

滑降するスキーの自転運動の機構

佐橋稔雄 (愛知スポーツ物理学研究所)

Mechanism of rotation of descending ski

Toshio SAHASHI (Laboratory of Aichi Sports Physics)

抄録 回転には自転を含む回転と、自転を含まない回転がある。スキーの回転滑降は、一般に自転を含む回転滑降である。スキーが自転をする原因について、砂面上の模型スキーを用いて調べられた。その結果、スキーの中心から先端までの間が反っているかどうかで、自転の有る、無しが決まる事が分った。滑降が始ると、スキーには反りが作られ、スキーと砂面との接触面がスキー後部に偏る。これにより摩擦力の作用点が後部に移り、自転が発生する。

滑降するスキーの自転運動の機構

佐橋稔雄 (愛知スポーツ物理学研究所)

Mechanism of rotation of descending ski

Toshio SAHASHI (Laboratory of Aichi Sports Physics)

Abstract There are two types of turn in skiing; one involves rotation and the other does not. Skiers descend by turns that generally involve rotation. The mechanism of such rotation was analyzed using model skis on a sand plane. As a result, it was clarified that the presence or absence of rotation depends on the degree of flexion of skis from their center to the top. When skis start descending, they exhibit flexion and the contact area between the skis and the sand plane moves towards the rear of the skis. Therefore, the point of the friction force shifts towards the rear, causing rotation.

Keywords: ski, model ski, turning descent with rotation, turning descent without rotation

1. 序文

スキー運動(滑降)は雪の上で行われるスポーツである。そのスキーが雪の上でどのような運動をするかを研究する事が、我々の目的である。冬山の雪は、温度あるいは仕様状態により、硬さや平面性は多様に変り、再現性を得る事は極めて難しい。スキー運動の研究に雪を用いる事は困難であった。その為、多くの研究者^{1,2)}は、雪以外のものの上で、模型スキーを用いてスキー運動を調べてきた。我々も、柔らかい砂を用いて、その上で模型スキーの滑降状態を調べてきた³⁾。用いた砂は真夏の太陽で完全に乾いたものであり、砂時計に用いられている砂のようにサラサラしているものであった。これを用いて得られた模型スキーの運動結果とスキーヤー・スキーの運動結果とがどのように対応しているかを知る事は、この種の研究には大切な事である。我々が、雪面のスキーヤー・スキーと砂面の模型スキーで共に得た運動結果は、「水平角付け角 $\beta_0=0^\circ$ の時は直線滑降」であり、「 $\beta_0\neq 0^\circ$ の時は回転滑降」であった^{3,4)}。

このように、共に得られた結果は「スキー運動は、角付け角(スキーの傾き)に依存している」事であった。これは、スキーヤーの重さの為にスキーに接している雪面が変形し、その変形した面に、スキー運動が依存している事を意味している⁵⁾。スキーの傾きは、変形した雪面を測定した結果分った事である。変形した雪面上にスキーがあり、その雪面が傾いておれば、スキーは傾いた方向へ運動する。滑降中に雪面の傾きが変わるのは、角付け角が変わる事である。傾きが変わる原因は、スキーヤーの重心移動や雪面の硬さの変化の為に、雪面の変形の仕方が変わる事であると考えられる。雪面と砂面を作っている物質は共に粉体である。従って、スキーヤー・スキーによる雪面の変形と、模型スキーによる砂面の変形との間に共通したものがある筈である。その為、砂面模型スキーの研究結果は、雪面スキーヤー・スキーの運動解析に還元されると思っている。

この論文は砂面上の模型スキーを用いて、回転滑降しているスキーがどのような条件の時に、「自転をしながら回転滑降をする」か、あるいは「自転をせずに回転滑降をする」かを調べたもの

