

令和 4 年 6 月 18 日現在

機関番号：82632

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K11514

研究課題名(和文) スキージャンプ女子選手の踏み切り動作における空気力学的特徴

研究課題名(英文) Aerodynamic characteristics of the take-off motion in ski jumping by the female athletes

研究代表者

山辺 芳 (Yamanobe, Kaoru)

独立行政法人日本スポーツ振興センター国立スポーツ科学センター・スポーツ科学部・前任研究員

研究者番号：00346470

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：女子スキージャンプ選手および男子コンバインド選手を対象に、風洞実験室において無風及び有風(25 m/s)の気流環境下で模擬踏み切り動作を行わせた。その結果、有風時において選手が発揮した床反力は揚力によって減少していたものの、揚力によって選手が引き上げられる作用によって結果的に大きな上昇速度を獲得していたことが明らかとなった。このような揚力の貢献度は選手によって異なり11～26%であった。女子選手の方が男子選手よりも大きな貢献度を示す傾向が見られた。さらに踏み切り動作の前半部分において揚力の影響が顕著に観察されたことから、踏み切り動作初期の姿勢に揚力獲得の要因があることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スキージャンプの踏み切り動作に伴う空気力の影響について、実際の選手を対象とした風洞実験によって作用した揚力がどの程度上昇速度に貢献しているのか明らかとなった。またその貢献度は最大で上昇速度の26%にも及び、出力が小さい選手あるいは女性の方が男性よりも強く影響を受けることを明らかにした。一方無風状態で大きな上昇速度を発揮できる選手は有風時に揚力によるさらなる速度の増大を得ることは困難と推察された。さらに揚力の作用は踏み切り動作のごく初期に現れることを示したことで踏み切り動作において揚力を効果的に獲得するためには踏み切り動作の初期における姿勢変化が重要であるという技術的示唆を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：Female ski jumpers and male Nordic combined skiers were subjected to a simulated ski jump take-off motion in a wind tunnel under no wind and windy (25 m/s) airflow conditions. The results showed that the ground reaction force exerted by the athletes in the windy condition was reduced by the lift force, nevertheless athletes gained a large vertical velocity by using the lift force that assisted them up. The contribution of the lift force to the vertical velocity varied from 11% to 26%, depending on the athlete. Female athletes tended to show higher contribution rate than male athletes. Furthermore, the effect of lift force was observed to be more pronounced in the first half of the take-off movement, suggesting that the posture in the initial phase of the step-off movement was a factor in the acquisition of lift force.

研究分野：スポーツバイオメカニクス

キーワード：スキージャンプ 空気力 バイオメカニクス

1. 研究開始当初の背景

スキージャンプの踏み切り動作によって得られる身体重心の上昇速度の大きさがスキージャンプの飛距離に影響を与えることが、コンピュータシミュレーションを用いた研究によって理論的に確かめられてきた(Denoth ら 1987, Müller ら 1996)。また、実際の競技場面においても、映像解析によって得られた身体重心の上昇速度と飛距離との間に、正の相関関係が観察されている(Komi ら 1974, Schwameder と Müller 1995)。このような助走路に対して垂直上向きの上昇速度を身体重心に与えるためには、踏み切り動作によって、助走路に対して垂直下向きに力を発揮し、その反力である床反力を得ることが重要となる。実際のジャンプにおける床反力発揮の様子を知るために、ジャンプ台に床反力計を埋設し、選手が発揮した床反力を直接計測することが行われてきた (Virmavirta ら 1989, 山辺ら 1999)。その結果、床反力の大きさが飛距離に影響を与えることが明らかとなった。さらに床反力発揮パターンは一流競技者のみを対象とした場合でも大きな個人差があることが山辺ら (2002) によって示され、多様な床反力発揮様式によって上昇速度を獲得していることが明らかとなった。一方で、踏み切り動作による姿勢変化がもたらす揚力によって、無風時に比べて踏み切り時間が短縮されたという報告 (Virmavirta ら 2001, Virmavirta ら 2010) が示すように、踏み切り動作時の上昇速度獲得には選手が能動的に発揮する動力学的な要素に加えて、外力として作用する空気力学的な要因を検討する必要がある。

