

原著論文

ノルディックコンバインドワールドカップのクロスカントリースキーを
対象としたレース分析と日本人トップ選手の体力的特徴
～ 2018-2019 年シーズンを対象として～
Race analysis of cross-country ski in nordic combined World cup and physical
characteristics of Japanese world-class skier in 2018-2019 season

谷中拓哉^{1),2)}, 河田絹一郎¹⁾, 河野孝典³⁾, 石毛勇介¹⁾
Takuya Yanaka^{1),2)}, Kenichiro Kawata¹⁾, Takanori Kono³⁾, Yusuke Ishige¹⁾

Abstract : The purpose of this study was to show the tendency of cross-country skiing in Nordic Combined competitions and to discuss the difference in speed between Japanese players and winners within eighth rank based on the physical characteristics of Japanese players. The fourteen 10 km races in 2018-2019 season were analyzed. Overall finish times and transit times for winners and 4 Japanese players were retrieved from official Home page of Fédération Internationale de Ski, and the segment times among the various points were calculated. Average segment speeds were calculated by dividing the segment distance by the segment time. For each race, the speed differences between winners' average speed and Japanese players' one was calculated. The subjects performed two exercise tests on different days. First, subjects performed multistage incremental roller-ski test to measure blood lactate concentration (La) and maximum oxygen uptake (VO₂max). In another day, they performed roller-skiing on the treadmill where the speed and slope were changed assuming a 10 km race, and the La at the time was measured. In many of the 10km cross-country skiing races at the Nordic Combined, the winners skated at a fast speed in the early stages, narrowing the time difference from the beginning. Furthermore, it was shown that the speed of winners increased in last lap. The top Japanese player, who have won many prizes, was skating at the same speed as the winners, but other players were skating at a slower speed than the winners from the beginning of the race, which was the most prominent on the final lap ($p < 0.01$). Even though the top Japanese player's VO₂max (65 ml/kg/min) was lower than other players, the indicator showing gliding efficiency was highest (V_{VO₂max}: 5.5 m/s). These results suggest that the top Japanese player use energy-efficient gliding methods to suit various situations.

Key words : VO₂max, skating efficiency, pace strategy, blood lactate concentration, average speed
キーワード : 最大酸素摂取量, 滑走効率, ペース戦略, 血中乳酸濃度, 平均スピード

¹⁾ 国立スポーツ科学センター, ²⁾ 横浜商科大学, ³⁾ 全日本スキー連盟

¹⁾ Japan Institute of Sports Sciences, ²⁾ Yokohama College of Commerce, ³⁾ Ski Association of Japan

E-mail : t.yanaka@shodai.ac.jp

受付日 : 2020 年 4 月 23 日

受理日 : 2020 年 9 月 16 日

I. はじめに

ノルディックコンバインド競技は、スキージャンプ種目とクロスカントリースキー種目の成績によって順位を決する競技である。多くの試合は前半にスキージャンプが行なわれ、そのポイント差によって後半のクロスカントリースキーのスタートタイムが決められる。スキージャンプでは、瞬発力が高いことや体重が軽いことが好成績を収めるうえでは重要である¹⁸⁾。一方、クロスカントリースキーでは高い有酸素性能力¹⁵⁾と大きな上肢パワーを有している²²⁾ことが上位進出には欠かせない。このようにノルディックコンバインドでは相反する身体能力が求められる特異的な競技であると言える。日本チームの近年の世界大会の成績を見ると、平昌オリンピック（2018）で銀メダル1つ、世界選手権（2019）で銅メダル1つを獲得し、個人戦での入賞（8位以内）も述べ2名、団体戦ではオリンピックおよび世界選手権ともに4位と健闘をみせている。しかしながら、スキージャンプとクロスカントリースキーの順位を詳細にみると、ジャンプ終了時には入賞圏内にいる選手がオリンピック・世界選手権ともに4名ずつおり、団体戦では全体2位でクロスカントリースキーをスタートしている⁹⁾。これらの成績から、日本チームは後半のクロスカントリースキーにおいて順

位を逆転されていることが分かる。実際に2018-2019年シーズンのワールドカップにおける各種目の順位と競技の総合順位との関係（Fig 1）に示す。

これらを見ると、日本人選手はジャンプの順位は総合順位よりも上位である傾向に対して（Fig 1左）、クロスカントリースキーの順位は総合順位よりも下位である傾向が読み取れる（Fig 1右）。したがって、日本人選手が国際大会で活躍するためには、後半のクロスカントリースキーで順位を維持、もしくは上げることが求められる。

クロスカントリースキーを含め、長距離レースでは長時間運動を継続するための有酸素性の能力も当然のことながら重要となるが、どのようにレースを進めるかというレース戦略も重要となる。種目の距離は様々であるが、様々な競技・種目でレース分析がなされている^{16),17),20),28),29),31)}。クロスカントリースキーを対象としたWeide et al.²⁹⁾以外の先行研究では、競技が異なるものの、そのほとんどはレースの後半や終盤にペースを維持あるいは上げることが選手の競技成績やパフォーマンスを決定するとしている。一方で、Weide et al.²⁹⁾の報告では、レースの序盤と終盤では速度が遅くなることが報告されており、これは集団でスタートする、いわゆる「マススタート（MS）」方

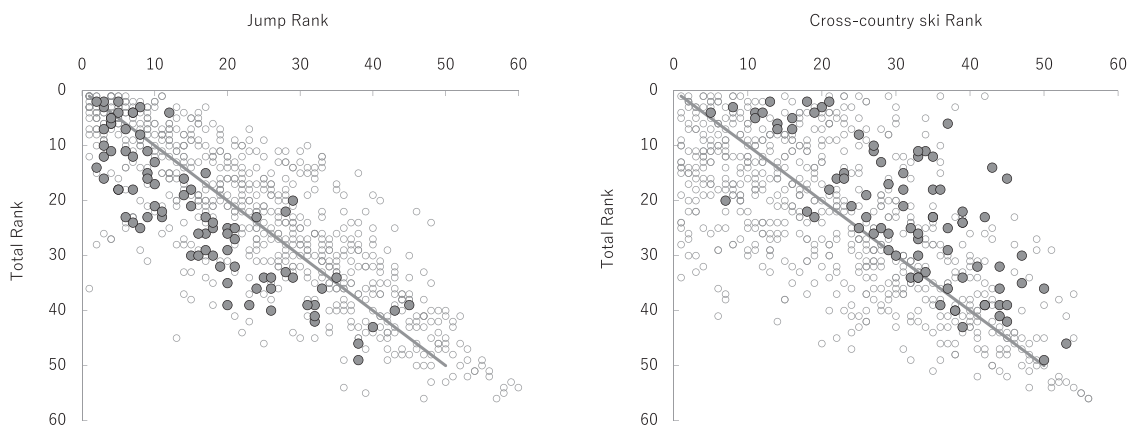


Fig 1. The relationships between total rank and each event rank in 2018-2019 season. Left side represents the relationship between total rank and jump rank. Right side represents the relationship between total rank and cross-country ski rank. Open circles show all competitor rank and filled circles show Japanese players' rank.

