 体育学研究第50巻記念特集：バイオメカニクス

バイオメカニクス50年の回顧と展望

金子 公宥

A review of half century of biomechanics research in Japan

Masahiro Kaneko

Key words : sport biomechanics, biomechanical research review

(Japan J. Phys. Educ. Hlth. Sport Sci. 50: 61-78, January, 2005)

キーワード：スポーツバイオメカニクス、バイオメカニクス小史

はじめに

スポーツ科学としてのバイオメカニクスは以前キネシオロジーと呼ばれた。歴史を経る中で名称がバイオメカニクスに変更されたとはいえ、研究内容が特別に変わったわけではない。筆者がこの分野に足を踏み入れて10年も充たない頃、「キネシオロジー20年の回顧と展望」を書けとの命令が下った。日本体育学会の成立さえも知らない未熟者にそんな原稿が書ける筈がなく「そればかりはご勘弁を」と固辞したが、「命令だ!」の師の一喝で押し切られた。それから30年、今回もトコトン固辞したが、再三にわたる編集委員の口説きにまたも押し切られた。体育学研究が50年を迎えた今日、論文数はあまりにも膨大で、国際誌に発表された研究も多数に上っている。それらのすべてに目を通すことは不可能なので、今回のレビューでは、和文論文に重点を置きながら、筆者の記憶を辿って一部は英文論文にも触れつつ、独断

と偏見のそしりを覚悟で執筆することとした。

Ⅰ バイオメカニクスの研究組織・機関誌・論文発表数

日本体育学会の誕生（1950）に立ち会った松井（1990）の回顧によれば、体育学会は地域の支部を母体として発足し、その7年後（1957）の第8回学会大会から専門分科会がスタートしたという。他の分科会とともに最初の分科会の仲間入りをしたキネシオロジー専門分科会は、その活動の拠点を専門分科会とほぼ時を同じくして誕生した「キネシオロジー研究会」に置き、研究会の代表に猪飼道夫と宮畑虎彦を選出。事務局を東大教育学部体育学研究室（通称「猪飼研」）においた。研究会の連絡紙「ひろば」第1号の発行には研究室の正木健雄が先頭に立ち、猪飼研の助手たちがこれを引き継いだ。そのタイトルに1957.12.12.の日付が見える（図1）ように、鉄筆で文字を書くガリ版刷りだった。「ひろば」第1号の冒頭で猪飼は、発足の挨拶として「この会の活動をすすめるには、まず会員相互の研究の現状および将来への計画を連絡し合うことが必要であろうと考えま

す」と述べ、名簿作成の必要性を呼びかけてた。この「ひろば」は1982年の113号まで続き、その全てが今も貴重な資料としてバイオメカニクス学会事務局に保管されている。

日本体育学会における研究発表数は、第18回大会頃まで急速に増加して60±5演題となり、その後は一定かやや減少傾向にある。発表数停滞の原因は、日本バイオメカニクス学会の設立により、独自の大会での発表が増えたためであろう(図2上段)。年々増加する国際学会での発表も一因かと思われる。研究内容については様々な分類が可能だが、代表的なキネマティクス(動作学)、キネティクス(動力学)、エナージェティクス(エネルギー学)に属すると思われる論分数(日本体育学会)を抜粋すると、近年におけるキネティクスの顕著な増加が注目される(図2下段)。

1. キネシオロジーからバイオメカニクスへ

1978年、キネシオロジー研究会を発展的に改変するかたちで「日本バイオメカニクス学会」が

図1 わが国バイオメカニクスの原点であるキネシオロジー研究会の通信誌「ひろば」No. 1 (1957年12月12日発行)の冒頭部。

誕生した。わが国のキネシオロジーは、機能解剖学的色彩の濃いアメリカのキネシオロジーの影響を強く受けていたが、そのアメリカがヨーロッパの力学中心のバイオメカニクスと合体し、1973年に国際バイオメカニクス学会(International Society of Biomechanics: ISB)を発足したことが、日本のキネシオロジーをバイオメカニクスに変更させる大きなインパクトとなり、世界の趨勢に乗り遅れないことが肝要と力説する宮下充正の

図2 バイオメカニクスに関する研究発表数
上段：体育学会とバイオメカニクス学会(体育学会総会資料より)
下段：分野の例；キネマティクス，キネティクス，エナージェティクスの年次推移(金子ほか，1993より抜料)

熱意が通じ、キネシオロジー研究会は1978年から日本バイオメカニクス学会と改称した。専門分科会の名称も、同年(1978)の日本体育学会総会において正式にバイオメカニクス専門分科会となった(宮下,1979)。また、日本バイオメカニクス学会(Japanese Society of Biomechanics: JSB)のISBへの加盟がパリ大会の総会において満場一致で承認された。学会大会の開催はISBと同様にJSBも隔年開催であるが、毎年開催される日本体育学会大会においても研究発表を行い、バイオメカニクス分科会としての役割も果たしている。キネシオロジー時代の研究動向は、上記以外にも適時報告されてきた(小林, 1973; 野原, 1975)。草創期の学会シンポジウム(1958)では「キネシオロジーとは何か」が論議され、「解剖学, 生理学, 物理学, 心理学を応用して身体運動を研究する学問」と結論されたが、松井(1967)は「自然科学的手法で研究する学問」とし、以後この考え方が定着した。

特筆すべきは、国際バイオメカニクス学会大会が日本で2回開催されたことである。第1回は1983年の松井秀治大会長と小林寛道事務局長による名古屋大会であり、2回目は1997年の宮下充正・福永哲夫両会長と深代千之・平野裕一両事務局長による東京大会である。

2. 大会論集と機関誌の発刊

日本バイオメカニクス学会の誕生の背景には、松井秀治が中心となって名古屋大学で開催した第1回キネシオロジー国内セミナー(1972)があった。現在のバイオメカニクス学会大会の回数は、この記念すべき国内セミナーを第1回とカウントし今日にいたっている。また、第1回の名古屋大会での大会論集は、「身体運動の科学I: Human Powerの研究」(杏林書院)として刊行され、同シリーズのII, III, IV, Vまで続いた。しかし、機関誌(後述のJJSS)が刊行されたことから、大会論集の出版は主管大学の自由裁量となった。

表1 日本バイオメカニクス大会論集一覧

回数	開催年	主管機関	大会テーマ
第1回	1972	名古屋大学	身体運動の科学I: Human Powerの研究
第2回	1974	東京大学・駒場	身体運動の科学II: 身体運動のスキル
第3回	1976	京都大学	身体運動の科学III: 運動の制御
第4回	1978	筑波大学	身体運動の科学IV: スポーツのバイオメカニクス
第5回	1980	大阪支部	身体運動の科学V: スポーツバイオメカニクスへの挑戦
第6回	1982	山口大学	(論文は機関誌への投稿を示唆)
第7回	1984	名古屋支部	走・跳・投・打・泳運動における“良い動きとは”
第8回	1986	日本体育大学	動きのコツを探る
第9回	1988	広島大学	スポーツパフォーマンスの環境
第10回	1990	国際武道大学	ジャンプ研究, バイオメカニクス研究'90
第11回	1992	中京大学	動きとスポーツの科学
第12回	1994	東京都立大学	生体・運動のシステム
第13回	1996	筑波大学	身体運動のバイオメカニクス
第14回	1998	山梨大学	バイオメカニクスをどう生かすか
第15回	1999	東京大学・駒場	21世紀と体育・スポーツ科学の発展(日本体育学会第50回記念大会)
第16回	2000	大阪体育大学	スポーツ科学の総合化に向けて(日本運動生理学会大会と合同)
第17回	2002	名古屋大学	新世紀のスポーツバイオメカニクス
第18回	2004	鹿屋体育大学	トレーニングを科学するバイオメカニクス(刊行予定)

