

アルペンスキーの力学概説

平野陽一

On the mechanics of alpine skiing

Yoichi HIRANO

筆者はレクリエーションとしてアルペンスキーを長年楽しんできた。スキーを始めた 50 年前からどうして雪面上でスキーが回転滑走できるのか疑問に思ってきた。スポーツ工学研究会が立ち上げられて研究発表の場が与えられたので、この疑問を解消しようと思った。いま疑問は解消できたと考えている。本概説では、学術文献とともに日本におけるスキーの歴史を若干紹介する際（年代等について正確を期す労をとらなかったが）に一般文献も紹介する。スキーは運動用具を使用するが、スキー用具（スキー板、スキー靴、締め具等）は日本にスキー技術が紹介されてからも随分改良されてきた。スキー技術はスキー用具と密接に関係している。アルペンスキーの力学で問題になるのは、直滑降と回転滑走である。直滑降で高速が実現できるのは、スキー板滑走面と雪面との間の摩擦係数が小だからである。回転滑走ができるのは求心力が作用するからだが、求心力がなぜ生じるのかを明らかにするのが筆者のアルペンスキーの力学研究の動機、目的であった。自動車がハンドルをきると楽に曲がれるのはコーナリングフォースが作用するからと説明されるが、なぜこの力が生じるかを正確に説明するのはなかなか難しい。ゴムタイヤトレッド部の変形を考えないと説明できない。アルペンスキーの回転滑走の求心力は何によるのか？がアルペンスキーの力学の要である。

Key words: Alpine skiing, Mechanics of skiing, Centripetal force, Snow cutting, Quickest descent line

1 はじめに

日本のスキー科学の歴史は 1945 年以前にさかのぼる。日本に最初にスキーを紹介し、指導したのはオーストリアの駐日武官レルヒ (Th. von Lerch) である。彼は 1911 年高田 (上越市) で軍人にスキー術を指導した¹⁾。その後、スキーは軍人以外の旧制高校生、大学生らに楽しまれるようになった。彼ら学生や卒業生の理系の人たちのなかには、スキーの科学に関心を持つ人たちがいたようである。筆者の手に井上真六の論文“スキー回転の力学について” (学術誌 ‘雪氷’, 2 巻, 1940 年) のコピーがある。井上は航空工学専攻である。スキーとは無関係であったが、雪自体の研究は北海道大学の中谷宇吉郎が行っていた。彼は十勝岳で雪の結晶を観察し、1936 年に人口雪を世界で初めて作った²⁾。中谷は北海道大学低温科学研究所の創設に深くかかわっていた。スキーの科学分野で、低温科学研究所の論文のいくつかは世界的に高く評価されている。

第二次世界大戦後、日本でスキーは広く楽しまれるようになった。1956 年コルチナダンペッツォ (イ

タリア) での冬季オリンピックで、猪谷千春が回転競技で銀メダルを獲得した³⁾⁴⁾。このとき、滑降、大回転、回転競技で 3 個の金メダルを勝ち取ったのはキッツビューエル (オーストリア) のトニー・ザイラー (Toni Sailer) である。これ以降、日本選手は冬季オリンピックのアルペン競技でメダルを 1 個も獲得していない。1972 年に札幌で冬季オリンピックが開催された。開催にあたり、木下 (是雄)⁵⁾を中心にスキーの科学的研究が行われ、その成果は“日本のスキー科学”⁶⁾にまとめられた。この書籍の発行所は日立製作所で、非売品である。木下は物理学者で、学習院大学の学長を務めた。札幌冬季オリンピック開催にあたり、アルペンスキー競技に適する雪面を作る研究もなされた。その研究成果も同書籍に収められている。この書籍には英語版⁷⁾があり、世界のスキー科学研究者に参考にされている。一般スキー場ならびに競技斜面の雪面の作製とメンテナンスに関する最近の書籍⁸⁾も紹介しておく。ところで、アテネは北緯 38 度であるが、北緯 37 度の越後湯沢や野沢は平地にもかかわらずスキーを楽しむのに十分の積雪がある。これは日本列島の北に日本海があるからだそうである。

アルペンスキーの力学で問題となるのは、直滑降と回転滑走である。この両者の運動に密接に関係するのが、スキーヤー、スキー板、空気抵抗ならびに雪とスキー板滑走面の間の摩擦等である。なお、回転滑走は摩擦抵抗という用語で科学的に取り扱えないことをここで強調しておきたい。以下に、これらの事項について解説し、関連文献を紹介する。なお、スキー技術の歴史等を解説する能力は筆者にはないので、中浦の著書⁹⁾(少し古いが)を紹介しておく。