式ではなく、時間差で選手が一人ずつスタートする「インディビデュアルスタート (IS)」が影響しているものと考えられる。IS では、選手間の駆け引きが生じにくく、MS と比較してレース中にペースの上げ下げが少ないと考えられる。ノルディックコンバインド競技ではジャンプ種目の順位によるタイム差で選手がスタートする（グンダーセン方式）が、タイム差がない状態で MS のように複数の選手でスタートする場合もあれば、IS のように他の選手とタイム差がある状態でスタートする場合もあり、各レースの展開は様ではないものと考えられる。日本人選手が上位に進出できるようにレース戦略を考える上では、どのようなレース展開が多いのかを把握する必要がある。また、Lima-Silva et al.¹⁴⁾ は 10 km 走の各区間の速度と関連のある生理学的な体力要素について検討しており、漸増負荷テストで到達できる速度（最大速度）や血中乳酸濃度が 1 mmol/l 以上蓄積し始める（LT）際の走速度、最大下強度での疾走時の血中乳酸濃度がレースを通じてパフォーマンスと関連があることを報告している。このようにレースのペースと選手の体力的特徴を関連付けて考えることができれば、各レース展開に求められる体力要素を向上させるためのより合理的で効率的なトレーニング方法を提案することができると考えられる。

クロスカントリースキーは長距離のレース^{注1)}であるため、有酸素性能力の指標である最大酸素摂取量が高い選手ほど、競技パフォーマンスが高いことが報告されている^{6),15),19),24)}。これらの最大酸素摂取量の測定には、主に斜度や速度のどちらかを固定した漸増負荷テストが用いられているが、実際のクロスカントリースキーでは、起伏に富んだコースに合わせて速く滑走する必要があるため、斜度や速度が固定されたテストでは、選手の特徴や課題を把握する際に不十分である可能性がある。Bolger et al.⁴⁾ は、起伏のあるコースを実際に滑走させ、スピードのバラつきや心拍数の変化について観察しており、長い登り区間で心拍数が増加することを示している。また、Bilodeau et

al.³⁾ も様々な走法で実際のコースを滑走させ、登りや下り、平地の区間それぞれについて心拍数や酸素摂取量を観察している。この報告によると、コース前半の登りよりも後半の下りで心拍数や酸素摂取量が大きいたことが示されており、コースのプロフィールによっても体力を評価する値が異なる可能性があることが分かる。上記の 2 つの研究では、走法や男女間の比較が行われており、選手間の比較や特徴の提示までには至っていない。しかしながら、実際のコースやそれを模倣したコースの滑走を用いた実践的な体力評価を行なうことによって各選手の課題がより明らかになるものと考えられる。

そこで本研究では、ワールドカップに出場している日本人ノルディックコンバインド選手を対象に、1) ワールドカップ入賞者および日本人選手におけるクロスカントリースキーにおけるレースの傾向を示し、2) 日本人選手の体力測定データを用いて、ワールドカップ入賞者と日本人選手におけるレーススピードの差を体力的特性とともに考察することを目的とした。日本人選手が国際大会での上位進出のために必要な要素を導き出すことが本研究の狙いである。

Ⅱ. 方法

1. 対象

測定対象となったのは、2018-2019 年シーズンにシーズンをとおしてワールドカップに出場していたナショナルチーム選手 4 名であった。各選手の身体的特徴を（Table 1）にまとめる。なお、本測定を行なうにあたって、選手には十分に測定の内容を説明したうえで、測定参加の同意を書面にて得た。また、本測定は国立スポーツ科学センターに帰属する倫理委員会の承認を得て実施した（倫理申請番号：2018-043 および 2019-037）。

2. データ収集および分析

1) レース分析

対象としたレースは 2018-2019 シーズンに行なわれたワールドカップでクロスカントリースキー

Table 1. Physical characteristics and the number of winnings within eighth rank in 2018-2019 season Nordic combined competition.

Player	age (yr)	height (cm)	weight (kg)	Winnings
A	31	172.4	62.0	13
B	35	169.2	66.6	0
C	27	170.6	60.2	1
D	24	174.3	62.6	0

種目が 10 km の試合で、計 14 レースであった (Table 2)。国際スキー連盟の公式ホームページから各選手のフィニッシュタイムおよびそれぞれのコースに設置されたチェックポイントでの通過時間を抽出した⁹⁾。対象とした選手は各レースで総合順位が 8 位以内 (入賞者) の選手と測定対象となっている日本人選手 4 名であった。

対象レースの分析において、スタート時刻、タイム差およびチェックポイント通過時間から、各対象選手がそれぞれの区間に要した時間 (所要時間) を算出した。算出された所要時間をそれぞれの区間の距離で除することによって、各区間における滑走スピードを算出した。それぞれのレースについて、各周回および各区間における入賞者 8 名の平均滑走スピードを算出した。入賞者の平均滑走スピードと日本人選手それぞれの滑走スピードの差を算出した。なお、それぞれの試合が開催される場所が異なるため、コースプロフィールはもちろんのこと、各区間においても距離や登り下りの割合は様々である。所要時間による比較では、各区間における入賞者平均と日本人選手の差の解釈が困難であると考えられた。それは、区間の距離が長いもしくは起伏が多いと、所要時間は長くなり、時間差が大きくなる可能性があり、コースプロフィールにその差が依存してしまい得るためである。コースプロフィールの要素を取り除くために各区間における滑走スピードを用いた。また、レース展開の 1 つとして、各周回において集団で滑走している選手の人数を調べた。前滑走選手とのタイム差が 2 秒未満であった場合を集団で滑走していると判断し、集団滑走しているグループ数

および延べ人数を算出した。なお、2 名以上で滑走している場合を 1 つの集団とみなした。

各区間における入賞者の平均スピードと日本人各選手の平均スピードの差 (Δ Speed) を算出した。得られた各区間におけるスピード差から、日本人選手それぞれについて 2.5 km 刻み (4 区間) で区間平均スピード差 (Ave_ Δ Speed) を算出した。具体的にはスタートから 2.5 km 以下の区間 (L1)、2.5 km から 5 km 以下の区間 (L2)、5 km から 7.5 km 以下の区間 (L3)、7.5 km から 10 km 以下の区間 (L4) とした。2.5 km 毎に平均スピード差を算出した理由として、スタート地点、各周回のチェックポイントおよびフィニッシュ地点の配置がスタジアムレイアウトによって各周回の距離は若干異なるものの、10 km のレースでは約 2.5 km の周回コースを 4 周することが多いためである。

2) ローラースキーを用いた体力測定

a) 最大酸素摂取量および乳酸カーブテスト

埋設型大型トレッドミル (S3040、ForceLink 社製) 上で、ローラースキー (MS610AS、MARWE 社製) とポール (Traiac 1.0、swix 社製) を用いた漸増負荷試験を実施した (2019 年 6 月)。測定前には、対象者に十分なストレッチ等を行なわせた後に、ウォーミングアップとして、大型トレッドミル上を任意の速度で約 10 分程度滑走させた。漸増負荷試験は、傾斜が 5.2 % で固定されたトレッドミルで 8 km/h からスタートし、3 分間のステージ毎に 1.5 km/h ずつ速度を漸増させた。比較的速度が遅い第 1 ~ 3 ステージまでは、自由な滑走方法を選択させ、第 4 ステージ以降

Table 2. The information of each race. TC, MC and HD represents “Total Climb”, “Maximal Climb” and “Height Difference”. Time lag shows time difference from top ski jump player in cross-country ski start. Jump rank range shows the range of overall prize winners rank, within rank eighth, in ski jump.

