



Title	スキーの研究 Ⅰ. スキーを前えおしすすめる足の力
Author(s)	藤岡, 敏夫; HUZIOKA, Tosio
Citation	低温科学. 物理篇, 12, 37-49
Issue Date	1954-03-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17874
Type	departmental bulletin paper
File Information	12_p37-49.pdf



Tosio HUKUOKA 1954 Studies on Ski (1). The Force with which the Foot of a Skier Pushes the Ski Forwards. *Low Temperature Science, Ser. A, 12.* (With English résumé p. 49)

スキーの研究 (1)

(スキーを前へおしすすめている足の力)*

藤岡敏夫

(低温科学研究所 応用物理学部門)

(昭和29年3月受理)

I

スキーが斜面を滑り下る時、人ののつている時の方が、のつていない時よりも早く滑ることは、あやまつて流したスキーを、スキーをはいている他の人が追つてとらえることが出来る経験から知られている。又滑降競技で目方の軽い人は重い人に比べて不利なことも経験されている。いずれの場合においても、人間の身体がスキーの滑る方向に力 f をくわえていることを意味し、この力は足をへて、スキーにつたえられていると考えるほかはない。この力 f をはかるために、力量計を足とスキーの間にとりつけ、札幌近郊で、主としてかなりしまつたゲレンデの雪について実験をおこなつた。この報告はその第1報である。

II

寫眞 1, 2 は測定装置をスキーにつけたところ及びそのスキーをはいているところである。寫眞 1 では左足のスキーの装置のおおいをとつて内部の構造をしめした。寫眞 2 の右足のスキーにみられるように、装置には簡単にあけられるようなふたがついている。

スキーは市販の普通のもので、材はいたやである。長さは先端から、スキーの裏面にそつて、後端迄の長さが 2.12 m、目方は左右同じで、装置をふくめて 3.5 kg 宛であつた。スキーの幅は一般に中程が最も狭く、前後で廣くなつてはいるが、先の彎曲のつけ根の最も幅の廣い所で 8.6 cm、靴ののる所で 6.8 cm、後端から 3 cm の所で 7.8 cm であつた。ここから後端えかけてせまくなつてゆく。スキーを水平面の上においた時、この面とスキーの裏との間の隙間は、靴をのせる所で最も大きく 2.7 cm であつた。

スキーの裏には、冬の初めに、ラツカーを二度塗りした。実験に際しては、その都度ワックス、パラフィンを手で塗りつけた。

第 1 圖は装置の略圖である。後程説明するように、この装置の特徴は、スキーをおしすすめる足の力 f が、摩擦部分をひとつもたない、いくつかのスプリングの變形だけで傳えられ、

* 北海道大學低温科学研究所業績 第 255 號

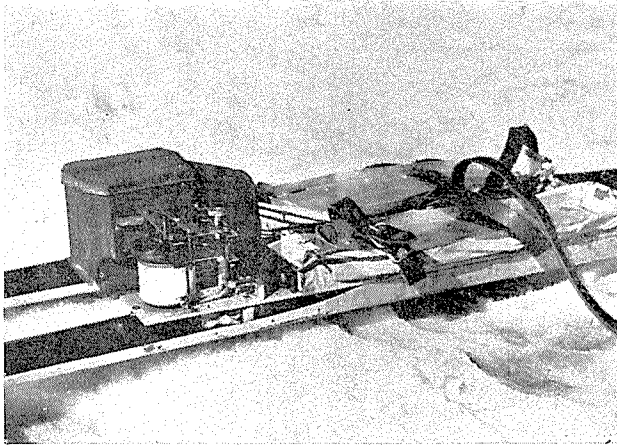
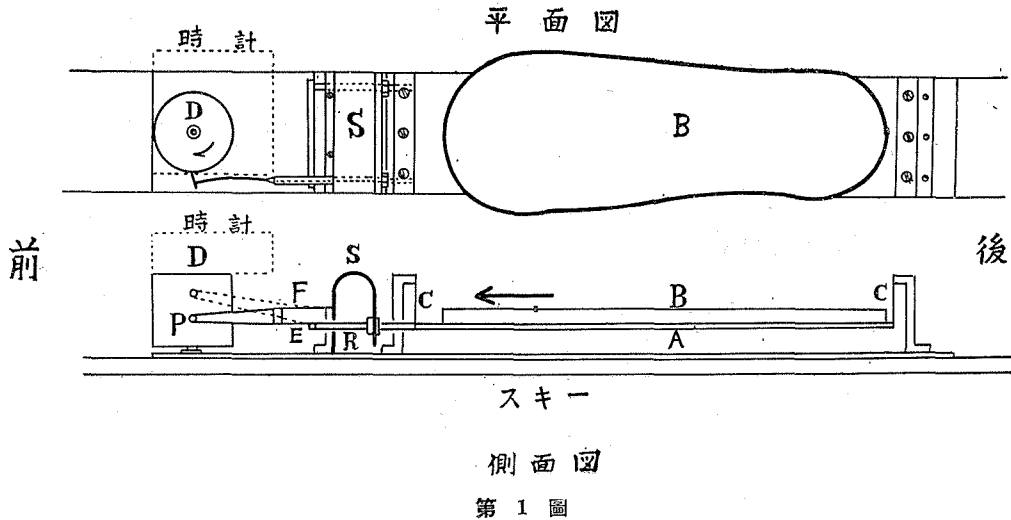