ここで、女子ジャンプ選手に目を向けると、日本人選手が国際競技会で上位入賞するなど、国内の女子選手の技術は国際的にも高いレベルにあると考えられる。しかしながらこれらの女子ジャンプ選手を対象とした動作分析によると、踏み切り動作に伴う上昇速度の進行方向及び鉛直方向の成分が男子選手に比べて著しく小さいことが示されている(山辺 2014)。女子選手の踏み切り動作における技術的課題は踏み切り動作に伴う前傾姿勢への移行の遅れであると指摘するコーチは多いが、その原因が、踏み切り動作によって得られる角運動量の不足であるのか、姿勢に由来する空気抵抗の影響なのか明確に示した報告はない。

これらの背景から、女子選手に特有の技術的課題であると考えられる、踏み切り動作による身体重心の前方及び上方向への加速および前傾姿勢への移行の困難さについて、選手の発揮した動力学的な要素と空気力学的な外的要素を検討することで、その原因を論理的に理解することができるものと考えた。また世界でもトップクラスの成績を得ている国内女子ジャンプ選手の踏み切り動作技術(前方への加速および鉛直方向への上昇速度)が国内一般男子選手に比べても低いパフォーマンスであったことが、本研究着想の最初の動機であった。この原因を単純な筋力不足によるものなのか、高速移動中の空気力に対する姿勢制御の問題なのか明確にすることが次世代の選手に対する技術指導に重要であると考えた。

2. 研究の目的

従来スキージャンプの踏み切り動作における動作速度の小ささは、単純に動作方向への出力不足あるいは動作開始のタイミングの遅れの問題として捉えられることが多かった。本研究は、踏み切り動作に関わる空気力を風洞実験によって明らかにすることで、単純な動作の出力の大きさのみならず、外力として作用する空気力の影響を技術的観点に取り込むことを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 風洞実験室におけるシミュレーションジャンプの解析：スキージャンプ選手(女子5名：F1~F5)、ノルディックコンバインド選手(男子3名：M1~M3)を対象に、風洞実験室において無風(0 m/s)および有風環境下(25 m/s)で踏切動作を実施させ(各試技1~5回)、高速度ビデオ映像(1000 fps)を用いた2次元画像分析を行った(図1)。風洞内に埋設した6分力計による反力測定を行った(サンプリング周波数1000 Hz)。踏切動作開始(映像による)から足部の離地(反力による)までの時間を踏み切り時間として求めた(Takeoff_time)。踏み切り動作に伴って発揮された反力の最大値(MaxFPz)を求めた。画像分析による身体重心速度(CGVz)と床反力の積分による上昇速度(ImpulseFPz)を求めた。揚力を推定するために、CGVzの微分値(加速度)から床反力由来の加速度を差し引きその積分値を求めた(ImpulseLift)。

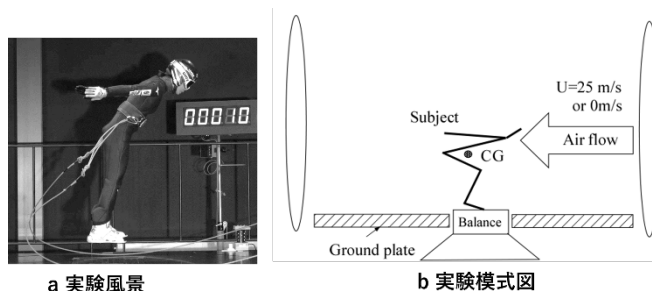


図1 風洞実験における踏み切り動作の計測

4. 研究成果

(1) 図2に各選手(女子5名：F1~F5, 男子3名：M1~M3)の上昇速度および反力データの積分値を示す。反力の積分値から求められた ImpulseFPz について、いずれの選手においても無風時の方が有風時よりも大きな値を示した。しかしながら画像解析によって求められた身体重心

の上昇速度 CGVz の値はいずれの選手においても有風時の方が無風時よりも大きいか同等であった (M3 選手を除く)。また有風時においてすべての選手で CGVz が ImpulseFPz よりも大きな値を示した。これらの結果は、有風時における揚力の作用によって床反力そのものが小さくなっていることを示すと同時に、揚力は上昇速度の獲得にも貢献していることを示唆するものと考えられる。

