

足底圧分布検出によるスキージャンプ競技力向上のための 指導法の開発

北海道大学	川初清典
(共同研究者) 同	清水孝一
同	下岡聡行
同	佐々木 聡
北海道女子大学	晴山紫恵子
北海道東海大学	上杉尹宏

Detection of Foot Pressure Distribution for the Coaching in Ski - Jumping

by

Kiyonori Kawahatsu

Physical Education Center,

Hokkaido University

Koichi Shimizu, Toshiyuki Shimooka,

Satoru Sasaki

Graduate School of Engineering, Hokkaido University

Shieko Hareyama

Hokkaido Women's University, Women's College

Takahiro Uesugi

The Cultural Institute of Northern Region,

Hokkaido Tohkai University

ABSTRACT

A system to measure a foot pressure distribution was constructed and applied to the field of competitive sport, i. e. ski jumping on normal hill.

The system consists of three parts, i. e., a pressure detection, a transmitter and a receiver for telemetry. A section for the pressure detection was made from pressure sensors, 6 and 2mm in their diameter and thickness respectively and the detector side of them was covered with thin square metal. The sensors were attached on the front and rear parts of the sole of both feet (planta pedis). The signals were led to wireless installation section on the waist of a subject and transmitted by radio wave (260MHz) to the last section composed of receiver and recorder equipments. After the confirmation of those function by the testing with walking and vertical jumping, foot pressure distribution in the real on-snow ski jumping was investigated and analyzed. The pressure signals from four sensors were all well recorded, and the change of its distribution related to a down hill decent and jumping could be evaluated. Unexpected high pressure was noticed after the thrust of taking off from a hill.

要 旨

スキージャンプにおける足底圧分布を計測するために圧センサー（6mm 径，2mm 厚）を利用して検出装置を作製した。そして左右の足底の各踵部および前部に検出装置を装着し，検出信号を腰部分まで導出し，送信装置から記録部まで無線搬送するシステムを構成した。そしてまず，この計測システムにおける静特性および動特性試験を経て歩行と垂直跳動作による足底圧検出試験を実施し，従来報告された結果と比較検討した。続いて一流選手を対象に北海道名寄市に設置されるノーマル級公認ヒルで雪上実ジャンプを実施した時の足底圧分布を計測した。信号の無線搬送能に依存しつつ助走滑走の終盤からフライト移行の直後まで記録が得られた。両足底4点からの各記録はスキー板から伝わる相当度の振動を含みながら滑走条件の変化に伴う圧力変化を示した。本研究ではフライト移行の直後にも相対的に強度の足底圧が記録され注目された。

緒 言

スキージャンプでは競技者はインランと称される助走の直線部および曲線部で加速し，飛躍台では約90km/hの速度に達する。その後選手は，好記録を求めて卵型滑降姿勢から可能な限りすばやく安定な飛躍姿勢へ移行するためのテイクオフ動作を行う。この動作は選手やコーチングスタッフに経験的に最も重視されている局面である。その動作のためにはテイクオフに至るまでの滑降各過程における身体姿勢と重心，そして筋力の発揮状況やその維持，等の安定な平衡がなくては瞬時のテイクオフ動作それ自体に悪影響が及ぶばかりか，それを完遂する集中力も得られないとされる。しかるに，この競技における滑降中の最適バランスの判定・評価並びにその指導はコーチングのキーポイントとして位置づけられる。しかし今日，その指導の最大の難点はこの助走中に生ずるアンバランスが動作観察や動画分析，さらには近年のスキーシャンツェ埋設型フォースプレートによって

も判別されない点にあり、その故にもよって他者がこのバランスの模範を示して指導できず、また同様にその客観的な口述指導もできず、加えて競技者自身も助走滑降の各過程で足底圧分布の移動を感覚的に識別出来ないなどの諸点にある。

本研究は以上の点に着眼し、左右のジャンプ用スキーシューズ内に圧センサーを装着しスキージャンプにおける足底圧分布の変化を無拘束かつ経時的に可能な限り記述する計測システムを開発してバランスの面からその客観的な評価を試みんとするものであり、この点から指導の最適化に資さんとするものである。

