面であると考えられる。図3-4は全力試技を実線、調整試技を破線としてその地面反力の典型例を重ね合わせたものであり、その上部には一連の対応動作が示してある。

全対象者に共通する力波形の特徴として、全力試技（実線）は最大値に達する約200ms前に一度小さなピークを迎えてから再度増加する二峰性波形を示すのに対して、調整試技（破線）は一気に最大値に達する一峰性波形を示し、この局面で地面反力の大きさに顕著な違いが生じた。さらに興味深いことに、最大値は両試技ともに離地直前で生じたが、その値はほぼ

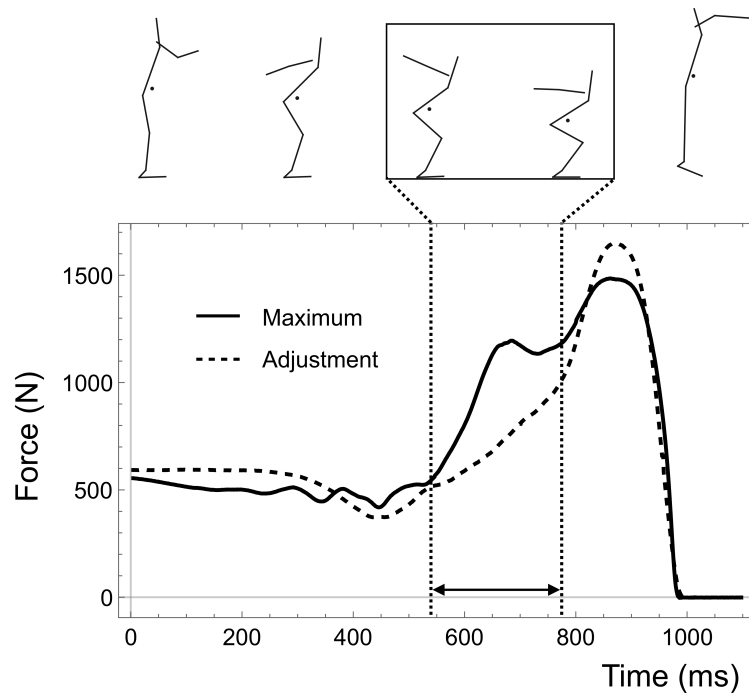


図3-4. 両試技における地面反力の典型例。実線が全力試技，破線が調整試技であり，細かい破線で区切られた範囲で調整試技が力積を下げていることが分かる。（若月・山田，2020を一部改変）

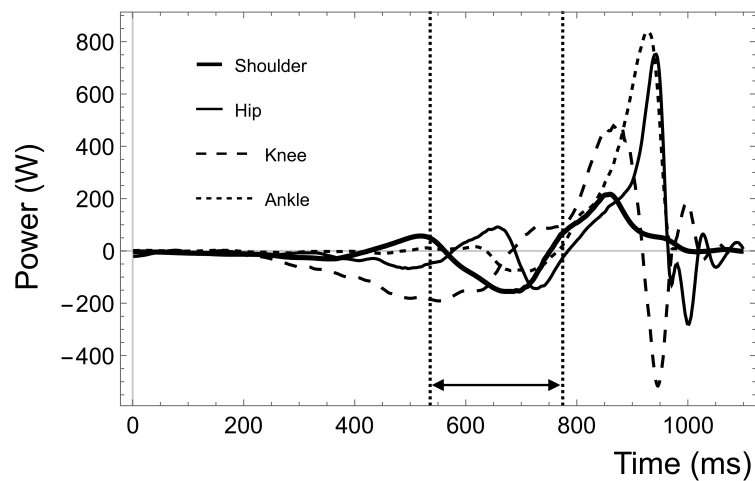


図3-5. 各関節の仕事率の典型例。Shoulder（太い実線）が肩関節，Hip（細い実線）が股関節，Knee（粗い破線）が膝関節，そしてAnkle（細かい破線）が足関節を示している。細かい破線で区切られた範囲は力波形から推定した調整局面に対応している。（若月・山田，2020を一部改変）

同じか、むしろ跳躍高を下げなければならない調整試技の方が大きい値を示した。このことから、垂直跳びにおける調整局面は、最大値到達時ではなく、それより約200ms前に生じる第二ピーク時付近であると推定される。この局面を動きで確認すると、図中の上部に示す対応動作のように、しゃがみ込んでから伸び上がろうとする移行局面に対応していた。

B. 調整局面に関与する関節

図3-5（前頁）に各関節の仕事率の典型例を示す。図中のShoulderが肩関節、Hipが股関節、Kneeが膝関節、そしてAnkleが足関節の仕事率である。また、細かい破線で区切られた範囲が前項で推定した調整局面に対応している。しかし、この調整局面には対象者によって若干の時間的誤差が生じるため、この範囲を前後100msまで拡張し、エネルギーを発揮する（仕事率が正方向）関節の特徴的なパターンを図3-5および表3-1から抽出する。

まず、図3-5からこの局面で肩関節と股関節が正の極値を示すことが分かる。そこで、全参加者のこれらの平均値と標準偏差、および抜重開始時刻からこの極値への到達時間の平均と標準偏差を表3-1に示す。この表から分かるように、各関節の極値は、肩関節が $55.5 \pm 27.0\text{W}$ 、股関節が $379.6 \pm 155.7\text{W}$ であり、股関節の方が有意に大きな値を示した（ $t_{94} = -11.239, p < 0.001$ 、

表3-1. 調整局面における肩関節と股関節の特徴的指標

	Joint	Mean	SD	Significance
正方向の極値 (W)	Shoulder	55.5	27.0	***
	Hip	379.6	155.7	
抜重開始時から正方向の極値への到達時間 (ms)	Shoulder	515.7	99.1	***
	Hip	720.3	104.5	

*** $p < .001$

$d = 2.902$) .また、この極値は肩関節の方が先に現れ、それから200msほど遅れて股関節が現れた (515.7 ± 99.1 vs. 720.3 ± 104.5 , $t_{94} = -7.777$, $p < 0.001$, $d = 2.008$) . さらに、膝関節は負の値から正の値への移行途中であることが図3-5から分かる. しかしその一方で、足関節はゼロからわずかに減少するだけで、正方向に関わる特徴的なパターンは確認されなかった. これらのことから、調整局面に大きく関与している関節は肩関節、股関節、膝関節の3関節であると考えられる. これに関連して、Feltner et al. (1999) は垂直跳びにおける腕振り、すなわち肩関節運動が股関節と膝関節のトルク生成に与える影響を報告しており、調整局面において3つの関節が関与していることを示した以上の結果と類似すると言える.

3. 3. 3. 跳躍高の変化パターンと類似する関節

図3-6に、跳躍高の調整局面に関与していると考えられる3つの関節に作用する最大仕事率の変化を示す. 左から、(1) 肩関節、(2) 股関節、(3) 膝関節であり、縦軸は全力試技の最大仕事率に対する調整試技のその割合である. そして、黒のバーが個人条件、グレーのバーがグループ条件を示している. また、関節周りの仕事率は (3-5) 式で示すようにトルクベクトルと速度ベクトルの内積で表され、正の値は両ベクトルの方向が同じで、負の値は方向が逆であることを意味する. よって、正負を区別して示す.

まず、グループ条件におけるモデルの試技（グレーの1人目）は、後の試技者に与える情報を統一するという重要な役割をもつため、モデルの試技の安定性を確認する. モデルには、全グループにおいて同様の跳躍をするよう教示おり、その結果、モデルの仕事率の標準偏差はいずれも個人条件（黒）における1回目の標準偏差よりも小さい、もしくは同等であった. この結果と跳躍高が安定しているという前述した結果 (3.3.1) は、モデルが跳躍高に加えて動作でも大差のない跳躍を行ったことを示している.

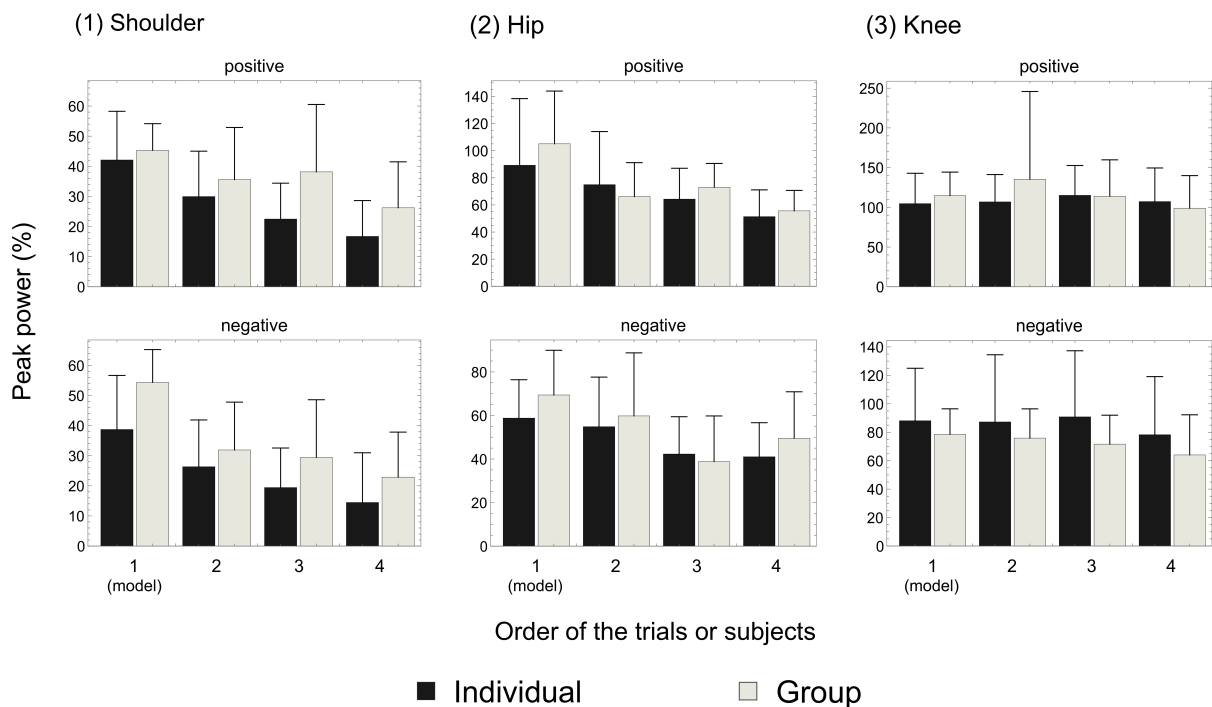


図3-6. 3つの関節に作用する最大仕事率の変化. 左から, (1) 肩関節, (2) 股関節, (3) 膝関節と並んでおり, 黒いバーが個人条件, グレーのバーがグループ条件である. また, スカラー量である仕事率は値の正負で意味合いが大きく異なるため, 正 (上) と負 (下) を区別している.

