



スキー研究の軌跡

3 紙面上に描くスキー滑降図

佐橋稔雄 市野聖治

日本スキー学会誌 第10巻 第1号別刷 2000年7月

3 紙面上に描くスキー滑降図

佐橋稔雄(大同工業大学電気工学科) 市野聖治(愛知教育大学体育教室)

The course of our ski research

3 Diagram of ski sliding drawn on a sheet of paper

Toshio Sahashi (Daido Institute of Technology)

Shoji Ichino (Aichi University of Education)

抄録 雪上を滑降しているスキーの軌跡を紙面上に描く事の意味が説明され,描く方法が述べられている。

キー・ワード:スキー,スキー滑降,回転機構,スキー・ロボット,スキー科学

§ 1.序文 スキー運動の原理

我々がスキー研究を始めたのは 1983(昭和 58)年 7 月であった。当時スキーと名の付くスポーツには,雪スキー,水上スキー,砂スキー,プラスチック上のスキー等があった。これ等に共通する物理的な原理が存在するかどうか,そしてその原理が何であるかが,我々の興味を中心であった。勿論,最大の関心事は雪スキーであった。もし上記の各スキーに共通の原理があれば,その中のどれか一つ,研究のし易いものについて調べれば,雪スキーの原理が分る筈である。

小さなスキーを作り,近くの小川へ行って,水の流れの中で,スキーの運動を調べてみた。小川の流れは一樣ではなく,スキーは複雑な運動をした。とても解析出来る運動ではなかった。そこで雨樋を作り,一樣な水を流す水上実験を色々と空想してみた。傾けた机の上に布を張り,スキーの滑降実験も行った。始めからスキー滑降の原理が分る筈もなかったが,上記の各スキー滑降と机上スキー滑降とでは,原理がかなり違う様な気がした。その事が分ってきたのは最近の事である。即ち,スキーの重みで雪が変形し,その変形した面が水平であるかどうかで運動の仕方が決まる。これがスキー運動の原理であろう。これを昨年1)の日本スキー学会誌に発表した。

早々と机上スキー滑降を切り上げ,スキー滑降の跡が残る様な物を探した。雪は白いから,砂糖や塩が良かろうと考えたが,多分湿度や温度に対して不安定であり,使い物にならないと思った。そして砂スキーが実際に行われているので,砂を採用した。詳しくは日本スキー学会誌2)を参照されたい。以来 18 年間も経過したが,今でも砂スキーの実験を行う事がある。雪山に行く事なく,いつでも実験出来るので重宝である。

§ 2.科学

2.1 科学の歴史

現在,自然科学と呼ばれている学問は,ガリレオ・ニュートン以後の学問を指している。この前後の歴史を振り返りながら,スキー学を考えて見よう。

朝起きると太陽は東から昇り,やがて晩になると太陽は西に沈んでゆく。TV では,毎日,日の出,日の入の時間を発表し,我々もそれに不信を感じる事はない。これは,地球が宇宙の中心にあり,その宇宙は地球の周りを回転していると言う天動説に基づいている。しかし,太陽の様な恒星については,天動説でもいいが,惑星の運動は天動説ではうまく説明できなかった。本当に天は動いているのだろうか。ティコ・ブラーエ(1546年生)は星の観測機器を作り,精密な測定を行った。データから星の位置と時間がどの様に変化しているかを知る事ができた。その弟子のケプラー(1571年生)は星の位置と時間から数学的な法則を見出した。それがケプラーの第1~第3法則であり,大学の物理学の教科書に記述されている。この3つの法則を元にニュートン(1642年生)は質量間に力(万有引力)が存在する事を導きだした。この力が,地球が太陽の周りを回る時の求心力である。即ち,自然科学の出発点は位置と時間の測定であった。

2.2 スキー研究の現状

我々のスキー学にも,この様な学問の発達過程が参考になると思う。今迄に研究されてきた「スキーの回転機構の研究」は次の4つに分類される。どの研究も位置と時間の測定結果が,曖昧か,或いは明示されていない。

