

原著論文

スピードスケートパシュート種目における後続走者の姿勢と間隔が
先頭走者の抵抗減少に与える影響

The influence of the posture and the interval of the following skaters on the reduction
of the aerodynamic drag of a leading skater in speed skating team pursuit events

山辺芳¹⁾, 鈴木功士¹⁾, 竹中俊輔^{1),4)}, 木村裕也¹⁾, 紅楳英信²⁾, 湯田淳³⁾
Kaoru Yamanobe¹⁾, Koshi Suzuki¹⁾, Shunsuke Takenaka^{1),4)},
Yuya Kimura¹⁾, Hidenobu Kobai²⁾, Jun Yuda³⁾

Abstract : The purpose of this study was to determine the effects of the distance between the following skaters and their posture on the aerodynamic drag of a leading skater in the team pursuit event of speed skating by conducting wind tunnel experiments. Three full-scale human models were placed in a tandem arrangement, with four different distances (0.8, 0.9, 1.0 and 1.2 m) between the models. For the first model, the upper torso angle of attack α was always set to 0° . For the two following models, α was set to three different values (0 , 20 and 40°). Four combinations of posture conditions (A-D) were used for the three models. For each posture, A: two following skaters had α of 0° ; B: the second and the third had α of 20° ; C: the α of the following skaters the second and the third were 20° and 40° respectively; D: two following skaters had α of 40° . These combinations were planned so that the total projection area of the following skaters was larger in the order $A < B < C < D$. The results indicated that the distance between the three athletes, if within 1.2 m, in the team pursuit formation can reduce the drag of the leading skater. Furthermore, the largest reduction in drag was observed at 0.8 m, which is the smallest distance between the three skaters in this study, indicating that the smaller the distance between the skaters, the greater the reduction in drag. It was also clear that the posture of the following skaters (large upper torso angle of attack) can also reduce the drag of the leading skater. In addition, it was suggested that even changes in the posture of the third skater as well as the second skater could affect the aerodynamic drag of the leading skater.

Key words : speed skate team pursuit, wind tunnel experiments, aerodynamic drag, interference
flow regions, vicinity

キーワード：スピードスケートチームパシュート, 風洞実験, 空気抵抗, 干渉流領域, 近接

¹⁾国立スポーツ科学センター, ²⁾相澤健康スポーツ医科学センター, ³⁾日本女子体育大学, ⁴⁾ヨネックス株式会社

¹⁾Japan Institute of Sports Sciences, ²⁾Jisenkai Aizawa Medical Science Center for Health and Sports,

³⁾Japan Women's College of Physical Education, ⁴⁾YONEX Co., Ltd.

E-mail : kaoru.yamanobe@jpnpsport.go.jp

受付日：2023 年 6 月 1 日

受理日：2023 年 11 月 14 日

I. 緒言

スピードスケートのチームパシュート（以下チームパシュート）は、3名の選手が同時に滑走し、最後尾選手のゴールタイムを競う種目であり、3名の選手は進行方向に対して前後1列に並んだ直線的な隊列（縦列隊列）を維持して滑走する。このように先行する走者に追従して滑走することで後続走者が単独滑走時に比べて生理学的な負担が小さくなる、いわゆる「ドラフティング効果^{28), 39)}」があることが知られている。このようなドラフティング効果を生み出す主な原因は後続走者の空気抵抗低減である。van Ingen Schenau (1982) は前後に並べた2名の選手の間隔を変えたときの空気抵抗を風洞実験で計測し、後続選手の空気抵抗は単独時と比較して間隔2 mで16%、1 mで23%減少したことを報告した⁴⁰⁾。また湯田ら (2008) も風洞実験において2名の選手を前後に配置した場合、後続走者の空気抵抗は単独時よりも小さく、0.8 m 後方では単独時に比べ約43%減少し、1.2 m および 1.6 m 後方では約37%減少したことを報告した⁴²⁾。これらの研究は、後続走者が前走者との距離を小さくすることで自らの空気抵抗をより低減できることを示している。

一方で先頭走者も後続走者の存在によって空気抵抗が低減することが報告されている。湯田ら (2008) はチームパシュートを模擬した3名の選手を用いた隊列条件（選手間隔0.8 m）において、先頭時（後続2名の選手が存在する条件）は単独時と比べて空気抵抗が約17%減少（17.3 N から14.3 N に減少）したことを報告した⁴²⁾。同様の現象は自転車競技を対象とした研究で多数報告されている^{3), 7), 13), 15)}。Blocken ら (2013) は2台の自転車の縦列隊列（車輪間隔0.1 m）を対象とした数値流体解析の結果、先頭走者の空気抵抗は単独時よりも最大2.6%低減したと報告した⁷⁾。

このような縦列隊列の先頭における空気抵抗の減少効果は、円柱模型を対象とした空気力学的研究によって1930年頃から知られており、二つの同径円柱の中心間距離が円柱直径のおよそ3.5倍

以上離れると、先頭円柱の空気抵抗低減効果は消失することが明らかにされている⁶⁾。さらに、前後に直径サイズの異なる円柱を配置した研究の結果、先頭円柱よりも大きな直径の円柱を後ろに配置すると、先頭円柱の空気抵抗減少は前述の3.5より離れた円柱間隔でも起こるが¹⁶⁾、その反対に後ろの円柱の直径が先頭円柱よりも小さい場合は3.5よりも近い円柱間隔で先頭円柱の空気抵抗減少効果が消失することが報告されている¹⁹⁾。このような縦列隊列の先頭における空気抵抗の減少は、後ろの円柱が近接することにより先頭円柱の後流領域に圧力の増大がもたらされ、先頭円柱の圧力抵抗（円柱前後の圧力差によって生ずる抵抗力）が減少することが原因であることが知られている^{1), 2), 6), 23)}。これらの知見をチームパシュート種目に適用すると、選手間距離または後続走者の姿勢（あるいは体格の大きさ）は先頭走者の空気抵抗に影響を与える可能性があることが分かる。

従来のチームパシュート競技においては、最も大きな空気抵抗を受ける先頭走者を順次交代する戦術が広く行われていたが、2019–20シーズン以降、先頭交代をせずに隊列の前後間隔を小さく維持し、後続走者が先行走者を手で押しながら滑走する、いわゆる「プッシュ」戦術を行うチームが現れた。2021年ワールドカップ・ソルトレークシティー大会ではアメリカ男子チームが先頭交代せずに当時の世界記録を樹立している²⁰⁾。チームパシュート種目においてこのような「プッシュ」戦術を遂行することで、手で直接先行走者を押すことに加え、前述の空気力学的な作用を効果的に利用することができれば先頭走者の負荷軽減に役立つ可能性がある。しかしながら、チームパシュートにおける先頭走者の空気抵抗低減を対象として、後続走者の姿勢や選手間隔を空気力学的に検討した研究は見当たらない。そこで本研究の目的は、スピードスケート競技のチームパシュート種目において、後続選手の前後間距離および滑走姿勢が先頭走者の空気抵抗低減に及ぼす影響を風洞実験によって明らかにすることとした。

II. 方法

本研究ではスピードスケート競技のチームパシュート種目を想定し、1体あるいは3体の実寸大人形模型を用いた風洞実験を行い、隊列の間隔と後続選手の姿勢の差異が先頭走者の空気抵抗に及ぼす影響を検討した。以下に詳細を記す。

1. 風洞実験

風洞実験による空気力計測は2021年7月1日から同7月5日までの期間に国立スポーツ科学センター風洞実験棟（東京都北区）で実施した。当該施設は、高さ3 m、幅2.5 m、長さ8 mの開放型の測定部を有する縦回流型風洞である。また、吹き出し口から計測部周辺（吹き出し口から2 m下手方向）の風速分布は $\pm 1.0\%$ 以内、測定断面の平均乱れ度は0.3%以内であった。

2. 実寸大人形模型の設置方法

本研究では、被験体として典型的なスケート滑走姿勢を模した実寸大人形模型（モデル身長1.8 m）を3体用いた。風洞吹出口より下流2 m地点に設置されたストレインゲージ式6分力計（日章電機社、LMC-61418）の上に連結した固定した長方形アダプタ（縦600 mm、横1400 mm）に先頭走者を想定した人形模型1体を固定し、残りの2体の人形模型は後方に等間隔で設置した（Figure 1）。人形模型には同一の競技用ワンピースおよびヘルメットを装着させた。3体の人形模型の姿勢および前後間隔の詳細について以下に示す。

先頭の人形模型は、上胴迎角 α を常に 0° に設定した。 α は人形模型の上胴セグメント（肩関節中心から下肢に向かって294.5 mm離れた体幹内部の回転軸中心までのアルミフレーム骨格）と水平線とのなす角として定義し、回転軸に設置された角度センサ（ALPS社製、RDC506002A）を用い

