ヒトにおける不可避的非ふるえ熱産生，体温調節性
非ふるえ熱産性，ふるえ熱産性の推定

横山真太郎・荻野 弘之

北海道大学・工学部・衛生工学科・産業環境工学

Prediction of Obligatory and Regulatory Non-shivering
Thermogenesis and Shivering Thermogenesis in Man

Shintaro YOKOYAMA and Hiroyuki OGINO

*Industrial Health Research, Department of Sanitary Engineering Faculty
of Engineering, Hokkaido University, Kita-ku, Sapporo, 060 Japan*

Physiological thermogenesis in internal organs as well as main muscle groups is one of the most important subjects in the study of human adaptability to cold environment. The experiments of the prediction of obligatory non-shivering thermogenesis were performed under optimal thermal condition in summer and in winter by using a prediction method of local muscle energy metabolic rate and quasi-basal metabolic rate B_1 (Yokayama, 1980). B_1 means the sum of metabolic rates other than those of main muscle groups. The subjects were eleven Japanese males in summer and ten Japanese males in winter. Subject YS was longitudinally examined to confirm seasonal change of obligatory non-shivering thermogenesis. Subject YS was performed to examine regulatory non-shivering thermogenesis and shivering thermogenesis by using nine resting and static exercising items of back cold and front cold under three cold environments ($T = -10^\circ\text{C}$, -5°C and 0°C). In the summer experiments B_{1s} were 32.43 (mean) ± 12.59 (S.D.) kcal/h and $B_1/A = 19.81 \pm 9.26$ kcal/ m^2 h. On the other hand, the results of the winter experiments were 67.32 ± 7.83 kcal/h and $B_1/A = 38.90 \pm 5.27$ kcal/ m^2 h. This tendency of the seasonal variation that the quasi-basal metabolic rate B_1 in winter was greater than in summer was coincident with the results in winter and in summer obtained from the same subject YS. In subject YS the predicted B_{1s} were 29.87 in summer, 57.84 in December and 55.55 and 57.92 kcal/h in March. In order to evaluate regulatory non-shivering thermogenesis, the predictions of B_1 were performed from items of back cold and front cold under cold environments. B_1 under $T = -5^\circ\text{C}$ and $T = 0^\circ\text{C}$ were 78.19 and 83.13 kcal/h respectively. Therefore the value of regulatory non-shivering thermogenesis was about 22 kcal/h under the present experimental conditions. The shivering thermogenesis was predicted for six to nine muscle groups in nine resting and exercising items of back cold and front cold under three cold environments.

緒 言

寒冷適応能の研究で重要事項である冬季の基礎代謝量の増加, 寒冷環境下における総エネルギー代謝量の増加を, 不可避的非ふるえ熱産生(obligatory or basal non-shivering thermogenesis; NST), 体温調節性非ふるえ熱産生(regulatory non-shivering thermogenesis) およびふるえ熱産生(shivering thermogenesis) とに, 明確に分けて定量することを試みた。今回, これまで至適温熱環境下で, 局所筋エネルギー代謝量(local muscle energy metabolic rate)の推定が可能と考えられる労作項目の組合せを寒冷環境へ導入し, ふるえ熱産生の部位別変動を定量するとともに, 体温調節性の非ふるえ熱産生の定量を試みた。一方, 季節を変えて実験することにより, 不可避的非ふるえ熱産生の動向を解明しようと試みた。

方 法

前下腿筋群 M_1 の前脛骨筋, 後下腿筋群 M_2 のヒラメ筋・腓腹筋, 前大腿筋群 M_3 の内側広筋・大腿直筋, 後大腿筋群 M_4 の大腿二頭筋, 臀筋群 M_5 の大臀筋, 脊柱起立筋群 M_6 の脊柱起立筋, 前腹筋群 M_7 の腹直筋の他に, 大胸筋(M_8), 上腕三頭筋(M_9)および僧帽筋, 胸鎖乳突筋, 咬筋, 三角筋, 上腕二頭筋, 腕橈骨筋の計17筋から双極表面誘導筋電図を導出した(表1参照)。同時に, ダグラスバック法により, 総エネルギー代謝量を測定した。換気量は湿式ガスメータにより, 呼気ガス分析はショランダー微量呼気ガス分析装置により行った。