大会論集の一覧表(表1)に一部欠落があるのはそのため、欠落は必ずしも手抜きではなく、機関誌への投稿を促すためであった。

学会の機関誌としては、和文誌ながら英語名の Japanese Journal of Sports Sciences (JJSS) の第1号(1982年8月)をソニー企業の支援のもとで発刊した。当初は月刊誌であったが、経済不況の波を受けて途中から隔月刊誌に移行し、やがて1997年の16巻1号をもって廃刊となった。これを引き継ぐかたちで、次に会員独自の力で刊行する本来の学会誌が誕生した。その誌名を「バイオメカニクス研究 Japanese Journal of Biomechanics in Sports & Exercise : JJBSE」として1997

年7月に創刊し、季刊誌として今日に至っている。

II バイオメカニクス研究の変遷

1. 草創期の研究

キネシオロジーの分野に筆者が入門した当時(1962)、キネシオロジーと直結した数少ない文献の一つが、松井秀治による「運動と身体の重心」(1958)であった。作図法により求めた各種運動姿勢における身体重心の位置が、その計測法と共に多数掲載されていた(図3)。また、宮畑・高木(1957)による大著「身体運動学」があり、この書物は後に熊本水頼が執筆に加わって改訂版(宮畑ほか, 1971)が出され、高木・熊本らが積み上げてきた筋電図学的研究の成果が披露された。その内容は言わば「筋電図の基礎」ともいえるべきもので、筋電図を読解し理解する上でその後の研究に大きな影響を与えた(図4)。また宮畑はブローアー(1957)の訳本「身体運動の力学」やスコット(1964)の訳本「体育の力学」を相次いで出版するとともに、運動経験者ならではの立場から鋭い実践論を展開した。猪飼(1961)が生理学者と著した早期の「体育生理学」には「運動の力学」の章があった。運動生理学との相違をあえて言えば「力学への関心の度合」にある。バイオ

図3 身体部位の重心計測と合成重心の作図法による研究(松井, 1958)。

図4 各種関節運動に伴う筋電図の標本図鑑の一部(宮畑ほか, 1971)

メカニクスに不可欠の力学は、その道の専門家である小林一敏がもっぱら担当し、瞬発力の力学的研究の先駆けとなった(小林, 1961)。また、宮畑、高木、小林の共著「スポーツのキネシオロジー」(1965)の中の力学的解説は、力学に疎い筆者のバイブルであった。やがて、もう一人の力学者・渋川侃二が参加し、大著「運動力学」(1969)を著した。その直後に松井(1968)が出した「身体運動学入門」もまた、力学に重点の置かれたコンパクトな名著で、若いわれわれの知的栄養源となった。また、小林一敏が学校体育誌上で24回にわたり連載した「スポーツ技術学」(1971—1973)では、力学の単なる知識を超えたユニークな深い思索のスポーツ技術論が展開されていた。

先述の高木・熊本ほかの筋電図学とは一味違う実践的な研究、すなわち水泳中の筋電図を記録する実験が、猪飼ほか(1961)により行われた。至難の業である水中でのノイズ除去には、石井がその克服に大きく貢献し、その研究成果は驚きをも

って海外のテキストにも紹介されたと聞く(図5)。当時は東京オリンピックを控えて、スポーツ科学への理解が高まりつつあるころであった。猪飼ほか(1963)の疾走研究もその一つで、当時のトップスプリンターも被験者の一人であった。関西では辻野(1966)が、A.V.ヒル門下の古沢一夫の指導でフォースプレートを作製し、3次元のキック力記録に成功した。本邦初の快挙であった。さらに西の九州は熊本の体質医学研究所で、澤田や長尾たちが日米プロ野球選手の体力的・動作学的研究を積み重ねていた(沢田, 1968; 長尾・沢田, 1967)。

2. 専門書・啓もう書の発刊

1970年以降になると、上記のほかに専門書や教科書が少なからず発刊された。特定の研究内容をまとめたものでは、水泳の科学(宮下, 1970)、人体筋のダイナミクス(金子, 1974)、人体筋出力の生理的限界と心理的限界(矢部, 1977)、ヒトの絶対筋力(福永, 1978)、パワーアップの科学(金子, 1988)、「たくみ」の科学(大築, 1988)、走る科学(小林, 1990)、跳ぶ科学(深代, 1990)、投げる科学(桜井, 1992)、打つ科学(平野, 1992)、身体運動における右と左(小田, 1998)などがある。

またテキスト的な啓蒙書には、「身体運動学概論」(浅見ほか, 1976)、スポーツ・バイオメカニクス入門(金子, 1982)、バイオメカニクス(大道, 1988)、動きを探る(大道, 1991)、スポーツ動作の隠し味(石井, 1994)、スポーツバイオメカニクス20講(阿江と藤井, 2002)、重心運動のバイオメカニクス(大道, 2003)などがあり、さらに総集編ないし事典的な書には、筋の科学事典(福永, 2002)、バイオメカニクス(金子・福永, 2004)がある。その間に翻訳書も多数出版された。たとえば、バイオメカニクス(アレクサンダー, 1976)、動物の運動(グレー, 1963)、スポーツ運動のバイオメカニクス(ホッホムート, 1981)、身体運動のエネルギー(マルガリア, 1978)、バイオメカニクス(ウイリアムス・リスナー, 1974)などの好訳書が、わが国のバイオメカニクス研究

図5 仮設プールをつくり、水泳中の筋電図記録に成功(猪飼ほか, 1961)

に少なからず影響を与えた。

3. 劇的な研究機器と分析作業の変化

バイオメカニクスにおける近年の大きな特徴の一つは、各種の身体運動のキネマティクス (kinematics: 動作学) とキネティクス (kinetics: 動力学) の研究が、精度の向上した映像解析法とフォースプレートを用いて3次元的になされるようになったことである。このような研究機器の発達を抜きにして、その後のバイオメカニクス研究の発展を語ることはできない。身体運動の具体的な表象は運動の動作にあり、当然のことながら優れた動作の謎解きが主要課題となって、運動の軌跡や速度を追求するキネマティクスが主流を占めた。その武器が高速度写真であったが、今日のような高速度ビデオカメラがない時代であるから、高価なフィルムをいかに有効に使うかに苦慮した。またデジタイザのない時代にあつては、壁に映した映像の座標読みに多くの時間を費やし、圧力板やフォトセル、ゴニオメータなど、記録器と増幅器を除くほとんどの機具が手作りであった。計算処理はもっぱらソロバンと計算尺であり、製図は烏口とレタリングで行った。今やソロバンや計算尺やレタリングは過去の遺物と化し、コンピュータが一切を瞬時的に処理する時代となった。映像の精度も格段の進歩を遂げた。また、水晶のピエゾ効果を利用した高周波数対応のフォースプレートが開発され、エレクトロニクスとコンピュータの革命的な発展と相俟って、以前なら考えも及ばなかった動作や力の3次元解析、関節トルクなどのキネティクス (動力学) 研究に不可欠の膨大なデータ処理が、極めて短時間にコンピュータでなされるようになった。そうした手法の違いを思うと、まさに隔世の感がある。とはいえ、草創期の研究成果を回顧するとき、今なお光輝いているものが少なくないことに気づく。

