

# ヒトにおける運動トレーニングが 全身耐寒性を増強させる機序の検討

樫 村 修 生

The Mechanisms of Improved Thermogenesis to Cold  
in Exercise-Trained Men

Osamu KASHIMURA

**Abstract :** In order to know a mechanisms of improved thermogenesis to cold in exercise-trained men, 20 nude male subjects (10 non-exercise control group and 10 exercise trained group) were exposed to 10°C for 60 min.

The changes of thermogenesis, plasma catecholamine, corticostroid hormones, glucose, and free-fatty acids levels were studied.

Energy metabolic rate was elevated to  $14.4 \pm 1.2$  kcal / m<sup>2</sup> / hr and  $18.9 \pm 2.0$  kcal / m<sup>2</sup> / hr after 10°C exposure in control and trained groups, respectively. Energy metabolic rate was also greater in trained group than in control. Then, respiratory exchange ratio(RER) was higher in trained than in control. However, plasma catecholamine increments to cold exposure did not differ between in trained and in control. When exposed to cold, plasma norepinephrine(NE) and epinephrine increments was significantly elevated in both groups. Blood glucose concentration during acute cold exposure was less in control than in trained. Also,

mean skin temperature during cold exposure was higher in trained than in control.

On the other hand, plasma cortisol levels of trained and control did not differ significantly during cold exposure period. There was a positive correlation between the increase in plasma cortisol and those in energy metabolism after cold exposure. Also, there was a correlation between the decrease of blood glucose and the increase in energy metabolism to cold exposure.

Our results, also show that exercise training:

- 1) does not suppress NE-dependent non-shivering thermogenesis.
- 2) was greater the metabolic sensitivity of plasma cortisol.
- 3) was greater the utilization of glucose.

## 緒言

最近、日本人は寒さに弱くなってきているという指摘がある。この原因には、衣服、居住構造及び暖房設備など冬季の厳しい寒さに対する防御策による環境条件の変化はもちろんのこと、体力の低下や健康の欠如なども加わり、全身的な耐寒性の減退が予想される。一般的に、耐寒性の向上には、寒冷環境に持続的もしくは間歇的に暴露することが効果的<sup>1)</sup>であるが、上述した現代環境ではその効果は年々期待できなくなってきており、それに変わるものとして運動トレーニングで体力を高めることが正の交叉適応効果として耐寒性を高めるために期待されている<sup>2)</sup>。榎村は、ラットにおいて持久的運動トレーニングは、全身及び局所耐寒性を亢進し全身耐寒性の増強がnorepinephrine (NE) 分泌で生じる脂質代謝による非ふるえる熱産生 (nonshivering thermogenesis: NST) の促進ではなく、筋におけるふるえなど糖質利用による熱産生の促進であると報告をした<sup>2)</sup>。さらに、トレーニングを積んだヒトにおいて指先の局所寒冷血管反応は亢進し耐寒性の増強が確かめられている<sup>3)</sup>。しかし、ヒトについての全身耐寒

性亢進と運動トレーニング改善との間の交叉適応研究は皆無である。本研究の目的は、運動トレーニングにより高められる全身耐寒性は、どのような機序によるかを解明するためNSTおよびふるえ熱産生に關与する血中catecholamine、遊離脂肪酸 (FFA)、副腎皮質 hormone 及び glucose の面から検討し、運動トレーニングによる耐寒性増強の獲得のための手がかりを究明することにある。

## 材料及び方法

被検者は、大学陸上競技部に属し過去のスポーツ歴から5年以上の10名（年令19から22才）の運動鍛練群 (Trained) と、対照者 (Control) として運動部に所属したことの無い大学生10名（年令19から21才）の協力を得た。被検者は、日本のなかで比較的温暖環境にある九州地方出身者を選んだ。被検者は、前日夕食後十分な睡眠をとり、当日朝食をとらず午前9時に人工気象室に入室してもらった。その直後、被検者はT-シャツと短パンを着用してもらい、気温 (Ta) 25°Cの温暖環境下で座位安静を保たせた (control 下) 2時間のcontrol 下のうち、最初1時間で測定機器の直腸と皮膚温用サーミスター素子、呼気ガス採気用マスク装着をした。2時間 control下に引き続いて、Ta10°C 1時間暴露を行ない実験を終了した。なお、実験は寒冷暴露の影響が少ない夏から秋にかけて実験した。実験項目は次に示す。