続いて, 全体の変化パターンを検討する. 個人条件における肩関節および股関節は, 正負とも試技数を重ねる毎に徐々に減少している. これをもとに, グループ条件における肩関節と股関節を確認すると, スムーズに減少していないデータがいくつか見受けられるものの徐々に減少していることが分かる. しかし, 膝関節は横ばいで減少が確認できず, むしろ正の値は1から4までの全てにおいて100%を超過している. これは, 調整試技の仕事率が全力試技のそれを上回っていることを意味する.

これらの変化パターンの類似性を定量化するため, 跳躍高の際と同様, データをロジスティックモデルに近似させて求めた回帰式について統計分析を行う. また, 今回は仕事率だ

けでなく跳躍高との類似性も評価する必要があるため、個人条件の跳躍高（1群）、グループ条件の跳躍高（2群）、個人条件の仕事率（3群）、グループ条件の仕事率（4群）の計4群を対象として、ロジスティック回帰の回帰係数についての一元配置分散分析を行い、多重比較にはBonferroni法を用いた。その結果、肩関節の係数は正負ともに主効果は認められなかった（正: $F_{3,44} = 2.144, p = 0.108, \eta^2 = 0.128$; 負: $F_{3,44} = 0.935, p = 0.432, \eta^2 = 0.060$ ）。また、股関節の係数も負の値のみ主効果が認められたものの（正: $F_{3,44} = 1.880, p = 0.147, \eta^2 = 0.114$; 負: $F_{3,44} = 3.518, p = 0.023, \eta^2 = 0.193$ ）、その後の多重比較ではどの群間にも有意な差は検出されなかった。その一方で、膝関節の係数は正負ともに主効果が認められ（正: $F_{3,44} = 18.519, p < 0.001, \eta^2 = 0.558$; 負: $F_{3,44} = 7.683, p < 0.001, \eta^2 = 0.360$ ）、その後の多重比較において、1群と3群、2群と3群、1群と4群、および2群と4群に有意な差が検出された。したがって、肩関節と股関節に作用する仕事率の変化パターンと跳躍高のそれは類似性が高い一方で、膝関節に作用する仕事率との類似性は低いと評価できる。

3. 4. 考察

3. 4. 1. 動きの生成レベルで発生する運動共感

個人条件とグループ条件の平均跳躍高は、いずれも試技（人）数を重ねる毎に目標跳躍高（50%高）へと収束し、その変化パターンは、図3-3に示したロジスティックモデルへの近似とその係数の統計解析の結果、類似していると判定された。目標跳躍高への収束は、自身の情報を得る個人条件では至って当たり前の結果と言えるが、他者の情報を得るグループ条件でも同様に起きたことは大変興味深い。この結果は、他者の運動に対して与えられたフィード

バック情報を自己のものとして扱い、観察した他者による調整動作から何らかの運動情報が伝達されたことを示唆している。

Calvo-Merino et al. (2005) と Cross et al. (2006) は、対象とする動作を自己の身体で経験することによるミラーニューロンの強い活性現象を、さらに大島・山田 (2010, 2012) は、対象動作の技術レベルが高い者ほど動作の差異に対する感度が高く、またその差異を自己の身体で正確に再現することもできると報告している。よって、対象動作の経験の有無や技術レベルの差は、運動観察によって得られる運動情報の量や質、そして自己の身体による表現に大きな影響を与える。しかし本研究では、専門性が低く、対象者間でのレベルの差が小さいと考えられる垂直跳びにおいて、上記のような結果が得られた。さらに方法でも述べたように、実験前の説明において研究目的の明示はしていない、すなわち他者の運動を参考にせよといった教示は行っていない。このことは、一定の経験があり、運動によって生じる感覚を予めシミュレーションする内部モデル (Desmurget et al., 2009; Haggard, 2009) がすでに構築されている運動であれば、人間は他者へのフィードバックや運動情報を自己のものとして扱い、運動制御レベルで他者とつながる行為を潜在的に行っていることを示唆している。

その一方で、グループ条件の対象者が自身の試技直前に申告した主観的努力感は、2-4人目の平均全てが50%を下回った（図3-3b）。この結果は、他者の運動を観察した対象者が、全力時の努力感の半分以下で出力すれば目標跳躍高に合わせられるだろう、と考えたことを意味しており、垂直跳びは自身が思っているよりも跳びすぎてしまう、という単なる知識が伝達されたとも言える。つまり、運動を観察しなくても、上述した主観と客観の関係性に関する知識が伝達されることにより、跳躍高が目標に収束する可能性も十分に考えられる。この可能性については、後述する検証実験（3.5）で検討することとする。

3. 4. 2. 自己と他者をつなぐ力学的運動情報

前節では、個人条件とグループ条件の跳躍高の変化パターンに類似性が示されたことから、運動制御レベルで自己と他者がつながっている可能性を述べた。そこで本節では、自己と他者をつなぐ運動情報を関節に作用する仕事率に着目して検討する。ここでは、跳躍高の調整局面に仕事率が関与していながら、その最大仕事率が跳躍高および個人条件の最大仕事率と同様の変化パターンを示す関節を特定する。

A. 自己-他者間で伝達される仕事率

前述したように、跳躍高を調整するためには力積を調整する必要がある。全力試技と調整試技の力波形の比較から、力積を調整しているのは最大地面反力に到達するおよそ200ms前であることが明らかになり、さらにこの局面に正方向の仕事率が関与している関節は、肩関節、股関節、膝関節であった。そしてこれら3関節のうち、跳躍高および個人条件の最大仕事率の変化パターンと類似している、すなわち試技人数を重ねる毎に値が徐々に減少していく関節は、肩関節と股関節の2関節であった。よって、自己-他者間で伝達される運動情報は、肩関節と股関節の仕事率であると考えられる。

さて、それではなぜ膝関節の最大仕事率は減少していかないのだろうか。この傾向は、全力試技と調整試技の最大地面反力が同等、もしくは後者の方が僅かに大きな値を示した結果と関連していると考えられ、それを裏付けるように、膝関節の正の最大仕事率は一貫して100%を僅かに超過している。すなわち、跳躍高調整には膝関節の仕事率調整は関与しないと考えられる。これに股関節の仕事率よりも肩関節の仕事率の方が早く立ち上がること、および股関節の仕事率が肩関節の仕事率よりも大きいことを加味すると、肩関節はこれからエネルギーを発揮する股関節の動きのタイミングと大きさを先導する役割を担い、この先導動作に続いて股関節と膝関節は跳躍に必要なエネルギーを生成し、特に股関節は跳躍高調整のため

に発揮エネルギーの調整をしていると考えられる。このように、わずか1秒程度で完了する垂直跳びにも各関節の役割があり、それが運動実施者から運動観察者に伝達されていると考えられる。このような運動中の関節の役割は歩行中の力学分析によっても解明されており（Gordon et al., 1980）、それが垂直跳びを制御する、あるいは運動を観察する際にも同様に見られることは大変興味深い。

B. 仕事率における正負の解釈

本研究の分析では、仕事率を正負で区別している。これは、関節周りの仕事率がトルクベクトルと速度ベクトルの内積で求められるスカラー量であり、正と負で意味合いが異なるためである。正の値は力と運動の方向が一致している、すなわちエネルギーを発揮している状態を表す。その一方で、負の値は力と運動の方向が一致していない、すなわち運動の方向を変更しようとしている状態を表す（Winter, 2009）。つまり、本研究の分析における正の最大仕事率の変化は発揮エネルギーの変化を、そして負の最大仕事率の変化は方向転換の勢いの変化を意味している。

以上のような正負の意味合いを考慮して今一度結果を確認すると、最大仕事率の変化パターンの類似性（図3-6）は、正と負どちらにも認められる。このことから、観察者は他者運動における肩関節と股関節の発揮エネルギーおよび方向転換の勢いの変化を有用な情報として獲得し、自己の運動調整に役立てていると考えられる。

C. 仕事率と親和性の高い動き

ここまで、自己と他者の運動制御は仕事率という力学的な運動情報によってつながり得る、と述べてきた。しかしながら、このことが全ての動きに適応されるかといえば、そうではない。仕事率はその特性から、勢いや切り返しのある動き、また本章の冒頭で述べた“手ごたえ”に特徴付けられる動きに適していると考えられる。これが本研究では、垂直跳びであっ

た。しかし、人間の動きの中には、流れるといった言葉で表現される滑らかな動きも多く含まれる。例えば、ダンスやバレエにおけるウェーブ動作のような、主に美しさを表現する動きがそれである。そのような動きには、他の力学量が適していると考えられる。

3. 5. 検証実験（実験2）

実験1の考察（3.4.1）において、垂直跳びは自身が思っているよりも跳びすぎてしまう、という単なる知識の伝達により跳躍高が目標へと収束した可能性を示した。そこで実験2では、グループ条件において運動情報は与えずにKR情報のみを与える、すなわち他者運動の観察はさせない、という新たな実験を実施し、上記の可能性を検討する。

3. 5. 1. 方法

A. 実験対象者

実験2は、実験1に参加していない対象者3名と1名のモデルで構成された4名1組のグループを4組作成した。したがって、計12名の対象者が本実験に参加した。対象者はいずれも20歳以上の健康な男子大学生（身長 $172.6 \pm 5.5\text{cm}$ 、体重 $73.5 \pm 11.9\text{kg}$ ）であり、選考基準や研究倫理、インフォームドコンセントの取得に関する手順は全て実験1と同様であった。

B. 実験内容

基本的な方法は実験1のグループ条件と同様であるが、実験2はKR情報以外の情報を一切与えない環境で実施した。その方法として、試技者以外の全対象者を実験室の外で待機させ、ここではアイマスクおよび防音イヤーマフを着用させた。これにより、視覚および聴覚情報、そして跳躍時の振動情報が遮断された。対象者は自身の試技順になると実験室に入室するよう

指示され、自身よりも前に跳躍した全試技者のKR情報を得た上で跳躍した。なお、1人目の記録は実験1におけるモデルの平均とし、これが2人目以降の対象者にKR情報として伝えられた。

