

雪面垂直観察法

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)

Method for Drawing Locus of a Sliding Ski as Observed
from Direction Perpendicular to Snow Surface.

SAHASHI Toshio (Daido Institute of Technology)

ICHINO Shoji (Aichi University of Education)

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)

Method for Drawing Locus of a Sliding Ski as Observed from Direction Perpendicular to Snow Surface.

SAHASHI Toshio (Daido Institute of Technology)

ICHINO Shoji (Aichi University of Education)

抄録

本論文の目的は「滑降しているスキーの位置を、時間の関数として定量的に調べる為の作図法」を開発する事である。この為に、滑降しているスキーを数枚の写真に連続的に撮った。これらの写真から、スキー滑降を、雪面に垂直方向から観察している様に描く事が出来た。

キーワード:スキー,回転滑降,滑降中のスキー,スキーの軌跡

§1. 序文

筆者らは、スキーヤーの運動を研究する為の基礎的な問題として、雪面とスキーとの関係を調べて来た。始めに、雪の代わりに砂を用い、模型のスキーを用い、写真解析法により、実験室内でスキーの運動状態を研究した^{1,2)}。その結果、スキーの回転方向と角付け角との間の関係が明らかになった。上の模型実験^{1,2)}では、滑降しているスキーを滑降面に垂直な方向から写真に撮り、その写真の解析から結論が得られている。次に、雪上で、スキーの運動状態を調べる為には、雪上を滑降している本物のスキーを、滑降面に垂直な方向から写真に撮る事が要求される。

雪上運動を解析する為に、固定した位置で写した写真から、立体空間の座標を求めるDLT法が開発されている^{3,4)}。この方法では、カメラの方向が固定されている為、被写体の角度範囲が小さい。その為、この方法は大きな角度範囲を滑降しているスキーの解析には適さない。

そこで、筆者らは滑降しているスキーを、カメラの位置を固定して、その位置でカメラの方向をスキーヤーの方向に回転しつつ、斜め横から連続的に写真に撮った。そして、それらの写真から、雪面に垂直方向から観察している様に、スキーの滑降を描く方法を開発した。この方法では、3次元空間の座標は得られないが、2次元空間(雪面)の座標は得られる。カメラが1つの為、カメラ操作や写真解析が簡単であり、雪上におけるスキーの運動を知るには、この方法が便利である。被写体の角度範囲が大きいので、遠くから来て、遠くへ滑降しているスキーヤー運動の基礎解析として、この方法は雪面とスキーとの関係を調べる事に適している⁵⁾。

§2. 方法

2.1 カメラと写真と雪面

雪面を水平面と仮定して図1を描く。水平面上の点dから垂直線上の点pにカメラのレンズの中心を置く。そのカメラに写る雪面(X,Y)をeqjhとする。その雪面とカメラの視野の中心が交わる点をoとする。線poに垂直な面(S,T)をkqjbとする。

図1の面paodと面peaを図2(a)に描き直す。水平線aodに垂直な線pdをHcmとする。kgsは面(S,T)を表す。点pから面(S,T)までの長さを L_T で表す。面(S,T)はカメラのフィルム面(M,N)と平行である。フィルム面(M,N)はopの延長上に存在するが、図を描き易くする為に、フィルム面(M,N)を点pと面(S,T)との間に置く。点pからフィルム面(M,N)までの長さを L_F (レンズの焦点距離)で表す。写真測定はフィルムを拡大した印画紙面で行なうのが便利なので、印画紙面を写真面(U,V)と定義し、フィルム面(M,N)と面(S,T)との間に置く。点pから写真面(U,V)までの長さを L_v (写真長)で表す。点pからフィルム面、写真面のそれぞれの中心を通る直線poと直線aodとの間の角(中心角)を A_0 で表す。直線poが各面と交わる点を各面の原点とする。

中心角 A_0 を求める事が出来れば、以下に述べる様に写真面上の任意の点(U,V)から、それに対応する雪面上の点(X,Y)が得られる。中心角 A_0 を求める為には、次の様ないくつかの方法が考えられる。