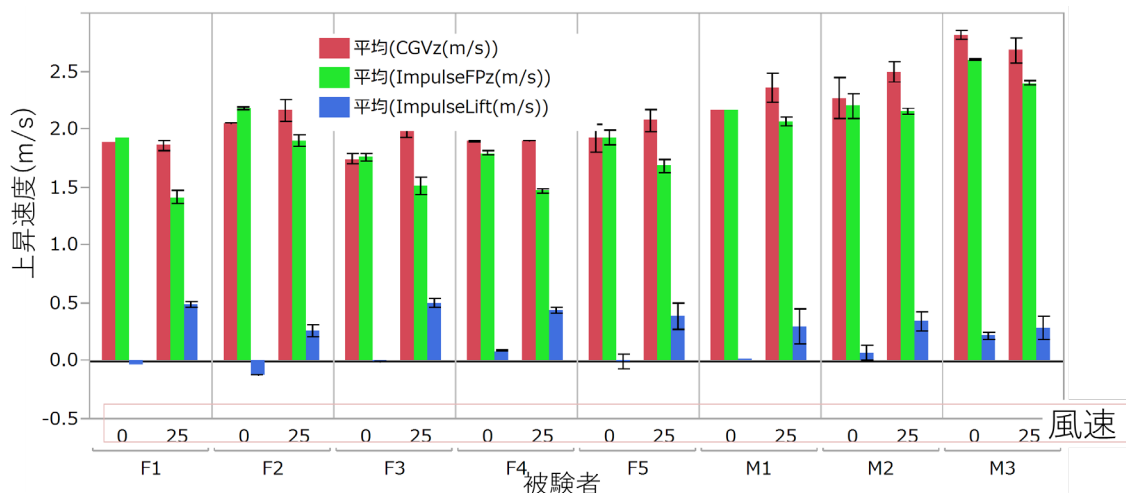


図 2 無風および有風条件下の踏み切り動作によって発揮された上昇速度 CGVz および反力の積分値 ImpulseFPz とその差分によって推定された揚力の積分値 ImpulseLift

(2) 表 1 に無風および有風時の上昇速度における揚力の貢献度 (%) を示す。貢献度は $(\text{ImpulseLift} / \text{CGVz}) \times 100$ として算出した。無風条件における貢献度は揚力が働かないため理論上ゼロとなるはずであるが $-6.01 \sim 7.61$ (%) の値が得られた。これらは計測手法上の誤差の大きさを示すものであり、手動で行った画像解析の精度に依存する部分が多いものとする。一方で有風時における貢献度は $11.87 \sim 25.93$ (%) と選手間で大きな差が見られたものの、前述の誤差の範囲を考慮しても揚力による貢献があったものとする。揚力の貢献度が 20 (%) を超えていたのは女子選手のみであり、男子選手は女子選手よりも貢献度が小さい傾向であった。これらの結果から、女子選手においては男子選手よりも揚力を有効に利用した踏み切り動作が行われている可能性が示唆された。

表 1 無風および有風条件下の上昇速度に対する揚力の貢献度 (%)

wind	0 m/s		25 m/s	
Sub	Mean	SD	Mean	SD
F1	-1.84	.	25.93	1.27
F2	-6.01	0.11	11.87	1.92
F3	-0.58	0.04	25.07	1.1
F4	4.61	0.63	22.91	1.14
F5	-0.59	3.25	18.7	4.64
M1	0.67	.	12.29	5.54
M2	3.07	2.57	13.71	2.8
M3	7.61	1.05	10.62	3.33

(3) 一方で、床反力の最大値 MaxFPz および踏切時間 Takeoff time について有風時と無風時を比較したところ、いずれも風の条件によって大きな変化は見られなかった (図3)。すなわち前述の気流環境の違いによる上昇速度の変化は床反力の最大値や踏切時間の変化に由来するものではないと推察される。