3. 5. 2. 結果

A. 跳躍高の変化

実験2における跳躍高の変化を図3-7に示す。なお、1人目は実験1におけるモデルの平均（74.05%）としたため、これは固定値である。この図から分かるように、跳躍高の平均は破線で示された目標跳躍高に収束するどころか、3および4人目においてはむしろ1人目よりも大きな値を示しており、実験1で示された変化パターンとの類似性は確認できない。また、図中

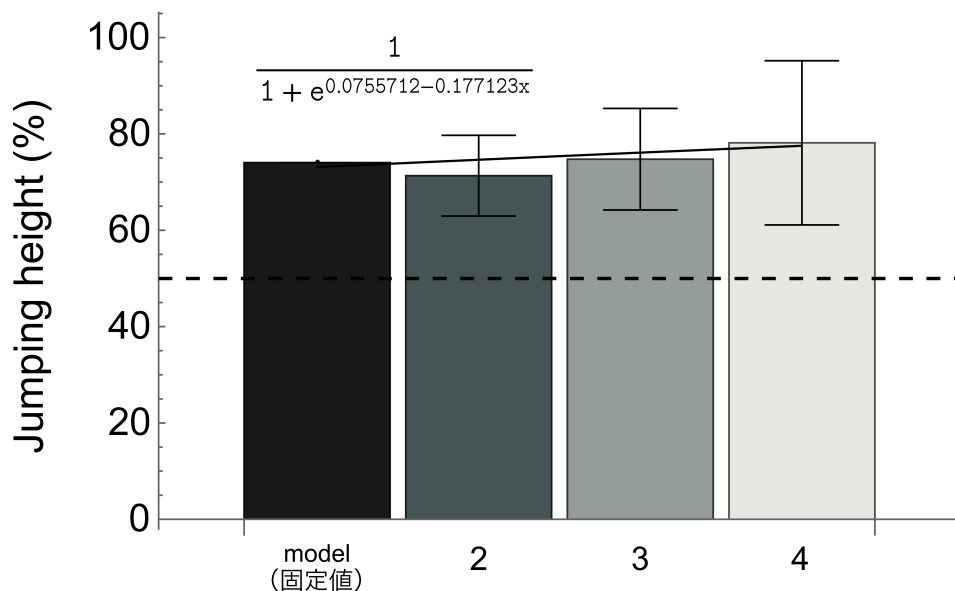


図3-7. 跳躍高の変化とロジスティック曲線（実験2）。実験1でモデルが記録した跳躍高の平均を全組に共通して与えたため、1人目（モデル）は固定値で示されており、標準偏差は0である。

左上に記したロジスティック回帰式のxに関わる係数が正ではなく負の値を示しており、実験1の結果とは大きく異なる。

上述した変化パターンの類似性を定量的に評価するため、各グループのデータをそれぞれロジスティックモデルに近似させ、その回帰式のxに関わる係数について、実験1の個人条件と対応のないt検定を行った。その結果、両者の間に有意な差が認められ（ $t_{14} = 4.546, p < 0.001, d = 2.625$ ）、両変化パターンは類似しているとは言えないことが確認された。しかし、グループ毎の結果を確認すると、4人目が実験1における4人目の標準偏差の範囲内に収束したグループが1組だけ（以下、唯一収束したグループ）認められた。これに関しては、適宜検討していくこととする。

B. 最大仕事率の変化パターン

跳躍高の調整局面に関与していると考えられる3関節（肩関節、膝関節、股関節）に作用する最大仕事率の変化を図3-8に示す。全4グループのデータをまとめたバーチャートの上に、唯一収束したグループのデータのみを折れ線で重ねている。

これらのデータをグループ毎にロジスティックモデルに近似させ、対応のないt検定を用いて実験1における個人条件の跳躍高変化パターンとの類似性を検討すると、肩関節の正（ $t_{14} = 9.681, p < 0.001, d = 5.589$ ）、肩関節の負（ $t_{14} = 4.356, p < 0.05, d = 4.006$ ）、股関節の正（ $t_{14} = 8.291, p < 0.001, d = 4.787$ ）、および膝関節の正（ $t_{14} = 3.171, p < 0.01, d = 1.831$ ）に有意な差が認められた。すなわち、これらの変化パターンと実験1における個人条件の跳躍高変化パターンは類似していないと評価できる。実験1では、肩関節および股関節の正負に類似性が示されたため、大きく異なる結果が得られたと言える。また、唯一収束したグループのデータ（折れ線）に着目すると、試技順が進むにつれて減少しているのは股関節の負の値だけであ

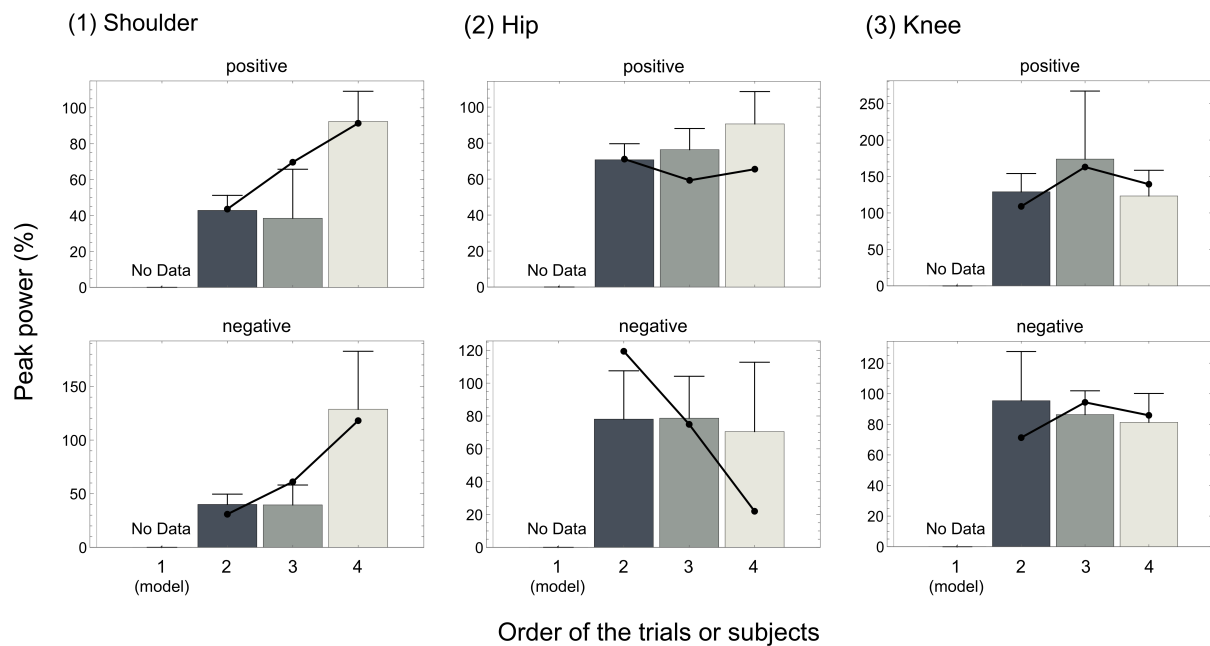


図3-8. 3つの関節に作用する最大仕事率の変化（実験2）. 左から、（1）肩関節、（2）股関節、（3）膝関節と並んでおり、上が正の値、下が負の値である。また、バーに重なる折れ線は、唯一4人目が目標跳躍高付近を記録したグループのデータを示している。

る。収束したサンプルの数が1であるために統計的な検討は困難であるが、特に肩関節は正負ともに明らかな増加傾向にあり、実験1とは真逆の結果を示している。

3.5.3. 考察

実験2では、運動情報が無くてもKR情報が得られれば跳躍高は目標へと収束するのか、という可能性に対し、KR情報のみを与えるグループ条件を実施した。その結果、跳躍高は収束せず、その変化パターンは実験1における個人条件との類似性を示さなかった。このことは、上記の可能性を否定し、KR情報に加えてその動作に関する運動情報も必要であったことを示唆している。つまり、どのような結果が得られたかという情報を得たとしても、どのように出力

したのかという情報が無ければ、他者による運動調整を自己の運動調整に役立てることは難しいと考えられる。なお、これらの跳躍高を出力した仕事率の変化パターンも、実験1とは大きく異なる結果を示した。

さて、実験1では、個人条件とグループ条件の仕事率の変化（調整）パターンが類似していることから、肩関節および股関節に作用する仕事率の情報が伝達されることによって跳躍高が目標へと収束した、と考察している。しかしながら、人間が垂直跳びの跳躍高を調整する際には、いつでもこれらの仕事率を調整する、という可能性も十分に考えられる。この可能性を検討するため、実験2において唯一跳躍高が収束した1グループの仕事率の変化パターン（図3-8内の折れ線）を参照すると、実験1の変化パターンと大きく異なっていた。特に、実験1では試技者順が進むにつれて減少傾向にあった肩関節は、正負ともに明らかな増加傾向にある。それにも関わらず跳躍高は調整されているという事実は、他者の運動を観察した実験1とは異なる方法を用いて調整したことを示唆している。つまり、実験1において跳躍高が目標へと収束した現象は、他者の運動情報が伝達されたことによる可能性が高いと考えられる。

以上をまとめると、実験2は、他者による運動調整を自己の運動調整に役立てるためにはKR情報に加えてその運動情報が必要であること、および実験1のグループ条件において跳躍高が目標へと収束した現象は、人間があらかじめ持っているバイオメカニク的な調整方略によるものではなく、他者の運動情報が伝達されたことによるものである可能性を強める結果を示したと言える。

3. 6. 本章の結論

本章では、他者から得られる運動情報が徐々に増えていく環境を実験室内に構築し、他者（自己）の運動が自己（他者）の運動に与える影響と自己-他者間で伝達される運動情報を力学的に検討した。その結果、他者の調整動作に対して与えられたフィードバック情報と運動情報を自己の身体に適応させてより正確な制御を行う、すなわち運動制御レベルで自己と他者がつながる現象が確認された。このことは、他者の運動を一人称的に観察する、すなわち運動共感が生じたことを示唆している。また、グループ条件において運動の観察をさせずにフィードバック情報のみを与えた検証実験では跳躍高が目標に収束しなかったことから、運動共感を発生させるためには結果の情報だけでなく、他者運動を観察することによりその運動に含まれる調整に関する運動情報を得ることが必要であることが示された。そして、運動共感の発生に伴い自己-他者間で伝達される運動情報を力学的に検討すると、関節周りに作用する仕事率である可能性が示された。本研究において採用された垂直跳びでは肩関節および股関節周りに作用する仕事率であることが特定できたように、今後、異なる動作に適する関節も特定できるだろう。これらの知見は、身体運動のコツの伝達や一度失われた動きの再獲得を目指すリハビリテーションにおける新たな運動学習法の開発に貢献することが期待できる。そればかりか、これまで主観的な現象としてのみ捉えられてきた集団内での成功と失敗の連続、いわゆる「流れ」を一つの情報伝達モデルとして説明することも可能にすると考えられる。

