スポーツシューズはどれだけ人間に近づくことができるか？*

金 子 靖 仙^{*1}

Biomechanical Problems of Athletic Footwear

Yasunori KANEKO

Key Words: Biomechanics, Modeling, Design, Perception, Sport Shoes, Athletic Footwear, Shoe Testing

1. はじめに

水泳や柔道などの一部のスポーツを除けば、すべてのスポーツにおいて必ず使用されるスポーツ用具がスポーツシューズである。多くのスポーツ活動中に、身体に唯一外力が作用する箇所にはスポーツシューズは位置し、身体と外部環境とのインタフェースとして重要な意味を持つことは疑いない。スポーツシューズには、外力によるストレスから身体を保護し傷害を予防する機能、そしてスポーツにおいて高いパフォーマンスを発揮するためのギアとしての機能が要求される。いずれの場合でも、スポーツシューズの性能研究あるいは機能開発においては人間要素を無視することはできない。

機械的存在であるスポーツシューズと人間とを統合的に扱う上ではバイオメカニクス(生体力学)が重要な役割を果たす。なぜならば、バイオメカニクスは、生体の構造や運動の合理性、合目的性を力学的視点から解釈する科学であるが、これは生体と機械とのアナロジーを論じていることにほかならない。そして、この分野での研究成果は従来の観察的なものから、メカニズムの解明を経て、現在では操作的段階に入ってきたものも多い。

ところが、このような研究内容や成果はさまざまな研究領域に分散しているために、系統的にまとめあげることが困難であったようである。ここではスポーツシューズのバイオメカニクス的研究について、まず、その歴史的背景を概観する。続いて、最近の研究内容

を整理し、今後の研究課題を探ってみる。文献としては、近年の国内外の学会やシンポジウムで発表された話題も積極的に取り上げた。

2. スポーツシューズの性能研究のはじまり

1930年代まではスポーツシューズの性能研究は実質的には行われていなかった⁽¹⁾。この時代のシューズの研究あるいは評価はもっぱら材料物性や強度に関するものであった。ここでの材料等に関する評価手法を確立したのが1919年に英国で設立されたSATRA (Shoe and Allied Trades Research Association)であると言われている⁽²⁾。1950年代頃から各シューズメーカーはシューズの性能評価方法を独自に開発して行ったが、実際にバイオメカニクスの手法がシューズの評価あるいは設計に取り入れられはじめたのは1970年代になってからのことである⁽¹⁾。1977年、Cavanagh⁽²⁾が“Runners World”誌上で紹介したシューズの性能評価法はその後のスポーツシューズの物理的試験方法の一つの基準となった。Cavanaghのシューズの性能評価法は1980年には改良が加えられ最終的に、踵と踏み付け部の衝撃吸収性、靴底の耐久性、屈曲性、衝撃吸収持続性、踵安定性(3項目)、重量、通気性に関する試験方法が確立された⁽²⁾。ここでの性能評価には、バイオメカニクスの研究成果が取り入れられ、運動中の負荷をシミュレートするようにデザインされた試験装置が開発された。

一方1980年頃からは実際に人間がシューズを着用した状態で衝撃吸収性^{(3)~(8)}や踵安定性^{(7)~(9)}といったシューズの性能を評価するいわゆるバイオメカニクスの性能評価が行われはじめた。ところが、これらの

* 原稿受付 1998年3月30日。

^{*1} ミズノ(株)研究開発部(☎559-8510 大阪市住之江区南港北1-12-35)。

研究からは、物理的テストとバイオメカニクスのテストとの結果の不一致が指摘されはじめた⁽⁵⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。この指摘が、その後のスポーツシューズの性能研究の方向性を決定した。

3. スポーツシューズの性能研究の発展と現状

物理的テストとバイオメカニクスのテスト結果の不一致の要因としては、バイオメカニクスのテストにおける、人間の外部環境に対する適応(Adaptation)、被験者間あるいは被験者内のばらつき(Variability)が考えられる。また、物理的試験方法の試験条件の妥当性についての問題も指摘されている⁽⁴⁾。これらの問題点に加え、性能に対する官能評価の問題が、現在のスポーツシューズの性能研究課題の源泉となっている(図1)。

物理的性能評価の発展には、より忠実にスポーツ動作中の負荷条件を再現するテスト方法の開発がある⁽¹³⁾⁽¹⁶⁾。また、試験条件の安定性を利用して、シューズの性能と周辺温度⁽¹²⁾⁽¹⁵⁾との関係や性能の持続性⁽¹⁴⁾に関する研究が行われている。さらに、新しいシューズの性能を提案しその試験方法を開発したものもある⁽¹⁷⁾。