(1) スキーに働く力^{3,4)}や,スキーヤーの体に働く力⁵⁻⁷⁾がハイテクを用いて調べられている。しかし,いづれもスキー・スキーヤーがどう言う運動をしている時にそれらの力が働くのかを明示していない。具体的にはハイテクで測定された力が,スキー滑降のどの時間に,どの位置にあるかを実験的に示す必要がある。

(2) スキー・スキーヤーの動きを仮定して,スキー・スキーヤーの運動が計算され,又はコンピューターでその数値が調べられている⁸⁻¹¹⁾。仮定して得られたスキー・スキーヤーの動きと,雪上のスキー・スキーヤーの動きとを比較検討するのが一般的なやり方であるが,検討された例は殆どない。

(3) スキー・ロボットが流行している。人間には,骨や関節が沢山あり,スキー運動の期間中それらは互いに,微妙に動いている。それらの関節の内,数個の関節だけが動くロボットを作り,「スキー・ロボットの運動」が研究されている¹²⁻¹⁶⁾。この数個の関節が選ばれた理由は,作られたロボットとスキーヤーが似ていたからではなく,工作がし易かったからであろう。スキー・ロボットの運動とスキー・スキーヤーの運動のどこが似ているのか,同じなのかを,論理的に定量的に調べられた例は殆どない。

(4) 他に,スキーにかかる荷重を調べた実験¹⁷⁾があるが,スキーの位置と時間は曖昧である。スキーによる氷の切削抵抗が調べられた実験¹⁸⁾もあるが,スキーの位置と時間は検討されていない。上記以外に,直線滑降,又は直線に近い滑降では,スキーの位置と時間が測られているが,その例¹⁹⁻²¹⁾は極めて少ない。

スキー運動を仮定する事は,スキー運動を想像する事である。実験をして,スキー運動を調べる事は,真実のスキー運動を見る事である。測定誤差が大きい時はスキー運動が,ぼんやりと見えた事に相当し,誤差が小さい時は,スキー運動がはっきりと見えた事に相当する。ぼんやりと見えたスキー滑降でも,想像だけのスキー滑降よりはましであろう。

2.3 スキー・スキーヤーの運動と抵抗

スキー・スキーヤーの運動は、スキー・スキーヤーに働く重力と抵抗で決まる。スキーヤーが空中を飛んでいる時の抵抗は、空気摩擦や浮力から出来ている。この抵抗はスキーヤーの運動が停止する程には大きくない。他方、雪上を滑降する時の抵抗は、スキーと雪面との間の摩擦から出来ている。この摩擦はスキー運動が停止する位大きくなる事がある。雪上滑降は、大部分この摩擦で決まる。この摩擦には、スキーで雪面をひっかく運動、即ち横滑り運動が含まれる。スキー運動の解析には、実験室で調べられたスキー板と雪との間の摩擦²²⁾は余り役に立たない。スキーが滑降している時に、雪面上のスキーの位置と時間を知る事が、スキーと雪面の間の摩擦を知る事になる。それがスキー・スキーヤーの雪上運動を調べる基本であり、スキー科学の出発点であろう。

§ 3. スキーの滑降実験

3.1 模型(砂)スキー

1983(昭和58)年に、模型スキーを用いて、実験室内で回転滑降を定性的に調べてみた。当時、スキー滑降の軌跡を定量的に調べる事は難しかった。用いられた砂スキー場は180cm×80cm×5cmの箱から出来ており、箱の中にはサラサラの砂が入れた。スキー場の平面性を保つ為に、箱を卓球台の上に乗せた。このスキー場を滑降するスキーを連続的に写真に撮り、その写真解析から滑降の軌跡を調べた。この実験では、図1にある様に砂面上にcm単位の物差を置き、斜め横上にカメラを置き、写真に撮った。写真の上では、長方形のスキー場は変形し、上下、左右の物差の縮尺は異なっていた。写真フィルムを拡大する時に、印画紙を傾けて、物差の縮尺が同じになる様に修正した。スキーが砂スキー場を約1.5m滑降する間中、スキーの動きを1ミリの精度で測定出来る事が、この写真から分った。これにより、スキー運動の速度 v 、加速度 G_c 、滑降方向 θ 、スキーの長さ方向 δ ²⁾の測定が可能となった。スキー場の斜面とスキーの滑降面の間の角(角付け角 β)の測定については、日本スキー学会誌²⁾を参照されたい。こうして、スキー場の傾斜角 α と β と θ を用いて計算式²³⁾から、水平面とスキーの滑降面の間の角(角付け角 β_0)を求めた。この β_0 の正負でスキーの滑降方向が決まる事を発見した²⁾。スキー運動の物理定数 β_0 が得られた事は、我々の研究がスキー科学と呼び得る証でもあった。

