

運動トレーニングによる耐寒性 増進の機序

榎村 修生

Mechanisms of Enhanced Cold Tolerance induced by Exercise Training

Osamu Kashimura

(1) はじめに

一般に運動を継続すると寒さに強くなると言われている。しかし、なぜ寒さに強くなるのかは明確な答えがまだにない。これまで、実験動物を用い、運動トレーニングによる耐寒性増強のメカニズムを探ってきた。そのメカニズムの全容を解明するためにはまだまだ労力を費やさなければならないが、ここでこの7年間の研究成果についてまとめ、さらに今後の研究の方向性を検討することにした。

(2) 耐寒性に対する運動鍛練の効果

寒冷馴化ラット及びヒトにおいて、寒冷暴露時の代謝量及び体温の反応は、温暖馴化ラットのそれと比較して、その増加が大きい(1,2,3)。さらに、運動トレーニングラットでは、トレッドミル運動の場合(1,3)ばかりでなく、水泳運動の場合でも(4)、寒冷暴露時の代謝反応は増大した(Fig. 1,2)。また、寒冷馴化させながら運動トレーニングをしたラットでは、寒冷暴露時の代謝量

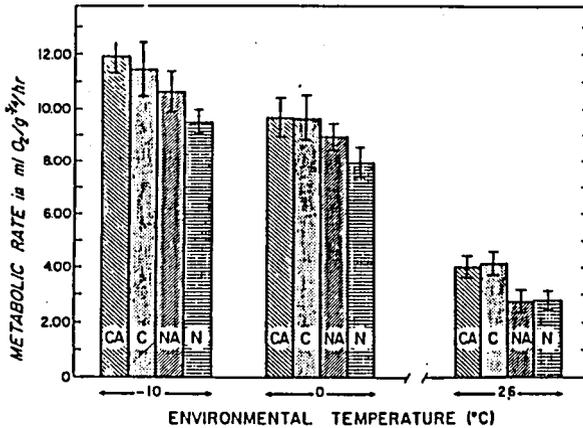


Fig.1 Resting metabolic rate at 26°C and metabolic response to two cold environments, 0°C and -10°C. Bars represent means \pm SD. (Strömme, et al. 1967)

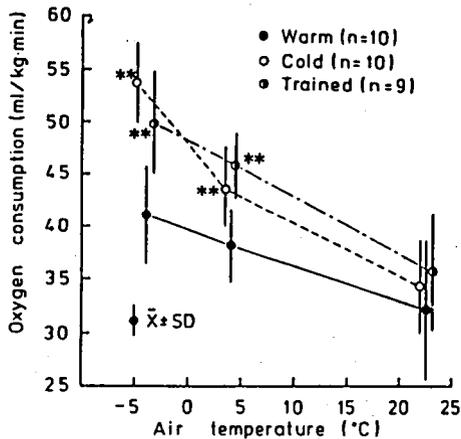


Fig.2 Resting oxygen consumption ($\dot{V}O_2$) at 23°C and $\dot{V}O_2$ responses to two cold environments, 5°C and -4°C. ** Statistically significant ($p < 0.01$) differences between warm group and cold or trained groups.

Table 1 Metabolic($\dot{V}O_2$):ml/kg/min and thermal(T_{col}): $^{\circ}C$ responses to cold and warm exposures.

Group		25 $^{\circ}C$		0 $^{\circ}C$	
		$\dot{V}O_2$	T_{col}	$\dot{V}O_2$	T_{col}
W	X	23.58	37.10	48.23**	37.48
	SD	1.57	0.38	2.81	0.21
WT	X	27.43##	37.60##	53.18***##	37.96*#
	SD	1.74	0.30	4.15	0.21
C	X	29.49##	36.50	54.28***##	38.22***##
	SD	2.62	1.70	3.49	0.23
CT	X	31.90##	36.86	57.99***##	38.22***##
	SD	2.43	1.36	4.86	0.31
WTvs. C		N. S.	N. S.	N. S.	P<0.05
WTvs. CT		P<0.01	N. S.	P<0.05	N. S.
Cvs. CT		N. S.	N. S.	N. S.	N. S.

