図6(b)のように,g_1とG_Eのベクトル和をg_2で表すと,その大きさは$g_2=\sqrt{g_1^2+G_E^2}$となる.g_1とg_2の間の角をεとすると,$\tan\varepsilon=G_E/g_1$,　$g_2=g_1/\cos\varepsilon$,となる.水平線はC-cである.ここで,面GOce上の合力の加速度はg_2だから,加速度成分g_yを無視すれば,滑降しているスキーヤーは,g_2を重力の加速度のように感じ,g_2の方向に垂直な線m-nを,水平線のように感じるであろう.特に,等速回転運動の場合には,線m-nはスキーヤーにとって水平線となる.こうして,水平線から測られた角付け角はβ_0からβ_Eに変る.このβ_Eは回転滑降の為に作られた水平線m-nとスキーとの間の角であるので,$\beta_E\neq0°$が回転滑降を作る要因であると推定される.εは回転滑降に寄与しない部分である.従ってβ_0は,$\beta_0=\varepsilon+\beta_E$となる.

こうして,$G_E=0$の時の図2(d)のg_1とβ_0は,$G_E\neq0$の時の図6(b)では,各々g_2とβ_Eに変る.加速度成分は$g_2=\sqrt{g_1^2+G_E^2}$を用いて,

$$g_x=g_2\cdot\sin\beta_E,\ g_y=g\cdot\sin\alpha,\ g_z=g_2\cdot\cos\beta_E,\quad(3)$$

となる.

図7(b)は,「β_0とβ_E」と「g_1とg_2の各加速度成分」との間の関係が,図8,スキー番号7の数値を用いて描かれたベクトル図である.ベクトル図は,角度は実測値であり,加速度成分は実測値に比例した大きさで描かれたものである.遠心力が考慮されていない($G_E=0$)時の重心の位置はG'であり,加速度成分はg_x'とg_z'であり,表1に示される.又,遠心力が考慮されている($G_E\neq0$)時の重心の位置はGであり,加速度成分はg_xとg_zであり,表2に示される.

5.2.　滑降方向がFLと異なるとき

図2(b)において,スキーヤーが点Oを通り過ぎると,図4(a)のように$\theta\neq0°$となる.図4(a)は図形が複雑すぎてスキー軌道SOTは描かれていない.スキー軌道SOTを図4(d)に示す.図4(a)で,点Oはスキー軌道SOTの接点であり,PLは接線である.スキーヤーに働く遠心力G_Eはスキー場の斜面に平行な面上にあり,更にスキー場をθ方向に垂直に切った面GOgce上にある.従って,G_Eの方向は図4(c)の横斜面角β_1の線M-A_3と平行である.図4(a)の面GOgceをPLに沿って前方からみると,図6(c)のようになる.右足のスキーは省略されている.図6(c)の遠心力G_Eの方向に平行な線をA-Oと表すと,線A-Oは図4(c)の線M-A_3に平行になる.図6(c)のg_2はg_1とG_Eのベクトル和であるので,g_1とg_2の間の角εを用いると,大きさg_2は

$$\tan\varepsilon=G_E\cdot\cos\beta_1/(g_1+G_E\cdot\sin\beta_1),$$

$$\beta_0=\varepsilon+\beta_E,\quad \beta_1>0°,$$

$$g_2=(g_1+G_E\cdot\sin\beta_1)/\cos\varepsilon,$$

となる.加速度成分は図7(c)から

$$g_x=g_2\cdot\sin\beta_E,\ g_y=g\cdot\sin\psi,\ g_z=g_2\cdot\cos\beta_E,\quad(4)$$

となる.

図7(c)は図8,スキー番号12の数値を用いて描いたベクトル図である.

スキーヤーが点Oに入る前では,図面は図6(a)となり,$\beta_1<0°$となり,式(4)が成立する.図8,スキー番号2の実測値でベクトル図を描くと図7(a)になる.$\theta=0°$の時は$\beta_1=0°$となり,式(3)と式(4)は同じ式になり,式(4)は滑降方向θに関係なく成立する.

