

スピードスケートにおける滑走姿勢の相違が 空気抵抗力に及ぼす影響

The influence of air resistance on different skating postures in speed skating

湯田 淳¹⁾ 青柳 徹²⁾ 高松 潤 二³⁾
山辺 芳³⁾ 鈴木 恵 一⁴⁾

Jun YUDA, Toru AOYANAGI, Junji TAKAMATSU
Kaoru YAMANOE and Keiichi SUZUKI

Abstract

The purpose of this investigation was to obtain useful information for enhancing the performance of speed skaters by analyzing the influence of air resistance on different skating postures. Eight male skaters participated in a wind tunnel experiment, where air frictional forces (drag forces) under different skating postures were determined using a force platform (1 kHz). The skaters were videotaped with a digital video camera (60 fps) from a side by using a two-dimensional DLT method. The two-dimensional coordinates of the body were collected to calculate the segment angles (torso, thigh, and shank) in the sagittal plane. The torso, thigh, and shank angles in the normal skating posture were 11.0 ± 5.2 deg, 27.5 ± 9.4 deg, and 59.5 ± 5.7 deg, respectively. Although the air frictional force in the normal skating posture (17.3 ± 2.1 N) was significantly smaller than those in a high skating posture (22.8 ± 2.3 N, $p < 0.001$) and the highest skating posture (28.8 ± 2.4 N, $p < 0.001$), it was not significantly different than those in a low skating posture (15.4 ± 0.9 N) and the lowest skating posture (14.7 ± 1.1 N). This indicates that the air frictional force remarkably increases with the height of skating posture. Moreover, although in a low skating posture, skaters experienced great stress on their lower limbs, the decrease achieved in the air resistance by greatly decreasing the height of skating posture was remarkably small. Thus, the normal skating posture presented in this study would be rational skating posture for minimizing the air resistance and maintaining the skating movement.

keywords : speed skating, air frictional force, skating posture, wind tunnel experiment

I. 緒 言

スピードスケートにおける滑走速度は、スケーターのプッシュオフによるパワー出力と、空気抵抗および氷摩擦抵抗によるパワー損失との差分によって決定される^{6,7)}。このため、大きな速度で滑走するためにはプッシュオフによるパワー出力を大きくすることが要求されるが、同時に空気抵抗力および氷摩擦抵抗力といった減速要因を小さくすることも重要な課題となる。特に、空気抵抗力が滑走速度に及ぼす影響は大きく、滑走中の空気抵抗と氷摩擦抵抗によるパワー損失の比はおおよそ7対3とも報告されている¹⁾。また、移

動中の物体に作用する空気抵抗力は速度の2乗に比例して増大することを考慮すると、滑走速度が最大で16 m/s (およそ時速60km) にも達する極めて大きな速度を有するスピードスケート滑走においては、空気抵抗力は競技成績に影響を及ぼす重要な要因といえる。

空気抵抗力がスピードスケートのパフォーマンスに及ぼす影響についてはいくつかの報告がみられる。Rundell²⁾は、5～7名の集団での4分間ショートトラック滑走中の心拍数および運動後の血中乳酸濃度を測定し、後方追従時では先頭時よりもこれらの値が有意に小さかったことから、空気抵抗力の減少が身体への負担を大きく軽減させることを示唆している。また、de Koning and van Ingen Schenau³⁾は、スケートリンクにおける外的条件の影響について検討し、気圧の低下および標高の増大による空気密度の低下によってレース中の滑走タイムは数パーセントの範囲内で向上