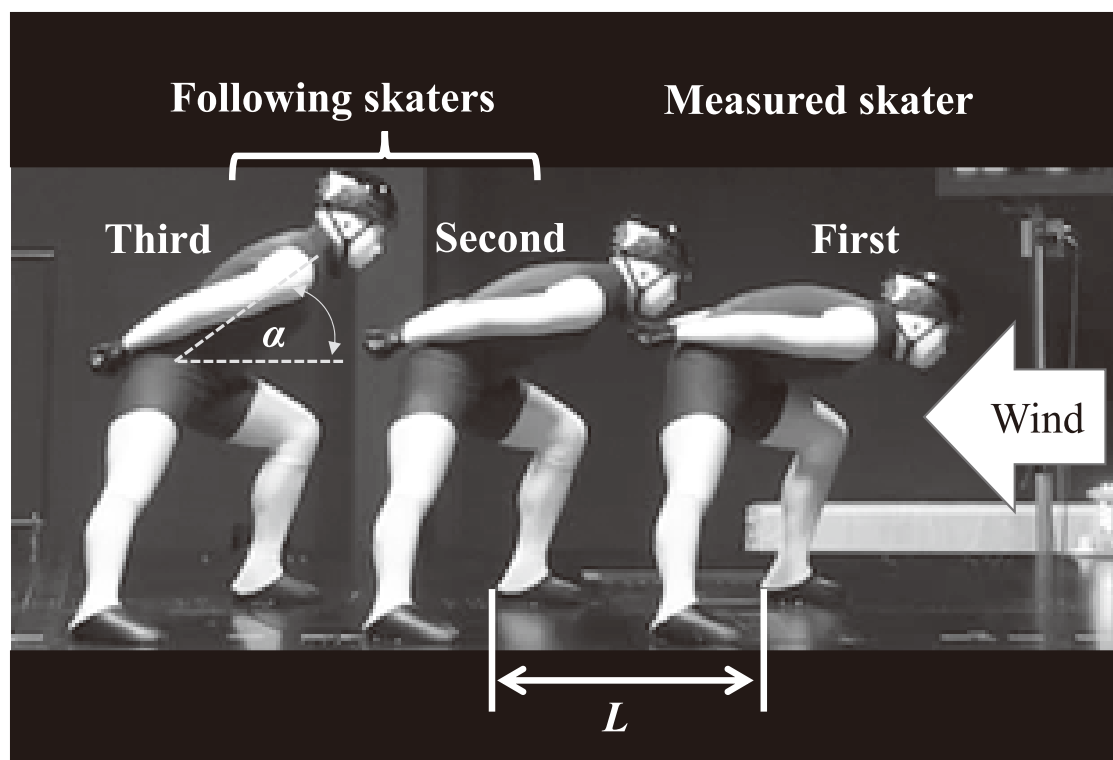


Figure 1 An example trial of the wind tunnel experiment of team pursuit formation using the full-scale models. The angle of attack in trunk is shown as “ α ”. This is an example of case “C” combination listed in Table 1 at the distance (L) in 0.8 m between each model.

て計測した (Figure 1) 後続の 2 体の人形模型について α を 3 種類 (0° 、 20° 、 40°) に設定した。なお、 α によらず顔の向きを気流に対して一定 (水平線から 60° 上向き) に保つように頭部を頭部中心まわりに回転させた。これらの α の値は先行研究¹²⁾ で示された 1500 m 個人競技における平均的な滑走姿勢における体幹角度 (約 $10 \sim 20^\circ$) を参考にし、その範囲を網羅できるようにやや広範囲に設定されている。3 体の姿勢条件 (A ~ D の 4 種類) を Table 1 に示す。それぞれの姿勢について、A: 後続走者 (Second および Third) の α がいずれも 0° であり、4 種類組み合わせの中で最も小さい姿勢を示す。B: 後続走者 (Second および Third) の α がいずれも 20° であり A よりも

大きな姿勢を示す。C: 後続走者 Second および Third の α がそれぞれ 20° および 40° であり C に比べて Third 走者のみ大きな姿勢を示す。D: 後続走者 (Second および Third) の α がいずれも 40° であり、4 種類の組み合わせの中で後続選手すべての α が最大となる姿勢を示す。すなわち、これらの組み合わせは後続走者の投射面積の合計が $A < B < C < D$ の順に大きくなるように計画されている。

簡単のため本研究では α の組み合わせは網羅的に行っていない。また本研究の目的である、隊列先頭走者の空気抵抗低減という主旨に沿って、先頭走者の空気抵抗を増大させるような姿勢条件 (先頭走者の α が 20° または 40° となるような姿勢) は除外した。

Figure 2 にはこれら 3 種類の姿勢の正面図および人形模型製造時の CAD データから求めた模型の最高点の高さと前方投射面積 (S) をそれぞれ示す。

3 体の人形模型を Figure 1 に示したように縦列に配置し、前後の人形模型の左足後端間の距離を模型間の距離とし、人形模型間の距離 L を 4 種類 (0.8 m 、 0.9 m 、 1.0 m 、 1.2 m) 設定した。なお、2 列目以降の人形模型の α が 0° となる姿勢条件 A

Combination	Angle of attack in trunk of the Skaters		
	First	Second	Third
A	0	0	0
B	0	20	20
C	0	20	40
D	0	40	40

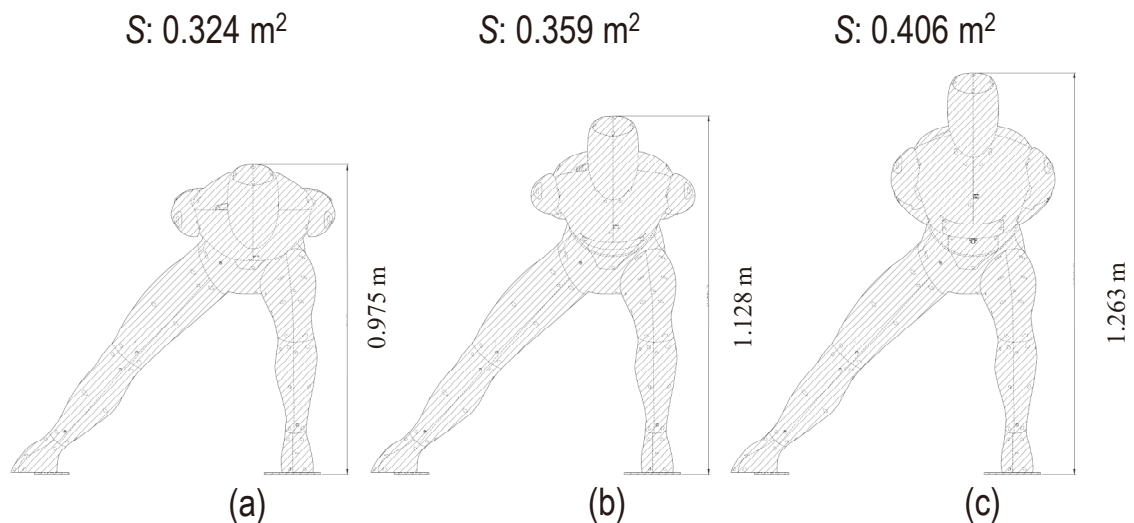


Figure 2 The frontal projected area S (m^2) and the maximal height of the model (m) in three positions of the trunk angles (α). Pictures (a), (b) and (c) show its position with angle of α 0 degree, 20 degrees and 40 degrees respectively.

において、人形の間隔が 0.9 m 以下で前後の人形（前人形の手部と後人形の頭部）が接触してしまうため、間隔 1.0 m と 1.2 m のみ計測を行った。

3. 空気抵抗の計測および気象変動を考慮した規格化

先行研究^{24), 42)}によれば、スピードスケートのチームパシュート競技の平均速度は約 14 m/s（ワールドカップ等の国際競技会における男子上位入賞チームの平均タイムより求めた値）である。風洞実験においては、競技会毎の気象条件および選手の体格の差異によるレイノルズ数領域の変動を含むよう気流速度を 12 ～ 16 m/s に設定し、計測中は一定とした。本実験において人形模型の肩幅（約 0.5 m）を代表長さとしたときのレイノルズ数は $Re = 3.9 \times 10^5 \sim 5.1 \times 10^5$ の範囲であった。なおレイノルズ数 Re は以下の式（1）で求めた。

$$Re = \frac{\rho \cdot U \cdot d}{\mu} \quad (1)$$

ここで ρ は空気密度 [kg/m^3]、 U は気流速度 [m/s]、 d は人形の代表長（肩幅）[m] そして μ は空気の粘性係数 [$\text{Pa} \cdot \text{s}$] である。

6 分力計によって計測された空気力は直流型歪増巾器（日章電機社、DSA-100B）を介し、分解能 24 bit の A/D 変換器（UEI 社、DNA-AI-217）を用いてサンプリング周波数 1000 Hz でコンピュータ（Dell 社、Optiplex7010）に取り込んだ。各条件において 5 秒間の測定を 4 回実施し、その平均値を代表値とした。なお、風洞実験施設における 1 m/s の風速変化に必要な時間はおよそ 5 秒程度であることから、速度変更操作後にファン回転数およびピトー管による速度表示が設定値に達したと目視で判断してから、10 秒以上の時間経過を経て速度が十分に安定したと考えられる状態で、気流速度 1 m/s 毎に測定を行った。また空気抵抗に影響を与える環境要因をモニタリングするため、空気力計測と同時に風洞内の大気圧および気温をそれぞれ記録した。