不可避的非ふるえ熱産生の季節変動の実験には夏季11名, 冬季10名の被験者について調べた。その他に, 推論を確固たるものにするために, 被験者YSを縦断的に調べた。また, ふるえ熱産生および体温調節性非ふるえ熱産生の定量には, 同じ被験者YSを用いて, 実験した。表2に, 被験者の身体特性値を掲げた。

不可避的非ふるえ熱産生の実験は(a)至適温熱環境条件下で行った。ふるえ熱産生および体温調節性非ふるえ熱産生の実験には(b)寒冷背面刺激と(c)寒冷前面刺激の2条件を設定した。〔1〕足関節屈曲, 〔2〕爪先立ち, 〔3〕中腰姿勢(膝関節120°), 〔4〕最前屈姿勢, 〔5〕緊張立位姿勢, 〔6〕中腰姿勢(膝関節伸展), 〔7〕体幹屈曲, 〔8〕弛緩立位姿勢, 〔9〕倚坐位姿勢を3分間保持

Table 1. The selected muscles for the prediction of local energy metabolic rate

Muscle group	Muscle
M_1 ; Ant. Crural M.	M. tibialis anterior
M_2 ; Post. Crural M.	M. soleus*
	M. gastrocnemius
M_3 ; Ant. Femoral M.	M. vastus femoris*
	M. rectus femoris
M_4 ; Post. Femoral M.	M. biceps femoris
M_5 ; M. of the Buttock	M. gluteus maximus
M_6 ; Erector Spinae M.	M. erector spinae
M_7 ; M. of the Ant. Abdominal Wall	M. rectus abdominis
M_8 ; M. of the Pectoral Region	M. pectoralis major
M_9 ; M. Exten. of Upper Arm	M. triceps brachii
Others	M. trapezius
	M. sternocleidomastoideus
	M. masseter
	M. deltoideus
	M. biceps brachii
	M. brachioradialis

Symbol (*) shows the indicator muscle of each muscle group.

Table 2. Physical Characteristics

Group	Age (yr.)	Height (cm)	Weight (kg)	Skin Surface Area (m ²)
Summer (n=11)				
Mean	23.	168.0	60.0	1.633
S.D.	3.0	7.9	6.8	0.115
Winter (n=10)				
Mean	22.	172.9	66.4	1.736
S.D.	2.0	3.7	5.6	0.084
Sub. YS	32.	171.0	69.0	1.760

し, 至適条件下で倚坐位の回復4分計7分間にわたって行った。労作項目は, 被験者によっては, 体幹伸展, 臀部伸展, 膝関節伸展, 膝関節屈曲, 足関節伸展, 仰臥位姿勢, 等を追加した。寒冷刺激としては-10℃, -5℃, 0℃の冷氣ドラフトを用いた。高さ180cm, 幅90cmの出口より冷気を吹き出すが, 内外圧力差が小さいことと冷気の比重量が大きいことにより, 下軀幹部,

大腿部, 下腿部, 足部に負荷される結果となった。

労作項目 i における時間 t [h] 中の総エネルギー代謝量 Q_i [kcal], j 筋群の筋電位を m_{ij} [mV] とすれば, 次式が式立する。

$$Q_i = \sum_{j=1}^n \left[a_j \int_0^t |m_{ij}| dt \right] + B_i \cdot t \quad (1)$$

ここに a_j は [kcal/mV] というエネルギー換算係数, B_i は [kcal/h] で着目する n 種の筋群以外の代謝量すなわちほぼ基礎代謝量と考えられる。 B_i を準基礎代謝量 (quasi-basal metabolic rate) と呼ぶことにする。