バイオメカニクスの性能評価においては、より詳細なシューズの設計要素と性能との関係が論じられ、衝撃吸収性^{(18)~(24)}や踵安定性^{(21)~(29)}に及ぼすシューズの影響が検討されている。シューズの構造と足底圧力分布との関係についての研究も近年なされている⁽³⁰⁾⁽³¹⁾。シューズの構造が身体の関節トルク⁽³²⁾、脛骨に作用する応力⁽³³⁾、足の変形パワー⁽³⁴⁾に及ぼす影響から、シューズの性能を評価する新しい試みもなさ

れている。バイオメカニクスの性能評価においては、シューズの性能以外にも計測値に影響を及ぼす因子が存在する。そして、疲労⁽³⁵⁾⁽³⁶⁾、ランニングスピード⁽³⁷⁾⁽³⁸⁾、着地時の姿勢^{(39)~(41)}、足の形態学的因子^{(42)~(47)}と評価パラメータとの関係が調査されている。

バイオメカニクスの性能評価においても物理的性能評価同様にテスト方法の改良がなされている。衝撃吸収性に関しては生体での振動伝ばに関する研究^{(48)~(54)}が近年多くなされている。踵安定性に関しては足関節の運動の三次元的な解析⁽⁵⁵⁾⁽⁵⁶⁾がなされ、シューズ内での足あるいは骨の運動計測手法^{(57)~(59)}、そして映像解析によらない踵安定性の評価方法⁽⁶⁰⁾が開発されている。足底圧力計測においてはセンサのサイズの問題が検討されている⁽⁶¹⁾。また、足底での圧縮力とせん断力を同時に計測可能な小形デバイス⁽⁶²⁾も開発されている。これらの計測・解析手法の発達により、より妥当性のある性能評価が実現されつつある。また複数のバイオメカニクスのパラメータの相互関係についての統計学的な研究も数多くなされている^{(63)~(66)}。

物理的テストとバイオメカニクスのテスト結果の不一致の要因の一つとして考えられる、人間の外部環境に対する適応については、いくつかの実験的研究がなされている^{(67)~(69)}。これらの研究結果は、人間は外部環境の変化に際してはなんらかの最適制御を行っていることを示唆するものであり、この最適制御基準を見つけ出そうとする研究も近年行われている^{(70)~(77)}。

物理的テストとバイオメカニクスのテスト結果の不一致のもう一つの要因として考えられる被験者間あるいは被験者内のばらつき(Variability)に関してもさまざまな角度からの実験的研究が行われてい

Fig. 1 Biomechanical problems of athletic footwear

る^{(78)~(85)}。湯川ら^{(83)~(85)}の研究は、全身を粘弾性モデルで表現し、実験から同定されるモデルパラメータを通して、このばらつきについて検討を行っているものである。このばらつきの問題を解決するものとして Lafortune-Lake⁽⁸⁸⁾ は全身振り子による着地衝撃再現法を開発した(図2)。そして全身振り子法はランニングの着地衝撃をよく再現し、さらにばらつきも少ないことが報告されている。この全身振り子法により、着地衝撃に影響を及ぼす要因に関してさまざまな角度から実験的研究が行われている^{(86)~(93)}。

スポーツシューズの開発においては設計段階で性能予測を高い精度で実現することが要求される。この性能予測はシューズと人間とを統合した形で行うべきであり、そこではシューズおよび人体のモデリングとそのモデルを利用した数値シミュレーションが重要な開発モジュールとなる。以下、これらの内容を概観する。

スポーツシューズあるいはシューズ構成材料のモデリングとしてはシューズのソールの一次元非線形粘弾性モデルによる衝撃吸収性のシミュレーション^{(94)~(98)}、有限要素モデルによる衝撃吸収性あるいは足底圧力分布のシミュレーション^{(99)~(103)}がある。有限要素モデルによるシミュレーションでは、このほか、踵安定性⁽¹⁰⁴⁾、屈曲性⁽¹⁰⁵⁾、グリップ性⁽¹⁰⁶⁾に関するものがある。シューズに関するモデリングとしては靴内でのマメの発生に関する数学モデル⁽¹⁰⁷⁾もある。

人間のモデリングとしては、まず、踵脂肪組織^{(109)~(111)}あるいはその他生体組織⁽¹⁰⁸⁾の粘弾性に関するものがあり、着地衝撃のシミュレーションに関しての有用な情報もたらされている。足全体に関するモデル^{(112)~(123)}では足の骨格の幾何学的モデルと粘弾性モデルが複合され、足底圧力分布や足内部応力の推定を可能にしている。足首^{(124)~(128)}や膝^{(129)~(131)}などの関節に関するモデルとしては、関節の機構、粘弾性に加えて筋のアライメントに関するもの^{(126)~(130)}があり、身体に加わるストレスを筋レベルで評価すること