1) 日本女子体育大学 (講師)
2) 日本体育大学女子短期大学部 (准教授)
3) 国立スポーツ科学センタースポーツ科学研究部
4) 財団法人日本スケート連盟

することを報告している。さらに、湯田ら⁹⁾は、風洞実験によって2名の縦列滑走時における空気抵抗力を測定している。その結果、後方追従時では単独時よりも空気抵抗力は有意に小さく、その差は6 N程度であったことを明らかにし、空気抵抗力の減少がパフォーマンスに及ぼす効果は大きいことを報告している。これらの報告はスピードスケート競技における空気抵抗力の減少の重要性を示唆するものといえよう。一方、van Ingen Schenau⁵⁾は、滑走中のスケーターに作用する空気抵抗力(F_{air})を以下の式によって表し、風洞実験を用いてスピードスケート単独滑走時における空気抵抗力について検討している。

$$F_{\text{air}} = \frac{1}{2} C_d A \rho v^2$$

ここで、 C_d は空気抵抗係数、 A はスケーターの前投影面積、 ρ は空気密度、 v は滑走速度である。その結果、体幹が水平に対してなす角度および膝関節角度を小さくすることにより空気抵抗力が減少し、滑走速度が高まることが報告されている。また、膝関節角度については、その角度変化が筋出力に影響するため、筋代謝や疲労との関連からパフォーマンスに対する最適膝角度の予測は困難であると述べられている。このように、空気抵抗力の軽減という観点からは滑走姿勢は低くする必要があるといえるが、滑走中の下肢の疲労を考慮すると、姿勢を低くしすぎることは必ずしも優れた成績を出すことに繋がらないとも考えられる。このため、スピードスケートにおける合理的な滑走姿勢は明確となっておらず、競技現場においては指導者ごとに解釈が異なっているのが現状である。また、van Ingen Schenau⁵⁾の実験では体型の大きな6名のオランダ人スケーターが被験者として用いられており、体型の異なる日本人スケーターにおける滑走姿勢と空気抵抗力との関係については再検討が必要といえる。

本研究の目的は、風洞実験によってスピードスケートにおける滑走姿勢の相違が空気抵抗力に及ぼす影響について検討することによって合理的な滑走姿勢を明らかにすることである。

II. 方 法

1. 被 験 者

被験者には、スピードスケート競技を専門とする男子選手8名(身長、 $1.69 \pm 0.04\text{m}$; 体重、 $63.9 \pm 5.0\text{kg}$)を用いた。計測に先立ってこれらの被験者には、研究

のねらいや意義、計測状況、安全性などを説明し、被験者と指導者(コーチ)から協力の同意を得た。

2. データ収集法

実験は、噴出し口の直径が3 mである円形噴流型の風洞実験装置(東京大学先端科学技術研究センター)を用い、測定範囲内に埋設したストレインゲージ式フォースプレート(日章電気社製、LMC-6524-100S)によりサンプリング周波数1 kHzにて被験者に作用する地面反力を測定した(図1)。本研究では図2に示す2つの設定によって実験を行った。1つ目の設定は、肩の位置の相違による影響について検討するためのものであり、被験者には通常の滑走姿勢、肩を上方および下方に位置させた姿勢といった3種の条件で測定を行った。この際、被験者には股および膝関節の位置はいずれの条件においても同じとし、肩の位置のみを変化させるように指示した。2つ目の設定は、滑走姿勢の高さの影響について検討するためのものであり、被