また, 式(1)は j 筋群の最大筋力発揮時の筋電位を

$m_{j\max}$ [mV] とし, m_{ij} の $m_{j\max}$ の比を p_{ij} とすれば, 前報 (Yokoyama *et al.*, 1982; Yokoyama, 1983) に従い, 式(1)のようになる。

$$Q_i = \sum_{j=1}^n \left[M_{j\max} \int |p_{ij}| dt \right] B_i \cdot t \quad (1')$$

式(1)あるいは式(1')から成る連立方程式を導びき, 未知係数の a_j あるいは $M_{j\max}$ および B_i を決定する。

結 果

被験者 YS における総エネルギー代謝量の測定結果を表 3 に掲げた。表 3 中の数値は労作 3 分および回復

Table 3. Total energy metabolic rate (kcal/h) in subject YS.

OPTIMAL	12/20/81	03/06/82	03/13/82	08/18/79
(1) ANKLE FLEXION	117.61	94.63	91.98	(76.60)
(2) STANDING ON TIPTOES	117.76	111.21	93.79	99.11
(3) HALF RISING AT 120°	181.32	123.13	135.59	128.72
(4) DEEP FORWARD BENDING	126.18	135.14	93.73	72.08
(5) STIFF STANDING	276.26	196.58	147.85	(93.27)
(6) HALF RISING AT 180°	137.48	151.38	101.45	83.35
(7) TRUNK FLEXION	(359.04)	183.99	165.45	(203.69)
(8) RELAXED STANDING	109.29	113.35	87.08	78.51
(9) SITTING ON A CHAIR	104.92	96.92	83.80	52.18
BACK COLD	T = -10°C	T = -5°C	T = 0°C	
(1) ANKLE FLEXION	136.55	281.33	158.02	
(2) STANDING ON TIPTOES	157.83	278.34	146.66	
(3) HALF RISING AT 120°	427.61	307.63	151.74	
(4) DEEP FORWARD BENDING	323.27	303.92	177.33	
(5) STIFF STANDING	275.86	275.41	206.29	
(6) HALF RISING AT 180°	204.56	265.64	139.31	
(7) TRUNK FLEXION	-----	388.66	196.45	
(8) RELAXED STANDING	208.10	314.44	144.18	
(9) SITTING ON A CHAIR	180.51	301.18	123.59	
FRONT COLD	T = -10°C	T = -5°C	T = 0°C	
(1) ANKLE FLEXION	307.74	304.93	119.31	
(2) STANDING ON TIPTOES	333.82	305.82	197.65	
(3) HALF RISING AT 120°	538.26	304.97	219.21	
(4) DEEP FORWARD BENDING	368.39	233.42	164.83	
(5) STIFF STANDING	430.15	327.01	226.28	
(6) HALF RISING AT 180°	259.44	224.08	170.05	
(7) TRUNK FLEXION	-----	240.55	232.69	
(8) RELAXED STANDING	195.11	244.66	174.39	
(9) SITTING ON A CHAIR	301.01	384.84	212.12	

過程 4 分計 7 分間の測定値と回復過程と同様な至適環境下の安静倚坐位姿勢の測定値とから, 単位労作時間当りの平均エネルギー代謝量として示してある. 表 3 によれば, 総エネルギー代謝量は, 同一項目に対して, 寒冷時には至適時に比較して, 大きいことが示された. また, 寒冷時の背面刺激よりも, 前面刺激において大きいことが示された. 総エネルギー代謝量の季節変動について言えば, 総じて夏季よりも冬季に大きいという結果を得た.

表 4 に冷氣ドラフト温 -10°C の実験を行った 12 月 20 日の同一電極条件の双極表面誘導筋電図の積分値の結果を示す. 積分時間は労作 180 秒, 回復過程 240 秒計 420 秒である. M_1 前下腿筋群から M_7 前腹筋群から M_7 前腹筋群までの各数値の単位は $[\text{mV} \cdot \text{sec}]$ である. M_8 大胸筋と M_9 上腕三頭筋の使用したチャンネルの校正電位発生器が不調であったことから, M_8 と M_9 の数値は $[\text{mV} \cdot \text{sec}]$ と考えるよりは相対積分値と理解した方がよいという結果であった. 表 5 は, 冷氣ドラフト温 -5°C の実験が行なわれた 3 月 6 日の同一電極条件の各種労作項目毎の筋電図積分値を示している. 表 6 には冷氣温 0°C の実験結果を示した. 表 5, 表 6 は最大筋力発揮時の各筋の双極表面誘導筋電図 $m_{j\max}$ の測定が可能だったので, 積分値の単位を $[\% \text{MVC} \cdot \text{h}]$ として求めた. 積分時間は表 4 と同じく 7 分間であった.