を可能にしている。下肢全体のモデルでは筋のアライメントに関するもの^{(132)~(134)}、そして下肢の機構に筋モデルを複合したもの^{(135)~(136)}があり、下肢の衝撃緩和メカニズムについて検討が加えられている。全身モデルとしては、ばね質量モデルによるもの^{(137)~(140)}、粘弾性モデルによるもの^{(141)~(149)~(152)}があり、着地衝撃のシミュレーションに関する多くの成果が出されている。全身を粘弾性モデルで表現する上での問題は、実際のランニング動作では起こり得ない一歩ごとの力学的エネルギーの損失がおこってしまうことである。この問題については粘性に非対象性を持たせ、負の粘性を許容することで、実際の現象をよく再現できることが報告されている^{(142)~(145)~(148)~(149)}。全身モデルとしてはこのほかリンクセグメントモデルによる着地衝撃の解析がある⁽¹⁵⁰⁾。最も大規模なモデルは Gerritsen ら⁽¹⁵¹⁾によるものであり、リンクセグメントモデルに筋モデルを組合わせ、接地インタフェースを粘弾性モデルで表現したモデルを用いて、着地衝撃のシミュレーションを行っている。

以上のようなバイオメカニクス的研究成果は、シューズの開発にも実際に応用されはじめている^{(152)~(155)}。

スポーツシューズの性能評価で物理的テスト、バイオメカニクスのテストとともに重要なのが官能評価である。実際に人間が感じる性能と、物理的あるいはバイオメカニクスのテスト結果との関連性を明らかにすることは、スポーツシューズの開発においても重要なことである。そして多くの研究が、物理的テスト結果と官能値との関係^{(156)~(161)}、あるいはバイオメカニクステスト結果と官能値との関係^{(161)~(167)}を報告している。この中で Woo ら⁽¹⁵⁹⁾は階層分析法(AHP: Analytic Hierarchy Process)により物理量と官能値との関係を認知工学的見地から明らかにすることを試みている。

4. 今後の研究課題

スポーツシューズのバイオメカニクスの特性に関する研究ではいまだに多くの不明点がある。今後それらの問題を解決することにより、高い次元での、人間とスポーツシューズの整合が実現することを期待したい。そのために必要と思われる研究課題を以下に述べる。

生体の外部環境への適応における神経生理学的制御機序は、いまだ推測の域を脱していない。今後この分野での研究がいつそう進むことが期待される。またこれらの研究成果が性能予測の数値シミュレーションに

Fig. 2 Illustration of the pendulum testing setup⁽¹⁰⁷⁾

取り入れられることを期待したい。

バイオメカニクステストにおける、被験者内および被験者間のばらつき (Variability) は身体構造の多様性と冗長性、あるいは動作の開放性に由来すると考えられるが、それぞれの視点に立ったバイオメカニクステスト手法の改良が必要である。Lafortune-Lake⁽⁶⁸⁾の全身振り子法はこの点で参考にするべき点が多い。ばらつきの構造と発生のメカニズムの解明にも大きな関心が持たれる。

物理的テストにおいては、より多様な人間要素を取り込んだ試験条件あるいは試験装置の改良が必要である。そのためにはロボット工学分野との連携が必要である。

シューズおよび人間のモデリングはスポーツシューズの衝撃吸収性を予測する上では大きな発展を見せている。今後はシューズの他の性能の予測を実現するモデルの開発が期待される。

物理的性能評価結果とバイオメカニクスの性能評価結果との不一致に関しては多くの工学的アプローチがなされてきた。今後同様のアプローチが、官能値と物理的評価値、あるいは官能値とバイオメカニクスの評価値との関係について展開されることを期待したい。近年の複雑系の科学の研究成果の応用が期待される。

スポーツシューズの性能研究のほとんどは衝撃吸収性や踵安定性等の安全性に関するものである。これらはもちろん重要な研究対象ではあるが、さらにスポーツシューズをギアとしてとらえた性能研究が展開されることを期待したい。

スポーツシューズのバイオメカニクスの研究成果をシューズの設計に迅速にフィードバックするためのツールの開発が必要である。この課題を解決するためのインフラは既に整っていると考えるべきである。

スポーツシューズの性能に関する用語の工学的定義が必要である。例えば市場では盛んに“クッション性”というシューズの性能らしき単語が使われているが、この“クッション性”は必ずしも衝撃吸収性等の工学的パラメータと1対1に対応していないのが実状である。

本文中では述べることはできなかったが、スポーツシューズの性能を論じる上ではシューズと足との適合性あるいはフィット性を無視するわけにはいかない。人間工学的研究領域でこの問題に関する研究成果が出ているが^{(168)~(170)}、今後、機械工学的なアプローチ⁽¹⁷¹⁾が、この適合性に対しても多くなされることを期待したい。