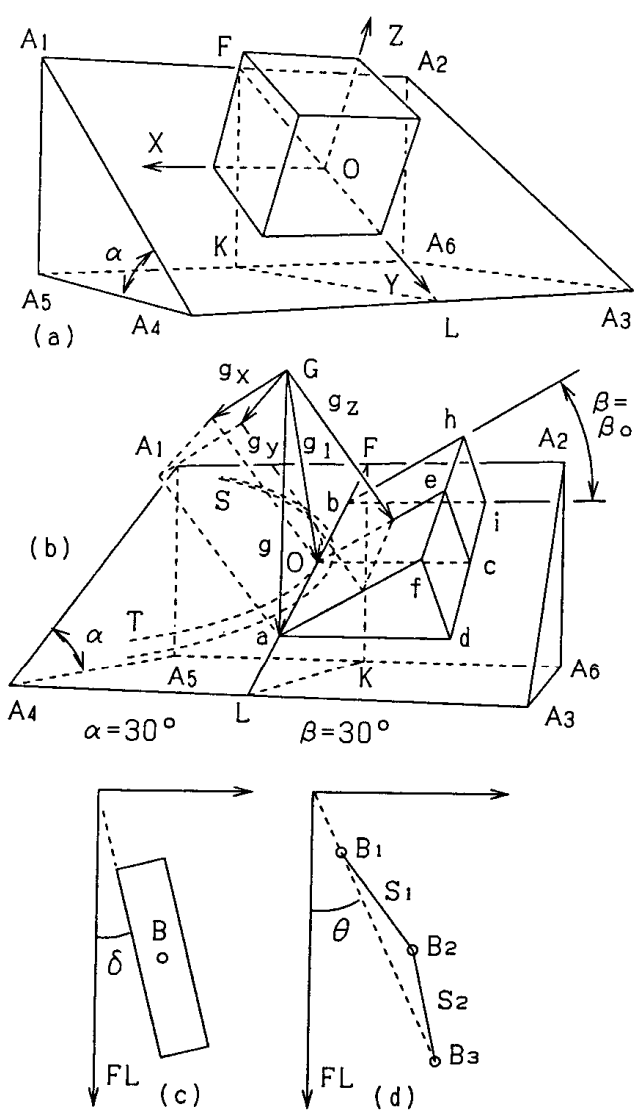


図1 (a) スキー場にX,Y,Z軸を定義する。
 (b) スキー滑降軌道上のスキーの、重力の加速度成分 g_x, g_y, g_z 。(c) スキー角 δ 。
 (d) スキー軌道の接線角 θ 。

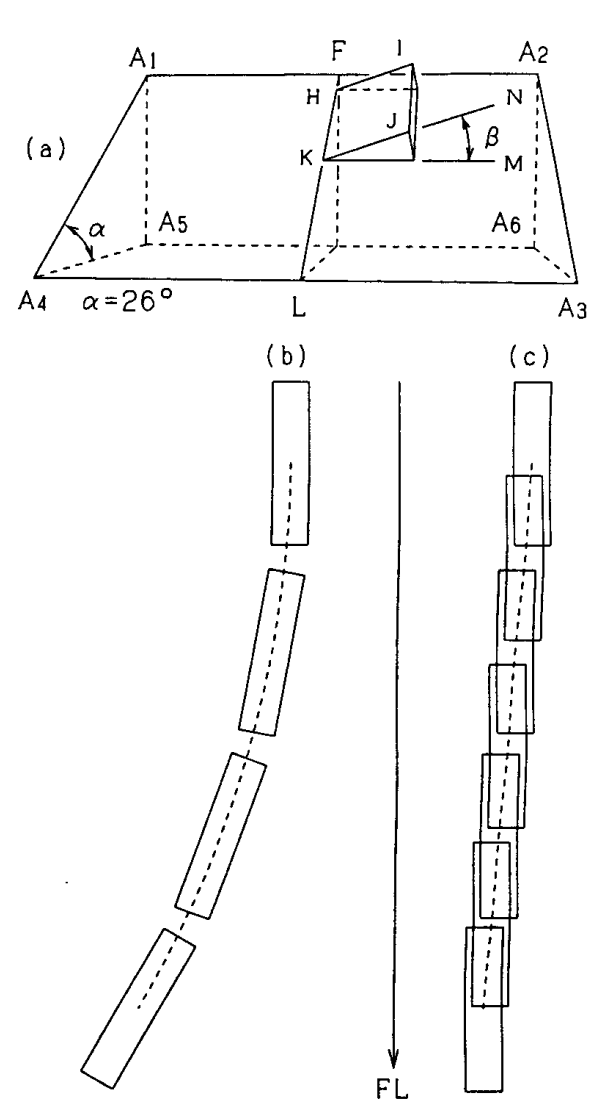


図2 (a) スキー場 $A_1A_2A_3A_4$ と角付け角 β のスキー-HIJK。(b) 自転を伴うスキー滑降軌道。
 (c) 自転を伴わないスキー滑降軌道。

である。その条件は、(1)サイド・カット、(2)砂の厚さ、(3)スキーの反り、(4)スキーと砂面との間の接触面の分布、である。

2. 定義

2.1. 座標

図1(a)は、 $A_1A_2A_3A_4$ を斜面とし、 $A_3A_4A_5A_6$ を水平面とし、傾斜角を α とするスキー場を表している。最大傾斜線FLの方向に沿って立方体を置き、斜面上の座標軸X,Y,Zを定義する。図1(b)のSOTは、スキーヤーが片足で斜面上をカービング・タ

ーン滑降した跡のスキーの軌道を表している。点Oの軌道(滑降面)の一部を拡大してabhfで表す。FLは点Oの滑降(接線)方向となっている。カービング・ターン滑降では、スキーの長さの方向と滑降方向は同じである。