No.	Date	Area	Laps	TC	MC	HD	Temperatures (°C)		Time Lag (s)		Jump Rank Range
				(m)	(m)	(m)	Air	Snow	Mean ± SD	range	
1	2018.12.02	Lillehammer (NOR)	4	420	29	43	2.2	-0.3	50 ± 31	(0 - 101)	1 - 17
2	2018.12.22	Ramsau am Dachstein (AUT)	4	352	40	40	2.2	-0.3	54 ± 32	(0 - 79)	1 - 14
3	2018.12.23	Ramsau am Dachstein (AUT)	4	352	40	40	3.0	-1.2	26 ± 10	(11 - 40)	2 - 12
4	2019.01.05	Otepaeae (EST)	4	292	25	37	-6.0	-7.0	22 ± 22	(0 - 55)	1 - 12
5	2019.01.06	Otepaeae (EST)	4	292	25	37	-6.0	-6.5	47 ± 24	(0 - 77)	1 - 16
6	2019.01.11	Val di Fiemme (ITA)	4	384	37	44	-1.0	-2.0	62 ± 36	(0 - 106)	1 - 17
7	2019.01.13	Val di Fiemme (ITA)	4	384	37	44	1.1	-0.2	58 ± 36	(0 - 110)	1 - 23
8	2019.01.19	Chaux-Neuve (FRA)	4	344	20	34	-3.0	-4.0	59 ± 30	(0 - 102)	1 - 12
9	2019.01.26	Trondheim (NOR)	5	390	40	40	-6.8	-5.9	47 ± 25	(0 - 82)	1 - 13
10	2019.01.27	Trondheim (NOR)	5	390	40	40	-6.0	-7.3	78 ± 27	(34 - 102)	2 - 12
11	2019.02.10	Lahti (FIN)	4	412	32	36	2.6	-0.5	91 ± 55	(0 - 148)	1 - 19
12	2019.03.09	Oslo (NOR)	4	360	32	56	-1.0	0.0	38 ± 22	(2 - 76)	2 - 15
13	2019.03.16	Schonach (GER)	4	400	33	34	14.0	-0.9	40 ± 14	(21 - 70)	2 - 21
14	2019.03.17	Schonach (GER)	4	400	33	34	2.0	-0.3	65 ± 26	(17 - 91)	2 - 22

は、V2 スケーティング（スーパースケーティング）のみで滑走するように指示をした。また、ステージの間に血液採取のために1分間の休憩をとらせ、選手が疲労困憊となるまで試験を継続した。疲労困憊の定義は、1) 呼吸交換比が1.15以上、2) 心拍数が年齢から推定される最大値（220-年齢）に到達している、3) 血中乳酸濃度が8 mmol/l以上のうち、いずれか2つを満たしている場合とした¹⁰⁾。

運動中における酸素摂取量、二酸化炭素排出量および換気量は、自動呼吸ガス分析器（AE310-S、ミナト医科学社製）のEXPモードを用いて測定した。呼吸ガス分析器は測定前後に2種類の校正ガス（大気相当：O₂ 20.90 %、CO₂ 0.03 %、N₂ balance および呼吸相当：O₂ 15.90 %、CO₂ 5.00 %、N₂ balance）によって、熱線流量計は実験前に流量校正器（2 L）によってそれぞれ校正した。測定開始前、各ステージの終了直後および測定終了直後に指先から血液を採取し、それぞれにおいて2台の血中乳酸濃度測定器（Lactate Pro2、アークレイ社製）を用いて血中乳酸濃度を測定した。得られた2つの値の平均値を各ポイントにおける代表値として採用した。また、測定中の心拍数はハートレートモニタ（RS800、Polar社製）を用いて

12 Hz で計測した。

各ステージの酸素摂取量は、ステージ終了前1分間の平均値を採用し、最大酸素摂取量は、テストを通じて酸素摂取量の30秒間の平均値が最大となる値を採用した。各ステージの酸素摂取量および滑走スピードから酸素摂取量を変数とした回帰直線を算出し、最大酸素摂取量時のスピード（V_{VO2max}）を推定した。また、各ステージの血中乳酸濃度と滑走スピードより、血中乳酸濃度が2 mmol/l時点のスピード（V_{2mmol}）を有酸素性の作業域値として¹⁹⁾、血中乳酸濃度が4 mmol/lとなるスピード（V_{4mmol}）を乳酸蓄積開始点として¹⁹⁾それぞれ算出した。

b) 実践を模したローラースキーテスト

実際のレースを想定し、速度や斜度が変化する大型トレッドミル上を滑走する測定を行った（2019年6月、7月）。速度や斜度は、石橋ら¹³⁾の方法を参考に、1セット6分間のプロトコルを4セット行なわせた。石橋ら¹³⁾のプロトコルにおける速度を100%とし、1セット目が85%、2セット目が90%、3セット目が95%、4セット目が100%に相当する滑走速度で漸増させた。なお、すべてのセットにおいて斜度の変化は同一であった（Table 3）。Table 3中の“rest”は下りを想定

しているが、トレッドミルの仕組み上、急な斜度変化ができなかったため、速度をウォーミングアップ程度（10 km/h 以下）に落として滑走させた。測定中の滑走方法は、速度や斜度に合わせて選手に自由に選択させた。測定前および各セット終了直後に、血中乳酸濃度を計測した。また、心拍数は各セット終了直後に確認した。血中乳酸濃度の測定や心拍数の測定に用いた機器や方法は、上記の漸増負荷試験と同様であった。

3. 統計分析

各レースにおける入賞者のレース展開を明らかにするために、各レースについて周回ごとのスピードの差の比較には対応のある一要因の分散分析を用いた。いずれかの周回間に差がみられた場合には、Bonferroni 法による多重比較検定を行なった。また、各区間における区間平均スピード差（Ave_ Δ Speed）の分析では二要因の分散分析（選手 $\times$ 区間）と 1 サンプル t 検定を行なった。二要因の分散分析において交互作用がみられた場合には、単純主効果の検定を行なった。分散分析では F 値と、効果量として偏イータ 2 乗（ η^2 ）を算出した。 η^2 の値は、0.02 が小さい、0.13 が中程度、0.26 が大きいとされている²⁾。1 サンプル t 検定では、各選手の各周回において 0 m/s と差があるかを検定した。なお、分散分析の有意水準は 5 % とし、1 サンプル t 検定は各選手について 4 周回分繰り返すため、Bonferroni 調整を行ない、有意水準を 1.25 % とした。

Ⅲ. 結果

1. レース分析

各レースにおける入賞者のスピードの変化および統計結果を（Table 4）に示す。すべてのレースにおいて、周回ごとのスピードに有意な主効果が認められた（ $p < 0.05$ ）。14 レース中 12 レースにおいて、最終周に差し掛かる前の段階で前周回よりもスピードが小さくなっていた（No. 1、2、3、4、5、6、7、9、10、11、13、14）。また、最終周に差し掛かり、スピードが大きくなったレースは、14 レース中 8 レースで確認できた（No. 1、2、3、6、7、8、10、12）。各周回における集団滑走をしていた入賞選手数およびグループ数を（Table 5）に示す。最終周にスピードが大きくなるレースでは、最終周前の周回で入賞した選手のほとんど（7 名以上）が集団で滑走していた。

それぞれの選手について、対象となったレースの各区間における入賞者との平均スピードとの差（ Δ Speed）を Fig 2 に示す。選手 A と選手 B は 14 レース分のデータであり、選手 C と選手 D は 12 レース分のデータである。（Fig 2）中のプロットは、それぞれのレースにおける各チェックポイント間でのスピード差を示している。また黒点線は、全レース・全区間の中で入賞者全員の標準偏差の最大値（ $\pm 0.30\text{m/s}$ ）を表している。なお、各周回中にチェックポイントが存在し、それが開催地によって位置が異なるため、Fig 2 中には周回ごとのプロットに加えて、各チェックポイント間のプロットも図示されている。