なお、風洞実験で用いた気流速度の変化が II. 4 で後述する臨界レイノルズ数領域であるか確認

するため、各速度において隊列の先頭に配置した人形のみ設置した条件（ $\alpha = 0^\circ$ による単独滑走条件）で空気抵抗を計測した。また単独滑走時の空気抵抗は、それぞれの速度における基準値として隊列形成時の先頭走者の空気抵抗の変化を相対的に検討する目的も有した。

なお、人形模型の前方投射面積が最大（0.406 m^2 ）となる上胴迎角が最大（ 40° ）の条件において、風洞吹き出し口の面積（7.5 m^2 ）とのブロック比は 5.4% と小さかったため、ブロック補正を行わなかった^{10), 41)}。

風洞実験によって計測された空気抵抗 F_D [N] は以下の式（2）で示すことができる。

$$F_D(N) = \frac{1}{2} \rho U^2 C_D A \quad (2)$$

ここで C_D は抗力係数 [無次元]、 A は前方投射面積 [m^2] である。式（2）に示した通り空気抵抗 F_D は測定日毎の気象変動に伴う空気密度 ρ の変化に影響を受けるため、空気抵抗を動圧（ $0.5 \rho U^2$ ）で除することにより空気抵抗を規格化した抗力面積 $C_D A$ [m^2] を用いて比較を行った。抗力面積は下記の式（3）で求めた。

$$C_D A (\text{m}^2) = \frac{F_D}{0.5 \rho U^2} \quad (3)$$

4. 統計処理

円柱模型を対象とした先行研究によると、抗力面積は臨界レイノルズ数領域（約 $2.0 \times 10^5 \sim 5.0 \times 10^5$ ）においてレイノルズ数の増大に伴い急激に減少することが知られている^{17), 36), 45)}。本研究で実施した人形模型を用いた風洞実験のレイノルズ数の範囲（ $3.9 \times 10^5 \sim 5.1 \times 10^5$ ）の一部はこの領域に含まれることから、このような抗力面積の速度依存性を確認するため、単独滑走時の抗力面積の平均値を各速度間（6 群間）で分散分析および Tukey-Kramer の多重比較法によって比較した。その結果、速度による影響があると判断されたため、以下の隊列条件間の比較においては異なる速度間での空気抵抗を直接比較することは行わず、同速度条件内で比較を行った。

単独滑走時の抗力面積を基準値として、隊列構成時に後続走者が存在することで先頭走者の抗力面積が単独滑走時と比較して差異が生じるのか検討した。そこで、単独滑走時をコントロール群として、隊列形成時の先頭走者との間で抗力面積の平均値の比較を行うべく分散分析および Dunnett (1995)¹⁴⁾ の多重比較を行った。

またチームパシュート競技における後続走者の姿勢と選手間距離の二つの要因が先頭走者の抗力面積にどのような影響を与えるのか検討すべく、各速度条件において同一姿勢における選手間距離の違い（4 群間）、または同一選手間距離における姿勢の違い（3 あるいは 4 群間）に由来する先頭走者の抗力面積の平均値を分散分析および Tukey-Kramer の多重比較法によって差を検定した。ただし姿勢条件 A は比較できる選手間距離が 1.0 m および 1.2 m の 2 条件のみであったため t 検定を用いた。なお統計処理には SAS Institute 社製 JMP ver. 11.2.1 を用い、統計学的有意水準はいずれも 5% とした。

III. 結果

1. 単独滑走を想定した単一選手の抗力面積

Table 2 および Figure 3（凡例「Single」と表記）に、1 体のみの人形模型の上胴迎角を 0° に設定し、気流速度 U を 12 ～ 16 m/s で 1 m/s 毎に変化させたときの抗力面積 $C_D A$ をそれぞれ示す（単独滑走時を想定）。各気流速度間で $C_D A$ を分散分析および Tukey-Kramer の多重比較法によって比較した結果、12 m/s 条件とその他すべての条件との間に有意な差が見られ、12 m/s は最も大きな値を示した。さらに 14 m/s 条件の $C_D A$ は最も小さな値を示すとともに 16 m/s 条件との間に有意な差が見られた。全体的な変化を概観すると、気流速度を 12 m/s から増大させると $C_D A$ は低下して 14 m/s で極小値を取り、その後さらに U を増大させると $C_D A$ は増大に転じていたことが分かる。

Table 2 Averaged drag area ($C_D A$) and standard deviation of single skater model ($\alpha = 0$) for each wind velocity (U : 12 ～ 16 m/s).

U [m/s]	$C_D A$ [m ²]		
	Mean		SD
12	0.199	±	0.003 △
13	0.192	±	0.002
14	0.190	±	0.001 †
15	0.191	±	0.001
16	0.194	±	0.001

Note: The symbols △ and † indicate significant differences between other groups ($p < .01$) and between 16 m/s condition ($p < .05$) respectively.

2. チームパシュート隊列における先頭走者の抗力面積

1) 単独滑走時との比較

Figure 3 に、チームパシュート隊列（以下隊列と略）における先頭走者の $C_D A$ を示す。また各速度における単独滑走時（Single と表記）の $C_D A$ を各速度における基準値として示した。Figure 3 (a) および 3 (b) はそれぞれ同じデータを異なる比較群別に示したものである。すなわち、Figure 3 (a) は後続走者の姿勢の組み合わせ (Table 1 の A ～ D) が同じグループ内で選手間距離 (0.8 ～ 1.2 m) の影響を比較しており、Figure 3 (b) は選手間距離が同じグループ内で後続選手の姿勢の組み合わせ (A ～ D) の影響を比較している。

単独滑走時をコントロール群として、隊列形成時の先頭走者との間で $C_D A$ の平均値を分散分析および Dunnett¹⁴⁾ の手法で比較した結果、12 ～ 16 m/s の各速度条件内で、先頭走者の $C_D A$ はいずれの隊列条件においても基準となる単独滑走時の $C_D A$ よりも有意に小さな値を示した ($p < 0.0001$)。各速度における単独滑走時の $C_D A$ の平均値および隊列における先頭走者の $C_D A$ の平均値の最小値と最大値および単独滑走時を基準とした減少率を求めると、12 m/s：単独滑走時 0.199 m² vs 隊列先頭時 0.166 ～ 0.187 m² (−16.6 ～ −6.0 %)、13 m/s：単独滑走時 0.192 m² vs 隊列先頭時

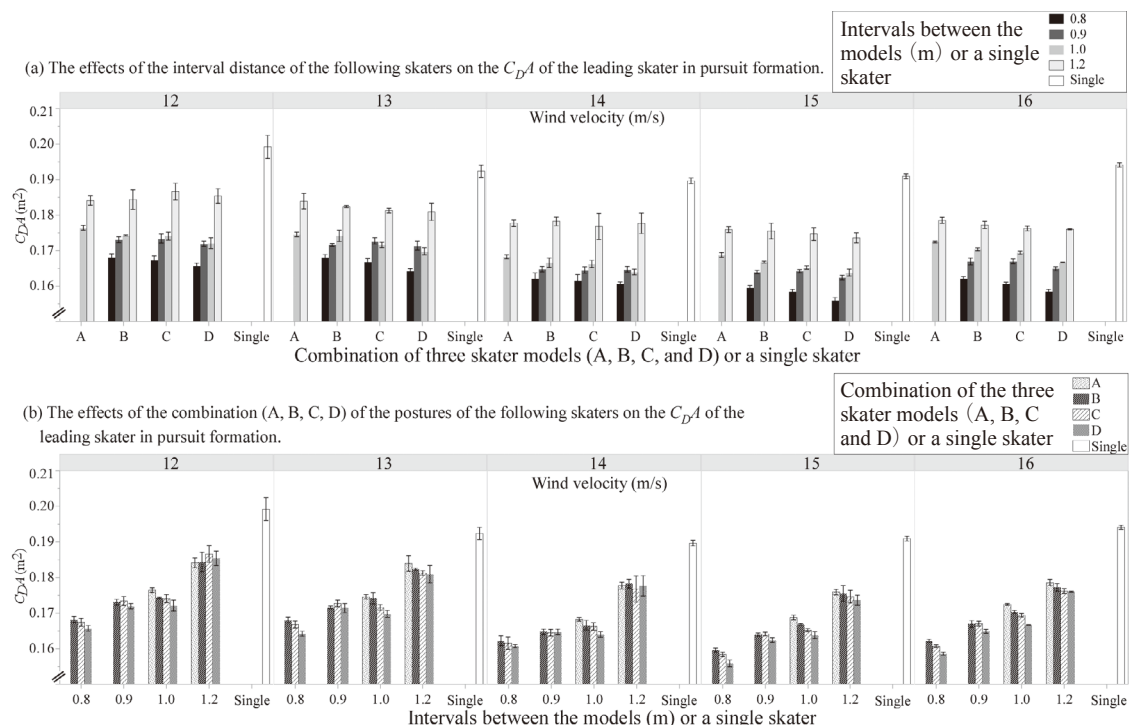


Figure 3 Comparison of the aerodynamic drag ($C_D A$) of the leading skater in the pursuit formation with a variety of spacing and posture configurations of the following skaters. (a) The effects of the interval distance of the following skaters on the $C_D A$ of the leading skater in pursuit formation in which the following skaters in the same combination of their postures (A, B, C, D). These combination mean the sets of the angles of attack in trunk (in degrees) for three skaters (the first, the second and the third) as A (0 0 0), B (0 20 20), C (0 20 40), and D (0 40 40), respectively. (b) The effects of the combination (A, B, C, D) of the postures of the following skaters on the $C_D A$ of the leading skater in pursuit formation in which the following skaters in the same interval distance. Statistic significance of the difference between the groups are listed in Table 3. A single skater is shown as reference value.