Statistically significant differences between 25 $^{\circ}C$ and 0 $^{\circ}C$, and W and other groups:

*p<0.05, **p<0.01, and #p<0.05, ##p<0.01, respectively. N. S.:not significant

が寒冷馴化や運動トレーニングラットのそれより、さらに増大することが明らかにになっているが (5), その増大量は運動トレーニング及び寒冷馴化ラットのそれぞれの代謝増加量の総和より少ない (5, Table 1)。しかし, 運動トレーニング及び運動トレーニングと寒冷馴化を組み合わせた場合, 明らかに耐寒性が増強することがわかった。寒冷馴化ラットは, 非ふるえ熱産生の亢進により耐寒性が亢進し, NA分泌によるFFAエネルギーの利用, FFA酸化速度の亢進が大きい (6,7)。しかし, 運動トレーニングラットは, NA投与時の代謝量及び体温反応は少なく, FFAの利用も少ない (5,8, Table 2)。寒冷馴化させながら運動トレーニングを実施したラットは, NA投与によるNST時のFFAの利用は, 寒冷馴化のみの場合よりやや少なかった (5, Table 2)。これらのことは, 運動トレーニングが, NA投与時及び寒冷暴露時にFFA利用の亢進がないことを示すものである。さらに, 寒冷暴露時に Haxamethonium による交感神経節遮断剤を投与した場合の代謝量及び体温反応は, 運動トレーニングラットで大きく, 寒冷馴化ラットで減少することもわかっている (5,7,8, Fig. 3, Table 3)。また, 運動トレーニングラットは, Adrenaline に対する代謝感受性が低いこともわかっている (8)。つまり, 運動トレーニングは, 耐寒

Table 2 Effects of noradrenaline injection on plasma fatty acids(FFA), oxygen consumption($\dot{V}O_2$) and colonic temperature (Tcol) under 25°C air temperature.

	W	WT	C	CT	
Saline FFA					
	X	0.392	0.261**	0.260**	0.243**
	SD	0.049	0.041	0.069	0.032
$\dot{V}O_2$	X	21.24	24.57*	24.49**	31.90**
	SD	3.04	3.24##	2.62	2.43@@
Tcol	X	37.14	37.69*	36.53*	36.87
	SD	0.36	0.53##	0.44	0.48@@
Noradrenaline FFA					
	X	0.644	0.468**	0.404**	0.387**
	SD	0.045	0.028##	0.055	0.012@@
$\dot{V}O_2$	X	23.97	27.58	42.86**	43.83**
	SD	5.19	4.46##	1.29	2.08@@
Tcol	X	37.89	38.47**	38.84**	39.14**
	SD	0.21	0.32	0.92	0.52@@
Increase(mEq/ml)					
	X	0.252	0.207*	0.404**	0.387**
	SD	0.047	0.035#	0.055	0.012@@
$\dot{V}O_2$	X	2.73	3.01	42.86**	43.83**
	SD	0.50	4.46##	1.29	2.08@@
Tcol	X	0.75	0.78**	38.84**	39.14**
	SD	0.30	0.50	0.92	0.52@@
Rate of increases(%)					
	X	64.3	79.9**	55.4*	59.3
	SD	12.0	13.4##	7.5	9.1@@
$\dot{V}O_2$	X	12.9	12.4	45.3**	37.4**
	SD	5.0	4.3##	5.8	7.0#@@
Tcol	X	2.0	2.1	7.8**	5.3**
	SD	0.8	1.3##	1.5	2.6@@

** P<0.01, *<0.05 : vs. W, ## P<0.01, # P<0.05 : vs. C

@@P<0.01, @P<0.05 : vs. WT

FFA(mEq/l), $\dot{V}O_2$ (ml/kg/min), Tcol(°C)