二要因の分散分析の結果、区間平均スピード差について有意な交互作用がみられた（Fig 3、F

Table 3. Practical roller skiing treadmill protocol.

time (s)		45	30	45	30	30	30	30	30	60
grade (%)		2.5	6.0	10.0	rest	5.0	2.5	rest	8.0	2.5
speed (m/s)	stage 1 (85%)	5.43	4.25	3.07	2.36	4.25	4.72	2.36	3.54	5.43
	stage 2 (90%)	5.75	4.50	3.25	2.50	4.50	5.00	2.50	3.75	5.75
	stage 3 (95%)	6.07	4.75	3.43	2.64	4.75	5.28	2.64	3.96	6.07
	stage 4 (100%)	6.39	5.00	3.61	2.78	5.00	5.56	2.78	4.17	6.39

Table 4. Average speed of each lap in World cup all 10 km race of prize winner within rank eighth. Upward and downward arrows show significant differences relative to previous lap speed ($p < 0.05$). Upward arrows indicate that lap speed increase relative to previous one, on the other hand downward arrows indicate that lap speed decrease relative to previous one.

No.	Area	LAP Speed (m/s)					ANOVA Result		
		1	2	3	4	5	df	F	η^2
1	Lillehammer (NOR)	6.49 ± 0.19	5.97 ± 0.17 ↓	5.68 ± 0.07 ↓	5.95 ± 0.15 ↑		3, 21	60.8	0.90
2	Ramsau am Dachstein (AUT)	7.25 ± 0.16	7.04 ± 0.11 ↓	7.07 ± 0.09 →	7.47 ± 0.19 ↑		1.5, 10.6	37.9	0.84
3	Ramsau am Dachstein (AUT)	7.17 ± 0.19	7.11 ± 0.02 →	6.53 ± 0.02 ↓	7.46 ± 0.08 ↑		1.2, 8.6	157.4	0.96
4	Otepaeae (EST)	7.57 ± 0.13	7.21 ± 0.16 ↓	7.14 ± 0.12 →	6.88 ± 0.23 ↓		3, 21	36.9	0.84
5	Otepaeae (EST)	7.75 ± 0.12	7.44 ± 0.07 ↓	7.48 ± 0.18 →	7.17 ± 0.16 ↓		3, 21	23.5	0.77
6	Val di Fiemme (ITA)	6.58 ± 0.10	6.16 ± 0.11 ↓	6.03 ± 0.05 ↓	6.52 ± 0.20 ↑		3, 21	53.6	0.88
7	Val di Fiemme (ITA)	6.54 ± 0.18	6.22 ± 0.20 →	5.99 ± 0.14 ↓	6.45 ± 0.21 ↑		3, 21	18.2	0.72
8	Chaux-Neuve (FRA)	7.54 ± 0.21	7.25 ± 0.22 →	7.17 ± 0.09 →	7.63 ± 0.15 ↑		3, 21	11.6	0.62
9	Trondheim (NOR)	6.95 ± 0.18	6.64 ± 0.18 →	6.52 ± 0.14 ↓	6.56 ± 0.20 →	6.70 ± 0.20 →	4, 28	9.7	0.58
10	Trondheim (NOR)	6.82 ± 0.30	6.69 ± 0.29 →	6.43 ± 0.06 →	6.28 ± 0.05 ↓	7.02 ± 0.14 ↑	4, 28	23.3	0.77
11	Lahti (FIN)	7.40 ± 0.28	6.99 ± 0.17 ↓	7.09 ± 0.30 →	6.84 ± 0.25 →		3, 21	16.7	0.70
12	Oslo (NOR)	6.48 ± 0.28	6.23 ± 0.12 →	6.38 ± 0.01 ↑	6.74 ± 0.23 ↑		3, 21	15.5	0.69
13	Schonach (GER)	6.98 ± 0.19	6.69 ± 0.09 ↓	6.49 ± 0.05 ↓	6.65 ± 0.18 →		3, 21	15.1	0.68
14	Schonach (GER)	7.00 ± 0.16	6.70 ± 0.06 ↓	6.45 ± 0.11 ↓	6.48 ± 0.14 →		3, 21	35.8	0.84

Table 5. The number of total players and groups of prize winner within rank eighth of each lap in World cup all 10 km race.

No.	Area	Lap 1		Lap 2		Lap 3		Lap 4		Lap 5	
		Total players	Groups	Total players	Groups	Total players	Groups	Total players	Groups	Total players	Groups
1	Lillehammer (NOR)	4	1	6	1	7	1	2	1		
2	Ramsau am Dachstein (AUT)	8	3	8	2	8	2	4	1		
3	Ramsau am Dachstein (AUT)	8	1	8	1	8	1	7	2		
4	Otepaeae (EST)	8	2	8	2	7	2	3	1		
5	Otepaeae (EST)	6	2	6	2	6	2	4	1		
6	Val di Fiemme (ITA)	6	2	6	2	7	2	2	1		
7	Val di Fiemme (ITA)	5	2	7	2	7	3	0	0		
8	Chaux-Neuve (FRA)	4	1	6	2	7	2	6	2		
9	Trondheim (NOR)	7	3	6	3	5	2	6	2	0	0
10	Trondheim (NOR)	7	2	5	1	6	1	7	1	5	1
11	Lahti (FIN)	5	2	4	1	5	2	4	2		
12	Oslo (NOR)	7	1	8	1	8	1	2	1		
13	Schonach (GER)	8	2	8	2	7	2	2	1		
14	Schonach (GER)	6	2	7	2	5	2	2	1		

(9, 324) = 3.03, $p < 0.05$, $\eta^2 = 0.78$)。選手 A はレースを進めても、区間平均スピード差が変化しなかった (L1: 0.00 ± 0.15 m/s, L2: -0.02 ± 0.09 m/s, L3: -0.02 ± 0.13 m/s, L4: -0.05 ± 0.21 m/s)。選手 B の区間平均スピード差は 4 周目が 1、2、3 周目と比較してマイナス方向に大きく、また 3 周目が 1 周目と比較してマイナス方向

に大きかった (L1: -0.13 ± 0.26 m/s, L2: -0.19 ± 0.22 m/s, L3: -0.27 ± 0.30 m/s, L4: -0.54 ± 0.27 m/s)。選手 C の区間平均スピード差は 4 周目が 1、2、3 周目と比較してマイナス方向に大きかった (L1: -0.31 ± 0.24 m/s, L2: -0.23 ± 0.27 m/s, L3: -0.19 ± 0.34 m/s, L4: -0.44 ± 0.27 m/s)。同様に選手 D の区間平均スピード差は、4 周

