

原 著

## ローラースキー滑走時の機械的効率が競技成績に与える影響

### Effects of mechanical efficiency in roller skiing on racing performance

中井 聖<sup>1)</sup>伊藤 章<sup>2)</sup>Akira Nakai<sup>1)</sup>Akira Ito<sup>2)</sup>

#### Abstract

The aims of the present study were to determine mechanical efficiency based on work done on body segments during roller skiing with a diagonal stride at various speeds and to examine the effects of mechanical efficiency on racing performance in roller skiing. Nine male collegiate cross-country ski athletes with different levels of roller ski racing performance volunteered to participate in this study. Two dimensional kinematics and oxygen uptake were determined in the athletes who performed roller skiing at the five paced speeds of 1.67, 2.50, 3.33, 4.16 and 5.00  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  using the diagonal stride on a 400-m level track. Mechanical efficiency in this study was evaluated with net efficiency, which was calculated from total mechanical work rate comprising the rates of internal and external work and net energy expenditure rate. Rates of total mechanical work and net energy expenditure and net efficiency at race speed were estimated from individual regression equations and mean race speeds of the athletes. Total mechanical work rate had a strong linear correlation with roller skiing speed ( $r = 0.987$ ,  $p < 0.001$ ) but had no correlation with racing performance at all given speeds. Net energy expenditure rate at the speeds of 1.67, 2.50, 3.33  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  negatively correlated with racing performance ( $r = -0.821$ ,  $p < 0.01$ ;  $r = -0.794$ ,  $p < 0.05$ ;  $r = -0.733$ ,  $p < 0.05$ , respectively). Estimated total mechanical work rate and net efficiency at race speed directly correlated with racing performance ( $r = 0.743$ ,  $p < 0.05$ ;  $r = 0.771$ ,  $p < 0.05$ , respectively). The ratio of net efficiency at race speed to maximum net efficiency was  $98.1 \pm 2.8\%$ . These results indicated that equivalent total mechanical work rate is needed to exert the same speed regardless of the athletes' racing performance and patterns of motion in roller skiing, that higher mechanical efficiency enhances racing performance and mechanical efficiency can be a determinant of racing performance and that the athletes in the race would subconsciously select individual speeds to perform roller skiing at maximum efficiency. Thus, these findings suggested that the high-level athletes would have more developed musculature to transform the same level of aerobic energy to higher mechanical work and exert higher speed than the low-level athletes.

**キーワード** ダイアゴナルストライド, 内的仕事, 外的仕事, net efficiency  
diagonal stride, internal work, external work, net efficiency

<sup>1)</sup> 大阪体育大学大学院スポーツ科学研究科

*Graduate School of Sport and Exercise Science,  
Osaka University of Health and Sport Sciences*

<sup>2)</sup> 大阪体育大学体育学部

*School of Health and Sport Sciences, Osaka University of  
Health and Sport Sciences*

## 1. はじめに

ローラースキーは、クロスカントリースキーと滑走時の動作パターンや必要とされる有酸素性能力が非常に近似しており、クロスカントリースキーのオフシーズン中の技術トレーニングや持久的トレーニングとして多用されている (Rusko, 2003)。しかし最近では、トレーニングの手段であったローラースキーは、競技としても盛んに行われるようになり、世界選手権も実施されている。また、その競技成績がオフシーズン中のトレーニングの指標として用いられることも多い。

ローラースキーのような長時間の持久的運動は主として、体内に取り込まれた酸素を利用して、骨格筋が化学的エネルギーを産生し、力学的エネルギーに変換して仕事をなすことで行われる (金子, 1985)。阿江ほか (1996) や Coyle (1999) は、産生された化学的エネルギーがいかに有効に運動に利用されるか、またその中間過程に存在する化学的エネルギーが力学的エネルギーに変換される割合や力学的エネルギーがパフォーマンスに変換される割合によって、運動のパフォーマンスは決定されるとしている。さらに、中井ほか (2009) は、滑走速度と酸素摂取量との関係から求めた有酸素的に滑走可能な最大速度が競技成績と高い相関を示すと報告している。これらのことから、有酸素性の最大能力から産生された化学的エネルギーがどの程度滑走速度に変換されたかが競技成績を左右し、その間に介在する産生された化学的エネルギーが力学的エネルギーに変換された割合である機械的効率 (Hill, 1927) が競技成績に影響を与えることが予想された。

ローラースキー時の機械的効率については、わずかに数例しか報告されておらず (Hoffman et al, 1995; Sandbakk et al, 2010)、競技成績との関係に着目して検討した研究はあまり見られない。また、選手ごとに滑走時の動作は異なり、必要とされる仕事量も違うと考えられるが、先に述べた報告では、機械的効率を身体合成重心のなす仕事量から求めており、異なる滑走動作によって生じるとされる仕事量の違いについ

ては考慮していない。そこで本研究では、競技レベルの異なる選手がローラースキーを用いて種々の速度で滑走した際の機械的効率を、被験者間の滑走動作の差異を考慮し、身体セグメントがなす仕事量、すなわち内的仕事量を加味して評価し、ローラースキーの競技成績に与える機械的効率の影響について検討することを目的とした。

