

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月30日現在

機関番号：15501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2012

課題番号：22654043

研究課題名（和文） 力学モデルによるスポーツ動作の原理解明とその物理教育への活用

研究課題名（英文） Elucidation of basic mechanism of sports movement based on mechanical models and its application to physics education

研究代表者

坂井 伸之（SAKAI NOBUYUKI）

山口大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：00267402

研究成果の概要（和文）：スポーツには様々な指導論があるが、その多くは客観的・科学的な言葉で記述されていない。本研究では、スポーツ動作全般に適用可能な剛体力学に基づく基本原理解明の理論的方法を提案し、野球の投動作及び剣道の面打ち動作について具体的に考察し、その成果をスポーツ指導及び物理教育に活用することを試みた。特に、通常はあまり意識されない重力・慣性力・筋肉の復元力・筋収縮の反作用の複合的効果の重要性を明らかにした。

研究成果の概要（英文）： In sports there are various coaching theories, most of which are not described with objective or scientific words. In this work we propose a theoretical method to elucidate basic mechanisms based on rigid-body mechanics, which is applicable to various sports movements. Specifically we consider throwing motion in baseball and *men-uchi* in kendo, and try to apply the results to sports coaching and physics education. We show the importance of hybrid effects of gravity, inertial force, restorative force of muscles and reaction of muscle contraction, which are usually unnoticed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	600,000	0	600,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	1,600,000	300,000	1,900,000

研究分野：宇宙物理学、運動力学、物理教育

科研費の分科・細目：物理学、数理物理・物性基礎

キーワード：スポーツ動作、力学モデル、物理教育、剛体力学、バイオメカニクス

## 1. 研究開始当初の背景

スポーツには熟練者の経験に基づく様々な指導理論がある。しかし多くの場合、指導論は客観的・科学的な言葉で記述されていないため、その真の意味やその科学的根拠が明確でない。そのため、初級者にとって理解が難しいだけでなく、指導者にとっても初級

者の動作の「何が」「なぜ」悪いのかを的確に指摘することが難しい。

これに対してスポーツバイオメカニクス研究分野では、熟練者と未熟練者の動作を高速カメラで撮影して分析するなど、様々な実験が行われている。しかし、運動法則と力学モデルに基づいて仮説を立てたり実験結果

を解釈したりという理論的考察があまりない。そのため、実験結果から物理的に何が理解できたのか、実践にどう活かせるかという肝心な点に議論が至らないことが多い。つまり、現状のバイオメカニクス研究の方法だけでは、スポーツの実践者・指導者が本当に知りたいことに答えられないのである。

私はこのバイオメカニクス研究の問題点に気付き、物理学の方法（物理法則と単純なモデルによって複雑な現象の本質を捉えること）によって、スポーツ動作の基本原則を物理学的に解明することが重要であると考えた。

## 2. 研究の目的

(1) スポーツ動作の力学モデルの構築。スポーツ動作の基本原則を解明するために、野球・ソフトボール・剣道を中心とする基本動作について、運動感覚に基づいたモデル構築を行い、検証する。

(2) 理想的な動作に近づくために実践されている筋肉トレーニング方法について、(1)の力学的考察に基づいてその意味や合理性を検討する。

(3) (1)の成果を基に、大学・高校の物理教育においてスポーツ動作を題材として指導する方法を開発・実践する。

(4) バイオメカニクス研究で使われている力学的方法論について、物理学的・数学的観点から妥当性を検証する。

## 3. 研究の方法

(1) スポーツ動作の力学モデルの構築については、以下の方法で研究を進める。

- ① 運動に関する一般論。運動に関わる力を分類し、様々の動作の基本となる剛体モデルを提示する。
- ② 野球・ソフトボール動作。自分の運動感覚・動作映像の分析に加え、選手の動作を観察したり、専門家との議論によって、投動作・打動作の基本メカニズムを解明する。具体的には、新潟県立長岡高等学校に訪問したり、増淵まり子氏（シドニーオリンピック銀メダリスト）との議論によって情報を収集する。
- ③ 剣道動作。剣道の専門家である竹田隆一氏（山形大学教授）との共同研究により、面打ち運動の下肢動作の基本メカニズムを解明する。