筋電図の結果は, 至適時に関して〔1〕足関節屈曲に対しては前下腿筋群 M_1 , 〔2〕爪先立ちに対しては後下腿筋群 M_2 あるいは〔7〕体幹屈曲においては前腹筋群 M_7 がというように, これまで明らかにされてきた各労作項目に対する主働筋の活動 (Yokoyama, 1980; Yokoyama, 1982; Yokoyama *et al.*, 1982) を確認するものとなった. 寒冷時の項目では主働筋群の活動以外に, 脊柱起立筋群 M_6 , 前大腿筋群 M_3 , 項目によっては後大腿筋群 M_4 , 腎筋群 M_5 , 前腹筋群 M_7 の活動増加が観察された. また, 至適時にはほとんど変化がみられなかった表 1 における大胸筋以下のうち M_8 大胸筋と M_9 上腕三頭筋に今回の実験条件下ではふるえ (shivering) が起っていることが確認された. すなわち, 表 3 の全項目を通じて活動変化の大きいのは $M_1 \sim M_9$ の 9 筋群であった.

各個人毎に, 式(1)あるいは式(1)'から成る連立方程式を導びき, n 個の a_j $[\text{kcal}/\text{mV}]$ あるいは $M_{j\max}$ $[\text{kcal}/$

$\text{h}]$ という熱量換算係体および準基礎代謝量 B_1 を決定する.

準基礎代謝量の季節変動の結果は夏季グループの平均が $32.43 \text{ kcal}/\text{h}$, 標準偏差 $12.59 \text{ kcal}/\text{h}$ であった. その体表面積比の平均は $19.81 \text{ kcal}/\text{m}^2\text{h}$, 標準偏差は $9.26 \text{ kcal}/\text{m}^2\text{h}$ であった. 冬季グループの平均は $67.32 \text{ kcal}/\text{h}$, 標準偏差は $7.83 \text{ kcal}/\text{h}$ であり, その体表面積比は $38.90 \pm 5.27 \text{ kcal}/\text{m}^2\text{h}$ であった. t 検定の結果, 冬季グループは夏季グループに比較し, 原値, 体表面積比値いずれの場合も, 有意に大きいということが示された (表 7 参照).

被験者 YS の準基礎代謝量 (B_1) の縦断的推定結果を表 8 に示す. 夏季 $29.87 \text{ kcal}/\text{h}$ であったものが, 冬季 12 月には $57.84 \text{ kcal}/\text{h}$ となり 3 月 6 日 $55.55 \text{ kcal}/\text{h}$, 3 月 13 日 $57.92 \text{ kcal}/\text{h}$ という結果であった. 従って, 表 7 の結果は被験者群の違いによるものではなく, 普遍的な季節による違いに基因すると考えられた.

ふるえ熱産生の定量のために, 式(1)あるいは式(1)'から成る連立方程式を構築し, a_j あるいは $M_{j\max}$ および B_1 を (b) 寒冷背面刺激, (c) 寒冷前面刺激の項目から決定しようと試みた. 冷氣ドラフト温 -10°C の 12 月 20 日の実験結果の (b) と (c) の項目からだけでは a_j と B_1 は決定されず, (a) 至適温熱環境の 9 項目を加え, 前大腿筋群 M_1 から上腕三頭筋 M_9 の a_j と B_1 を推定した結果が, 表 9 である. 表 9 によれば, B_1 は (a) 至適温熱環境の 9 項目から推定された表 8 の $B_1 = 57.84 \text{ kcal}/\text{h}$ より大きい $B_1 = 64.13 \text{ kcal}/\text{h}$ であった. 表 9 の a_j を用いて, 表 4 の双極表面誘導筋電図の積分値をエネルギー代謝量に換算することが可能となる.