写真 1



写真 2



第 1 圖

記録されるようになってきていることである。迂り面やその他、力をつたえるのに時間的なおくれや遊びをとまらうような機構がないために明解な結果をえることが出来た。

A は厚さ 2mm のジュラルミンの板で、これに靴底の形に加工した厚さ 1mm のアルミニウムの靴受け B がとりつけてある。B の先端のたちあがりに靴の先をあて、写真 2 にある要領で革バンドで靴をしつかり B にとりつける。しかし、写真とちがって、後のバンドをいちど踵の後からまわして足首にかけての方がよいことが後程わかった。こうすると、靴の先が何時でも靴受け B の先端におしつけられているからである。バンドはアルミ板の両脇のたちあがりに穴をあけて通してある。ジュラルミン板の縁とスキーの側面とのあいだには、木綿の布をはつて、A とスキーのあいだに雪の入るのを防いである。

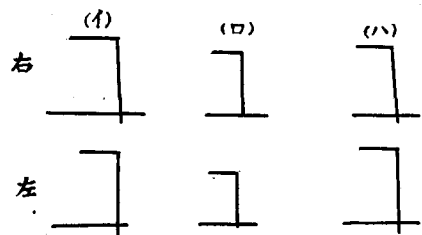
板 A が靴によつて前方えおされる力 f を、ペン P の圆弧状の動きにかえ、ドラム D にま

いた紙に記録するようになっていた。ドラムは時計仕掛でまわす。A は前後を燐青銅の板 (厚さ 1 mm) C, C でつるされ、スキ-の木部にはふれていない。ただし、寫眞ではここに布がはつてあるために隙間はみえない。U 型スプリング S にとりつけられた金屬棒 R はジュラルミン板 A の前端におしつけられている。S は 1 mm の厚さの鋼板で作られていて、スキ-に固定されている。棒 R はこのスプリングの固定された側にあけた穴を通つて先に出、そこに板バネ E がハンダ付けしてある。F もやはり板バネで、E, F とともに厚さ 0.4 mm, 幅 5 cm の時計のゼンマイでつくつた。長さは E が 3 cm, F はそれより少し長い。

2 枚のバネ E, F は A におされた棒 R の前えのうごきを圓弧狀の動きにかえる仕掛である。E, F はともにペン P の根元を約 2 mm の間隔をおいてはさんでおり、F の他の端はスプリング S の止め金にハンダ付けしてある。E が棒 R におされて前えでも、F の右の端は固定されているために、E, F の先は上の方に曲がる。それでペン P の先端は圓弧をえがいて上方にあがる。棒 R の水平方向 1 mm の變位に對してペンの先端は約 1 cm の圓弧をかく。また A にくわえられるスキ-の前方えの力 f と、ペンの動きとの間にはほぼ直線關係がなりたつことをたしかめた。ペンの先には鉛筆の芯をとりつけてある。

ドラム D はゼンマイ仕掛でまわし、ドラムが 1 廻轉すると、自動的にストツパーが働いて廻轉がとまるようにした。スキ-で滑り出す時このストツパーを手で外して始動するのである。ゼンマイ仕掛は目覺し時計を改造してつくつた。目ざまし時計には、始めに強いゼンマイがあつて、それから 5 つの齒車をへて、秒針の軸になり、その先にガンギや天府、ハズミ車のついた調節機構がある。齒車はさきえ行くほど早くまわる組み方である。この最後の調節機構をとりさり、その前の秒針の軸に眞鍮の抵抗板をつけた。板の寸法は幅 1 cm, 長さ 3 cm で長邊の兩端は、まわる方向に曲げておく。なるべく空氣の抵抗をうけさせるためである。調節機構をとりさつたので、ゼンマイは急激に解きほぐれようとするが、一番はやくまわる秒針の軸に抵抗板があるために、すぐ一定の廻轉速度におさえられるようになる。ドラムはゼンマイのある軸につけた。自動的に廻轉をとめるようにするには、抵抗板を自動的にとめる仕掛をすればよい。ドラムの縁にくぼみをつけておいて、爪がこのくぼみにおちこんだ時、これと連動したストツパーの先が抵抗板にひつかかるようにした。ドラムは 15 秒で 1 廻轉する。

靴とスキ-との間ではたらく力 f と、ペン P の動きとの間に時間のおくれがあると、えられた記録を検討する際に色々と不便である。この點をたしかめるために簡単な試験をした。スキ-を固定し、靴をしめる革バンドに紐をつけて一定の力で引いておき、この紐を鉋で切る。力は一定の大きさから急に零になるわけである。この時のペンの動きを自記させれば、ペンの戻り具合から、示度のおくれを知ることが出来る。第 2 圖はこの試験の記録である。(イ) は今述

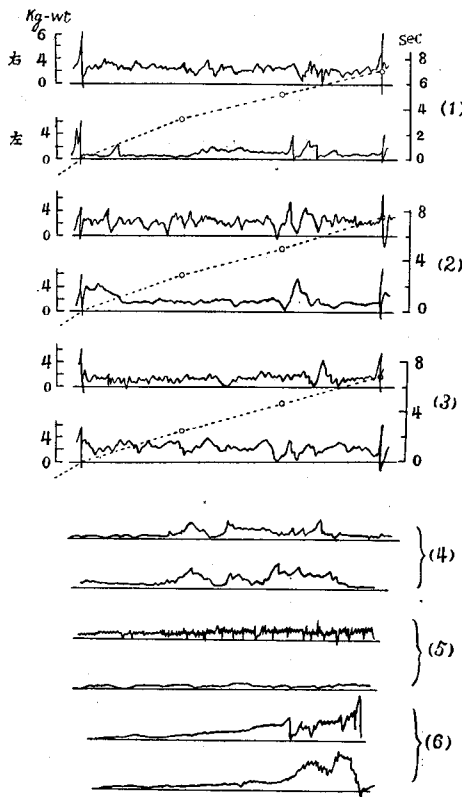


第 2 圖

べた場合、(a) は人がスキーをはき、試験する方のスキーに全体重をかけている場合、(b) は (a) とは反対に、靴をのせる板 A を固定し、スキーに力をかけておこなつた記録である。いずれの場合にもペンの動きには時間的なおくれがない。