### 1. 温暖及び寒冷暴露時に連続的に測定した項目

1) 直腸温及び皮膚温：サーミスター温度計 (宝工業K722)により1分間隔で測定した。皮膚温は、倉田と船津の11点<sup>4)</sup>法により測定し、平均皮膚温を算出した。また、直腸温は、肛門から直腸温サーミスターを10cm挿入した。

2) 酸素摂取量 ( $\dot{V}O_2$ ):ダグラスバック法により5分間隔で採気し、%O<sub>2</sub>及び%CO<sub>2</sub>を分析し求めた。

### 2. 温暖環境暴露2時間後と寒冷暴露1時間後の2回測定した項目

1) 血漿norepinephrine (NE)及びepinephrine (E)濃度測定:有資格者に依頼し採集した血液は、直ちに高速冷却遠心器で除蛋白により血漿を求め、アルミナ吸着法で前処理した Catecholamine (CA) を抽出した<sup>5)</sup>。CAは、高速液体

クロマトグラフィと電気化学検出器を組み合わせた装置（島津LC-6AとL-ECD-6A）により分析した。

2) 血中FFA及びglucose濃度分析:キット（ワコー純薬製キット）を用いて分析した。

3) 血漿副腎皮質hormoneの分析:血清副腎皮質hormone (cortisol) は、血清1mlに冷却した1.25N-NaOH 0.1ml とCH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> 10mlを加え30秒振盪し、2500rpm 5分間遠心し、上層をアスピレータにより取り除いた。その後、蒸留水1mlで水洗し、水分層を取り除き、残留物を遠心式エバポレータにより蒸発乾固させた<sup>6)</sup>。その後冷却したCH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>100μlを溶解し、50μlを高速液体クロマトグラフィ（LC-6A）、分光光度検出器（SPD-6A）および分析カラム（島津ゾルバックスCN）により分析した。

## 結果

Table 1 は、被検者の身体的特徴を示す。運動鍛練群における体重及び体脂

Table 1 被検者の身体的特徴

	Age(yr)	Body weight(kg)	Body fat(%)
Control(n=10)	21±1.2	65.4±4.0	18.3±4.1
Trained(n=10)	21±1.3	62.3±5.5	14.2±3.8*

\* p vs. control (p<0.05)

$\bar{X} \pm SD$

Table 2 代謝におよぼす寒冷暴露時の影響

		E. M. (kcal/ m <sup>2</sup> / h)	R. E. R.
25°C, 2 hours(n=10)	Control	48.7±1.8	0.83±0.04
	Trained	52.4±2.3###	0.81±0.02
10°C, 1 hour(n=10)	Control	63.1±1.3***	0.76±0.03**
	Trained	72.3±3.0***##	0.82±0.04
Increase	Control	14.4±1.2	-0.07±0.03
	Trained	18.9±2.0###	0.01±0.02##

\*\* p vs. 25°C, ### p vs. control (p<0.01)

E. M.: Energy metabolic rate, R. E. R.: Respiratory exchange ratio

$\bar{X} \pm SD$

Table 3 寒冷暴露による血中物質像の変化

	NE ( $\mu\text{g/ml}$ )	E ( $\mu\text{g/ml}$ )	FFA ( $\mu\text{Eq/l}$ )	Glucose ( $\text{mg/dl}$ )	Cortisol ( $\mu\text{g/dl}$ )
25°C 2 hours C	542 $\pm$ 21	220 $\pm$ 13	405 $\pm$ 28	69.1 $\pm$ 5.7	11.5 $\pm$ 0.5
(n=10) T	632 $\pm$ 24 ##	245 $\pm$ 11 ##	430 $\pm$ 15	80.1 $\pm$ 4.5 ##	12.4 $\pm$ 0.8
10°C 1 hour T	889 $\pm$ 35 **	240 $\pm$ 24	612 $\pm$ 18 **	50.4 $\pm$ 2.2 **	15.2 $\pm$ 1.2 **
(n=10) C	734 $\pm$ 26 ** ##	260 $\pm$ 18 *	629 $\pm$ 24 **	71.0 $\pm$ 5.0 ** ##	16.3 $\pm$ 0.9 **