性の亢進すなわち寒冷時の熱産生増加は認められるが、その機序は、寒冷馴化ラットのような脂質代謝の増大によるものとは違い、その他の代謝亢進によるものと推察した。また、その機序は、運動トレーニングラットの肝臓における Gluconeogenesis の促進が原因であるとともに骨格筋での Shivering による熱産生が考えられる (9)。しかし、その後、急性寒冷暴露時の四肢筋における Shivering 発現は、温暖馴化ラットのそれに比較して遅延することもわかった (10, Fig. 4)。また、寒冷暴露時 Curare 投与により筋 Shivering を抑制した

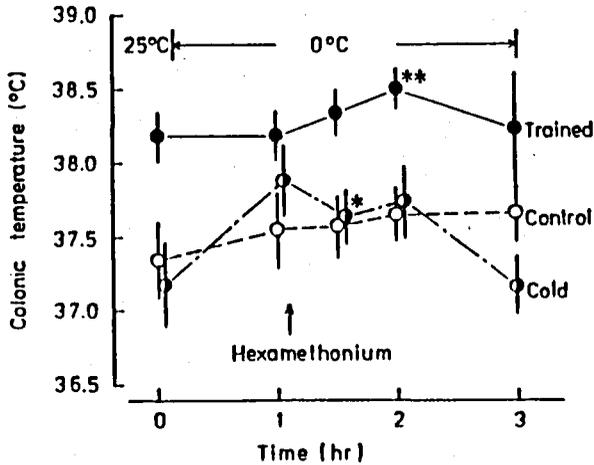


Fig.3 The changes of colonic temperatures caused by hexamethonium (28 mg/kg body weight. i.p.) administration during cold exposure. Data are presented as means \pm SD. Asterisks indicates statistically significant differences between before and after hexamethonium administration.

Table 3 The responses of consumption ($\dot{V}O_2$) to 0°C exposure after Hexamethonium (He) injection.

$\dot{V}O_2$ (ml/kg/min)	W	WT	C	CT
25°C	\bar{X} 22.00	24.5	29.26	33.15
	SD 2.03	2.70	4.00	3.21
0°C	\bar{X} 48.00	53.40	55.37	57.35
	SD 3.30	3.24	4.00	5.43
0°C, 30min after He	\bar{X} 51.33	67.72**	51.61*	50.83
	SD 8.22	1.20	2.44	7.70
0°C, 60min after He	\bar{X} 53.68	71.30**	53.34	51.60
	SD 8.45	1.28	3.05	6.32

Significant differences between $\dot{V}O_2$ to 0°C exposure and $\dot{V}O_2$ to 0°C exposure after He injection: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$

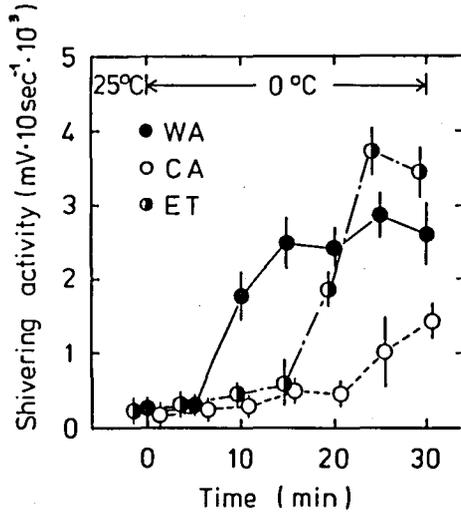


Fig.4 寒冷暴露時の Shivering 量 (未発表)

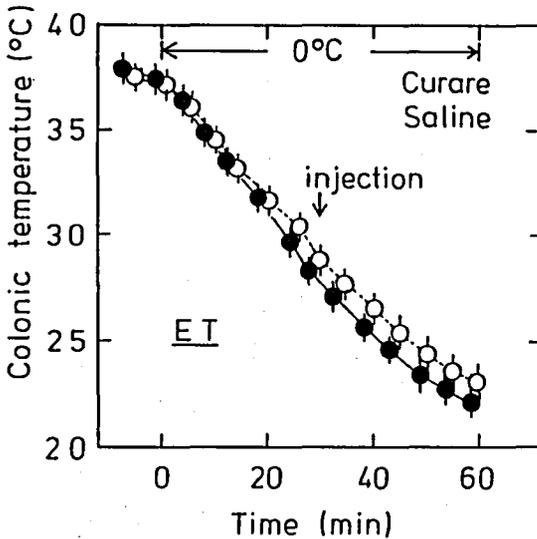


Fig.5 Carare 投与による寒冷暴露時の結腸温変化 (未発表)