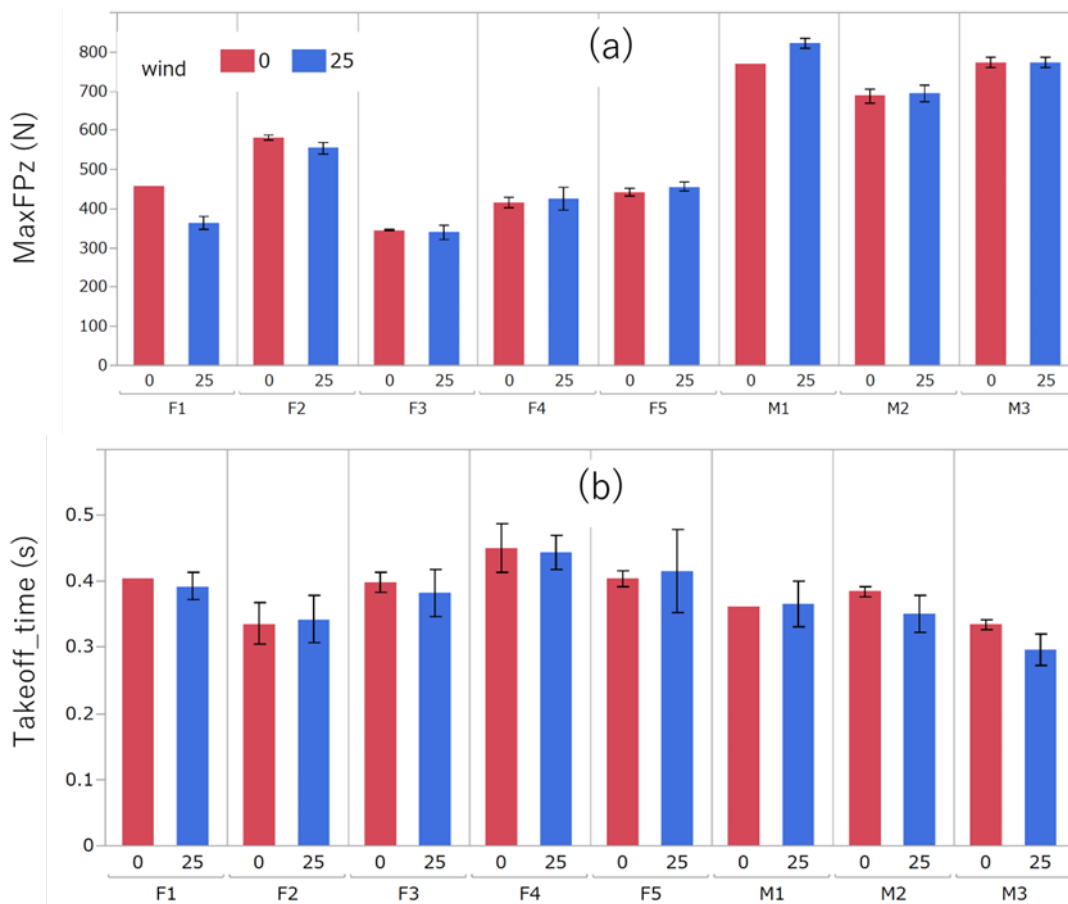


図 3 無風及び有風条件の踏み切り動作によって発揮された床反力の最大値 MaxFPz (a) および踏み切り動作時間 Takeoff Time (b)

(4) 前述のように床反力の最大値や踏み切り時間による大きな変化が見られない中で、揚力の作用による上昇速度増大がどのようにして起こっているのか明らかにするため、揚力の貢献度が高かった女子選手(F3)を対象として床反力波形の解析を行った (図4)。床反力の立ち上がりが見られる踏み切り動作の初期局面 (離地から-0.4~-0.3 秒手前)において、有風時は無風時に比べて反力が小さかった。この結果は踏み切り動作初期において揚力の引き上げ作用による反力の減少が見られたものと考えられる。すなわち、踏み切り動作における初期局面の姿勢変化が揚力獲得に大きく貢献していることが示唆された。今後詳細な姿勢変化と揚力の変化とを時系列的に解析することで、どのような姿勢変化が揚力獲得に貢献しているのか明らかし、より効果的に揚力を利用して上昇速度を獲得できる踏み切り動作技術を明らかにすることが課題である。