## 2. 方法

### 2.1 被験者

被験者は、同程度の有酸素性能力を有し、ローラースキーの競技成績が異なる男子大学生クロスカントリースキー選手9名であった。被験者の身体特徴 (平均±標準偏差) は、年齢:  $19.2 \pm 1.0$  歳、身長:  $1.76 \pm 0.06$  m、身体質量:  $64.6 \pm 3.5$  kg、体脂肪率:  $14.2 \pm 1.9\%$ であった。ローラースキーでダイアゴナルストライドを用いて滑走した際の最大酸素摂取量は  $61.0 \pm 6.3$  mL $\cdot$ min $^{-1}$  $\cdot$ kg $^{-1}$ であった。ローラースキーの競技成績は、Alsobrook and Heil (2009) の方法に倣い、後述の実験の1か月前に実施され、被験者全員が参加したローラースキー大会の5 km競技のレースタイムから算出した平均滑走速度を用いて示した (表2)。被験者のレースタイムは  $1290.5 \pm 73.2$  s、レースの平均滑走速度は  $3.88 \pm 0.21$  m $\cdot$ s $^{-1}$ であった。

なお、本研究は、大阪体育大学研究倫理審査委員会の審査、承認を受けて実施された。被験者には予め研究の目的や方法、予想される影響について説明し、書面で同意書を得た後、実験を実施した。

### 2.2 実験プロトコル

全ての実験は、全天候型の400 mトラックにおいて、負荷調整装置を装備したローラースキー (V2-920, V2 Jenex Inc.製) と、各被験者がクラシカル競技時に使用しているブーツおよびポールを使用して実施された。被験者はダイアゴナルストライドを用いて、予め規定した速度 (1.67, 2.50, 3.33, 4.16, 5.00 m $\cdot$ s $^{-1}$ ) で4分間滑走し、直後に6分間の休息を取るという試行を、

速度を段階的に増加させて連続して行った。各試行での滑走速度は、被験者を自転車で先導し、速度計と50 m毎の基準タイムを用いて一定に保った。ダイアゴナルストライドは、競技では主として登坂時に用いられる滑走テクニックであり (Smith, 2003), 平地において摩擦負荷の少ないローラースキーを用いてダイアゴナルストライドで滑走した場合、その動作は登坂時と幾分異なることが予想された。そのため、本研究では、Nakai and Ito (2009) の方法に従い、負荷調整装置を用いてローラースキーに一定の摩擦負荷を加え、登坂時の動作に近づくよう配慮して実験を行った。

### 2.3 動作解析

400 mトラックの直線区間において、各試行時の被験者の矢状面上の滑走動作を、デジタルビデオカメラ (DSR-PD150, Sony社製) を使用して60 Hzで撮影した。本研究では、図1に示したとおり、右ローラースキーが接地する時点から、次に右ローラースキーが接地する時点までを1サイクルの滑走動作と定義した。被験者を18セグメントからなるリンクセグメントモデル (左右上下肢それぞれ3セグメント、頭と胴、左右ローラースキーおよび左右ポール; 図1) とみなし、撮影した映像の1サイクル分の滑走動作を、ビデオ動作解析システム (Frame-DIAS

3.22, DKH Inc.製) を使用し、解析周波数60 Hzでデジタル化した。分析平面の水平方向かつ被験者の進行方向をX軸、鉛直上方向をY軸として静止座標系を設定し、2次元パニングDLT法を用いてリンクセグメントモデルに対応する分析点の座標値を算出した。座標較正による算出値の平均誤差は、X軸方向が0.001 m、Y軸方向が0.004 mであった。算出された分析点座標値は、分析点ごとに残差分析法 (Winter, 2005) によって決定された最適遮断周波数 (X座標: 1.5~8.4 Hz, Y座標: 1.3~8.9 Hz) で、4次のButterworth low-pass filterを用いて平滑化した。各身体セグメントの質量および慣性モーメントは、身体部分慣性係数 (阿江, 1996) を用いて求め、ローラースキーとポールの質量、重心位置および慣性モーメントは実測値を用いた。以上の方法によって得られたデータから、各セグメントの重心座標、速度および角速度を算出した。

### 2.4 総仕事率, エネルギー消費率および機械的効率の算出

本研究では、Winter (1979) の定義に基づき、被験者が1サイクル間に行う力学的仕事のうち、身体セグメントがなす仕事を内的仕事、外的負荷に対してなされる仕事を外的仕事とし、内的仕事と外的仕事の合計から総仕事率を求めた。

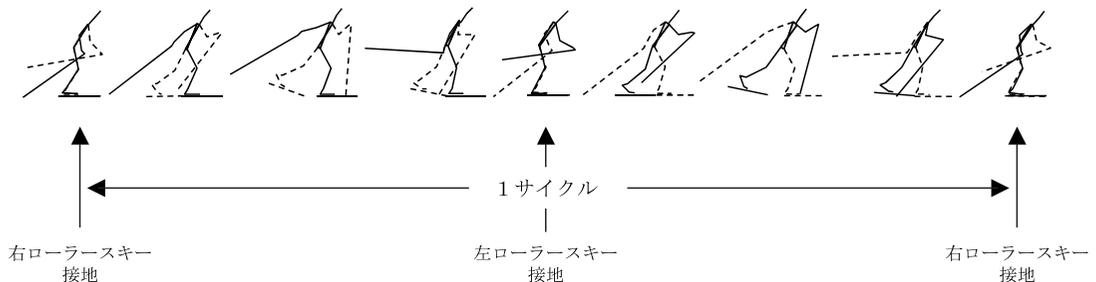


図1. ダイアゴナルストライドを用いてローラースキーで滑走した際の1サイクルの動作の典型例。右ローラースキーが接地する時点から、次に右ローラースキーが接地する時点までを1サイクルの滑走動作と定義した。実線は右、破線は左を示す。