滑降しているスキー上の座標軸x,y,zを次のように定義する。y軸はスキーの長さ方向であり、x軸はスキー(滑降)面上でy軸に垂直であり、z軸はスキー(滑降)面に垂直である。

砂面上にスキーが滑降した跡が残る。これを軌道と表す。スキー解析の後、紙面上に描くスキーを軌跡と表す。

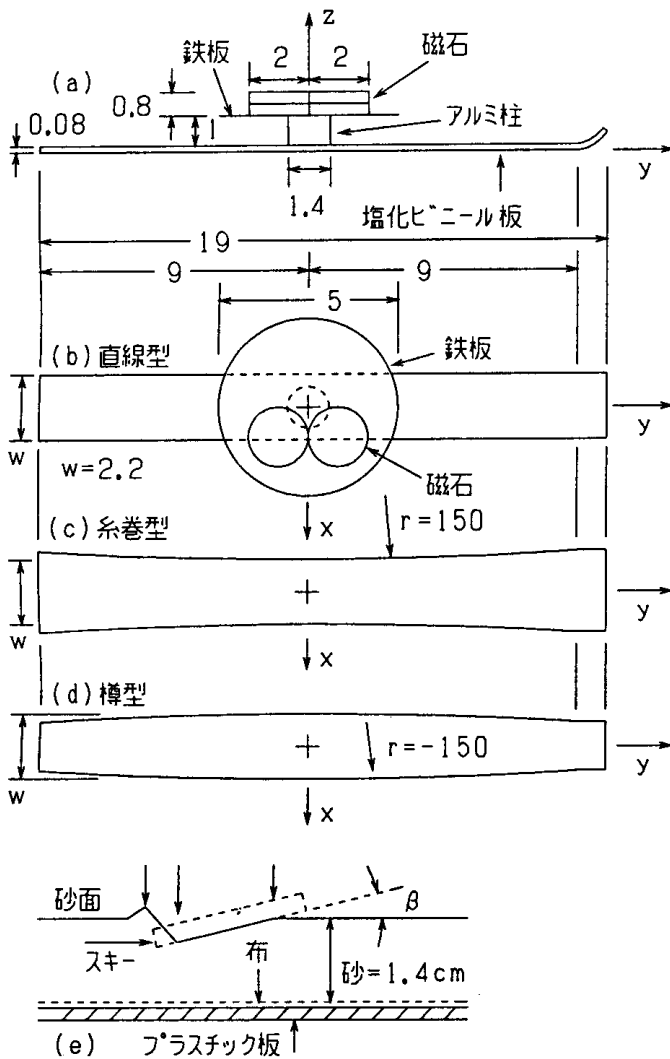


図3 (a) 模型スキーの横図. (b) 直線型スキーの上図. (c) 糸巻型スキー. (d) 樽型スキー. (e) 砂スキー場の断面図.

2.2. スキー方向 δ と滑降軌道の接線方向 θ

図1(c)では、スキーの長さ方向と最大傾斜線FLとの間の角がスキー角 δ である。スキーの滑降に伴ってスキー軌道が出来る。図1(d)では、その軌道上にスキー中心Bの位置、 B_1, B_2, B_3 が記録される。軌道上の位置 B_2 の接線方向 θ は、線 B_1-B_3 の方向とFLの間の角である。以上のように δ と θ を定義する。

2.3. 回転滑降に含まれる自転の有無

図2(a)の $A_1A_2A_3A_4$ はスキー場の斜面である。角付け角 β を持ったスキーHIJKが、斜面上のFLに沿って置いてあり、下に向かって回転滑降を始める。滑降では自転の有無により、次の2つの滑降

を定義する。図2(b)はその1つで、滑降と共に、スキー角 δ が変化しており、自転を含む回転滑降である。この図はカービング・ターンのように描かれている。図2(c)は他の1つで、スキー角が $\delta =$ 一定の滑降をしており、自転を含まない回転滑降である。これは斜滑降の様に描かれているが、回転滑降の一部と考える事ができる。

3. 実験

3.1. スキーのサイド・カット

我々は、特異なサイド・カット(カーブ)を持つスキーとして、平行型、糸巻型、樽型の各模型スキーを選び、砂面上で滑降実験を行ってきた。図3(b)は平行型スキーを上から見た図である。同様に、図3(c)は糸巻型スキー、図3(d)は樽型スキーである。サイド・カットの曲率半径 r は150cmである。スキーの上には、スキーに重りと重心移動の役割を与える為に磁石が乗せてある。図3(a)は横から見た図であり、3つの型に共通している。図面上の数値の単位はcmである。図3(e)はスキー場の断面を表している。