III バイオ (生体) とメカニクス (力学) の基礎研究

1. 力学的基礎データ

身体も物体であるから、その運動はすべて力学の法則 (運動の法則) に従ってなされる。すなわちメカニクス (力学) を抜きにしてはいかなる身体運動も語り得ない (池上, 1983)。身体運動に力学法則を適用する場合は通常、単純化のために身体各部を剛体とみなし、各部の重心や全体としての合成重心をもとめる。松井 (1958) の研究による身体各部の重心 (その位置と大きさ) の求め方は、今や身体運動の力学的分析の基本的な係数としてコンピュータのソフトに組み込まれている。また、身体運動は関節運動から成り立っており、各関節における速度や加速度、トルク、パワーといった計算には横井ほか (1986) や阿江ほか (1992) の明らかにした身体各部の慣性係数が不可欠である。またこうした3次元の角速度の算出には、山田ほか (1987)、湯ほか (1989)、藤井ほか (1995) によるオイラー角の微分法や、湯 (1995) や宮西 (1996) による座標軸の誘導法の開発が、力学的研究の基礎を与えてきた。

2. 神経・筋の基礎研究

バイオメカニクスにおけるバイオ (生体) の基礎研究は、主として身体運動 (motion, movement) を惹起し調節する神経機能と筋機能に関心が向けられてきた。例えば、巧みさの基本的な神経制御の一つとして矢部 (1977) が、運動前サイレントピリオドの関与する研究を深めるとともに、最大筋力には生理的限界と心理的限界があることを明らかにした。熊本らの研究グループは、謎の多い二関節筋の機能に着目し、成果を挙げた (Fujikawa et al., 1997)。また運動方向の急速変換を含む動作の「巧み」な調節機構について総合的な研究を行った大築 (1992) の研究や、身体運動における左右差の研究 (小田, 1998)、比較的最近の「ゆらぎ」の研究 (Masani et al., 2003) 等があり、さらには筋電図を駆使した運動

学習効果の研究（後藤，1995；西薗ほか，1987）がある。こうした神経機能と運動に関わる知見が、矢部ほか（2003）によって総括され出版された。

筋機能を代表する筋力（最大筋力）に関する猪飼と福永の研究（Ikai and Fukunaga, 1968；福永，1978）は、当時としては画期的な超音波法を用いて、単位筋断面積当たりの筋力が性や年齢に関係なく一定（ $6.3\text{kg}/\text{cm}^2$ ）であることを明らかにした。この研究はその後多数の俊秀との共同研究によって見事な発展を遂げ、（改めて後述するように）国際的な注目を集めて国際バイオメカニクス学会賞の栄誉に輝いた。また、瞬発力と呼ばれていた体力要素について金子（1974）は、筋パワーと称することによって力と速度の要素が分離解明できるとし、力－速度関係を基に動的筋収縮の特性を研究した。川初（1972）はこの筋パワーを膝伸展運動で測定し、スポーツ競技の種目特性などを分析した。筋パワーに関するこの種の基礎研究は後に、発育発達（淵本ほか，1981）や実践的研究に発展している（金久，1983；Kanehisa et al., 1997；Funato et al., 1997, 2001；Toji, 1997）。

IV 走・跳・投の運動例にみる バイオメカニクス

身体運動は走・跳・投をはじめとする陸上での運動から氷上・雪上での運動、水上・水中での運動まで多岐にわたり、それらすべてのバイオメカニクス研究を回顧することは困難である。そこでここでは走・跳・投のみを取り上げ、他の運動種目については後述の近著「バイオメカニクス」（金子・福永，2004）に譲ることとしたい。

1. 発育発達に関する基礎研究

（1）走運動：走運動は何歳頃を開始するのか？ 宮丸・加藤（1996）は公園の一角にビデオを設置してこの課題に挑戦し、ついに1歳半から2歳の幼児の「両足が宙に浮く」走運動の瞬間の映像を捉えた。また、発育に伴う疾走速度曲線の変化はすでに報告されていたが（猪飼ほか，1963），宮

丸（2001）と加藤ほか（1992，1997）が、疾走動作やピッチ，ストライドなどの発育過程を長年にわたり追跡した（図6）。また2歳児から一流のスプリンターまでの走能力に関する貴重な報告もある（斎藤・伊藤，1995）。子どもの走運動の学習効果に関する研究も古くからなされ（佐藤，1973），その後は辻野と後藤（1975，1979）による研究や尾縣ほか（1992）により貴重な成果が得られている。こうした走運動をめぐる話題は、小林（1990）のレビューに詳しい。

走運動は歩行運動の延長線上にあり、歩行運動は走運動よりさらに基本的な運動（人類であることを象徴する運動）であるところから、多数の研究がある。果たして人間は生後いつ頃から二足歩行をするようになるのか—の課題に取り組んだ岡本らの筋電図学的な研究によれば、人間は生後間もない頃からいわゆる原始歩行を行い、1歳頃に独立歩行ができるようになると、爪先から着床する不安定な歩行が消えて、踵から着床する安定歩行になるという（Okamoto and Kumamoto, 1972；Okamoto et al., 2003）。加齢に伴う歩行動作の研究が、近年では体育・スポーツ科学の分野でもしばしば取り上げられるようになった（Kaneko et al., 1991；吉澤ほか，1989）。高齢化社会に向けて高齢者の転倒そして寝たきりへの問題提起が一因であろう。身体障害者の歩行に関しても、例えば脊髄損傷者の歩行を取り上げた中澤ほか（1999，2002）の研究など、多数の報告がある。

（2）跳運動：跳躍運動には高く跳ぶいわゆる「高跳び」と、遠くに跳ぶ「幅跳び」とがある。瞬発力のテストとしては垂直跳びと立幅跳びの歴史が古く、特にわが国では垂直跳びが文部省テストに含まれたこともあって、古くから多数の研究に用いられた。発育発達の研究発育期の垂直跳び能力については、パワーの指標における発達経過が、筋力の発達とおおむね類似したS字曲線を描くことが報告された（辻野ほか，1974）。跳躍高を高める動作についての腕振り効果や反動効果の研究も古くから行われ、パフォーマンスや動作の変化、フォースプレートへの地面反力の変化など

図6 加齢に伴う疾走速度、ピッチ、ストライドおよびその身長比の変化とスプリンターの値 (宮丸ほか, 2001)

から考察された (金原ほか, 1960 ; 渋谷ほか, 1966 等). こうした研究は今日, 下腿三頭筋の機能に着目した筋腱複合体 (muscle-tendon complex) の研究に発展し, 日本のバイオメカニストたちによってそのメカニズムの全容が解明されつつある (Fukunaga et al., 2002) すなわち, 垂直跳びのような跳躍をする場合, まず収縮要素である筋の収縮によって動作が開始するが, その下腿三頭筋の力 (ないしエネルギー) が腱組織 (アキレス腱) に蓄えられ, 引き続く上昇運動がこの腱

に蓄えられたエネルギーの放出とともに起こる. 反復跳躍ではこの腱による弾性エネルギーの貢献がいっそう顕著にみられる (Fukashiro and Komi, 1987 ; Kurokawa et al., 2001 ; Kubo et al., 2001a ; Kubo et al., 2001b) (図7).