本研究は、これまでミラーニューロンの活動という一点に帰着していた観察運動学習のメカニズムに、運動共感とそれを生じさせる力学情報という観点からアプローチした初めての研究になり得る。

第4章 総括

対人スポーツでは、反応者が先導者よりも早く運動を完了させる場面がしばしば観察される。本研究は、この1対1の攻防が成立するメカニズムの一端を明らかにすることを目的として、反応者の運動制御を実際の動き（第2章）とその際に伝達される運動情報（第3章）という2つの観点から検討したものである。そこで総括である本章では、まず、本研究を構成する2つの研究で得られた結果を振り返った上で、研究1と研究2の繋がりを考察する。そして、それらの総合的な考察をもとに、反応者が先に運動を完了させる仕組みの概念形成を行う。

4. 1. 動き出しと情報伝達の観点からみた反応者の運動制御

理論物理学者のニールス・ボーアが西部劇の決闘シーンから導いた仮説を初めて実験的に検証したWelchman et al. (2010) は、反応者であるヒーローが先導者である悪党に勝利することは困難であると結論付けた。これは、反応者の運動時間（MT）が先導者のMTよりも短くなる（ボーアの法則）という重要な結果を得ながらも、反応者が負う反応時間（RT）の影響があまりに大きすぎたために導き出された結論である。しかしながら、先導者と反応者という対人関係は対人スポーツにおける1対1の状況にも置き換えられ、そこでは反応者が先導者の動き出しを制する、または出鼻を挫く場面がしばしば観察される。すなわち、Welchmanらが導いた結論とスポーツの実場面で起こる事象との間には矛盾が生じており、ボーアが提唱した仮説は対人スポーツの本質を突く重要な問題提起であるとも言える。そこで本研究では、この1対1の攻防が成立するメカニズムの一端を明らかにするために、反応者の運動制御

を対人動作における動き出し（研究1）と自己-他者間における情報伝達（研究2）という2つの観点から検討した。

まず研究1（第2章）では、ボーアの法則を検討してきたいくつかの研究に共通する問題点を2点明らかにし、そこから検討すべき課題を導出した。1つ目の問題点は、ボタン押し実験を主とした手部運動でしか検討がなされていない点である。スポーツで用いられる動作は全身運動が基本であり、手部運動と全身運動の間には身体運動における最も重要な法則の一つであるフィッツの法則（Fitts, 1954）が適用されるか否かに代表される相違点が多数挙げられた。よって、このボーアの法則を対人スポーツの状況に適用させるためには、身体重心の移動および空中局面を伴う全身運動で再検討する必要があると考えられた（課題1）。続いて2つ目の問題点は、動き出し時刻を位置（ボタン押し実験によるデジタル信号）や速度といったキネマティクスデータをもとに定義している点である。特に、ボタン押し実験を用いた研究では、本来アナログデータである動きをデジタルデータ、すなわち0と1という単純な2つの状態に変換して動き出しを定義していると言える。しかし、動きを生成する力自体はデジタル信号が切り替わる瞬間よりも前に立ち上がっていることから、動き出しの検出方法を見直す必要があると考えられた（課題2）。以上の課題を踏まえ、研究1では、対象動作にサイドステップを採用し、さらに動き出しを地面反力の立ち上がりから定義することにより、対象動作と運動時間の算出方法がボーアの法則に与える影響およびその生成メカニズムを検討した。実験の結果、意図的動作のMTよりも反応的動作のMTの方が短くなることが確認され、このことから、身体重心の移動および空中局面を伴う全身運動でもボーアの法則が適用されることが示された。さらに、両動作を詳細に分析すると、速度生成および力発揮パターンの違いが明らかになり、特に動作中における速度の逆転現象が大きな特徴として抽出された。これらの違いから、反応的動作が時間差を生成する局面（反応者の優位段階）、意図的動作が移動距離

の差を縮める局面（先導者の優位段階），反応的動作が第一局面で生成した時間差を守りきる局面（先導者の未完了段階），というボーアの法則を構成する3つの局面が特徴付けられた。また，動作中における速度の逆転現象は，動作時間が長くなればなるほど本法則の効果が消失していくことを示唆しており，これはWelchman et al. (2010) およびPinto et al. (2011) による報告を支持している。よって，いくつかの段階をなす動作よりも，素早く単発的な動作の方がより大きな効果を発揮することが期待できる。本研究では，キネマティクスな側面からの検討に加え，動きに関する全ての情報を含む地面反力データを用いてキネティクスな側面からもボーアの法則を検討することにより，両動作の間に力発揮パターンおよび制御様式の違いが示唆された。これらの違いは，Welchman et al. (2010) がボーアの法則を生存戦略として発達してきた運動特性と表現したように，意識的に制御できるものではない，潜在的なものであると考えられる。つまり，トリガーが内部にあるか外部にあるかによって潜在的に制御様式を選択して動きを変化させている可能性がある。

次に研究2（第3章）では，観察対象の運動と同期して発生するという運動共感の特徴に着目し，RTが短縮される可能性の検討を試みた。運動共感は自己組織化理論を基礎として発展してきた対人同期（Okumura et al., 2012; Varlet & Richardson, 2015）とは異なり，安定した周期運動を前提としない単発的な同期を実現させる情報伝達システムと考えられる。しかし，運動共感を提唱した運動学（Meinel, 1960）は体育の指導現場から発展してきた研究分野であるがゆえに，運動共感の実験的な検証はほとんどなされていないことから，運動共感の発生に関与する運動情報を実験的に検討する必要があると考えられた（課題3）。この課題を踏まえ，研究2では，運動共感の発生を実験的に検証し，さらに得られた実験データをもとに，自己-他者間で伝達される運動情報を検討した。垂直跳びの跳躍高調整課題を用いた実験の結果，他者の情報を与えられても自己の情報を与えられた時と同様に運動調整を適切に行え

ることが示された。この結果は、他者の運動情報を自己の動きの制御として扱っていること、すなわち観察対象に運動共感を起こしていることを示唆している。さらに、それらの動作を詳細に分析すると、他者運動の仕事率を有用な情報として用いることにより運動共感を起こしている可能性が示された。そしてこの力学量はしばしば、“手ごたえ”といった言葉で表現される（日高, 2008; 山本, 2012）。すなわち、我々が手ごたえとして扱っている感覚を他者の調整動作から獲得し、自己の運動調整に役立てたと考えられる。

4. 2. デジタルデータを扱うボタン押し実験の再考

前節では、本研究を構成する2つの研究で得られた結果を振り返った。本節では、実験結果を分析していく過程で明らかになった研究1と研究2の繋がりを考察し、次節の概念形成へと繋げていく。

研究1（第2章）では、ボーアの法則が主にボタン押し実験でしか検討されておらず、ゆえに本来アナログデータである動きがデジタルデータに変換され、力がボタンに作用してから手がボタンを離れるまでの時間と動態が分析から除外されてしまうという問題点を解決するために、動き出しの瞬間を地面反力の立ち上がりから検出し、運動時間の新たな算出方法を提案した。これは当初、ボタン押しにおけるデジタル信号の切り替わりよりも前に立ち上がっている力から動き出し時刻を定義することにより、より高い精度でボーアの法則を再検討すべきという検討課題（課題2）に従うものであった。その一方、研究2（第3章）では、運動共感の発生には他者運動の仕事率情報が有用である可能性が実験的に示された。それでは、ボタン押し実験のデジタルデータであれば分析から除外されてしまう区間における仕事率は、実際にどのような動態を見せるのだろうか。

図4-1下は、サイドステップの最中に実験対象者が発揮する重心の仕事率の典型例である。この仕事率は、2枚のフォースプレートを用いて取得した両脚の鉛直方向の地面反力データ (F_z) を加算し、そのデータを実験対象者の質量で除することで加速度を、さらにその加速度を数値積分することで速度を求め、その両者を掛け合わせて算出した。まず、進行方向脚が離地する局面B (図中, takeoff) はボタン押し実験においてデジタル信号が切り替わる瞬間、すなわち動き出しの瞬間に相当しており、それは研究1で新たに定義した動き出し時刻 (図中, Onset time) から100ms程度遅れていることが分かる (図中, time lag)。そして、その時間遅延を示す区間における仕事率は正の値を示しており、局面Bでは極値に達している。これは、仕事率が速度と力 (加速度) の掛け合わせであり、動き出しの瞬間は力が大きく、且つ速度が立ち上がる瞬間だからである。つまり、デジタルデータを扱うボタン押し実験では、動き出し局面における仕事率の動態が分析に含まれない。それと同時に、動き出し局面が正の仕事率が最初に発揮される局面であることから、ボタン押し実験で得られたデジタルデータではなく実際の動作を分析した研究1は単に動き出し時刻の検出精度を高めただけでなく、この局面が運動共感で使われる重要な情報を含んでいることを示唆しているとも言える。