○ : Curare, ● : Saline

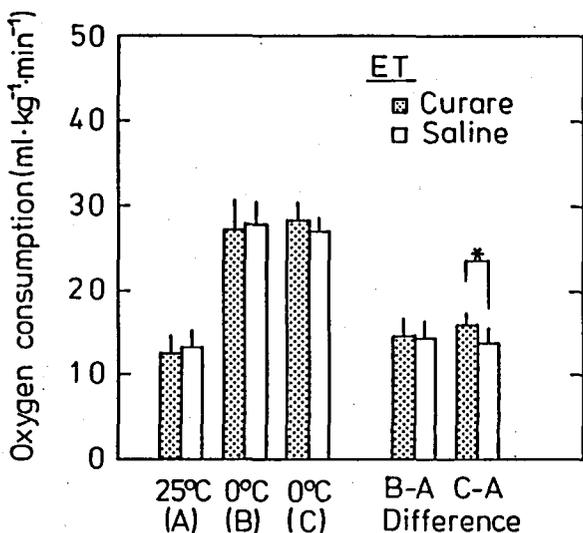


Fig.6 Curare 投与による寒冷暴露時の熱産生量 (未発表)

場合、寒冷馴化ラットは直腸温の低下が抑えられるのに対し、運動トレーニングラットでは、わずかに低下が抑えられるが、その変化は統計的に有意でなかった (10, Fig. 5)。さらに、同じ条件で代謝量を見ると、Curare 投与により温暖対照ラットのそれは、明らかに抑制されるが、寒冷馴化及び運動トレーニング群では、抑制されない (10, Fig. 6)。さらに、Curare 投与時の血中グリコース及びFFAをみると、グルコースは、寒冷馴化ラットで変化がないのに対し、温暖馴化及び運動トレーニングラットで上昇し、FFAは寒冷及び温暖馴化ラットで上昇傾向にあるが、運動トレーニングラットでは変化がないか、低下傾向にあった (10)。一連の筋 Shivering 抑制実験から言えることは、確かに運動トレーニングラットにおける耐寒性の増強には、筋 Shivering だけにこの熱産生の増大が依存しているのではなさそうであり、グルコースを基質とする

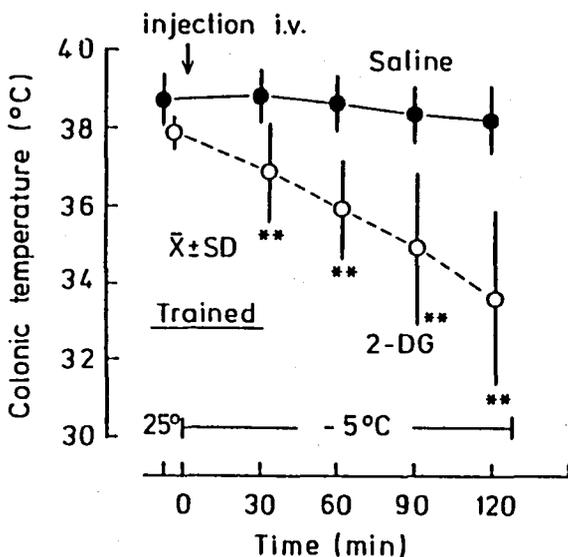


Fig.7 Changes in colonic temperature induced by 2-deoxyglucose (2-DG) injection during cold exposure in unanesthetized rats. ** $p < 0.01$: Significantly different from saline injection levels. Number of rats in each group was 20.