まず、動作解析によって得られたデータから、1サイクル中の各時点において、それぞれのセグメントが有する力学的エネルギーを算出した。次に、Pierrynowski et al. (1980) の方法を用いて、各時点で全ての力学的エネルギーがセグメント内およびセグメント間で伝達すると仮定して求めた1サイクル間の仕事量から、内的仕事量を算出した。具体的な算出方法は、以下のとおりである。

時点*j*においてセグメント*i*が有する全ての力学的エネルギー（位置エネルギー、並進および回転運動エネルギー）を求めた（式（1））。

$$E_{ij} = m_i g h_{ij} + \frac{1}{2} m_i v_{ij}^2 + \frac{1}{2} I_i \omega_{ij}^2 \quad (1)$$

ここで、 $E_{ij}$  は時点*j*におけるセグメント*i*が有する全力的エネルギー、 $m_i$ はセグメント*i*の質量、 $g$ は重力加速度、 $h_{ij}$ は時点*j*におけるセグメント*i*の垂直位置、 $v_{ij}$ は時点*j*におけるセグメント*i*の速度、 $I_i$ はセグメント*i*の重心まわりの慣性モーメント、 $\omega_{ij}$ は時点*j*におけるセグメント*i*の角速度を示す。

次に、時点*j*においてセグメント*i*が有する全力的エネルギーを全てのセグメント分合計し、全セグメントが有する総力学的エネルギーを求めた（式（2））。

$$TE_j = \sum_{i=1}^s E_{ij} \quad (2)$$

ここで、 $TE_j$  は時点*j*における総力学的エネルギー、 $s$ は総セグメント数を示す。

さらに、時点*j*と時点*j+1*の総力学的エネルギーの差分の絶対値を全測定区間分積算することで、セグメント内およびセグメント間の全力的エネルギーの伝達を仮定した1サイクル間の仕事量を求めた（式（3））。

$$W_{wb} = \sum_{j=1}^{n-1} |TE_{j+1} - TE_j| \quad (3)$$

ここでは、 $W_{wb}$ はセグメント内およびセグメント間の全力的エネルギーの伝達を仮定した1サイクル間の仕事量、 $n$ は1サイクル間のサンプリング時点数を示す。

求められた仕事量はpositive workとnegative workの両方を含んでいるが（Winter, 1978）、本研究ではIto et al. (1983) の方法に倣い、この仕事量のうち、1サイクル間の総力学的エネルギーの増加分の合計に相当するpositive workの総和を、1サイクル間に行われる内的仕事量とした。

1サイクル間に行われる外的仕事量は、先行研究（Saibene et al., 1989; Hoffman et al., 1995）と同様の方法を用い、負荷調整装置によって加えられた摩擦負荷、路面とローラースキーとの間の転がり摩擦抵抗などを含む、全ての外的負荷に抗して推進するための力を測定して算出した。バイクを用いて、ローラースキーを装着した立位姿勢の被験者を、試行と同じ速度で牽引し、ロードセル（LUR-A-200NSA1、共和電業社製）を使用して牽引力を測定した。本研究では先行研究に倣い、この測定値を外的負荷に抗して推進するための力とみなし、1サイクル間の合成重心の移動距離を乗じて、1サイクル間になされる外的仕事量とした。

以上の方法によって求められた1サイクル間の内的仕事量と外的仕事量を合計し、被験者の身体質量にローラースキーやポール、ブーツ、測定機器など装備品一式の質量（合計4.23 kg）を加えた総質量および1サイクルに要した時間で除することで、総仕事率を算出した。

呼吸代謝測定装置（VO2000, MedGraphics Corporation製）を用い、立位安静時および各試行時の酸素摂取量を4分間測定し、終末1分間の平均値を安静時および各試行時の酸素摂取量とした。各試行時の酸素摂取量から安静時の酸素摂取量を差し引き、酸素摂取量1 Lあたり20.93 kJとして換算した後、総質量および要した時間

で除し、各試行時に消費された正味のエネルギー消費率（以下、エネルギー消費率）とした。

本研究の機械的効率は、機械的効率の定義の1つであるnet efficiencyを用いて評価した。net efficiencyは、運動時のエネルギー消費量から安静時のエネルギー消費量を差し引いた、運動に消費される正味のエネルギーに対するなされた仕事の割合と定義されている（Benedict and Cathcart, 1913; Gaesser and Brooks, 1975）。本研究では、上記の方法により求められた総仕事率をエネルギー消費率で除して、net efficiencyを算出した。

2.5 レース時の各変数の推定

本研究の実験時とレース時では、コースの斜度や路面の摩擦抵抗、使用されたローラースキーなどの条件に多少の違いが見られるが、Mognoni et al. (2001) の方法に倣い、実験により得られた各変数の回帰式からレース時の各変数を推定した。実験結果より得られた各被験者の回帰式は、総仕事率が $r = 0.973$ から $0.996$ 、エネルギー消費率が $r^2 = 0.949$ から $0.992$ と、い