幅跳びも筋腱複合体からみた生理学的原理は共通であり, またキックする強さを調整するメカニズムについても, 遠くへ跳ぶ場合と高く跳ぶ場合との間に基本的な相違はないといわれる (大築・定本, 1979). しかし, 前方に「遠くへ跳ぶ」と

図7 足関節のホッピングにおける筋腱複合体のふるまい (深代, 2000)。

いう点が動作学的相違を生む。発育発達に関してはHellebrandt (1961)の研究がよく知られているが、国内のバイオメカニストによっても同様の研究がなされてきた。辻野ほか (1974)によれば、立幅跳びの発育発達も、成人の動作に至る年齢経過は先述した垂直跳びの経過と基本的に変わらないという。踏み切りの動作が発育に伴って関節運動が拡大し、前進の動作が伸びやかなものとなる (深代, 1985; 宮丸ほか, 2001)。

(3) 投運動：投げる動作は腕を自在に使える人間の特権であり、古くから研究されてきた (野口, 1952; 石井, 1960)。発育発達に関しては、投能力の指標としてボールを遠くに投げる能力 (遠投力) とコントロールする能力 (的当て) とがある。使用するボールは文部省がソフトボールを採用し、年々その発育曲線を報告してきたが、ソフトボールは幼少児にとっては重すぎるためか、幼児の発育発達研究にはむしろ硬式テニスボールを用いたものが多い。

硬式ソフトボールで遠投距離を調べた角田ほか (1976)によると、5歳—12歳の発育過程で男子の成績は10mから35mへ、女子は6mから21mへ向上し、特に7—9歳の頃の増加が著しかったとしている。また投動作を高速度写真で分析した

結果によれば、発育にともなって運動のタイミングが体幹部から腕の末端部に向けて順次起こるように変化し、また、ひねり動作などを含めて動作がしだいに拡大する (辻野ほか, 1974; 桜井・宮下, 1983; 宮丸, 1980)。また遠投距離には筋力や瞬発力などの体力的要因 (尾縣ほか, 1989) や民族などの社会的要因も関係し、練習効果についても、一覧表で示すことができるほどに多数の研究があり、いずれも確かな効果が報告されている (桜井, 1991)。学習による投げの正確さ向上の背後に関するメカニズムも論じられている (森下, 1965; 大築, 1988)。

2. スポーツ競技における応用研究

1) 疾走の競技

陸上競技の100m走を代表とするスプリント走は、マラソンとともに陸上競技の人気種目である。オリンピックで花を咲かせる夢と、人間の極限を知ろうとする知的好奇心の現れかも知れない。古くはすでに言及した猪飼ほか (1963)によって日本のトップスプリンターを含むランナーたちの疾走速度曲線が明らかにされた。小林 (2001)は、速く走るための腰を中心した動作を創造したいと考え、疾走動作を強制的に操作するマシンを開発している。近年の疾走研究では関節トルクの研究が盛んである。関節トルクを求めるには映像とフォースプレートが必要だが、フォースプレートのサイズは限られているため、伊藤ほか (1997)はスタート地点を後方にずらしてスタートダッシュにおける各ステップの下肢関節トルクを算出し、それらが大腿の引き上げや振り戻し動作の拡大に対応して変化することを明らかにした。また、いわゆる腿上げの高さは疾走速度と無関係であることなどのデータを分析した結果から、大切なことは着地後の蹴り局面で膝を伸展せず、足首もなるべく固定すると、股関節のトルクが有効に作用して疾走速度の増大に貢献することを報告した (伊藤ほか, 1998)。また疾走運動における関節運動を生体側から分析するため、筋電図記録の採取も行われてきた (松下ほか, 1974; 馬場ほか, 2000)。

陸上競技のバイオメカニクス研究の多くが、動作分析のみならず関節トルクやパワーを3次元レベルで解析している背景には、阿江通良ほか(1988他)の貢献が見逃せない。図8は疾走における下肢関節の力からみた貢献度を示している。関節トルクは文字通り関節部に働くトルク(回転力)であって、特定の筋群の活動を示すものではないが、例えば、着地前には膝関節が伸展しているが、屈曲トルクの方が大きいため大腿後面の筋群がエクセントリック収縮を強いられ、ハムストリングスに大きな負荷が生ずる可能性がある。こうした知見が肉離れの原因などに貴重な示唆をもたらすかも知れない。関節トルク部のトルクと角速度から関節パワーが導かれる。この段階はすでにエナジェティクスの領域である。阿江ほか(1988)は力学的仕事の何%が推進に有効なエネルギーに変化されるかを示す有効性指数を提案した。また、走運動のエナジェティクスでは、走

速度における機械的効率の変化や、短距離と長距離選手のエネルギー変換効率の違いなどが研究された(Kaneko, 1990)。

2) 跳躍競技

陸上競技では、走高跳び、走幅跳び、棒高跳びで跳躍の高さ(鉛直距離)を競い、走幅跳びと三段跳びで幅(水平距離)を競う。これらの競技は「助走」に始まる。その運動エネルギーは進行方向へは直接的に影響するため、助走速度の影響は高跳び種目より幅跳び種目の方が大きい(松井・三浦, 1973)。走高跳びの跳躍スタイルは歴史的に著しく変化し、挟み跳びからベリーロールへ、そして今日の背面跳びの時代を迎えている。必然的に研究の視点も変った。背面跳びでは、かつてのベリーロールとは比較にならない速い助走から跳躍する。関節トルクを測定した阿江(1990)の報告によると、走高跳びの助走には3つのタイプがあり、踏み切りにおける振り上げ脚の使い方(貢献度)が、同じ優秀選手でも異なる。この相違がまた、バーをクリアする身体長軸周りの回転に微妙な個人差をもたらす。いずれの跳躍方法がより合理的か、今後の課題は尽きない。

棒高跳びはポールの材質が竹からグラスファイバーに移行して久しい。棒高跳びは助走における運動エネルギーをポールに注入し(ポールの弾性エネルギーの増加)、その放出されるエネルギーを利用して跳ぶ競技である。ポールに注入される力学的エネルギーの量が弦反力となるが、このエネルギー注入量は、競技レベルの高い選手ほど多い。そこにはレベルの高い外国人選手のポールが固く、速い助走速度と強い筋力によって、低レベルに甘んじる日本選手との差をもたらしていると思われる(淵本, 1992)。もうひとつの要素は、ポールのエネルギーが放出するエネルギーをいかにタイミングよく、合理的な空中動作で受け止めるかが大きな課題である。この点についてはコンピュータ・シミュレーションによる研究に期待がかかっている(高松, 2004)。走り幅跳びでは、先述したように助走速度との間には高い相関があるが、三段跳びでは助走速度と跳躍成績の間に有意な相関がないとされている。また三段跳びのス

図8 全力疾走中の下肢関節におけるトルク、角度度およびパワー (n = 5) (阿江ら, 1988)

タイルにも3つのタイプのあることが明らかにされているが、その合理性にいかなる決定的因子が関わっているのかが今後の課題である（飯干，2004）。

3) 投擲競技

スポーツ競技における投げも多彩で、陸上競技の投擲種目、野球の投球、その他各種ボールゲームの投げがある。陸上競技の砲丸投げにはグライド投法と回転式投法があり、グライド式には強い筋力が要求されるが、回転式投法では回転スピードが重要だとされる（植屋，1985）。円盤投げのメカニズムはジャイロモデルにあり、その技術は回転軸まわりでいかに角運動量を高めるかにかかっている（宮西，2000）。ハンマー投げも回転運動であるが、ハンマーがハイポイントからローポイントにかけて加速されながらスピードを高め、その間の遠心力は2500Nにも達するという（桜井，1992）。世界レベルの選手を対象とした研究が複数の研究グループによって進行中と聞く。槍投げの投法には引っかき型と突っ張り型があるが、突っ張り型では上体と腕が大きくしなる。このとき体に弾性エネルギーが蓄えられ、いわゆる鞭動作がはたらくと考えられる（池上・橋本，1988；金子，1988；若山，1994）。

野球のピッチングにおける身体各部の速度には、体幹部から末端の手に向かって順次速度が高まる傾向が以前から観察されていた（豊島，1976）。その後の加速度分析や関節トルクの分析を通して、いわゆる鞭効果の存在がキネティクスの的にも証明され、またエネルギーの流れ（energy flow）の説明もなされた（Sakurai, 1993；宮西ほか，1997）。しかし、ピッチング動作における投球腕の動きには微妙なものが隠されており、今後ますます詳細にメカニズムの解明がなされてゆくものと思われる。

