

ヒトの寒冷適応に関するバイオメカニクス的研究 —日本南極地域観測隊とエスキモー装備の 保温性, 運動性の比較—

渡部和彦*・寺井 啓**

Biomechanical Study on Man's Adaptation to Cold —Comparison of the Outfit of JARE and Eskimos in Heat Insulation and Physical Activity—

Kazuhiko WATANABE* and Kei TERAI**

Abstract: The heat insulation and the physical performance were tested to compare the winter clothing of the JARE with that of Greenland Eskimos. Four healthy students were chosen as subjects. In the heat insulation test, each subject's body temperature was monitored during 60 min in chamber (-40°C). The condition of bicycle ergometer exercise was $2.5\text{ kp} \times 15\text{ min}$. The results revealed the following: In heat insulation the Eskimo outfit excels the JARE outfit. In the physical performance test, the sportswear proves better in "broad jump" than the JARE and Eskimo outfit. But in the seven other items of the test, the three kinds of clothing showed almost the same result, though the Eskimo outfit was a little lower in "trunk flexibility". The JARE outfit seems suitable for physical activity, but its gloves require some improvements in heat insulation so as to cope with the severe cold.

要旨: 日本南極地域観測隊 (JARE) が現在使用している冬用作業装備について, 保温性および機能性を明らかにするために, グリーンランドエスキモーの装備と比較した。被検者として, 健康な男子学生 4 名の協力を得た。保温性のテストでは, -40°C の部屋に 60 分間在室させ, その間に 2.5 kp の負荷で 15 分間の自転車エルゴメーター作業を行わせ, 身体各部と装備内温をモニターした。その結果, エスキモー装備は, 保温性において JARE 装備よりすぐれている結果が得られた。

また, 運動能力テストの 8 項目においては, 「立ち幅跳び」でスポーツウェアが JARE およびエスキモー装備よりすぐれた成績であったが, 他の項目では, 「伏臥上体反らし」でエスキモーの装備がやや低い成績のほかは, ほぼ同様の値であった。

JARE 装備は, 身体的作業を行うのに適していると考えられる。ただし, JARE の作業手袋は保温性が著しく低く, 検討を要する。

1. はじめに

本研究の目的は, 過去の南極観測の経験に基づいて開発, 改良がなされてきた現用装備について実験的資料を得て, 極地における最適な装備を追求しようとするものである。これによって, 極地における作業の安全性および効率性を高め, さらに快適性をも高めたい。

今回は, 日本南極地域観測隊 (以下「JARE」と略称する) が現在使用している防寒衣類

* 広島大学教育学部体育教育学講座生理学研究室。Laboratory of Physiology and Sports Biomechanics, The University of Hiroshima, 2-17, Midori-cho, Fukuyama 720.

** 国立極地研究所。National Institute of Polar Research, 9-10, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173.

(羽毛服, D 型雪靴) と, グリーンランドエスキモーが常用する毛皮服とについて, 保温性および作業性の面から比較検討することにした。

2. 方法および実験手順

2.1. 保温性についての実験

2.1.1. 実験場所

国立極地研究所低温実験室 (温度条件: -40°C , 無風)

2.1.2. 被検者

健康な成人男子 4 名に被検者として協力を得た。被検者の形態的プロフィールを表 1 に示した。

表 1 被検者の身体的特徴
Table 1. Physical characteristics of the subjects.

Subject	Age	Height (cm)	Weight (kg)	Chest girth (cm)	Subcutaneous fat (mm)			
					Subscapula	Upper arm	Waist	Omphalion
K. H.	28	170.1	60.74	89.5	5.3	3.8	6.8	6.2
J. O.	18	178.2	60.93	89.4	4.8	3.0	5.0	6.0
H. S.	20	174.7	72.41	88.5	8.3	4.3	9.5	8.5
Y. K.	20	165.1	61.58	89.3	6.5	4.0	6.0	7.0
\bar{m}	21.5	172.0	63.90	89.2	6.2	3.8	6.8	6.9

2.1.3. 測定手順

被検者にあらかじめ実験の目的, 内容, 方法を説明したうえで, 23.5°C の部屋において身体検査を行い, 併せて健康状態が良好であることを確認した。その後テレメーター心電図および身体各部位からの皮膚温の導出のためのピックアップを装着した (図 1)。

被検者は, 23.5°C の部屋で椅子に座ったままでの安静時の値を読み取り, その後低温室に



図 1 温度検出部位。 1. 前額部, 2. 胸部, 3. 大腿部 (大腿直筋), 4. 足部 (足背部), 5. 手 (手背部), 6. 背中, 7. 直腸, 8. 上着内部, 9. 靴内部 (足背部の位置)

Fig. 1. The position of the temperature measurement. 1. Forehead, 2. Breast (nipple level), 3. *M. rectus femolis* (surface), 4. Instep, 5. Hand (back), 6. Back (subscapular level), 7. Rectum, 8. Overcoat (inside of breast level), 9. Boot (inside of instep position).