冷氣ドラフト温が -5°C の 3 月 6 日の実験の (b) 寒冷背面刺激と (c) 寒冷前面刺激の計 18 項目を用いて, 前下腿筋群 M_1 から腎筋群 M_6 の $M_{j\max}$ ($j = 1, 2, \dots, 6$) と B_1 の推定に成功した. その結果を, 表 10 に掲げた. 表 9 と異なり, 用いた項目が寒冷条件のみのものであったことを反映して, B_1 は $78.19 \text{ kcal}/\text{h}$ と大きくなっている. 3 月 13 日の冷氣ドラフト温 0°C の実験では, 寒冷条件の (b) と (c) から, 前下腿筋群 M_1 から大胸筋 M_8 までの 8 筋群の $M_{j\max}$ と B_1 の推定が可能であった. その結果を表 11 に掲げた. B_1 は $83.13 \text{ kcal}/\text{h}$ と表 10 の結果と近い値を示した.

以上, 総エネルギー代謝量の変動を規定している要因のなかで, 不可避的非ふるえ熱産生は夏季に約 30

Table 4. Integrated electromyograms [mV·sec] under optimal, back cold ($T = -10^{\circ}\text{C}$) and front cold ($T = -10^{\circ}\text{C}$) conditions. Symbols ($M_1 - M_9$) are explained in Table 1.

Optimal		M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8	M_9
[1]	Ankle flexion	56.47	6.79	1.79	0.80	0.63	5.60	2.33	1.61	0.80
[2]	Standing on tiptoes	5.87	16.06	1.79	3.01	4.75	8.15	2.44	1.36	1.20
[3]	Half rising at 120°	2.69	8.60	30.23	3.41	1.01	5.72	2.55	1.19	0.78
[4]	Deep forward bending	2.58	8.82	2.24	17.61	5.06	6.08	2.44	1.27	0.75
[5]	Stiff standing	3.91	4.97	32.18	2.54	26.01	6.30	7.66	1.65	0.81
[6]	Half rising at 180°	2.58	7.31	1.56	10.00	1.13	18.45	2.44	1.33	0.78
[7]	Trunk flexion	9.91	1.57	9.93	1.86	1.75	5.42	32.43	1.27	0.78
[8]	Relaxed standing	2.63	5.56	1.88	0.73	7.70	6.84	2.44	1.18	0.75
[9]	Sitting on a chair	2.56	1.13	1.09	0.80	0.88	6.30	3.11	1.59	0.84
Back cold										
[1]	Ankle flexion	53.59	8.50	6.77	6.09	1.78	10.66	3.48	4.69	2.94
[2]	Standing on tiptoes	10.26	21.57	11.01	14.11	17.63	20.80	10.18	3.42	1.88
[3]	Half rising at 120°	2.99	4.41	28.24	5.69	10.13	18.29	18.99	2.21	1.98
[4]	Deep forward bending	3.39	10.61	3.58	18.27	3.43	7.28	2.05	2.51	1.61
[5]	Stiff standing	5.15	7.73	45.19	6.97	29.74	10.17	6.31	3.51	1.28
[6]	Half rising at 180°	7.54	6.47	3.27	10.22	2.01	22.72	1.73	1.32	1.88
[7]	Trunk flexion	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
[8]	Relaxed standing	4.63	6.37	4.94	6.79	6.14	17.60	2.06	0.27	0.27
[9]	Sitting on a chair	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Front cold										
[1]	Ankle flexion	53.90	10.36	25.84	2.96	2.00	9.13	2.23	3.35	1.73
[2]	Standing on tiptoes	6.91	13.05	11.40	11.52	22.83	19.99	6.03	3.73	2.32
[3]	Half rising at 120°	6.14	6.47	34.23	5.39	15.34	17.70	19.09	3.36	2.04
[4]	Deep forward bending	4.99	11.68	3.74	21.67	14.01	11.14	14.84	2.19	2.02
[5]	Stiff standing	4.82	9.16	36.13	4.56	27.67	18.70	8.96	3.09	0.84
[6]	Half rising at 180°	4.89	7.78	2.93	10.98	2.53	27.75	2.95	1.97	2.04
[7]	Trunk flexion	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
[8]	Relaxed standing	4.82	5.05	5.48	5.66	15.15	19.64	2.36	2.26	3.28
[9]	Sitting on a chair	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Table 5. Integrated electromyograms [%MVC·h] under optimal, back cold ($T = -5^{\circ}\text{C}$) and front cold ($T = -5^{\circ}\text{C}$) conditions. Symbols (M_1 - M_9) are explained in Table 1.