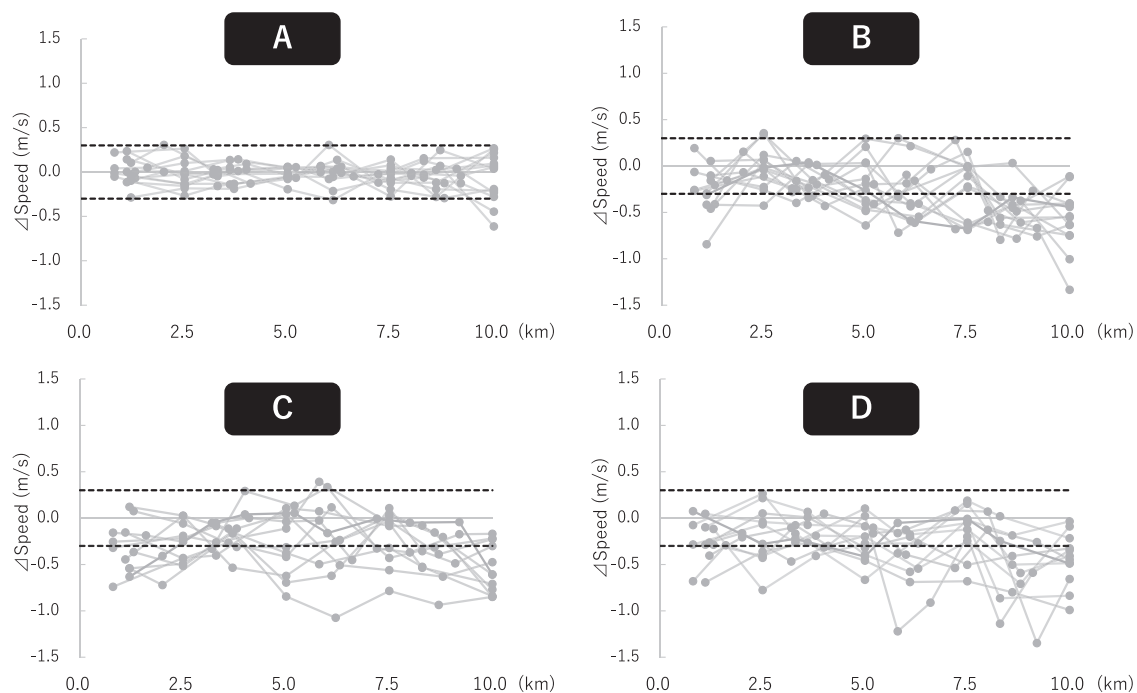


Fig 2. The average speed difference (Δ Speed) with prize winners within rank eighth in each interval of Japanese players. The plots lower than baseline indicate the speed of each player is slower than prize winners within rank eighth.

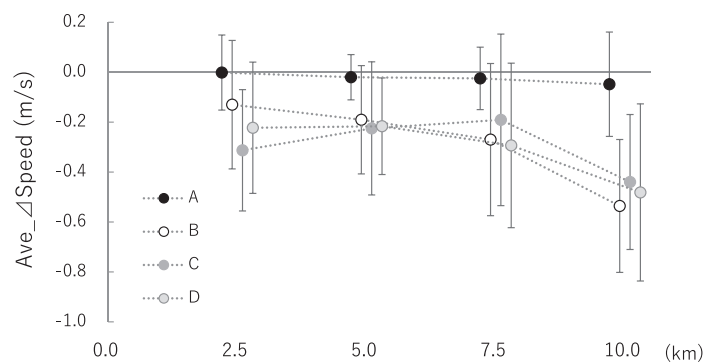


Fig 3. The average of speed difference (Ave_ Δ Speed) each interval of Japanese players. Baseline indicates same speed as prize winners within rank eighth. The plots lower than baseline indicate the speed of each player is slower than prize winners within rank eighth.

目が1、2、3周目と比較してマイナス方向に大きかった (L1: -0.22 ± 0.26 m/s, L2: -0.22 ± 0.19 m/s, L3: -0.29 ± 0.33 m/s, L4: -0.48 ± 0.35 m/s)。また1サンプルt検定の結果、選手Aはすべての周回において、0 m/sとの差がなく、他3名の選手はすべての周回において0 m/sとの差がみ

られた ($p < 0.01$)。

2. 体力測定

1) 最大酸素摂取量および乳酸カーブテスト

漸増負荷試験の結果を (Table 6) に示す。統計的な差の検定は行っていないが、それぞれの項

Table 6. The results of multistage incremental roller ski test of Japanese players.

Player	VO ₂ max (ml/kg/min)	V _{VO2max} (m/s)	V _{4mmol} (m/s)	V _{2mmol} (m/s)
A	64.9	5.50	3.61	3.11
B	66.8	5.03	3.56	3.06
C	67.0	5.36	4.00	2.86
D	67.7	5.36	3.64	2.64

目で最も大きな数字を示したのは、最大酸素摂取量では選手 D、V_{4mmol} では選手 C、V_{VO2max} および V_{2mmol} では選手 A であった。なお、漸増負荷試験前の血中乳酸濃度は、すべての選手が 1.5 mmol/l 未満であった。

2) 実践を模したローラースキーテスト

速度や斜度が変化する滑走における各週の血中乳酸濃度、心拍数を (Fig 4) に示す。最終ステージにおける血中乳酸濃度は、選手 A が 4.2 mmol/l、選手 B が 14.1 mmol/l、選手 C が 7.2 mmol/l、選手 D が 9.8 mmol/l であった。なお、漸増負荷試験前の血中乳酸濃度は、すべての選手が 1.5 mmol/l 未満であった。

また、最終ステージ終了後の心拍数は、選手 A が 165 拍/分、選手 B が 187 拍/分、選手 C が 182 拍/分、選手 D が 188 拍/分であった。選手 A の血中乳酸濃度や心拍数の変化は、他の 3 選手と比

較して低い傾向にあった。

IV. 考察

1. ノルディックコンバインドにおける 10 km レースの傾向

入賞者の平均スピードの変化をみると、ほとんどのレース (14 レース中 12 レース) で最初の周回のスピードが最終周を除く他の周回のスピードよりも速かった。最初の周回が速くなる理由として、スタートの方式が挙げられる。ジャンプの成績によるタイム差でそれぞれの選手がスタートするため、そのタイム差を縮めるために 1 周目のスピードが大きくなっている可能性がある。また、同じコースが使用されているレース (Ramsau、Otepaeae、Val di Fiemme、Trondheim、Schonach) におけるタイム差と 1 周目のスピードとの間の関連を見ると、タイム差が大きいレースにおいてス

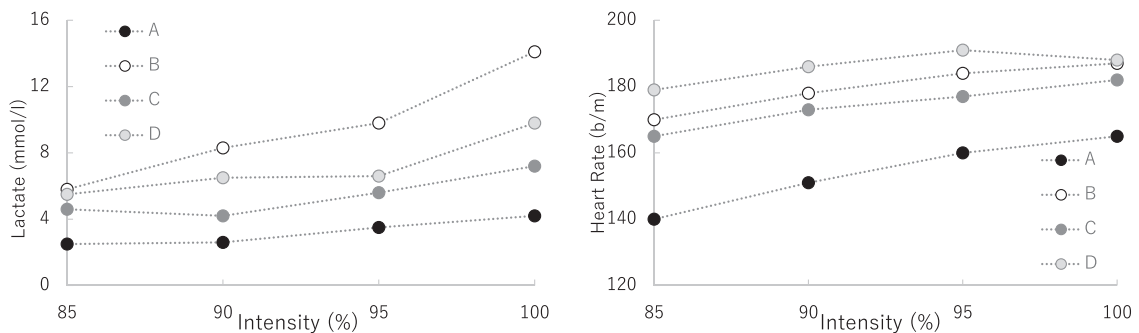


Fig 4. The change of blood lactate concentration (left side) and heart rate (right side) in practical treadmill protocol of Japanese players.