III

第3圖はこのスキーをはいて、雪の斜面を實際に滑つた時の f の記録の例である。(1), (2), (3) の實線は、同じスロープを3人の異なつた人達が滑つた例であつて、それぞれの上段が右足の



第 3 圖

力 f_r 、下段が左足の力 f_l の記録である。長さ 80 m の直線コースで、平均の傾斜角は 10 度、雪質は、下に、しまり雪が一度しめつた後に固く凍つた雪があつて、その上に 2 cm の新しいしまり雪 (密度 0.2 gr/cm³) の層が出来ていた。気温は -6 °C 前後、雪温は上層の 2 cm のしまり雪の中程で -4 °C 前後であつた。第3圖 (1), (2), (3) にかかっているのは 80 m の直線コースのうち、はじめの 20 m をのぞいた後の 60 m に對するもので、始めの 20 m はスキーが一定速度になるようにとつた豫備コースである。記録の上に、この 60 m の部分の始點と終點とがあらわれるように、スロープの 20 m と 80 m の所に階段を切つた。階段は深さ 20 cm 程切り下げてから、坂下の方に、水平に約 1 m 削りひろげた段である。スキーがこの段を滑り通る時、足には前の方に向う大きい力が瞬間的にくわわり、記録の上には大きいフレがあらわれる。(1), (2), (3) の両端の山がこれである。左右の装置とも同じにつくつてあるけれども、ゼンマイの巻き具合や抵抗板の僅かのちがひから、ドラムの廻轉速度も少しちがう。それで、左右のスキーにかかる力の記録の同時性を確保するためには、このような始點、終點のマークがぜひとも必要である。第3圖では両端がちようど揃うように、個々の記録を倍率をちがえて擴大してある。ペン P の動きをあらわすスケールを左側の縦軸にかいておいた。

(1), (2), (3) の記録をみると、 f には大体の平均値があつて、その上下に f が細かく變動していることがわかる。ことに右足の f は、いずれのばあいでもはげしく變動している。右足に、はげしい變動の多くあらわれる傾向は 40 回あまりの測定で、いつでもみられた。ストックをつくると、記録に山があらわれるが、測定中はストックを使わなかつた。(1), (2), (3) の左足を順にみて

ゆくと、次第に平均値がふえ、それと共に變動も多くなる。又右足の平均値の方はこの順序にしたがつて小さくなつてゐる。これでも、スキーをはいた人の個人差というものが非常に大きいことがわかる。

IV

以下に f の平均値と變動との關係をしらべてみよう。

變動が雪面の凸凹によるものであるならば、左右同じ程度にあらわれる筈で、事實記録の兩端の山がそのひとつの例である。その他途中でも左右の f に、對應する山があらわれて、斜面の凹凸のえいきようを明らかにしめす場合がある。しかし、大部分の變動には、このような明らかな對應がみとめられない。したがつて、雪面の凹凸を直接の原因とをすることは出来ない。

次にスキー自身の性質によることが考えられるが、右足のスキーが特別に變動をおこしやすいものでないことは、次の實驗でたしかめた。スキーを平行にならべ、丸椅子の足を、靴をのせる板 A においてバンドでしつかりとめる。この丸椅子に人がすわり、身体が左右にかたよらないようにして滑つたのが (4) の記録である。このようにして滑ると右足の記録に特別にはげしい變動があらわれることがない。又力 f の平均値も左右大体ひとしくなつてゐる。これは、さきの 3 つの場合とは別な斜面での實驗ではあるが (4) の實驗と同時に普通にスキーをはいて滑つたら (1) に似た記録がえられた。

第 3 圖の (4) は左右大体均しい結果がえられた例であるが、これとは反對に、片方だけにはげしい變動があらわれているのが (5) の記録である。これは全制動からの左廻轉に際してえられたものである。記録は、廻轉の始めから、まわり終つて止つたところまでである。右足のはげしい變動にもかかわらず、左足の方は極めて平滑な曲線で、平均値も、右足の方が大きい。よく知られてゐるように、全制動で左右の足に均等にかけていた体重を右の方にうつすとスキーは左に廻轉する。

以上のことから、スキーに對する体重のかけ方、正確には、スキーに對する垂直の荷重 W と、 f の變動及び f の平均値との間に密接な關係があることがわかるが、このことは、假設のジャンプ臺のランディングバーンを滑り下りた時の記録からもたしかめられた。ランディングバーンの長さは 32 m で、傾斜角は頂から 10 m の所で 37 度、20 m の所で 34 度であつた。この斜面を滑り下り、向い斜面を上つて臺地に出る。(6) はこの時の記録で、滑り始めから、向い斜面を上り切つたところまでの記録をかかげた。向い斜面の長さは 10 m 程で臺地に出た所でも、スキーにはかなりの速度がある。記録をみると、滑り出しからランディングバーンの下に達するまで f は小さく、谷底から向い斜面にかけて、急激に f がますとともに、はげしい變動が記録されている。この例では、左右の足の記録はほぼ等しい。スキーに對する垂直の荷重 W は簡單ではないけれども、もし兩斜面の断面が圓弧状になつていたとすれば、 W は遠心力に相當して、一番低いところで最大である。模型でしめせば、ブランコに物をのせて、大きい角度で

