

平昌2018パラリンピック冬季競技大会の
バイアスロン競技におけるシットスキーの滑走速度の分析

Analysis of Cross-country Sit-skiing Velocity in the Biathlon Competition
in the PyeongChang 2018 Paralympics Winter Games

渡部 峻¹⁾ 近藤 雄一郎²⁾ 竹田 唯史^{1), 3)} 山本 敬三^{1), 3)}

Shun WATANABE¹⁾ Yuichiro KONDO²⁾ Tadashi TAKEDA^{1), 3)} Keizo YAMAMOTO^{1), 3)}

Abstract

This research was conducted to investigate determining factors for the rank of biathlon sit-ski competition in the PyeongChang Paralympics 2018 and to identify possible relations between skiing velocity and poling action. We analyzed data of 15 female athletes participating in the 6 km biathlon sit-ski in the PyeongChang Paralympics using official records and video recording of skiing motions. The rankings and the numbers of missed shots were drawn from official records. The relative skiing velocity and poling frequency of each athlete were obtained by analyzing video recordings. For statistical processing, correlations between the ranking and skiing velocity, and the number of missed shots were analyzed respectively using Spearman's correlation coefficient by rank Test. Pearson's product-moment correlation analysis was used to evaluate the correlative relation between skiing velocity and poling frequency. To assess differences between skiing velocity and poling frequency, one-way analysis of variance and multiple comparison test were used. Significance of all statistical processes inferred for results less than 5%. Results show significant correlative coefficient between the ranking and average skiing velocity ($r_s = -0.5951$, $p < 0.05$), and the number of missed shots ($r_s = 0.5874$, $p < 0.05$). The missed shots of higher ranked athletes were fewer. Therefore, one can infer that higher ranked athletes have higher shooting skill. No significant correlative coefficient was found between skiing velocity on a flat track and poling frequency. Although the poling frequency increased significantly in the final lap, no significant difference was found in the relative skiing velocity. Results suggest that athletes increased poling frequency in the final lap to compensate for reduced propulsion of poling because of fatigue.

Keywords : sit-ski, cross-country, shooting, sit-skiing, poling frequency

1) 北翔大学北方圏生涯スポーツ研究センター
2) 北海道大学大学院教育学研究院
3) 北翔大学生涯スポーツ学部スポーツ教育学科

I. 背景と目的

シットスキーは障害者スポーツの一種目であり、座位で行われるスキー競技である。主に下肢に障害を持つスキーヤーが行う。チェア部はスキー板に固定され、スキーヤーはチェア部に着座し、滑降やクロスカントリーを行う。このうち、クロスカントリー競技では、2台のクロスカントリー用スキー板を使用し、スキー板とチェア部の間に緩衝材を使用せずにつなぎ合わされる。スキーヤーはポールを利用して、ポーリング動作を行い、推進力を得る。スキー板やポールは健常者用クロスカントリースキーで使用される道具と同じものが使用される。クロスカントリー競技のシットスキーの動作分析に関する先行研究では、Gastaldi et al. (2012) の報告で、競技場におけるポーリング動作のマーカレス動作解析の有効可能性を実証し、アスリートの残存能力や座位姿勢によって、運動のバリエーションが存在することを指摘している¹⁾。Bernardi et al. (2013) の報告では、競技成績の高い選手は、低い選手に比べて、レース後半も滑走速度を維持していることが示されている²⁾。また、Ohlsson and Laaksonen (2017) や Hofmann et al. (2016) は、選手の座位姿勢がポーリング力やポーリング動作中のエネルギー消費に及ぼす影響を調査し、パフォーマンスの高い座位姿勢を提案している。しかし、最適な座位姿勢やそれを決定するチェア部の形状については、選手の障害の程度に依存するとも追補されている^{3) 4)}。選手の障害の程度に多様性があるため、シットスキーのパフォーマンス向上に関する科学的情報は不足している状況にある。