れも非常に高い適合度を示した。各被験者の回帰式にそれぞれのレース時の平均滑走速度を代入することで、レース時の総仕事率およびエネルギー消費率を求め、レース時のnet efficiencyを算出した。

2.6 統計処理

変数ごとに、得られた全被験者のデータを一群として、Shapiro-Wilk検定を行い、データの正規性を確認した。各変数とレース時の平均滑走速度との関連については、Pearsonの積率相関係数の検定を行った。規定した速度で滑走した際の各変数について、変数ごとに分散分析を行い、主効果が認められた場合には、Bonferroniの方法による多重比較および多項式対比を行った。球面性が仮定されない場合は、Greenhouse-Geisserの方法を用いて自由度を修正し、検定した。全ての統計処理は、統計解析ソフト（SPSS 15.0J for Windows, SPSS Inc.製）を使用して行い、統計的有意水準は5%未満に設定した。

表1. 各滑走速度における総仕事率、エネルギー消費率およびnet efficiencyと競技成績の関係

被験者	総仕事率 (W)					エネルギー消費率 (W)					net efficiency (%)				
	滑走速度 (m·s <sup>-1</sup> )					滑走速度 (m·s <sup>-1</sup> )					滑走速度 (m·s <sup>-1</sup> )				
	1.67	2.50	3.33	4.16	5.00	1.67	2.50	3.33	4.16	5.00	1.67	2.50	3.33	4.16	5.00
A	1.45	2.65	3.85	5.05	6.27	5.65	7.48	9.91	13.12	17.43	25.6	35.4	38.9	38.5	36.0
B	1.10	2.46	3.82	5.18	6.56	5.34	6.94	9.04	11.76	15.35	20.6	35.4	42.3	44.0	42.7
C	1.22	2.49	3.76	5.04	6.32	4.23	5.84	8.05	11.10	15.36	28.8	42.7	46.7	45.4	41.2
D	1.59	2.67	3.75	4.83	5.92	4.67	6.65	9.48	13.50	19.30	34.0	40.1	39.5	35.8	30.7
E	1.26	2.61	3.95	5.30	6.66	4.86	6.60	8.96	12.16	16.56	26.0	39.6	44.2	43.6	40.2
F	1.23	2.37	3.51	4.65	5.80	4.92	6.34	8.18	10.54	13.63	25.0	37.4	42.9	44.1	42.5
G	1.21	2.44	3.66	4.89	6.13	6.74	9.05	12.16	16.33	22.01	17.9	26.9	30.1	29.9	27.9
H	1.64	3.02	4.40	5.77	7.17	6.61	9.20	12.80	17.81	24.89	24.8	32.8	34.3	32.4	28.8
I	1.27	2.41	3.56	4.71	5.87	7.24	9.24	11.78	15.03	19.22	17.5	26.1	30.2	31.3	30.5
M	1.33	2.57	3.81	5.05	6.30	5.59	7.48	10.04	13.48	18.20	24.5	35.2	38.8	38.3	35.6
SD	0.19	0.20	0.26	0.35	0.44	1.05	1.34	1.77	2.46	3.57	5.2	5.7	6.0	6.2	6.2
r	-0.072	0.029	0.096	0.128	0.144	-0.821**	-0.794*	-0.733*	-0.643	-0.539	0.587	0.797*	0.806**	0.737*	0.636

Mは平均値、SDは標準偏差、rは各変数とレース平均速度のPearsonの積率相関係数を示す。\* $p < 0.05$ 、\*\* $p < 0.01$ 。

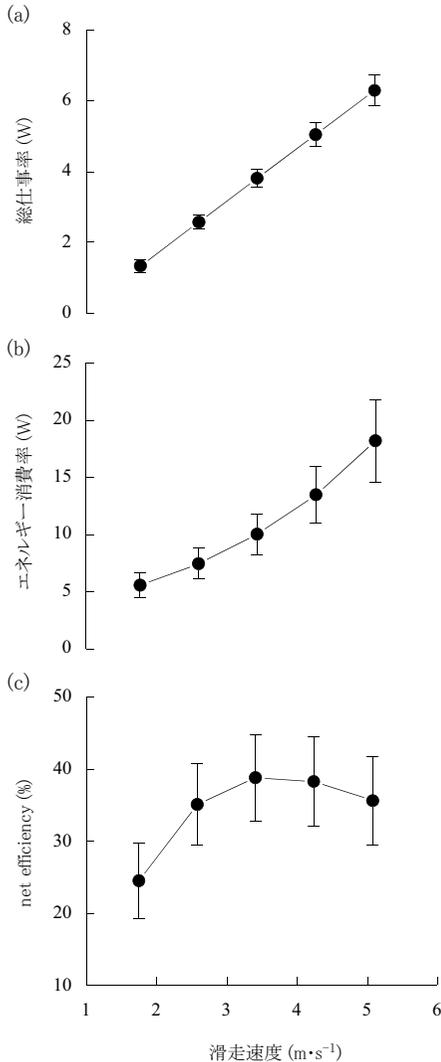


図2. 滑走速度の上昇に伴う総仕事率(a), エネルギー消費率(b)およびnet efficiency(c)の変動. プロットは平均値, エラーバーは標準偏差を示す.