振つた時、綱にあらわれる張力の大きさに等しく、一番下で最大になる。しかし、(6) の例の場合はこの通りであるとはいえない。斜面の形が少し特殊だからである。滑つた人の膝の感じでは、向い斜面にかかつてからの圧力が一番大きい。澤山の人が滑つた後で雪面をみると、この邊りで一番雪面がえぐられている。記録の f の最大のところはそれよりも少し上つたところであられたのである。しかし、垂直荷重 W の大きいところで f の平均値と變動が大きくなるということにはほとんどどうたがいが無い。

以上の説明によつて、垂直荷重 W が大きい時に f の平均値も、その變動も大きいことがわかる。スキーに対する垂直荷重がますと、スキーの滑りの抵抗がふえて、足がスキーを前におしすすめる力がまし、それとともに f の平均値も、變動もますと考えてよいであろう。

スキーに対する垂直荷重と滑りの抵抗との間の關係を BOWDEN は固い雪についてしらべている。¹⁾ その結果によると、兩者の間には直線的な關係がある。すなわち、荷重が多ければ多い程抵抗も大きいのである。しかし BOWDEN は抵抗力の變動については何ものべていない。

V

このように考えると、(1), (2), (3) のあいだの差異は、人により、その人は意識していなくとも、左右のスキーへの体重のかけかたがちがうためとして説明される。しかし、これで全部が明らかになつたのではない。例えば、(2) の左右をくらべると、平均値が大體等しいのに、變動は右足が多く、(3) では左足の平均値が大きいにもかかわらず右足にもかなりの變動が見られる。ただし (1), (2), (3) の左足だけをみてゆくと、上の説明はなりたつていたのである。したがつて次は右足の特殊性の問題になる。

滑降の途中を横から寫した寫眞によると、みな右足が約一足長前方に出ていた。スキーの重心はスキーの中程に、身体の重心は腹部にあつて、それをつないでいるのが脚である。したがつて、この2つの重心の速度の間にくいちがいが出来て、力のやりとりが生じた時、脚のもつ役割を無視することは出来ない。スキーをする人はこれを脚のスプリング作用とよんで大切な技術としている。スキーに急激な速度の變化がおきた時、身体の重心にその變化がそのまま傳わらないように脚で調節することをさしているのである。身体の重心が一定の速度で滑るとすれば、スキーの速度の變化はすべて脚で調節されるわけで、第3圖の (2), (3) の結果は、その際特に右足がよく働くことをしめしている。(3) の實驗を行つた人は、數日前から左足に神経痛の障害があつたが、そのために左足の調節作用が餘計に悪かつたのかも知れない。

第3圖にあらわれている力の變動は、幅の廣いゆつくりしたものから、幅のせまいはげしくかわるものまでいろいろある。これらの變動のうちで、最も幅のせまいものが實際のスキーで滑る距離に換算してどの位の長さに相當しているかをしらべてみよう。そのためにはスキーの滑る速さを知る必要がある。實驗の際出發點、およびそこから 20 m, 40 m, 60 m, 80 m の所に人がいて、秒時計で時間をはかつた。20 m の階段の脇にいる人は、スキーで滑る人が階段を

通る時、手をふり下して合圖をする。この合圖で 40 m, 60 m, 80 m の所の人は秒時計をスタートさせ、各自の前を通過する時に秒時計を止めた。出發點にいる人は、スキ－の滑り出しから 20 m にいる人の合圖迄の時間をはかつた。秒時計のよみを第 3 圖の (1), (2), (3) に點線で示してある。縦軸には時計のよみ、横軸に距離をとり、出發點から 20 m の點を座標の原點にとつてある。多少加速度のあることがわかるけれども、大体等速度になつてゐる。したがつて、(1), (2), (3) の實線であらわされた力の記録の横軸は、距離をそのままあらわしてゐると考えてよい。兩端の山の間は 60 m であるからこれから變動の最小のものの幅をもとめると、1~2 m に當り、スキ－の長さ 2.12 m と同じ位か、その半分である。ただし、記録は鉛筆の芯で書かせてゐて、かなり太く書いてゐるので、これ以下の幅の變動があつても、それは記録の上ではわからない。又速度は 20 m 毎にはかつてゐるので 20 m 内での速度の變化はわからない。上の計算では 20 m 以内でも一樣な速度を假定してゐるのであるから、1~2 m の幅にも多少の出入りがあるだろうと考へておかなければならない。第 3 圖 (6) の全制動からの廻轉のばあいの變動の最小の幅は數 cm から 10 cm 位に當り、1つの變動の幅をスキ－が滑るのに要する時間は約 0.1 秒になる。