0.164 ~ 0.184 m² (−14.6 ~ −4.2%)、14 m/s：単独滑走時 0.190 m² vs 隊列先頭時 0.161 ~ 0.178 m²、(−15.3 ~ −6.3%)、15 m/s：単独滑走時 0.191 m² vs 隊列先頭時 0.156 ~ 0.176 m² (−18.3 ~ −7.9%)、16 m/s：単独滑走時 0.194 m² vs 隊列先頭時 0.159 ~ 0.179 m² (−18.0 ~ −7.7%) であった。

これらの結果から、本研究で実施したすべての隊列条件において後続走者が存在することで先頭走者の $C_D A$ が単独滑走時よりも −18.3 ~ −4.2% の範囲で減少することが明らかとなった。以下において、後続走者の姿勢および選手間距離の違いが先頭走者の $C_D A$ に与えた影響を詳細に検討する。

2) 後続走者の選手間距離および姿勢の影響

ここでは隊列における後続走者 (Second およ

び Third) の姿勢および選手間距離の変化が先頭走者の $C_D A$ にどのような影響を与えるのかそれぞれ選手間距離 (Figure 3 (a)) および後続走者の姿勢 (Figure 3 (b)) に分けて検討する。またこれらの群間比較における検定結果 (有意水準の一覧) について、選手間距離に関しては Table 3 の上段に記載し、後続走者の姿勢に関しては同下段に記載した。

a) 選手間距離の影響

Figure 3 (a) は隊列における選手間距離 L の大きさが先頭走者の $C_D A$ に与える影響を示す。気流速度と姿勢の影響を排除するため、それぞれの姿勢条件 (Table 1 の A ~ D) 内で先頭走者の $C_D A$ を気流速度別 (12 ~ 16 m/s) に比較している。これに対応した Tukey-Kramer の多重比較による

Table 3 List of the significance of the differences in the mean $C_D A$ of the leading skater model. These comparisons were made between the groups based on spacing (upper) or posture (lower) differences of the following models, respectively.

Combination of the three models (A, B, C and D)																	
U (m/s)	A				B				C				D				
	L (m)	0.8	0.9	1.0	1.2	0.8	0.9	1.0	1.2	0.8	0.9	1.0	1.2	0.8	0.9	1.0	1.2
12	0.8	—	—	—	—	—	*	**	***	—	**	**	***	—	**	**	***
	0.9		—	—	—		—	N.S.	***		—	N.S.	***		—	N.S.	***
	1.0				***			—	***			—	***			—	***
	1.2				—				—				—				—
13	0.8	—	—	—	—	—	**	***	***	—	***	***	***	—	**	*	***
	0.9		—	—	—		—	*	***		—	N.S.	***		—	N.S.	***
	1.0				**			—	***			—	***			—	***
	1.2				—				—				—				—
14	0.8	—	—	—	—	—	N.S.	*	***	—	N.S.	*	***	—	*	*	***
	0.9		—	—	—		—	N.S.	***			N.S.	***		—	N.S.	***
	1.0				***			—	***			—	***			—	***
	1.2				—				—				—				—
15	0.8	—	—	—	—	—	*	***	***	—	***	***	***	—	***	***	***
	0.9		—	—	—		—	*	***		—	N.S.	***		—	N.S.	***
	1.0				***			—	***			—	***			—	***
	1.2				—				—				—				—
16	0.8	—	—	—	—	—	***	***	***	—	***	***	***	—	***	***	***
	0.9		—	—	—		—	**	***		—	**	***		—	***	***
	1.0				***			—	***			—	***			—	***
	1.2				—				—				—				—
Intervals between the models (L)																	
U (m/s)	Combination of the models	0.8 m				0.9 m				1.0 m				1.2 m			
		A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
12	A	—	—	—	—	—	—	—	—	—	*	*	**	—	N.S.	N.S.	N.S.
	B			N.S.	*		—	N.S.	N.S.		—	N.S.	*		—	N.S.	N.S.
	C				N.S.			—	N.S.			—	N.S.			—	N.S.
	D				—				—				—				—
13	A	—	—	—	—	—	—	—	—	—	N.S.	**	**	—	N.S.	N.S.	N.S.
	B			N.S.	**		—	N.S.	N.S.		—	*	**		—	N.S.	N.S.
	C				**			—	N.S.			—	N.S.			—	N.S.
	D				—				—				—				—
14	A	—	—	—	—	—	—	—	—	—	N.S.	N.S.	**	—	N.S.	N.S.	N.S.
	B			N.S.	N.S.		—	N.S.	N.S.		—	N.S.	*		—	N.S.	N.S.
	C				N.S.			—	N.S.			—	*			—	N.S.
	D				—				—				—				—
15	A	—	—	—	—	—	—	—	—	—	*	***	***	—	N.S.	N.S.	N.S.
	B			N.S.	**		—	N.S.	*		—	*	**		—	N.S.	N.S.
	C				*			—	*			—	*			—	N.S.
	D				—				—				—				—
16	A	—	—	—	—	—	—	—	—	—	***	***	***	—	N.S.	*	*
	B			*	***		—	N.S.	*		—	*	***		—	N.S.	N.S.
	C				**			—	*			—	***			—	N.S.
	D				—				—				—				—

Note. Upper: The symbols of the asterisks indicate significant difference on the averaged $C_D A$ between the groups about the interval of the models (L) with same combination of the three models (A–D). These combination mean the sets of the angles of attack in trunk (in degrees) for three skaters (the first, the second and the third) as A (0 0 0), B (0 20 20), C (0 20 40), and D (0 40 40), respectively. Lower: The symbols of the asterisks indicate significant difference on the averaged $C_D A$ between the groups about each combination (A–D) of the posture of the three models with same interval of the models (0.8–1.2 m). “N. S.” means no significant difference were found in comparisons between intersecting groups. The upper and the lower tables correspond to Figures 3 (a) and 3 (b) respectively. (* $p < .05$, ** $p < .001$, *** $p < .0001$)

検定結果（有意水準の一覧）を Table 3 の上部に示した。

最も選手間距離 L の大きい 1.2 m 条件は各気流速度において、より小さな L の条件すべてと比較して有意に大きな $C_D A$ を示した。また、最も選手間距離 L の小さい 0.8 m 条件は 14 m/s における B および C 条件の $L=0.9$ m 以外のすべての条件と比較して有意に小さな $C_D A$ を示した（ $L=0.8$ および 0.9 m を実施していない A 条件を除く）。これらの結果は、全体的な傾向として、選手間距離 L が増大するにつれて先頭走者の $C_D A$ が大きくなることを示している。

一方で、これら遠位（ $L=1.2$ m）と近位（ $L=0.8$ m）に比べて中間的な距離である $L=0.9$ と 1.0 m との比較では、 $L=1.0$ m が同 0.9 m より有意に $C_D A$ が大きかったのは姿勢条件 B の 13、15 および 16 m/s、姿勢条件 C および D の 16 m/s であった（5 ケース）。上記以外の 10 ケース（姿勢条件 B の 12 および 14 m/s、姿勢条件 C および D の 12、13、14 および 15 m/s）では有意な差は見られなかった。

また 16 m/s 条件における同一姿勢条件（A～D）内のすべての比較において、 L が小さいほど有意に $C_D A$ が小さかった。

これらの結果から選手間距離（ L ）の影響を概観すると、先頭走者の $C_D A$ の大きさに有意な差が認められたケースはすべて、 L が小さい方がより小さな $C_D A$ を示したことが分かる。その一方で後続選手の姿勢や選手間距離が同じ条件内の比較であっても、気流速度によって $C_D A$ の差が見られたケースと見られなかったケースがあった。

b) 後続選手の姿勢の影響

Figure 3 (b) は隊列における後続走者の姿勢条件（Table 1 の A～D）の違いが先頭走者の $C_D A$ に与える影響を示す。気流速度と選手間距離 L の影響を排除するため、それぞれの L 内で先頭走者の $C_D A$ を気流速度別（12～16 m/s）に比較している。これに対応した Tukey-Kramer の多重比較による検定結果（有意水準の一覧）を Table 3 の下部に示した。