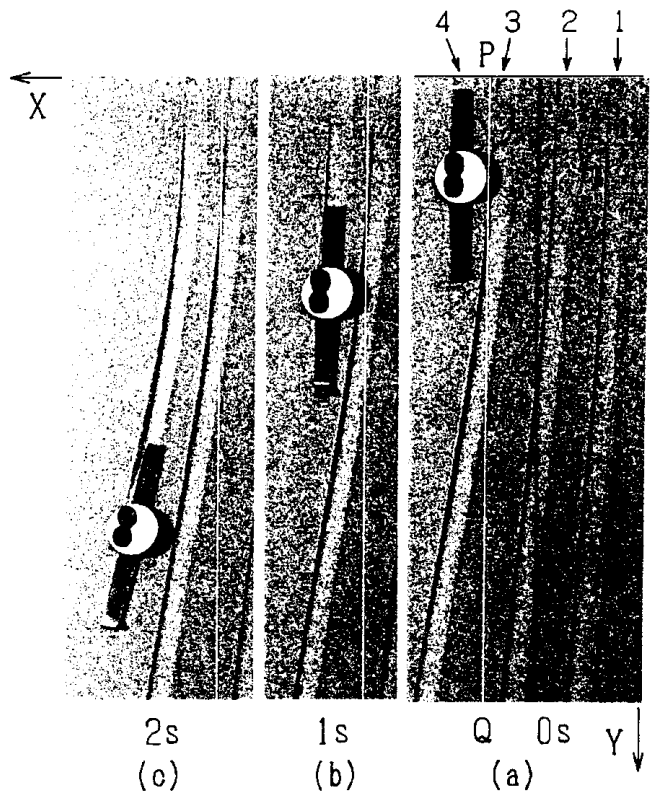


図4 樽型スキーの滑降図. (a) 0秒. (b) 1秒. (c) 2秒.