入室した。入室時には、被検者は椅子ごとキャスターによって運ばれた。したがってその過程での運動は極力避けられた。なお、皮膚温、衣服温の読み取りは3分ごとに連続的に行われた。

23.5°C の部屋での安静時10分間の値および -40°C の低温室での安静時30分間の値を記録したのち、-40°C で15分間自転車エルゴメーターを駆動させた（モナーク社製自転車エルゴメーター、2.5 kp で毎分60回転）時の値を記録した。その後、同室で椅子に座って15分間の回復過程を記録したのち、再びキャスターによって被検者を 23.5°C の部屋に運び出し、そこでさらに15分間の安静回復過程を記録した。

2.1.4. 測定器機

テレメーター心電図は、三栄測器製テレメーター心電計を用い、-40°C の部屋からアンテナコードを 23.5°C の部屋まで導いて、記録器は常温下で作動させた。皮膚温、衣服温の測定は、宝工業製サーミスター温度計を用い、デジタル表示切り換えにより連続的に記録した。温度計の読み取りは、-40°C の低温室を避け、常温下において行った。

2.2. 運動能力テスト

2.2.1. 実験場所および被検者

実験場所は、国立極地研究所内で運動が十分行える部屋および廊下において行った。表1に示した4名の被検者に JARE およびエスキモー装備を着用させ、それぞれの条件下で同一のテスト項目を行った。

2.2.2. 運動能力テスト項目

運動能力のテスト項目は、以下のとおりである。

- a) 立ち幅跳び (Broad jump)
- b) サイドステップ (Side stepping)
- c) 立位体前屈 (Trunk flexibility; forward bending under the ground level)
- d) 伏臥上体反らし (Trunk flexibility; backward bending in belly position)
- e) ステッピング (Stepping)
- f) 全身反応時間 (Reaction time)
- g) 背筋力 (Back strength)
- h) 垂直跳び (Sargent jump)

測定に際しては、それぞれの項目について練習をさせたうえで実施し、疲労の影響がないように注意した。

2.3. その他の測定項目と手順

2.3.1. 衣服の重量と厚さ

衣服の重量は、10 g 目盛り表示の天秤により測定した。また、衣服の厚さは、0.1 mm 目

盛りのノギスを用いた。

2.3.2. 形態計測

皮下脂肪は、労研式皮脂厚計を用いた。握力はスメドレー式、血圧は水銀式血圧計を用い、いずれも、23.5°C の条件で行った。

3. 結果と考察

3.1. 被検者の形態的特徴

表 1 に被検者 4 名についての形態的特徴を示してある。被検者の年齢の平均が 21.5 歳、身長 172.0 cm、体重 63.90 kg、胸囲 89.2 cm であり、さらに皮下脂肪厚においても、ほぼ日本人成人男子の標準的体格を有すると考えられる。

3.2. 装備の重量および衣服などの厚さ

表 2 は JARE およびエスキモーの衣類について、その重量と厚さについて計測した値を示したものである。重量については、手袋、長靴、上着、ズボン、下着、帽子について、JARE とエスキモー装備の比較がなされている。エスキモー装備においては、まず手袋はアザラン皮製で、自然の毛皮によって入口部分をカバーするように縫い込まれている。長靴はアザラン皮製の外靴と羊皮製の内靴とからなる。上着は通常トナカイの皮製であるが、今回使用のものは羊皮製であった。ズボンは白熊または犬皮製が普通であるが、今回使用のものは羊皮製であった。下着は木綿のシャツ、ももひきおよび毛糸シャツ、無脱脂の長袖のセーターを着用した。足部は薄手ナイロン靴下を着用した。

JARE 装備の衣類は、上下羽毛服と D 型雪靴のほかは、エスキモー装備と同一の下着を着用した。帽子は毛糸の目出帽を着用し、手袋は軍手および牛皮作業用手袋を着用した。

表 2 装備の重量および厚さ
Table 2. Weight and thickness of the outfit.