2 直滑降の力学

雪の斜面をまっすぐ滑降するスキーヤーに作用する外力は重力、空気力、摩擦力、雪面よりの反力である。重力の斜面に平行な成分がスキー板—スキーヤー系の推進力となる。重力の斜面垂直成分は斜面反力と釣り合う。

2.1 空気力

系に作用する空気力は、抵抗成分と揚力成分に分解できる。両成分は空気密度 ρ に比例し、速度 v の二乗に比例、スキーヤーの前面積 S に比例する。揚力は系の運動に大きな影響を持たないので、ここでは空気抵抗 D のみについて考える。空気抵抗 D は次式で与えられる。

$$D = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_D \quad (1)$$

式(1)で、 C_D は空気抵抗係数である。スキーヤーの三次元形状は複雑なので、この係数の値は風洞実験で求めざるを得ない。三浦雄一郎は1964年イタリアで開催されたスキースピードレースに参加するにあたり、防衛庁技術研究本部第三研究所の所長の協力を得て、実際に風洞の測定部に入って空気抵抗の少ない姿勢を模索した¹⁰⁾。このスキースピードレースは現在も開催されており、時速 240 km を超えている¹¹⁾。この競技は動力を使わない最速のスポーツと言われている。なお所長の弟が経営する海研工業(株)では、GFRP(ガラス繊維強化プラスチック)製のスキー板を当時すでに販売していた。クナイスル社のGFRP製のスキー板ホワイトスターは1960年発売らしいのでどちらが早いのかという感じである。

ちなみに、世界最初のFRP製グライダー(LBS-2)を製作し、1956年に初飛行させたのは東京大学の林毅である¹²⁾。スキーヤーに作用する空気力測定の方洞実験に関する最近の論文を2編紹介しておく^{13),14)}。

2.2 雪とスキー板滑走面の間の摩擦

スキーヤーが雪面上を高速で滑走できるのは、動摩擦係数が小(0.02以下の測定値もある)だからである。摩擦係数が小になる理由については現在もいくつかの説があるようである。O. Reynolds(レイノルズ数の?)は圧力が氷に作用すると、融解して水の膜ができるために摩擦が小になるとする圧力融解説を唱えた。Bowdenはスキー板を使って実験を行い、 -20°C でもスキーが滑降できることから考えて、圧力融解ではなくて摩擦融解のため摩擦係数が小になると結論した¹⁵⁾。日本の研究としては、新保のスキーのための実験研究があげられる¹⁶⁾⁻²⁰⁾。また、北海道大学の吉田²¹⁾、黒岩^{22),23)}、木下(誠一)²⁴⁾の雪に関する著書、論文を紹介しておく。摩擦係数に関する理論的研究としては、U.S. Army Cold Regions Research & Engineering Laboratory(CRREL)のColbeckの研究があげられる^{25),26)}。

2.3 直滑降の運動方程式

図1に示すスキースキーヤー系の運動方程式は、系を質量 m の質点とし、揚力を無視して式(2)で与えられる。

式(2)で、 x は斜面に平行下向きに取った座標、 t は時刻、 g は重力加速度、 ϕ は斜面の傾斜角、 μ は動摩擦係数である。この微分方程式は簡単に解けて、たとえば終速度も求められる。詳しくは、筆者の

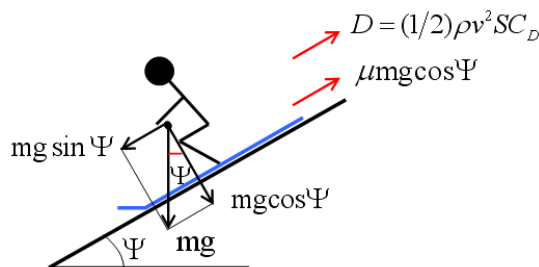


図1 斜面上のスキーヤーに作用する力

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = mg \sin \psi - \mu mg \cos \psi - D \quad (2)$$

JSEA 機関誌の解説²⁷⁾を参照されたい。式(2)を解くと、空気抵抗が速度に決定的な影響を持っていることがわかる。スキーヤーの滑降姿勢により空気抵抗値は大きく変化する。

3 回転滑走の力学

直線運動している物体が方向を変えるには外から横方向に作用する力が必要である。スキーヤー系が回転運動をするには求心力が必要である。この求心力を系はどうして獲得するのであろうか。シュテムボーゲンやシュテムクリスチャニアの場合には、想定する回転弧の外側のスキー板を開き出し、雪にぶつけるか雪を削るかして求心力を得る。つまり、現時点の速度方向に対し外側スキー板の長軸方向を傾ける。また、パラレルクリスチャニアの場合には、何らかの方法で両方のスキー板の長軸を同時に速度方向に対し傾けて求心力を得る。この回転技術はスキッドターン (skidding turn) と呼ばれている。