シットスキーでは、下肢筋群による推進力発揮が行えないため、滑走中の推進力はポーリング力と重力によってのみ発生する。シットスキーのポーリング動作では、登坂や平坦路でダブルポーリングによって推進力を得ることが一般的である。ダブルポーリングとは、両手に把持したポールを使って同時に雪面を押して推進力を得る技術である。健常クロスカントリースキーヤーを対象としたダブルポーリング滑走では、滑走速度の上昇に伴ってポーリング時間（ポールが地面に接地している時間）が短縮されることが示されている（ 702 ± 33 ms； 9km h^{-1} で滑走時、 243 ± 9 ms；最大努力滑走時）。この先行研究では、エリートスキーヤーは上腕三頭筋の伸張短縮サイクル（SSC；Stretch-Shortening Cycle）を利用して大きなポーリング力を発揮していると示唆している⁵⁾。本研究では、シットスキーに関してもポーリング動作は滑走速度に影響を及ぼすと仮説を立てた。また、パラリンピック冬季競技大会のシットスキーに関する上記の先

行研究^{1) 2)} は、いずれもクロスカントリースキー種目に限定されている。スキーの滑走能力に加えて射撃精度も要求されるバイアスロン競技については、これまでのところ研究報告は見当たらない。

そこで、本研究の目的は、2018年に開催された平昌パラリンピック競技大会バイアスロン競技の競技成績の決定要因についてクロスカントリースキーにおける滑走速度とポーリング動作および射撃の正確度との関係を明らかにすることとした。

II. 方法

被験者は、平昌パラリンピックのバイアロン女子6kmシットイングに参加した全15名のスキーヤーとした（シットイング・カテゴリー、LW10.5～12の選手が参加；LWはクラスと呼ばれ、障害の程度を表す指標値である。数値が小さい程、障害の程度が重いことを示す。選手のクラスに応じて係数が設けられ、自走タイムにこの係数を乗算して計算タイムが求められる。順位成績はこの計算タイムによって決定され、この成績が競技成績となる）。各スキーヤーは2kmの周回コースを3周し、1周目と2周目の周回後に射撃エリアで各回5発の射撃を行った。射撃ではエアライフルを使用し、4.5mmの弾を用いて、10m先にある15mmの的を伏撃で狙った。射撃にミスショットがあった場合、その数に応じた周回分のペナルティループ（150m）のスキー滑走が課せられる。ペナルティループ滑走中の時間も上記の自走タイムに加算される。

ビデオ撮影は、各周回の最後の平坦なストレートコースで行い、スキーヤーを側方から撮影した（60 fps, シャッタースピード1/2000 s）。各スキーヤーに対して各3周回の走行動作を計45回撮影した。解析には、動画解析ソフトウェア Dartfish (Dartfish Co., Ltd.) を用いた。滑走速度の解析では、計測開始から終了までの距離区間を画面内で定義した（図1）。選手は右から左へ滑



図1 相対滑走速度算出について

注) 選手は右から左へ滑走する。チェア部が開始線を通り過ぎてから、終了線を通り過ぎるまでの時間を計測し、その逆数を相対滑走速度とした。

走する。チェア部が開始線を通り過ぎてから、終了線を通り過ぎるまでの時間を計測し、その逆数を相対滑走速度とした（以下、スキーイング時間とする）。大会期間中は、競技エリア内への立ち入りが制限されていたため、上記セクションの距離を実測することが出来なかった。そこで、被験者の相対的なスキー滑走速度としてスキーイング時間の逆数を求めた（以下、相対滑走速度、relative skiing velocityとする、任意単位 arbitrary unit ; a.u.）。ポーリング動作の分析では、上記セクション内のポーリング頻度（poling frequency, 1秒間に行われるポーリング動作回数, Hz）を求めた。ポーリング頻度の算出では、ポールが雪面への接触から次の接触までの時間を計測し、その逆数を求めた（図2）。本研究では、ポーリング頻度が滑走速度や順位成績に及ぼす影響を調べた。