	Weight (kg)		Thickness (mm)	
	JARE	Eskimo	JARE	Eskimo
Gloves	0.15	0.35	2.0	6.0
Boots	2.15	2.38 (0.84 inner)	1.5	12.0 (6.0 inner)
Coat	0.98	4.15	4.2	4.0 (26.0 hair length)
Trousers	0.46	1.59	1.5	4.0 (34.0 hair length)
Underwear	1.47	1.49	3.0	6.0
Cap	0.32	—	4.0	4.0 (26.0 hair length)
Sole	—	—	53.0	17.0
Total	5.63	9.96	—	—

さて、総重量の比較では、JARE のものが 5.63 kg, エスキモーのものは 9.96 kg であり、エスキモー装備の方が 4.33 kg も重いことが示された。特に上着の重量差は大きく、JARE の上着が 0.98 kg と極めて軽量であったのに対し、エスキモーの方は 4.15 kg という値で、著しい差を示した。エスキモーの上着は皮製ということもあって、着用時の重量感から両者の差は明確であることがすべての被検者から報告された。エスキモー装備の場合、上着だけで全重量の40%以上を占めていることが特徴的である。JARE の場合、その値はわずか17%程度である。

一方、厚さに関しては、表2に示すとおりだが、特徴的な違いは手袋についてである。JARE の方が 2.0 mm であったのに対し、エスキモーが 6.0 mm であり、エスキモーの方が厚いことを示した。長靴に関しては、JARE が 1.5 mm であったのに対し、エスキモーは 12.0 mm であった。しかし、靴底の厚さに関しては、JARE が 53.0 mm であり、エスキモーの 17.0 mm よりも著しく厚いことが示された。既に示したように、長靴の総重量はJARE が 2.15 kg エスキモーが 2.38 kg とほぼ同じ値であった。

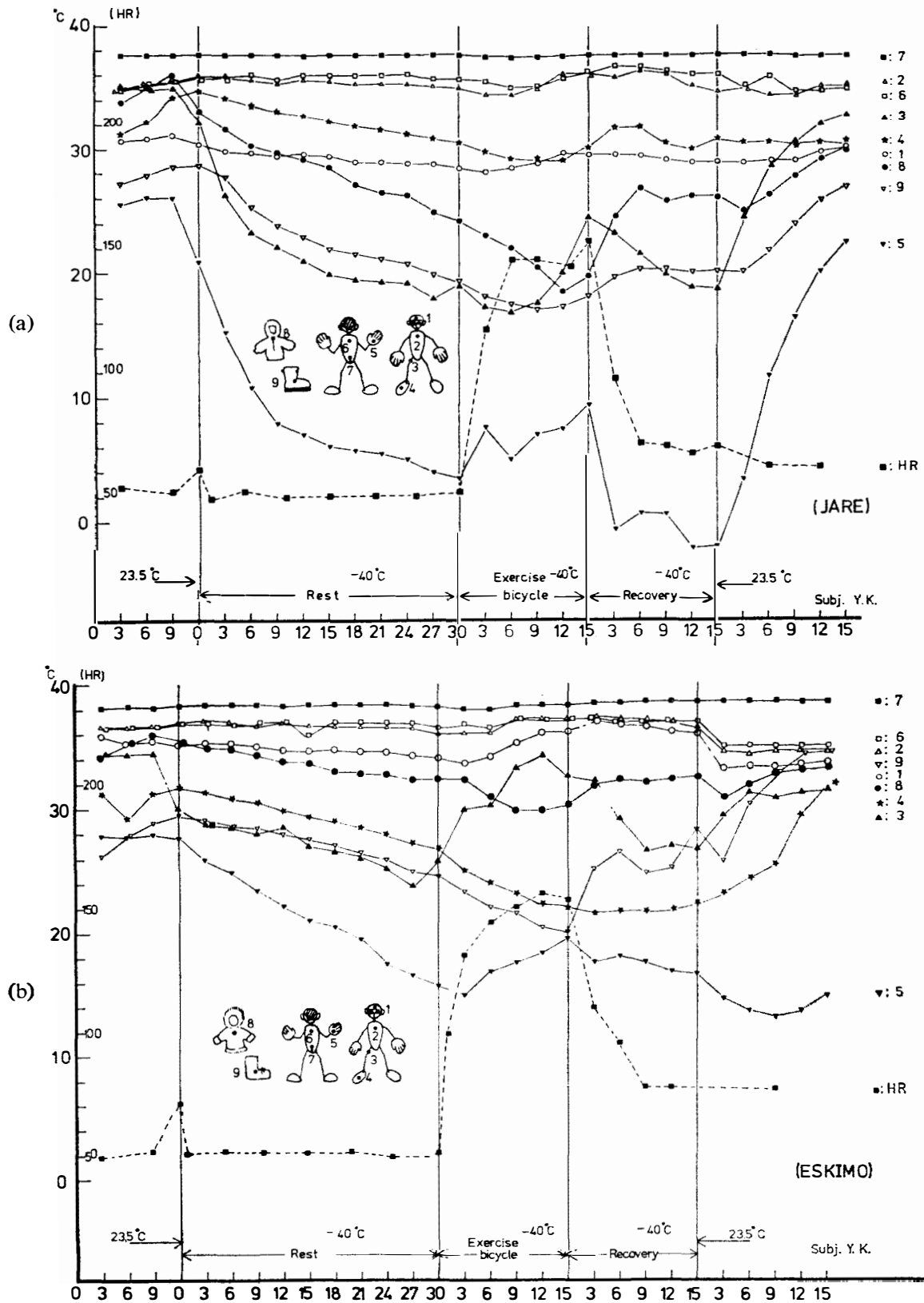
また、エスキモー装備において特徴的なことは、毛皮の毛の長さを考慮した場合の厚さのことである。例えば、上着では JARE が 4.2 mm, エスキモーが 4.0 mm とほぼ同一の値であるが、毛の長さを考慮すると、エスキモー服は 26.0 mm という値に達する。同様に、ズボンにおいてもエスキモーは、毛の長さを考慮に入れると 34.0 mm にも達する。