2.2 雪面上の2点間の距離が既知の場合

雪面上の任意の2点 $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2)$ は、写真上の2点 $(U_1, V_1), (U_2, V_2)$ とフィルム上の2点 $(M_1, N_1), (M_2, N_2)$ に対応する。図2(a)は $(X_1, Y_1), (U_1, V_1), (M_1, N_1)$ のみを表す。写真長 L_v は (U_1, V_1) と (M_1, N_1) を用いて、式 $N_1/L_F = V_1/L_v$ から得られる。

$$V_1/L_v = \tan B_1, \quad V_2/L_v = \tan B_2,$$

$$L_v/K_{v1} = \cos B_1, \quad L_v/K_{v2} = \cos B_2,$$

$$U_1/K_{v1} = \tan D_1, \quad U_2/K_{v2} = \tan D_2$$

から角度 B_1, B_2, D_1, D_2 が得られる。

$$A_0 = A_1 + B_1, \quad A_0 = A_2 + B_2,$$

$$H/K_{Y1} = \sin A_1, \quad H/K_{Y2} = \sin A_2,$$

$$X_1/K_{Y1} = \tan D_1, \quad X_2/K_{Y2} = \tan D_2$$

から次の X_1, X_2 が得られる。

$$X_1 = H \cdot U_1 (\cos B_1) / L_v (\sin A_1), \quad \dots (1)$$

$$X_2 = H \cdot U_2 (\cos B_2) / L_v (\sin A_2). \quad \dots (2)$$

又次の3式

$$H/L = \tan A_0,$$

$$H/(L+Y_1) = \tan A_1, \quad \dots (3)$$

$$H/(L+Y_2) = \tan A_2$$

から Y_1, Y_2 が得られる。

$$Y_1 = H \cdot [(1/\tan A_1) - (1/\tan A_0)], \quad \dots (4)$$

$$Y_2 = H \cdot [(1/\tan A_2) - (1/\tan A_0)]. \quad \dots (5)$$

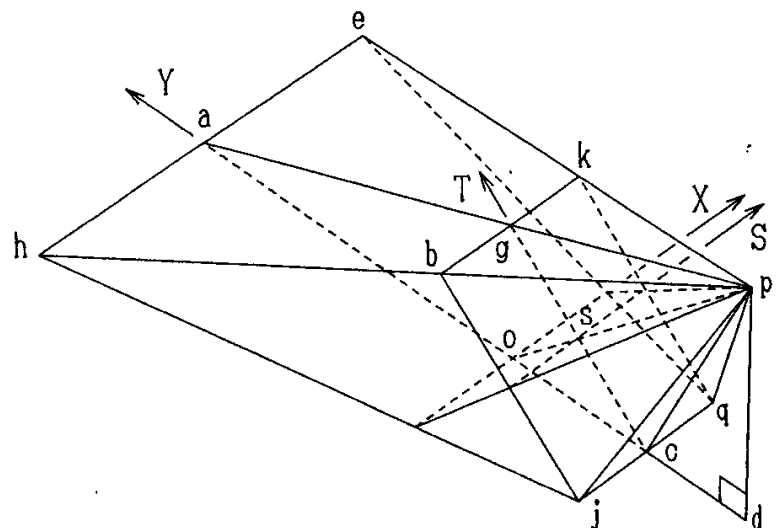


図1 カメラpからスキー場の平面eqjhを見る鳥瞰図。psoの方向が視野の中心。

式(1)~(5)の中の未知数は A_0 のみである。

2点間の距離 S_L が既知であれば、式(1),(2),(4),(5)を用いて、

$$(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2 = (S_L)^2 \dots\dots (6)$$