ピードが速くなるといった、一定の傾向がみられなかった。すなわち、レース序盤の展開にタイム差はあまり影響しないものと考えられる。

また、半数以上のレース（8レース）において最終周でスピードが速くなっており、これは最終周において入賞者がスパートとしてスピードを大きくしたことがうかがえる。最終周におけるスピードの変化の要因を考えると、最終周に差し掛かる直前の周回までに上位選手の集団が形成されるかが鍵を握るものと考えられる。最終周でスピードが大きくなるレースにおいて、最終周直前の周回のスピードのばらつきをみると、他の周回に比べて小さい傾向にあることが分かる（Fig 5）。これは、最終周直前の周回で入賞者がほぼ同じようなスピードで滑走していることを示しており、最終周直前の周回において、集団で滑走していることが示唆される。実際にどのような集団で滑走しているかについて見ると、最終周でスピードが大きくなるレースでは、入賞選手中7名以上が2名以上の集団を形成していた（Table 5）。つまり、最終周に差し掛かるまでに集団を形成することで、選手間の駆け引きが存在し、最終周でスピードが大きくなるという集団レースと同様の傾向みられたものと考えられる。その他にも集団を形成する選手の特長（クロスカントリースキーの得

意／不得意）によっても滑走スピードが変わることが推察される。これらを考えると、最終周に差し掛かる段階でどのような集団（選手や人数）で滑走しているかが、上位選手のレース中の滑走スピードを決める1つの要因となることが示唆される。

本研究の対象となったシーズンのレース展開についてまとめると、レース序盤では、先頭とのタイム差を縮めるためにレースのスピードが大きくなり、次にレース中盤では上位選手達が集団となって滑走しており、最後にレース終盤でスパートのため、再びレースのスピードが大きくなるという傾向が見られた。

2. 日本人選手と入賞者とのスピード差

入賞者とのスピード差に着目して日本人選手のレースの傾向を見ると（Fig 3）、選手Aはほとんどのレースで入賞しているため、入賞者とのスピード差（ Δ Speed）がなく、最大の標準偏差内（ ± 0.3 m/s）で各レース各区分滑走していることがわかる。一方で選手B、C、Dについてみると、各レース各区分のスピード差（ Δ Speed）が大きくばらついていることがわかる。2.5 km 刻みにおける区間平均スピード差を見てみると、選手Aについては区間平均スピード差（Ave_ Δ Speed）

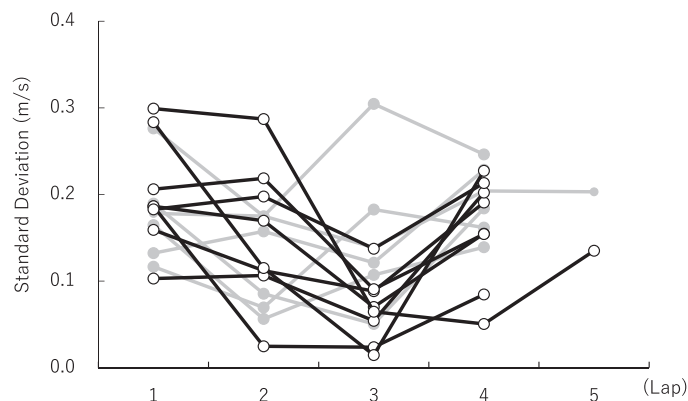


Fig 5. The changes in the standard deviation of average speed of winners within eighth rank in each race. Black lines represent the race that speed of the last lap increased. Gray lines represent anything else.

がレースを通して変化しなかった。また、その大きさも 0 m/s との差がみられなかったことから、レースを通して選手 A は入賞者と同じスピードで滑走していたことを示している。また、すべての区間において、標準偏差の範囲がプラスになることから、それぞれの区間において入賞者よりも速いスピードで滑走できている局面があることがわかる。

選手 B、C、D については、各区間平均スピード差 (Ave_ Δ Speed) が 0 m/s との間に差がみられ、数値がそれぞれマイナスの値を示しているため、すべての区間を通して、入賞者よりも遅いことを示している。また、区間平均スピード差についてみると、選手 B は L1 ~ L3 にかけてスピード差がマイナス方向へ大きくなり、L4 でその差がさらにマイナス方向へ大きくなっていた。選手 C および D は L4 のスピード差が L1 ~ L3 のスピード差よりもマイナス方向に大きくなっていた。すなわち、選手 B、C、D はレース序盤から中盤にかけて (L1 ~ 3)、入賞者よりも遅いスピードで滑走しており、入賞者よりも速いスピードで滑走する区間が少ないことがうかがえる。レース終盤には半数以上のレースにおいて、最終周で入賞者の平均スピードが大きくなるため、L4 の区間で入賞者とのスピード差がさらに大きくなっているものと考えられる。ほとんどの区間を通して、選手 B、C、D が入賞者に対して遅いスピードを示す要因として、各選手が発揮できる最大滑走スピードが小さいことも考えられる。実際に選手 B、C、D の V_{VO2max} は、入賞を多数している選手 A よりも小さい (Table 6)。さらに、国際レベルと国内レベルのクロスカントリースキー選手を比較した研究では、国際レベルのクロスカントリースキー選手の方が大きな最大滑走スピードを記録したことが明らかとなっている²³⁾。つまり、選手 B、C、D は最大滑走スピードを大きくすることが、入賞者とのスピード差を小さくする方法であると考えられる。

また、前述したようにジャンプの成績によって、クロスカントリースキーのスタートタイムが決定

するため、そのスタートタイムによってレースの戦略を変える必要があると考えられる。総合成績入賞者におけるジャンプ 8 位以内の選手の割合を見てみると、おおよそ 61 % であり、総合成績入賞者の半数以上がジャンプで入賞圏内にあることがわかる。ジャンプが入賞圏内で終わられた場合、入賞者と同程度のスピードでレースを進めていくことによって、入賞の可能性が高まるものと考えられる。一方で、ジャンプの順位が低い場合には、先頭に追い付くために入賞者よりも大きなスピードで滑走する必要があるものと考えられる。特にレース序盤で、入賞者たちは大きなスピードで滑走しているため、それよりも大きなスピードで滑走することが求められるだろう。ジャンプが 8 位以内の回数をみると選手 C が 8 回、選手 D は 7 回であり、半数以上の試合において上位でクロスカントリースキーが開始している。次シーズン以降にジャンプの成績が維持できたと仮定した場合、選手 C や選手 D はレース序盤の大きなスピードアップは必要としないが、レース中盤以降に入賞者と同程度のスピードとなるように滑走するという対策を練る必要があろう。一方で、選手 B がジャンプを 8 位以内終えているのは 1 回のみであり、選手 B は先頭とのスタートタイム差が大きいことが予想される。選手 B に関しても次シーズン以降にジャンプの成績が変わらない場合は大きなスタートタイム差を埋めるべく、レース序盤に入賞者を上回るほどのスピードアップが必要になることが考えられる。

3. 日本人トップ選手の体力特性とレースの展開

本研究の対象となった選手たちの最大酸素摂取量をみると、64.9 ~ 67.7 ml/kg/min であった。Sandbakk et al.²⁴⁾ は国際大会レベルのノルディックコンバインド選手とクロスカントリースキー選手の最大酸素摂取量を比較しており、ノルディックコンバインド選手の酸素摂取量はクロスカントリースキー選手 (78.2 ± 3.1 ml/kg/min) には劣るものの、 70.1 ± 3.8 (65.8 - 74.4) ml/kg/min であることを報告している。この先行研究で