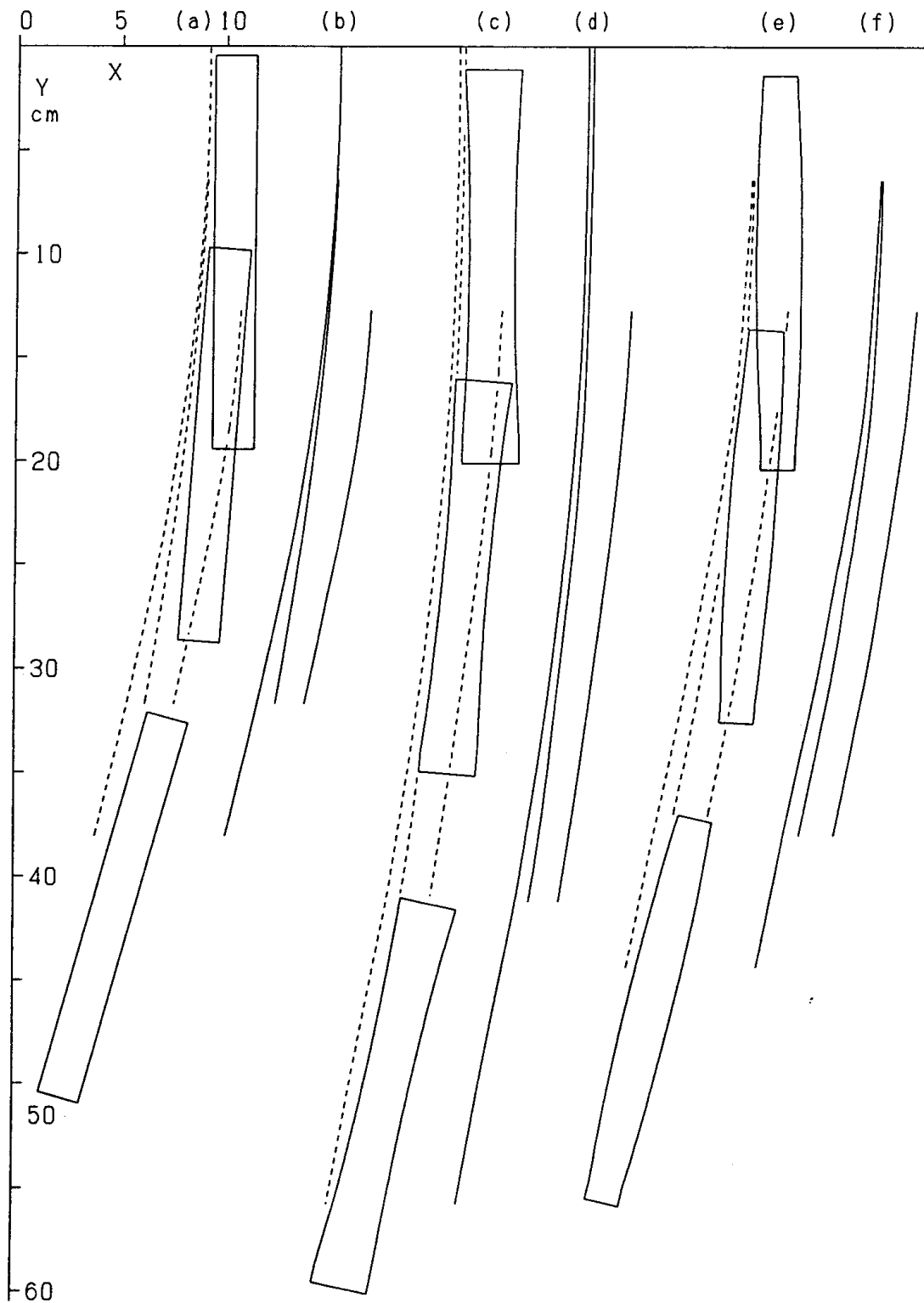


図5 (a) 平行型スキー. (b) 砂面に現われる平行型スキー軌道. (c) 糸巻型スキー.
(d) 糸巻型スキー軌道. (e) 樽型スキー. (f) 樽型スキー軌道.

例として、図4に樽型スキーの滑降写真を示す。白い線PQは最大傾斜線の方に、砂面上2cmに張られた糸である。矢印1~4は、重心の座標 x_0 が、 $x_0 = 0.31\text{cm}, 0.37\text{cm}, 0.43\text{cm}, 0.46\text{cm}$ であることを示している。重心の位置は、中心を通るx方向に変えられ、 x_0 はスキーの中心と重心との間の長さである。スキー軌道やスキーの影から、スキーは傾い

た方向へ回転滑降をしている事が分るのである。

各型のスキーの滑降写真から、軌道とスキーの外形(軌跡)を描いたものが図5である。図5(e)は樽型スキーの軌跡とスキー軌道である。図5(e)は図4(a), (b), (c)から写し取られたものである。図4の1つのスキー軌道には3本の曲線が見られ、それらが図5(e)の3本の点線で表されている。図5

(e)の3本の軌道は、スキーと重なり、その一部は省略されている。そこで図5(f)に再び実線で描かれている。この軌道の3本の曲線は、図3(e)の3本の縦矢印の位置が作った曲線である。

図5(a),(b)は平行型スキーであり、図5(c),(d)は糸巻型スキーである。これらの滑降図から、「サイド・カットの形が、スキーの回転方向を決めるものではない」事は容易に分る。さらに「サイド・カットの形が、『スキー回転に自転が含まれるか否か』を決めるものでない」事も分る。

3.2. スキー場の砂の厚さ

図3(e)のように、スキー滑降は厚さ1.4cmの砂の表面上で行われている。スキーの重さによる砂の変形は、この厚さに依存していた⁶⁾。砂の厚さを s とすると、 $0.2\text{cm} < s < 1.4\text{cm}$ では、 s が小さい程、砂の変形が小さく、角付け角が小さかった。そして、スキー軌道の曲率半径が大きかった。即ち、 s が小さい程、スキーは回転しにくかった。 $0.2\text{cm} < s < 1.4\text{cm}$ の範囲で、回転方向は3種の型共、同じ方向であり、自転の仕方も同じであった。しかし、回転滑降の仕方は少しずつ違っていた。

$s < 0.2\text{cm}$ では、滑らかに回転滑降をしないものが現われてきた。スキー場には、プラスチックの箱の底面に木綿の布が張られ、その上に砂が入れている。それは箱を傾けて砂の斜面を作った時、砂が下へ流れ落ちないようにする為である。