Optimal		M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8	M_9
[1]	Ankle flexion	1.133	0.514	0.271	0.190	0.118	0.210	0.601	0.671	0.272
[2]	Standing on tiptoes	0.220	1.180	0.247	0.190	0.198	0.436	0.601	0.563	0.272
[3]	Half rising at 120°	0.135	1.076	2.085	0.558	0.346	0.331	0.601	0.625	0.366
[4]	Deep forward bending	0.198	0.535	0.294	1.742	0.278	0.210	0.821	0.532	0.149
[5]	Stiff standing	0.209	0.597	2.420	0.476	1.215	0.346	1.226	0.701	0.244
[6]	Half rising at 180°	0.198	0.680	0.318	1.701	0.141	1.654	0.674	0.532	0.149
[7]	Trunk flexion	0.209	0.389	0.700	0.313	0.186	0.271	1.887	0.686	0.285
[8]	Relaxed standing 0.198	0.660	0.247	0.190	0.221	0.481	0.564	0.517	0.149	
[9]	Sitting on a chair	0.124	0.243	0.223	0.190	0.106	0.210	0.601	0.609	0.190
Back cold										
[1]	Ankle flexion	1.511	0.787	0.748	1.353	0.082	0.406	1.230	1.147	0.538
[2]	Standing on tiptoes	0.444	1.325	1.382	1.484	0.342	0.989	1.838	1.216	0.602
[3]	Half rising at 120°	0.375	0.892	2.996	0.782	0.378	0.785	1.715	0.751	0.464
[4]	Deep forward bending 0.362	0.468	0.485	2.149	0.149	0.342	0.930	0.942	0.676	
[5]	Stiff standing	0.354	0.955	0.742	1.081	0.609	0.854	1.084	0.895	0.492
[6]	Half rising at 180°	0.896	0.561	0.575	1.638	0.371	1.616	1.222	0.711	0.416
[7]	Trunk flexion	0.343	0.478	1.115	0.371	0.085	0.266	2.493	0.710	0.228
[8]	Relaxed standing	0.335	0.888	1.318	1.533	0.486	1.061	0.990	1.197	0.363
[9]	Sitting on a chair	0.848	1.171	1.226	1.610	0.307	0.546	1.437	1.257	0.823
Front cold										
[1]	Ankle flexion	1.276	0.639	0.564	0.796	0.078	0.357	0.806	1.029	0.547
[2]	Standing on tiptoes	0.688	1.519	2.276	1.961	0.573	1.719	2.383	1.544	1.026
[3]	Half rising at 120°	0.558	0.896	3.675	1.775	0.535	1.183	1.247	1.230	1.139
[4]	Deep forward bending	0.338	0.686	0.983	2.521	0.233	0.354	1.135	0.881	0.397
[5]	Stiff standing	0.391	0.924	3.328	1.404	0.985	1.045	2.022	1.175	0.577
[6]	Half rising at 180°	0.337	1.063	0.647	1.914	0.360	1.376	0.893	0.760	0.507
[7]	Trunk flexion	0.362	0.527	1.291	0.357	0.145	0.453	3.592	0.841	0.247
[8]	Relaxed standing	0.294	0.770	1.139	1.211	0.460	1.085	1.926	1.165	0.474
[9]	Sitting on a chair	0.963	0.654	2.341	1.558	0.238	0.681	2.140	1.630	1.460

Table 6. Integrated electromyograms [%MVC · h] under optimal, back cold ($T=0^{\circ}\text{C}$) and front cold ($T=0^{\circ}\text{C}$) conditions. Symbols (M_1 - M_9) are explained in Table 1.