5. おわりに

スポーツシューズの性能研究は、機械的存在であるスポーツシューズと人間とを統合した形で行われなくてはならない。この点で、バイオメカニクス (生体力学) は重要な役割を果たしてきた。さまざまな研究領域に分散している、バイオメカニクスの研究内容や成果も、系統的にまとめあげてみると、それぞれの研究の相互関係や、今後の研究の方向性が明らかになったように感じる。

今後多くの研究者がスポーツシューズの研究に着手され、多くの成果がもたらされ、応用されることを期待したい。この小文がその際に少しでもお役に立てば幸いである。

最後に国内外には従来からスポーツシューズの性能研究に関する優れた解説論文^{(172)~(180)}や書籍⁽¹⁸¹⁾⁽¹⁸²⁾が存在する。これらも文献に挙げておいたので参考にさせていただきたい。

文 献

- (1) Bates, B. T. (Winter, D. A., ほか 4 名編), *Biomechanics*, IX-B (1985), 128-132, Human Kinetics Pub.
- (2) Cavanagh, P. R., *The running shoe book*, (1980), Anderson World.
- (3) Bates, B. T., ほか 3 名 (Morecki, A., ほか 3 名編), *Biomechanics*, VII-B (1981), 226-233, University Park Press.
- (4) Clarke, T. E., ほか 2 名, *Int. J. Sports Med.*, **4** (1983), 247-251.
- (5) Nigg, B. M., ほか 3 名, *J. Biomech.*, **20**-10 (1987), 951-959.
- (6) Nigg, B. M., ほか 2 名, *Am. J. Sports Med.*, **16**-1 (1988), 70-76.
- (7) Nigg, B. M., ほか 5 名 (Asmussen, E. and Joergensen, K. 編), *Biomechanics*, VI-A (1978), 303-309, University Park Press.
- (8) Nigg, B. M. and Morlock, M., *Med. Sci. Sports Exerc.*, **19**-3 (1987), 294-302.
- (9) Stacoff, A., ほか 2 名 (Winter, D. A., ほか 4 名編) *Biomechanics*, IX-B (1985), 139-143, Human Kinetics Pub.
- (10) Nigg, B. M., *Med. Sci. Sports Exerc.*, **22**-1 (1990), 131-139.
- (11) Nigg, B. M., ほか 3 名 (Matsui, H. and Kobayashi, K. 編), *Biomechanics*, VIII-B (1983), 1041-1052, Human Kinetics Pub.
- (12) Kinoshita, H. and Bates, B. T., *J. Appl. Biomech.*, **12**-2 (1996), 258-268.
- (13) Martin, R. B., ほか 3 名, *J. Biomech.*, **27**-3 (1994), 361-364.
- (14) Swigart, J. F., ほか 2 名, *J. Appl. Biomech.*, **9**-1 (1993), 27-46.
- (15) Torg, J. S., ほか 2 名, *Am. J. Sports Med.*, **24**-1 (1996), 79-82.
- (16) 宇治橋貞幸・ほか 3 名, 機講論, No. 96-20 (1996-10), 111-115.
- (17) Valiant, G., *Proc. Symp. 1st Footwear Biomech.*, (1994),