nonsnivering 熱産生の増大もあると推察できる結果であろう。そのため、運動トレーニングラットにおける耐寒性の増強の機序は、糖質利用に依存しており、肝臓における熱産生の増大が関与する可能性が高い。また、寒冷暴露時に 2-Deoxyglucose の糖質利用抑制剤を投与すると、直腸温および代謝量の低下が大きく、耐寒性の増強に対して糖質エネルギーの重要性が示唆される (9, 15, Fig. 7)。また、運動トレーニングラットと寒冷馴化ラットにおける寒冷暴露時の血中物質の変化を比較した。運動トレーニングラットは、寒冷暴露時に糖質利用の方向にあり、これは、寒冷馴化ラットの寒冷暴露初期の反応と類似している (9, 15)。

トレッドミル運動によるトレーニング量と耐寒性(熱産生量)は、4週間、すなわち45m以上で亢進が認められた (8, Fig. 8)。また、運動トレーニングを

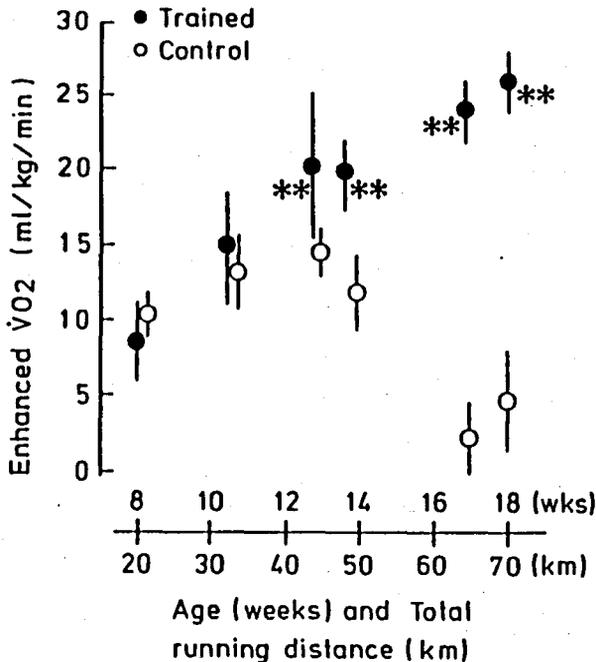


Fig.8 The effects of total running distances on $\dot{V}O_2$ increase caused by acute cold exposure. Control rats lived without exercise training. Data are presented as means \pm SD. Asterisks indicate statistically significant differences between the trained rats and the controls.

一定にした場合、運動強度の増大に伴い代謝量の増加を示した (8, Fig. 9)。また、運動トレーニング量の増大にともない、NA投与による代謝量の亢進には変化がみられなかった (8, Fig. 10)。運動強度の増強に伴うNA投与時の代謝亢進もみられなかった (8, Fig. 11)。

また、ヒトにおける研究では、5年以上スポーツをした運動鍛練者と非運動鍛練者を比較すると、寒冷時のグルコース利用が運動鍛練者で大きく (11, Fig. 12)、さらに代謝量の増加と血中Cortisolの増加と正の相関関係がみられた (11, Fig. 13)。また、寒冷暴露時の平均皮膚温は、運動鍛練者で有意に高かつ

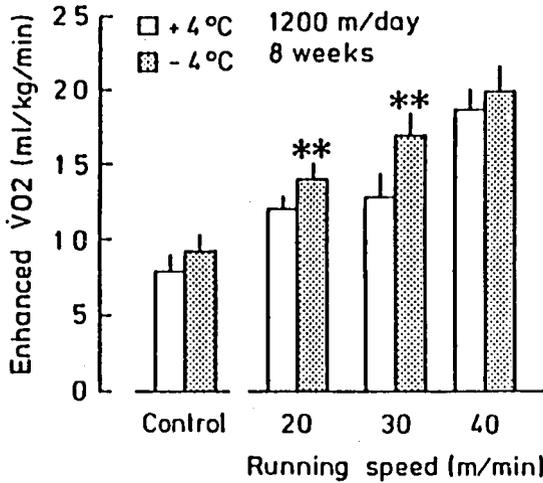


Fig.9 The effects of training intensities on $\dot{V}O_2$ responses caused by acute cold exposures. Data are presented as means \pm SD. Asterisks indicates statistically significant differences between +4°C and -4°C exposures.