最も選手間距離の小さい $L=0.8$ および 0.9 m では姿勢条件 A の組み合わせを実施していないので姿勢条件 B、C および D の比較を行った。まず B と C との比較について、 $L=0.8$ m において速度 16 m/s の速度条件のみ B が C より有意に大きな $C_D A$ の値を示した。一方で $L=0.9$ m においてはいずれの速度条件も B と C との間に有意な $C_D A$ の差は見られなかった。次に B と D との比較について、 $L=0.8$ m において 14 m/s を除くすべての速度条件で B が D より有意に大きな値 $C_D A$ を示した。 $L=0.9$ m において 12、13 および 14 m/s の速度条件で B と D との間に有意な差は見られなかったが、15 および 16 m/s の速度条件では B が D より有意に大きな $C_D A$ を示した。最後に C と D との比較について、 $L=0.8$ m では 13、15 および 16 m/s の速度条件で C が D より有意に大きな $C_D A$ を示した。さらに $L=0.9$ m では 12、13 および 14 m/s の速度条件で C と D との間に有意な差は見られなかったが、15 および 16 m/s の速度条件で C が D より有意に大きな $C_D A$ を示した。

上記よりも選手間距離の大きな $L=1.0$ m における姿勢条件 A、B、C および D の比較について、15 および 16 m/s の速度条件において $C_D A$ は A から D の順に有意に小さな値を示した。これより低い 12～14 m/s の速度条件においては、A と B とを比較すると 12 m/s の速度条件で有意に A が B よりも大きな $C_D A$ を示した。A と C とを比較すると 12 および 13 m/s の速度条件で有意に A が C よりも大きな $C_D A$ を示した。A と D とを比較すると 12～14 m/s の速度条件すべてにおいて有意に A が D よりも大きな $C_D A$ を示した。前述のより高い速度条件（15 および 16 m/s）と合わせて、全速度条件において有意に A が D よりも大きな $C_D A$ を示したことを意味する。B と C とを比較すると 13 m/s の速度条件で有意に B が C よりも大きな $C_D A$ を示した。B と D とを比較すると 12～14 m/s の速度条件すべてにおいて有意に B が D よりも大きな $C_D A$ を示した。最後に C と D とを比較すると 14 m/s の速度条件で有意に C が D

よりも大きな $C_D A$ を示した。

最後に最も選手間距離の大きな条件である $L = 1.2 \text{ m}$ において、姿勢条件 A、B、C および D の比較を行った結果、12 ～ 15 m/s の速度条件ではいずれの姿勢条件間においても $C_D A$ の大きさに有意な差は見られなかった。一方で速度 16 m/s の条件のみ有意な $C_D A$ の差が見られ、姿勢条件 A および C、さらに A および D の間いずれも A がより大きな値を示した。

これらの姿勢条件間の比較結果を概観すると、先頭走者の $C_D A$ の大きさに有意な差が認められたケースはすべて、後続走者の投射面積の合計の大きさ ($A < B < C < D$) が小さい姿勢の方がより大きな $C_D A$ を示したことが分かる。その一方で選手間距離や速度条件の違いによっては、これらの姿勢条件間の比較であっても $C_D A$ に有意な差が見られなかったことが示された。

IV. 考察

本研究の目的は、スピードスケート競技のチームパシュート種目において、後続選手の前後間距離および滑走姿勢が先頭走者の空気抵抗低減に及ぼす影響を風洞実験によって明らかにすることであった。まず先頭走者を模擬した人形模型単体の風洞実験の結果から実験に用いた気流速度の変化が流体力学的にどのような影響を与えていたのか検討する。次にチームパシュート隊列の後続走者の前後間距離および滑走姿勢が先頭走者の空気抵抗に与えた影響を検討する。

1. 本研究の限界

本研究で得られた結果は、風洞実験に用いた人形模型のサイズおよびその姿勢に依存したレイノルズ数に固有の空気力学的な影響を受ける。そのため、本研究で得られた結果を実際の選手に対して直接当てはめるのは危険であり、選手個々の体格などの条件を考慮した上でその影響を検討する必要がある。また実際の滑走動作に伴う身体各部位の運動の非定常性が本研究のような静止した姿勢を維持した風洞実験との差異を生ずる可能性が

ある¹¹⁾。さらに Terra ら (2023)³⁴⁾ が指摘するように、スケーティング動作による左右への移動が後流を左右に偏らせ、後続選手の空気抵抗に影響を与えていることを考慮すると、本研究の風洞実験は主流に左右方向の偏りがいないためその影響を反映できていないことに留意する必要がある。

2. 単独滑走を想定した単一選手の抗力面積に対する速度変化の影響

1 体のみの人形模型を用いた風洞実験の結果、気流速度を 12 ～ 16 m/s に漸増させると $C_D A$ は 14 m/s まで次第に減少し、さらに気流速度を増大させると $C_D A$ は増大に転じた (Figure 3 および Table 2)。ここで式 (1) に示したレイノルズ数 Re の定義より、空気密度、空気の粘性係数および被検体の代表長に変化がない場合、気流速度の増大は Re の増大として捉えることができる。円柱を被検体とした先行研究によると、風洞実験では Re が約 $2.0 \times 10^5 \sim 5.0 \times 10^5$ の領域で Re を増大させると円柱に作用する $C_D A$ が急激に減少した後に Re の増大に従い漸増することが知られている^{17), 26), 29), 31), 35), 36), 45)}。先行研究^{35), 36)} ではこのような $C_D A$ の Re 応答特性に応じて Re の領域を以下のように定義している。すなわち Re の増大に従って $C_D A$ が極小に至るまで減少するレイノルズ数領域を臨界域、さらなる Re の増大に伴い $C_D A$ が増大するレイノルズ数領域を超臨界域と定義している。これらの先行研究によると、このような $C_D A$ の変化は円柱表面に沿う気流の流れ (境界層) の特性が変化することが原因であることが示されている。すなわち、臨界域における $C_D A$ の減少は主として表面の流れが層流境界層から乱流境界層へ遷移し、剥離点が後方に移動することで後流幅が減少し、結果的に円柱の圧力抵抗が減少することがその原因とされている。さらにその後の超臨界域における $C_D A$ の増大は、形成された乱流境界層が円柱表面から剥離することで剥離点が前方に移動し、後流幅が増大するためとされている。

本研究の実験で用いられた実寸大人形模型は、

これらの先行研究で使用された単純な円柱と比較してより複雑な形状の柱状物体の複合体として捉える必要があるが、本研究の風洞実験におけるレイノルズ数の範囲 ($Re = 3.9 \times 10^5 \sim 5.1 \times 10^5$) において、これらの単純な円柱を用いた先行研究と同様に Re の増大に伴い臨界域 (気流速度 $12 \sim 15$ m/s) から超臨界域 (気流速度 > 15 m/s) へと移行し、人形模型表面の流れに影響を与えた結果、 $C_D A$ の変化を生じたものとする。

3. 先頭走者の抗力面積に対する後続走者の選手間距離および姿勢の影響

本研究では、スピードスケート競技チームパシュート種目における後続走者の姿勢および選手間距離の違いが、先頭走者の空気抵抗に及ぼす影響を検討した。その結果、各気流速度条件内でそれぞれの隊列条件における先頭走者の $C_D A$ はすべて、単独滑走時よりも小さな値を示した (Figure 3)。単独滑走時の $C_D A$ を基準値として各速度における隊列先頭時の $C_D A$ 減少量を相対的に見ると、最大 -18.3% から最小 -4.2% の範囲で減少していた。

このような縦列隊列における先頭物体の抵抗減少の理論的背景は、円柱を対象とした風洞実験^{2), 6)} や数値流体解析 (Computational Fluid Dynamics: CFD)^{1), 23)} によって空気力学的に明らかにされてきた。これらの先行研究によると、縦列隊列の先頭に位置する円柱に後続円柱が近接することによって、先頭円柱の背部 (流れの下流域) の圧力が增大することで圧力抵抗 (円柱前面と背面との圧力差によるもの) が減少するため、先頭円柱の空気抵抗が減少することが示されている。このような空気抵抗の減少は先頭円柱と後続円柱との中心間距離が円柱直径のおよそ $3.5 \sim 4.0$ 倍以上に広がると消失すること^{2), 6), 18)} に加え、前後の円柱の直径が異なる場合には、その直径比が先頭円柱の抵抗減少および上記の間隔に影響を与えることが明らかにされている^{16), 19), 22)}。以下の節では本研究で実施した風洞実験における縦列隊列の後続選手の選手間距離および姿勢が先頭走者