統計処理では、まず、順位成績に影響を及ぼす因子を検討するために、順位成績と各参加者の平均相対滑走速度（LWによる補正有無）、射撃のミスショット数およびポーリング頻度との間で相関関係をそれぞれ調べた。平均相対滑走速度に関しては、スキーイング時間にLWに応じた係数を乗算し、その逆数を求めることで、障害のレベルを考慮した相対滑走速度（補正有）を求めた。対象レースのLWに応じた係数は、LW12は100%、LW11.5は96%、LW11は94%およびLW10.5は90%であった。以下、補正有のデータについては、「平均相対速度（補正有）」と表記し、補正無のデータ「平均相対速度」と区別する。順位成績は順序尺度データであるため、ここではスピアマンの順位相関分析を適用し、有意水準は5%未満とした。次に、相対滑走速度とポーリング頻度の関係を調べた。全45走行のデータを散布図にプロットし、ピアソンの積率相関分析から決定係数 R^2 と有意確率 p を求めた。また、相対滑走速度とポーリング頻度の周回毎の差を調べるために、各周回の相対滑走速度とポーリング頻度の平均値と標準偏差を求め、一元配置分散分析（ANOVA）を用いて差を検定した。多重比較検



図2 ポーリング頻度の算出方法

注) 選手のポールが接地してから次に接地するまでの時間を計測し、その逆数をポーリング頻度とした。

定では、Tukeyのテストが使用された。有意水準は5%未満とした。

Ⅲ. 結果

全被験者の順位成績（Rank）と周回毎の相対滑走速度をプロットしたものを図3に示した。図3は横軸のRankは値が小さい方が、順位成績（競技成績）が優れていることを表す。Rankの下のかっこ内の数字は射撃のミスショットの数を表す。縦軸の相対滑走速度は、値が大きい方が、スキー滑走速度が相対的に大きいことを表す。スピアマンの順位相関分析の結果、順位成績と各参加者の平均相対滑走速度の間には有意な負の相関関係（ $r_s = -0.5951$, $p = 0.0260$ ）が認められた。一方で、順位成績と平均相対滑走速度（補正有）の間には有意な相関関係（ $r_s = -0.4843$, $p = 0.0699$ ）は認められなかった。順位成績と射撃のミスショット数の間には有意な正の相関関係が認められた（ $r_s = 0.5874$, $p = 0.0279$ ）。順位成績とポーリング頻度の間には有意な相関関係は認められなかった（ $r_s = 0.5178$, $p = 0.0527$ ）。

全45走行の相対滑走速度とポーリング頻度の散布図を図4に示した。ピアソンの積率相関分析の結果、有意な相関関係は認められなかった（ $R^2 = 0.0337$, $p = 0.2275$ ）。

各周回（lap）の相対滑走速度とポーリング頻度の平均値と標準偏差をそれぞれ図5、6に示した。図5より、1、2周目（1st lap, 2nd lap）の相対滑走速度がそれぞれ 0.79 ± 0.08 a.u., 0.79 ± 0.09 a.u.（平均 \pm 標準偏差）であるのに対し、3周目（3rd lap）のそれは $0.83 \pm$

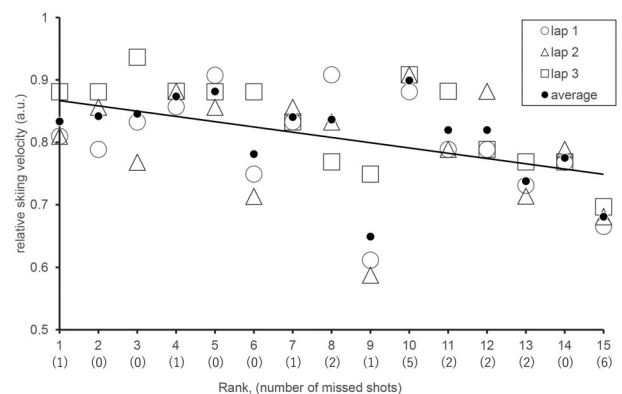


図3 参加全選手の順位成績（Rank）と周回毎の相対滑走速度（relative skiing velocity, 任意単位 a.u., ○、△、□）および3周回の滑走速度の平均（●）