### 3. 結果

Shapiro-Wilk検定の結果, 全ての変数は正規分布に従うことが確認された. 各被験者の規定滑走速度での総仕事率, エネルギー消費率およびnet efficiencyと, 被験者全体での平均値を表1および図2に示した. Pearsonの積率相関係数の検定の結果, 総仕事率は全滑走速度において,

レース時の平均滑走速度と関連が認められなかった (表1). レース時の平均滑走速度は, 1.67, 2.50, 3.33 m·s<sup>-1</sup>で滑走した際のエネルギー消費率と有意な負の相関 ( $r = -0.821, p < 0.01$ ;  $r = -0.794, p < 0.05$ ;  $r = -0.733, p < 0.05$ ; 図3), 2.50, 3.33, 4.16 m·s<sup>-1</sup>で滑走した際のnet efficiencyと有意な正の相関を示した ( $r = 0.797, p < 0.05$ ;  $r = 0.806, p < 0.01$ ;  $r = 0.737, p < 0.05$ ; 図4). 分散分析の結果, 総仕事率, エネルギー消費率およびnet efficiencyの全変数において, 滑走速度に有意な主効果が認められた [ $F(1.00, 8.00) = 1197.99, p < 0.001$ ;  $F(1.01, 8.07) = 162.42, p < 0.001$ ;  $F(1.15, 9.22) = 31.97, p < 0.001$ ; 図2]. 多

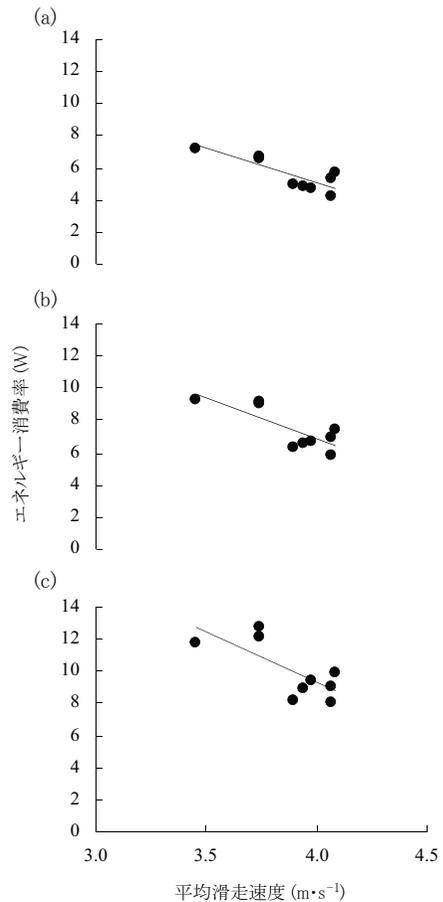


図3. 1.67 m·s<sup>-1</sup>(a), 2.50 m·s<sup>-1</sup>(b), 3.33 m·s<sup>-1</sup>(c)で滑走した際のエネルギー消費率と平均滑走速度の関係.

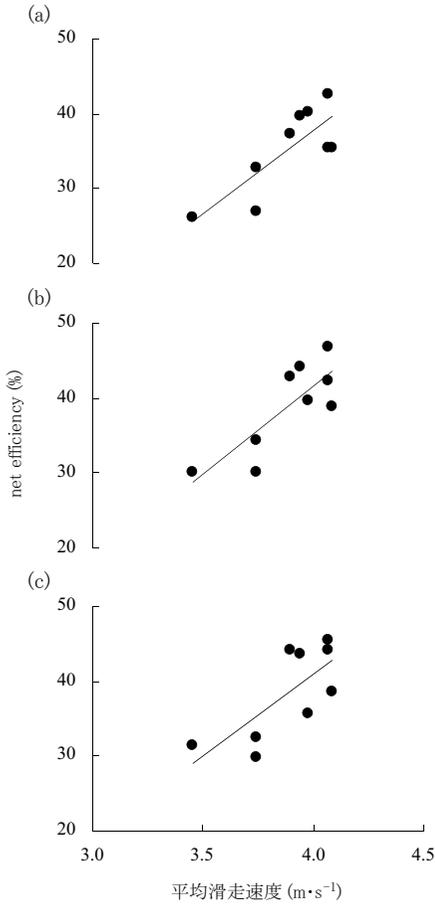


図4. 2.50 m·s<sup>-1</sup>(a), 3.33 m·s<sup>-1</sup>(b), 4.16 m·s<sup>-1</sup>(c)で滑走した際のnet efficiencyと平均滑走速度の関係。

重比較および多項式対比の結果、総仕事率とエネルギー消費率は、滑走速度の増加によって有意に増加し（各水準間とも  $p < 0.001$ ）、総仕事率は線形、エネルギー消費率は2次式で回帰された ( $r = 0.987$ ,  $SEE = 0.19$ ,  $p < 0.001$ ;  $r^2 = 0.820$ ,  $SEE = 2.18$ ,  $p < 0.001$ )。net efficiencyは1.67 m·s<sup>-1</sup>から3.33 m·s<sup>-1</sup>までは有意に増加（それぞれ  $p < 0.001$ ,  $p < 0.05$ ）、4.16 m·s<sup>-1</sup>から5.00 m·s<sup>-1</sup>の間では有意に減少し ( $p < 0.01$ )、2次式で回帰された ( $r^2 = 0.461$ ,  $SEE = 5.78$ ,  $p < 0.001$ )。