図2(a)は砂(模型)スキーの滑降の例である。この砂スキーの写真は、始め1983(昭和58)年12月に解析された。それを2000(平成12)年に再解析したものが図2である。 μ は摩擦係数であり、 β 、 θ 、 δ 、 ϕ 等は論文²⁴⁾を参照されたい。

3.2 雪スキー

やがて1984(昭和59)年の冬がやって来た。この β_0 を雪の上で調べてみた。我々が滑っ

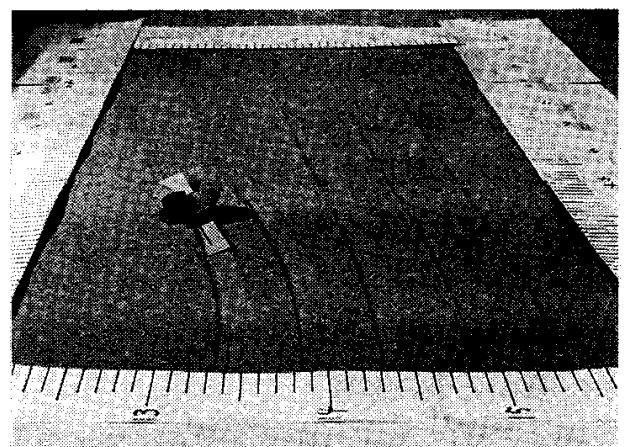


図1. 砂スキー場を滑降する模型スキー。
1983, 12, 10 撮影。

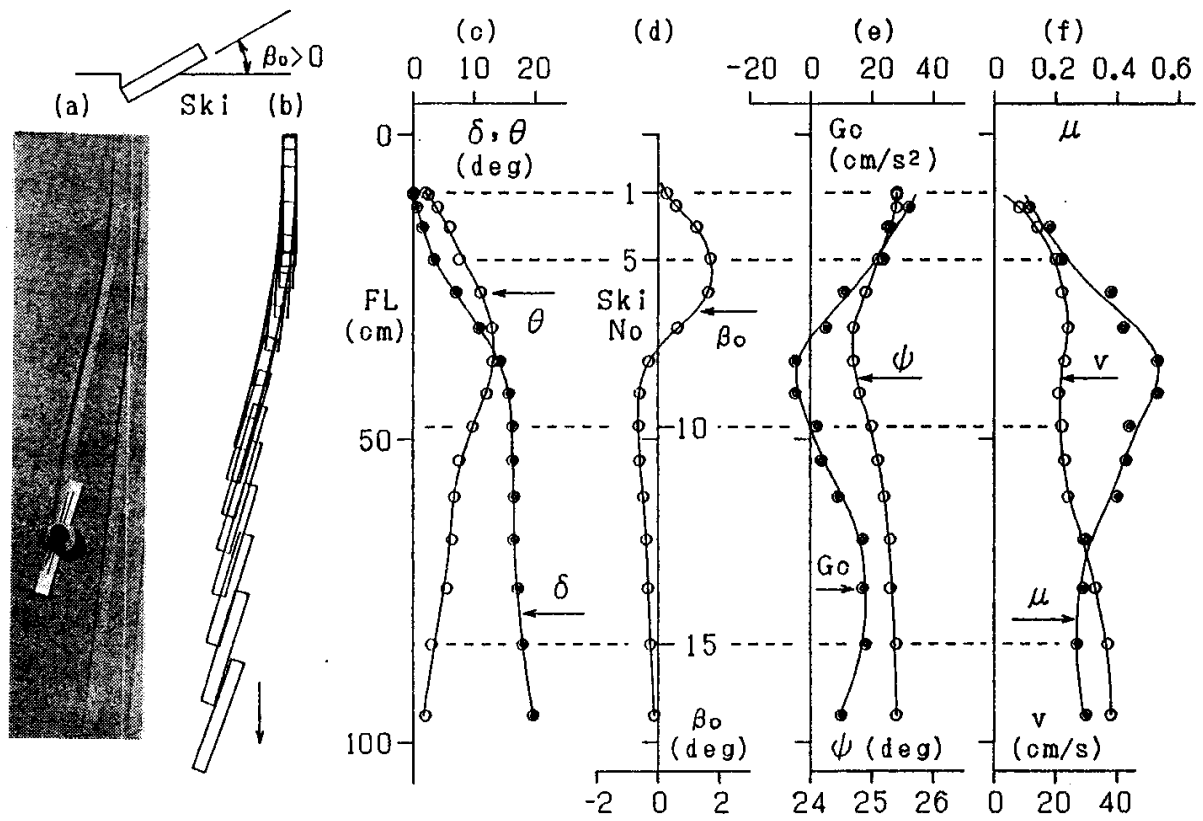


図 2. (a) 模型スキー, (b) 滑降するスキーの軌跡, (c) スキー角 δ と接線角 θ , (d) 水平面に関する角付け角 β_0 , (e) 滑降方向へのスキーの加速度 G_c と滑降方向に関する斜面角 ψ , (f) 滑降方向へのスキーの速度 v と運動摩擦係数 μ .