V 学会50年の節目に「バイオメカニクス」総集編を刊行

走・跳・投運動以外の、例えば「打つ」「蹴る」「泳ぐ」「滑る」といった残された各種運動の研究

紹介ができず残念であるが、本稿の紙数に限りがあり、軟着陸ならぬ強行着陸の地点を探さねばならない。幸い、学会50周年にふさわしい書物「バイオメカニクス～身体運動の科学的基礎」（金子・福永，2004）が杏林書院より出版され、55名という大勢の執筆者が各種運動の専門部分を担当して健筆を振るっているのので、詳細はそちらに譲ることとしたい。

第I部では編者らのほかに堀居昭が解剖学を、川上泰雄が筋生理学を、久野譜也と加藤守匡がエネルギー供給機構を、そして矢部京之助が運動の神経機構をそれぞれ執筆している。II部「応用篇」が種々の運動種目に関するもので、本稿で触れることができなかった運動の「打動作」では、野球を平野裕一、テニスを友末亮三、ゴルフを川島一明と池上久子がそれぞれ執筆。「蹴動作」ではサッカーを戸刈晴彦と磯川正教、格闘技の蹴りを吉福康郎が執筆。「滑動作」ではスキージャンプを渡部和彦、スケートは結城匡啓、フィギュアスケートは吉岡伸彦が担当した。「泳動作」は池上康男、高木英樹、若吉浩二が執筆。「漕動作」はボートを川上泰雄、自転車を淵本隆文が執筆。「体操」は岡本 敦と土屋純、「ダンス」は森下はるみと沢井史穂がそれぞれ執筆した。また、「スポーツ障害とバイオメカニクス」（堀居昭と黄仁官）の解説もある。また、第III部では「バイオメカニクスの研究法」を取り上げ、キネマティクスとキネティクスを阿江通良、筋電図を西藺秀嗣、超音波法を川上泰雄、MRIは秋間 広、「シミュレーション」を藤井範久、「競技力向上のバイオメカニクス」では陸上競技を小林寛道、水泳を野村照夫、サッカーを大橋二郎が担当した。さらに論文には不可欠のSI単位を寺島徹と桜井伸二がまとめている。

バイオメカニクスの歴史と最新の研究成果を取りまとめた本書は、本稿に課された「バイオメカニクス50年の回顧と現状」の詳細な内容を収録している。現段階における最新の研究法を含めて利便性をも兼ね備えた点で、現代のバイオメカニクス事典とも言えよう。本稿の及ばぬ点はすべて本書がカバーしてくれるものと信ずる。

VI 福永哲夫会長に国際バイオメカニクス学会賞

日本バイオメカニクス学会の福永哲夫会長が、ニュージーランドで開催された国際バイオメカニクス学会大会 (ISB, 2003) で、最も権威のあるマイブリッジ賞 (Muybridge Award) に輝き、受賞の特別講演を行った。この賞は、映画分析の元祖マイブリッジ (1830—1904) にちなんで設けられた最高賞で、ISBの歴史の中でわずかしき受賞者のいない真に荣誉ある賞である。受賞に至った氏の研究の足跡をかいつまんで紹介する。

1960年代、ヒトの固有筋力 (筋断面 1cm^2 当たりの筋力) は、4—10kgの大きな幅の中で論議されていた。そこに猪飼門下の福永氏が登場し、超音波法による見事な筋断面画像の撮影に成功して、固有筋力は $6.4\text{kg}/\text{cm}^2$ であることを明確に示し、世界の論争に終止符を打った (Ikai and Fukunaga, 1968)。その後MRIが開発されるやいち早く筋研究に導入。筋の生理的断面積 (PCSA) を求めて足底屈筋や前脛骨筋の形態的・機能的相違を明らかにした (Fukunaga et al., 1992)。やがて解像度の良くなった超音波映像を使用して、筋断面を白く斜めに走る筋束 (筋線維

の束) を発見。その腱 (腱枝) に付着する角度 (羽状角) から筋線維の走行方向をキャッチすることに成功し、肥大した筋ほど羽状角が大きいこと等を報告した。また、筋腱複合体の超音波画像をリアルタイムでダイナミックに撮影し (図9)、関節角を固定した等尺性収縮においても筋束長は短縮する (Ito et al., 1998) ことから、この筋短縮に伴う腱の伸長をもとに腱組織の弾性特性を定量的に示した (Fukashiro et al., 1995)。さらに、スポーツ成績 (垂直跳び高や100mタイム) と腱弾性特性との密接な相関やトレーニング効果を報告 (Kubo et al., 2001a, 2001b)。歩行中の筋腱複合体の伸長—短縮サイクルでは、筋線維のパワーがほぼ一定で、腱が伸張されてから短縮へ移行するときのエネルギーが重要な役割を果たしていること (Fukunaga et al., 2001)、同様の現象が垂直跳び動作にもみられること (Kurokawa et al., 2002)、およびこのような腱の弾性特性が、特に反動動作において高いパワーの発揮できる根拠 (メカニズム) を示唆するものであること (Kawakami et al., 2002) などを明らかにした。こうした結果はまた、A.ハックスレーのノーベル賞につながった筋節長と張力関係に挿入され、位置づけされた (図10)。

特筆すべきは、これらの研究成果が、J. Physiol. や J. Appl. Physiol. あるいは Proc. Roy. Soc. といったインパクトファクターの極めて高い、世界一流のジャーナルに多数掲載され、世界の注目を集

図9 超音波法による筋内の筋束配置の3次元構築
腓腹筋内側頭の一部 (筋腹中央) を示す。bが2次元縦断画像 (右側が近位)、aが再構築した3次元画像 (手前側が近位)。腱膜および筋束の3次元的な配列状態が観察できる。 (Kawakami et al., 2000)

図10 さまざまな身体動作中の各筋のサルコメア長—力関係 (Fukunaga, 2002)

めてきたことである。

日本バイオメカニクス学会にとっても、50年史を飾るに相応しい快挙であり、それを現会長とそのグループが成し遂げた意義は大きい。

VII バイオメカニクスの展望

バイオメカニクスの展望とはすなわち未来への展望が開けるのかどうか、開けるのならどんな方面に開けるのかという問いかけである。

1. 必然的な細分化と必要な総合化

学問が発展過程で分化するのは必然の理であり、バイオメカニクス領域の場合もまたその例に漏れない。たとえば国際誌の研究テーマが「ランニング中の振り出し脚の研究」と「キック脚の研究」に分離され、それぞれの詳細が報告されたりしているのはその良い例である。また研究方法も、上述のように（図2）キネマティクスの研究が停滞ないしやや減少する中で、キネティクスやエナジェティクスの研究が増加する傾向にある。その背景にはエレクトロニクスや映像解析の発達やコンピュータの出現とそのソフトの開発とがあり、そのお陰でバイオメカニクスは著しく発展した。こうした研究の発展は、冒頭に述べたように必然の結果であり、この傾向は今後ともますます加速されるものと予想される。

研究の必然的な発展は知識の細分化を伴うため、しばしばその意味が不明確になったり、部分が全体を忘れてひとり歩きをし始める危険を秘めている。部分に関する知見を実際の走運動の理解や指導に応用するには、細分化された結果を総合ないし統合する必要がある。この総合には明確な目的意識をもつ必要があり、そのための努力が求められる場合が多い。とはいえ、研究当初から目的が明確に意識されていれば、得られた結果の意義はおのずと導かれる。それは、ISB学会賞を得た福永らの研究を見ればわかる。彼らの研究は、筋線維や腱の生理学的研究であると同時に、跳躍運動のメカニズムを説明する研究やトレーニング法などに見事に結びついているからである。また、

得られた知識を指導ないしコーチングに応用する場合は、指導を受ける側の特性を考慮した上で、いかなる方法でその知識を伝達し、真にパフォーマンスの向上を図ることができるかの難問に直面する。しかし、それがいかに難問であろうとも、バイオメカニクスのスポーツ科学としての使命を果たすには、研究成果をできる限りその意義がわかりやすいかたちに総合化し、その上で心理学や教科教育学、コーチ学などと協調しつつ、指導の現場に生かしてゆくこととなろう。そうした努力はすでになされつつあり、その前途に大きな期待がかかっている。