このように、エスキモーの装備と JARE の装備との大きな違いは、まずその重量の差である。さらに、エスキモーの衣類は厚手のものが多く、特に毛の長さも考慮に入れるとその特徴がさらに明瞭となろう。

3.3. 保温性の比較

図 2(a) は JARE の装備を着用した被検者 Y. K. の身体各部位からの温度および心拍数変化の記録を示したものである。縦軸は温度と心拍数を示し、横軸は時間経過とともに室内温、被検者の運動条件などを示す。

皮膚温の検出部位は、図 1 に示したとおり、1. 前額部、2. 胸部、3. 大腿部（大腿直筋）、4. 足部（足背部）、5. 手（手背部）、6. 背中、7. 直腸、8. 上着内部、9. 靴内部（足背部の位置）である。23.5°C の部屋から -40°C に入室後、まず著しい温度低下が認められたのは手背部（5; ▼）であり、大腿部（3; ▲）、靴内部（9; ▽）がそれにつづき、さらに上着内部（8; ●）も著明な低下を示す。足背部（4; ★）においてもやや著明な低下が認められた。これらの身体部位は、いわゆる外殻（shell）に相当するものであり、これに対して核心（core）に相当する胸部（2; △）、背中（6; □）および直腸（7; ■）では低下は著明ではなかった。これらの中で、皮膚温が 10°C 以下に至った部位が手背部に認められたということは、安全性の面からも注目される。



つづいて、2.5 kp の運動負荷で15分間の自転車作業を行わせると、手背部、大腿部の温度上昇が認められる。しかし、これらの部位は、運動終了後再び温度低下が著しい。特に、手背部の低下が目立った。運動後15分間の回復期をおき、23.5°Cの部屋において計測したところ、手背部、大腿部の体温上昇および上着内部、靴内部温の上昇が目立った。

さて、図 2(b) はエスキモー装備を着用した同一被検者の Y. K. の結果である。実験手順は JARE 装備の場合とまったく同一である。この結果によると、JARE 装備の場合の図 2 と比較してまず気付くことは、23.5°C の部屋から -40°C の部屋へ入室した後の30分間の経過の中で、エスキモー装備の方が、全般的に温度の低下率が低いということである。例えば、23.5°C における手背部の温度は、JARE、エスキモーの装備ともほぼ同じ値であるが、-40°C の部屋での30分経過後の手背部の温度は、エスキモーの装備の場合 10°C を下まわることはない。大腿部、靴内部、足背部における温度低下は著しいが、これらも JARE のものに比べて低下が少ないという傾向が認められる。JARE の装備で著明な低下を示した上着内部(8; ●)の温度は、エスキモーではあまり低下が認められず、エスキモー服の保温性の良さを示すものと思われる。