20 年ほど前からカービングスキー板が使用されるようになった。この板の平面形状を図 2 に示すが、板の中央部の幅が前部と後部の幅より小である。この幅変化をサイドカット (side cut) と、幅変化の度合いを円弧で近似してその半径を *radius* と言っている。この板を使用する回転技術をカービングターン (carving turn) という。刻む、彫るという意味の *carve* で、1993 年発行のランダムハウス英和大辞典には“(スキー) エッジを効かせて向きを変える”との記載がすでにある。カービングスキー板は、モノスキー板であるスノーボード板より派生したのではないかと筆者は思う。

3.1 回転滑走するための求心力

一般スキー場や競技斜面の雪質はいろいろである。先に述べた求心力は雪質によりその発生メカニズムが異なる。粉雪やザラメ雪のときには、流体力学における運動量の法則の応用である噴流を考えて(雪は流体ではないが) 求心力を求めることができると



図 2 カービングスキー板の一例

筆者らは考えた。また一般スキー場のグルーミングされた(固く整えられた)斜面の雪や競技斜面の雪(というより氷)には、傾斜切削抵抗を考えて求心力を求められると筆者らは考えた²⁸⁾。本解説では切削抵抗についてのみ述べる。切削抵抗は切削加工学で使用される用語である。

刃物で木材や金属材料を切削する際には、刃物を加工材に押し込むための切削力が必要である。切削力の反力が切削抵抗力である。直線状の切刃が切削運動方向に直角な場合を二次元切削、直角でない場合を三次元(傾斜)切削という。図 3 に切削刃物の場合の例を示す。同図の α_n はすくい角であるが、スキー板の場合は負の値となる。刃面はスキー板底面に対応する。角 *i* は傾斜角と呼ばれ、*i*=0 が二次元切削となる。スキー板の角付け角(スキー板底面と雪面との角)は $\pi/2-|\alpha_n|$ で、迎え角(速度方向とスキー板長軸との角)は $\pi/2-i$ で与えられる。

切削力は一般に実験により求められる。Lieu & Mote は氷の二次元切削実験を行った²⁹⁾。また、Renshaw & Mote はこの実験結果をもとにカービングターンについて考察している³⁰⁾。Mote は 1995 年まで *Skiing Trauma and Safety: International Symposium* をスポーツ医学者の R.J. Johnson とともに主催していた。Mote は機械工学者で University of California, Berkley にいたが、1998 年から 2010 年まで University of Maryland の学長を務めた。筆者らは氷の三次元切削実験を行ったが³¹⁾、氷を mm 単位の切削深さで切削できず、最大で 70 μm であった。ち

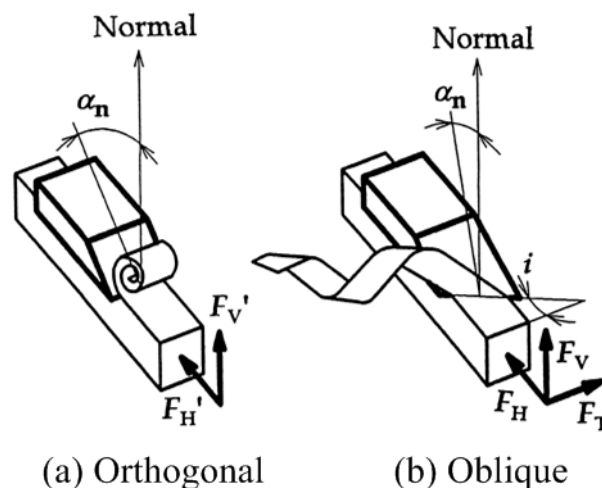


図 3 二次元切削と三次元(傾斜)切削

なみに Lieu & Mote は深さ 1 mm まで切削している。筆者らは、さらに締まり雪の三次元切削実験を行った³²⁾。この三次元切削実験で、切削方向とその直交方向の切削抵抗値を計測した。切削抵抗力は角付け角と迎え角の関数である。この計測値をもとに作った切削抵抗力の実験式により回転滑走のシミュレーションを行った。このようなシミュレーションは筆者らが最初に行ったと思われる。