1. 研究方法

1. 1 足底圧計測システムの構成

従来、スキージャンプのテイクオフ時の圧計測では、シミュレーション動作としてインラン状態を模擬した静止準備姿勢からテイクオフ動作を起こして床反力を計測することに始まり、近年ではジャンプ・シャンツェにフォースプレートを埋設して圧計測するようになっている。後者の手法は近年のエレクトロニクス技術を駆使した堅固な構成のシステムであるが、フォースプレート上のみで計測値を得ること、左右足の差を検出できないこと、そして積雪下で計測不能になること、など

の不都合を有している。

そこで、本研究では上記のシャンツェ埋設型フォースプレートの不都合を克服し、足底圧の分布の経時変化検出も可能にしてスキージャンプにおけるバランスングを評価できる計測システムを構成することを第1の目的としている。足底圧の検出法およびその信号の記録法では複数の手法を試行し、結果的に本研究が構成したシステムは被検者側で導出された情報を無線搬送する無拘束計測法となった。それらはジャンプ用スキーシューズ内に装着する足底圧検出部、被検者の腰部に装着するアンプおよび送信部、並びに遠隔位置に設定される受信・記録部から構成された(図1)。

1. 2 足底圧検出部

足底圧の検出には6mm径、2mm厚の歪みゲージ式圧力センサー(共和電業KK社製、PS-30KAM260)を用い、上面および下面に3×3cm、0.3mm厚の金属板を装着、周囲をスポンジで覆い検出部を形成した。受圧面には弾性接着剤を、反対の面にはシアノアクリルレート系の接着剤を用いた(図2)。この検出部の足底への設置状況は図3に示すとおりである。

1. 3 バイオテレメトリ

足底圧の検出信号は被検者の腰部まで導出して増幅し無線搬送した。これによって小型記録器を

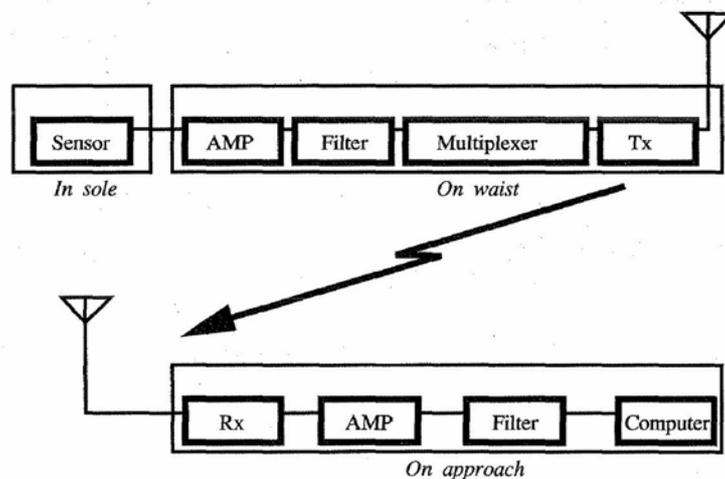


図1 スキージャンプ時の足底圧分布検出および信号の無線搬送と記録のシステム構成

図中Txは発信、Rxは受信の各装置

携帯させるよりもさらに小型軽量化でき、連続記録するうえでも煩雑性を回避できた。この送受信器にはHERUTU社製HRF-260 (24W×4H×12D, 4gWT) およびHRF-260R (52W×15H×32D, 23gWT) を用いた。使用周波数は260MHz帯の1波で、FM変調方式によって搬送した。信号の安定な送受信距離は20mであり、受信部固定状態では送信部の移動速度が約90km/hでも安定であった。計測時に被検者の腰部に装着する器具重量は200gであった。

2. 実験結果

2.1 足底圧検出部の特性

1) 静特性

足底圧検出部の受圧面に対し垂直に負荷を加えた場合の実験システムと計測した出力電圧の結果を図4に示した。この図から計測使用域の荷重と出力電圧との間には直線性 ($r = 0.995$) が確認され検定の結果最大誤差は15%、平均誤差は5%であった。