2. バイオメカニクスに寄せられる期待

アテネオリンピックは日本のメダルラッシュに沸いた。その要因のひとつとして、複数のスポーツ評論家が“国立スポーツ科学センターの貢献”を指摘した。オリンピック直後に鹿屋体育大学で開催された日本バイオメカニクス学会大会2004では、同センターのバイオメカニストたちを演者とした特別シンポジウムが開かれ、オリンピック候補選手たちを被験者とした研究によってどんなサポートが行われたかが、冷静にしかも熱く語られた。それらの研究発表はまた、パフォーマンスの向上を直接的な目的とした実践的研究がいかに困難なものであるかをも痛感させた。

アテネでは引き続きパラリンピックも行われ、日本選手のメダル獲得はもとより、障害を持った人たちの懸命に努力する姿が、人々の感動を呼んだ。障害によって制限された身体資源をいかにうまく引き出し、いかにパフォーマンスの維持・向上に結びつけるかの課題には、バイオメカニクスに求められる部分が極めて多いと言えよう。リハビリテーション領域との共同研究が大いに期待される所以である。

高齢者を対象とした研究が増えている。筆者らが十数年前に手がけた頃には珍しがられた高齢者の歩行研究が、いまや各方面でなされている。高齢社会を迎えて、お年寄りの寝たきりが問題となり、転倒予防につながる歩行研究が、その必要性を増しているからであろう。しかし同時に、将来

を担う子供たちの研究が、高齢者の研究に優るとも劣らぬ重要な課題であることを忘れてはならない。発育発達に関する研究がそれであり、運動好きの子供が増えるように、動きづくりの指導に役立つような研究が期待される。コンピュータソフトの開発でロボット工学が大きく進展している。やがてスポーツ指導の場面でも、優れた動作を師範するデモンストレーション役のロボットが参入してくるようになってならない。いずれにしろ、身体運動をバイオ（生体）とメカニクス（力学）の両面から研究するバイオメカニクスの分野には、ますます大きな期待が寄せられることであろう。幸い、優れた若きバイオメカニストが続々と育っており、バイオメカニクス分野の将来は明るい。

おわりに

本稿の執筆は、喩えて言えば、あたかも何台ものトラックに積まれた食材（研究成果）を前に、それらを調理して小さな皿に盛り付けよと命ぜられたようなものである。調理人の腕の拙さが原因で、優れた多数の研究を紹介できなかったことが悔やまれる。特に各種運動に関する研究成果はあまりにも膨大なため、それらの研究成果については、本稿とほぼ同趣旨で刊行された近著「バイオメカニクス」（杏林書院）に委ねることとした。責任が十分に果たせない無念さと各方面へのお詫びの気持ちとを引きずりながら、ここに拙稿を閉じる。

文 献

- 阿江通良・湯 海鵬・横井孝志（1992）日本人アスリートの身体部分慣性特性の推定。バイオメカニズム学会編 バイオメカニズムII。東京大学出版会：東京，pp. 23-33。
- 阿江通良・宮下 憲・横井孝志・大木昭一郎・洪川侃二（1986）機械的パワーからみた疾走における下肢筋群の機能および貢献度。筑波大学体育科学系紀要，9：229-239。
- 阿江通良（1990）走高跳および走幅跳の踏み切りに

- おける身体各部の使い方・貢献度。Jpn. J. Sports Sci., 9：130-135。
- 阿江通良・藤井範久（2002）スポーツバイオメカニクス20講。朝倉書店：東京。
- 浅見俊雄・戸刈晴彦・菊池武道・足立長彦・北川薫・佐野祐司（1974）サッカーのキックにみられるパワーとパフォーマンスとの関係について。キネシオロジー研究会編 身体運動の科学I。杏林書院：東京，pp. 147-157。
- 浅見俊雄・石井喜八・宮下充正・浅見高明・小林寛道編著（1976）身体運動学概論。大修館書店：東京。
- アレクサンダー，R.M.：平本幸男訳（1976）バイオメカニクス。講談社：東京。
- 馬場崇豪・和田幸洋・伊藤 章（2000）短距離走の筋活動様式。体育学研究，45：186-200。
- ブローア，M.：宮畑虎彦訳（1964）身体運動の力学。ベースボールマガジン社：東京。
- 淵本隆文（1992）スポーツ用具に注入されるエネルギーを測る—棒高跳ポールの場合—。Jpn. J. Sport Sci., 11：188-193。
- Fujikawa, T., Oshima, T., Kumamoto, M., and Yokoi, N. (1997) Functional coordination control of pairs of antagonistic muscles. Trans. J. Soc. Mech. Eng., 63: 769-776.
- Fukashiro, S. and Komi, P.V. (1987) Joint moment and mechanical power flow of the lower limb during vertical jump. Int. J. Sports Med., 8 (Suppl) : 15-21.
- Fukashiro, S., Itoh, M., Ichinose, Y., Kawakami, Y., and Fukunaga, T. (1995) Ultrasonography gives directly but invasively elastic characteristic of human tendon in vivo. Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol., 71: 555-557.
- 深代千之（2000）反動動作のバイオメカニクス。体育学研究，45：457-471。
- 深代千之（1985）より遠くへ—跳動作の発達—。体育の科学，35：303-309。
- 深代千之（1990）跳ぶ科学。大修館書店：東京。
- 深代千之・桜井伸二・平野裕一・阿江通良編著（2000）スポーツバイオメカニクス。朝倉書店：東京。
- 福永哲夫（1978）ヒトの絶対筋力—超音波による四肢組成・筋力の分析—。杏林書院：東京。
- Fukunaga, T., Roy, R.R., Shellock, F.G., Hodgson, J.A.,