(2) 筋肉トレーニング方法の検証。小山裕史氏（「初動負荷理論による野球トレーニング」ベースボールマガジン社）のトレーニング理

論を検証するため、小山氏の開発したトレーニング施設のあるワールドウィング秋田（秋田県由利本荘市）に毎月1回訪問する。

(3) (1)の研究に基づいて、スポーツ動作を題材にした物理教育の指導法と実験教材を考案し、山形大学の授業や高校の出張講義で実践によって検証・修正する。

(4) バイオメカニクス研究で広く使われている逆動学的解析法について、その妥当性と適用限界を検証する。

## 4. 研究成果

(1) スポーツ動作の力学モデルの構築。

### ① 運動に関する一般論。

運動に関わる力は、I 筋肉の力・II 重力等の外力・III 慣性力と大きく3つに分類され、そのうちのI 筋肉の力は、Ia 意図的に働かせる筋収縮・Ib その反作用・Ic 筋肉の復元力（弾性力+伸張反射）の3つに細分化される。通常、運動に関わる力と言えはIa 意図的に働かせる筋力が注目されるが、無意識に働く力Ib・Ic・II・IIIがより重要であることを、単純な力学モデルで具体的に示した。このうち、これまでほとんど理解されていなかったIII 慣性力の効果について、以下に説明する。

質量 $m$ 、長さ $l$ の様な細い棒を考える。棒の一端Aに棒に垂直な力を瞬間的に働かせると、他端Bはどちら向きに動くだろうか。Bの運動は、重心の並進運動と重心周りの棒の回転という2つの力学量の競合によって決まるので、自明ではない。運動方程式を書くことなしに答えを導くことはできない。この問題を解くため、Aと共に運動する非慣性系（A系）を導入する。

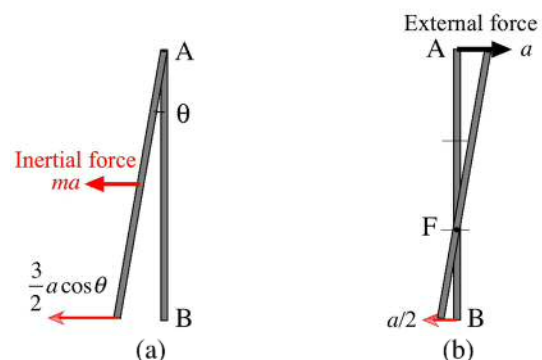


図1

A点の加速度が右向きに $a$ とすると、上図(a)のように、A系では左向きに $ma$ の慣性力が現れ、A系での運動方程式は

$$I_{(A)} \frac{d^2\theta}{dt^2} = ma \frac{l}{2} \cos\theta, \quad I_{(A)} = \frac{1}{3} ml^2$$

となる。ここで $I_{(A)}$ はAのまわりの慣性モーメント

ントである。よって、A系における棒の角加速度及びB点の加速度は、次のようになる。

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{3a}{2l} \cos\theta, \quad \alpha_{B(A)} = l \frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{3}{2} a \cos\theta.$$

よって、慣性系におけるB点の加速度は、

$$\alpha_B = \alpha_{B(A)} - a = \left( \frac{3}{2} \cos\theta - 1 \right) a$$

となる。この式から、 $\theta=0$ のとき $\alpha_B=a/2$ であり、向きはAと逆向きであることがわかる。また、線分ABを2:1に内分する点Fが不動点になることもわかる。

このように、棒の一端に垂直に力を働かせると他端が反対向きに運動することは、経験的にはある程度認識されていたが、慣性力の効果として運動方程式から示したのは本研究が初めてである。