各被験者のレース時の総仕事率、エネルギー

消費率、net efficiencyおよびnet efficiencyの最大値と、被験者全体での平均値を表2に示した。レース時のnet efficiencyはnet efficiencyの最大値の98.0±2.8%であった。Pearsonの積率相関係数の検定の結果、レース時の平均滑走速度は、レース時の総仕事率、net efficiencyおよびnet efficiencyの最大値と有意な正の相関を示したが ( $r = 0.743$ ,  $p < 0.05$ ;  $r = 0.771$ ,  $p < 0.05$ ;  $r = 0.794$ ,  $p < 0.05$ ; 図5)、エネルギー消費率とは関連が認められなかった。

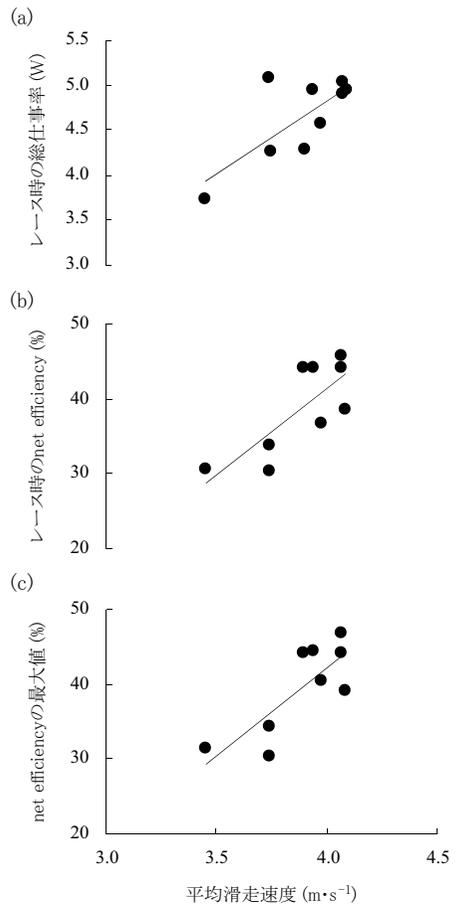


図5. レース時の総仕事率(a), net efficiency(b)およびnet efficiencyの最大値(c)と平均滑走速度の関係。

表2. 競技成績とレース時の各変数の推定値およびnet efficiencyの最大値との関係

被験者	レース		レース時の	レース時のエネ	レース時のnet	net efficiency	(b)に対する
	タイム (s)	平均速度 (m·s <sup>-1</sup> )	総仕事率 (W)	ルギー消費率 (W)	efficiency (a) (%)	の最大値(b) (%)	(a)の割合 (%)
A	1223.1	4.09	4.95	12.81	38.6	39.1	98.9
B	1229.0	4.07	5.03	11.43	44.0	44.0	100.0
C	1229.1	4.07	4.90	10.72	45.7	46.8	97.6
D	1258.3	3.97	4.58	12.45	36.8	40.4	91.0
E	1270.2	3.94	4.94	11.21	44.1	44.4	99.3
F	1282.6	3.90	4.29	9.73	44.1	44.1	99.9
G	1335.6	3.74	4.27	14.06	30.4	30.4	100.0
H	1337.9	3.74	5.08	15.07	33.7	34.4	98.0
I	1448.7	3.45	3.73	12.20	30.5	31.3	97.5
<i>M</i>	1290.5	3.88	4.64	12.19	38.7	39.4	98.0
<i>SD</i>	73.2	0.21	0.46	1.66	6.1	6.1	2.8
<i>r</i>			0.743 *	-0.375	0.771 *	0.794 *	

*M*は平均値, *SD*は標準偏差, *r*は各変数とレース平均速度のPearsonの積率相関係数を示す. \*  $p < 0.05$ .

#### 4. 考察

規定した滑走速度における各変数の平均値および変動について検討すると、総仕事率は全ての滑走速度において、被験者の競技成績にかかわらずほぼ同等の値を示した(表1)。Sandbakk et al. (2010)は、競技レベルの異なる選手が同じ速度で滑走した場合、外的仕事率には差異が認められなかったと報告している。内的仕事率を加味した本研究の総仕事率は、滑走速度の上昇に伴って直線的な増加を示した(図2a)。回帰度や推定値の標準誤差から、滑走速度と総仕事率は線形関係に強く収束されることが考えられる。これらのことから、同じ滑走速度を発揮するためには、競技レベルにかかわらず同等の総仕事率が必要であること、また被験者間で滑走動作が異なっても総仕事率は同等であることが示唆される。

低速から中程度の速度(1.67~3.33 m·s<sup>-1</sup>)で滑走した際のエネルギー消費率は、競技成績が高いほど低い値を示した(表1および図3)。この速度範囲での運動には、遅い収縮速度で効率が