た直線滑降では、角付け角が全て $\beta_0 = 0^\circ$ を満たしていた。雪面上に残されている多くのスキーヤーの滑降の跡を測定して歩いた。その結果、 $\beta_0 = 0^\circ$ は直線滑降(図 3(a))であり、 $\beta_0 \neq 0^\circ$ は回転滑降(図 3(b))である事が確かめられた。しかし、この結果を論文上で説明するには、紙面上にスキー軌道を表し、その位置と角付け角の大きさを明示する必要があった。直線滑降の場合には長さの測定と証拠写真があれば可能である。しかし、回転滑降の場合には、そう簡単ではない。そこで、証拠写真から回転滑降の軌跡を描き出す方法を色々と考えた。次にそれらを解説する。

§ 4. 紙面上に描くスキーの跡

4.1 雪面とその写真

図 4 の様に、雪面の垂直上方 q にカメラを置いて、雪面の模様を写すと、写真面には雪面の模様按比例した大きさの模様が作りだされ

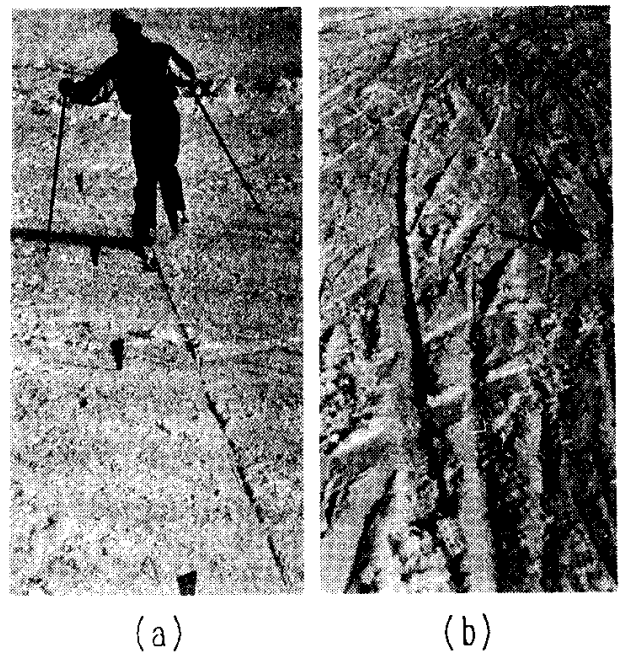


図 3. (a) 直線滑降, スキーヤーは中谷, 朴の木平スキー場. 1992, 1, 27 撮影. (b) 回転滑降, 熊の湯スキー場. 1984, 1, 8.