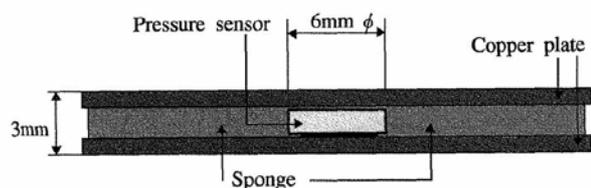


図2 足底圧検出センサー部の断面図

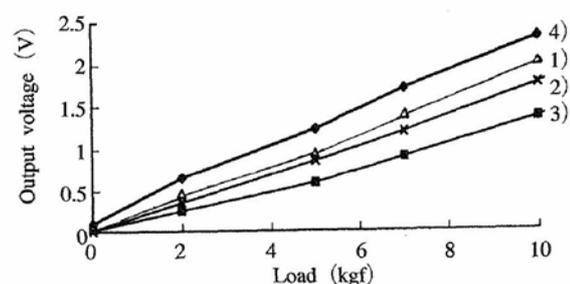


図4 足底圧検出用受圧センサーの静特性実験システムおよび結果

2) 動特性

足底圧検出部の受圧面に一定の荷重を加え支持線を焼き切って抜重し、ステップ応答を求めその動特性を得た。その実験システムと、瞬時的抜重時の出力電圧をサンプリング周波数1MHzで計測した結果を図5に示した。図5の結果から判読される本検出部の時定数は11ms、約14Hzの周波数であった。図5の結果から歩行および垂直跳び等の足圧変化に要する動特性を十分に充足していることが示された。

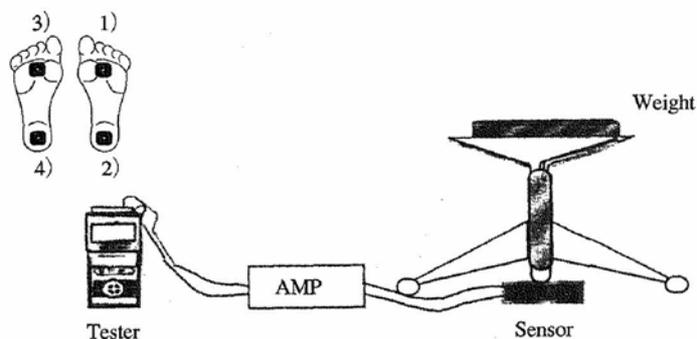
2.2 本システムによる運動時の足底圧分布検出

1) 歩行試験による検討

健康成人男子3名を被検者として市販の通常のスポーツシューズを着用させ、歩行による本足底圧検出部の試験を実施した。足底圧信号は増幅器、フィルタ、AD変換器を介して有線方式でコンピュータ (IBMPC110) に取り込んだ。歩調は1秒当り1歩で実施させた。3名の被検者共同様な足底圧変化を示し、その1例について記録結果を図6に示した。図の圧力変化曲線より、足底踵部か



図3 検出部の足底への設置状況



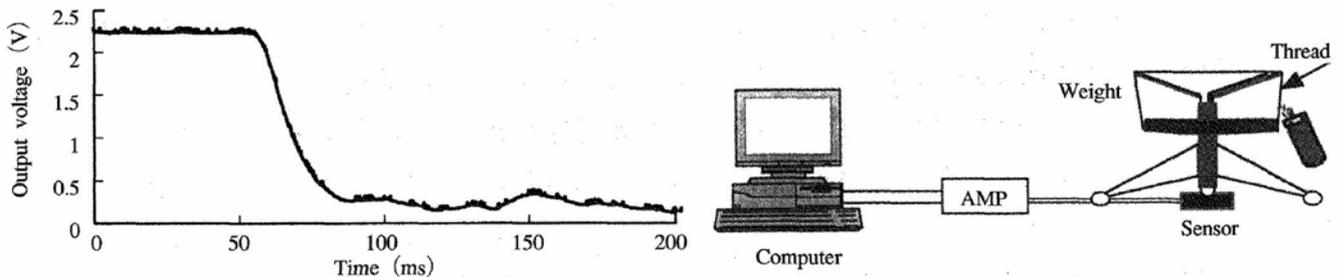


図5 足底圧検出用受圧センサーの動特性実験システムおよび結果

ら尖部への荷重移動が判読され、踵部では着床に、また尖部では離床に相当する時間的位相でピーク値が示されている。さらに各検出部の記録を先行研究結果¹⁾と比較し、着床から離床までの圧の経時変化がよく示されていると判断された。