もローラースキーによる測定がされており、ローラースキーやトレッドミルのベルトの違いなどを考慮しても、本研究の対象となった選手たちの最大酸素摂取量は先行研究の対象となった国際大会レベルの選手よりもやや低い傾向にあるように思われる。そのような最大酸素摂取量が低い中でも多くの大会で入賞を果たしている選手 A について着目すると、最大酸素摂取量は他の 3 名よりも低いものの、 V_{O2max} は最も高い値を示していた。これは、少ないエネルギーで大きな速度を獲得できることを示すものであり、選手 A はエネルギー効率の良い滑走をしていることが考えられる。ランニングではあるものの、長距離のレースでは最大酸素摂取量の高さに加えて、エネルギー効率の良さもパフォーマンスに影響することが知られており、競技レベルが高くなるほど、エネルギー効率の良さがパフォーマンスの優劣を決定することが報告されている⁷⁾。本研究の対象となった選手の競技成績やレース展開と V_{O2max} の結果を合わせてみると、滑走におけるエネルギー効率の良し悪しが国際大会レベルでのクロスカントリースキーのパフォーマンスの決定する一つの要因であることが予想される。生理学的に考えるとエネルギー効率の良し悪しには、筋内の代謝や心血管系など様々な要因が影響するものと考えられている。筋内の代謝では、筋内の pH が低くなりにくいような高い緩衝能力¹¹⁾や、ミトコンドリアが多く存在することによってミトコンドリア呼吸鎖における酸素消費量が減るような筋内の高い酸化能力¹⁾がエネルギー効率の良さに繋がる要因として考えられる。また、血液による酸素運搬能力もエネルギー効率には関連すると考えられ、ヘモグロビン濃度が増加した対象者において、有酸素性能力の向上が見られている⁹⁾。さらに、乳酸血中濃度が 4 mmol/l 以下の一定負荷トレーニングを継続的行なうことによって、有酸素性能力の向上に加えて毛細血管密度が増加することが報告されている¹²⁾。この結果は、毛細血管密度が増加することによって酸素運搬能力が向上し、結果的に有酸素能力が向上することを示唆するもの

である。加えて、国際レベルの優秀な長距離選手は、国内レベルの長距離選手と比較して最大強度でのトレッドミル走にて高い血液量、1 回あたりの心拍出量を記録していることが報告されている⁸⁾。実践的なトレッドミル滑走を行なった際に、選手 A の血中乳酸濃度や心拍数が低く推移する (Fig 4) ことから、上記のような生理学的要因が関係するものと推測される。しかしながら、これらの要因についてはより詳細な分析を要するものと考えられるため、今後の検討としたい。

ランニングにおけるエネルギー効率のバラつきは、足の接地時間やストライド長、ステップ頻度などのキネマティックな要因、いわゆる「走り方」によって 50 % 以上説明されることが報告されている^{27),30)} ことから、クロスカントリースキーの滑走におけるエネルギー効率も「滑り方」、つまり滑走技術によってその優劣が決定することが推察される。クロスカントリースキー選手やノルディックコンバインド選手に実際のコースを滑走させ、その最中における滑走方法の自動判別を試みた研究では、3.45 km の滑走中に約 6800 回の滑走サイクルが観察されている²¹⁾。コースプロフィールや状況も異なり、単純な計算ではあるが、ノルディックコンバインドの 10 km のレースに置き換えるとおよそ 19000 回の滑走サイクルを行なうこととなる。このような膨大な回数の滑走サイクルを遂行するためには、1 サイクルのエネルギー消費が少ない、すなわちエネルギー効率の良い滑走方法を行なうことが重要であろう。エネルギー効率の良い滑走方法については、本研究の目的から逸脱するため、今後詳細に検討していくこととする。

斜度や速度が変化するトレッドミルの滑走において、選手 A の 4 セット目 (強度 100 %) の血中乳酸濃度や心拍数は、他 3 名の選手の 1 セット目 (強度 85 %) と比較しても低い値を示していた (Fig 4)。選手 A 以外の選手はすべてのセットにおいて、血中乳酸濃度が 4 mmol/l を下回らなかった (最小値・選手 B : 5.8 mmol/l、選手 C : 4.2 mmol/l、選手 D : 5.5 mmol/l)。漸増負

荷試験に関するすべての項目 ($\text{VO}_{2\text{max}}$ 、 $\text{VVO}_{2\text{max}}$ 、 $\text{V}_{4\text{mmol}}$ 、 $\text{V}_{2\text{mmol}}$) において、選手 A の値が最も大きいわけではないこと (Table 5) を考慮すると、実践的なトレッドミル滑走における相対的な運動強度の違いは体力的な要素ではなく、滑走時のエネルギー効率に起因するものであると考えられる。漸増負荷試験ではトレッドミルの斜度が固定されていたものの、実践的なトレッドミル滑走では、速度とともに斜度も変化した。このような状況で血中乳酸濃度や心拍数が低く推移していることを考えると、選手 A についてはいかなる斜度や速度であっても、その状況に合わせたエネルギー消費の少ない (効率の良い) 滑走をしていることが推察される。先述した実際の滑走方法を観察した研究²¹⁾では、コースに合わせて様々な滑走方法が使用されていた。今回の測定も目視による確認ではあるが、対象となった選手は様々な滑走方法を使用していた。漸増負荷試験ではスーパースケーティングのみの使用であり、この結果により選手 A のスーパースケーティングのエネルギー効率が良いことは明らかである。また、実践的なトレッドミル滑走において様々な滑走方法が使用されていたこと考えると、選手 A は様々な斜度や速度に合わせて滑走方法を変化させ、それぞれの滑走方法でエネルギー消費を低く抑えている可能性がある。つまり、国際大会において上位入賞を目指すためには、高い体力特性も必要であるが、様々なコースプロフィールやレース展開に合わせて、滑走技術を変化させ、エネルギー効率の良い滑走することが重要であることが考えられる。選手 B、C、D については選手 A ほどの有酸素性能力を有していることは明らかとなっている (Table 6)。しかしながら、選手 B、C、D のスーパースケーティングにおけるエネルギー効率は選手 A と比較すると低く ($\text{VVO}_{2\text{max}}$: Table 6)、さらに実践的なトレッドミル滑走での血中乳酸濃度や心拍数が高かった。このことを考慮すると、それぞれの滑走方法におけるエネルギー効率を改善することによって、レース中のスピード向上およびレース終盤でのスパートにつながるものと思われる。

上記で述べた要因をもとに考えると、エネルギー効率の良い滑走技術を身につけることや筋内の代謝や心血管系の要因の改善が有用と考えられる。筋内の代謝や心血管系を改善させる方法の 1 つとして高所トレーニングが挙げられる^{5),11)}ため、競技力向上のために高所トレーニングを取り入れるのも一つの手段であろう。実際に雪上での体力測定や動作の測定ができていないため、これらの測定については今後、検討していくこととする。

V. まとめ

本研究の目的は、ワールドカップに出場している日本人ノルディックコンバインド選手を対象に、1) ワールドカップ入賞者および日本人選手におけるクロスカントリースキーにおけるレースの傾向を示し、2) 日本人選手の体力的特性について考察し、ワールドカップ入賞者と日本人選手のレーススピードの差を考察することであった。その結果、ノルディックコンバインドワールドカップにおけるクロスカントリースキー 10 km レースの多くでは、入賞者は序盤に大きなスピードで滑走し、先頭とのタイム差を縮めていること、中盤には集団で滑走していること、最終周でスピードが大きくなることが示された。入賞を多数している日本人トップ選手は、入賞者と同様のスピードで滑走しているものの、他の選手はレース序盤から入賞者よりも遅いスピードで滑走しており、最終周において最も顕著な差が見られた。長距離レースのパフォーマンスを表す指標である最大酸素摂取量の数値は、選手間に大きな違いはないものの、日本人トップ選手はエネルギー効率が良く滑走できていることが示された。このエネルギー効率の良い滑走が実際のレースにおいてパフォーマンスの優劣を決定する要因であることが推察された。