図7から,スキーヤーにG_Eが働くと,スキーヤーが感じる重力の加速度は,g_1からg_2へ変り,その方向と大きさが変る事が理解できる.更に水平線の方向も線C-bから線m-nへ変る.重力の加速度成分もg_x',g_z'から,g_x,g_zへと変る.従って,角付けの意味と定義も変ってくる.

g_2とg_yのベクトル和をg_0(合力)で表すと,その大きさは$g_0=\sqrt{g_2^2+g_y^2}$となる.図8のスキー番号2,7,12の左足スキーについて,遠心力が考慮された式(4)のg_2,g_x,g_y,g_zの値が表2に記されている.更に,上記の各スキーについて,$g_0,G_E,G_c,V,\varepsilon,\beta_E,\beta_1$が書き加えられている.表1と表2について,$g_y$は遠心力の影響を受けないので同じ値となる.「$g_2,g_x,g_y,g_z,g_0,G_E,G_c$」の単位は$cm/s^2$,「V」の単位はcm/s,「$\varepsilon,\beta_E,\beta_1$」の単位は度である.

回転滑降をしているスキーヤーがFLを通過する位置を図2(b)のように点Oとする.点Oの前後で,遠心力が考慮された加速度g_2がどのように変

表2　遠心力が考慮された加速度成分　$\alpha=10°$

スキー番号	足	g_2	g_x	g_y	g_z	g_0	G_E	G_C	V	ε	β_E	β_1
			成分			合力	遠心力	加速度	速度		角付	
2	左	973	79	163	970	987	175	123	662	10	4.6	-3.0
7	左	1062	102	170	1057	1076	441	147	757	25	5.5	0.2

表3　点O前後のθ, ε, g_2の変化

	前	点O	後
θ	＋	0	−
ε	大	ε	小
合力	小	g_2	大

るかを見てみよう．もし,回転滑降の曲率半径Rと接線速度Vが点Oの前後で一定であれば,G_Eも一定となり,点Oの前後でθとεとg_2は表3のようになる事が図6から理解できるであろう．即ち,加速度g_2は点Oの前では小さく,後では大きくなる．スキーヤーが左回りと右回りの回転滑降を連続して行っている時,山回り回転から変曲点に入り,その後谷回り回転に入ると体が軽く感じるのは,g_2が小さくなる為であろう．次にFLの点Oを通過し,山回り回転入るとスキーを強く押すように感じるのは,g_2が大きくなる為であろう．

5.3.　摩擦力の加速度g_f

滑降方向の加速度の実験値はGcである．$g_y-G_C=g_f$が摩擦力の加速度であり,方向はスキーの後方を向いており,$g_f>0$が推定される．この摩擦力は,スキーと雪面の間の摩擦力とスキーヤーと空気との間の摩擦力から成り立っている．図2と図4は$g_f=0$と見なして描かれている．表2では$g_f \fallingdotseq g_y/4$である．

6.　有効角付け角β_E

図6から,回転滑降をする時は$\beta_0>\beta_E>0°$であり,$\beta_0>\varepsilon>0°$である事が推定される．「1.序文」で,直線滑降は$\beta_0=0°$であり,回転滑降は$\beta_0\neq0°$と述べたが,回転を始めれば遠心力が生ずるので有効に働く角付け角はβ_0より小さくなり,β_Eになるであろう．β_Eを有効角付け角と呼ぼう．