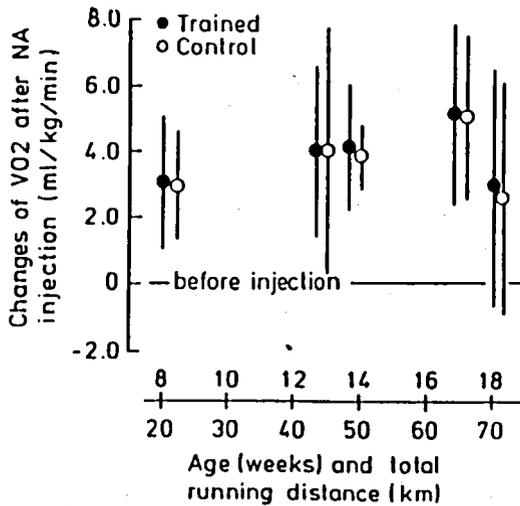


Fig.10 The noradrenaline ($400 \mu\text{g}/\text{kg}$ body weight i.v.) induced increase in $\dot{V}O_2$ vs total running distances. Control rate lived without exercise training. Data are presented as means \pm SD.

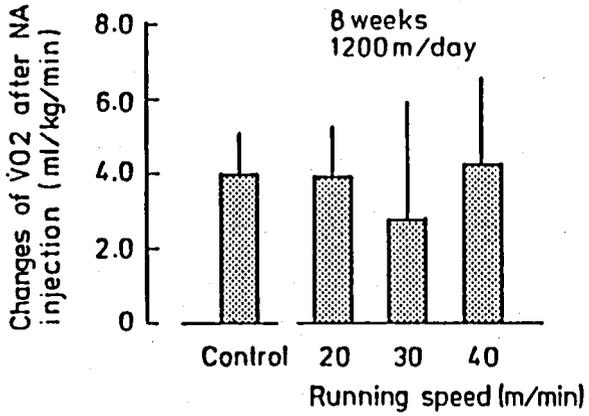


Fig.11 The effects of training intensities on noradrenaline (400 $\mu\text{g}/\text{kg}$ body weight i.v.) induced increase in $\dot{V}\text{O}_2$. Data are presented as means \pm SD.