\*\* p vs. 25°C, p vs. control (p<0.01)

C: Control, T: Trained, NE: norepinephrine, E: epinephrine, FFA: free-fatty acids

$\bar{X} \pm \text{SD}$

肪率は、対照群に比較して有意 (p<0.01) に小さい。Table 2 は、温暖及び寒冷暴露時における酸素摂取量 ( $\dot{V}\text{O}_2$ ) 及び呼吸交換比を示す。25°C および 10°C 下での  $\dot{V}\text{O}_2$  は、運動鍛練群の方が対照群より大きい。10°C 暴露による  $\dot{V}\text{O}_2$  の増加量は、対照群より運動鍛練群の方が有意に大きい。呼吸交換比は、対照群において 25°C 下より 10°C 下で有意 (p<0.01) に低い、運動鍛練群では変化がない。Table 3 は、温暖及び寒冷暴露時における血中 catecholamine, cortisol, FFA 及び glucose の変化を示す。NE 濃度は、寒冷暴露により両群とも有意な増加を示したが、Control 群の平均増加率 36.4% に対し、Trained 群では 16.1% と有意に Control 群の方が大きかった。E 濃度は、両群とも寒冷暴露時有意に増加し、それぞれの平均増加率は control 群 9.1%、Trained 群 6.1% と差はなかった。

血漿 FFA 濃度は、寒冷暴露により両群とも有意な上昇を示したが、その上昇率には両群で差がなかった。

血中 glucose 濃度は、寒冷暴露により有意に減少を示し、それぞれの減少率は Control 群 27.5%、Trained 群 11.3% で、Trained 群の方が有意に減少が小さかった。

血漿 cortisol は、寒冷暴露で両群とも有意な上昇を示したが、平均増加率は Control 群で 32.2% Trained 群で 31.5% と差がなかった。