15分間の自転車作業においては、JARE の装備で示したと同様、手背部、大腿部での温度回復が著しかった。-40°C においては、これらの部位は、再び温度低下することが認められた。いずれにしても、核心の部位の温度は大きな変動がなく、エスキモー装備においても外殻の部位での寒冷環境の影響を、大きく受けることが示されたのである。

さて、これらの傾向について、4名の被検者について、各室温条件および作業条件における温度の変動量について以下に示す。

表 3 は -40°C の部屋への入室前と、入室30分後の温度変化の比較である。最終的には JARE の装備とエスキモーの装備との条件の比較を行ったものであるが、前述のように、核心の部位は外殻の部位に比べて低下の割合が少ないことがここでもあらためて示されている。統計的に有意差を認めたのは、衣服内温と靴内温とにおいてであった。衣服内温は JARE で 8.4°C、エスキモーでは 3.4°C の低下であった。また、靴内部温は JARE で 15.1°C の低下であったのに対し、エスキモーでは 5.2°C にとどまった。

表 4 は JARE およびエスキモー装備について、-40°C の部屋で15分間の自転車作業を行い、作業前と作業直後を比較したものである。被検者は前回同様4名で少ないのであるが、統計的に検定した結果、有意差が認められたのは、大腿部 (JARE では 4.6°C の上昇、エスキモーでは 7.8°C の上昇)、直腸温 (JARE では 0.2°C、エスキモーでは 0.4°C の上昇)、衣服内温 (JARE では 2.7°C の低下、エスキモーでは 0.2°C の上昇) であった。いずれもエスキモー装備において、体温および衣服内温の上昇が認められた。

さて、自転車作業による生体への影響としては心拍数に関して以下のような結果が得られた。

JARE

表 5 自転車エルゴメーター作業中の最高心拍数の比較
 Table 5. Maximum heart rate during the bicycle ergometer exercise.

	JARE	Eskimo
K. H.	168.0	206.2
J. O.	171.4	186.0
H. S.	144.9	160.4
Y. K.	153.7	160.4
\bar{m}	159.5	178.2

表 6 低温実験に伴う体重 (a), 握力 (b), 血圧 (c) の変化
 Table 6. Comparison of the body weight (a), grip strength (b), blood pressure (c) before and after sitting in a cold chamber.

(a) Body weight (kg)

	JARE		Eskimo	
	Before	After	Before	After
K. H.	60.74	60.51	60.93	60.62
J. O.	65.64	65.41	63.95	63.63
H. S.	72.41	72.20	72.34	71.99
Y. K.	61.58	61.47	61.76	61.49
\bar{m}	65.09	64.90	64.75	64.43

(b) Grip strength (kg)

K. H.	46.0	46.1	50.5	47.5
J. O.	52.0	48.0	54.0	50.0
H. S.	49.2	47.5	50.0	51.0
Y. K.	46.5	43.0	48.0	47.2
\bar{m}	48.4	46.2	50.6	48.9

(c) Blood pressure (mm Hg)

K. H.	125/50	132/58	116/65	120/84
J. O.	127/39	110/44	134/43	125/44
H. S.	141/56	139/57	137/45	133/47
Y. K.	107/37	98/55	100/58	100/65
\bar{m}	125/46	120/54	122/53	120/60

表 5 に自転車作業による最高心拍数を示す。表 5 によって明らかなように、エスキモー装備の方が、心拍数からみると作業強度が高いことが推測される。これは、エスキモー装備の重量が重く、作業のしやすさは JARE 装備と比較して劣ることを示すものとして注目される。この差は、トレッドミル歩行で一層明確に生ずるのではないかとと思われる。

さて、 -40°C の低温実験室への入室前および自転車作業 15 分間を含め、合計 60 分経過後を

比較して、以下のような値を得た。

表 6(a) は体重の差である。すなわち、平均値をみると、エスキモーの装備では 320 g の体重減があり、JARE の装備での 190 g に比べて、より大きいことが示された。これはエスキモー装備の方が発汗量が多かったことを示すものであろう。このことは、自転車作業における心拍数が、エスキモー装備着用の方がより高いレベルを示したことと併せて考えると理解できよう。