から A_0 が得られる。 S_L としてスキーの長さを使う事が出来る。

2.3 雪面上の1点からカメラの足元までの距離が既知の場合

点 (X_1, Y_1) とカメラの足元 d 間の距離 (XYL) が既知であれば、式(1)と(3)を用いて、

$$(X_1)^2 + (L + Y_1)^2 = (XYL)^2 \dots\dots (7)$$

から A_0 が得られる。点 (X_1, Y_1) として後述の標識を使う事が出来る。

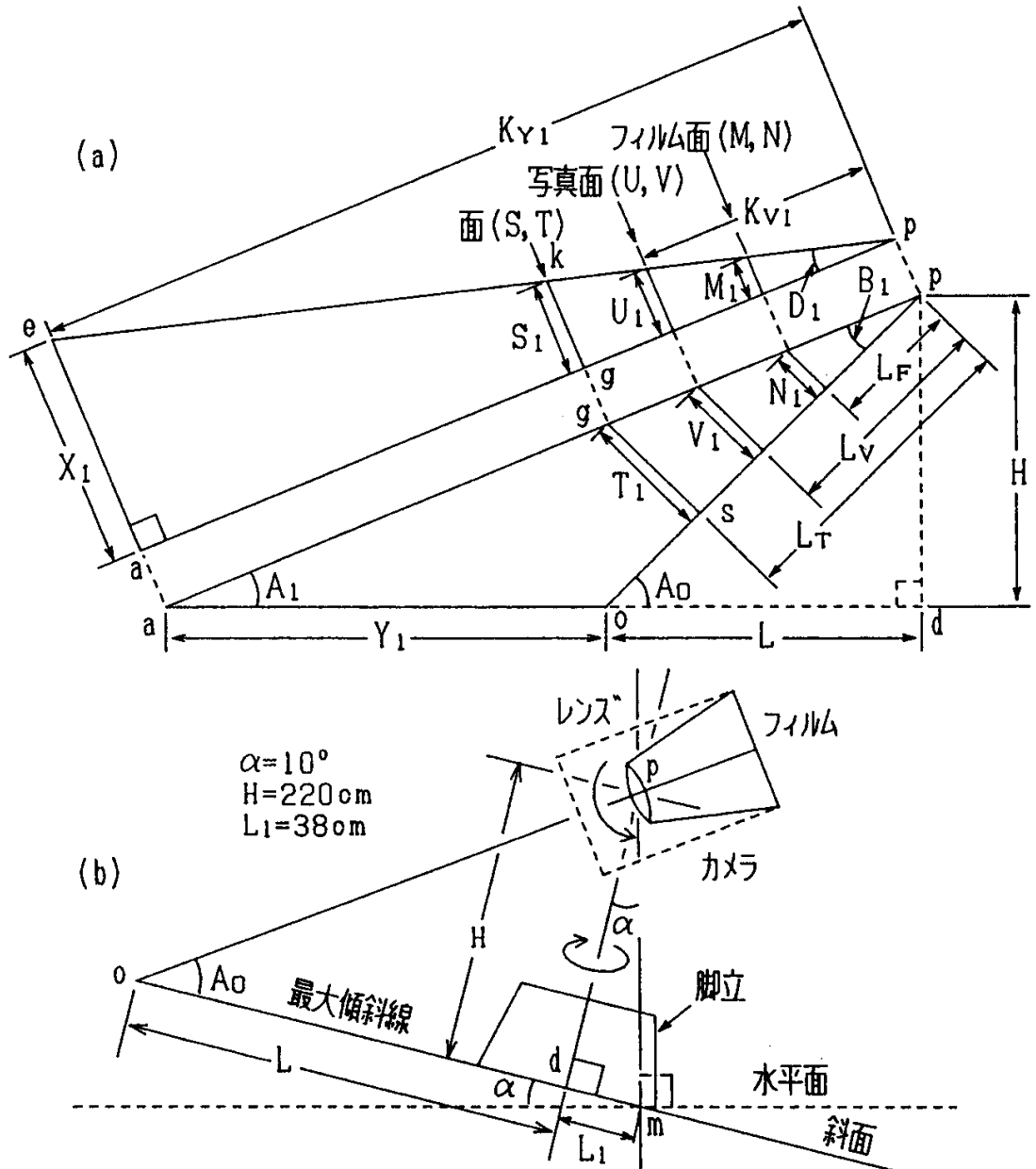


図2 (a) 図1の面 $paod$ と面 pea の詳細図。 L_F はカメラの焦点距離。 (M_1, N_1) は写真フィルム面上の座標であり、図を描き易くする為に po 間に描かれている。 H はカメラの高さ。 (b) 斜面とカメラとカメラの回転軸。

2.4 カメラの焦点距離が不明の場合

焦点距離が不明の場合は、写真長 L_v を次の様にして求める。図1の面 $paod$ を、図3の様を描き直す。雪面上で且、 Y 軸上の任意の2点 a, f は、写真上の2点 $(U_1, V_1), (U_2, V_2)$ に対応する。 a, f とカメラの足元までの距離を、それぞれ $ad=Y_{11}$ 、 $fd=Y_{12}$ とし、 $U_1=0, U_2=0$ とする。 Y_{11} と Y_{12} が既知であれば、