図1 風洞実験風景

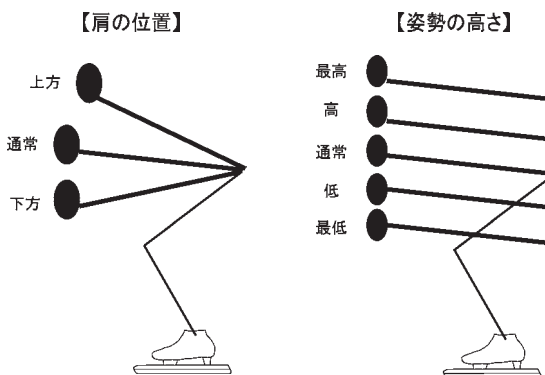


図2 設定した滑走姿勢

験者には通常の滑走姿勢、最も高い姿勢、高い姿勢、最も低い姿勢、低い姿勢の5種の条件で測定を行った。この際、被験者には体幹の姿勢（後述の体幹角）はいずれの条件においても同じとし、膝の位置を変化させることによって姿勢の高低を調節するように指示した。被験者はフォースプレート上に固定したスケート靴を履き、スピードスケート競技用のレーシングスーツを着用して測定を行った。いずれの設定においても風速はスピードスケートレース時に相当する14m/sとし、風速が安定した後に5秒程度滑走姿勢を保持させている間の地面反力をパーソナルコンピュータに取り込んだ。また、各試技は1台のデジタルビデオカメラ（SONY社製、HDR-HC7）を用いて左側方から撮影し（撮影スピードは60fps、露出時間は1/60s）、同期ランプの画像への映し込みおよび同期信号のコンピューターへの取り込みによってVTR画像と地面反力データとの同期を行った。得られたVTR画像からVTR digitizer（DKH社製、Frame-Dias II）により分析点4点（左半身における足関節外果、膝関節中点、大転子および肩関節中点）をデジタル化し、2次元DLT法を用いて分析点の2次元座標を算出した。得られた2次元座標は、残差分析法⁸⁾により最適遮断周波数を決定し、4次のButterworth low-pass digital filterにより平滑化した。なお、1台のデジタルビデオカメラ（SONY社製、HDR-HC7）を用いて各試技の後方からの滑走姿勢を確認したところ（撮影スピードは60fps、露出時間は1/60s）、左右差はほとんどみられなかった。このため、本研究においては滑走姿勢の左右差の影響は無視できると判断し、分析を進めた。

3. 測定項目およびその算出法

1) 空気抵抗力の算出

被験者が滑走姿勢を保持している間（5秒程度）における抗力（Drag）の平均値を求め、これを各試技における空気抵抗力とした。風洞実験は平成19年7月9日に実施され、実験を行う直前（午前）に気象条件の測定を行うことによって風洞内の空気密度（ $\rho=1.163 \text{ kg/m}^3$ ）を算出した。得られた気象条件と気流速度（14 m/s）に加え、選手の肩幅を基準長（0.50m）として算出されたレイノルズ数は 4.413×10^5 であった。なお、午後に行った気象条件の測定によって算出された空気密度およびレイノルズ数はそれぞれ 1.162 kg/m^3 および 4.408×10^5 であり、午前および午後の気象条件の相違による空気抵抗力の差異は0.09%程度と、無視できる

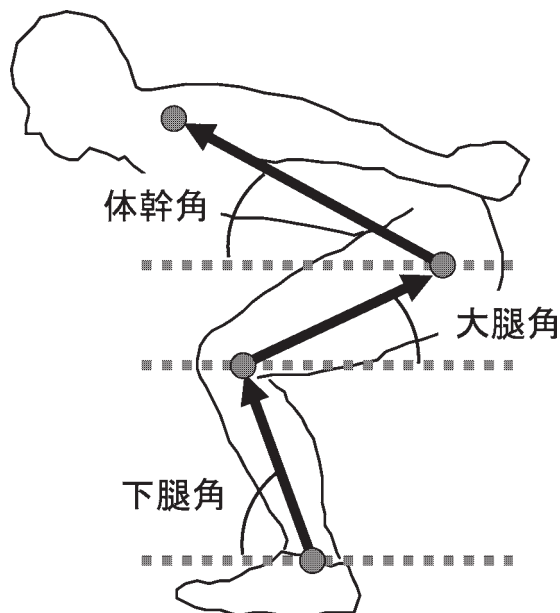


図3 身体部分角度の定義

範囲であった。

2) 身体部分角度の算出

図3に風洞実験における身体部分角度の定義を示した。本研究では体幹角、大腿角および下腿角といった3つの身体部分角度を算出した。それぞれの角度は、左大転子点から左肩関節中点を結ぶベクトルを体幹ベクトル、左膝関節中点から左大転子点を結ぶベクトルを大腿ベクトル、左足関節外果から左膝関節中点を結ぶベクトルを下腿ベクトルとし、これらのベクトルが水平に対してなす角度とした。したがって、これらの角度の値が増大することは、それぞれの身体部分が起き上がることを意味する。いずれの角度も地面反力データを測定している間の平均値を求め、これらを被験者の姿勢を表す指標とした。