### ② 野球・ソフトボールの投動作。

投動作では、体の末端部をいかに効率的に加速させるかが重要である。そのしくみについては、これまでPutnam (1983, 1993)やKreighbaum & Barthels (1995)の解釈が広く受け入れられていたが、私はそれぞれの不十分な点を指摘し、物理的に正しい説明を与えた。末端部の加速の本質は、慣性力と筋肉の復元力の複合効果にある。

ここでは、①で説明した慣性力がどのように末端の加速に関係するかを説明する。

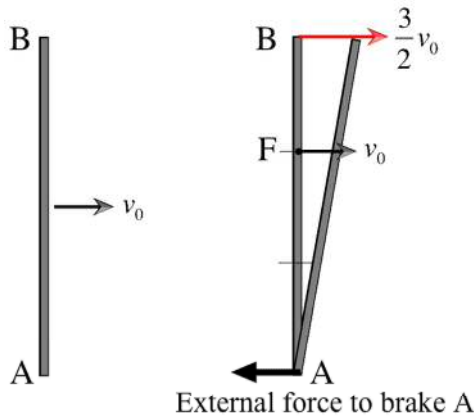


図2

上図のように、一様な棒が速さ $v_0$ で棒と垂直な方向に並進運動し、ある瞬間に一端Aにブレーキがかかり、瞬間的に停止すると仮定する。このとき、図1(b)においてFが不動点であることに対応して、図2ではFが一定の速度 $v_0$ で運動を続ける。このことから、他端Bは瞬間的に $1.5v_0$ 、つまり50%加速されることになる。

### ③ 剣道面打ち下肢動作。

①で展開した一般論を剣道面打ち下肢動作に適用し、基本動作の物理的意味を明らか

にした。その一例を以下に示す。

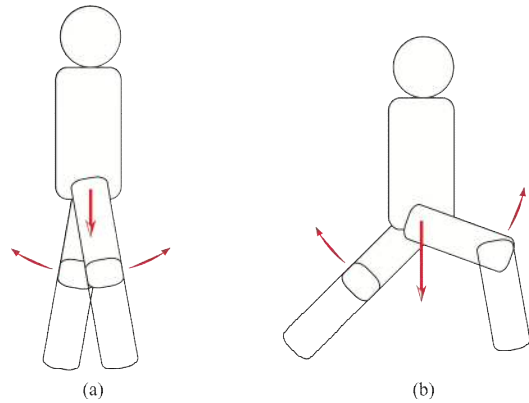


図3

右(前)脚の振り上げによって打突が素速くなることが経験的に知られているが、その物理的理由は全く理解されていなかった。これに対し、私は以下のような物理的解釈を与えると共に、効果的な動作を示した。右脚を振り上げると、その反作用として腰に下向きの力が働き、それが左脚が重力で前に倒れる動きを加速する。図3(a)のように直立に近い状態と、(b)のようにある程度開脚した状態を比較すると、右脚を振り上げる内力が一定で上体の向きが変化しないとき、下向きに働く反作用は(b)の方が大きくなる。更に、(b)の方が左脚の角度が $45^\circ$ に近く、同じ下向きの力に対して前方への加速度が大きくなる。よって、この2つの物理的理由により、始動と共に右脚を強く振り出すのではなく、左脚が倒れる間をとってから右腿を鋭く上げるのが効果的であることがわかる。

### (2) 筋肉トレーニング方法の考察。

(1)①の考察から、筋肉の働きとして重要なのは意図的な筋収縮の強さだけでなく、復元力(弾性力+伸張反射)であることがわかった。通常筋肉トレーニングは前者を鍛えることを目的としているが、後者の働きを強化することもまた重要である。

様々な既存のトレーニング方法を比較したところ、一部のアスリートが採用している初動負荷理論といわれるトレーニング方法は、復元力を強化するという点で物理的に合理的な方法であると言える。ただし、初動負荷理論という名称はあまり本質を表しておらず、誤解を招く可能性がある。