注) 横軸のRankは値が小さい方が順位成績（競技成績）が優れていることを表す。Rankの下のかっこ内の数字は射撃のミスショットの数を表す。縦軸の相対滑走速度は、値が大きい方が、スキー滑走速度が相対的に高いことを表す。順位成績と滑走速度の平均値には、有意な負の相関関係が認められた（ $r_s = -0.5951$, $p = 0.0260$ ）。図中の直線は、順位成績と滑走速度の平均の相関分析によって得られた回帰直線を表す。

0.07 a.u.で、平均で0.04ポイントの増加があった。しかし、相対滑走速度に周回間の有意差は認められなかった ($p = 0.3417$)。一方で、ポーリング頻度に関しては、3周目 (3rd lap) のポーリング頻度は 1.16 ± 0.14 Hzで、1st lap (0.98 ± 0.10 Hz) と2nd lap (0.99 ± 0.12 Hz) のそれよりも有意に多かった (図6, $p = 0.0002$)。

IV. 考察

順位成績 (Rank) と相対滑走速度のプロット図 (図3) およびスピアマンの順位相関分析の結果から、順位成績の良い選手は平坦地における滑走技術が高く (滑走

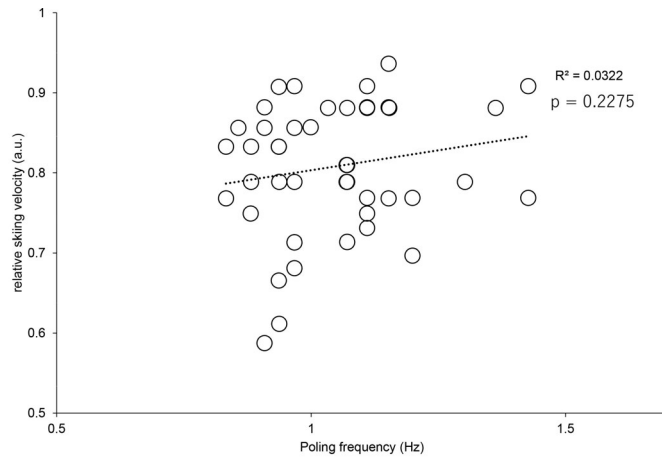


図4 相対滑走速度とポーリング頻度の関係

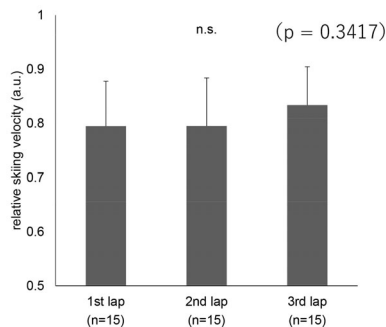


図5 周回毎の相対滑走速度

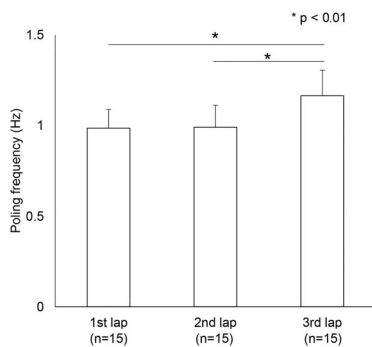


図6 周回毎のポーリング頻度

速度が高い)、射撃技術が高い (ミスショットが少ない) ことが示唆された。しかし、LWを考慮した相対滑走速度 (補正有) には、順位成績との間に有意な相関関係が認められなかった。このことは、ビデオ計測されたエリアでは、障害レベルの差に起因する滑走技術の差が緩和されたことを示唆している。滑走技術と射撃技術について、順位成績に影響を及ぼした要因について検討すると、例えば10位の選手は全選手中で最も平均相対滑走速度が高く (0.90 a.u.), 滑走能力が高いことが伺える。しかし、公式記録によると、この選手は射撃で5発のミスショットを犯していた (図3)。ミスショットの数に応じてペナルティループ (150m) を周回しなければならないため、時間ロスが生まれて順位成績が下がったと示唆される。一方で、6位の選手の平均相対滑走速度 (0.78 a.u.) は選手15名の中で11番目に位置しており、滑走技術が高いとは言えないが、射撃のミスショットはなかった。この選手は滑走技術の低さを高い射撃技術で補ったと推察され。1~7位の上位選手は、ミスショットが0~1発 (2, 3, 5, 6位は0発, 1, 4, 7位は1発) であったのに対し、10~15位の下位選手については、14位の選手を除いて、2発以上のミスショットが発生していた。先に述べたように、滑走技術については、LWによって障害レベル差が緩和されたと考えられるため、本研究の対象レースに関しては、射撃技術が高いことが、成績上位の選手の共通の特徴であると推察された。