3.2 回転滑走の運動方程式

スキー板—スキーヤー系を剛体と考え、滑走斜面上における平面運動（二次元運動）をここでは取り扱う。系の質量中心はスキー板より上に位置するが、これをスキー板の面内に置いて問題を取り扱った。また問題の本質を損なわないと考えたのでスキー板は一本とした。ただし、スキー板の両サイドは平行（サイドカットがない）とする。図4は平坦な斜面を系が山回りターンをしている状態を示している。斜面下向きに x 軸、水平方向に y 軸をとる。 \mathbf{V} は速度ベクトル、 β はスキー板長軸と y 軸との角、 γ は長軸と速度方向との角（迎え角）を表している。系は二次元剛体とし、その慣性モーメントを I 、 R_T と R_L をスキー板長軸と直交方向、長軸の逆方向の切削抵抗力の合力とすると式(3)の運動方程式が書ける。式(3)中の R_{CF} 、 R_{CR} は、系の質量中心の前部と後部に分けた切削抵抗力の長軸に直交方向成分である。また、 l_F 、 l_R は R_{CF} 、 R_{CR} の作用点と質量中心との間の距離である。

$$\begin{aligned} m \frac{d^2 x}{dt^2} &= -R_T \cos \beta - R_L \sin \beta + mg \sin \psi \\ m \frac{d^2 y}{dt^2} &= R_T \sin \beta - R_L \cos \beta \\ I \frac{d^2 \beta}{dt^2} &= -R_{CF} l_F + R_{CR} l_R \end{aligned} \quad (3)$$

当初筆者らは実験を行っていなかったため、まず Lieu & Mote の二次元切削実験データ²⁹⁾を Usui & Hirota³³⁾の考え方にに基づき三次元（傾斜）切削に適用可能にした。ついで、式(3)を与えられた初期条件のもとで Runge-Kutta 法で解いて、回転滑走のシュプールのシミュレーションを行った²⁸⁾。その後、切削

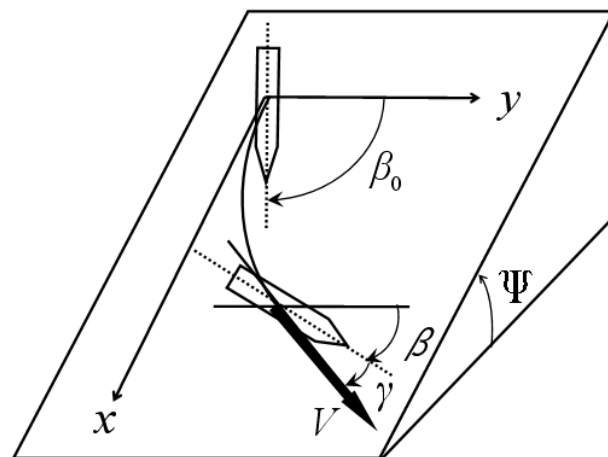


図4 斜面を回転滑走（山回りターン）するスキー

抵抗力として筆者らの雪の切削実験に基づく実験式を使用してシミュレーションを行った³²⁾。

筆者らの研究を Federolf, Luthi, Rhyner & Dual は進展させた³⁴⁾。彼らは回転滑走中のスキーヤーとスキー板間の力およびスキー板の角付け角を測定し、これらを境界条件として有限要素法（FEM）によりスキー板の変形を計算して、カービングターンによる回転滑走をシミュレートした。このシミュレート結果と実際の滑走シュプールとスキー板の変形を比較して良い一致を得た。上記4名の内ははじめの3名はダボス（スイス）の Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research（SLF）に在籍していた。Federolfらの最近の論文も紹介しておく³⁵⁾。

質量中心を本来の位置で取り扱ったのは Hasegawa & Shimizu³⁶⁾である。彼らは清水の製作したスキーロボットの動きをシミュレートした。スキー板を一本の直棒で、スキーヤーを折れ曲がった棒でモデル化して、回転滑走を転倒せずに持続できる条件等を検討した。ただし、求心力は摩擦によるものとしている。

3.3 カービングターンとは何か

回転滑走のための求心力を得るには雪面を切削する必要がある。傾斜切削をすると切削抵抗力がスキー板に作用する。切削抵抗力は、速度方向に直交する成分と平行な成分に分解できる。二次元切削では直交成分は0である。速度に直交する成分が回転滑走に必要な求心力となるが、平行な成分は速度と逆方向の抵抗力となり運動を減速させる作用を持つ。

回転滑走する系は求心力による公転と系の質量中心回りの自転をしている。自転は質量中心の前部と後部のスキー板長軸に直交する切削抵抗力が質量中心回りに作るモーメントにより生じる。式(3)の第3式を β の正負に注意してみると、**図4**の山回りターンの場合、後部の作るモーメントは山回り方向の自転を妨げる作用を持つことがわかる。切削抵抗力は角付け角と迎え角の関数であるが、角度が小ならおおよそそれぞれの角に比例する³⁷⁾。カービングスキー板の場合はサイドカットのため後部の迎え角は前部の迎え角より小である。このためスキッドターンにおいてもサイドカットがあると自転が容易となる。この効果はスキー板を角付けしてたわませることによっても得られる。