他方εは回転に寄与しない部分であるので,εは無効角付け角と考えられる．またスキーヤーの重心の方向がg_1からεだけ傾いているので,εは身体傾斜角とも考えられる．

7.　カービング・ターン滑降

図8はカービング・スキーを用いたカービング・ターン滑降[1)]の1例である．(a)は1秒間に7.5枠のビデオ・プリントから作られたスキーの滑降軌跡である．(a)では,隣同志のスキーが重なり合って見え難いので,1m離し,長さ50cmの短スキーが(b)に再び描かれている．下向きの矢印はFLの方向を示している．(c)は,「3.定義」から作られたθとRを表している．スキー角δは$\delta\fallingdotseq\theta$とみなし,省略された．(d)は$\beta_0$と$\beta_E$を表している．$\beta_0$については,両足のスキーの$\beta_0$を示した．$\beta_{0R}$は右足スキーの水平角付け角であり,$\beta_{0L}$は左足スキーの水平角付け角である．スキーヤーは左スキーに乗っていると考え,β_Eについては左足のみを示した．角付け角は$\beta_{0L}=\varepsilon+\beta_{EL}$である．$\beta_{EL}$は左足スキーの$\beta_E$である．(e)は加速度成分を表している．ミカケの傾斜角ψは$\theta=0°$では,$\alpha=\psi=10°$であるが,θが大きくなるとψは減少する．しかし$\theta=20°$でも,$\psi=9.4°$であり,