4. 統計処理

測定結果における群間の差を検定するために分散分析を行い、F値が有意であった場合はTukeyのHSD法による多重比較を行った。これらの有意水準はいずれも5%以下とした。

III. 結果

1. 肩の位置の相違による変化

図4に肩の位置の相違による体幹角度の変化を平均

値および標準偏差で示した。体幹角度は、肩の位置が上方 ($34.7 \pm 4.6 \text{deg}$)、通常 ($11.6 \pm 5.3 \text{deg}$) および下方 ($-2.7 \pm 5.3 \text{deg}$) のすべての群間において有意差がみられた (上方 > 通常, 通常 > 下方, 上方 > 下方; $p < 0.001$)。

図5に肩の位置の相違による空気抵抗の変化を平均値および標準偏差で示した。空気抵抗は、肩の位置が上方 ($25.4 \pm 2.3 \text{N}$) では、通常 ($17.2 \pm 1.8 \text{N}$) および下方 ($17.3 \pm 1.4 \text{N}$) よりも有意に大きかった ($p <$

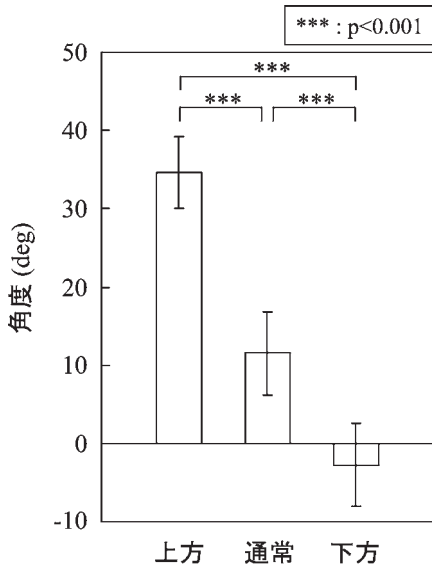


図4 肩の位置の相違による体幹角度の変化

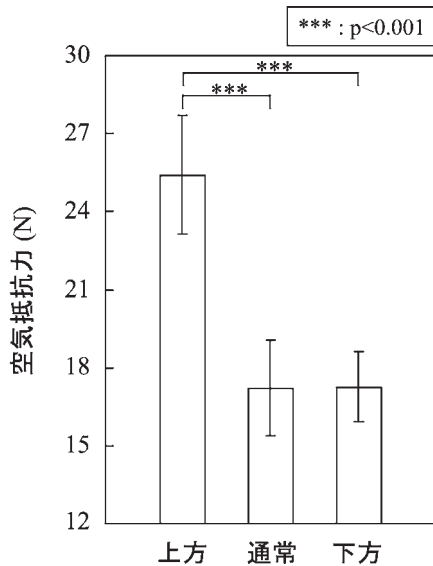


図5 肩の位置の相違による空気抵抗の変化

0.001)。

2. 滑走姿勢の高さの相違による変化

図6に滑走姿勢の高さの相違による身体部分角度の変化を平均値および標準偏差で示した。体幹角度は、滑走姿勢が最高 ($19.0 \pm 5.1 \text{deg}$) と通常 ($11.0 \pm 5.2 \text{deg}$) においてのみ有意差がみられた (最高 > 通常, $p < 0.05$)。大腿角度は、滑走姿勢が最高 ($62.9 \pm 7.3 \text{deg}$)、高 ($45.4 \pm 6.4 \text{deg}$)、通常 ($27.5 \pm 9.4 \text{deg}$)、低 ($15.6 \pm 7.5 \text{deg}$)、最低 ($5.4 \pm 7.6 \text{deg}$) の順に大きく、低と最低との間を除くすべての群間において有意差がみられた ($p < 0.05 \sim p < 0.001$)。下腿角度は、滑走姿勢が最高 ($81.4 \pm 5.8 \text{deg}$)、高 ($68.4 \pm 6.0 \text{deg}$)、通常 ($59.5 \pm 5.7 \text{deg}$)、低 ($53.5 \pm 4.7 \text{deg}$)、最低 ($52.6 \pm 6.3 \text{deg}$)