- 14-15.
- (18) Forner, A., ほか 5 名, *Foot & Ankle Int.*, **16**-12(1995), 778-786.
- (19) Jørgensen, U., *Am. J. Sports Med.*, **18**-2(1990), 177-181.
- (20) Jørgensen, U. and Ekstrand, J., *Int. J. Sports Med.*, **9** (1988), 468-473.
- (21) Kersting, U. G. and Brüggemann, G. P., *Proc. XVth Int. Cong. Biomech.*, (1995), 468-469.
- (22) Nigg, B. M. and Segesser, B., *Med. Sci. Sports Exerc.*, **24**-5(1992), 595-602.
- (23) Wit, B. D., ほか 2 名, *J. Appl. Biomech.*, **11**-4(1995), 395-406.
- (24) Yingling, V. R., ほか 2 名, *J. Appl. Biomech.*, **12**-3(1996), 313-325.
- (25) Ferrandis, R., ほか 4 名, *J. Appl. Biomech.*, **10**-1(1994), 28-42.
- (26) Gheluwe, B. V., ほか 2 名, *J. Appl. Biomech.*, **11**-1(1995), 47-67.
- (27) Stacoff, A., ほか 2 名, *Med. Sci. Sports Exerc.*, **23**-4(1991), 482-490.
- (28) Stacoff, A., ほか 3 名, *Int. J. Sport Biomech.*, **5**-4(1989), 375-389.
- (29) Woensel, W. and Cavanagh, P. R., *Int. J. Sport Biomech.*, **8**-1(1992), 30-47.
- (30) Brown, M., ほか 2 名, *Foot & Ankle Int.*, **17**-3(1996), 152-156.
- (31) Henning, E. M. and Milani, T. L., *J. Appl. Biomech.*, **11**-3(1995), 299-310.
- (32) Devita, P. and Skelly, W. A., *Med. Sci. Sports Exerc.*, **24**-1(1992), 108-115.
- (33) Milgrom, C., ほか 12 名, *Foot & Ankle Int.*, **19**-2(1998), 85-90.
- (34) Robertson, D. G. E., ほか 2 名, *Proc. XVIth Int. Cong. Biomech.*, (1997), 263.
- (35) Dickinson, J. A., ほか 2 名, *J. Biomech.*, **18**-6(1985), 415-422.
- (36) Gheluwe, B. V. and Madsen, C., *J. Appl. Biomech.*, **13**-1(1997), 66-75.
- (37) Ricard, M. D. and Veatch, S., *J. Appl. Biomech.*, **10**-1(1994), 14-27.
- (38) Simpson, K. J. and Bates, B. T., *Int. J. Sport Biomech.*, **6**-3(1990), 309-324.
- (39) Martin, P. E. and Marsh, A. P., *J. Biomech.*, **25**-10(1992), 1237-1239.
- (40) Nigg, B. M., ほか 2 名 (Morecki, A., ほか 3 名編) *Biomechanics*, VII-B(1981), 88-99, University Park Press.
- (41) Williams, K. R. and Ziff, J. L., *Int. J. Sport Biomech.*, **7**-1(1991), 76-90.
- (42) Cavanagh, P. R., ほか 5 名, *J. Biomech.*, **30**-3(1997), 243-250.
- (43) 木下博・ほか 2 名, *デサントスポーツ科学*, **7**(1986), 255-265.
- (44) Nachbauer, W. and Nigg, B. M., *Med. Sci. Sports Exerc.*, **24**-11(1992), 1264-1269.
- (45) Nigg, B. M., ほか 2 名, *J. Biomech.*, **26**-8(1993), 909-916.
- (46) Simpson, K. J., ほか 3 名, *Med. Sci. Sports Exerc.*, **24**-5(1992), 586-594.
- (47) Sneyers, C. J. L., ほか 3 名, *Foot & Ankle Int.*, **16**-10(1995), 624-632.
- (48) Hennig, E. M. and Lafortune, M. A., *Int. J. Sport Biomech.*, **7**-3(1991), 303-309.
- (49) Hennig, E. M., ほか 2 名, *J. Appl. Biomech.*, **9**-4(1993), 306-314.
- (50) Lafortune, M. A., *J. Biomech.*, **24**-10(1991), 877-886.
- (51) Lafortune, M. A. and Hennig, E. W., *Med. Sci. Sports Exerc.*, **23**-3(1991), 360-363.
- (52) Lafortune, M. A., ほか 2 名, *J. Biomech.*, **28**-1(1995), 113-117.
- (53) Shorten, M. R. and Winslow, D. S., *Int. J. Sport Biomech.*, **8**-4(1992), 288-304.
- (54) Wilson, J. F., ほか 2 名, *Trans. ASME, J. Biomech. Eng.*, **119**-1(1997), 115-123.
- (55) Areblad, M., ほか 4 名, *J. Biomech.*, **23**-9(1990), 933-940.
- (56) Soutas-little, R. W., ほか 3 名, *Med. Sci. Sports Exerc.*, **19**-3(1987), 285-293.
- (57) Reinschmidt, C., ほか 2 名, *Med. Sci. Sports Exerc.*, **24**-12(1992), 1390-1395.
- (58) Stacoff, A., ほか 6 名, *Proc. XVIth Int. Cong. Biomech.*, (1997), 423.
- (59) Stacoff, A., ほか 2 名, *Med. Sci. Sports Exerc.*, **24**-6(1992), 695-701.
- (60) Lafortune, M. A., *J. Appl. Biomech.*, **13**-2(1997), 197-204.
- (61) Davis, B. L., ほか 4 名, *J. Biomech.*, **29**-7(1996), 979-983.
- (62) Davis, B. L., ほか 4 名, *J. Appl. Biomech.*, **14**-1(1998), 93-104.
- (63) Bates, B. T. and Stergiou, N., *Proc. XIVth Int. Cong. Biomech.*, I(1993), 158-159.
- (64) McClay, I and Manal, K., *J. Appl. Biomech.*, **13**-1(1997), 109-124.
- (65) Perry, S. D. and Lafortune, M. A., *Proc. XIVth Int. Cong. Biomech.*, II(1993), 1024-1025.
- (66) Simpson, K., *Proc. XIIIth Int. Cong. Biomech.*, (1991), 461-462.
- (67) Komi, P. V., ほか 3 名, *Int. J. Sports Med.*, **8**(1987), 196-202.
- (68) Lake, M. J. and Lafortune, M. A., *Proc. Symp. 3rd Footwear Biomech.*, (1997), 12-13.
- (69) 宮地力・小林一敏(日本バイオメカニクス学会編), *ジャンプ研究*, (1990), 121-124, メディカルプレス.
- (70) 金子靖仙・小川雅央, 第12回日本バイオメカニクス学会大会論集, (1994), 12-16.
- (71) Kaneko, Y. and Ogawa, M., *Proc. XVth Int. Cong. Biomech.*, (1995), 450-451.
- (72) Nigg, B. M. and Anton, M., *Med. Sci. Sports Exerc.*, **27**-1(1995), 92-97.
- (73) Pandy, M. G., ほか 2 名, *Trans. ASME, J. Biomech. Eng.*, **114**-3(1992), 450-460.
- (74) Pandy, M. G. and Zajac, F. E., *J. Biomech.*, **24**-1(1991), 1-10.
- (75) Pandy, M. G., ほか 3 名, *J. Biomech.*, **23**-12(1990), 1185-1198.
- (76) Wood, G. A., ほか 2 名 (Jonson, B. 編), *Biomechanics*, X-B(1987), 869-874, Human Kinetics Pub.
- (77) Wright, I. C., ほか 3 名, *Proc. Symp. 3rd Footwear Biomech.*, (1997), 16-17.
- (78) Bates, B. T., *J. Biomech.*, **22**-8/9(1989), 963-965.
- (79) Bates, B. T., ほか 2 名, *J. Biomech.*, **16**-3(1983), 181-189.
- (80) Munro, C. F., ほか 2 名, *J. Biomech.*, **20**-2(1987), 147-155.
- (81) Vagenas, G. and Hoshizaki, B., *Int. J. Sport Biomech.*, **8**-1(1992), 11-29.
- (82) Yukawa, H., *Proc. XVIth Int. Cong. Biomech.*, (1997), 202.
- (83) 湯川治敏・小林一敏, *スポーツ産業学研究*, **7**-1(1997), 19-28.
- (84) 湯川治敏・小林一敏, *機講論*, No. 97-10-2(1997-7), 127-131.