2) 垂直跳試験による検討

上記歩行試験と同様の被検者に対し同様の方法によって、市販のスポーツシューズ並びにジャン

プ用スキーシューズを着用させて垂直跳を課し、本足底圧検出部の試験を行った。その結果、圧変化記録では踏込み、抜重、キックの動作過程を各被検者とも共通に示した。しかし離床に至る圧変化経過には個人間で差が見られた。離床に伴って圧力値はゼロになり着床と共に急峻な圧の起ち上がりを示した。ジャンプ用スキーシューズを着用して実施した記録を1例、図7に示した。この跳

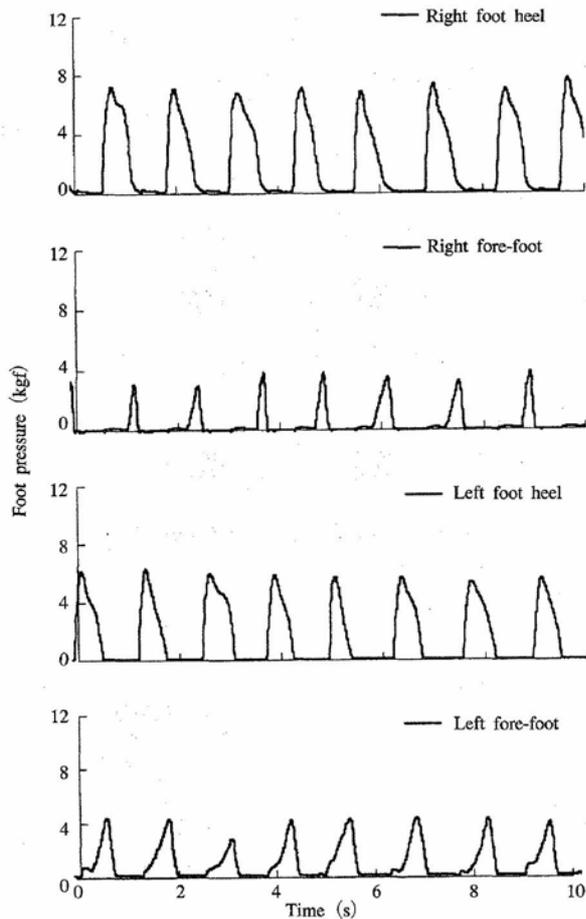


図6 通常歩行における足底圧検出記録例
着用シューズは一般スポーツ用

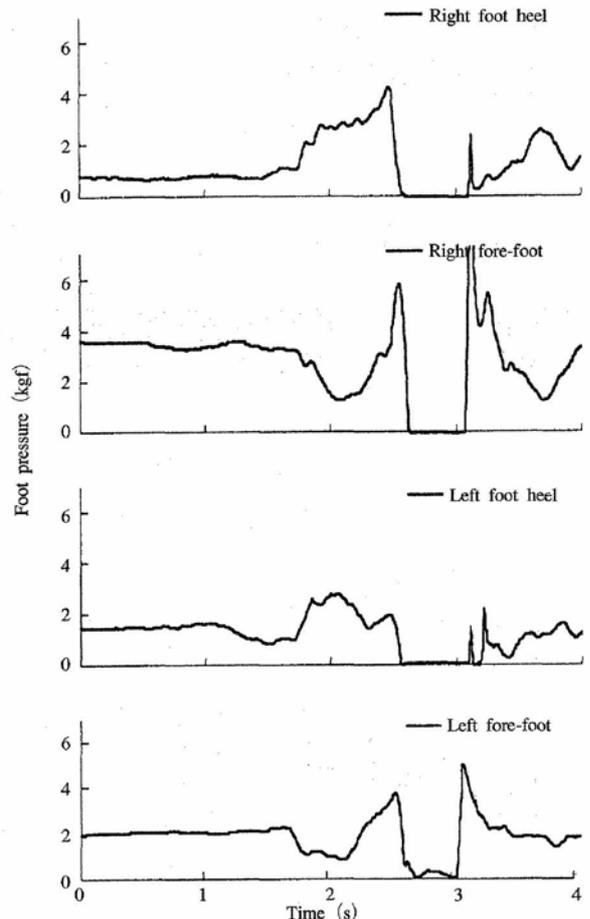


図7 垂直跳における足底圧検出記録
着用シューズはスキージャンプ用

躍試験でも先行研究結果⁶⁾との比較検討をも勘案して本足底圧検出部は動作をよく記述する結果を示したと判断された。

2.3 スキージャンプにおける足底圧計測

本計測システムによって雪上でスキー実ジャンプを行った際の足底圧を検出した。その計測状況は図8および表1のとおりである。生体情報の受信システムは、法定範囲の制約条件下にあって、スキージャンプテイクオフの位相周辺期の受信を重視し、試技毎に受信位置を移動して信号受信の確実性を目指した。以上の計測手順によって得られた記録ではジャンプシャンツェ最前方で受信された記録が良好と判断され、これを図9に示した。