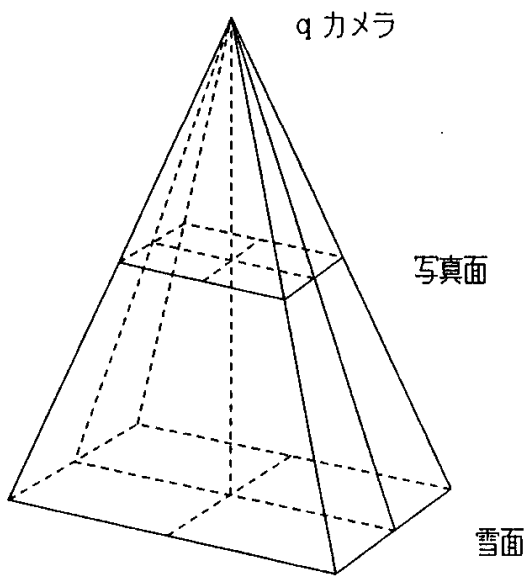


図 4. 雪面の垂直上方からカメラ q で撮影.

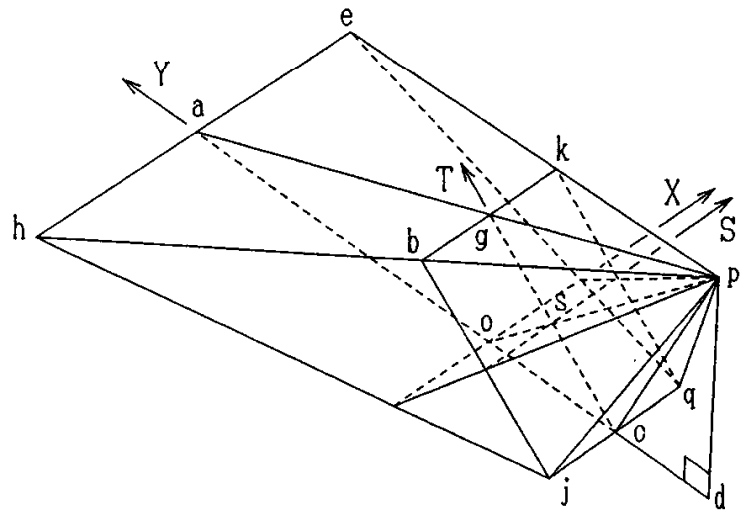


図 5. 雪面の斜め上方からカメラ p で撮影.

る. しかし, と言う実験は, 費用がかかり過ぎて, 我々には困難であった. 従って図 5 の様に, カメラを雪面 $ehjq$ の斜め上 p に置いて, 写真を撮る事になった. p から写すと $kbjq$ の大きさに比例した写真ができるので, $kbjq$ 面を写真面とする. 写真フィルムとカメラの焦点距離の大きさが分れば, 写真の倍率を知る事ができる. 雪面 $ehjq$ の中央 ac 方向にスキーがあり, それが写真 gc 上に写っている場合を例として, 写真から雪面のスキーを再現する方法を述べて見よう.

4.2 写真から雪面の再現

雪面が水平であると仮定し、図5の apd 面を図6に描き直す。カメラと写真の中央を通る直線と雪面との角を中心角 A_0 とする。その交点を o とする。雪面(カメラマンの足元 d)からカメラまでの高さ H は測定可能である。足元 d から o までの長さを L とする。