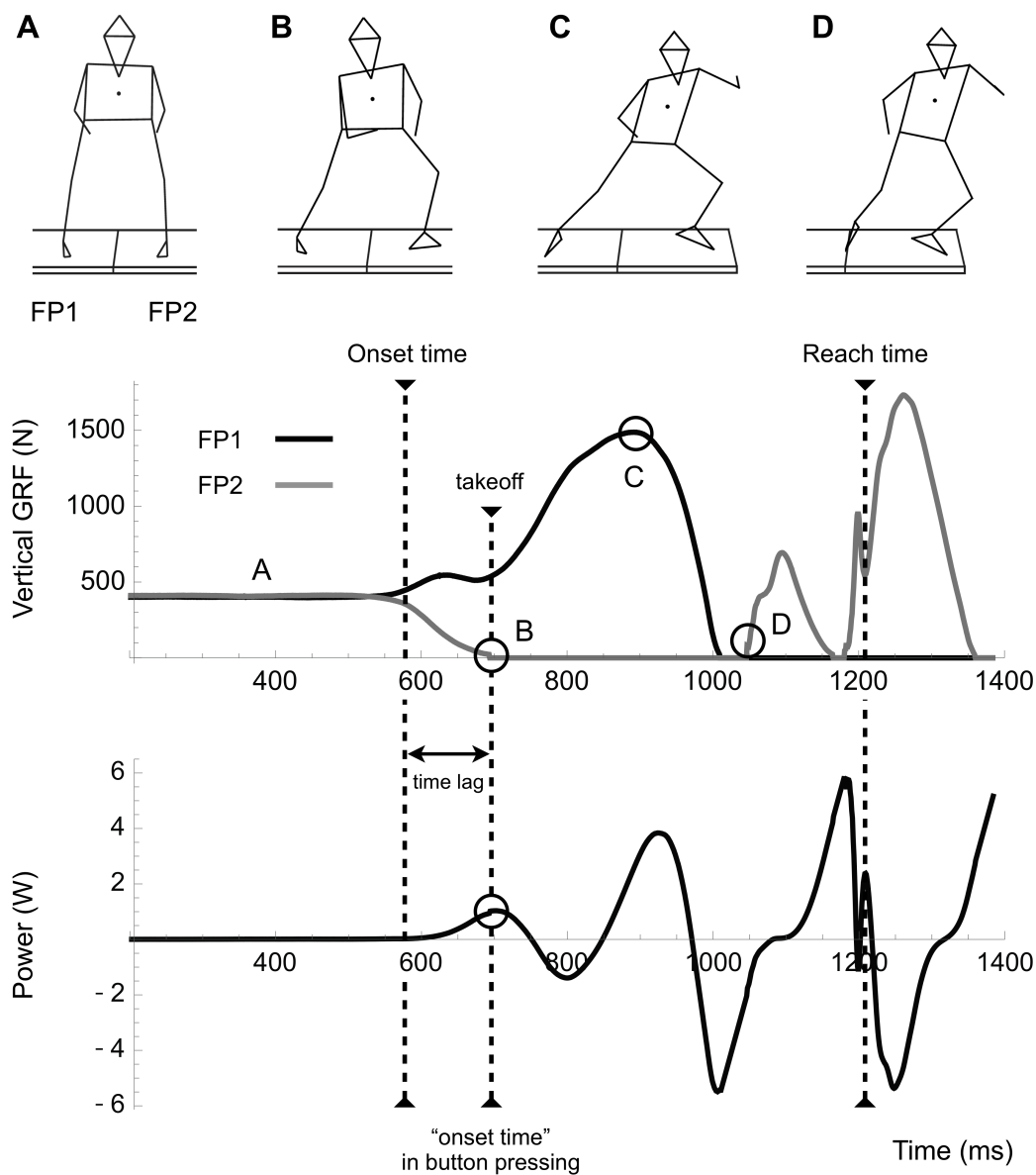


図4-1. サイドステップ動作の地面反力と仕事率. 上図が鉛直方向の地面反力, 下図が重心の仕事率である. 進行方向脚が離地する局面Bは, ボタン押し実験における動き出しに相当し, 力の立ち上がりから求めた動き出し時刻と比べて100ms程度遅れていることが分かる. そして, その局面における仕事率は正の値を示している.

4. 3. 反応者が先に運動を完了させる仕組みの概念形成

研究1（第2章）では、これまで手部運動でしか確認されていなかったボーアの法則が全身運動にも適用されることが示され、最終的なMTの差は平均57msであった。さらに、ボーアの法則は速度の逆転現象を含む3つの局面で構成されており、最大速度に達するまでの第一段階でMTの差が最大になることが本研究で明らかにされている。この段階では平均84msの差が確認されており、対象者別に確認すると、100ms以上の差が生成されている対象者も見受けられた（表2-3を参照）。陸上競技短距離種目におけるフライングスタートの基準が100ms未満であること（World Athletics, 2019）を鑑みると、この時間差は聴覚刺激に対するRTにも相当する大きな差と言える。したがって本法則は、ボクシングにおけるパンチング動作や一步で完了する移動等、素早く単発的な動作の方がより大きな効果を発揮することが期待される。しかしその一方で、単発的な動作であっても、このアドバンテージが180-200msとされるRT（Galton, 1899; Fieandt et al., 1956）をカバーできるかと言え、それほど大きな差には相当していない。この結果は、Welchman et al.（2010）をはじめとするボーアの法則を検討してきた全ての研究による報告と一致している。このことから、ボーアの法則は反応者が先に運動を完了させる仕組みに貢献している可能性は高いものの、これだけでは説明が成立しないと考えられる。

研究2（第3章）では、運動共感の発生を実験的に捉え、さらにその発生には仕事率情報が関与している可能性を示した。言い換えれば、人間は他者運動を一人称的に観察する際、すでに生成された動きとして現れるキネマティクス情報ではなく、その動きを生成しているキネティクス情報を得ており、さらにこのキネティクス情報（仕事率）の立ち上がりを予測することによってRTの短縮が可能になると考えられる。しかしこれは、先導者が実施する対象動

作について一定の自己経験があり、運動によって生じる感覚を予めシミュレーションする内部モデルがすでに構築されている必要がある。また、運動共感は観察対象と同期して発生すると述べたが、同期するのはあくまで観察対象の運動と自己の仮想運動である。この仮想的な身体運動は身体内部の神経系で生み出されるため、情報空間で生じていると言える。情報空間の特徴は質量がないことであり、慣性を考慮する必要がなく、力学法則に従わない（山田・若月, 2018）。この運動を力学法則に従う物理空間に表出させようとする、ある一定の時間を要する。したがって厳密には、他者運動との同期、すなわちRTの無効化ではなく、RTの短縮が正しい表現であると言える。さらに、仕事率は速度と力（トルク）の掛け合わせであるため、速度の2倍周期で移り変わる。この特徴から、動きの発生がより短時間に強調されているとも言え、これもRTの短縮に貢献していると考えられる。

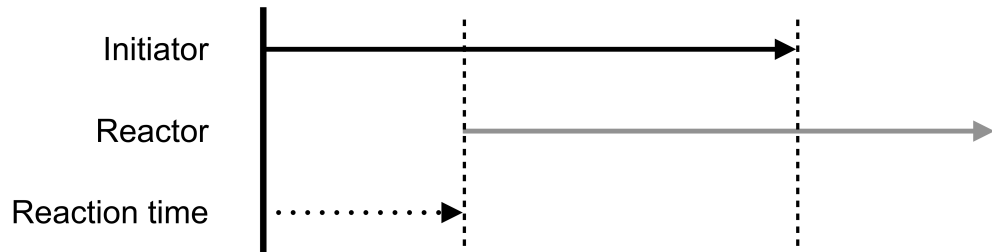
さて、これまで反応といえ、与えられた外部刺激に対するボタン押し課題に代表される、刺激-反応のパラダイムにおける実験的な検討が一般的であった。しかし、ギブソン生態心理学の創始者であり生態学的アプローチを考案したジェームズ・ギブソン（James Gibson, 1904-1979）は、アフォーダンス（affordance）と呼ばれる、刺激そのものに行為を生成する情報が含まれているという概念を用いて、このパラダイムに異議を唱えている（Gibson, 1979）。つまり、アフォーダンスは情報の入力と動きの出力が同期して行われるという考え方であり、刺激の知覚（入力）、情報処理、そして動きの生成（出力）の順で行われるとされる従来の反応形態とは一線を画する。これの実験的な検証として、Lee & Aronson（1974）は、「動く部屋」と呼ばれる実験を行っている。この実験では、可動式の壁でできた部屋の中に乳幼児を立たせて壁を前後に動かすと、乳幼児は壁の動きに合わせて重心を動揺させ、高確率で転倒する現象が確認された。この現象はまさしく、外部刺激に動きが同期した例であると言える。さらに、Kugler & Turvey（1987）は、アフリカシロアリによる集団的な巣作りを対

象として、ギブソンの生態学的アプローチを、自ら力を発揮する生物における個体間の協調に発展させた。そして本研究は、自己と他者の運動共感という考え方を導入することによって刺激-反応のパラダイムの見直しを図ったものと言え、これはギブソンによる問題提起と類似している。さらにギブソンは運動に関する情報をアフォーダンスという抽象的な概念で捉えているが、本研究ではそれが人間の動きにおける仕事率である可能性を実験的に示した。この成果は、ギブソンによる問題提起を支持し、発展させると同時に、運動共感型の反応とも言える新たな反応形態を提案する。

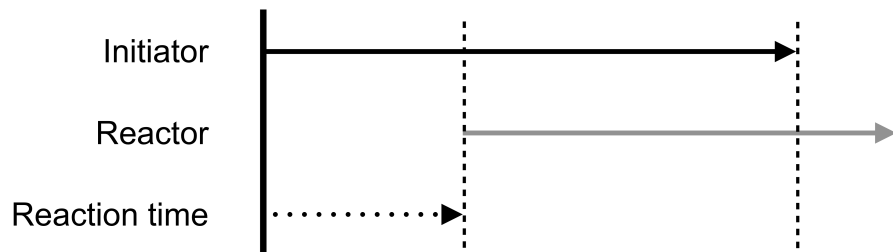
以上を踏まえ、ボーアの法則による運動時間の短縮と運動共感による反応時間の短縮を組み合わせると、反応者が先導者よりも早く運動を完了させる仕組みを説明することも可能となる。図4-2はその概念図であり、両者のMTおよび反応者のRTが矢印の長さで表されている。上から、(1)は両者のMTが同等でRTも通常通りである。続いて、(2)は(1)にMTの短縮のみが作用する。すなわち、RTは(1)と同等である。そして、(3)は(2)にRTの短縮が加わる。すなわち、MTは(2)と同等である。ここで初めて、反応者が先導者よりも早く運動を完了させることが分かる。

最後に、概念形成された仕組みを実際の対人場面に置き換えて考える。ボーアが仮説提唱の舞台とした西部劇における銃決闘は、両者がほぼ同じ動きであるため、そこでは先導者に運動共感を起こしてRTが短縮され、最終的に反応者が勝利を収める。その一方で、対人スポーツは両者の動きがそれぞれ異なる。しかしながら、動き出し自体は両者にあるため、反応者のそれが短縮され、反応者が先に運動を完了させる一要因になる可能性がある。

(1) Original



(2) Shortened MT only



(3) Shortened MT and RT

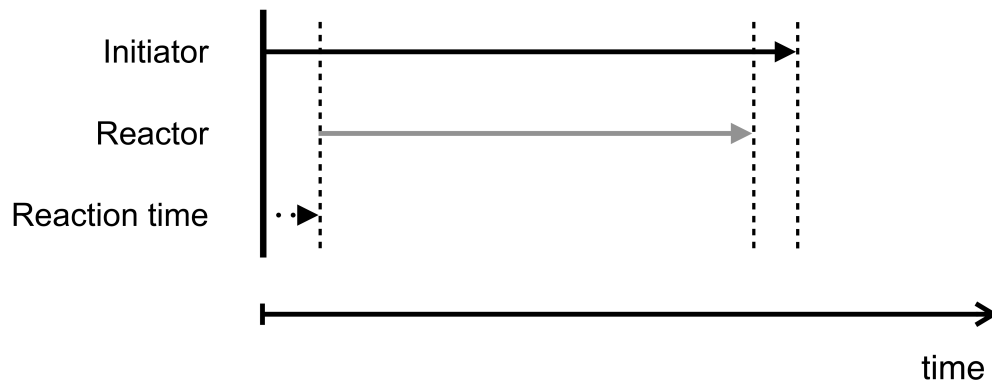


図4-2. 反応者が先に運動を完了させる仕組みの概念図. 上から, (1) 従来の考え方, (2) MTのみの短縮, (3) MTおよびRTの短縮であり, 両者のMTおよび反応者のRTが矢印の長さで表されている. (3) では, RTとMTの短縮が組み合わさることにより, 反応者が先導者よりも早く運動を完了させている.