の空気抵抗に与える影響について、これらの先行研究の知見をふまえて考察する。

1) 選手間距離の影響

本研究における隊列の選手間距離 L は $0.8 \sim 1.2$ m の範囲であった。円柱を対象とした先行研究において、円柱間の距離は円柱の直径に対する円の中心間の距離を相対化した無次元数で定義されているため、これに倣い本研究の選手間距離 L を人形模型の代表長である肩幅 d (0.5 m) を用いて L/d として再定義すると、それぞれ 1.6 (0.8 m)、 1.8 (0.9 m)、 2.0 (1.0 m) そして 2.4 (1.2 m) となる (括弧内は選手間距離 L を示す)。円柱を対象とした先行研究^{2), 6), 18)} によれば、円柱間の相対的な距離 L/d (円柱中心間の距離を L 、円柱直径を d とした場合) を $1.1 \sim 4.0$ まで増大させた場合、先頭円柱の $C_D A$ は L/d の増大に従って減少し、 L/d がおよそ 3.0 で極小値を示し、さらに間隔を増大させると $C_D A$ は増大に転じ L/d が $3.5 \sim 4.0$ でほぼ単独の円柱と同じ $C_D A$ になることが示されている。

一方、本研究では L/d を $1.6 \sim 2.4$ まで増大させたところ、最も小さい L/d である 1.6 (0.8 m) において 14 m/s における B および C 条件の $L = 0.9$ m 以外のすべての条件と比較して有意に小さな $C_D A$ を示し、その中間の距離である L/d が 1.8 (0.9 m) および 2.0 (1.0 m) の間では明確な違いは見られなかったものの、 L/d が最大となる 2.4 (1.2 m) 条件の $C_D A$ は同一速度においてより小さな L/d 条件よりも常に大きな値を示した。すなわち全般的には間隔の増大に従い $C_D A$ は増大する傾向が見られた (Figure 3 (a))。このような先行研究との違い (極小値が見られなかったこと) を生じた理由として、本研究で用いられた人形模型が先行研究で用いられた円柱模型のような単純な形状ではなかったことが挙げられる。円柱模型を対象とした実験においても先に挙げた 2 次元的な模型 (円柱の両端が気流の影響を受けないような模型)^{2), 6), 18)} と、3 次元的な模型 (円柱の両端あるいは片端が気流にさらされる模型)^{27), 30)} を用いた実験結果には差が見られることが知られており、

2次元円柱模型で見られた L/d の変化に対する先頭円柱の $C_D A$ の変化パターンが3次元円柱模型では明瞭には再現しないことが示されている。その理由として3次元円柱においては2次元円柱では発生しない円柱自由端から発生する吹き下ろし流れが円柱後流の構造に違いをもたらすことにより円柱表面の圧力分布が変化することが指摘されている^{32), 37)}。さらに Figure 1 に示した通り、人形模型間の距離 L が 0.8 m であっても第2走者の人形模型の頭部は先頭人形模型の手部および腰部とほぼ接触する程度まで近接している。従って、本研究における人形模型間で生じた局所的な近接空間と先行研究で使用された直立円柱模型間の均質な空間との違いが、同じ L/d であってもそれぞれの流れの構造に変化を及ぼした可能性がある。これらを考慮すると、本研究で用いた人形模型の前傾した体幹部および頭部が自由端となり吹き下ろし流れを形成していたことと、人形模型間の局所的な近接による流れの差異が影響したことで、代表的な2次元円柱模型の実験結果との差異を生じたものと推察する。

一方で自転車競技の縦列隊列における先頭走者の空気抵抗低減を取り上げたCFD研究^{7), 9)}は本研究と同様に、隊列を構成する選手間の距離が小さいほど先頭走者の空気抵抗が小さくなることを示している。Blocken ら (2013)⁷⁾ は2台の自転車の縦列隊列を模擬した解析を行い、先頭走者の自転車後輪と後続走者の自転車前輪の間隔を 0.01 から 1.00 m まで増大させると先頭走者の空気抵抗の減少率（単独走を基準値として）が -2.6 から -0.6 % に低下したことを示した。さらに Blocken ら (2018)⁹⁾ は自転車3台の縦列隊列において車輪の間隔を 0.05 から 5.00 m まで増大させた場合、先頭走者の空気抵抗の減少率は -2.8 から -0.01 % に低下したことを報告している。これらの車輪間距離は本研究の選手間距離に換算すると（自転車1車体分である約 1.8 m を加算すると）、それぞれ約 1.81 ~ 2.80 m⁷⁾ および 1.85 ~ 6.80 m⁹⁾ となる。ここで本研究の選手間距離の最大値は 1.2 m で、その空気抵抗の減少率は -4.2 ~ -7.9 % の

範囲であったことを考慮すると、本研究で得られた空気抵抗の減少率がこれらの先行研究よりも大きい原因は、本研究で用いた選手間距離がこれらの先行研究よりも小さかったことに起因するものと考えられる。これらの研究よりも選手間距離が近い先行研究と比較すると、スピードスケート競技のチームパシュート隊列を模擬した風洞実験（選手間距離 0.8 m）を行った湯田ら (2008)⁴²⁾ の研究では、先頭走者の空気抵抗の減少率は -17.3 % であり、本研究における選手間距離 0.8 m 条件の空気抵抗の減少率（-14.6 ~ -18.3 %）とはほぼ同じであった。以上の自転車およびスピードスケートを対象とした先行研究と本研究で得られた結果との議論から、本研究で用いた選手間距離 L が 0.8 ~ 1.2 m の範囲において全般的には L が大きいほど先頭走者の $C_D A$ が大きくなる傾向があると考えられる。

しかしながら $L=0.9$ と 1.0 m との間で $C_D A$ を比較したところ、気流速度によって差の有無が見られた。各姿勢条件における気流速度の影響を詳細に見ると、姿勢条件 B では気流速度 12 および 14 m/s で有意な差が見られず、気流速度が 13、15 および 16 m/s では有意な差が見られた。また姿勢条件 C および D では、気流速度 12 ~ 15 m/s で有意な差が見られなかったものの、気流速度を 16 m/s まで増大させると、これらの距離条件間で差が見られた。ここで、本実験の先頭走者を模擬した風洞実験のレイノルズ数は気流速度 12 ~ 15 m/s までは臨界域、15 m/s よりも大きな速度では超臨界域であったことを想起すると、このように同じ姿勢条件かつ同じ選手間距離であっても比較的气流速度が低速な条件では有意な差が見られず、同じく比較的高速な条件で有意な差が見られた原因として、Okajima (1979)²⁵⁾ が指摘したレイノルズ数の影響が挙げられる。すなわち、レイノルズ数が亜臨界域（臨界レイノルズ数よりも低い領域）では2円柱の縦列隊列における先頭円柱の抗力係数への円柱間距離の影響が見られたものの、さらにレイノルズ数を臨界領域まで増大させると円柱間距離の影響は漸減の後抗力係数が極小

値を示す領域でその影響は消失し、さらに超臨界域まで速度を増大させると再び円柱間距離の影響が顕在化したという現象である。本研究においても同様に、選手間距離の影響はレイノルズ数が臨界域において潜在化し、超臨界域において顕在化したものとする。レイノルズ数の変化が円柱の周辺の気流構造および空気力に影響を与える現象については、数多くの報告がある^{4), 25), 26), 31), 33), 38), 43), 44)}。中でも Bearman(1969)は、レイノルズ数の増大に伴う抗力係数の急激な低下は臨界域において円柱表面に剥離泡が形成されるためであることを明らかにしている⁴⁾。すなわち、レイノルズ数を増大（速度の増大と同意）させ、臨界域に達すると円柱表面の層流境界層が層流剥離を起こし、この層流剪断層が乱流境界層に遷移して円柱の表面に再付着することにより、剥離泡を形成する。再付着した乱流境界層は層流剥離した点よりも下流で再び剥離する。このような剥離点の後退のため円柱の後流幅が狭くなり抗力係数が減少する。前述の臨界域における剥離泡形成は2段階あり、臨界域の初期における剥離泡は円柱の片側のみで生じ、後流が主流の方向から左右(主流に対して直交する方向)のどちらかに偏って流れる構造となる。さらにレイノルズ数が臨界域の後期に達すると剥離泡は円柱の両側に形成され、円柱の後流は幅が狭くなり左右への偏りなく後方に流れるようになる。超臨界域においては乱流境界層が円柱表面の上流側で剥離するために後流が(偏りなく)広がり抗力係数が増大する。

これらの円柱を対象とした先行研究から、臨界レイノルズ数領域では円柱の後流が円柱の後方ではなく(主流方向に対して左右のどちらかに)傾くこと、さらに臨界レイノルズ数領域の後期から超臨界域に至って再び後流は円柱の後方に流れるようになることが分かる。ここで、流れの中に置かれた円柱の圧力抵抗は円柱の後流発生に伴う円柱前後の圧力差によって生ずることを想起すると^{4), 26)}、先に述べた Okajima (1979)²⁵⁾ の円柱縦列実験において、円柱間隔が先頭円柱の抗力係数に与える影響がレイノルズ数領域の違いによって