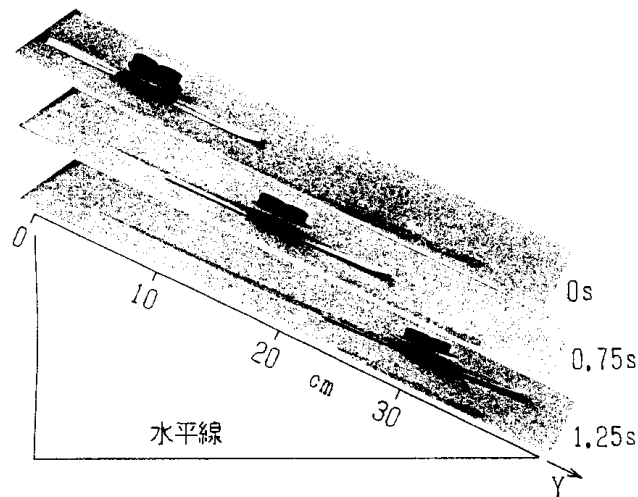


図6 平行型スキーの滑降の横図。

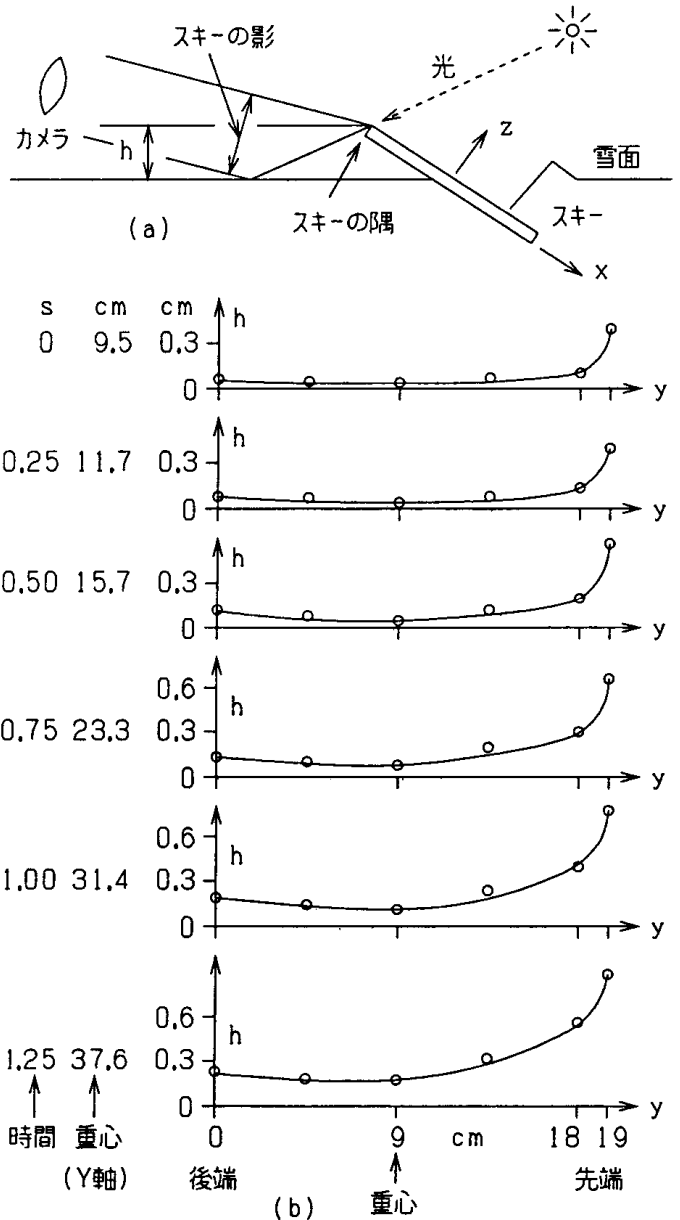


図7 (a)スキーの影から測るスキーの傾き。
(b)スキーの傾きの大きさ。

$s = 0\text{cm}$ では、3種の各スキーは、砂の無い布の上を滑降しているようであり、いわゆる雪スキーのような滑降は出来なかった。 $s = 0\text{cm}$ の時は、重心の位置を変えてみても、スキーの下の布や砂の厚さ変わる様子はなかった。 $s = 0\text{cm}$ の時の滑降は、雪スキーのアイス・バーン上の滑降に相当するのであろう。さらに、直接、プラスチックの板やガラスの板の上では、雪上滑降のような運動は不可能であった。