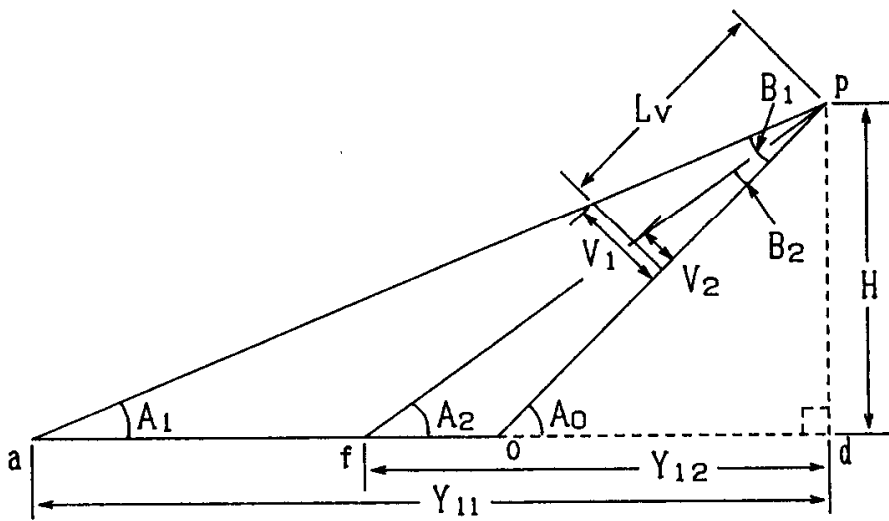


図3 カメラの焦点距離が不明の場合に、中心角 A_0 を求める図。

$$V_1/L_v = \tan B_1, \quad V_2/L_v = \tan B_2, \quad H/Y_{11} = \tan A_1, \quad H/Y_{12} = \tan A_2.$$

$$A_0 = A_1 + B_1 = \tan^{-1}(H/Y_{11}) + \tan^{-1}(V_1/L_v), \dots (8)$$

$$= A_2 + B_2 = \tan^{-1}(H/Y_{12}) + \tan^{-1}(V_2/L_v).$$

$A_1 + B_1 = A_2 + B_2$ から L_v が得られる。この L_v を用いれば、式(6)、(7)又は(8)から A_0 が得られる。点 a, f として後述の標識を使う事が出来る。

2.5 雪面上の位置(X,Y)を求める方法

中心角 A_0 と写真長 L_v が既知ならば、写真上の任意の点 (U, V) から式(1)、(2)、(4)、(5)を用いて、それに対応する雪面上の位置 (X, Y) が得られる。

2.6 2枚の写真間の相対関係

スキーマの動きと共に、スキーを写すカメラも又その方向へ回転して行く。従って図1の雪面 $eqjh$ も位置を変えて行く。その様子を図4に示す。2つの雪面 $eqjh$ と $e'q'j'h'$ の中で共通に写っている標識を $\odot K$ で表す。各々の雪面の中で Y 軸と K 点間、 Y' 軸と K 点間の角度を調べれば、 Y 軸と Y' 軸間の角度が得られ、2枚の写真上にあるスキーの相対的な位置変化を知る事が出来る。

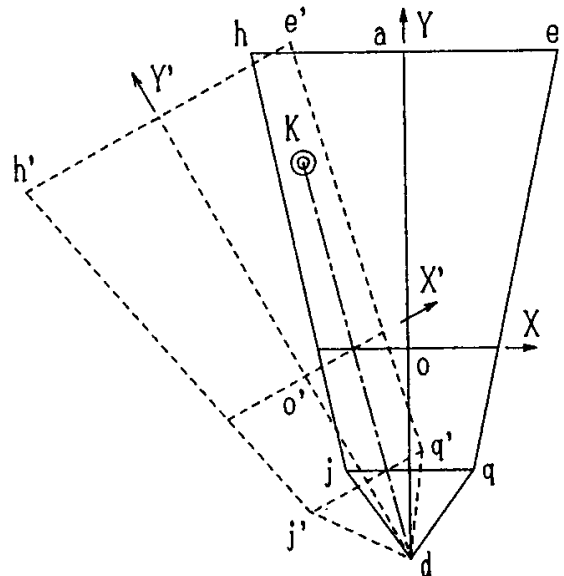


図4 2つの写真間の相対的な位置合せ。
 $\odot K$ は2つの写真上に共存する「標識」。

§3. 実験と写真解析

3.1 滑降しているスキーヤーの撮影

図1、図2(a)、図3では雪面を水平面と仮定して作図した。しかし、実験に用いたスキー場の雪面は、角度 $\alpha = 10^\circ$ だけ水平面から傾いていた。その為に、図2(b)の様、図を描き直す。雪面に脚立を置き、その上にカメラを置いた。レンズの中心 p から重力方向に下ろした雪面上の点を m