表 6(b) は、握力の値を示す。握力は低温実験によって全般に低下傾向を示すようであるが、JARE とエスキモーの装備との間において差異があるとは認めがたい。

被検者の中には、3.5-4.0 kg もの握力低下をまねく者もいた。低温実験室中での測定値を得ることも含めて、手指温の低下との関係をさらに追求すべきであろう。

表 6(c) は血圧変化についての値を示す。個人差があるが、全般的傾向として、JARE およびエスキモーの装備ともに血圧については大きな変化は認められなかった。平均値的には、低温実験室における実験の結果として、最高血圧が若干低下し、最低血圧が若干上昇するという傾向が双方に認められた。

3.4. 身体運動能力テスト

JARE およびエスキモー装備の着用条件における運動能力テストは、コントロール条件として、スポーツウエア、スポーツシューズの条件と比較しながら、パフォーマンステストを行った。

表 7 JARE とエスキモー装備およびスポーツウエアによる身体運動能力の比較

Table 7. Comparison of the physical performance test of the outfit of JARE, Eskimo and sportswear.

(a) Broad jump (cm)

	Sportswear	JARE	Eskimo
K. H.	223.0	187.5	191.8
J. O.	242.5	196.0	208.9
H. S.	230.5	202.1	203.0
Y. K.	211.0	181.0	189.5
\bar{m}	226.8	191.7	198.3

(b) Side stepping (times/20s)

	Sportswear	JARE	Eskimo
K. H.	36.0	35.0	35.0
J. O.	37.0	35.0	35.0
H. S.	36.0	39.0	38.0
Y. K.	43.0	46.0	42.0
\bar{m}	38.0	38.8	37.5

(c) Trunk flexibility (cm: forward bending under the ground level)

	Sportswear	JARE	Eskimo
K. H.	17.1	14.3	15.4
J. O.	5.9	3.9	0.0
H. S.	15.2	5.2	8.4
Y. K.	10.4	4.4	2.5
\bar{m}	12.2	7.0	6.6

(d) Trunk flexibility (cm: backward bending in belly position)

K. H.	32.0	37.0	34.0
J. O.	40.0	47.0	36.0
H. S.	37.0	39.0	32.0
Y. K.	55.0	45.0	41.0
\bar{m}	41.0	42.0	35.8

(e) Stepping (times/s: right, left)

K. H.	9.8	11.0	10.5
J. O.	11.2	10.4	10.4
H. S.	12.0	12.0	12.4
Y. K.	13.1	12.6	13.0
\bar{m}	11.5	11.5	11.6

(f) Reaction time (ms)

K. H.	367.4	336.0	361.2
J. O.	373.6	370.2	369.0
H. S.	283.6	295.8	284.4
Y. K.	250.0	303.0	268.4
\bar{m}	318.7	326.3	320.6

(g) Back strength (kg)

K. H.	125.0	130.0	123.0
J. O.	146.0	137.0	146.0
H. S.	120.0	116.0	134.0
Y. K.	136.0	137.0	141.0
\bar{m}	131.8	130.0	136.0

(h) Sargent jump (cm)

K. H.	52.0	44.0	42.5
J. O.	63.5	59.0	57.0
H. S.	51.0	48.5	45.5
Y. K.	48.5	44.0	45.5
\bar{m}	53.8	48.9	47.6

結果は表 7 に示すとおりである。まず測定項目 a) の立ち幅跳びでは、スポーツウェアが JARE およびエスキモー装備よりも有意に良い成績であった ($p < 0.01$)。しかし、JARE およびエスキモーの装備間では、有意差は認められなかった。全般的に、スポーツウェアも含めて、JARE およびエスキモー装備において有意差は認められず、結果としてこれらの装備における運動機能性のすぐれていることを示すことになったと思われる。d) の伏臥上体反らしにおいては、平均値的には、エスキモー装備が、スポーツウェアおよび JARE の装備に比較して低い値を示したことが注目される。

謝 辞

本研究を行うにあたり、前国立極地研究所企画調整官の村山雅美氏をはじめ、日本大学北極点遠征隊員の諸氏、岡山大学の山口立雄氏および城西大学の明石正和氏のご協力を得た。ここに深謝いたします。

文 献

中山昭雄編 (1981) : 温熱生理学. 東京, 理工学社, 638 p.

(1984年10月 3 日受理)