このように、実験の範囲内では、砂の厚さが大きい程、滑降によって出来る砂の変形が大きく、砂スキーはよく回転した。その回転は、雪スキーと同

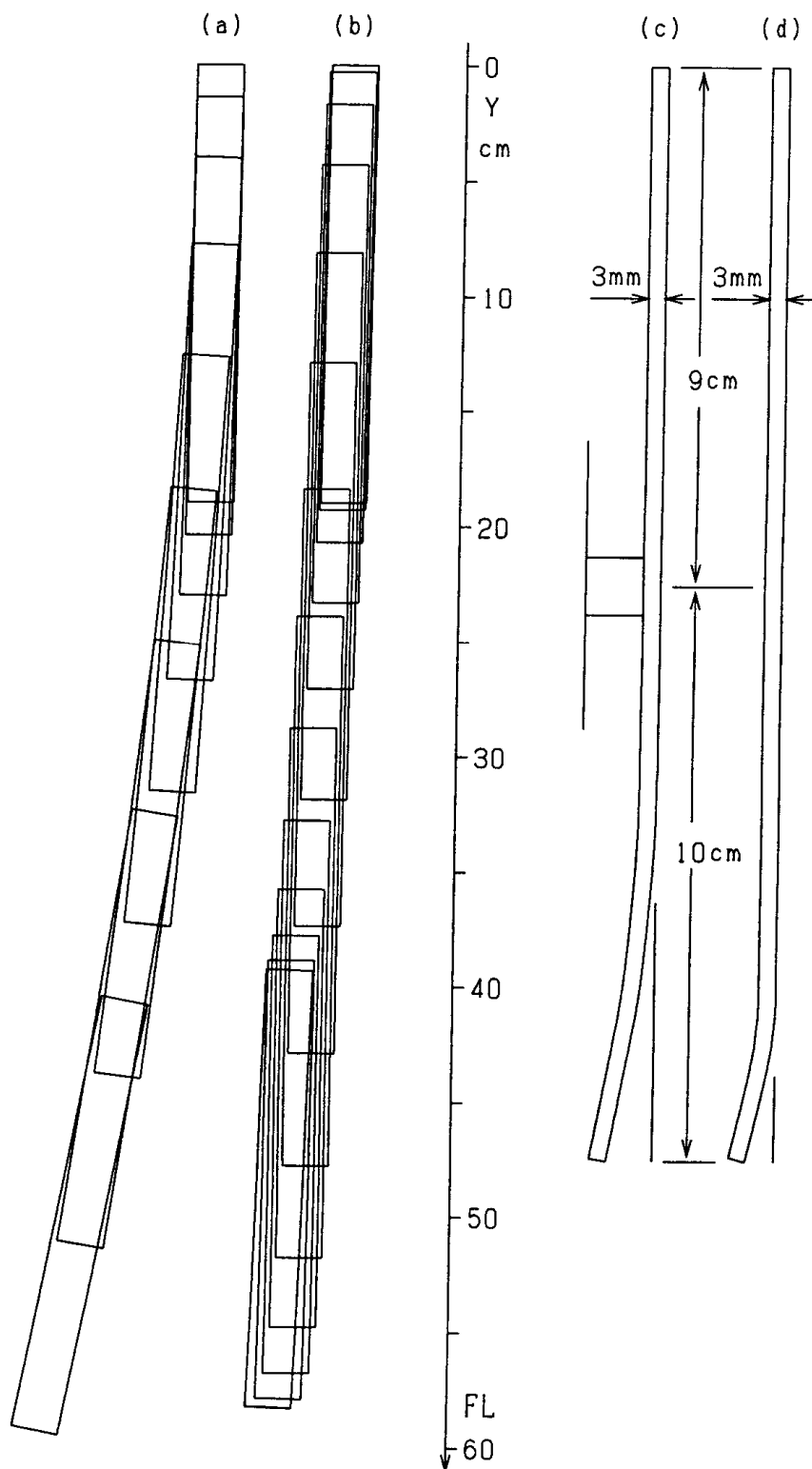


図9 (a)反りの有るスキーの滑降図. (b)反りの無いスキーの滑降図.
 (c)反りの有るスキーの横図. (d)反りの無いスキーの横図.

じような滑降であり,自転を含む回転滑降であった. しかし砂の厚さが極端に小さい時は,砂スキーは雪スキーと同じような回転滑降をしなかった. 模型スキーの運動が,スキーの重さによる砂の変形に依存した運動である事も確認された.

3.3. スキーの反り

3.3.1. 厚さ0.8mmのスキー

スキーの反りとは,図3(a)のスキーで,アルミの柱の中心から先端までの9cmの間の部分が,滑降と共に上に反って行く事を意味している. この部分をスキーの前方部分と呼ぶ. この反りは図6のように,図3(b)のスキーを用いたスキー滑降を,横から撮影した写真により明らかになった.