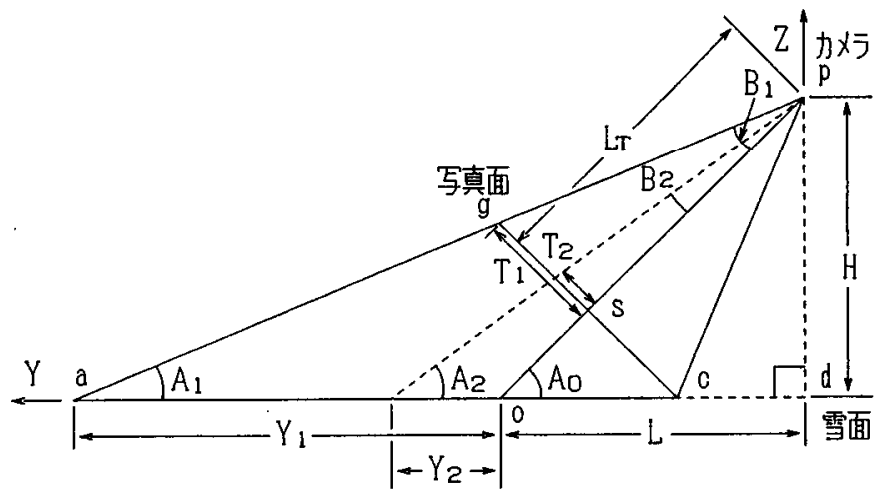


図6.雪面と写真と中心角 A_0 .

o からスキーの前と後迄の距離を Y_1 と Y_2 とすると、その差はスキーの長さ SL であり、 SL は測定可能である。 Y_1 と Y_2 に対応する写真上の位置 T_1 と T_2 が分ると、それらに対応する角度 B_1 と B_2 も分る。 H, SL, B_1, B_2 が分れば、次の数式を用いて、中心角 A_0 が得られる。そして、 L も得られ、3角形 pod が確定する。こうして、中心角 A_0 が分れば、写真上の任意の位置 T から、角度 B を求め、雪面上の位置 Y が得られる。

$$H/L = \tan(A_0) \quad (1)$$

$$H/(L+Y_1) = \tan(A_1) = \tan(A_0 - B_1) \quad (2)$$

$$H/(L+Y_2) = \tan(A_2) = \tan(A_0 - B_2) \quad (3)$$

$$L+Y_1 = H/\tan(A_0 - B_1) \quad (4)$$

$$L+Y_2 = H/\tan(A_0 - B_2) \quad (5)$$

$$Y_1 - Y_2 = SL \quad (6)$$

スキーが、雪面 $ehjq$ の中央 ac 方向にない場合は、少し複雑になる。その場合は論文²⁵⁾を見て頂きたい。この様に、スキーヤーが雪面を滑っている所を写真に撮りさえすれば、その写真から、そのスキーの跡を雪面の垂直上から見ている様に紙面上に描く事が可能となる。

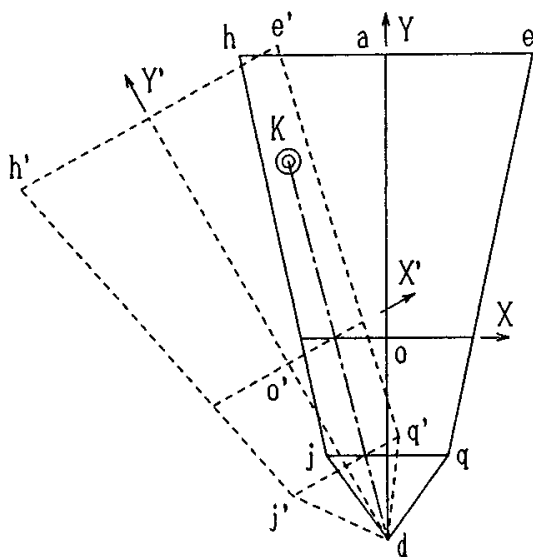


図7.撮影視野が異なる雪面の結合。

§ 5.動くスキーヤーと追うカメラ

5.1 雪面写真の結合

スキーヤーが滑降する方向にカメラを向けて、固定してみると、スキーヤーは左から右へと素早く滑降し、カメラの視野から消えてゆく。ショート・ターンは小さな視野の中でも右回転、左回転と往復するが、ロング・ターンではターンの一部しか視野の中に入らない。その為、大きな視野が必要となる。カメラに大きな視野を入れると、スキーヤーは小さく写り、細かい運動は分らなくなる。そこで、スキーヤーの動きと共に、カメラも動いて行く事が必要となる。この様にして、撮られた写真(図3と8)には、いつもスキーヤーが中央に