図8 本足底圧計測システムによって雪上スキー実ジャンプ時の計測が実施された北海道名寄市ピヤシリスキージャンプ場ノーマル級ヒル（向かって右）

この図に先立つ前2回の記録ではジャンプテイクオフ以前に受信記録の焦点が当てられており、気象条件に由来する滑走路の不整に起因すると考えられる圧力曲線の振動が多く記録されていた。しかしそれらの記録から、「R-1」と通称される助走の曲走路部分を抜けた直後から両足とも前方荷重への変化が見られ、平均的に2.5～3.0Kgfの値を示し、若干ではあるが優位側の右側に強い荷重を

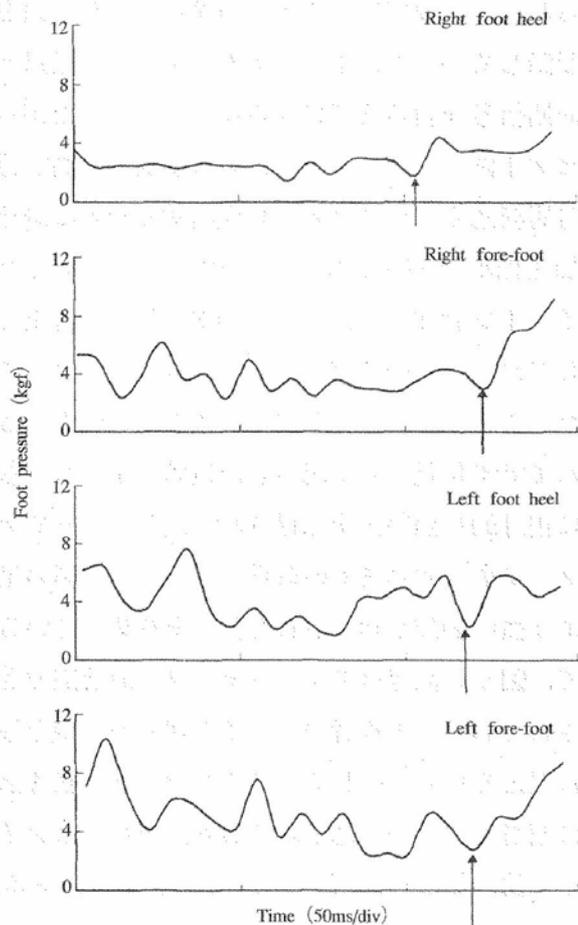


図9 本足底圧計測システムによって計測された雪上スキー実ジャンプ時の記録

矢印はビデオ画像からの推定によるテイクオフ動作のための加圧開始時点

表1 雪上スキー実ジャンプにおける足底圧計測の実施状況

シャンツェ名	北海道名寄市ピヤシリスキージャンプ場
シャンツェ規模	ノーマル級ヒル, K点距離 86.0m
気象条件	曇晴天, 0℃, 中等度の横風
シャンツェ状態	雪表面の不整 (シーズン開始期の雪不足による)
被検者	全日本学生選手権大会における上位入賞選手1名
計測手順	通常の服装による試技を2回実施した後, 本計測機器を装荷して3試技実施
機器装着	スキージャンプスーツ内の腰部, ウェストバッグ利用
計測手順	計測機器着脱以外は通常の練習手順のとおり
計測のサンプリング周波数	460Hz