4. 4. 本研究の限界と今後の課題

研究1（第2章）では、主に2つの限界が挙げられ、いずれも方法によるものである。まず1つ目の限界は、採用されたタスクに関連する。本研究で採用された、静止状態からサイドステップを踏んで移動するタスクは、地面反力データから動き出し時刻を検出するというオリジナリティを保つために実際の動きを単純化したものであった。実際のスポーツ場面では、静止状態から突然動き出すことは稀であり、テニスにおけるスプリットステップに代表されるような準備動作を伴う場合が多い（Uzu et al., 2009）。サイドステップの準備動作に関連する先行研究では、準備段階で周期的な上下運動を行わせる、すなわち地面反力の加重と抜重を連続して起こすことによる主動作への影響が検討されており、加重状態よりも抜重状態で提示された刺激に反応した方が目標への到達時間が早まること（Fujii et al., 2013）、さらにはバスケットボールにおけるディフェンスの成功率が高まること（Fujii et al., 2015）が報告されている。以上のように、準備動作が主動作や1対1の攻防の結果に大きな影響を与えることから、今後は動的に移り変わる地面反力から動き出しを検出する方法を検討し、より対人スポーツの現場に近い環境で実験を企画する必要がある。続いて2つ目の限界は、提示刺激の種類に関連する。本研究は対人動作の検討を目的としているため、本来であれば、2名の対象者が対峙して相手の動きに反応する実験を企画すべきである。しかし、同時に使用できるフォースプレートの数に限りがあったことから、本研究ではLED点灯によるデジタル刺激を用いることとなった。これに関連して、Belen'kii et al. (1967) は、人間が動作を生成しようとする際、その後生じるであろう重心動揺を抑制するために、主動筋の活動に先立って他部位の筋群が活動することを報告している。彼らの研究では、立位姿勢から片上肢を急速に挙上させると、主動筋である三角筋の活動に先行して同側の大腿二頭筋や脊柱起立筋が活動することが実験的に示されている。この補償的な姿勢制御は、先行随伴性姿勢調節（anticipatory

postural adjustment: APA) と名付けられており、ここで重要なのは、この姿勢制御が運動実施者の意思に関係なく潜在的に生じる点である。つまり、先導者の主動作に先行して現れるAPAは反応者にとってより早く動き出すための有益な情報になり得る。しかしながら、第2章で行われた実験ではデジタル刺激が用いられたため、これにはAPAに代わるような、LEDの点灯に先立つ刺激は含まれない。よって今後は、実際の人間の動き、すなわちアナログ刺激に対する反応を検討していく必要がある。

研究2（第3章）では、運動実施者との時間遅延なしに生じるという運動共感の大きな特徴をもとに、二者間の単発的な同期および反応時間の短縮の可能性を論理的に導いた。しかしながら、これはあくまで推論であるため、反応時間の短縮とそれに対する仕事率情報の関与を実験的に検証していくことが今後の課題である。

以上のように、本研究にはいくつかの限界点がありつつも、複雑な対人関係をなす1対1の攻防を反応者が制するメカニズムの一端を明らかにしたと言えよう。

第5章 結論

対人スポーツにおける反応者の運動制御を対人動作における動き出しと自己-他者間における情報伝達の観点から検討するために、本研究では、実際の動きに着目して運動時間の短縮を検討する研究（第2章 全身運動におけるボアの法則とその生成メカニズム）と運動共感に着目して反応時間の短縮を検討する研究（第3章 運動共感の発生に伴い自己-他者間で伝達される運動情報）を行った。その結果、以下の結論が導かれた。

- i. 対人スポーツにおける反応者が先導者よりも先に運動を完了させる技は、ボアの法則による運動時間の短縮および運動共感による反応時間の短縮の両者が貢献することによって成立すると考えられる。
- ii. 運動時間の短縮は単発的な動作ほど顕著であり、反応時間の短縮は仕事率の立ち上がりを予測することによって可能になると考えられる。

論文の構成

本論文は、以下の査読付き論文をもとに構成された。

Tsubasa Wakatsuki, & Norimasa Yamada (2020). Difference between intentional and reactive movement in side-steps: patterns of temporal structure and force exertion. *Frontiers in Psychology*, 11:2186. doi: 10.3389/fpsyg.2020.02186 (第2章を構成)

若月翼・山田憲政 (2020). 他者の運動情報は自己の運動調整に役立つか：仕事率でつながる自己と他者の運動制御. 認知科学 (特集 若手研究者の認知科学), 27(3), 295–307. doi: 10.11225/cs.2020.024 (第3章を構成)

謝 辞

本博士学位論文の作成は、学位審査委員会主査である中京大学大学院体育学研究科山田憲政教授の御指導のもとで行われました。山田教授には、公私に渡り多大なる御指導と御厚情を賜りました。その中でも、常に質の高い仕事をするために自身のリズムと習慣を徹底的に研究すること、図の美しさからお酒の種類に至るまで自分なりのこだわりを持つこと、そして日常生活に研究活動を埋め込み、研究活動に日常生活を埋め込むこと、これらの教えは私が当初持っていた研究と日常の関係に関する概念を覆すものであり、プロフェッショナルとしての仕事を常に意識させるものでした。論文作成に関する直接的な御指導はもちろん、上のような間接的な御指導なくしては、本論文を完成させることはできませんでした。

私が研究の道を本格的に志したきっかけは、山田先生とその労作、『フェルメールが約350年前に捉えた女性の身振り』との出会いに他なりません。オランダの画家、ヨハネス・フェルメールが自身の代表作である“牛乳を注ぐ女”に日常の静かな動きを埋め込んだ巧みな絵画技法を、地道な資料集めとバイオメカニクスの分析手法によって解明したこの研究は、スポーツ科学が有する無限の可能性を示すものであり、紹介して頂いたのは学部生時代になりますが、その時に受けた衝撃と胸躍る感覚は今も変わらず鮮やかに思い出されます。素直な好奇心で溢れたこの研究は、進路や将来のキャリア形成に迷っていた私に確かな道しるべを与えて下さいました。博士課程2年時（2019年7月）には初めて国際学会で研究発表をするために、山田先生がこの絵と出会った地であり、Human Movement Scienceの聖地とも言えるアムステルダムを共に訪れ、それまでとそれからの研究生活に思いを馳せました。その時に抱いた強いモチベーションが、幾度にも渡る論文投稿先からのリジェクトや研究助成等の不採用

通知を受けた際の心の拠り所となり、本論文の完成へと導いてくれました。山田先生とその奥様に、心より感謝申し上げます。

中京大学大学院体育学研究科家田重晴教授、倉持梨恵子准教授には、学位審査委員会の副査を引き受けて頂きました。先生方には細部に渡り内容を吟味して頂き、丁寧な御校閲と御助言を賜りました。特に、本論文を構成する2つの研究の繋がりをまとめた考察部（第4章第2節）は先生方の御指摘から加筆された箇所であり、本論文の意義を格段に高める最重要考察の一つとなりました。深く、感謝致します。

本論文がこのような形にまとまるまで、実に多くの方々にお世話になりました。その中でも、中京大学スポーツ科学部小山哲教授（現名誉教授）には、それはそれは素晴らしい実験室を御用意頂き、研究に没頭する環境を整えて頂きました。さらに、公私に渡り頂いた御助言は、自信を失いつつあった私を幾度となく救って下さいました。中京大学大学院体育学研究科來田享子教授（体育学研究科長）から頂いた温かくも力強い御言葉にはいつも励まされ、同桜井伸二教授には初めて研究の基本概念を御教授頂き、同荒牧勇教授には研究内容への貴重な御意見を賜りました。山梨大学大学院総合研究部木島章文教授、東京学芸大学教育学部奥村基生准教授には、勉強会に参加する機会を賜り、夜が明けるまでディスカッションをさせて頂くなかで研究社会におけるネットワークの重要性を教わりました。また、愛知淑徳大学健康医療科学部豊嶋陵司助教（元応用スポーツ科学系実験実習助手）、名古屋大学大学院情報学研究科藤井慶輔助教（理化学研究所革新知能統合研究センター客員研究員、JSTさがけ研究者、元名古屋大学総合保健体育科学センター学振PD）には、若手研究者のお手本として研究に向かう真摯な姿勢を教わり、あらゆる相談にも親身になって頂きました。そして、同年代の仲間たちの存在は私にとって非常に大きなものでした。まず、スポーツ認知・行動科学系のメンバー、特に学部および修士課程の同期である村上宏樹氏と中島健登氏とは互い

に叱咤激励し合い、かけがえのない青春の日々を過ごしました。本稿第3章を構成する研究2で行われた実験は、彼らの協力なしには叶いませんでした。また、学部および修士課程の先輩であり博士課程の同期である応用スポーツ科学系中島大貴氏には、他系ながら多くの意見を頂き、強い覚悟と計画的な行動には大きな刺激を受けました。ここに書ききれなかった全ての方々にも、この場を借りて感謝申し上げます。ありがとうございました。

最後になりますが、幼少期から研究者としての背中を見せてくれた父徹、少しでも私の研究に関係しそうな素材を目ざとく見つけ与えてくれた母理恵、そしていつも強く優しく応援してくれているパートナー浦島晶子に心から感謝します。

追伸

本論文は、新型コロナウイルス（COVID-19）の世界的なパンデミックのさなかに執筆されました。2020年に東京での開催が予定されていたオリンピック・パラリンピックは本ウイルスにより延期に迫りやられ、現在もなお、感染威力は衰えることを知りません。そんな未曾有の大災害が世界を混乱に陥れる中で、本ウイルスに関する研究はその感染スピードに負けじと急ピッチで進められています。改めて、研究活動のスピード感と研究成果を世に出すことの重要性に気づかされながらの執筆となりました。パンデミックのいち早い終息に向けた研究をなさっている研究者の皆様、そして危険と恐怖に耐え、現場で医療行為に従事されている医療関係者の皆様に最大の敬意と感謝の意を表します。

2021年3月

若月 翼

文 献

Ae, M., Tang, H., & Yokoi, T. (1992). Estimation of inertia properties of the body segments in Japanese athletes. *Biomechanisms*, 11, 23–33. doi: 10.3951/ biomechanisms.11.23

Aglioti, S. M., Cesari, P., Romani, M., & Urgesi, C. (2008). Action anticipation and motor resonance in elite basketball players. *Nature Neuroscience*, 11, 1109–1116. doi: 10.1038/nn.2182

Badets, A., Blandin, Y., & Shea, C. H. (2006). Intention in motor learning through observation. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 59, 377–386. doi: 10.1080/ 02724980443000773

Belen’kii, V. Y., Gurfinkel’, V. S., & Pal’tsev, Y. I. (1967). On the control elements of voluntary movements. *Biofizika*, 12, 135–141.