Fig. 1 は、寒冷暴露による酸素摂取量の増加と血漿 cortisol の増加量の相関関係を示す。両群におけるこの関係には、正の相関関係が示され、また、両群

の回帰直線を比較すると、高さに有意差 ( $p < 0.01$ ) が認められた。

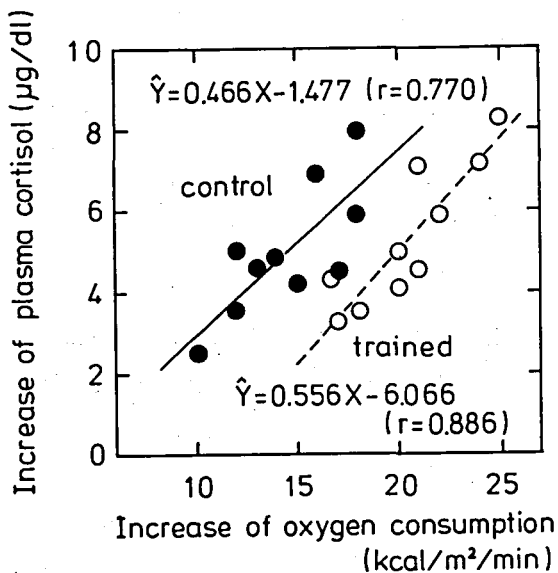


Fig. 1 寒冷暴露による酸素摂取量の増加と血漿cortisolの増加の相関関係

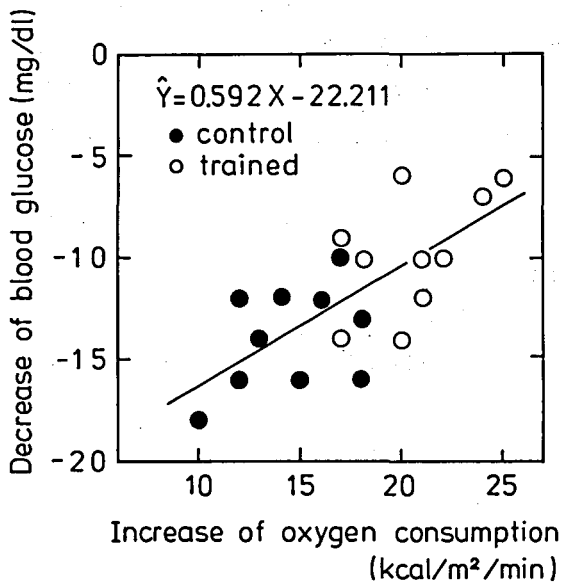


Fig. 2 寒冷暴露による酸素摂取量の増加と血中glucose減少量の相関関係

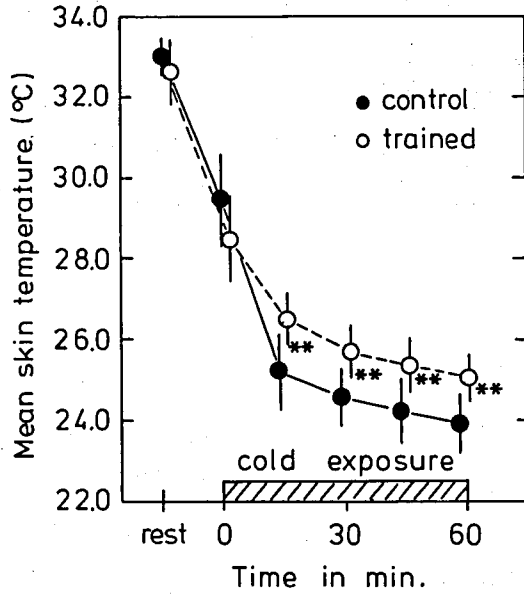


Fig. 3 寒冷暴露時の平均皮膚温 (\*\* $p < 0.01$ )

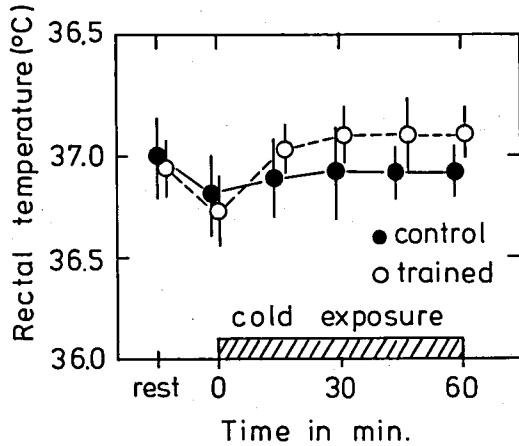


Fig 4. 寒冷暴露時の直腸温

Fig. 2 は、寒冷暴露による酸素摂取量と血中glucose減少量の関係を示す。両者間には、有意な相関関係が認められた。

Fig. 3 は、寒冷暴露時の平均皮膚温を示した。平均皮膚温は、暴露10分後ですでに、Trained 群の方が有意に高かった。

Fig. 4 は、寒冷暴露時の直腸温を示した。直腸温は、2群間に差がなかった。

## 考察

### 1. 運動鍛練による身体的特徴の変化

本研究における陸上競技選手とくに中長距離選手の身体的特徴は、非鍛練者と比較し、体重が少ない傾向にあり、また、体脂肪率は有意 ( $p < 0.05$ ) に小さかった。これは、これまでの報告<sup>7)</sup>と同傾向を示し、運動鍛練により体脂肪が減少し、中長距離選手においてより効率的な走行ができるようになった結果である。

### 2. 運動鍛練者の寒冷暴露による代謝量の変化

寒冷馴化したヒトやラットにおいて寒冷暴露による代謝量は、顕著な亢進を示し、熱産生増大型の耐寒能力の増強を獲得する。また、寒冷馴化したヒトやラットでは、熱産生の亢進ばかりでなく、防熱系の能力も増強する<sup>8)</sup>。檜村<sup>2)</sup>は、運動鍛練を積み重ねるほど寒冷暴露時の代謝量の増加は、大きくなる。体力の増強は、熱産生増大型の耐寒能力を増強させることがわかっている。本研究のヒトの場合でも運動鍛練者の代謝量は、寒冷暴露時に増大を示した。

ラットにおける寒冷暴露時の呼吸交換比は、運動鍛練により変化はないが、対照群では低下することを示した。<sup>2)</sup>つまり、運動鍛練ラットでは寒冷暴露時に温暖暴露時と同じ比率の糖質及び脂質代謝にあるが、対照ラットでは、顕著に脂質代謝に傾く。したがって、運動鍛練により寒冷暴露時の代謝量の増加は、糖代謝の亢進が関与していることを示し、寒冷馴化による代謝量の亢進と異なる機序、つまり、NE分泌によるnon-shivering thermogenesisの亢進とは違う