カービングターンではスキー板前部のエッジで雪面を彫って(切削して)、求心力と系の自転のためのモーメントを獲得する。前部が雪面に彫った円弧状の溝の中を板のサイドカットとたわみの効果で後部が収まって滑る。このとき後部は雪面を切削していないので、減速作用を持っていない。しかし、溝側面より求心力を獲得している。円弧状の軌道(レール)を車輪が転がって求心力を得るのと同じ原理である。スキー板後部は求心力を獲得するが、減速作用を持っていない。これが、競技スキーでカービングターンは高速だと言われる理由である。注意したいことは雪面を少しでも傾斜切削しないと求心力は得られないことである。スキッドターンではスキー板の前部と後部で雪面を削るが、理想的なカービングターンでは前部だけが雪面を削る。カービングターン状態を実現するためには複雑な条件を満足する必要があり、スキーヤーに高度な技術が要求される。

3.4 スキー板について

スキー板の材料は、単板、合板、メタル、FRPと変化してきた。単板は一枚板のスキー板のことで、ヒッコリー、いたや、みずなら等の木材が使われていた。メタルスキーを最初に作ったのは航空技術者であったアメリカ人 H. Head である。単板以降のスキー板断面は積層構造である。Sakata は 1975 年から 1985 年の 11 年間に市販された 700 本以上のスキー板の曲げ剛性、ねじり剛性の測定を行った³⁸⁾。測定された曲げ剛性値のばらつきは、ねじり剛性のばら

つきより小であった。したがって曲げ剛性の方がスキー板の性能に重要ではないかと述べている。棚橋は複合構造体であるスキー板の曲げ剛性分布、ねじり剛性分布の計算法と設計法を提案した^{39),40)}。さて、現在はカービング板、カービングターンの時代である。カービング板の登場は革新的であり、その特徴はその平面形状にある。Yoneyama et al.⁴¹⁾は、スキーメーカーのテストに雪斜面を大回りでカービングターンしてもらい、スキー板底面の圧力分布、スキー靴と板の間の力、板のひずみを測定してたわみを求めている。なおスキー靴、締め具(binding)、エッジ等も板と同様に改良され、進歩してきた。

4 アルペンスキー競技と最速径路

4.1 国際スキー連盟 (International Ski Federation; FIS)

FIS は北半球の冬季に各種スキー競技の World Cup Race を主催している。そのうちのアルペン競技には、滑降(down hill, DH)、スーパー大回転(super giant slalom, Super-G)、大回転(giant slalom, GS)、回転(slalom, SL)等の男女種目ある。また、冬季オリンピックでもアルペンスキー競技が行われ、世界選手権大会(World Championships)も開催されている。2009-2010年シーズンにはワールドカップレースと冬季オリンピックの両方が開催された。

4.2 旗門間の最速径路

DH, Super-G, GS, SL 競技では斜面に設定された多数の旗門を通過してゴールする時間を競う。その際どんな径路で滑走すると一番速いかが大問題である。この径路のとり方をライン取りと言っているようである。旗門と旗門を結ぶ直線が最速の径路ではない。ジグザクに折れ曲がった直線の径路を雪面よりの大きな抵抗なくして回転滑走できる訳がない。ではどのような径路が最速なのだろうか? この問題に筆者は最適制御理論を適用してみた。なお DH, Super-G, GS においては空気抵抗を最小にする姿勢を選手の運動能力、体力を最大限に使って取る必要があることは言うまでもない。

まず最適制御とは何かを説明する。質点が重力の作用で**図5**に示す同一鉛直面内のA点とB点を結ぶ摩擦のない径路を初速0で降下するとする。このと

き最短時間で降下する曲線を最速降下線 (brachistochrone) という。A 点と B 点を結ぶ直線がそれではなく、図中に示す曲線が最速降下線である。この曲線は変分法により計算できるが、これを最適制御の問題として求めることもできる。その制御変数は図中の角 $\gamma(t)$ で、状態変数は位置 $x(t), y(t)$ で、評価関数を到達時刻 t_f とする。ここで t は媒介変数であるところの時刻である。この最適制御問題を変分法により定式化して解くこともできる⁴²⁾。この方法を間接法といている。また制御変数と状態変数を時刻に関して離散化して最適化問題とし、数理計画法を使って解くこともできる⁴³⁾。この方法を直接法といている。