- (85) 湯川治敏・ほか2名, 機講論, No. 95-45(1995-10), 71-74.
- (86) Hennig, E. M., ほか2名, *Proc. Symp. 2nd Footwear Biomech.*, (1995), 2-3.
- (87) Lafortune, M. A., ほか3名, *Proc. XVth Int. Cong. Biomech.*, (1995), 522-523.
- (88) Lafortune, M. A. and Lake, M. J., *Proc. XIVth Int. Cong. Biomech.*, I(1993), 744-745.
- (89) Lafortune, M. A. and Lake, M. J., *J. Biomech.*, **28**-9(1995), 1111-1114.
- (90) Lafortune, M. A., ほか2名, *Proc. Symp. 1st Footwear Biomech.*, (1994), 28-29.
- (91) Lake, M. J. and Lafortune, M. A., *Proc. XIVth Int. Cong. Biomech.*, I(1993), 746-747.
- (92) Lake, M. J. and Lafortune, M. A., *Proc. XVth Int. Cong. Biomech.*, (1995), 524-525.
- (93) Lawless, D. L. and Lafortune, M. A., *Proc. Symp. 2nd Footwear Biomech.*, (1995), 8-9.
- (94) 小林一敏, 筑波大学体育科学系紀要, **11**(1988), 205-211.
- (95) 小林一敏・湯川治敏, 機講論, No. 930-9, III(1993-3), 385-387.
- (96) 小林一敏・湯川治敏, 機論, **60**-573, C(1994), 1561-1568.
- (97) 小林一敏・湯川治敏, 機論, **60**-573, C(1994), 1569-1574.
- (98) Krabbe, B. and Baumann, W., *Proc. Symp. 1st Footwear Biomech.*, (1994), 26-27.
- (99) D'Agati, M. C. and Ladin, Z., *Proc. XIVth Int. Cong. Biomech.*, I(1993), 302-303.
- (100) 磯部真志・西脇剛史, スポーツ産業学研究, **6**-1(1996), 1-6.
- (101) 松本金矢・水谷真由子, 機講論, No. 97-34(1997-10), 73-77.
- (102) 西脇剛史・奈迫光男, 機講論, No. 97-34(1997-10), 63-67.
- (103) Shorten, M. R., *J. Biomech.*, **26**-S1(1993), 41-51.
- (104) Li, P. and Ladin, Z., *J. Biomech.*, **25**-5(1992), 501-510.
- (105) 村上治・ほか2名, 機講論, No. 97-34(1997-10), 68-72.
- (106) 高本義国・西脇剛史, 機講論, No. 97-34(1997-10), 58-62.
- (107) Chang, W. and Seireg, A. A., *Proc. Symp. 3rd Footwear Biomech.*, (1997), 40-41.
- (108) Suh, J. K. and Spilker, R. L., *Trans. ASME, J. Biomech. Eng.*, **116**-1(1994), 1-9.
- (109) Aerts, P. and De Clercq, D., *J. Sports Sci.*, **11**-5(1993), 449-461.
- (110) Aerts, P., ほか4名, *J. Biomech.*, **28**-11(1995), 1299-1308.
- (111) De Clercq, D., ほか2名, *J. Biomech.*, **27**-10(1994), 1213-1222.
- (112) Cole, G. K., ほか3名, *J. Appl. Biomech.*, **11**-1(1995), 25-46.
- (113) Gilchrist, L. A. and Winter, D. A., *J. Biomech.*, **29**-6(1996), 795-798.
- (114) Glitsch, U., *Proc. XVth Int. Cong. Biomech.*, (1995), 326-327.
- (115) Gross, T. S. and Bunch, R. P., *Am. J. Sports Med.*, **17**-5(1989), 669-674.
- (116) Salathé, Jr, E. P., ほか2名, *J. Biomech.*, **19**-12(1986), 989-1001.
- (117) Salathé, Jr, E. P., ほか2名, *J. Biomech.*, **23**-7(1990), 655-659.
- (118) Scott, S. H. and Winter, D. A., *J. Biomech.*, **24**-8(1991), 743-752.
- (119) Scott, S. H. and Winter, D. A., *J. Biomech.*, **26**-9(1993), 1091-1104.
- (120) Siegel, K. L., ほか2名, *J. Biomech.*, **29**-6(1996), 823-827.