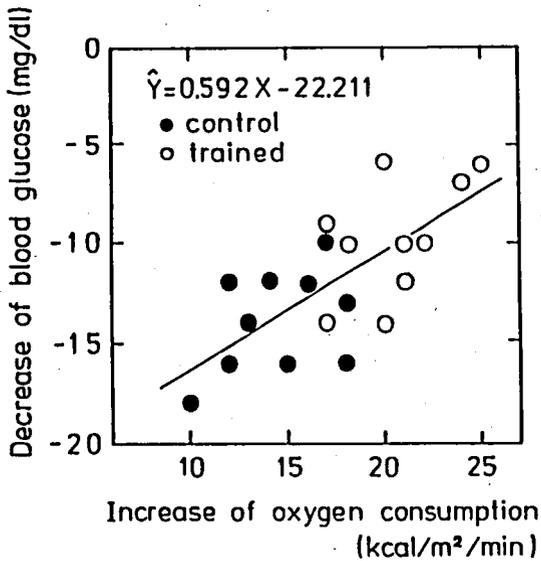


Fig.12 寒冷暴露による酸素摂取量の増加と血中 glucose 減少量の相関関係

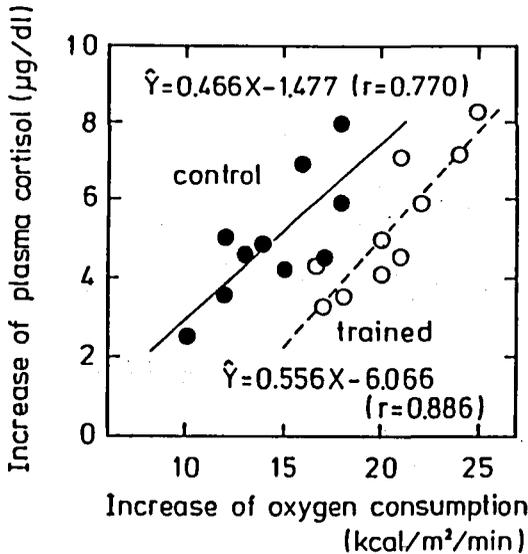


Fig.13 寒冷暴露による酸素摂取量の増加と血漿 cortisol の増加の相関関係

た。また、持久的運動鍛練をしている成人男性の寒冷血管反応は、温暖馴化した九州出身者と寒冷馴化した北海道出身者を比較すると、両者間に差がない(12, Fig. 14)。つまり、運動鍛練による寒冷血管反応の亢進は、温暖馴化した九州出身者の運動鍛練者の方が大きいことがわかる。故に、持久的運動鍛練は末梢血管系の耐寒性を増強させる。さらに、陸上競技鍛練者においては、長距離と短距離トレーニング者の寒冷血管反応を比較すると、両者の間に差がない(13, Fig. 15)。これは、寒冷血管反応が運動の形態に影響されないことを示すものである。

ラットの場合、褐色脂肪量が肩甲骨間 I BATをはじめ、広く分布しているが、寒冷馴化ラットの場合、I BATは肥大しさらに除脂肪乾燥部分つまりミ

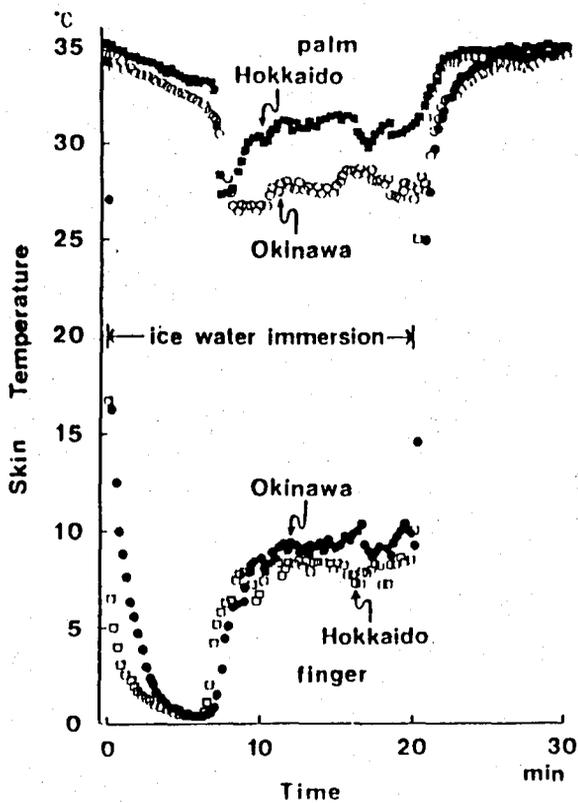


Fig.14 Changes of finger and palm skin temperatures for Hokkaido and Okinawa subjects.

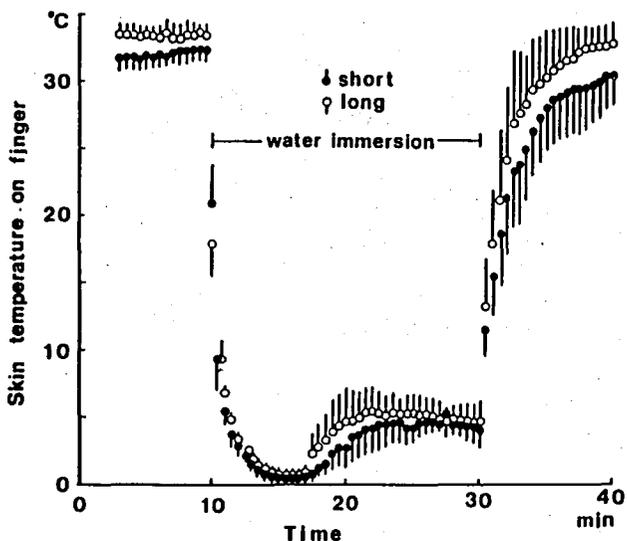


Fig.15 Middle finger skin temperatures of the short and long distance runners for cold water immersion.