とする。mを通る最大傾斜線を描く。その最大傾斜線に垂線pdを図の様に描く。その交点を点dとする。dm間は $L_1=38\text{cm}$ であった。カメラは、軸pdの回りに回転出来る様なホルダー(点線の枠)の中に置かれた。又、カメラはpを通り、紙面(pdと最大傾斜線を含む面)に垂直な軸の回りに回転する事が出来る。カメラの高さは $H=pd=220\text{cm}$ であった。



図5 スキーヤーの滑降とその近くに置かれた数個の標識(矢印)。

圧雪車で平らに良く整備されたスキー場で、スキー実験が行われた。実験に用いたカメラは、焦点距離 $L_F=50\text{mm}$ 、35mmフィルム・カメラである。中心角 A_0 が求め易い様に、カメラの位置から5m~15m位の範囲に数個の標識を置き、その近くをスキーヤーが滑降した(図5)。カメラの足元(図2のd)と標識との間の距離 L_M を測定した。写真は0.25秒間隔に撮影された。スキーヤーは全日本スキー連盟公認パトロールである。

3.2 平均中心角 A_0

図6は写真解析されたスキーの軌跡の1例である。この論文では、 A_0 を求める為に§2.3の方法を用いた。◎はカメラの足元dの位置である。3重丸は標識の位置である。この図を用いて A_0 を求める順序を次に示す。写真のフィルムと印画紙の大きさの比から写真長 L_v を求める。写真の中央を座標の原点に取り、写真上の標識位置(U,V)を測定する。 L_v と(U,V)と標識の実測値 L_M を用いて、式(7) ($L_M=XYL$)から中心角 A_0 を求める。

1枚の写真上にある、他の標識からも同様に A_0 を求める。各標識から得られた A_0 の平均値を平均中心角 A_0 とする。次に、平均中心角 A_0 と、写真上の標識位置(U,V)から、(1)~(5)式を用いて、カメラの足元dと標識間の距離 L_{MA} を求める。それらの結果の一部を表Iに示す。*印は L_{MA} に

対応する実測値 $L_M(m)$ である。実測値 L_M と、平均 A_0 から得られた L_{MA} 値との差は次の様である。

$L_M \leq 10\text{m}$ では

$L_M - L_{MA} < 10\text{cm}$,

$L_M \approx 15\text{m}$ では

$L_M - L_{MA} \approx 10\text{cm}$

である。以下平均 A_0 の値を、中心角 A_0 の値とする。

表I 中心角 A_0 の平均値から求められたカメラの足元と標識間の距離 L_{MA} 。*印は実測値 L_M 。図6と表Iのスキー番号は各々対応。図6と表Iの括弧付き番号(標識)も各々対応。

スキー番号	平均 A_0 (度)	標識番号と、カメラの足元と標識間の距離 $L_{MA}(m)$						
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
6	10.66	14.20	10.75	7.70	6.80			
8	11.20	14.30	10.81	7.71	6.80	6.03		
10	12.10			7.71	6.81	6.06		
12	12.73			7.69	6.81	6.03		
14	13.34				6.78	6.05	5.67	
16	13.55					6.05	5.70	5.70
18	12.57							5.69
		14.20*	10.80*	7.70*	6.80*	6.05*	5.70*	5.70*