が高いST線維が選択的に動員される(Goldspink, 1978; Sale, 1987)と考えられる。Coyle et al. (1992)はまた、骨格筋に占めるST線維比率が高いほど機械的効率は高くなると指摘している。これらのことは、同じ仕事率すなわち同じ速度で滑走する際には、ST線維比率が高いほど、低いエネルギー消費率で滑走できることを意味している。また、持久性トレーニングは、ST線維比率の増加や毛細血管の発達(Ingier, 1979)、ミトコンドリア容量の増大による酸化系酵素活性の向上(Wibom et al., 1992)などの適応を骨格筋に促し、運動時の代謝応答を改善するとされている。以上のことから、競技レベルの高い選手は、十分な持久性トレーニングによって、競技レベルの低い選手よりもST線維比率が高く、筋の代謝機能の向上が進んでいるため、低いエネルギー消費率で滑走していると推察される。

Sandbakk et al. (2010)は、ローラースキーでスケーティング滑走した時の機械的効率を、外的仕事量と安静時のエネルギー消費を含めた

運動中の全エネルギー消費量を用いて算出し、滑走速度の上昇 ( $3.89 \sim 5.00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) に伴って14.2%から15.4%に緩やかに増加すると報告している。一方、本研究のnet efficiencyは、滑走速度の上昇に伴い、 $1.67 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ の24.5%から $3.33 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ の38.8%まで増加したが、それ以上の速度では減少傾向を示した (図2c)。本研究と先行研究との値や変動の不一致は、異なる滑走テクニックを用いたことが原因の1つであると思われるが、金子 (1985) が指摘しているように、入出力エネルギーの評価方法の違いが大きく影響したと考えられる。

次に、競技成績とレース時の各変数との関係について検討してみると、競技成績が高いほどレース時の総仕事率およびnet efficiencyは高かった (図5aおよび5b)。一方、レース時のエネルギー消費率と競技成績との間に、共変関係は認められなかった。また、net efficiencyの最大値は競技成績が高いほど高値を示した (図5c)。したがって、競技レベルが高い選手はレース時の平均滑走速度が高く、必要とされる総仕事率が高いにもかかわらず、net efficiencyが高いため、エネルギー消費率は競技レベルの低い選手と同等か低い値であった (表2)。これらのことから、競技成績と高い関連を示した本研究のnet efficiencyはローラースキーの競技成績を規定する1つの要因になりうると考えられる。これは、機械的効率が持久的運動の競技パフォーマンスの決定要因の1つであるというCoyle (1999) の見解を支持している。

net efficiencyは、エネルギー消費率に対する総仕事率の割合であるため、エネルギー消費率が同じであれば発揮された総仕事率が高いほど、総仕事率が同じであればエネルギー消費率が低いほど、net efficiencyは高くなる。競技レベルの高い選手と低い選手が同じ速度で滑走すると仮定すると、先に述べたとおり、必要とされる総仕事率は同じであり、高いnet efficiencyを有する競技レベルの高い選手はより少ないエネルギー消費率で滑走することができることになる。ローラースキーのような長時間の持久的運動では、消費エネルギーが節約されることは

競技成績の向上に有利に働くであろう。また、競技レベルの異なる選手が同じエネルギー消費率で滑走すると仮定すれば、net efficiencyが高い選手は、同じエネルギー消費率から発揮される総仕事率が高く、より高い速度で滑走できることになる。しかし、レース時のnet efficiencyは各被験者のnet efficiencyの最大値に近い値であったことから (表2)、実際のレースでは、選手は競技レベルにかかわらず、無意識的に各々のnet efficiencyが最大となるような速度を選択して滑走していると推察される。

以上の考察から、競技レベルの高い選手は、十分な持久的トレーニングによって骨格筋の適応が進み、体内に取り込んだ酸素を利用してより多くの化学的エネルギーを産生することが可能であり、高いnet efficiencyを有することから、産生された化学的エネルギーを効率的に力学的エネルギーに変換して仕事を行い、より高い滑走速度を発揮することができると考えられた。

本研究においては、Pierrynowski et al. (1980) の方法に基づき、全力的エネルギーの伝達を仮定して仕事量を算出した。この方法では、異なる関節で同時に起こるエネルギーの発生と吸収が低く見積もられ、仕事量が過少評価される可能性が指摘されており、近年、地面反力から逆動力学的に仕事量を算出することが推奨されている (Winter, 2005)。しかし、ローラースキー滑走時は、歩行や走行と比べてステップ長が長く (本研究では $1.67 \sim 3.34 \text{ m}$ )、左右上下肢が独立して力発揮するため、地面反力の測定は困難であった。また、本研究では、機械的効率が着目して競技成績との関係について検討してきたが、発揮された仕事が滑走速度に変換される過程については言及していない。その過程には滑走スキルのような技術的要素が介在すると考えられ、今後発揮された仕事を有効に滑走速度に変換する技術的要素についても検討していく必要がある。