- (121) Meglan, D. and Berme, N., *Proc. XIIIth Int. Cong. Biomech.*, (1991), 428-429.
- (122) Morag, E. and Cavanagh, P. R., *Proc. Symp. 3rd Footwear Biomech.*, (1997), 36-37.
- (123) Morlock, M. and Nigg, B. M., *Clin. Biomech.*, **6**-1(1991), 4-13.
- (124) Buczek, F. L., ほか3名, *J. Biomech.*, **27**-12(1994), 1447-1457.
- (125) Gross, T. S. and Nelson, R. C., *Med. Sci. Sports Exerc.*, **20**-5(1988), 506-514.
- (126) Klein, P., ほか2名, *J. Biomech.*, **29**-1(1996), 21-30.
- (127) Weiss, P. L., ほか2名, *J. Biomech.*, **21**-7(1989), 539-544.
- (128) Yaganandan, N., ほか3名, *Trans. ASME, J. Biomech. Eng.*, **119**-4(1997), 433-437.
- (129) Abdel-Rahman, E. and Hefzy, M. S., *Trans. ASME, J. Biomech. Eng.*, **115**-4, A(1993), 357-365.
- (130) Clément, B., ほか3名, *J. Biomech.*, **22**-8/9(1989), 767-774.
- (131) Engin, A. E. and Tümer, S. T., *Trans. ASME, J. Biomech. Eng.*, **115**-2(1993), 137-143.
- (132) Hoy, M. G., ほか2名, *J. Biomech.*, **23**-2(1990), 157-169.
- (133) Spoor, C. W., ほか4名, *J. Biomech.*, **23**-12(1990), 1247-1259.
- (134) White, S. C., ほか2名, *J. Biomech.*, **22**-8/9(1989), 885-893.
- (135) 王永金・ほか2名, 機講論, No. 95-45(1995-10), 190-194.
- (136) 王永金・ほか2名, 機講論, No. 96-20(1996-10), 225-229.
- (137) Denoth, J. and Nigg, B. M. (Morecki, A., ほか3名編), *Biomechanics*, VII-B(1981), 100-105, University Park Press.
- (138) Farley, C. T. and González, O., *J. Biomech.*, **29**-2(1996), 181-186.
- (139) McMahon, T. A. and Cheng, G. C., *J. Biomech.*, **23**-S1(1990), 65-78.
- (140) McMahon, T. A., ほか2名, *J. Appl. Physiol.*, **62**-6(1987), 2326-2337.
- (141) 土居陽治郎・小林一敏, 筑波大学体育科学系紀要, **13**(1990), 235-243.
- (142) 小林一敏・湯川治敏, 機講論, No. 96-20(1996-10), 14-16.
- (143) 小林一敏・ほか2名, 機講論, No. 96-15, I(1996-9), 267-268.
- (144) 小林一敏・ほか2名, 機講論, No. 97-10-2(1997-7), 60-65.
- (145) 小林一敏・ほか3名, 機講論, No. 97-34(1997-10), 53-57.
- (146) 宮地力・ほか2名, 筑波大学体育科学系紀要, **11**(1988), 253-263.
- (147) Özgüven, H. N. and Berme, N., *J. Biomech.*, **21**-12(1988), 1061-1066.
- (148) 湯川治敏・小林一敏, 機講論, No. 930-69(1993-11), 121-124.
- (149) 湯川治敏・小林一敏, 機論, **61**-587, C(1995), 2862-2868.
- (150) Bobbert, M. F., ほか2名, *J. Biomech.*, **25**-3(1992), 223-234.
- (151) Gerritsen, K. G. M., ほか2名, *J. Biomech.*, **28**-6(1995), 661-668.
- (152) Amirouche, F. M. L., ほか2名, *Trans. ASME, J. Biomech. Eng.*, **116**-4(1994), 413-420.
- (153) 金子靖仙, 精密工学会誌, **63**-4(1997), 460-465.
- (154) 村上治・ほか3名(日本バイオメカニクス学会編), ジャンプ研究, (1990), 115-120, メディカルプレス.
- (155) Takamoto, Y., ほか2名, *Proc. XVth Int. Cong. Biomech.*, (1997), 377.
- (156) 田中聖子・ほか3名, 機講論, No. 940-59, S(1994-11), 100-105.
- (157) 宇治橋貞幸・ほか2名, 機講論, No. 95-3(1995-1), 50-51.
- (158) 宇治橋貞幸・ほか3名, 第15回バイオメカニクス学術講演会予稿集, (1994-10), 225-228.