- Day, M.K., Lee, P.L., Lee, P.L., Kwong-Fu, H., and Edgerton, V.R. (1992) Physiological cross-sectional area of human leg muscles based on magnetic resonance imaging. *J. Orthop. Res.*, 10: 928-934.
- Fukunaga, T., Kubo, K., Kawakami, Y., Fukashiro, S., Kanehisa, H., and Magnaris, C.N. (2001) In vivo behavior of human muscle tendon during walking. *Proc. Roy. Soc. Lond. B Biol Sci.*, 268: 229-233.
- Fukunaga, T. (2002) Muscle and tendon interaction during human movements. *Exerc. Sport Sci. Rev.*, 30: 106-110.
- 福永哲夫 (2002) 身体の形と力への興味. 福永哲夫教授退官記念誌編集委員会: 東京.
- 福永哲夫編 (2002) 筋の科学事典—構造・機能・運動—. 朝倉書店: 東京.
- Funato, K., Matsuo, A., Yata, H., Akima, H., Suzuki, Y., Gunji, A., and Fukunaga, T. (1997) Changes in force-velocity and power output and lower extremity musculature in young subjects following 20 days bed rest. *J. Gravit. Physiol.*, 4: S22-S30.
- Funato, K., Yanagiya, Y., and Fukunaga, T. (2001) Ergometry for estimation of mechanical power output in sprinting in humans using a newly developed self-driven treadmill. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 84: 169-173.
- 後藤幸弘・風井訖恭・岡本 勉 (1979) ピッチャーの投げの筋電図的分析. *体育の科学*, 29: 533-538.
- グレー, J.: 柳田為正訳 (1963) 動物の運動. 岩波書店: 東京.
- 平野祐一 (1992) 打つ科学. 大修館書店: 東京.
- ホッホムート, G.: 遠藤萬里訳 (1981) スポーツ運動のバイオメカニクス. 新体育社: 東京.
- 堀居 昭・黄 仁官 (2004) スポーツ障害とバイオメカニクス. 金子公宥・福永哲夫編 バイオメカニクス. 杏林書院: 東京, pp. 423-430.
- 星野春雄 (1961) 体育物理学序説. 不昧堂書店: 東京.
- 飯干 明 (2004) 走高跳のバイオメカニクス. 金子公宥・福永哲夫編 バイオメカニクス. 杏林書院: 東京, pp. 223-227.
- 猪飼道夫・石井喜八・宮下充正 (1961) 水泳中の筋電図～トレーニングとキネシオロジーの交点. *Olympia*, 8: 258-263.
- 猪飼道夫 (1961) 運動の力学. 猪飼道夫 体育生理学序説. 杏林書院: 東京.
- 猪飼道夫・芝山秀太郎・石井喜八 (1963) 疾走能力の分析～短距離疾走のキネシオロジー～. *体育学研究*, 7: 1-12.
- Ikai, M. and Fukunaga, T. (1968) Calculation of muscle strength per unit cross-sectional area of human muscle by means of ultrasonic measurement. *Int. Z Angew Physiol.*, 26: 26-32.
- 石田和之 (2001) 投動作の発達段階. *バイオメカニクス研究*, 5: 155-161.
- 石井喜八 (1960) 投の研究. *体育の科学*, 10: 275-276.
- 石井喜八・斎藤好史 (1982) 強靱でしなやかな投げ. *Jpn. J. Sport Sci.*, 1: 79-84.
- 石井喜八 (1994) スポーツ動作の隠し味. ベースボールマガジン社: 東京.
- 池上康男 (1983) 写真撮影による運動の3次元解析法. *Jpn. J. Sport Sci.*, 2: 163-170.
- 池上泰男・橋本 勲 (1988) やり投げの動作. *体育の科学*, 38: 106-111.
- 伊藤 章・斉藤昌久・淵本隆文 (1997) スタートダッシュにおける下肢関節のピークトルクとピークパワー, および筋放電パターンの変化. *体育学研究*, 42: 71-83.
- 伊藤 章・市川博啓・斉藤昌久・佐川和則・伊藤道郎・小林寛道 (1998) 100m 疾走局面における疾走動作と速度の関係. *体育学研究*, 43: 260-273.
- Ito, M., Kawakami, Y., Ichinose, Y., Fukashiro, S., and Fukunaga, T. (1998) Nonisometric behavior of fascicles during isometric contractions of a human muscle. *J. Appl. Physiol.*, 85: 1230-1235.
- 金久博昭 (1983) 筋の出力特性とトレーニング. *Jpn. J Sport Sci.*, 2: 23-34.
- Kanehisa, H., Ikegawa, S., and Fukunaga, T. (1997) Force-velocity relations and fatigability of strength and endurance-trained subjects. *Int. J. Sport Med.*, 18: 106-112.
- 金子公宥 (1970) キネシオロジー 20 年の回顧と展望. *体育の科学*, 20: 28-33.
- 金子公宥 (1974) 瞬発的パワーからみた人体筋のダイナミクス. 杏林書院: 東京.
- 金子公宥・伊藤 章・淵本隆文・淵本恭子 (1993) 日本と世界におけるバイオメカニクス研究の動向.

- Jpn. J. Sport Sci., 12 : 398-408.
- 金子公宥 (1982) スポーツバイオメカニクス入門. 杏林書院: 東京.
- Kaneko, M (1990) Mechanics and energetics in running with special reference to efficiency. J. Biomech., 23: 57-63.
- Kaneko, M., Morimoto, Y., Kimura, M., Fuchimoto, K., and Fuchimoto, T (1991) A kinematic analysis of walking and physical fitness testing in elderly women. Can. J. Appl. Physiol., 16: 223-228.
- 金子公宥 (1988) パワーアップの科学. 朝倉書店: 東京.
- 金子公宥・福永哲夫編 (2004) バイオメカニクス—身体運動の科学的基礎. 杏林書院: 東京.
- 金子靖仙・佐藤文宣 (1999) 走動作中の関節トルクの地面反力への変換. 植屋清見ほか編 バイオメカニクス研究概論. 山梨大学: 山梨, pp. 208-212.
- 加藤謙一・山中任広・宮丸凱史・阿江通良 (1992) 男子高校生の疾走能力および最大無酸素パワーの発達. 体育学研究, 37 : 291-304.
- 加藤謙一・宮丸凱史・阿江通良 (1974) 女子高校生の疾走能力および最大無酸素パワーの発達. 体育学研究, 39 : 13-27.
- Kawakami, Y., Abe, T., and Fukunaga, T. (1993) Muscle-fiber penetration angles are greater in hypertrophied than in normal muscles. J. Appl. Physiol., 74: 2740-2744.
- Kawakami, Y., Muraoka, T., Ito, S., Kanehisa, H., and Fukunaga, T. (2002) In vivo muscle-fiber behavior during counter movement exercise in humans reveals significant role for tendon elasticity. J. Physiol., 540: 635-646.
- 金原 勇・古藤高良・広橋義一・関岡康雄 (1960) 基礎的跳躍運動の分析. 体育の科学, 10 : 271-274.
- 小林一敏 (1971-1973) スポーツ技術学. 学校体育 (23-25 巻に 24 回連載).
- 小林寛道 (1973) キネシオロジーの動向. 体育の科学, 23 : 503-507.
- 小林寛道 (1990) 走る科学. 大修館書店: 東京.
- 小林寛道 (2001) 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: 東京.
- Kurokawa, S., Fukunaga, T., and Fukashiro, S. (2001) Behavior of fascicles and tendinous structures of human gastrocnemius during vertical jumping. J. Appl. Physiol., 90: 1349-1358.
- Kubo, K., Kanehisa, H., and Fukunaga, T. (2001a) Effects of different duration isometric contractions on tendon elasticity in human quadriceps muscles. J. Physiol., 536: 649-655.
- Kubo, K., Kanehisa, H., Kawakami, Y., and Fukunaga, T. (2001b) Influence of static stretching on viscoelastic properties of human tendon in vivo. J. Physiol., 90: 520-527.
- マルガリア, R.: 金子公宥訳 (1978) 身体運動のエネルギー. ベースボールマガジン社: 東京.
- Masani, K., Kouzaki, M., and Fukunaga, T. (2003) Variability of ground reaction forces during treadmill walking. J. Appl. Physiol., 92: 1885-1890.
- 松井秀治 (1958) 運動と身体の重心—各種姿勢の重心位置に関する研究. 杏林書院: 東京.
- 松井秀治 (1968) 身体運動学入門. 杏林書院: 東京.
- 松井秀治 (1970) バイオメカニクス研究の歩み. 体育の科学, 40 : 18-21.
- 松井秀治・三浦望慶 (1973) 跳能力の向上. 走幅跳びの踏み切りにおける速度変化. 日本体育協会スポーツ科学研究報告, VI. 7-11.
- 松井秀治 (1979) 国際学会とその研究動向. 体育の科学, 29 : 792-796.
- 松永尚久 (1974) 内野手の投球動作の習熟. 体育の科学, 24 : 448-452.
- 宮畑虎彦・高木公三郎 (1957) 身体運動学. 学芸出版社: 東京.
- 宮畑虎彦・高木公三郎・熊本水頼 (1971) 身体運動学 (第2版). 学芸出版社: 東京.
- 宮畑虎彦・高木公三郎・小林一敏 (1965) スポーツとキネシオロジー. 大修館書店: 東京.
- 宮丸凱史 (1980) 投げの動作の発達. 体育の科学, 30 : 464-471.
- 宮丸凱史編著 (2001) 疾走能力の発達. 杏林書院: 東京.
- 宮西智久・藤井範久・阿江通良・功力靖雄・岡田守彦 (1997) 野球の投球動作における体幹および投球腕の力学的エネルギー・フローに関する3次元解析. 体力科学, 46 : 55-68.
- 宮西智久 (2000) 円盤の速度増大のメカニズム—角運動量からみた2つの仮説: Dapena 説と宮西・桜井説 (ジャイロモデル) —. 陸上競技研究, 43 :