ことが推測される。

### 3. 寒冷暴露時の血中物質像の変化

寒冷暴露によりNE分泌が増加することはすでに報告されている<sup>9)</sup>。この分泌増加は寒冷適応動物では小さい。これは、寒冷馴化によってNEに対する感受性の増加に伴いNEの分泌の低下が埋め合わせられるためである。寒冷適応による熱産生の増大には、NEの重要性は持続するものである<sup>8)</sup>。しかし、運動鍛練動物の場合、寒冷時のNE分泌は、寒冷適応動物と同じように少ないが<sup>10)</sup>、NEに対する代謝感受性の増大がみられないため、熱産生増加に対するNEの重要性は亢進しないものと思われる<sup>2)</sup>。本研究において感受性試験は行っていないが、寒冷時のNE分泌が少なく、同じ結果を示した。推測するところ、ヒトの運動鍛練者においても、動物実験と同じようにNEによる非ふるえ熱産生の依存度の少ないことが考えられる。

E分泌は、NEに比較して寒冷適応状態に対する必要性はあまりなく、熱産生に対して重要な役割をもつが、その後寒冷適応と経過ではほとんど寒冷暴露前の状態に戻ってしまうことが報告されている<sup>8)</sup>。また、運動鍛練ラットにおいて、Eの外因的投与による代謝感受性は、変化がないことも報告されている<sup>2)</sup>。ヒトにおける寒冷時のE分泌は、Control 群とTrained 群で変化がなく、動物と同様に寒冷時に重要性が増したとは言いがたい。寒冷時の血漿cortisolは、両群とも有意に増大したが、両群間に差はなかった。副腎皮質ホルモンは、寒冷暴露の初期に放熱を補償する形で熱産生を増大させるのに役立ち、適応状態が得られるとその分泌は、減少することが言われている<sup>8)</sup>。つまり、本研究におけるControlおよびTrained 群の副腎皮質ホルモン分泌は顕著に増大していることから、熱産生の亢進に対して重要な役割をもつものと思われる。そこで、寒冷暴露により生じた熱産生の増加と血漿cortisol 分泌増加との相関をみたところ、正の相関関係が認められた。つまり、熱産生の増加が大きいほど血漿cortisol の分泌が多いことがわかった。また、両者の相関関係から求められた回帰直線は、その高さに有意差が生じた。つまり、同じ血漿cortisolの分泌増

加でもTrained群の方が熱産生量が大きい。cortisol 分泌に対する熱産生の感受性が高まっている可能性がある。ヒトがトレーニングした場合、熱産生が顕著に増加するのは、副腎皮質ホルモンの分泌の増加ならびに副腎皮質ホルモンに対する感受性の亢進という両者の要因が関係すると思われる。運動鍛練の場合、寒冷馴化による熱産生とはまったく別の機序の改善が、耐寒性の正交叉適応として働くと思われる。寒冷時に副腎皮質ホルモンの作用は、gluconeogenesisやlipolysisを亢進させ、とくに糖質代謝とは重要な関係があるとされる<sup>8)</sup>。glucoseの利用度の指標とされている寒冷暴露時のglucose低下量と代謝量の関連性をみた。寒冷暴露時の代謝量が大きいほど、glucoseの低下が少ないと言う相関関係がある。つまり、glucoseの低下が小さいほど糖代謝利用が大きく、それをgluconeogenesisにより補償することが考えられている。

そこで、Fig. 5 に示すごとく寒冷に対する非ふるえ熱産生に関与する機序<sup>8)</sup>を模式的に示したが、今回、トレーニングにより生じる顕著な熱産生増大は、太い矢印の機序になる。また、これまで確かめられているトレーニングによる熱産生亢進にあまり関与しない部分は、破線で示す。