Bernstein, N. (1967). *The co-ordination and regulation of movements*. London: Pergamon Press.

Brault, S., Bideau, B., Craig, C., & Kulpa, R. (2010). Balancing deceit and disguise: how to successfully fool the defender in a 1 vs. 1 situation in rugby. *Human Movement Science*, 29, 412–425. doi: 10.1016/j.humov.2009.12.004

Brault, S., Bideau, B., Kulpa, R., & Craig, C. (2012). Detecting deception in movement: the case of the side-step in rugby. *PLoS One*, 7:e37494. doi: 10.1371/ journal.pone.0037494

Brebner, J. T. & Welford, A. T. (1980). Introduction: an historical background sketch. In Welford , A. T. (Ed.), *Reaction Times*. New York, NY: Academic Press.

Breslin, G., Hodges, N. J., Williams, A. M., Curran, W., & Kremer, J. (2005). Modeling relative motion to facilitate intra-limb coordination. *Human Movement Science*, 24, 446–463. doi: 10.1016/ j.humov.2005.06.009

Breslin, G., Hodges, N. J., Williams, A. M., Kremer, J., & Curran, W. (2006). A comparison of intra- and inter-limb relative motion information in modelling a novel motor skill. *Human Movement Science*, 25, 753–766. doi: 10.1016/j.humov.2006.04.002

- Buccino, G., Vogt, S., Ritzl, A., Fink, G. R., Zilles, K., Freund, H. J., & Rizzolatti, G. (2004). Neural circuits underlying imitation learning of hand actions: an event-related fMRI study. *Neuron*, 42, 323–334. doi: 10.1016/S0896-6273(04)00181-3
- Calvo-Merino, B., Glaser, D. E., Grezes, J., Passingham, R. E., & Haggard, P. (2005). Action observation and acquired motor skills: an fMRI study with expert dancers. *Cerebral Cortex*, 15, 1243–1249. doi: 10.1093/cercor/bhi007
- Cañal-Bruland, R. (2009). Visual cueing in sport-specific decision making. *International Journal of Sport and Exercise Psychology*, 7, 450–464. doi: 10.1080/1612197X.2009.9671919
- Carpenter, W. B. (1852). On the influence of suggestion in modifying and directing muscular movement independently of volition. *Proceedings of the Royal Institution*, 1, 147–53.
- Chandler, R. F., Clauser, C. E., McConville, J. T., Reynolds, H. M., & Young, J. W. (1975). Investigation of inertial properties of the human body. *Air Force Aerospace Medical Research Laboratory Technical Report, ADA016485*, 74–137.
- Cline, B. L. (1987). *Men Who Made a New Physics: physicists and the Quantum Theory*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences (2nd edition)*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Cross, E. S., Hamilton, A. F. D., & Grafton, S. T. (2006). Building a motor simulation de novo: Observation of dance by dancers. *Neuroimage*, 31, 1257–1267. doi: 10.1016/j.neuroimage.2006.01.033
- Cunnington, R., Windischberger, C., Deecke, L., & Moser, E. (2002). The preparation and execution of self-initiated and externally-triggered movement: a study of event-related fMRI. *Neuroimage*, 15, 373–385.
- Deiber, M. P., Honda, M., Ibanez, V., Sadato, N., & Hallett, M. (1999). Mesial motor areas in self-initiated versus externally triggered movements examined with fMRI: effect of movement type and rate. *Journal of Neurophysiology*, 81, 3065–3077. doi: 10.1152/jn.1999.81.6.3065

- Desmurget, M., Reilly, K. T., Richard, N., Szathmari, A., Mottolese, C., & Sirigul, A. (2009). Movement intention after parietal cortex stimulation in humans. *Science*, 324, 811–813. doi: 10.1126/science.1169896
- Feltner, M. E., Frascchetti, D. J., & Crisp, R. J. (1999). Upper extremity augmentation of lower extremity kinetics during countermovement vertical jumps. *Journal of Sports Sciences*, 17, 449–466. doi: 10.1080/026404199365768
- Fieandt, K., Huhtala, A., Kullberg, P., & Saarl, K. (1956). Personal tempo and phenomenal time at different age levels. *Reports from the Psychological Institute, No. 2*, University of Helsinki.
- Field, A. (2005). *Discovering statistics using SPSS (2nd edition)*. London: Sage Publications.
- Fitts, P. M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, 47, 381–391.
- Fujii, K., Shinya, M., Yamashita, D., Oda, S., & Kouzaki, M. (2014). Superior reaction to changing directions for skilled basketball defenders but not linked with specialised anticipation. *European Journal of Sport Science*, 14, 209–216. doi: 10.1080/17461391.2013.780098
- Fujii, K., Yoshioka, S., Isaka, T., & Kouzaki, M. (2013). Unweighted state as a sidestep preparation improve the initiation and reaching performance for basketball players. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 23, 1467–1473. doi: 10.1016/j.jelekin.2013.08.001
- Fujii, K., Yoshioka, S., Isaka, T., & Kouzaki, M. (2015). The preparatory state of ground reaction forces in defending against a dribbler in a basketball 1-on-1 dribble subphase. *Sports Biomechanics*, 14, 28–44. doi: 10.1080/14763141.2015.1026931
- 深代千之・桜井伸二・平野裕一・阿江通良 (編) (2003). スポーツバイオメカニクス. 東京: 朝倉書店.
- Gallese, V., Fadiga, L., Fogassi, L., & Rizzolatti, G. (1996). Action recognition in the premotor cortex. *Brain*, 119, 593–609. doi: 10.1093/brain/119.2.593

Galton, F. (1899). On instruments for (1) testing perception of differences of tint and for (2) determining reaction time. *Journal of the Anthropological Institute*, 19, 27-29.

Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Boston, MA: Houghton Mifflin.

Gordon, D., Robertson, E., & Winter, D. A. (1980). Mechanical energy generation, absorption and transfer amongst segments during walking. *Journal of Biomechanics*, 13, 845-854. doi: 10.1016/0021-9290(80)90172-4

郡司ペギオ幸夫 (1992). “進化” を生成する自己言及システム. 数理科学, 350, 69-77.

Haggard, P. (2009). The sources of human volition. *Science*, 324, 731-733. doi: 10.1126/science.1173827

Haken, H., Kelso, J.A.S., & Bunz, H. (1985). A theoretical model of phase transitions in human hand movements. *Biological Cybernetics*, 51, 347-356. doi: 10.1007/BF00336922

Heyes, C. M., & Foster, C. L. (2002). Motor learning by observation: evidence from a serial reaction time task. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 55A, 593-607. doi: 10.1080/02724980143000389

日高 敏隆 (2008). みんなと学ぶ小学校理科 (6 年). 東京: 学校図書.

Horn, R. R., Scott, M. A., Williams, A. M., & Hodges, N. J. (2005). Visual search and coordination changes in response to video and point-light demonstrations without KR. *Journal of Motor Behavior*, 37, 265-274.

Hodges, P. W., & Bui, B. H. (1996). A comparison of computer-based methods for the determination of onset of muscle contraction using electromyography. *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, 101, 511-519. doi: 10.1016/S0921-884X(96)95190-5

Hughes, G., Schutz-Bosbach, S., & Waszak, F. (2011). One action system or two? evidence for common central preparatory mechanisms in voluntary and stimulus-driven actions. *Journal of Neuroscience*, 31, 16692-16699. doi: 10.1523/JNEUROSCI.2256-11.2011

Iacoboni, M., Woods, R. P., Brass, M., Bekkering, H., Mazziotta, J. C., & Rizzolatti, G. (1999). Cortical mechanisms of human imitation. *Science*, 286, 2526–2528. doi: 10.1126/science.286.5449.2526

Jahanshahi, M., Jenkins, I. H., Brown, R. G., Marsden, C. D., Passingham, R. E., & Brooks, D. J. (1995). Self-initiated versus externally triggered movements. I. An investigation using measurement of regional cerebral blood flow with PET and movement-related potentials in normal and parkinson's disease subjects. *Brain*, 118, 913–933. doi: 10.1093/brain/118.4.913

Jenkins, I. H., Jahanshahi, M., Jueptner, M., Passingham, R. E., & Brooks, D. J. (2000). Self-initiated versus externally triggered movements. II. The effect of movement predictability on regional cerebral blood flow. *Brain*, 123, 1216–1228. doi: 10.1093/brain/123.6.1216

金子明友・朝岡正雄 (編) (1990). 運動学講義. 東京: 大修館書店.

Kelso, J. A. S. (1984). Phase transitions and critical behavior in human bimanual coordination. *American Journal of Physiology: Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 246, R1000–R1004. doi: 10.1152/ajpregu.1984.246.6.R1000

Koike, T., & Yamada, N. (2007). Anticipation of elbow joint perturbation shortens the onset time of the reflex EMG response in biceps brachii and triceps brachii. *Neuroscience Letters*, 412, 56–61. doi: 10.1016/j.neulet.2006.10.058

小池貴行・山田憲政 (2007). 動作と反射からみた外力への予測的反応. 北海道大学大学院教育学研究科博士論文.