VI

先に力 f の變動は雪面の凹凸のせいばかりではないことをのべた。そして、垂直荷重 W が大きいほど f の變動が大きいことを知つたのである。それで、左右のスキ－にかかる垂直荷重を W_l , W_r とすると、 W_l と W_r とが交互に大きくなつたり、小さくなつたりするために、左右おのおののスキ－に f の變動がでるのではないかと考へられる。それならば、右のスキ－の f_r が大きい時には、左のスキ－の f_l が小さくなるという關係がなければならぬことになる。第 3 圖の (1), (2), (3) の記録をみてもわかるように、このような規則性がみとめられるところもあるけれども、それ程明瞭でないところも多い。殊に (5) の全制動廻轉の例では、 f の變動は片側の記録だけにあらわれているのである。したがつて、体重を左右のスキ－に週期的にうつしているために、 f の變動があらわれるとする考へは、何時でも成立つことではない。

力 f の變動の原因として、他に考へられるのはスキ－による積雪の破壊である。スキ－の先の彎曲部や、スキ－の下を通つて行く積雪が連続的に變形するのではなくて、間歇的に、ある時間スキ－の壓力をうけると破壊しておちこむと考へると、その度毎に記録にも變動があらわれる筈である。

しばらく、簡單のために摩擦がなく、スキ－の抵抗は、スキ－がシユプールをつけるという積雪の變形のためだけによつておこされると考へる。スキ－で斜面を滑り下ると、人とスキ－は位置エネルギーを減少するとともに、それに等しいエネルギーをえる。このエネルギーは、積雪の變形や、空氣の抵抗を排除する仕事として使われるが、空氣の抵抗は、一般に小さいので、今は省略して考へる。第 3 圖 (1), (2), (3) では、スキ－の速さは一定であつたから、運動エ

エネルギーの増加はない。したがって、位置エネルギーの減少分は、そつくり雪の變形に必要なエネルギーに使われたのである。(1), (2), (3) の實驗のあとには、深さ 5 mm のシュプールが残っていたが、これが今のべたエネルギーによる仕事の結果である。

一般に、積雪の變形には、破壊をとまなわないで、じわじわおこる粘性的な變形と、破壊をとまなう變形がある。スキーの場合は、次にのべるように破壊をとまなう變形である。

吉田、笹谷、内海⁵⁾、吉田⁶⁾、小島⁷⁾ の實驗によると、雪の塊に、破壊をおこさないように、静かにおもりをのせた時におこる雪の變形は次の 2 つである。おもりをのせるとすぐに變形する弾性的な變形と、おもりをのせると同時にはじまるが、時間がたつにつれて變形がまして行く粘性的な變形である。弾性的な變形はおもりをとりさると、すぐもとにもどる。粘性的な變形のうちには、おもりをとりさつて、時間がたつともとにもどる變形と、もどらない變形(永久變形)がある。スキーのシュプールが粘性的な變形だとすれば、この永久變形に入ることになる。しまり雪の柱に 12 gr-wt/cm^2 の壓力をかけて縮ませた例では、力をかけてから 1 分後に生じた永久變形は、柱の長さの 1 万分の 1 位で、力をくわえている時間が短かければ縮みも小さくなる。第 3 圖の (1), (2), (3) では、厚さ 2 cm のしまり雪の層が 5 mm 縮んだのであるから、縮みの割合は $\frac{1}{4}$ に達する。又スキーが 1 つの地點を通過する時間は約 0.2 秒、スキーの底(面積は $1.4 \times 10^4 \text{ cm}^2$) のうける靜壓力は、60 kg の目方の人がのつたとして、平均では $60 \text{ kg-wt}/1.4 \times 10^4 \text{ cm}^2 = 4 \text{ gr-wt/cm}^2$ である。したがって、スキーのシュプールは、粘性的な永久變形によるものと考えることは出来ない。

今のべた場合は、積雪に静かに力をくわえた時の變形の例であつたが、もつと急激に力をくわえると、積雪には破壊がおこる。雪の柱のようなものではなく、積雪の表面の一部に力をくわえると、瞬間的には、積雪内部に應力の不均等がおこり、力をくわえた場所で應力はもつとも大きく、この場所を遠ざかるにつれて應力も小さくなつていく。しかし、粘性的な歪は、この應力の不均等を、時間の経過とともに緩和するはたらきをしているのである。ただ、スキーの場合のように 0.2 秒というみじかい時間の間に力がくわえられておこる變形では、この緩和現象が間に合わず、力をくわえた部分の近くに應力が集中するために破壊變形がおこるのである。

積雪に急激な力をくわえる實驗は、おもりを積雪の上からおとしておこなわれている。^{5), 6)} おもりがおちこんで出来る穴の大きさは、おもりのもつ運動エネルギーに比例する。しまり雪についての 1 つの實驗によると、 34.4 kg-wt-cm の運動エネルギーで、体積 $1.8 \times 10^3 \text{ cm}^3$ の穴があいた。すなわち、 1 kg-wt-cm のエネルギーによつて、体積 5.5 cm^3 の穴があくことになる。第 3 圖 (1), (2), (3) の場合には、人とスキーの位置エネルギーの減少分が、そつくり積雪の變形のエネルギーにつかわれるのであるから、エネルギーと穴の体積の關係を利用してシュプールの深さを計算することが出来る。今スキーが現在の位置から、斜面を下つてスキーの長さだけすすんで次の位置に來たとする。第 3 圖 (1), (2), (3) では斜面の傾斜角は 10 度、スキーの長さ