*スキージャンプシャンツェ助走路の曲走の位相のこと。着地後のアウトランの曲走位相は「R-2」と呼ばれる。

示した。次にこの「R-1」部とシャンツェ最前部との中間位置での受信記録からはテイクオフ動作始動直前の足圧状態が示されており、左右足とも荷重変動は相対的に少なく、加速の位相である「R-1」部とは異なって荷重値も1.8~2.7Kgfの低い範囲にあった。この位相でも先と同様に優位側足の荷重値が大きかった。これらに引き続いて図9に示されるジャンプテイクオフ域の受信記録が得られた。本研究ではこれらの試技のビデオ画像を収録しているが、本システムによる計測記録との同期信号を得るまでに至らなかった。したがってビデオ画像と本システムによる個別の計測記録の時間経過からテイクオフ動作始動のための概その加圧開始時点を推定して図中に矢印で示した。テイクオフ動作時には総じて5.0Kgf程度の荷重を示しており、この位相以前より強目の値になっていた。この記録例に見る限りテイクオフ動作ではこれまで優位足として記述した逆側、すなわち左足に相対的に強い圧が記録された。したがってテイクオフ動作始動までの荷重が少なかった側の足でより強い動作が起こされたことを意味している。さて、図9の記録はスキーシャンツェ最前部で受信されており、被検者のフライト初期の記録を確実に把握している。そしてその位相では両足底各部位に相当度の圧が確認されており、それらはテイクオフ動作始動の位相よりもむしろ高い値である。

3. 論 議

足底圧の検出部の構成では、当初は圧センサをスキーシューズ中敷に片側6箇所埋入してスキージャンプ時のより精緻な荷重曲線の移動の検出を試みた。しかし、このシューズの中敷を取りはずせる構造にしているメーカーは一家のみであり、被検者は別の固有のシューズを用いていて、シューズ内の改造が困難であったこと、シューズ先端部分は狭隘堅固に構成されており、改造困難に加えて計測値の適切な較正法が得られなかった。そ

れらによって本研究では装置を足底部分へ直接装着する方法によった。また同様に足底全面にメッシュ状のセンサを下敷に用いて足底全面から圧変化を記録する方法も検討された。しかし、この手法は競技スポーツへのコーチング応用のうえで被検者が足底圧検出面におけるキーポイントとしての部位を識別する点で困難があった。したがって本研究では足底圧検出点の識別が容易なセンサー装着の方法を採用した。本研究手法はなお開発途上にあり、現時点では片足の計測点が足の前後2点である。被検者自身によれば4~5点までの分別が可能と申告され、これに対する今後の取り組みが必要である。また、検出信号の記録について本研究では法定搬送距離の制約条件内で無線搬送した。本システムはスキージャンプの助走開始からテイクオフ、ランディングを経てアウトランやブレーキングトラック滑走までの全行程で足底圧分布の検出が可能なのでそれらデータを被検者側で一旦ロギングする小型薄型軽量のロガー製作も引き続き取り組むべき重要課題である。また、スキージャンプ動作の記録には今日ビデオ画像が便利であるが、本手法のように遠隔計測法を用いた場合、常にそれら機器間の同期の困難が伴う。スキー場内において本研究のように高速な移動体との同期を得る手法の開発も必要である。