変化した原因を以下のように推察する。すなわち、このような臨界領域における先頭円柱の後流の構造変化によって後続円柱が先頭円柱の後流に覆われる領域が大きい程その干渉作用は強く現れ、その反対に後続円柱が先頭円柱の後流に覆われる領域が小さい程その干渉作用は小さくなったというものである。

このような円柱実験の先行研究の知見から得られた推論を本研究で得られた結果に当てはめて考察すると、気流速度 12 ~ 15 m/s ではレイノルズ数が臨界域であったことから先頭人形模型の後流が偏ったため真後ろに配置された後続人形模型が先頭人形模型の後流に覆われる領域が減少し、選手間距離による干渉作用の影響⁴⁴⁾が出にくい状況であったものと推察する。さらに気流速度の大きい 16 m/s 条件では超臨界域に達し、先頭人形模型の後流は偏りが小さくなったことで、後続人形模型が後流に覆われる領域が増大したため選手間距離の影響が顕在化したものとする。

その一方で、最も選手間距離 L の小さい 0.8 m 条件は 14 m/s における B および C 条件の $L=0.9$ m 以外のすべての条件と比較して有意に小さな $C_D A$ を示した。このように比較的気流速度の影響を受けなかった原因について考えると、先頭人形模型の後流が偏っていても、選手間距離が非常に小さいため、後流に覆われることが可能となったためではないかと推察する。

2) 後続走者の姿勢の影響

本研究では、隊列における後続走者の姿勢を先頭走者と同じ条件 (A)、さらに先頭走者よりも大きな投射面積となる上胴迎角の組み合わせ B ~ D (後続走者の投射面積の合計が $A < B < C < D$ の順に大きい) をそれぞれ比較することにより、先頭走者への $C_D A$ 低減に後続走者の姿勢(投射面積の大きさ)が影響しているか検討した。その結果、後続走者の合計投射面積が A から D の順に大きくなるに従って先頭走者の $C_D A$ が有意に小さくなったのは $L=1.0$ m における気流速度 15 および 16 m/s 条件および $L=0.8$ m における気流速度 16 m/s 条件のみであった ($L=0.8$ では A 姿



Figure 4 An example which shows the largest athlete is placed as the second skater in the team pursuit formation.

*This image was edited by the author after filmed by the Japan Skating Federation.

勢の実施なし)。上記以外の気流速度および選手間距離の条件下では、必ずしも後続走者の投射面積の合計が大きいほど先頭走者の $C_D A$ が小さいわけではなかった。ただし、各姿勢条件間の比較において先頭走者の空気抵抗が有意に小さかったケースは、いずれも後続選手の投射面積の合計がより大きい姿勢条件であったことに加え、いずれの速度条件においても最も小さな $C_D A$ を示した姿勢条件は後続走者の投射面積が最も大きい D であったことから、後続走者の姿勢は先頭走者の $C_D A$ に影響を与えていた可能性がある。

しかしながら、最も選手間距離の大きい条件である $L=1.2$ m で、先頭走者の $C_D A$ に有意な差が見られたのは、気流速度 16 m/s における姿勢条件 A および C、さらに A および D の組み合わせのみであり、いずれも A がより大きな値を示した。さらに $L=1.2$ m において気流速度 12 ~ 15 m/s の条件では、いずれの姿勢条件間においても先頭走者の $C_D A$ の大きさに有意な差は見られなかった。これらの結果は、隊列における選手間距離が 1.2 m 以上の場合には後続選手の姿勢の差異が先頭走者の空気抵抗にほぼ影響しないことを示唆するものである。

また、本研究では隊列の最後尾となる第 3 走者 (Third) の姿勢が先頭走者に及ぼす影響を検討するために姿勢 B と C との比較を行った。その結果、最も選手間距離の小さい $L=0.8$ m において速度 16 m/s の速度条件のみ B が C より有意に大きな $C_D A$ を示した。また上記よりも選手間距離の大きな $L=1.0$ m においても 13、15 および 16 m/s の

速度条件で B が C より有意に大きな $C_D A$ を示した。これらの結果は、自転車の縦列隊列を対象とした研究⁹⁾において、3 台隊列の方が 2 台隊列よりも先頭走者の空気抵抗が減少していたという報告および、陸上競技の長距離走の縦列隊列を対象とした研究⁵⁾において、先頭走者の抗力係数は 2 名隊列よりも 5 名隊列の方が小さかったという報告と類似していると考ええる。すなわち、縦列隊列における先頭走者の空気抵抗は直後の第 2 走者のみならず第 3 走者以降の選手の影響を受けることを意味しており、第 3 走者以降の選手の姿勢の変化も同様に先頭走者に対して影響を与えることを示唆するものである。

比較的大きな後続物を配置した先行研究⁸⁾ (自転車の後ろに 2 人乗りモーターバイクを並列に 1 ~ 3 台配置) は、先頭自転車との車輪間隔 (0.25 ~ 1.00 m) によらず、モーターバイクの台数 (すなわち後続走者の投射面積の大きさ) の違いが先頭の自転車走者の空気抵抗低減に与える効果はその台数に比例していたことを報告している。本研究の結果はこれと異なり、選手間距離の小さい $L=0.8$ および 0.9 m より、やや大きな選手間距離である $L=1.0$ において姿勢の違いによって先頭走者の $C_D A$ の差に有意性が見られるケースが増えた。この原因は不明であるが、前述のように、本研究で用いた人形模型特有の形状に起因する後流の構造がレイノルズ数領域によって影響を受けることを考慮すると、CFD や PIV (Particle Image Velocimetry) 等の気流の可視化手法によって隊列間の気流構造を明らかにし、先頭走者の抵抗低減の原因である先頭走者の背部 (流れの下流域) の圧力が增大する原因を詳細に検討することが今後の課題であると考ええる。

本節では後続走者の選手間距離とその姿勢が先頭走者の抗力低減に与える影響を議論してきた。本研究の結果から競技現場への示唆を以下のように考える。近年新たな戦術として、ワールドカップや世界選手権においてチームパシュートの先頭交代回数を減らし、選手同士が互いに触れられるほどに狭い前後間隔を常に維持する、いわゆる

「プッシュ」戦術 (Figure 4 参照) を採用するチームが多く見られるようになった²¹⁾。ただし、このように交代の少ない戦術は最も空気抵抗の大きい先頭走者としての滑走時間を増大させることになるため、その身体的負担が著しく増大すると推察される。その負担を軽減するため、後続走者が前走者をプッシュすることで直接的に力を伝えるとともに、プッシュ動作に付随して起こる選手間の近接条件そのものが先頭走者の空気抵抗低減作用をもたらすことを最大限に利用すべきである。すなわち直接的にプッシュできなくても選手間距離を小さく (少なくとも 1.2 m 以内) 保つことは空気力学的に有効な戦術となる。また後続選手の姿勢については、比較的高い姿勢を取ることで同様に先頭走者の空気抵抗低減に貢献する可能性がある。ただし、高い姿勢を取った後続選手が受ける空気抵抗は投射面積の増大に従って増大するものと考えられ、3 名の選手それぞれの空気抵抗の最適化が今後の検討課題である。この課題の解法の一つとして、先頭走者と比較して相対的に大きな形態を有する選手を第 2 走者として配置することを提言する (Figure 4 参照)。その根拠は体格の大きな第 2 走者は体幹迎え角を特別に増大することなく大きな投射面積を有するため、第 2 走者自身の受ける $C_D A$ を抑制しつつ、さらに前後走者への空気抵抗低減の可能性を有する点にある。

V. まとめ

本研究の目的は、スピードスケート競技のチームパシュート種目において、後続選手の前後間距離および滑走姿勢が先頭走者の空気抵抗低減に及ぼす影響を風洞実験によって明らかにすることであった。得られた結果から、チームパシュート隊列を構成する 3 名の選手の前後間距離は 1.2 m 程度離れていても、先頭走者の空気抵抗を単独滑走時よりも削減できることが明らかとなった。さらに本研究で行った最小の選手間距離である 0.8 m において最も大きな空気抵抗の削減が見られたことから、選手間の距離が小さいほどこの効果は高まることが明らかとなった。また後続選手の姿勢

(上胴迎角が大きいこと) によっても先頭走者の空気抵抗を減少できることが明らかとなった。さらに第 2 走者のみならず第 3 走者の姿勢の変化でさえも先頭走者の空気抵抗に影響を及ぼす可能性が示唆された。

謝辞

本研究はスポーツ庁委託事業「スポーツ支援強化のための基盤整備事業」および国立スポーツ科学センタースポーツ医・科学研究事業の一部として実施した。また、公益財団法人日本スケート連盟の協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