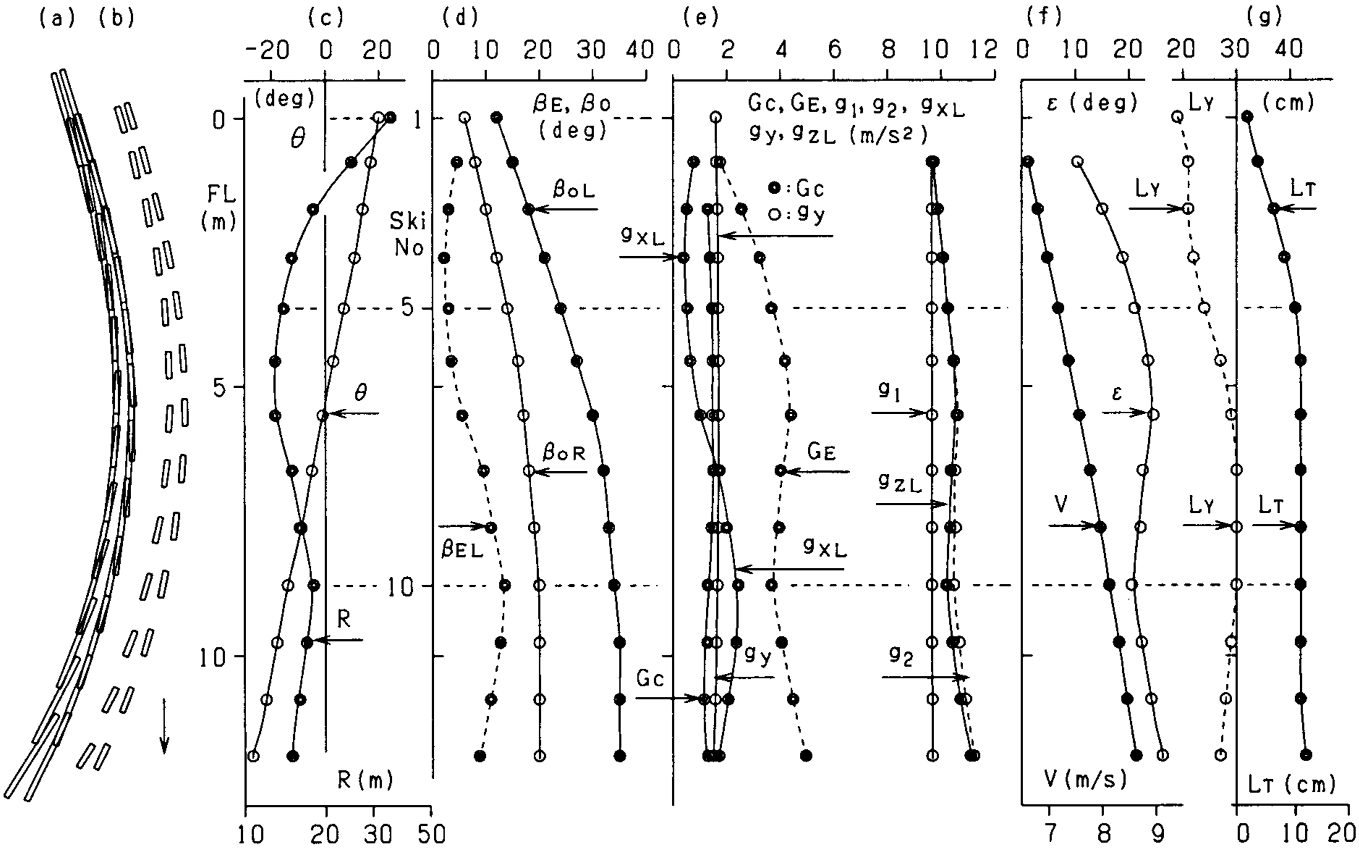

図8 カービング·スキーによるカービング·ターン

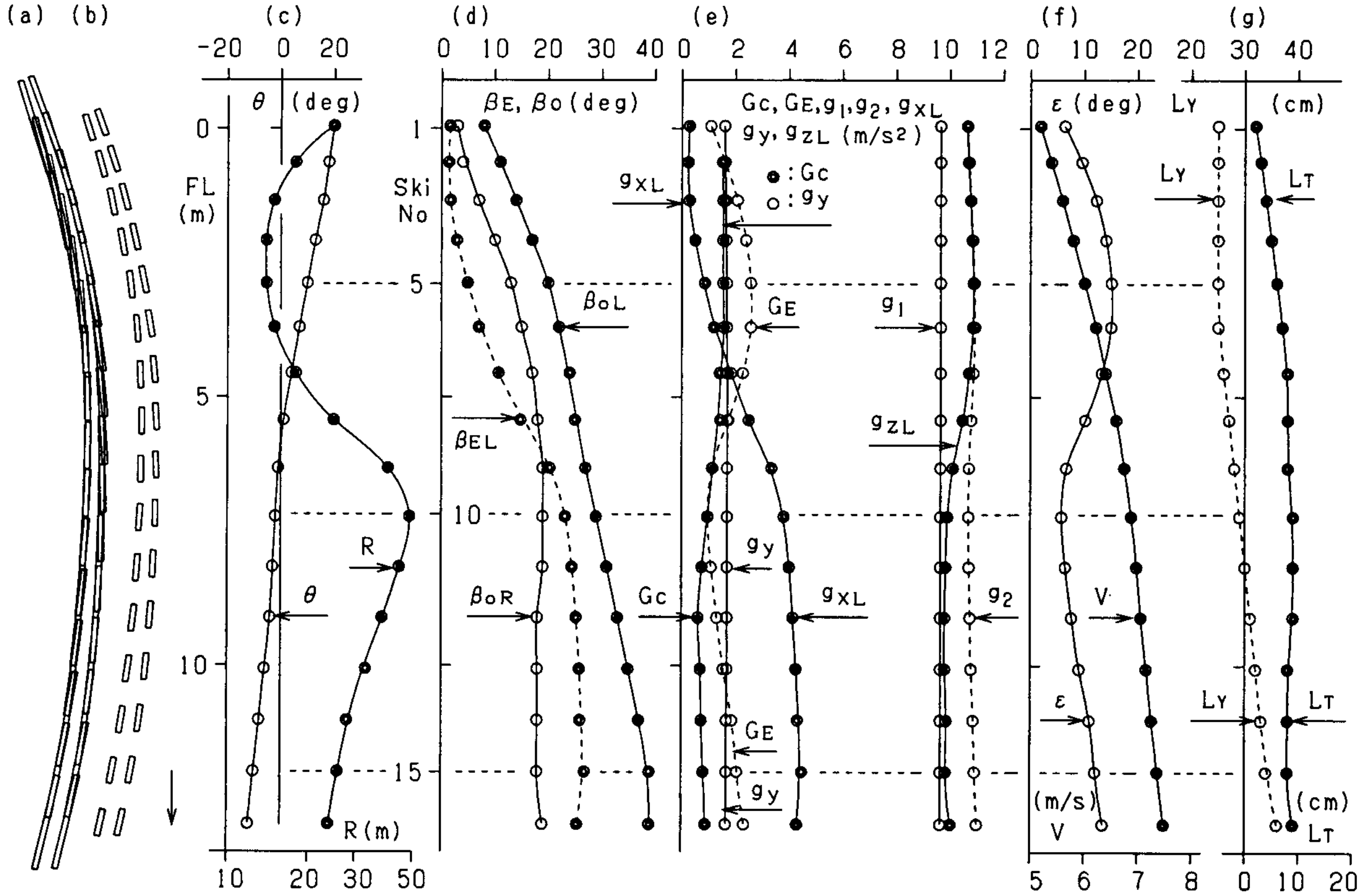

図9 ノーマル·スキーによるカービング·ターン