写って居る。カメラの動きと共に、カメラの視野(図5の雪面 ehjq)が動いて行く様子を図7に示す。2つの視野 ehjq と e'h'j'q'に共存する物 K があれば、それ等をつなぎ合わせると2つの視野の相対位置が決まる。この様な写真を組合せて、一連のスキー滑降の軌跡が作られた(図9と20)。写真の数は、少ない時で10枚、多い時は30枚位になった。最近では、ビデオ写真を使うので、枚数は100枚位になる事もあった。複数の写真から作られるスキー滑降図の作り方を具体的に述べてみよう。



図8.スキー写真からスキーの座標を読取る方法, 市野, 朴の木平スキー場. 1994,2,4.

(1)スキー写真を図8の様にグラフ用紙に張り付ける。グラフ用紙の目盛から、スキーの端の座標と、他の模様(共存する物 K,例えば、雪上の凹凸の影)の座標を読み取る。スキーの端と模様を含めると、座標の数は、1枚の写真に10個位になった。

(2)スキーの座標から上の式を用いて中心角 A_0 を求める。1枚の写真には、2つのスキーがあるので、2つの A_0 をだし、それ等を平均して A_0 を決める。 A_0 が決まれば、共存する雪面上の模様的位置を求める事ができる。

(3) A_0 や雪面上のスキーの位置を求める為に、昭和59年頃には、5kB位のプログラムを作って計算していた。

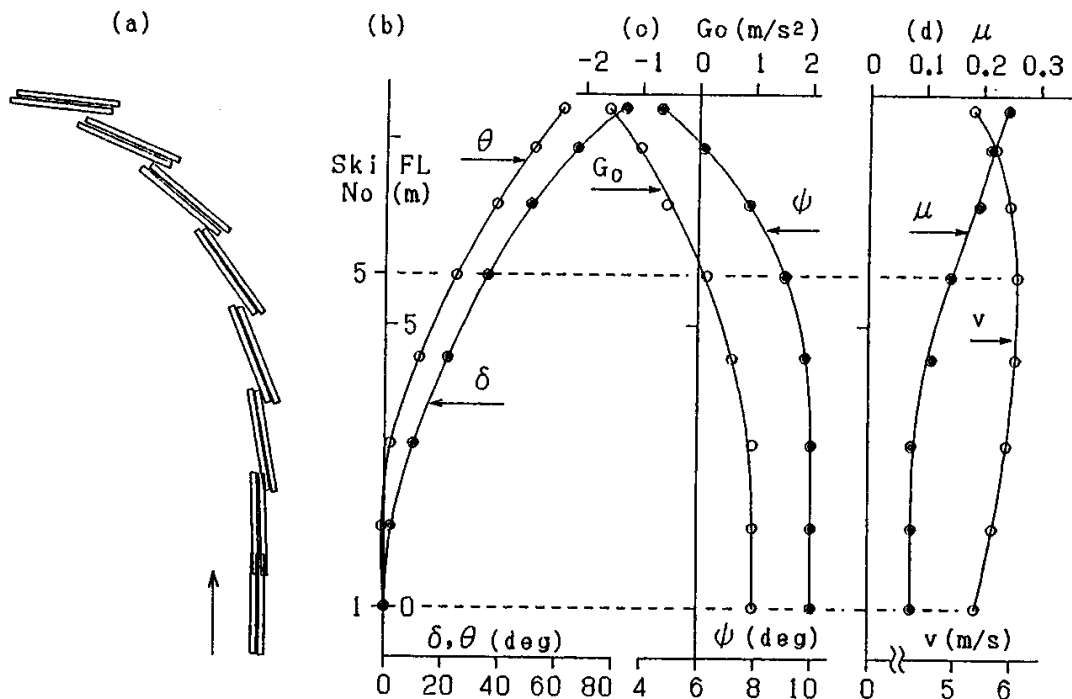


図9.直滑降に始る山回り回転滑降, 各スキー間は1/4秒である。市野, 山田牧場スキー場. 1984,3,28.