筆者は旗門間の最速径路問題を最適制御問題として定式化し、これを直接法で解くことにした。図 4 に示したような平坦な斜面に出発点と終点の旗門があり、その間に 1 旗門が設定されているという簡単な問題を取り扱った³⁷⁾。この回転滑走は式(3)で記述されるものとする。制御変数としては角付け角を選んだが、この角はスキヤーの動作で決められると考えた。系にかかる切削抵抗力は角付け角と迎え角の関数であるが、これを締めり雪で行った実験データ³²⁾をもとにした簡単な関数で近似した。迎え角は式(3)を解く過程で求まる。数値計算は MATLAB により行ったが、収束解を得るための出発値の設定には大変な困難を伴った。この研究は最適径路を最適制御問題として取り扱うことができるということを示しただけであったと認識している。しかし、今後工夫を重ねていけば実際に役立つ最速径路を見出せるのではないかと考えている。

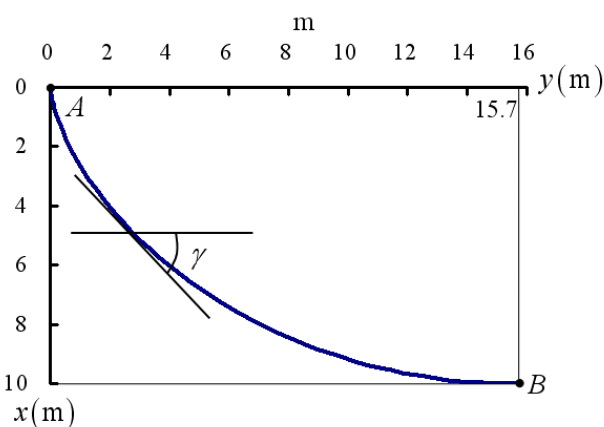


図 5 最速降下線 (x 軸：鉛直方向, y 軸：水平方向)

4.3 回転競技の滑走順とタイムとの相関について

ワールドカップ (Alpine FIS World Cup) の回転競技 (SL) では異なる旗門設定で 2 回滑走し、その合計タイムで順位 (rank) を決める。1 回目は FIS points で決められる第 1 シード選手 15 名について 1 位から 7 位、8 位から 15 位のそれぞれのグループ内のドローで滑走順を決める。FIS ポイント 15 位以降はポイント順で滑走する。1 回目の上位 30 名のみが 2 回目の回転競技に出場できる。2 回目の滑走順は、1 回目のタイム順位の逆順である。2 回目の滑走では 1 回目で好成績の選手ほど滑走順が後になる。

滑走順が後になるほど滑走斜面が荒れて不利になると言われている。筆者は本当にそうだろうかと思って、2009-2010 シーズンの FIS World Cup 回転競技 (SL) のデータをもとに相関係数による考察を行った。上記シーズン中に FIS 男子回転競技は異なるスキー場で 9 回行われた。日本からは佐々木、皆川、湯浅の 3 選手が参戦していた。生データは FIS のウェブサイト (<http://www.fis-ski.com>) を参照されたい。なお FIS World Cup の Official Results 表には各選手が使用したスキー板のメーカー名!! が示されている。なおスキー用具のことをマテリアルズ (materials) と呼んでいる。

付表に FIS データをもとに算出した 2 回とも完走した選手についての各種相関係数値を示した。HH-JJ は 2 回とも完走した選手の 1 回目滑走順位とタイム順位の相関係数、II-KK は 2 回とも完走した選手の 2 回目滑走順位とタイム順位の相関係数である。順位相関係数値は Spearman の順位相関係数値と同一である。順位相関係数は一般の人にも理解が容易であろう。1 回目には強い正の順位相関が見られる。強い選手の滑走順位が前だからか、滑走順位が前だと雪面が荒れていないためか、その両方かである。2 回目については滑走順位が 1 回目成績の逆順になっているが、順位相関係数値が正の場合も負の場合もあり、その絶対値は小である。つまり 2 回目は滑走順位とタイム順位との間にほとんど相関がない。2 回目での滑走順位が後になる 1 回目高順位の選手は、雪面が荒れていても巧みに回転滑走していると考えられる。このことは AA-DD (最終順位 - 2 回目タイム) に正の相関が見られることから明

らかであろう。なお最終戦 Garmisch Partenkirchen での SL 競技は選ばれた選手のみが出場する特別な試合である。回転競技では何人も滑ると雪面が削られて溝ができるが、溝のバンクを上手に滑ると雪面を削らなくても求心力を得られるので速いと筆者は考えている。強い選手はバンクを利用して巧みに回転滑走できるのではないかと考えている。

5 おわりに

筆者らの研究ではスキー板—スキーヤー系の質量中心の位置を斜面上に取ったが、この位置を斜面より上に取って系を三次元剛体として取り扱う必要がある。またスキーヤーの動作により質量中心位置を前後、左右、上下に移動させたときに回転滑走径路がどうなるのかはなほだ興味がある。さらにスキーヤーの複雑な動作をシミュレーションに取り入れることも可能ではないかと考えている。