Kugler, P. N., & Turvey, M. T. (1987). *Information, natural law, and the self-assembly of rhythmic movement*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Kurata, K., & Tanji, J. (1985). Contrasting neuronal activity in supplementary and precentral motor cortex of monkeys. II. Responses to movement triggering versus non-triggering sensory signals. *Journal of Neurophysiology*, 53, 142–152. doi: 10.1152/jn.1985.53.1.142

- La Delfa, N. J., Garcia, D. B. L., Cappelletto, J. A. M., McDonald, A. C., Lyons, J. L., & Lee, T. D. (2013). The Gunslinger effect: why are movements made faster when responding to versus initiating an action? *Journal of Motor Behavior*, 45, 85–90. doi: 10.1080/00222895.2012.746283
- Lee, D. N., & Aronson, E. (1974). Visual proprioceptive control of standing in human infants. *Attention Perception & Psychophysics*, 15, 529–532. 10.3758/BF03199297
- Maimon, G., & Assad, J. A. (2006). Parietal area 5 and the initiation of self-timed movements versus simple reactions. *Journal of Neuroscience*, 26, 2487–2498. doi: 10.1523/JNEUROSCI.3590-05.2006
- Martinez de Quel, O., & Bennet, S. J. (2014). Kinematics of self-initiated and reactive karate punches. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 85, 117–123. doi: 10.1080/02701367.2013.872222
- Matsuno, K. (1989). *Protobiology: Physical basis of biology*. Boca Raton, FL: CRC Press. doi: 10.1201/9781351076098
- Meinel, K. (1960). *Bewegungslehre*. Berlin: Volk und Wissen Volkseigener Verlag. (マイネル, K. 金子明友 (訳) (1981). マイネル・スポーツ運動学. 東京: 大修館書店)
- Miura, A., Kudo, K., Ohtsuki, T., & Kanehisa, H. (2011). Coordination modes in sensorimotor synchronization of whole-body movement: a study of street dancers and non-dancers. *Human Movement Science*, 30, 1260–1271. doi: 10.1016/j.humov.2010.08.006
- 水本篤・竹内理 (2008). 研究論文における効果量の報告のために: 基礎的概念と注意点. 英語教育研究, 31, 57–66.
- 村木征人・稲岡純史 (1996). 跳躍運動における主観的強度 (努力度合) と客観的出力との対応関係. スポーツ方法学研究, 9, 73–79.
- Mushiake, H., Inase, M., & Tanji, J. (1991). Neuronal activity in the primate premotor, supplementary, and precentral motor cortex during visually guided and internally determined sequential movements. *Journal of Neurophysiology*, 66, 705–718. doi: 10.1152/jn.1991.66.3.705

中尾綾・橋本泰裕・山田憲政 (2018). スポーツ動作における運動時間と正確性の関係: バスケットボール競技 3 ポイントショットによる検討. *コーチング学研究*, 32, 33–40. doi: 10.24776/jcoaching.32.1_33

Obhi, S. S., & Haggard, P. (2004). Internally generated and externally triggered actions are physically distinct and independently controlled. *Experimental Brain Research*, 156, 518–523. doi: 10.1007/s00221-004-1911-4

大島 浩幸・山田 憲政 (2010). 運動技術レベルと運動観察能力の関連. *スポーツ心理学研究*, 37, 65–74. doi: 10.4146/jjpsopsy.2010-065

大島浩幸・山田憲政 (2012). 他者運動認知能力に関する自己運動制御からの検討. *スポーツ心理学研究*, 39, 129–136. doi: 10.4146/jjpsopsy.2012-1125

太田涼・有川秀之 (2001). 短距離走の疾走動作改善過程に関する実践的研究: 運動学的考察の観点から. *体育学研究*, 46, 61–75. doi: 10.5432/jjpehss.KJ00003390587

Okano, M., Shinya, M., & Kudo, K. (2017). Paired synchronous rhythmic finger tapping without an external timing cue shows greater speed increases relative to those for solo tapping. *Scientific Reports*, 7:43987. doi: 10.1038/srep43987

Okazaki, S., Hirotsu, M., Koike, T., Bosch-Bayard, J., Takahashi, H. K., Hashiguchi, M., & Sadato, N. (2015). Unintentional interpersonal synchronization represented as a reciprocal visuo-postural feedback system: a multivariate autoregressive modeling approach. *PLoS One*, 10:e0137126. doi: 10.1371/journal.pone.0137126

Okumura, M., Kijima, A., Kadota, K., Yokoyama, K., Suzuki, H., & Yamamoto, Y. (2012). A critical interpersonal distance switches between two coordination modes in kendo matches. *PLoS One*, 7:e51877. doi: 10.1371/journal.pone.0051877

Otsuka, M., Kurihara, T., & Isaka, T. (2017). Gun fire influences sprinters' multiple joint reaction times of whole body in block start. *Frontiers in Psychology*, 8: 810. doi: 10.3389/fpsyg.2017.00810

Oulasvirta, A., Roos, T., Modig, A., & Leppänen, L. (2013). “Information capacity of full-body movements,” in *Proceeding of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, New York, NY, 1289–1298. doi: 10.1145/2470654.2466169

大山正 (1985). 反応時間研究の歴史と現状. 人間工学, 21, 57–64. doi: 10.5100/jje.21.57

Panagiotacopoulos, N. D., Lee, J. S., Pope, M. H., & Friesen, K. (1998). Evaluation of EMG signals from rehabilitated patients with lower back pain using wavelets. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 8, 269–278. doi: 10.1016/S1050-6411(98)00013-3

Pinto, Y., Otten, M., Cohen, M. A., Wolfe, J. M., & Horowitz, T. S. (2011). The boundary conditions for bohr’s law: when is reacting faster than acting? *Attention, Perception, & Psychophysics*, 73, 613–620. doi: 10.3758/s13414-010-0057-7

Ramenzoni, V., Riley, M. A., Davis, T., Shockley, K., & Armstrong, R. (2008). Tuning in to another person’s action capabilities: Perceiving maximal jumping-reach height from walking kinematics. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 34, 919–928. doi: 10.1037/0096-1523.34.4.919

Richardson, M. J., Marsh, K. L., Isenhower, R. W., Goodman, J. R. L., & Schmidt, R. L. (2007). Rocking together: dynamics of intentional and unintentional interpersonal coordination. *Human Movement Science*, 26, 867–891. doi: 10.1016/j.humov.2007.07.002

Roberts, J. W., Lyons, J. L., Garcia, D. B. L., Burgess, R., & Elliott, D. (2017). Gunslinger effect and Müller-Lyer illusion: examining early visual information processing for late limb-target control. *Motor Control*, 21, 284–298. doi: 10.1123/mc.2015-0079

Romo, R., & Schultz, W. (1987). Neuronal activity preceding self-initiated or externally timed arm movements in area 6 of monkey cortex. *Experimental Brain Research*, 67, 656–662. doi: 10.1007/BF00247297

Savelsbergh, G. J. P., Van der Kamp, J., Williams, A. M., & Ward, P. (2005). Anticipation and visual search behaviour in expert soccer goalkeepers. *Ergonomics*, 48, 1686–1697. doi: 10.1080/00140130500101346

Schmidt, R. A. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review*, 56, 188–200. doi: 10.1037/h0076770

Siebert, R. J., Harper, D. N., Cameron, F. B., & Abernethy, D. (2002). Self-initiated versus externally cued reaction times in parkinson's disease. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 24, 146–153. doi: 10.1076/jcen.24.2.146.991

Soon, C. S., Brass, M., Heinze, H. J., & Haynes, J. D. (2008). Unconscious determinants of free decisions in the human brain. *Nature Neuroscience*, 11, 543–545. doi: 10.1038/nn.2112

Tsutsui, K., Shinya, M., & Kudo, K. (2019). Spatiotemporal characteristics of an attacker's strategy to pass a defender effectively in a computer-based one-on-one task. *Scientific Reports*, 9:17260. doi: 10.1038/s41598-019-54012-5

Uzu, R., Shinya, M., & Oda, S. (2009). A split-step shortens the time to perform a choice reaction step-and-reach movement in a simulated tennis task. *Journal of Sports Science*, 27, 1233–1240. doi: 10.1080/02640410903233222

Varlet, M., & Richardson, M. J. (2015). What would be usain bolt's 100-meter sprint world record without tyson gay? unintentional interpersonal synchronization between the two sprinters. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 41, 36–41. doi: 10.1037/a0038640

Waszak, F., Wascher, E., Keller, P., Koch, I., Aschersleben, G., & Rosenbaum, D. A. (2005). Intention-based and stimulus-based mechanisms in action selection. *Experimental Brain Research*, 162, 346–356. doi: 10.1007/s00221-004-2183-8

渡辺悦男 (1993). 器械運動学習における児童の運動共感に関する基礎的研究. *スポーツ教育学研究*, 13, 15–24. doi: 10.7219/jjses.13.15

Welchman, A. E., Stanley, J., Schomers, M. R., Miall, R. C., & Bulthoff, H. H. (2010). The quick and the dead: when reaction beats intention. *Proceedings of the Royal Society B*, 277, 1667–1674. doi: 10.1098/rspb.2009.2123

Weller, L., Kunde, W., & Pfister, R. (2018). Disarming the gunslinger effect: reaction beats intention for cooperative actions. *Psychonomic Bulletin & Review*, 25, 761–766. doi: 10.3758/s13423-018-1462-5

Winter, D. A. (2009). *Biomechanics and motor control of human movement (4th edition)*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc.

Woodworth, R. S. (1899). The accuracy of voluntary movement. *Psychological Review*, 3, 1–114. doi: 10.1037/h0092992

World Athletics (2019). *Book of rules*. Retrieved from <https://www.worldathletics.org/about-iaaf/documents/book-of-rules>.

山田憲政 (1997a). 身体運動の自己組織性. 北海道大学大学院教育学研究院博士論文.

山田憲政 (1997b). 運動の自由度. 宮本省三・沖田一彦 (編), 運動制御と運動学習 —セラピストのための基礎研究論文集 (1)—. 東京: 協同医書出版社.

山田憲政 (2011). トップアスリートの動きは何が違うのか —スポーツ科学でわかる一流選手の秘密—. 京都: 化学同人.

山田憲政 (2013). 心理学と力学を融合する「運動情報システム論」による運動感覚への接近. *バイオメカニクス研究*, 17, 144–151.

山田憲政・若月翼 (2018). 仕事率で繋がる自己と他者の運動情報. *運動学習研究会報告集*, 27, 50–58.

山本逸郎 (2012). 小学校理科6年「電気の利用」の中の手回し発電機とコンデンサーを用いた実験について. *弘前大学教育学部紀要*, 107, 51–64.