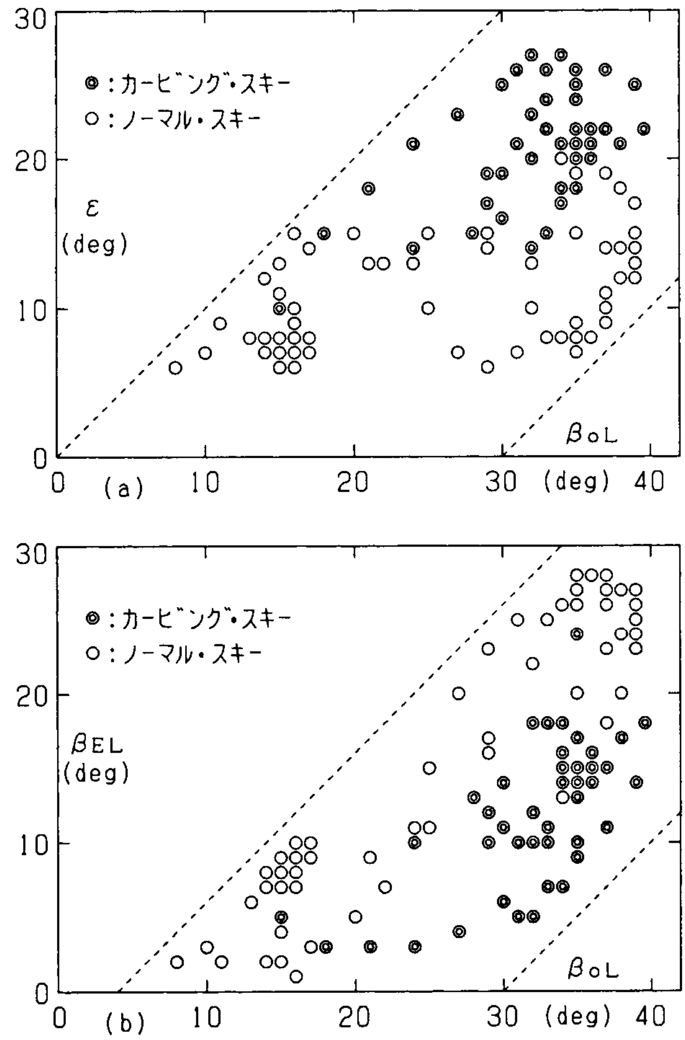

図10 水平角付け角β_0と有効角付け角β_Eと身体傾斜角εの間の相関図.
(a)左スキーのβ_0とε.
(b)左スキーのβ_0とβ_E.