本稿のアルペンスキーの科学、力学に関する記述については正確を期したつもりである。しかし、その他の一般的な記述については不正確な点があるかと思う。ご容赦いただきたい。

末尾となるが、スポーツ工学研究会の立ち上げと運営にご尽力された先輩、諸兄に深く敬意を表します。また JSEA 機関誌の最終号に執筆の機会を与えていただいた編集委員会に謝意を表します。

文献

- 1) レルヒの会, 上越市立総合博物館編, スキー発祥思い出アルバム, 第1版第2刷, ベースボール・マガジン社, 1990
- 2) 中谷宇吉郎, 雪, 第36刷, 岩波新書, 岩波書店 (第1刷1938), 1987
- 3) 猪谷千春, わが人生のシュプール, ベースボール・マガジン社, 1994
- 4) 猪谷六合雄, 雪に生きる (上, 下), ベースボール・マガジン社, 1986
- 5) 木下是雄, スキーの科学, 中公新書, 中央公論社, 1973
- 6) スキー科学研究会編, 日本のスキー科学, 再版, 日立製作所, 1972
- 7) The Society of Ski Science (Ed.), Scientific Study of Skiing in Japan, Hitachi Ltd., 1971
- 8) Fauve, M. et al., Preparation and maintenance of pistes (Handbook for practitioners), Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research, 2002
- 9) 中浦皓至, スキー技術の歴史と系統, 北海道大学図書刊行会, 1991
- 10) 三浦雄一郎, スキー超特急, 中公文庫, 中央公論社, 1983
- 11) Thomson, B.E. et al., Aerodynamics of speed skiers, *Sports Engineering*, **4**(2), 2001, pp.103-112
- 12) Hoff, N.J., Innovation in aircraft structures – fifty years ago and today, AIAA paper 84-0840, 1984, p.7
- 13) Luethi, S.M. & Denoth, J., The influence of aerodynamic and anthropometric factors on speed in skiing, *International Journal of Sport Biomechanics*, **3**, 1987, pp.345-352
- 14) Barelle, C. et al., Experimental model of the aerodynamic drag coefficient in alpine skiing, *Journal of Applied Biomechanics*, **20**, 2004, pp.167-176
- 15) Bowden, F.P., Friction on snow and ice, *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, 217, 1953, pp.462-478.
- 16) 新保正樹, 雪上の滑走と摩擦 第1報—雪上の摩擦測定と滑走速度および接雪圧の影響について—, 雪氷, **21**(5), 1959, pp.139-143
- 17) 新保正樹, 雪上の滑走と摩擦 第2報—雪上におけるプラスチックの摩擦について—, 雪氷, **21**(6), 1959, pp.171-177
- 18) 新保正樹, 雪上の滑走と摩擦 第3報—スキーワックスの諸現象について—, 雪氷, **22**(2), 1960, pp.48-54
- 19) 新保正樹, 雪上の滑走と摩擦 第4報 砕氷および有機結晶上のモデル実験について, 雪氷, **22**(4), 1960, pp.113-119
- 20) 新保正樹, 雪上の滑走と摩擦 第5報 低温室における研究, 雪氷, **22**(5), 1960, pp.147-156
- 21) 吉田順五, 雪の科学, NHK ブックス, 日本放送出版協会, 1971
- 22) 黒岩大助, スキーヤーのための雪の科学, 共立出版, 1972
- 23) Kuroiwa, D., The kinetic friction of snow and ice,

Journal of Glaciology, **19**(81), 1977, pp.141-152

24) 木下誠一, 雪の話・氷の話, 第5刷, 丸善, 1996

25) Colbeck, S.C., Bibliography on Snow and Ice Friction, 1993, CRREL Special Report 93-6

26) Colbeck, S.C., A review of the friction of snow ski, *Journal of Sports Sciences*, **12**, 1994, pp.285-295

27) 平野陽一, アルペンスキーの力学と最速径路, スポーツ工学 (JSEA 機関誌), **3**, 2008, pp.47-55

28) Hirano, Y. & Tada, N., Numerical simulation of a turning alpine ski during recreational skiing, *Medicine and Science in Sports and Exercise*, **28**, 1996, pp.1209-1213

29) Lieu, D.K. & Mote, C.D., Experiments in the machining of ice at negative rake angles, *Journal of Glaciology*, **30**, 1984, pp.77-81

30) Renshaw, A.A. & Mote, C.D., A model for the turning snow ski, *International Journal of Mechanical Sciences*, **31**, 1989, pp.721-736

31) Tada, N. & Hirano, Y., Simulation of a turning ski using ice cutting data, *Sports Engineering*, **2**(1), 1999, pp.55-64