は約 2 m であるから、スキ-の落下した鉛直の高さは $2\text{ m} \times \sin 10^\circ = 34\text{ cm}$ となる。60 kg の目方の人がスキ-にのつていとすれば、このようにしてえられたエネルギーは $60\text{kg-wt} \times 34\text{ cm} = 2.0 \times 10^3\text{kg-wt-cm}$ となる。これは $5.5 \times 2.0 \times 10^3\text{cm}^3 = 1.1 \times 10^4\text{ cm}^3$ の穴をあけるエネルギーであるが、スキ-の底面積は左右合せて $1.4 \times 10^4\text{cm}^2$ であるから、穴の深さは $(1.1 \times 10^4\text{ cm}^3) \div (1.4 \times 10^4\text{cm}^2) = 0.8\text{ cm}$ となり、實測されたシュプールの深さ 5 mm と同程度になる。したがつて、破壊による抵抗は、スキ-の全抵抗とおなじ程度の大きさをもつものであるといえる。すなわち、その他の抵抗、たとえば、摩擦抵抗などおなじ程度の大きさのものである。スキ-のシュプールも、したがつて、雪の塊におとしたおもりによる雪の破壊變形と同じに取扱えばよいことになる。尙体重の餘計かかっている方のスキ-で f の變動が多くあらわれるのは、位置エネルギーの減少分が、その側のスキ-に餘計に與えられるからである。かくして第 3 圖の (1), (2), (3) の記録では、前にのべたようにスキ-が 1~2 m すすむごとにおちこみ、(5) では數 cm~10 cm すすむごとにおちこむとして説明されるわけである。スキ-による積雪の破壊の機構については、吉田が理論的な考えをのべている。⁷⁾

VII

いままで、スキ-にはたらく足の力のうち、前後方向の力 f をしらべてきたわけであるが、この f がそのまま雪がスキ-におよぼす抵抗 r になるわけではない。つぎに測定された f から、スキ-の抵抗 r を量的にしらべてみる。

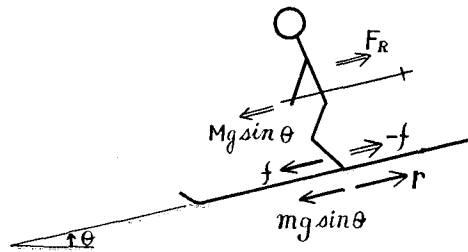
スキ-のつて斜面を直滑降する時、スキ-及び人にはたらく力のうち斜面に沿う方向の力、 $m \frac{d^2x}{dt^2}$ 、 $M \frac{d^2x}{dt^2}$ は次の式であらわされる。

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = mg \sin \theta + f - r \dots\dots\dots (1)$$

$$M \frac{d^2x}{dt^2} = Mg \sin \theta - F_R - f \dots\dots\dots (2)$$

ここで x は直滑降のコースに沿う座標、 m 、 M はスキ-及び人間の質量、 g は重力加速度、 θ は斜面が水平面となす角、 f は足がスキ-を滑る方向におす力、 r はスキ-が雪面からうける滑りの抵抗、 F_R は身体がうける空氣の抵抗力である。

(1), (2) の式にあらわされている力を模型的に第 4 圖にかいておいた。 m の中にはスキ-の金具や測定装置の質量がふくまれ、 M には衣服や靴、ストックの質量がふくまれている。スキ-と身体の重心には mg 、 Mg の力が鉛直下向きにはたらくが、その力を斜面に沿う力と、斜面に垂直な力にわけると、斜面に沿う力が $mg \sin \theta$ 、



第 4 圖

$Mg \sin \theta$ となる。(2) の式の $-f$ は、足がスキーをおす力 f の反作用として、あらわれる力であつて、足にはたらく力である。したがつて、 $Mg \sin \theta$ と $-f$ の着力点はちがう。 F_R は空気を排除してすすむために身体がうける力、すなわち風圧による力であつて、流体力學によつて詳しくしらべられているが、滑る速さがはやければはやいほど力も大きく、風をうける面積(風衝面積)が大きければ大きい程力も大きい。この F_R の着力点も身体の重心に一致するとは限らない。このように、身体にはたらく力は、着力点が散らばつてゐるために、身体には直滑降のコースを含む鉛直面内で廻轉力が生じ、その結果スキーの前部と後部とではスキーが雪を押す力に差がでてくる筈である。このため、スキーに對する雪の抵抗にも變化が生ずることが豫想されるが、次の理由でこの廻轉力の影響は無視することにした。

スキーをする人達、殊に山などで深い雪を滑る人達は、前傾姿勢、後傾姿勢をとることによつて、故意に鉛直面内での廻轉力をつくり、スキーの先を雪に深く入れたり、浅くしたりしてスキーの速度をかえることをしつてゐる。しかし、それには前傾バンドで靴の踵をスキーに固定しておくことが必要で、さもないと、身体の前傾、後傾の効果は少ない。このことは、逆に前傾バンドをつけていなければ、身体によつて生ずる鉛直面内での廻轉力の影響がスキーにつたわらないことをしめしている。實驗のスキーには前傾用のバンドはない上に、實驗中身体の前後の傾きを特に深くすることはなかつた。したがつて、先にのべた着力点の相違によつておこつた鉛直面内での廻轉力は、スキーにつたえられないで、身体の姿勢の調整だけで打消されてゐると考えることにする。又雪面も大部分固められたスロープとか、新雪の場合でも、スキーの先がかくれる程度の深さであつて、前傾姿勢や後傾姿勢の影響が強くあらわれるような深い雪ではなかつた。