- (159) Woo, S. H., ほか 2 名, 機講論, No. 97-10-2(1997-7), 46-53.
- (160) Woo, S. H., ほか 3 名, 機講論, No. 96-5, I(1996-8), 489-492.
- (161) Valiant, G., *Proc. Symp. 2nd Footwear Biomech.*, (1995), 32-33.
- (162) Hennig, E. M. and Milani, T. L., *Proc. Symp. 2nd Footwear Biomech.*, (1995), 30-31.
- (163) Henning, E. M., ほか 2 名, *J. Appl. Biomech.*, **12**-2(1996), 143-150.
- (164) Kowalzik, R., ほか 3 名, *Foot & Ankle Int.*, **17**-10(1996), 629-634.
- (165) Lake, M. J. and Lafortune, M. A., *Proc. Symp. 2nd Footwear Biomech.*, (1995), 28-29.
- (166) Luethi, S. M. and Nigg, B. M. (Winter, D. A., ほか 4 名編), *Biomechanics*, IX-B(1985), 149-153, Human Kinetics Pub.
- (167) Milani, T. L., ほか 2 名, *Proc. Symp. 2nd Footwear Biomech.*, (1995), 26-27.
- (168) Valiant, G. and Borchers, R., *Proc. Symp. 3rd Footwear Biomech.*, (1997), 58-59.
- (169) 山崎信寿・富田祐司, バイオメカニズム, **8**(1982), 80-88.
- (170) 山崎信寿, 総合リハ, **11**-11(1983), 889-894.
- (171) 小林一敏・ほか 2 名, 機講論, No. 910-67(1991-10), 109-112.
- (172) Barnes, R. A. and Smith, P. D., *J. Sports Sci.*, **12**-4(1994), 341-353.
- (173) 福岡正信, 機誌, **95**-888(1992), 984-988.
- (174) 福岡正信, *Jp. J. Sports Sci.*, **14**-2(1995), 151-157.
- (175) 福岡正信, *Jp. J. Sports Sci.*, **16**-1(1997), 3-7.
- (176) 小林一敏, *Jp. J. Sports Sci.*, **4**-10(1985), 729-733.
- (177) Nigg, B. M. and Bobbert, M., *J. Biomech.*, **23**-S1(1990), 3-12.
- (178) Nigg, B. M., ほか 2 名, *J. Appl. Biomech.*, **11**-4(1995), 407-432.
- (179) 宇治橋貞幸, メカライフ, No. 12(1988), 2-5.
- (180) 宇治橋貞幸, 設計工学, **31**-5(1996), 153-159.
- (181) Frederick, E. C. (編), *Sport shoes and playing surfaces.*, (1984), Human Kinetics Pub.
- (182) Nigg, B. M. (編), *Biomechanics of running shoes*, (1986), Human Kinetics Pub.