32) Tada, N. & Hirano, Y., In search of the mechanics of a turning alpine ski using snow cutting force measurements, *Sports Engineering*, **5**(1), 2002, pp.15-22

33) Usui, E. & Hirota, A., Analytical prediction of three dimensional cutting process (Part 2), *Journal of Engineering for Industry*, **100**, 1978, pp.229-235

34) Federolf, P. et al., Finite element simulation of carving skis and their interaction with snow, *Proceedings of the First International Working Conference IT and Sport & 5th Conference dvs-Section Computer Science in Sport*, 2004, pp.51-55

35) Federolf, P. et al., Finite element simulation of the ski-snow interaction of an alpine ski in a carved turn, *Sports Engineering*, **12**(3), 2010, pp.123-133

36) Hasegawa, K. & Shimizu, S., Alpine ski robots and dynamical analysis of skiing turn, in *The Engineering of Sport* (ed. Haake, S.J.), 1998, pp.497-505

37) Hirano, Y., Quickest descent line during alpine skiing, *Sports Engineering*, **9**(4), 2006, 221-228

38) Sakata, T., Considerations on mechanical properties

of skis, in *Skiing Trauma and Safety: Sixth International Symposium*, ASTM STP 938, (eds. Mote, C.D. and Johnson, R.J.), American Society for Testing and Materials, 1987, pp.86-99

39) 棚橋良次, スキー複合構造体の曲げ剛性設計法, 日本複合材料学会誌, **19**(6), 1993, pp.224-232

40) 棚橋良次, スキー複合構造体のねじり剛性の計算, 日本複合材料学会誌, **20**(5), 1994, pp.178-186

41) Yoneyama, T. et al., Investigation on the ski-snow interaction in a carved turn based on the actual measurement, *Proceedings of 8th Conference of the International Sports Engineering Association, Procedia Engineering*, **2**(2), 2010, pp.2901-2906

42) 加藤寛一郎, 工学的最適制御, 東京大学出版会 1993, p.106

43) 鈴木真二, 軌道最適化問題の新たな展開, 日本航空宇宙学会誌, **47**, 1999, pp.106-111

付表 FIS World Cup Race 2009-2010SL 競技における 2 回とも完走した選手の成績に関する各種相関係数

Place	AA - CC	AA - DD	AA - BB	CC - DD	FF - CC	GG - DD	HH - JJ	II - KK
Levi	0.6619	0.7525	0.5735	0.0569	0.7144	-0.1263	0.7142	-0.1439
Alta Badia	0.7118	0.8653	0.5991	0.3126	0.6730	-0.2291	0.6219	-0.2734
Zagreb	0.6694	0.6281	0.5448	0.1485	0.6603	-0.1724	0.6875	0.0279
Adelboden	0.7893	0.7465	0.8225	0.1944	0.7539	-0.2349	0.8046	-0.1925
Wengen	0.9146	0.4694	0.7011	0.0811	0.7158	-0.1438	0.7564	0.3321
Kitzbuhel	0.2908	0.7497	0.4051	-0.3607	0.7016	0.2820	0.7764	0.1364
Schladming	0.7907	0.8308	0.6351	0.4316	0.7378	-0.3996	0.8085	-0.3215
Kranjska Gora	0.8166	0.5938	0.6689	0.0487	0.8125	-0.0695	0.8708	-0.0308
Garmisch Partenkirchen	0.8589	0.6638	0.4304	0.2196	0.3509	-0.2751	0.3137	-0.2353

- AA-CC: rank - 1st run time (最終順位 - 1 回目タイム)
- AA-DD: rank - 2nd run time (最終順位 - 2 回目タイム)
- AA-BB: rank - bib number (最終順位 - 1 回目スタート順番「ビブ番号」)
- CC-DD: 1st run time - 2nd run time (1 回目タイム - 2 回目タイム)
- FF-CC: 1st run start order - 1st run time (1 回目スタート順番 - 1 回目タイム)
- GG-DD: 2nd run start order - 2nd run time (2 回目スタート順番 - 2 回目タイム)
- HH-JJ: 1st run time order - 1st run start order adjusted
(2 回とも完走者についての 1 回目タイム順位 - 2 回とも完走者についての 1 回目スタート順位)
- II-KK: 2nd run time order - 2nd run start order adjusted
(2 回とも完走者についての 2 回目タイム順位 - 2 回とも完走者についての 2 回目スタート順位)

注： HH-JJ と II-KK の相関係数値は Spearman の順位相関係数値に等しい。

BB と FF は同一データ。ビブ (bib) はいわゆるゼッケンのこと。

順位は 2 回とも完走者についての順。順番は完走しなかった選手にも付いている。