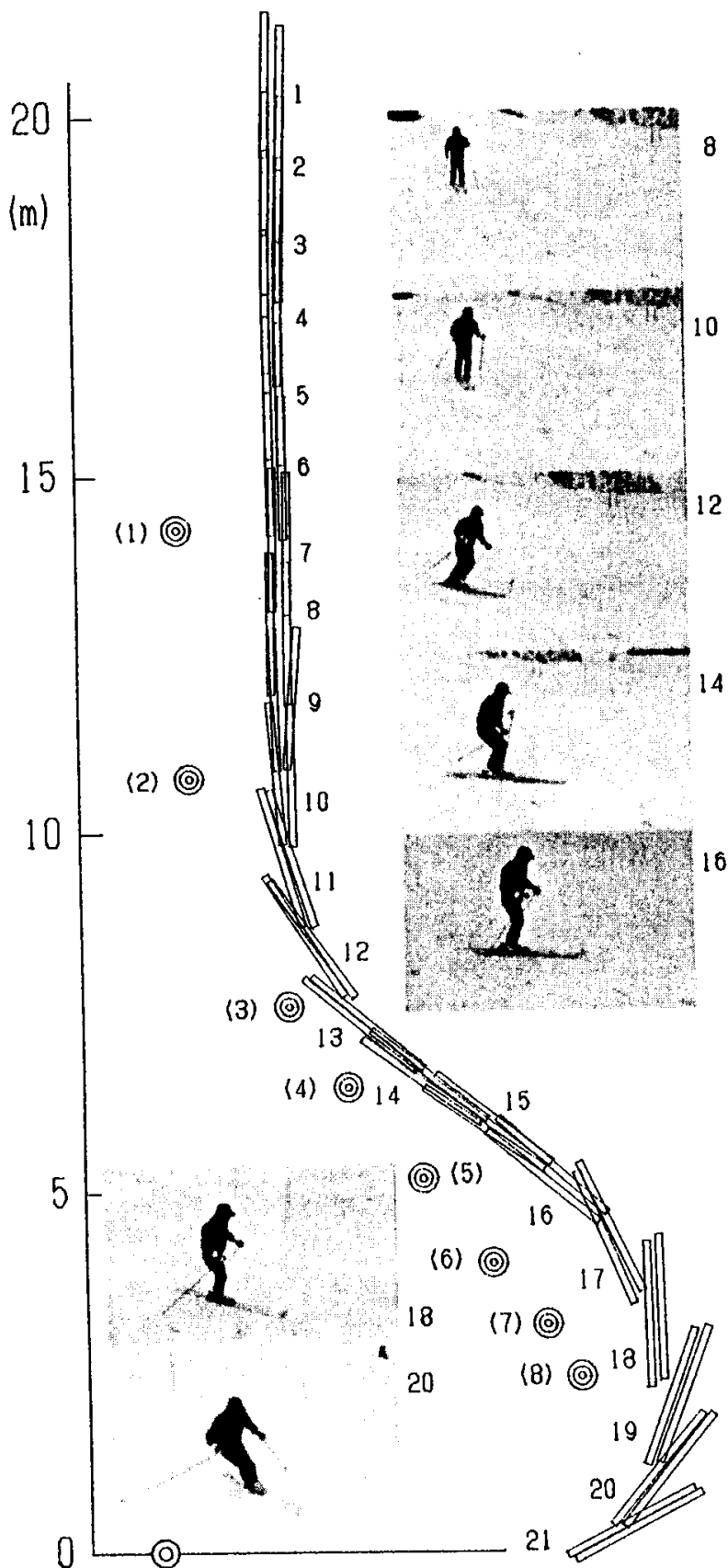


図6 パラレル・ターンをしているスキーヤーとそのスキーの軌跡。◎はカメラの位置d. 3重丸は標識の位置。写真番号とスキー番号は各々対応している。

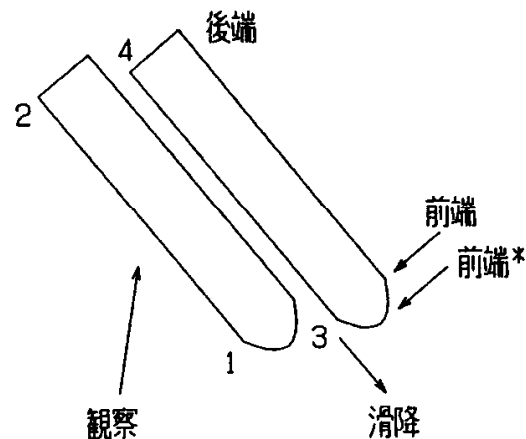


図7 2本のスキーと、その4つの端の位置と、観察方向と、滑降方向。前端は雪とスキーが接している部分の端。前端*は上に反っている部分の端。

表II スキーの中心とカメラの足元間の距離 L_c とスキーの長さ SL 。添字1は右足,2は左足。

スキー番号	スキ-長(cm)		距離(m)	
	SL1	SL2	Lc1	Lc2
6	202	201	15.25	15.21
8	181	179	13.02	12.90
10	185	184	10.93	10.93
12	188	192	8.72	8.69
14	189	188	7.23	7.35
16	185	185	7.03	7.24
18	181	188	6.97	7.17