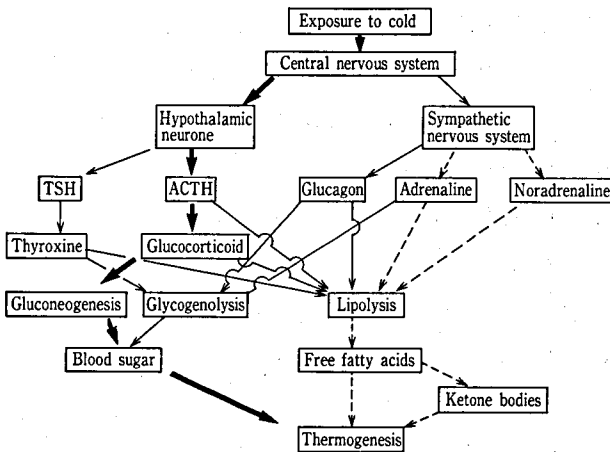


Fig 5. 寒冷暴露時の非ふるえ熱産生の機序<sup>8)</sup>

#### 4. 寒冷時の体温

寒冷暴露時の皮膚温は、Trained群で高かった。これは、運動により体温の上昇が繰り返されるため、一種の間歇的暑熱馴化を呈することになる。そのため、熱放散機序は亢進すると思われる。本実験において、この影響が寒冷暴露時に生じるため、平均皮膚温が高い傾向を示した。また、直腸温は、熱産生と熱放散のバランスで決定される要因であるが、寒冷時に両群間に差がなかった。寒冷時にTrained 群で熱産生の増していることは報告があるため、やはり、Trained 群では熱放散が増していることがうかがわれる。

#### 要約

運動トレーニングにより高められる全身耐寒性は、どのような機序によるかを解明するため、代謝、血中物質及び体温の面から検討した。以下の結果を得た。

- 1) 寒冷暴露時運動鍛練者の代謝量は、対照者より亢進した。
- 2) 血漿NE, E及びcortisolは、両群間に差がなかった。
- 3) しかし、cortisolの分泌増加と代謝量増加の間には、正の相関関係が認められ、同じcortisol 分泌量に対する代謝量の増加は、Trained 群で大きかった。
- 4) 寒冷暴露時のglucose 低下量と代謝の増加量の間には、相関関係が認められた。
- 5) 寒冷暴露時の直腸温は、両群で差がないが、運動鍛練者で高い傾向を示した。また、皮膚温は、運動鍛練者が有意に高かった。

この研究は、文部省科学研究費（奨励研究A,課題番号01780182）により行なわれた。

#### 文献

- 1) Aronold,J. and Richard,D. (1987) : Exercise during intermittent cold exposure prevents acclimation to cold in rats. J.Physiol. (Lond.) ,30,

- 2) 樫村修生 (1988) : ラットにおける持久的トレーニングと全身耐寒性の正の交叉適応. 日生理誌, 50, 753-760.
- 3) 樫村修生 (1984) : 運動鍛練が局所寒冷血管反応に与える影響. 長野体育学研究, 1, 19-24.
- 4) 倉田正一, 船津雄三 (1954) : 平均皮膚温の算出について. 労働科学, 30, 332-337.
- 5) Anton, A. H. and Davis, F. S. (1962) : A study of the factors affecting the aluminum oxidetrihydroxyindole procedure for the analysis of catecholamines. J. Pharmacol. Exp. Ther., 138, 360-375.
- 6) Belliveau, J. F., Tschaeen, D. M., Ferrante, K. J. and O'leary, Jr, G. P. (1982): The plasma corticosteroid profile in the adjuvant induced arthritic rat model. FEBS Letters, 139, 136-139.
- 7) Oscari, L. B., Spinakis, C. N., Wolff, C. A., and Beck, E. J. (1972) : Effects of exercise and of food restriction on dipose tissue cellularity. J. Lipid. Res., 13, 588-592.
- 8) 伊藤真次 (1978) : 日本人の耐寒性. p.124-125, 149-150, 社会保険新報社, 東京.
- 9) 八幡剛浩, 黒島辰汎 (1983) : 寒冷暴露によるヒトの血漿カテコラミンの変化. 日生氣誌, 20, 69-73.
- 10) Moriya, K., Maekubo, H. and Hiroshige, T. (1977) : Effects of norepinephrine on uptake and oxidation of plasma free fatty acids in coldacclimated rats. Jap. J. Physiol. 27, 601-616.