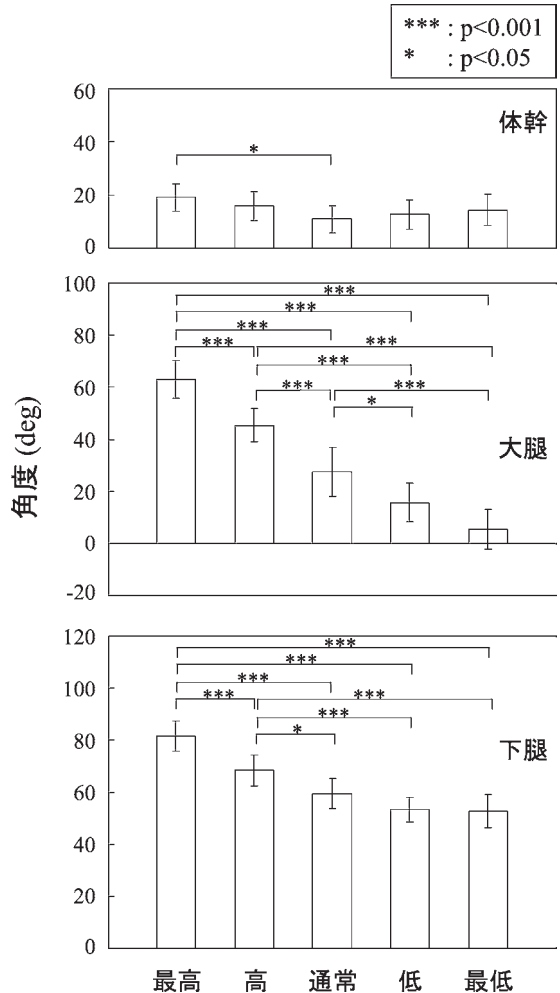


図6 滑走姿勢の高さの相違による身体部分角度の変化

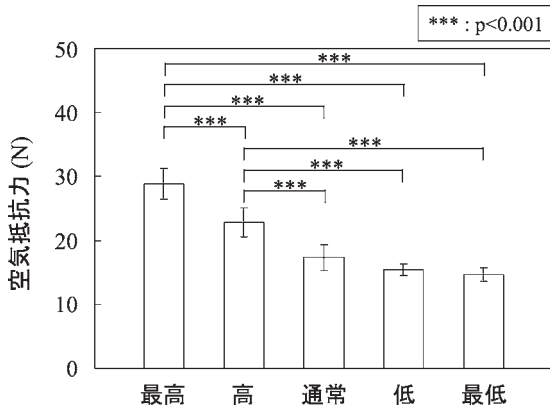


図7 滑走姿勢の高さの相違による空気抵抗力の変化

の順に大きく、通常と低、通常と最低および低と最低との間を除くすべての群間において有意差がみられた ($p < 0.05 \sim p < 0.001$).

図7に滑走姿勢の高さの相違による空気抵抗力の変化を平均値および標準偏差で示した。空気抵抗力は、滑走姿勢が最高 (28.8 ± 2.4 N)、高 (22.8 ± 2.3 N)、通常 (17.3 ± 2.1 N)、低 (15.4 ± 0.9 N)、最低 (14.7 ± 1.1 N)の順に大きく、通常と低、通常と最低および低と最低との間を除くすべての群間において有意差がみられた ($p < 0.001$).