射撃でミスショットの無かった5選手 (2, 3, 5, 6 および14位) について、その平均相対滑走速度はそれぞれ0.84, 0.84, 0.88, 0.78および0.77 a.u.であった。2, 3, 5位の選手に比べて、6位の選手は平坦地の滑走技術が劣る可能性が示唆された。また、6位と14位の選手を比較すると、平坦地の滑走速度に大きな差が見られないことから、傾斜地での滑走技術に差があった可能性が示唆された。

相対滑走速度とポーリング頻度、順位成績とポーリング頻度の相関分析の結果から、ポーリング頻度が滑走速度や順位成績に影響を与えないことが示唆された (図4)。この結果から、ポーリングの動作技術においてポーリング頻度以外のポーリング力などの力学的要素が存在することを示唆しており、今後の研究課題とした。Bernardi et al. (2013) の報告では、ポール接地時の傾きを上位群と下位群で比較しているが、両者に有意な差は認められなかった²⁾。健常者のクロスカントリースキーに関する先行研究では、ダブルポーリング滑走において、滑走速度と cycle length (1回のポーリング動作による滑走距離) の間には正の相関関係が認められている。一方で、滑走速度とポーリング頻度の間には差は認められていない^{6) 7)}。今後、ポーリング動作の分析につ

いては、上肢や体幹の運動も含めた動作分析を行う必要があると考えられる。

分散分析の結果から、周回毎の相対滑走速度に有意差は認められなかったが(図5)、ポーリング頻度は、3rd lapは1stおよび2nd lapに比べて有意に増加していた(図6)。これらの結果から、3rd lapではポーリング頻度が増加したが、相対滑走速度には影響しないことが示唆された。平坦地のスキー滑走において選手の滑走速度は、ポーリングによる推進力とポーリング頻度および雪面抵抗と空気抵抗によって決定される。3rd lapでポーリング頻度が増加したものの相対滑走速度に差が認められなかったのは、ポーリングによる推進力の低下や雪面抵抗の増加が予想される。推進力の低下については、ポーリング動作に動員される筋群の疲労が原因の一つと推察された。選手は推進力の低下に対し、ポーリング頻度を上げることで速度を維持しようとした可能性が考えられる。また雪面抵抗の増加については、スキーに塗布したワックスの剥離や気象条件による雪面状況の変化による雪面抵抗の変化などの要因も考慮する必要があるだろう。空気抵抗に関しては、自然風が向かい風の場合は抵抗となり、追い風の場合は推進力となる。しかし、本研究手法では、ポーリング頻度以外の情報を得ることが出来なかった。今後の研究課題としたい。ポーリング動作を含む選手の滑走パフォーマンスを分析するためには、登坂滑走や滑降時の動作分析の必要性が考えられる。また、座位姿勢やチェア部の形状については、障害の程度の多様性の観点から、複数選手を平均的に分析するよりも、個々の選手に対しケーススタディを行う方が、パフォーマンス向上に現実的と考えられる。本研究でもビデオ映像から座位姿勢の分析を検討したが、各選手の障害の程度が不明であるため、分析には至らなかった。