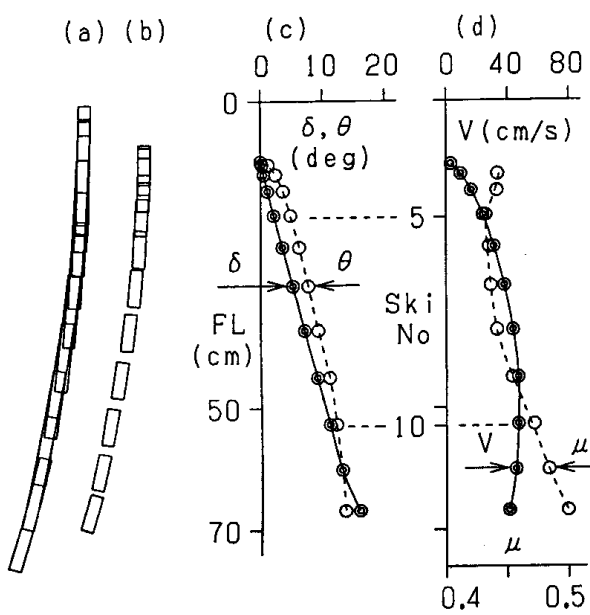


図8 (a)0.8mm厚の平行型スキーの滑降図。
 (b)短スキー。(c)スキー角 δ と接線角 θ 。
 (d)接線方向の速度 V と運動摩擦係数 μ 。

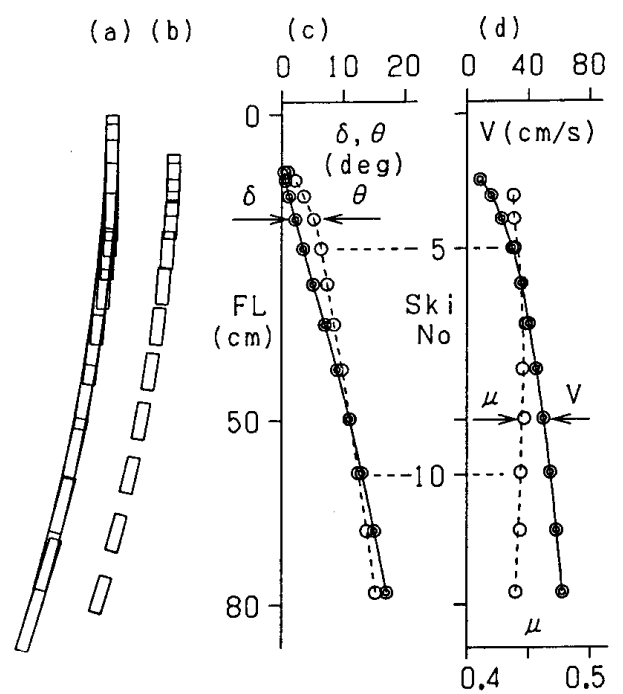


図10 (a)3mm厚の反り有り平行型スキーの滑降図。(b)~(d)は図8と同じ。

その定量的な値は図7に示されている。滑降の始め(0s)では、前方部分はほぼ反りがなく、平らである。しかし、滑降が進むにつれ、角付けは大きくなり、前方部分は上に大きく反っていった。これはスキーが柔らかい為に、滑降と共に上に反っていったのであろう。

図6のスキーは図3(b)の平行型スキーであり、重心の位置 x_0 は、スキー中心から測って、x方向に $x_0=0.5\text{cm}$ にあった。このスキーの滑降過程を解析したものが図8である。図8(a)のスキーは重なり合って見難いので、スキー長を1/3にして図8(b)に描き直した。図8(c)はスキー角 δ ◎と接線角 θ ○である。 $|\delta - \theta| < 3^\circ$ であり、ほぼカービング・ターン⁸⁾である。図8(d)は滑降方向の速度 V ◎と運動摩擦係数 μ ○である。この様に、このスキーは直滑降から始り、自転を伴った山回りの回転滑降をしていた。

3.3.2. 厚さ3mmの反り有りスキー

次にスキーが滑降をしても、スキーが上に反り難い分厚いスキー⁹⁾について調べて見た。図9(c)、(d)は厚さ3mmのスキーの横図である。上図は図3(b)と同じである。

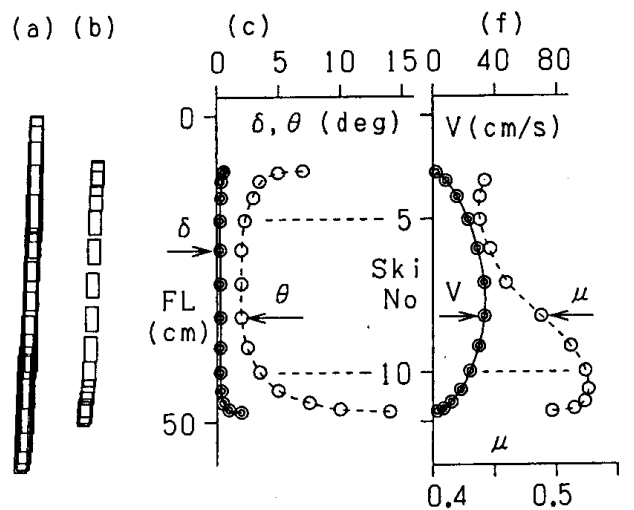


図11 (a)3mm厚の反り無し平行型スキーの滑降図。(b)~(d)は図8と同じ。

図9(c)は、滑降の前にスキーの前方部分に反りが与えられたものである。スキーの重心の位置は $x_0=0.5\text{cm}$ である。このスキーによる滑降過程を図10に示す。 δ, θ, V, μ については、図8と同じで、それぞれの大きさはよく似ている。図10の滑降は、図8と同様に $|\delta - \theta| < 3^\circ$ であり、ほぼカービング・ターンである。そして自転を伴った山回り回転滑降である。