- 29-36.
- 宮下充正 (1970) 水泳の科学～キネシオロジーと水泳への応用～. 杏林書院: 東京.
- 宮下充正 (1979) キネシオロジーからバイオメカニクスへ. 体育の科学, 29: 752-754.
- 森下はるみ (1965) 投球動作の学習過程の筋電図および映画分析による研究. 体育の科学, 15: 440-442.
- 長尾愛彦・沢田芳男 (1967) 高速度撮影による動態の研究. 王・長嶋のバッティングについて. 体質医学研究所報, 18: 110-129.
- 中澤公孝 (1999) ヒトの脊髄の歩行発生能力とその可塑性. バイオメカニクス研究, 3: 195-200.
- 中澤公孝・赤井正美 (2002) 脊髄損傷と歩行の可能性. 臨床リハビリテーション, 11: 193-203.
- 西園秀嗣 (1987) 巧みな腕の運動と筋活動. Jpn. J. Sports Sci., 4: 249-257.
- 西園秀嗣 (2004) 筋電図. 金子公宥・福永哲夫編 バイオメカニクス. 杏林書院: 東京, pp. 444-451.
- 野口義之 (1952) 投力に関する研究. 体育学研究, 1: 259-265.
- 野原弘嗣 (1975) キネシオロジーの成果と課題. 体育の科学, 25: 804-806.
- 小田伸午 (1998) 身体運動における右と左. 京都大学学術出版会: 京都.
- 尾縣 貢・中田順造・山本章雄・熊安貴美江 (1989) 成人女性におけるオーバーハンドスロー動作の検討: 投距離に影響を与える体力要因を考慮して. 体育学研究, 34: 63-72.
- 尾縣 貢・岡沢祥訓・関岡康雄 (1992) 走運動学習における言語教示と示範の有効性に関する研究. 陸上競技研究, 10: 2-12.
- Okamoto, T. and Kumamoto, M. (1972) Electromyographic study of the learning process of walking in infants. Electromyogr., 12: 149-158.
- 岡本 勉・岡本香代子・堤 博美・港野恵美・後藤幸弘 (1996) 筋電図からみた原始歩行. 体育科学, 24: 79-88.
- 大道 等 (1988) バイオメカニクス. 高文堂出版社: 東京.
- 大道 等 (1991) 動きを探る. 大修館書店: 東京.
- 大道 等 (2003) 重心運動のバイオメカニクス. 不昧堂出版: 東京.
- 大築立志・定本朋子 (1979) 前方跳躍および上方跳躍における運動制御. 日本バイオメカニクス学会編 身体運動の科学 III. 杏林書院: 東京, pp. 191-204.
- 大築立志 (1988) 「たくみ」の科学. 朝倉書店: 東京.
- 斉藤昌久・伊藤 章 (1995) 2歳児から世界一流短距離選手までの疾走能力の変化. 体育学研究, 40: 104-111.
- Sakurai, S. and Miyashita, M. (1983) Developmental aspects of overarm throwing related to age and sex. Human Movement Science, 2: 320-324.
- 桜井伸二・池上康男・矢部京之助・岡本敦・豊島進太郎 (1990) 野球投手の投動作の3次元動作解析. 体育学研究, 35: 143-156.
- 桜井伸二 (1992) 投げる科学. 大修館書店: 東京.
- 佐々木秀幸ほか監修 (1994) 世界一流陸上競技者の技術. ベースボールマガジン社: 東京.
- 佐藤信一 (1973) 小学生における短距離疾走の進歩の追及. 体育学研究, 18: 41-50.
- 沢田芳男: 日本人の体格・体型・体質. 福田邦三編 日本人の体力・体力の国際比較. 杏林書院: 東京, pp. 26-76.
- 渋谷侃二・吉本 修 (1969) 垂直跳の力学 (第2報). 東京教育大学体育学部スポーツ研究所報, 7: 47-54.
- 渋谷侃二 (1969) 運動力学. 大修館書店: 東京.
- 島津 晃・浅田莞爾 (1988) バイオメカニクスよりみた整形外科. 金原出版: 東京.
- スコット, M.G.: 宮畑虎彦訳 (1957) 体育の力学. 不昧堂書店: 東京.
- 高松潤二 (2004) 棒高跳の力学. 金子公宥・福永哲夫編 バイオメカニクス. 杏林書院: 東京, pp. 234-238.
- 湯 海鵬 (1995) 3次元的身体角運動量の算出法. 体育学研究, 40: 161-169.
- 湯 海鵬・渋谷侃二・阿江通良 (1989) 空中に於ける身体角速度の算出法. 体育・スポーツ科学, 4: 54-57.
- Toji, H., Sueti, K., and Kaneko, M. (1997) Effect of combined training loads on relations among force, velocity and power development. Can. J. Appl. Physiol., 22: 328-336.
- Toyoshima, D. and Miyashita, M. (1973) Force-velocity relation in throwing. Res. Q., 44: 86-95.
- 豊島進太郎 (1982) ボールの的当て. Jpn. J. Sport

- Sci., 1 : 91-98.
- 豊島進太郎・池上康男・亀井貞次・星川 保 (1983) 投動作における調整能. 日本バイオメカニクス学会編 身体運動の科学IV. 杏林書院: 東京, pp. 93-103.
- 角田俊幸 (1978) 投げる動作の発達. 体育の科学, 28 : 320-324.
- 辻野 昭・岡本 勉・後藤幸弘・橋本不二雄・徳原康彦 (1974) Human Power の発達. キネシオロジー研究会編 身体運動の科学I. 杏林書院: 東京, pp. 203-243.
- 辻野 昭・後藤幸弘 (1979) 幼少時における走運動の習熟過程の筋電図的研究. 日本バイオメカニクス学会編 身体運動の科学III. 杏林書院: 東京, pp. 237-248.
- 植屋清見 (1985) 回転式砲丸投の技術について. Jpn. J. Sports Sci., 4 : 91-97.
- 山田憲政・関岡康雄・小林一敏・宮下 憲・金子靖仙 (1987) コンピュータを用いた3次元運動解析に関する基礎的研究. 筑波大学体育科学系紀要, 10 : 167-175.
- 矢部京之助 (1977) 人体筋出力の生理的限界と心理的限界. 杏林書院: 東京.
- 矢部京之助・大築立志・笠井達哉編 (2003) 入門運動神経生理学. 市村出版: 東京.
- 横井孝志・洪川侃二・阿江通良 (1986) 日本人幼少年の身体部分係数. 体育学研究, 31 : 53-56.
- 吉澤正尹・田中久美子・熊本水頼・岡本 勉・ (1989) 加齢による歩容変化の動作筋電図学的研究. Jpn. J. Sports Sci., 8 : 134-141.
- 吉福康郎 (1982) 投げる一物体にパワーを注入する一. Jpn. J. Sport Sci., 1 : 85-90.
- 若山章信 (1995) 槍投げ動作における身体各セグメントの運動連鎖と上肢帯筋群の収縮機序. 永田晟編 第12回日本バイオメカニクス学会論集生体・運動のシステム. 早稲田大学: 埼玉, pp. 289-293.
- 渡部和彦 (1982) 風洞実験による空気抵抗の測定. Jpn. J. Sports Sci., 1 : 413-421.
- ウィリアムス, M・リスナー, H.: 太田仁訳 (1974) バイオメカニクス. 医歯薬出版: 東京.

(平成16年11月4日受付)
(平成16年11月6日受理)