V. まとめ

本研究では、2018年に開催された平昌パラリンピック競技大会バイアスロン競技の競技成績の決定要因について検討することと、クロスカントリースキーにおける滑走速度とポーリング動作との関係を明らかにすることを目的とした。公式記録および平坦地の滑走動作のビデオ分析から、以下の知見が得られた。

- 1) バイアスロン競技におけるシットスキーにおいては、順位成績と平均相対滑走速度に有意な相関関係が認められた。
- 2) 順位成績と射撃のミスショット数の間に有意な相関関係が認められた。
- 3) 順位成績とポーリング頻度の間に有意な相関関係は認められなかった。

- 4) 平坦地での相対滑走速度とポーリング頻度との間には有意な相関関係は認められなかった。
- 5) ポーリング頻度は、最終ラップで増加したが、相対滑走速度に有意な差は認められなかった。

付 記

本研究は、平成30年度北翔大学北方圏生涯スポーツ研究センター選定事業の助成を受けて実施したものである。

利益相反

申告すべき利益相反なし。

引用文献

- 1) Gastaldi L, Pastorelli S, Frassinelli S : A biomechanical approach to paralympic cross-country sit-ski racing. Clin. J. Sport Med. 22 : 58-64, 2012.
- 2) Bernardi M : Kinematics of cross-country sit skiing during a Paralympic race. J. Electromyogr Kinesiol, 23 : 94-101, 2013.
- 3) Ohlsson ML and Laaksonen MS : Sitting position affects performance in cross-country sit-skiing. Eur J Appl Physiol, 117 (6) : 1095-1106, 2017.
- 4) Hofmann KB, Ohlsson ML, Höök M, et al. : The influence of sitting posture on mechanics and metabolic energy requirements during sit-skiing : a case report. Sport Eng, 19 (3) : 213-218., 2016.
- 5) Lindinger SJ, Holmberg HC, Müller E, et al. : Changes in upper body muscle activity with increasing double poling velocities in elite cross-country skiing. Eur. J. Appl. Physiol, 106 : 353-363, 2009.
- 6) Stöggl T and Holmberg HC : Force interaction and 3D pole movement in double poling. Scand. J. Med. Sci. Sport, 21 : e393-e404, 2011.
- 7) Bilodeau B, Rundell KW, Roy B, et al. : Kinematics of cross-country ski racing. Med. Sci. Sports Exerc, 28 : 128-138, 1996.

抄 録

本研究の目的は、2018年平昌パラリンピックでのバイアロン・シットスキー競技の順位成績の決定要因について検討することと、スキー滑走速度とポーリング動作との関係を明らかにすることとした。被験者は、平昌パラリンピックで女子6kmのバイアロン・シットスキー競技に参加した15名とし、公式記録とスキー滑走動作のビデオを用いて分析を行った。公式記録から順位成績と射撃のミスショット数を求め、ビデオ分析から各選手の相対的な滑走速度とポーリング頻度を求めた。統計処理では、スピアマンの順位相関分析を用いて、順位成績と滑走速度、射撃のミスショット数およびポーリング頻度との相関関係をそれぞれ分析した。滑走速度とポーリング頻度の相関関係ではピアソンの積率相関分析を用いた。また、滑走速度やポーリング頻度のラップ間の差を調べるために、一元配置分散分析と多重比較検定を用いた。すべての統計処理の有意水準は5%未満とした。結果、順位成績と平均滑走速度 ($r_s = -0.5951$, $p < 0.05$) および射撃のミスショット数 ($r_s = 0.5874$, $p < 0.05$) の間にそれぞれ有意な相関関係が認められた。成績上位選手は射撃のミスショット数が少なかったことから、射撃技術が高いことが、上位選手の特徴であると考えられた。次に、平坦地での滑走速度とポーリング頻度との間には有意な相関関係は認められなかった。最終ラップでは、ポーリング頻度は有意に増加したが、相対滑走速度に有意差は認められなかった。この結果から、最終ラップではポーリング頻度を増加させて、疲労によるポーリングの推進力低下を補ったことが示唆された。

キーワード：シットスキー、クロスカントリー、射撃、スキー滑走、ポーリング頻度