$\alpha \fallingdotseq \psi$である．従って,式(4)の$g_y$はほぼ一定となっている．gは$g_1$と$g_y$に分けられており,$g_1$もほぼ一定となっている．$g_1$と$G_E$をベクトル合成したものが$g_2$である．$g_2$は滑降面(図7,O-k)に沿う成分$g_x$と垂直な成分$g_z$に分れる．スキーヤーは左足で滑降しているとして,$g_x = g_{xL}, g_z = g_{zL}$とした．Vは両スキーの中心が描く軌道の接線方向の速度であり,Gcは接線方向の加速度である．L_YとL_Tは図3で定義されたスキー横幅と縦幅を表している．図9はノーマル・スキーを用いたカービング・ターン滑降[1)]の1例である．

8. 測定結果

図8と図9から曲率半径Rを調べてみると,R＞10mである．スキーの横幅L_YはL_Y＜40cmである．「5.1.」のR'≒Rはほぼ満たされている．

スキーヤーの重心の位置と雪面の間は約1mであり,(C'-C)≒1mとなり,(C'-C)＜Rはほぼ満たされている．

スキーの縦幅L_Tでは,両図から15cm＞L_T＞0cmであり,回転滑降の内側のスキーが常に前に出ていた．

図8と図9から,接線方向の加速度の実測値Gcは常にGc＞0であったので,スキーはいつも加速の状態にあった．接線方向の重力の加速度g_yは実測値Gcより大きい筈あり,両図からg_y＞Gcが確かめられた．摩擦力の加速度g_fについては,$g_y - Gc = g_f > 0$であり,$g_f < g/10$であった．図2と図4は摩擦力＝0の元に描かれているが,ほぼこの条件を満たしている．

遠心力の加速度G_Eと重力の加速度成分g_1から,身体傾斜角εと有効角付け角β_Eが導かれた．それを基に,「図8と同様の滑降を3例」と「図9と同様の滑降を3例」からβ_0とβ_Eとεの間の関係を調べて図10に示した．◎はカービング・スキーであり,○はノーマル・スキーであり,両者の間に分布の違いが認められる．◎と○は斜め点線の間に分布している．これらから,共に,「6.有効角付け角β_E」で推定されたように,回転滑降をする時は$\beta_0 > \beta_E > 0°$であり,$\beta_0 > \varepsilon > 0°$である事が図10から確かめられた．これにより,有効角付け角β_Eの導入は実験的にも合理的であると思われる．

9. 結論

回転滑降中のスキーを含むスキーヤーの重力の加速度成分を調べてみた．加速度成分は,スキーの傾きα, β, θと,これらから作られる数個の傾きに依存している事が分った．

回転滑降をする時には遠心力を考慮する必要がある．遠心力を含む重力の加速度成分を調べる事により,スキー角付け角には,斜面角付け角β,水平角付け角β_0,有効角付け角β_Eの3種類を考える必要がある事も分った．

実際に,回転滑降に寄与しているのはβ_Eであ

ろうと思われる.

謝辞

著者は愛知教育大学市野教授に対して貴重な討論を感謝する. 又,雪上実験に対して岐阜県朴の木平スキー場の上平氏に感謝する.

参考文献

1) Toshio Sahashi and Shoji Ichino (2001): Carving-turn and edging angle of skis, Sports Engineering 4,135-145
2) 佐橋稔雄,市野聖治 (1999):スキー研究の軌跡,日本スキー学会誌9(1),67-77
3) 佐橋稔雄,市野聖治 (2001):スキーの回転機構の実験的研究
2.角付け角の測定,日本スキー学会誌11(1),203-212
4) 市野聖治 (2002):カービング·ターンの科学,スキー·ジャーナル社, 東京
5) Toshio Sahashi and Shoji Ichino (1996): Experimental Study of the Mechanism of Skiing Turns. 3. Measurement of Edging Angles of Skis on Snow Surface, Japanese Journal of Applied Physics 35,2377-2382

著者 佐橋稔雄(さはし としお)
愛知スポーツ物理学研究所
スポーツ物理学

(原稿受付 2008年5月28日)