注 1)

クロスカントリースキー競技の場合、0.8 ~ 1.6 km 程度のスプリント種目や最長 50 km の長距離種目 (他: 10 km、15 km、30 km) が行なわれる。

ノルディックコンバインド競技でのクロスカン
トリ種目は主に 10 km のレースが行なわれるが、
5 km や 15 km のレースが行なわれる場合もある。

謝辞

本研究を実施するにあたり、全日本スキー連盟
コンバインドチームのコーチおよび選手には快く
ご協力いただきました。心より感謝申し上げます。

文献

- 1) Assumpção Cde O, Lima LC, Oliveira FB, Greco CC, Denadai BS. Exercise-included muscle damage and running economy in humans. *The Scientific World Jo*, 189149, 2013.
- 2) Bakeman R. Recommended effect size statistics for repeated measures designs. *Behav Res Methods*, 37 (3):379-384, 2005.
- 3) Bilodeau B, Rundell KW, Roy B, Boulay MR. Kinematics of cross-country ski racing. *Med Sci Sports Exerc*, 28:128-138, 1991.
- 4) Bolger CM, Kocbach J, Hegge AM, Sandbakk Ø. Speed and heart-rate profiles in skating and classical cross-country-skiing competitions. *Int J Sports Physiol Perform*, 10:873-880, 2015.
- 5) Burtcher M, Nachbauer W, Baumgartl P, Philadelphia M. Benefits of training at moderate altitude versus sea level training in amateur runners. *Eur J Appl Physiol*, 74:558-563, 1996.
- 6) Carlsson M, Carlsson T, Hammarström D, Tivel T, Malm C, Tonkonogi M. Validation of physiological tests in relation to competitive performances in elite male distance cross-country skiing. *J Strength Con Res*, 26 (6):1496-1504, 2012.
- 7) Conley DL, Krahenbuhl GS. Running economy and distance running performance of highly trained athletes. *Med Sci Sports Exerc*, 12:357-360, 1980.
- 8) Ekblom B, Hermansen L. Cardiac output in athletes. *J Appl Physiol*, 25(5):619-625, 1968.
- 9) Fédération Internationale de Ski (FIS) . NORDIC COMBINED “Calender & Results” . <https://www.fis-ski.com/DB/nordic-combined/calendar-results.html?noselection=true> (2019 年 4 月 5 日)
- 10) Fletcher JR, Esau SP, MacIntosh BR. Economy of running: beyond the measurement of oxygen uptake. *J Appl Physiol*, 107:1918-1922, 2009.
- 11) Gore CJ, Hahn AG, Aughey RJ, Martin DT, Ashenden MJ, Clark SA, Garnham AP, Roberts AD, Slater GJ, Mckenna MJ. Living high: train low increases muscle buffer capacity and submaximal cycling efficiency. *Acta Physiol Scand*, 173:275-286, 2001.
- 12) Hoppeler H, Howald H, Conley K, Lindstedt SL, Claassen H, Vock P, Weibel ER. Endurance training in humans: aerobic capacity and structure of skeletal muscle. *J Appl Physiol*, 59 (2):320-327, 1985.
- 13) 石橋彩, 山辺芳, 谷中拓哉, 北村隆, 河野孝典, 石毛勇介, 高橋英幸. スキー・コンバインド ナショナルチーム選手のレースを想定した滑走運動が上腕三頭筋および大腿筋のグリコーゲン含有量に及ぼす影響. *トレーニング科学*, 31 (1):53-60, 2019.
- 14) Lima-Silva AE, Bertuzzi RCM, Pires FO, Barros RV, Gagiardi JF, Hammond J, Kiss MA, Bishop DJ. Effect of performance level on pacing strategy during a 10-km running race. *Eur J Appl Physiol*, 108:1045-1053, 2010.
- 15) Mahood NV, Kenefick RW, Kertzer R, Quinn TJ. Physiological determinants of cross-country ski racing performance. *Med Sci Sports Exerc*, 33 (1):1379-1384, 2001.
- 16) Muehlbauer T, Panzer S, Schindler C. Pacing pattern and speed skating performance in competitive long-distance events. *J Strength Con Res*, 21 (4):114-119, 2010.
- 17) Muehlbauer T, Schindler C, Widmer A. Pacing pattern and performance during the 2008

- Olympic rowing regatta. *Eur J Sport Sci*, 10 (5):291-296, 2010.
- 18) Müller W. Determinants of ski-jump performance and implications for health, safety and fairness. *Sports Med*, 39(2):85-106, 2009.
- 19) Rasdal V, Fudel R, Kocbach J, Moen F, Ettema G, Sandbakk Ø. Association between laboratory capacities and world-cup performance in Nordic combined. *PLoS ONE*, 12 (6):e0180388, 2017.
- 20) Renfree A, Gibson ASC. Influence of different performance levels on pacing strategy during the women's world championship marathon race. *Int J Sports Physiol Perform*, 7:279-285, 2013.
- 21) Sakurai Y, Fujita Z, Ishige Y. Automatic identification of subtechniques in skating-style roller skiing using inertial sensors. *Sensors*, 16:473, 2016.
- 22) Sandbakk Ø, Holmberg HC. A reappraisal of success factors for Olympic cross-country skiing. *Int J Sports Physiol Perform*, 9:117-121, 2014.
- 23) Sandbakk Ø, Holmberg HC, Leirdal S, Ettema G. The physiology of world-class sprint skiers. *Scand J Med Sci Sports*, 21:e9-e16, 2011.
- 24) Sandbakk Ø, Rasdal V, Bråten S, Moen F, Ettema G. How do world-class Nordic combined athletes differ from specialized cross-country skiers and ski jumpers in sport-specific capacity and training characteristics?. *Int J Sports Physiol Perform*, 11:899-906, 2016.
- 25) Sjodin B, Jacobs I. Onset of blood lactate accumulation and marathon running performance. *Int J Sports Med*, 2(1):23-26, 1981.
- 26) Skinner JS, Mclellan TH. The transition from aerobic to anaerobic metabolism. *Res Q Exercise Sport*, 51 (1):234-248, 1980.
- 27) Tanji F, Shirai Y, Tsuji T, Shimazu W, Nabekura Y. Relationship between 1, 500-m running performance and running economy during high-intensity running well-trained distance runners. *J Phys Fitness Sports Med*, 6 (1):41-48, 2017.
- 28) Thiel C, Foster C, Banzer W, Koning JD. Pacing in Olympic track races: competitive tactics versus best performance strategy. *J Sport Sci*, 30 (11):1107-1115, 2012.
- 29) Weide B, Stöggl T, Mathisen GE, Supej M, Zoppirolli C, Winther AK, Pellegrini B, Holmberg, HC. The pacing strategy and technique of male cross-country skiers with different levels of performance during a 15-km classical race. *PLoS ONE*, 12 (11):e0187111, 2017.
- 30) Williams KR, Cavanagh PR. Relationship between distance running mechanics, running economy, and performance. *J Appl Physiol*, 63:1236-1245, 1987.
- 31) 谷中拓哉, 中里浩介, 藤田善也, 石毛勇介. クロスカントリースキー競技における平昌オリンピックのコースプロフィール取得とプレ大会の公式記録からみるレースの展望: 男子15km + 15km スキーアスロン種目を対象として. *体育学研究*, 64 (1):249-263, 2019.