次に本測定システムによって得られたスキージャンプ時の足底圧分布変化について議論する。本システムによるいずれの荷重曲線にも相当度の振動の混入が観察された。選手達によると新雪助走路の滑走では足部に伝わる振動が少ないが、固雪・氷結の助走路および夏ジャンプ用のセラミック・レイルや氷結レイルでは相当度の振動が伝わると内省報告されている。本研究の記録が得られた条件は固雪・氷結の助走路であった。また、各荷重曲線とも「R-1」通過後と考えられるテイクオフ動作始動前の位相で荷重が減少しているのは「R」を抜けて直走部分の滑走を行っていること

を裏付けていよう。この記録では一過性の抜重がテイクオフ動作に前置された可能性も高いと考えられる。そしてテイクオフに移行するが、この位相では競技現場や一部の指導者が主張する所謂「垂直跳」の際のような強いキックは示されなかった。スキージャンプのテイクオフに至る直走路部分は下向き10～11度で形成されており、このトレイルを80～90Km/hの速度で滑降した場合のテイクオフ動作で下肢伸展の力や速度の能力的条件がどの程度であるかに依存してキック力が示されることになる。ジャンプ埋設型フォースプレートの計測では約180Kgという相対的高値が報告されている⁴⁾。しかし、落下条件下のこれら出力に関しては今日なお不明な点も多い。フォースプレートのジャンプで本システムを用いて同時試験を行うことは可能でありその意義は大きい。最後にフライトへの移行時の足底圧について論議する。本研究では動作画像との同期記録の点で弱点を有しているもののテイクオフからフライトへ移行した動作局面の足底圧信号を確実に捉えているものである。この位相の足底圧は各記録とも滑降の位相より高値であった。従来の動作分析の報告ではフライトへ移行した直後の位相は踵部がなおスキー板に接したままである^{2, 5)}。すなわち本研究結果はフライト移行直後はスキー板滑走面全面で急激に空気抵抗を受けていることが足底圧に示されているものとして考えられる。元来、テイクオフ直後の約1秒間の動作変化に関して感覚や意識を認識していないことが選手たちによって共通に訴えられており¹⁾、本研究によって示されたフライト移行直後の足底圧の存在も初めて輪郭化された現象になる。この点を競技者の認識過程に明確にし、足底にかかる圧力を頼りにしてさらに動作を起こし好ましい姿勢保持への制御指導へ導くなどの点が期待されるものである。

4. 結 語

1. スキージャンパーの足底に圧センサーを利用した足底圧検出装置を装着し無線搬送によって信号を記録する測定圧分布計測システムを構成した。圧は左右足の前および後部から検出した。
2. 上記装置の歩行および垂直跳試験を実施した後、選手1名を対象にノーマル級ヒルで雪上実ジャンプ時の足底圧分布を計測した。
3. ジャンプ試技では助走滑走の終盤からフライト移行直後まで記録が得られ、各系統とも相当度の振動を示しながら圧力変化の状態も示した。
4. フライト移行直後にも各系統から相対的に強度な足底の圧力値が記録された。

謝 辞

本研究の遂行に当たっては、財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団より研究助成を賜った。記して深謝する次第である。

附 記

本研究では助成申請時の共同研究者にさらに1名を加えて実行した。

文 献

- 1) 笠谷幸生；冬季五輪物語，毎日新聞1月7日号（1998）
- 2) 川初清典；スキージャンプ，V字飛行における筋電図的研究～世界一流の我国選手のサマージャンプから～，北海道大学体育指導センター年報，5，17-21（1993）
- 3) 牧川方昭，七川観次，川村次郎，堀尾裕幸，長谷川利典；携帯型歩行分析装置の開発と各種歩行における足底圧分布の計測，医用電子と生体工学，24，25-30（1986）
- 4) Virmavirta, M., and Komi, P. V. ; “The takeoff

- forces in ski jumping.” , *Int. J. Sport Biomech.*, 5, 248-257 (1989)
- 5) Virravirta, M., P.Komi ; Electromyographic analysis of muscle activation during ski jumping performance, *Int. J.Sport Biomech.*, 7, 175-182 (1991)
- 6) 渡部和彦 ; Human Powerの研究からジャンプ分析へ, バイオメカニクス研究' 92, 日本バイオメカニクス学会編, 164-169 (1992)