(1) 式のスキーにはたらく力は両方のスキーをひとつにまとめて考えた時の力であつて、したがつて、足がスキーを前えおす力 f も、第1圖の記録の左右の足にあらわれた力をくわえ合せたものである。さきにのべたように、左右の足がスキーをおす力が違ふのであるから、スキーは左右別に考えた方がよい。右足がスキーを前えおす力を f_r 、左足の方を f_l と書くことにする。したがつて、(1) は左右のスキーについて

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = mg \sin \theta + f_r - r_r \dots\dots\dots (1.1)$$

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = mg \sin \theta + f_l - r_l \dots\dots\dots (1.2)$$

となる。但し m は今後スキーの片方の質量とする。實驗のスキーでは左右同じで 3.5 kg であつた。

(2) の式ではそのままの f 、すなわち、 $f_r + f_l$ をつかつておく。 $-f_r$ 、 $-f_l$ は同一の身体にはたらく力だからである。 f_r と f_l は一般にはことなる大きさであるから、足のうける反作用の力 $-f_r$ 、 $-f_l$ も大きさがことなる。この結果身体は廻轉力をうけることになるが、このことにつ

いては、吉田が別の報告でのべている。⁷⁾

VIII

(1) 及び (2) の式は直滑降中のコースの方向についての力の関係をあらわす式であつて、各瞬間間になりたつ式である。(1.1) の中で、 f_r は記録から知ることが出来、右邊の第1項は斜面の傾斜角 θ を測定すれば求められる。実際には、傾斜角 θ は細かく變動しているのであろうが、それは無視して、すべて、斜面の途中の 2, 3 箇所で測定した値の平均値に等しい値をもっているものと假定する。

未知なのは $m \frac{d^2x}{dt^2}$ と r_r とである。 $\frac{d^2x}{dt^2}$ は速度の時間的な變化、すなわち加速度である。スキ-の速度にも時間的な變動があると想像されるが、先にのべた第3圖 (1), (2), (3) では、20m 區間毎の速度を測つた結果では、區間によつて大きな差がみとめられなかつた。したがつて、大体等速度になつていたとみて、加速度は 0、すなわち、(1.1) の左邊は 0 とする。(1.2) についても同様であつて、その結果この2つの式は次のようになる。

$$mg \sin \theta + f_r = r_r \dots\dots\dots (1.1)$$

$$mg \sin \theta + f_i = r_i \dots\dots\dots (1.2)$$

したがつて、記録された f_r, f_i に $mg \sin \theta$ をくわえれば、雪がスキ-に及ぼす抵抗力がえられる。 f_r, f_i は 1~10 kg-wt の程度であるが、 $mg \sin \theta$ は、實驗につかつた斜面では $\theta < 20^\circ$ なので、1.2 kg-wt をこえない。したがつて、 f_r, f_i を r_r, r_i そのものとみてもほとんどさしつかえないわけである。

f_r, f_i の平均値を記録からもとめ、(1.1), (1.2) をつかつて計算した r_r, r_i の平均値を第1表にかかげておく。スキ-の裏は、豫めラツカーを塗つてある上に、各種のワックスを上塗りしたものである。ワックスの種類、雪の状態を記事に書いておいた。

IX

前節の (2) の式によつて身体にはたらく力を計算する。左邊の加速度は前同様に 0 とおく。右邊の $Mg \sin \theta$ は、人の体重と、斜面の傾斜角から前と同様にきまる。 f は $f_r + f_i$ であつて、記録を加え合せてえられる。 F_R は空氣によつて生ずる抵抗力で、つぎのような形にあらわすのがもつとも普通であらう。

A を身体の真正面からみた面積 (風衝面積)、 ρ を空氣の密度、 C を 常數として

$$F_R = \frac{\rho}{2} \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 A \cdot C \dots\dots\dots (3)$$

の形に F_R をあらわす。 $\frac{dx}{dt}$ は身体のすすむ速度である。 C は普通抵抗係數とよばれ、レーノルズ數の函數で、又風衝面積 A が同じでも、形のちがひによつておこる抵抗力のちがひは