3.3 スキーの端

図7は滑降しているスキーを観察している模型図である。スキーの端に図の様に1,2,3,4の番号を付ける。スキーの前端は雪面から上がっている為、雪面上の位置を特定し難い。その為、雪面に接している部分の前端を1,3とした。観察方向から見て、4はスキーヤーの陰になって観察できない場合が多い。その

時は推定の位置を4とした。又滑降中に舞上がった雪がスキーの端を隠している場合も、推定の位置をスキーの端とした。表IIは測定した位置(U,V)から得られたスキーの長さを示している。SL1は右足スキーであり,SL2は左足スキーである。スキーの長さにバラツキが多いのは

表Ⅲ カメラの足元から見た標識間の角度。

スキー 番号	標識番号と標識間の角度(度)						
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
6	0*	0.5	10.1	18.3			
8	0*	0.4	10.0	18.3	31.2		
10			10.0*	18.2	31.1		
12			10.0*	18.3	31.1		
14				18.3*	31.1	45.6	
16					31.1*	45.6	57.5
18							57.5*

表Ⅳ 写真中央の0.1mmの読取誤差に対応する雪面上の誤差 $\Delta X, \Delta Y$. 写真は18cm×13cm. Lは図2のod間の距離. $L_F=5\text{cm}, L_V=28.1\text{cm}$.

L	H=220cm			H=110cm		
	A_0	ΔX	ΔY	A_0	ΔX	ΔY
1247cm	10	0.45cm	2.55cm	5.04	0.44cm	5.00cm
952cm	13	0.35cm	1.52cm	6.59	0.34cm	2.93cm
494cm	24	0.19cm	0.64cm	12.55	0.18cm	0.81cm

3.4 標識間の角度

中心角 A_0 と写真長 L_V と写真上の標識位置(U,V)から,雪面上の標識位置(X,Y)を(1)~(5)式から求める. 雪面上の標識(1)を基準角度 0° に取り,カメラの足元dから見た各標識間の角度を求める. スキー番号10では,標識(1)がないので,番号6と8から標識(3)を 10.0° として,それを基準に取り,他の標識との間の角度を求める. この様にして得られた標識間の角度の一部を表Ⅲに示す. *印は基準角度である.

3.5 写真の読取誤差

実験に用いた写真は18cm×13cmである. $L_F=5\text{cm}, L_V=28.1\text{cm}$,式(1)~(5)を用いて,写真上の読取誤差 ΔU と ΔV から生じる雪面上の誤差 ΔX と ΔY を求め表Ⅳに示す. 読取は写真の中央とし,誤差 $\Delta U=U_2-U_1$ は $(U_1, V_1)=(0,0)$ と $(U_2, V_2)=(0.01,0)$ 間の長さとし,誤差 $\Delta V=V_2-V_1$ は $(U_1, V_1)=(0,0)$ と $(U_2, V_2)=(0,0.01)$ 間の長さとする. $\Delta X=X_2-X_1, \Delta Y=Y_2-Y_1$. 単位はcmである. 表Ⅳから, ΔY は ΔX より大きく, ΔY はカメラの高さHに強く依存している. Hが大きい程,誤差は小さくなる. 写真上で,読取誤差 $<0.02\text{cm}$ とすれば,雪面上では, $L=5\text{m}\sim 10\text{m}$ の範囲内で, $\Delta Y<10\text{cm}$ となる. この ΔY と§3.2の L_M-L_{MA} の大きさは良く似ている.

§4. 討論

4.1 測定精度

図6の実験では,カメラから10m~15mの範囲で,標識までの距離 L_{MA} の誤差は10cm位であった

スキーの端の特定が難しかった為であろう. スキーの後端から前端*(図7)までの実測値は200cmである.

図6のスキーの軌跡は,この様にして得られたスキーの2つの端の位置とスキー幅(10cm)から描かれたものである. カメラの足元dとスキーの中央の位置との間の距離が表Ⅱに L_{c1} と L_{c2} で表されている. L_{c1} は右足スキーであり, L_{c2} は左足スキーである.