IV. 考 察

Van Ingen Schenau⁵⁾は、体幹角が15度の場合、膝関節角度の増大とともに空気抵抗力も増大することを報告しているが、ここで示されている膝関節角度の範囲は80~125度程度であり、本研究で設定された低の姿勢および最低の姿勢での膝関節角度(それぞれ 69.1 ± 8.4 deg, 58.1 ± 5.1 deg)までは検討されていない。したがって、本研究は、より低い滑走姿勢における空気抵抗力の変化を明らかにするという観点においても意義があるといえよう。

滑走姿勢の高さによる変化をみると、通常と低、通常と最低との間には姿勢の高さに大きく影響を及ぼすと考えられる大腿角には有意差がみられたが(図6)、空気抵抗力には有意差はみられなかった(図7)。これは、通常の滑走姿勢よりもさらに姿勢を低くしたとしても空気抵抗の軽減という恩恵はほとんど得ることができないことを意味しており、この原因は次のように考えることができる。すなわち、空気抵抗力は移動体の前投影面積だけでなく、移動体の形状によって決

まる空気抵抗係数の影響も受ける⁹⁾ため、たとえ前投影面積が減少しても空気抵抗係数が増大すれば空気抵抗力に大きな変化はみられない。したがって、本研究で設定した通常よりも低い滑走姿勢においては、前投影面積の減少による空気抵抗力の低下という効果を、姿勢が変化したことによる空気抵抗係数の増大が打ち消したと推察される。ここで、滑走姿勢の高さを滑走動作という観点から捉えると、より深く下肢を曲げた低い滑走姿勢はその後のプッシュオフによる下肢の伸展範囲が大きくなるため、十分なパワー発揮による大きな滑走速度の獲得には重要なことと考えられる。しかし、低い滑走姿勢は大腿角および下腿角の減少によって膝関節を身体の前方向へと位置させるため、膝関節のモーメントアームの増大によって姿勢保持のためにより大きな膝関節伸展トルクが要求されることとなる¹¹⁾。滑走中の膝関節伸展トルクの過度の増大は下肢の疲労を助長するため、姿勢を低くしすぎることは動作の持続という観点からは必ずしも好ましいこととはいえない。一方、滑走姿勢が最高および高の場合の空気抵抗力は、通常姿勢に比べて平均でそれぞれ11.5および5.5 N 有意に大きかった(図7)。ここで、2名での縦列滑走時においては後方追従時と単独時での空気抵抗力の差が6 N程度であり、この差はパフォーマンスに大きく影響を及ぼすことが報告されている⁹⁾。これらのことは、滑走姿勢が通常の状態から高くなることによる空気抵抗力の増大は、後方追従滑走時と単独滑走時の相違に相当する程の大きなパフォーマンスへの影響を引き起こすことを示している。したがって、滑走姿勢の増大は空気抵抗力という観点からは好ましくなく、本研究の結果は、長距離種目でのレース後半においては「腰高の姿勢」とならないように下肢を深く屈曲させた姿勢を保持する必要があるとした湯田ら^{10,11)}の報告を強く支持するといえる。これらのことから、本研究で測定した通常の滑走姿勢(平均で体幹角が 11.0 ± 5.2 deg, 大腿角が 27.5 ± 9.4 deg, 下腿角が 59.5 ± 5.7 deg)は空気抵抗力および動作の持続という観点において合理的な滑走姿勢であると考えられる。なお、短距離種目などの短時間高強度の運動においては、効率を犠牲にしてでも大きなパワー発揮を獲得することの方がパフォーマンス向上のためには合理的であるとも考えられる。前述の通り、プッシュオフにおいて十分にパワーを発揮するためにはより深く下肢を曲げた低い滑走姿勢が有効であると推察されるが、姿勢の低さの程度については十分な知見が得られていな

い。また、本研究により、通常の滑走姿勢よりもさらに姿勢を下げても空気抵抗力はほとんど変わらないことが明らかとなっているため、短距離種目における合理的な滑走姿勢については、発揮パワーと関連づけて今後詳細に検討する必要があるといえよう。