## 5. まとめ

本研究は、ダイアゴナルストライドを用いて種々の速度でローラースキー滑走した際の機械

的効率を、内的仕事量を加味して評価し、競技成績との関係について検討した。各滑走速度における総仕事率は、いずれの被験者もほぼ同等の値を示し、同じ速度で滑走するためには、競技レベルや滑走動作の違いにかかわらず同じ総仕事率が必要であることが示唆された。また、機械的効率が高いほど競技成績は高く、機械的効率がローラースキーの競技成績を規定する要因の1つとなりうると考えられた。これらのことから、競技レベルの高い選手は、高い機械的効率を有し、同じエネルギー消費率からより高い仕事率を発揮できるため、高い速度で滑走していると考えられた。加えて、レース時の機械的効率は各々の最大値に近い値であったことから、選手はレース時に機械的効率が最大となるような速度を無意識的に選択して滑走していると推察された。

## 文献

- 阿江通良 (1996) 日本人幼少年およびアスリートの身体部分慣性係数. 体育学研究, 15(3): 155-162.
- 阿江通良・藤井範久 (1996) 身体運動における力学的エネルギー利用の有効性とその評価指数. 筑波大学体育科学系紀要, 19: 127-137.
- Alsobrook, N. G. and Heil, D. P. (2009) Upper body power as a determinant of classical cross-country ski performance. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 105: 633-641.
- Benedict, F. and Cathcart, E. P. (1913) Muscular work: a metabolic study with special reference to the efficiency of the human body as a machine. Carnegie institution of Washington: Washington, D.C.
- Coyle, E. F. (1999) Physiological determinants of endurance exercise performance. *J. Sci. Med. Sport*, 2(3): 181-189.
- Coyle, E. F., Sidossis, L. S., Horowitz, J. F., and Beltz, J. D. (1992) Cycling efficiency is related to the percentage of type I muscle fibers. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 24(7): 782-788.
- Gaesser, G. A. and Brooks, G. A. (1975) Muscular efficiency during steady-rate exercise: effects of speed and work rate. *J. Appl. Physiol.*, 38(6): 1132-1139.
- Goldspink, G. (1978) Energy turnover during contraction of different types of muscle. *Biomechanics VI-A: Proceedings of the 6th International Congress of Biomechanics*. Copenhagen, Denmark: 27-39.
- Hill, A. V. (1927) Muscular movement in man: The factors governing speed and recovery from fatigue. McGraw-Hill: New York.
- Hoffman, M. D., Clifford, P. S., Watts, P. B., O'Hagan, K. P., and Mittelstadt, S. W. (1995) Delta efficiency of uphill roller skiing with the double pole and diagonal stride techniques. *Can. J. Appl. Physiol.*, 20(4): 465-479.
- Ingjer, F. (1979) Effects of endurance training on muscle fibre ATP-ase activity, capillary supply and mitochondrial content in man. *J. Physiol.*, 294: 419-432.
- Ito, A., Komi, P. V., Sjödin, B., Bosco, C., and Karlsson, J. (1983) Mechanical efficiency of positive work in running at different speeds. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 15(4): 299-308.
- 金子公宥 (1985) 筋運動と効率－効率評価法の問題点を中心に－. *Jpn. J. Sports Sci.*, 4(1): 3-8.
- Mognoni, P., Rossi, G., Gastaldelli, F., Canclini, A., and Cotelli, F. (2001) Heart rate profiles and energy cost of locomotion during cross-country skiing races. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 85: 62-67.
- Nakai, A. and Ito, A. (2009) Mechanical efficiency and skiing speed during roller skiing with diagonal stride technique. *Proceedings of the 14th Annual Congress of the European College of Sport Science*. Oslo, Norway: 169.
- 中井聖・伊藤章・豊岡示朗 (2009) ローラースキー滑走時の生理的指標と競技成績の関係. *大阪体育学研究*, 47: 1-10.
- Pierrynowski, M. R., Winter, D. A., and Norman, R. W. (1980) Transfers of mechanical energy within the total body and mechanical efficiency

- cy during treadmill walking. *Ergonomics*, 23: 147-156.
- Rusko, H. (Ed.) (2003) *Cross Country Skiing*. Blackwell Science: Oxford.
- Saibene, F., Cortili, G., Roi, G., and Colombini, A. (1989) The energy cost of level cross-country skiing and the effect of the friction of the ski. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 58: 791-795.
- Sale, D. G. (1987) Influence of exercise and training on motor unit activation. *Exerc. Sport Sci. Rev.*, 15(1): 95-152.
- Sandbakk, Ø., Holmberg, H.-C., Leirdal, S., and Ettema, G. (2010) Metabolic rate and gross efficiency at high work rates in world class and national level sprint skiers. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 109(3): 473-481.
- Smith, G. A. (2003) Biomechanics of cross country skiing. In: Rusko, H. (Ed.) *Cross Country Skiing*. Blackwell Science: Oxford, pp. 38-44.
- Wibom, R., Hultman, E., Johansson, M., Matherei, K., Constantin-Teodosiu, D., and Schantz, P. G. (1992) Adaptation of mitochondrial ATP production in human skeletal muscle to endurance training and detraining. *J. Appl. Physiol.*, 73: 2004-2010.
- Winter, D. A. (1978) Calculation and interpretation of mechanical energy of movement. *Exerc. Sport Sci. Rev.*, 6(1): 183-256.
- Winter, D. A. (1979) A new definition of mechanical work done in human movement. *J. Appl. Physiol.*, 46: 79-83.
- Winter, D. A. (2005) *Biomechanics and motor control of human movement* (3rd ed.). John Wiley & Sons: Hoboken, NJ.