本論文に関連し、開示すべき利益相反関連事項はない。

文献

- 1) Aasland TE, Pettersen B, Andersson HI, Jiang F. Revisiting the reattachment regime: a closer look at tandem cylinder flow at $Re = 10,000$. *J Fluid Mech*, 953: A18, 2022.
- 2) Alam MM, Moriya M, Takai K, Sakamoto H. Fluctuating fluid forces acting on two circular cylinders in a tandem arrangement at a subcritical Reynolds number. *J Wind Eng Ind Aerod*, 91 (1-2) : 139-154, 2003.
- 3) Barry N, Burton D, Sheridan J, Thompson M, Brown NT. Aerodynamic drag interactions between cyclists in a team pursuit. *Sports Eng*, 18 (2) : 93-103, 2015.
- 4) Bearman PW. On vortex shedding from a circular cylinder in the critical Reynolds number régime. *J Fluid Mech*, 37 (3) : 577-585, 1969.
- 5) Beaumont F, Legrand F, Bogard F, Murer S, Vernede V, Polidori G. Aerodynamic interaction between in-line runners: new insights on the drafting strategy in running. *Sport Biomech*, doi: 10.1080/14763141.2021.2006295, 2021.
- 6) Biermann D, Herrnstein WH, Jr. The interference

- between struts in various combinations. NACA Report, No. 468: 515–524, 1933.
- 7) Blocken B, Defraeye T, Koninckx E, Carmeliet J, Hespel P. CFD simulations of the aerodynamic drag of two drafting cyclists. *Computers & Fluids*, 71: 435–445, 2013.
 - 8) Blocken B, Toparlar Y, Andrianne T. Aerodynamic benefit for a cyclist by a following motorcycle. *J Wind Eng Ind Aerod*, 155: 1–10, 2016.
 - 9) Blocken B, Toparlar Y, van Druenen T, Andrianne T. Aerodynamic drag in cycling team time trials. *J Wind Eng Ind Aerod*, 182: 128–145, 2018.
 - 10) Carbó Molina A, De Troyer T, Massai T, Vergaerde A, Runacres MC, Bartoli G. Effect of turbulence on the performance of VAWTs: An experimental study in two different wind tunnels. *J Wind Eng Ind Aerod*, 193: 103969, 2019.
 - 11) D'Auteuil A, Larose GL, Zan SJ. The effect of motion on wind tunnel drag measurement for athletes. *Procedia Engineer*, 34: 62–67, 2012.
 - 12) de Koning JJ, van Ingen Schenau GJ. Performance-Determining Factors in Speed Skating. In: Zatsiorsky VM (ed.) *Biomechanics in Sport*. Blackwell Science Ltd, pp. 232–246, 2000.
 - 13) Defraeye T, Blocken B, Koninckx E, Hespel P, Verboven P, Nicolai B, Carmeliet J. Cyclist drag in team pursuit: influence of cyclist sequence, stature, and arm spacing. *J Biomech Eng*, 136 (1) : 011005. doi: 10.1115/1.4025792, 2014.
 - 14) Dunnett CW. A Multiple Comparison Procedure for Comparing Several Treatments with a Control. *J Am Stat Assoc*, 50 (272) : 1096–1121, 1955.
 - 15) Edwards AG, Byrnes WC. Aerodynamic characteristics as determinants of the drafting effect in cycling. *Med Sci Sports Exerc*, 39 (1) : 170–176, 2007.
 - 16) Hiwada M, Taguchi T, Mabuichi I, Kumada M. Fluid Flow and Heat Transfer around Two Circular Cylinders of Different Diameters in Cross Flow. *Bulletin of JSME*, 22 (167) : 715–723, 1979.
 - 17) Hoerner SF. *Fluid-dynamic drag. Practical information on aerodynamic drag and hydrodynamic resistance*. Published by author, 1958.
 - 18) Igarashi T. Characteristics of the Flow around Two Circular Cylinders Arranged in Tandem: 1 st Report. *Bulletin of JSME*, 24 (188) : 323–331, 1981.
 - 19) Igarashi T. Characteristics of a Flow around Two Circular Cylinders of Different Diameters Arranged in Tandem. *Bulletin of JSME*, 25 (201) : 349–357, 1982.
 - 20) International Skating Union. Mantia anchors USA to Team Pursuit world record to conclude Salt Lake City World Cup [press release 2021 December 6]. <https://www.isu.org/media-centre/press-releases/2021-2/26679-isu-world-cup-speed-skating-salt-lake-city-day-3/file>. (2023 年 6 月 1 日)
 - 21) International Skating Union. No change is as good as a rest for team pursuit champions. [press release 2021 January 29]. <https://www.isu.org/media-centre/press-releases/2021-2/25459-isu-world-cup-speed-skating-2-day-1/file>. (2023 年 6 月 1 日)
 - 22) Jiang R, Lin J, Ku X. Numerical predictions of flows past two tandem cylinders of different diameters under unconfined and confined flows. *Fluid Dyn Res*, 46 (2) : doi: 10.1088/0169-5983/46/2/025506, 2014.
 - 23) Kitagawa T, Ohta H. Numerical investigation on flow around circular cylinders in tandem arrangement at a subcritical Reynolds number. *J Fluids Struct*, 24 (5) : 680–699, 2008.
 - 24) 紅楳英信, 横澤俊治, 山辺芳, 白崎啓太, 湯田淳. スピードスケート競技チームパシュートにおける隊列形態の検討. *日本体育学会大会予稿集*, 66: 289, 2015.

- 25) Okajima A. Flows around Two Tandem Circular Cylinders at Very High Reynolds Numbers. *Bulletin of JSME*, 22 (166) : 504-511, 1979.
- 26) Roshko A. Experiments on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds number. *J Fluid Mech*, 10 (3) : 345-356, 1961.
- 27) Roshko A. Perspectives on bluff body aerodynamics. *J Wind Eng Ind Aerod*, 49 (1-3) : 79-100, 1993.
- 28) Rundell KW. Effects of drafting during short-track speed skating. *Med Sci Sports Exerc*, 28 (6) : 765-771, 1996.
- 29) Schewe G. On the force fluctuations acting on a circular cylinder in crossflow from subcritical up to transcritical Reynolds numbers. *J Fluid Mech*, 133: 265-285, 1983.
- 30) Sumner D, Reitenbach HK. Wake interference effects for two finite cylinders: A brief review and some new measurements. *J Fluids Struct*, 89: 25-38, 2019.
- 31) 種子田定俊. 画像から学ぶ流体力学. 朝倉書店, 1988.
- 32) Taniguchi S, Sakamoto H, Arie M. Interference Between Two Circular Cylinders of Finite Height Vertically Immersed in a Turbulent Boundary Layer. *J Fluid Eng*, 104 (4) : 529-536, 1982.
- 33) 辰野正和, 浜田義勝, 石井幸治, 天本肇, 烏谷隆. 臨界レイノルズ数領域における直列2円柱の揚力発生機構. 日本流体力学会年会講演論文集, 19: 453-454, 2000.
- 34) Terra W, Spoelstra A, Sciacchitano A. Aerodynamic benefits of drafting in speed skating: Estimates from in-field skater's wakes and wind tunnel measurements. *J Wind Eng Ind Aerod*, 233: doi: 10.1016/j.jweia.2023.105329, 2023.
- 35) 植松康. 二次元円柱まわりの流れの分類と臨界レイノルズ数について. 日本風工学会誌, 1990 (43) : 35-43, 1990.
- 36) 植松康, 山田大彦, 石井馨. 有限長円柱の空気力学的特性に関する研究—その1文献研究. 日本風工学会誌, 1988 (34) : 3-18, 1988.
- 37) 植松康, 山田大彦, 石井馨. 有限長円柱の空気力学的特性に関する研究その2風洞実験. 日本風工学会誌, 1988 (36) : 27-43, 1988.
- 38) 卯月英夫. 二次元流中における円柱の揚力係数について. 日本航空宇宙学会誌, 28 (322) : 537-546, 1980.
- 39) van den Brandt FAP, Stoter IK, Otter RTA, Elferink-Gemser MT. Why Train Together When Racing Is Performed Alone? Drafting in Long-Track Speed Skating. *Int J Sports Physiol Perform*, 16 (12) : 1874-1879, 2021.
- 40) van Ingen Schenau GJ. The influence of air friction in speed skating. *J Biomech*, 15 (6) : 449-458, 1982.
- 41) West GS, Apelt CJ. The effects of tunnel blockage and aspect ratio on the mean flow past a circular cylinder with Reynolds numbers between 10^4 and 10^5 . *J Fluid Mech*, 114: 361-377, 1982.
- 42) 湯田淳, 青柳徹, 高松潤二, 山辺芳, 鈴木恵一. スピードスケートチームパシュ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, 2008.
- 43) Zdravkovich MM. Review of Flow Interference Between Two Circular Cylinders in Various Arrangements. *J Fluid Eng*, 99 (4) : 618-633, 1977.
- 44) Zdravkovich MM. The effects of interference between circular cylinders in cross flow. *J Fluids Struct*, 1 (2) : 239-261, 1987.
- 45) Zdravkovich M. M., Flow around circular cylinders: a comprehensive guide through flow phenomena, experiments, applications, mathematical models, and computer simulations. Vol 1: Fundamentals, Oxford University Press, 1997.