Table 4 Total weight(mg/100g/body weight)and chemical composition (%) of interscapular brown adipose tissue.

Group	Total	FFDM	Lipid	Water
Control \bar{X}	165.1	13.4	33.0	53.6
SD	42.2	3.1	10.7	14.4
Cold \bar{X}	301.4**	16.6**	23.3*	60.1**
SD	35.5	2.4	5.7	8.1
Trained \bar{X}	125.7*	14.5	25.5**	60.0
SD	33.2	3.5	8.8	17.6
C-T	##			

FFDM : Fat-free dry matter

Warm group vs each group, ** $P < 0.01$, * $P < 0.05$

C-T : Statistical difference between cold and trained group, ## $P < 0.01$

トコンドリアを含む代謝促進部が増大するため、熱産生量は大きくなることが明らかになっている。しかし、運動トレーニングラットの場合、このIBATの肥大はまったくみられず、熱産生量の増大がBATに依存する増大でないことがわかる(8, Table 4)。また、このIBATは、運動トレーニングの量や強度によっても変化がないことも確認されている。

(3) おわりに

以上、運動トレーニングによる耐寒性の増強つまり寒冷暴露時の熱産生促進の機序についてまとめた。運動トレーニング、特に持久的トレーニングをすることで非ふるえ熱産生の亢進及びShivering熱産生は亢進する可能性がある。非ふるえ熱産生の亢進の中で、特に注目されるものは、糖基質を利用した非ふるえ熱産生に参与する Glucocorticoid, Thyroxine の変動であり、詳細に検討することが、今後の方向性となろう。

文 献

- 1) Strömme, J. B., and H. T. Hammel: Effects of physiological of physiological training on tolerance to cold in rats. *J. Appl. Physiol.*, 23, 815-824, 1967.
- 2) Chin, A. K.: Plasma catecholamine response to exercise and cold adaptation. *J. Appl. Physiol.*, 34, 409-412, 1967.
- 3) 樫村修生: ラットの持久的トレーニングが耐寒性に与える影響, 長野体育学研究, 3, 31-38, 1988.
- 4) 森谷潔, 井川和夫, 広重力: ラットの非ふるえ産熱と血漿遊離脂肪酸利用に対する運動鍛練効果, 日生氣誌, 17, 59-64, 1980.
- 5) 樫村修生: 寒冷馴化ラットの非ふるえ熱産生亢進に与える運動トレーニングの影響, 環境科学年報, 11, 79-84, 1989.
- 6) Moriya, K., Maekubo, H. and Hiroshige, T.: Effects of norepinephrine

on uptake and oxidation of plasma free fatty acids in cold-acclimated rats. Jpn. J. Physiol. 27,601-616, 1977.

- 7) Jansky, L.: Noshivering thermogenesis and its thermoregulatory significance., Biol. Rev., 48,85-132, 1973.
- 8) 榎村修生: 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, 1988.
- 9) 榎村修生, 上田五雨: 運動トレーニングラットにおける急性寒冷暴露時の体温変化, 日生氣誌, 26,125-133, 1989.
- 10) Kashimura, O.: Thermogenesis induced by inhibition of shivering to cold exposure in exercise trained rats, Jpn. J. Physiol., (投稿中)
- 11) 榎村修生: 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, 信州豊南女子短期大学紀要, 7,135-146, 1990.
- 12) 榎村修生: 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, 1985.
- 13) 榎村修生: トレーニング方法の違いが局所耐寒性に与える影響, 長野体育学研究, 2,13-20, 1986.
- 14) 榎村修生, 上田五雨: ラットにおけるトレーニング強度の差異が寒冷時の産熱に与える影響, 日本生気象学会第26回, 1987.
- 15) 榎村修生, 上田五雨: 運動トレーニングラットにおける寒冷暴露時の交感神経系活動, 日本生理学会第66回, 1989.