肩の位置の相違による変化をみると、体幹角においては通常と上方、通常と下方との間のいずれにおいても有意差がみられ(図4)、空気抵抗力においては通常と上方の間に有意差がみられたものの(通常<上方)、通常と下方との間には有意差がみられずほぼ同様の値を示した(図5)。これは、肩の位置を通常の姿勢よりも下げても空気抵抗力はほとんど変わらないが、逆に肩の位置を上げると空気抵抗力は大きく増大する(平均でおよそ8N)ことを意味している。これらの結果は、膝関節角度が一定(110度)の場合、体幹角が15度以上では角度の増大とともに空気抵抗力も増大するが、15度より小さくしても空気抵抗力は大きくは変わらないという van Ingen Schenau⁵⁾の報告と類似していた。競技現場における指導において、坂井⁹⁾は、長距離種目における滑走スピードの持続のためには姿勢を低くすることは必ずしも好ましいことではなく、レースでは比較的楽な姿勢で滑走することが重要であると示唆している。また、スピードスケート滑走特有の体幹を前傾させた窮屈な滑走姿勢は下肢のダイナミックな動きを困難にする姿勢と捉えられることから、楽な滑走姿勢として肩を上方に位置させることを推奨する指導場面もしばしば見受けられる。これらはいずれも楽な動作を選択することによる疲労の軽減を重視した滑走方法と推察されるが、肩を上げることによる空気抵抗力の著しい増大を考慮すると、このような楽な姿勢が長距離種目のパフォーマンス向上にとって合理的な滑走姿勢であるとは言い難い。このため、競技現場においては体幹を水平近くに保った低い滑走姿勢を推奨する指導者も多く、長距離種目にとって合理的な滑走姿勢に関しては統一した見解が得られていないのが現状といえる。長距離種目における滑走スピードの持続について、湯田ら¹¹⁾はカーブ滑走での左ストローク(左脚が支持脚となる局面)を3次元的に分析し、レース前半ではストローク前半の股関節伸展トルクを増大させることによって膝関節伸筋群の負担を減らし、レース後半における膝関節伸展トルクの低下を抑えることが重要であることを示唆している。また、Yuda et al.¹²⁾は、長距離種目ではカーブでの高いサイクル頻度の持続が重要であり、そのためにはレース後半におい

てもカーブでの左ストローク前半における下腿の前傾を深く保持することが有効であると報告している。これらはいずれも低い滑走姿勢という状況下での疲労の軽減に関する技術であり、長距離種目における動作の持続は、楽な滑走姿勢を求めるよりもむしろこのような工夫によって達成する方が効果的であると考えられる。これらのことから、主に長距離種目においてみられる肩の位置を上方に位置させた滑走姿勢はパフォーマンスの向上にとって合理的とはいえず、空気抵抗力の軽減という観点からは体幹を水平近くに保った通常の滑走姿勢が好ましいことが示唆される。

以上のことから、本研究で用いられた通常の滑走姿勢は空気抵抗力および動作の持続という観点において合理的な滑走姿勢であることが示唆された。そして、空気抵抗力は、通常の滑走姿勢から低くしても大きな変化はみられないが、姿勢を高くすると急激に増大することが明らかとなった。また、肩の位置も同様に、空気抵抗力は通常の位置から下げてもほとんど変化はみられないが、上げるとその値は大きく増大することが明らかとなった。

V. まとめ

本研究の目的は、風洞実験によってスピードスケートにおける滑走姿勢の相違が空気抵抗力に及ぼす影響について検討することによって合理的な滑走姿勢を明らかにすることであった。得られた結果をまとめると、以下ようになる。