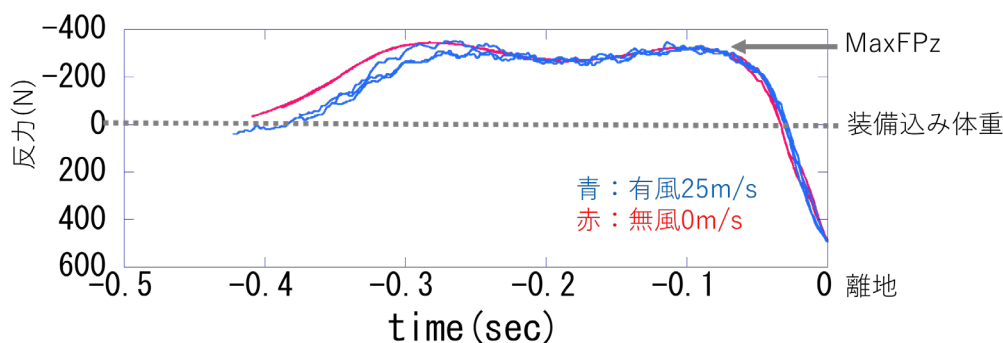


図 4 揚力の貢献度が高かった女子選手(F3)の反力波形

引用文献

- Denoth J, Luethi SM, Gasser HH (1987): Methodological problems in optimization of the flight phase in ski jumping. *International Journal of Sport Biomechanics* 3 (4): 404-418
- Komi PV, Nelson RC, Pulli M (1974): Biomechanics of skijumping. *Studies in Sport Physical Education and Health*, 5, University of Jyväskylä, Jyväskylä
- Müller W, Platzer D, Schmölzer B (1996): Dynamics of human flight on skis: improvements in safety and fairness in ski jumping. *Journal of Biomechanics* 29 (8): 1061-1068
- Schwameder H, Müller E (1995): Biomechanische Beschreibung und Analyse der V-Technik im Skispringen. *Spectrum der Sportwissenschaften* 7 (1): 5-36
- Virmavirta M, Komi PV (1989): The takeoff forces in ski jumping. *International Journal of Sport Biomechanics* 5 (2): 248-257
- Virmavirta, M., Kivekäs, J., & Komi, P. (2001): Take-off aerodynamics in ski jumping. *Journal of Biomechanics*, 34(4), 465-470.
- Virmavirta, M., Kivekas, J., & Komi, P. (2011): Ski jumping take-off in a wind tunnel with skis. *Journal of Applied Biomechanics*, 27(4), 375-379.
- 山辺 芳, 渡部 和彦 (1999): スキージャンプ競技場面における踏力の測定. *バイオメカニクス研究* 3 (4): 277-286
- 山辺 芳, 渡部 和彦 (2002): 一流スキージャンプ選手を対象としたスキージャンプ踏切局面における床反力発揮の特徴. *バイオメカニクス研究* 6 (1): 2-14
- 山辺 芳 (2014): スキージャンプ競技の踏み切り動作に関するバイオメカニクス. *バイオメカニクス研究* 17 (4): 201-205

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 山辺 芳	4. 巻 85
2. 論文標題 競技スポーツを支援する空気力学	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 宙舞：自動車技術会中部支部報	6. 最初と最後の頁 10-14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Kaoru Yamanobe
2. 発表標題 Wind tunnel laboratory assistance for sports with high speed movement
3. 学会等名 13th International Congress on Sport Science（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山辺芳, 鈴木功士, 三浦智和, 山本悠介
2. 発表標題 スキージャンプ踏み切り動作における床反力発揮の性差について
3. 学会等名 第27回日本バイオメカニクス学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山辺芳, 鈴木功士, 明石啓太
2. 発表標題 スキージャンプ踏切動作において空気力が身体重心速度に与える影響
3. 学会等名 日本体育・スポーツ・健康学会第71回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山辺 芳, 松本 実, 石毛 勇介
2. 発表標題 スキージャンプ踏み切り動作における下腿の挙動が重心速度獲得に及ぼす影響
3. 学会等名 日本体育学会第70回大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------