第 1 表

M kg	θ 度	\bar{f}_r kg-wt	\bar{f}_l kg-wt	$\frac{dx}{dt}$ m/sec	A m ²	C	\bar{r}_r kg-wt	\bar{r}_l kg-wt	μ_R	記	事
59	19	3	10	8.8	0.53	0.23	4.1	11.1	0.22	新 雪	ラツカー, -1°C(氣温)
"	"	7	9	10.0	"	0.09	8.1	10.1	0.27	"	"
"	"	7	10	8.6	"	"	8.1	11.1	0.29	"	"
52.4	"	5	7	8.4	0.62	0.18	6.1	8.1	0.23	"	"
59	"	5	7	10.6	0.53	"	6.1	8.1	0.20	しまり雪	パラフィン(50°) -2°C(氣温)
"	"	2	7	10.6	"	0.26	3.1	8.1	0.25	"	"
"	"	5	6	10.6	"	0.21	6.1	7.1	0.19	"	"
"	"	5	6	10.9	"	0.20	6.1	7.1	0.19	"	"
60	20	4	3	13.5	0.56	"	5.2	4.2	0.12	こおりざらめ	"
"	"	3	2	13.1	0.36	0.38	4.2	3.2	0.08	"	"
"	16	2	3	11.3	0.56	0.25	3.0	4.0	0.08	ぬれざらめ	" +2°C(氣温)
"	"	2	3	11.9	0.36	0.35	3.0	4.0	0.08	"	"
"	14	4.5	1	8.6	0.56	0.33	5.4	1.9	0.09	しまり雪	" -5°C(氣温)
59.7	"	4	3	8.3	0.42	0.39	4.9	4.9	0.11	"	"
57.0	"	4	2	7.9	"	0.45	4.9	2.9	0.10	"	"
52.3	"	3	3	7.7	"	0.42	3.9	3.9	0.11	"	"
52.4	"	5	2	7.8	0.42	0.23	5.9	3.9	0.13	"	"
59.5	10	2	3	8.4	"	0.32	2.6	3.6	0.08	新 雪	パラフィン (45°) -6°C(雪温)
60	"	2	2	9.4	0.53	0.21	2.6	2.6	0.06	"	"
55.5	"	2	1	8.6	0.42	0.33	2.6	1.6	0.05	"	"
"	"	2	1	9.0	0.35	0.36	2.6	1.6	0.05	"	" (65°) -8.5°C(〃)
"	"	3	1	8.6	0.35	0.33	3.6	1.6	0.07	しまり雪	" (〃) -4°C(〃)
59.0	"	3	2	8.8	0.56	0.20	3.6	2.6	0.08	"	"
"	"	3	3	9.0	0.56	0.16	3.6	3.6	0.10	"	"
52.4	"	2	2	8.0	0.62	0.12	2.6	2.6	0.07	"	"
60	19.0	6	3	11.1	0.53	0.30	7.2	4.2	0.15	新 雪	ラツカー
"	"	5	4	10.5	0.53	0.32	6.2	5.2	0.15	"	パラフィン(65°)
52.4	"	7	5	10.5	0.62	0.13	8.2	6.2	0.23	"	" (〃)

$$m = 3.5 \text{ kg}, \quad \rho = 1.29 \text{ kg/m}^3$$

C の中に入れて考えている。速度が変わるとレーノルズ数もかわるので、 C は速度の函数であるが、スキーで滑る時の速度の範囲では、ものの形がきまれば、 C は大体一定である。流体力學では、球や圓板、廻轉隋圓体などと單純な形をしたものを使つて、風洞實驗などで C の値をきめるのである。人間の形が單純なものであれば風洞實驗の簡單なもの値をそのまま使えばよいのであるが、人間の形はそれ程簡單ではない。それで、逆に (2) の式から F_R をもとめ、(3) に入れて C を決定することにした。色々の人に滑つてもらつて、その時に前から寫眞をとれば、風衝面積 A が計算されるから、 A のちがひによる C の値の變化もわかる。また、一人の

人でも立つて滑つたり、屈んで滑つたりすれば A はかわる。実験結果を第1表にかかかけてある。最後の欄に、滑りの動摩擦係数 μ_K , すなわち, $\bar{f}/(M+m)g \cos \theta$ を出しておいた。 μ_K の値はいろいろであるが、記事の雪質及び速度を考えに入れて、普通えられているもの¹⁾とくらべても、値のちらばり方が大きい。 f の測定の精度がまだ悪いことが原因していると思はれる。

抵抗係数 C もかなりちらばっている。 μ_K と同じく、 \bar{f} に原因するちらばりと、風衝面積 A の測定には、かなり任意性があるのが原因であろう。風洞実験による圓錐の抵抗係数は 0.3~0.4 の間にある。

む す び

スキーに自記力量計をとりつけ、足とスキーの間にはたらく前向き力を測定した。この力は左右の足でことなり、体重の餘計かかっている方で大きく、同時に力の變動も大きい。力の變動は、雪の階段状の破壊によるもの、及び身体の調節作用に起因することをのべた。

おわりに、この実験をすることをすすめる、実験に際し色々御援助下さつた北大教育學部体育研究室山崎教授に厚く感謝する。又指導にあつた低温科學研究所の吉田順五教授、実験に参加してくれた低温科學研究所の研究員、その他の方々に厚くお禮の言葉をのべる。

この研究は文部省科學研究費によつておこなつたものである。

文 献

- 1) F. P. Bowden 1953 Friction on snow and ice. Proc. Roy. Soc., A 217, 462.
- 2) 吉田順五・笹谷雅信・内海威彦 1948 積雪の弾性と匍匐. 低温科學, 4, 11.
- 3) 吉田順五 1953 雪の弾性及び雪の破壊抵抗. 低温科學, 10, 1.
- 4) 小島賢治 1954 積雪の粘弾性. 低温科學, 12, 1.
- 5) 吉田順五・黒岩大助 1951 衝撃荷重による積雪沈下の経過. 雪氷, 12, 2 號, 28~33.
- 6) 木下誠一 1953 雪の中に落下する物体に及ぼされる抵抗. 低温科學, 10, 13.
- 7) 吉田順五 1954 スキーの研究 (2). 低温科學, 12, 51.

Résumé

Instrument registering automatically the force with which the foot of a skier pushed forwards the ski was attached to each of the skis and many experiments were carried out on the ski-field. It was observed that not only the force had not the same mean value on each one of the skis but also violent fluctuations were superposed on its mean value. The fluctuations were larger on that one of the skis which showed the larger mean value of the force. The main cause of the larger mean value and of larger fluctuations was found to be the larger weight with which the foot of the skier loaded the ski. Some considerations were made on the mechanism by which the fluctuations of the force were brought about with the conclusion that they were caused not by the frictional force between snow and ski but by the break-down of snow under the pressure exerted by the ski.