- ① 空気抵抗力は、肩の位置が上方(25.4 ± 2.3 N)では通常(17.2 ± 1.8 N)よりも有意に大きかったが($p < 0.001$)、通常と下方(17.3 ± 1.4 N)との間に有意差はみられなかった。
- ② 空気抵抗力は、滑走姿勢が最高(28.8 ± 2.4 N)、高(22.8 ± 2.3 N)、通常(17.3 ± 2.1 N)、低(15.4 ± 0.9 N)、最低(14.7 ± 1.1 N)の順に大きく、通常と低、通常と最低および低と最低との間を除くすべての群間において有意差がみられた($p < 0.001$)。通常滑走姿勢における身体部分角度は、体幹角が 11.0 ± 5.2 度、大腿角が 27.5 ± 9.4 度および下腿角が 59.5 ± 5.7 度であった。

以上のことから、本研究で用いられた通常の滑走姿勢は空気抵抗力および動作の持続という観点において合理的な滑走姿勢であることが示唆された。そして、空気抵抗力は、通常の滑走姿勢から低くしても大きな

変化はみられないが、姿勢を高くすると急激に増大することが明らかとなった。また、肩の位置も同様に、空気抵抗力は通常的位置から下げてもほとんど変化はみられないが、上げるとその値は大きく増大することが明らかとなった。

本研究は2007年度日本オリンピック委員会/日本コカ・コーラスポーツ科学基金（アクエリアス基金）の研究助成を受けたものである。

謝 辞

風洞実験を実施するにあたり渡部勲氏（東京大学先端科学技術研究センター）から多大なるご協力を頂き、日本体育大学および早稲田大学スケート部の選手各位には被験者として実験に快くご協力頂いた。これらの関係各位に深く感謝の意を表します。

引用文献

- 1) de Koning, J.J., de Groot, G. and van Ingen Schenau, G.J. (1992) Ice friction during speed skating. *Journal of Biomechanics* 25: 565-571.
- 2) de Koning, J.J. and van Ingen Schenau, G.J. (2000) Performance-determining factors in speed skating: *Biomechanics in sport* (Zatsiorsky, V.M). pp.232-246, Blackwell Science Ltd.: London.
- 3) Rundell, K.W. (1996) Effects of drafting during short-track speed skating. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 29: 765-771.
- 4) 坂井俊行 (2003) スピードスケートにおける一貫指導システム構築への取り組み～ジュニア期に必要とされる滑走技術～. (財)日本スケート連盟一貫指導システムプロジェクト班編, p.15, 東京.
- 5) van Ingen Schenau, G.J. (1982) The influence of air friction in speed skating. *Journal of Biomechanics* 15: 449-458.
- 6) van Ingen Schenau, G.J. and Bakker, K. (1980) A biomechanical model of speed skating. *Journal of Human Movement Studies* 6: 1-18.
- 7) van Ingen Schenau, G.J., de Boer, R.W. and de Groot, G. (1987) On the technique of speed skating. *International Journal of Sport Biomechanics* 3: 419-431.
- 8) Winter, D.A. (1990) *Biomechanics and motor control of human movement*. pp.41-43, John Wiley and Sons Inc.: New York.
- 9) 湯田 淳, 青柳 徹, 高松潤二, 他 (2008) スピードスケートチームバシユート競技におけるレースパターンに関するバイオメカニクスの研究. 日本オリンピック委員会/日本コカ・コーラスポーツ科学基金（アクエリアス基金）2007年度研究報告書, 90-100.
- 10) 湯田 淳, 結城匡啓, 阿江通良 (2005a) スピードスケート長距離種目における疲労に伴うレース中のストレート滑走動作の変化. 日本体育学会第56回大会予稿集, p275.
- 11) 湯田 淳, 結城匡啓, 青柳 徹, 他 (2005b) スピードスケート長距離種目におけるカーブ滑走中の下肢キネティクスの変化. *バイオメカニクス研究* 9 (2): 53-68.
- 12) Yuda, J., Yuki, M., Aoyanagi, T. et al. (2007) Kinematic analysis of the technique for elite male long-distance speed skaters in curving. *Journal of Applied Biomechanics* 23: 137-147.

（平成20年9月16日受付）
（平成20年11月26日受理）