### (3) 物理教育への活用。

図1や図2のような物理モデルを取り入れた剛体力学の指導法と演示実験教材を開発した。このように、スポーツ動作を題材にした物理教育は画期的である。実際に山形大学の授業で実践し、学生の興味を惹き、かつ十分理解可能なようであることを確認した。

また、高校の出張講義では、数式を使わずに演示実験を中心とした指導を実践した。

#### (4) 逆動力学的解析法の問題。

バイオメカニクス動作解析では、人体を剛体リンクモデルで近似し、動作実験のデータから各関節付近にはたらく力のモーメントを求める逆力学計算法が用いられる。そして、次に筋骨格モデルや数値最適化計算によって、各筋にはたらく張力が推定される。この後半の計算過程、つまり関節モーメントから筋張力を推定することは難しく、これまでに多くの議論があった。

本研究では、これまでに問題にされなかった前半の計算過程、つまり剛体リンクモデルの逆力学計算法によって関節モーメントを求める過程を再検討した。その結果、以下のように重大な問題点が見落とされていたことがわかった。

人間の腕や脚には、2つの関節をまたぐ二関節筋がいくつかある。この二関節筋があると、ある関節のまわりでそれを挟む2つのセグメントに働く関節モーメントについて、作用・反作用の関係は成り立たない。しかしながら、関節モーメントを求める逆動力学的計算法では、その作用・反作用の関係が仮定されているのである。

これは、実験で検証する以前の論理的な矛盾であり、この方法に基づいたこれまでの計算結果は全て誤りであると言わざるを得ない。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

①坂井伸之、力学モデルによるスポーツ動作の理論的研究、体力科学、査読無、Vol. 61, 2013, pp. 514-515

②坂井伸之、動作解析の剛体運動方程式に見られる誤概念、体力科学、査読無、Vol. 62, 2013, p. 122

③坂井伸之、動作解析の剛体運動法手式に見られる誤概念、第70回日本体力医学会中国・四国地方会、2012年11月24-25日、吉備国際大学(高梁市)

[学会発表] (計8件)

①坂井伸之、剛体連結系の運動方程式に見られる誤解とその原因、日本物理学会第68回年次大会、2013年3月26-29日、広島大学(東広島市)

②坂井伸之、スポーツ動作の物理：慣性力の効果II、日本物理学会第66回年次大会、2011年3月、東日本大災により新潟大学での開催は中止、代替措置でweb上の発表

③坂井伸之、Basic Mechanism of Throwlike Movement、第67回日本体力医学会大会、2012年9月14-16日、長良川国際会議場・岐阜都ホテル(岐阜市)

④坂井伸之、竹田隆一、金義信、剛体力学モデルによる面打ち足さばきの理論的研究、日本武道学会第45回大会、2012年9月6-8日、東京農工大学(小金井市)

⑤坂井伸之、力学モデルによるスポーツ動作の理論的研究、第21回日本体力医学会東北地方会、2012年6月16日、仙台大学(宮城県柴田町)

⑥坂井伸之、棒の力学とスポーツ動作、第16回新潟・山形合宿(京大基礎領域スクール)、2011年11月4-6日、山形県青年の家(天童市)

⑦坂井伸之、棒の力学とスポーツ動作、日本物理学会第67回年次大会、2012年3月24-27日、関西学院大学(西宮市)

⑧坂井伸之、Basic Mechanism of Throwlike Movement、体力科学、査読無、Vol. 62, 2013, p. 70

⑨研究者番号：坂井伸之、スポーツ動作の物理：慣性力の効果I、日本物理学会2010年秋季大会、2010年9月23-26日、大阪府立大学(堺市)

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

坂井 伸之 (SAKAI NOBUYUKI)  
山口大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号：00267402

##### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

##### (3) 連携研究者

( )