Optimal		M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8	M_9
[1]	Ankle flexion	1.265	0.769	0.177	0.279	0.386	0.256	0.127	0.658	0.130
[2]	Staning on tiptoes	0.163	1.256	0.177	0.487	0.459	0.402	0.127	0.658	0.130
[3]	Half rising at 120°	0.114	1.212	1.271	0.666	0.386	0.402	0.127	0.658	0.130
[4]	Deep forward bending	0.114	0.946	0.208	1.173	0.277	0.219	0.154	0.602	0.130
[5]	Stiff standing	0.131	1.123	2.271	0.517	2.211	0.366	0.181	0.715	0.169
[6]	Half rising at 180°	0.114	1.035	0.177	1.382	0.422	1.097	0.127	0.658	0.130
[7]	Trunk flexion	0.131	0.813	0.521	0.309	0.495	0.256	1.212	0.743	0.169
[8]	Relaxed standing	0.131	0.990	0.177	0.279	0.459	0.366	0.127	0.658	0.130
[9]	Sitting on a chair	0.114	0.414	0.146	0.279	0.422	0.256	0.127	0.658	0.182
Back cold										
[1]	Ankle flexion	0.990	0.402	0.150	0.159	0.142	0.237	0.106	0.763	0.198
[2]	Standing on tiptoes	0.097	1.068	0.185	0.690	0.396	0.588	0.061	0.659	0.088
[3]	Half rising at 120°	0.036	0.858	1.713	0.835	0.494	0.353	0.058	0.516	0.071
[4]	Deep forward bending	0.044	0.412	0.143	1.643	0.250	0.234	0.118	0.773	0.145
[5]	Stiff standing	0.030	0.691	1.423	0.545	1.314	0.903	0.136	0.830	0.081
[6]	Half rising at 180°	0.030	0.480	0.077	1.324	0.085	1.248	0.052	0.557	0.184
[7]	Trunk flexion	0.070	0.340	0.396	0.074	0.256	0.232	1.573	1.118	0.059
[8]	Relaxed standing	0.021	0.426	0.285	0.568	0.654	0.848	0.080	0.821	0.028
[9]	Sitting on a chair	0.110	0.318	0.258	0.171	0.281	0.226	0.092	0.868	0.144
Front cold										
[1]	Ankle flexion	0.931	0.643	0.417	0.093	0.219	0.131	0.054	0.347	0.046
[2]	Standing on tiptoes	0.156	2.330	0.915	1.338	0.814	0.829	0.147	0.750	0.097
[3]	Half rising at 120°	0.059	0.974	2.098	1.059	1.044	0.687	0.100	0.609	0.045
[4]	Deep forward bending 0.106	0.873	0.335	2.188	0.235	0.261	0.086	0.511	0.325	
[5]	Stiff standing 0.044	0.961	1.567	1.107	1.654	0.863	0.229	0.726	0.104	
[6]	Half rising at 180°	0.058	0.894	0.176	1.520	0.154	1.121	0.057	0.448	0.099
[7]	Trunk flexion	0.028	0.512	0.477	0.056	0.100	0.178	1.055	0.568	0.094
[8]	Relaxed standing	0.026	0.671	0.361	0.826	0.670	0.724	0.100	0.566	0.056
[9]	Sitting on a chair	0.026	0.076	0.423	0.516	0.144	0.403	0.257	1.263	0.382

kcal/h であったものが, 冬季約58kcal/h に上昇することが明らかとなった. 体温調節性非ふるえ熱産性は約58kcal/h から約80kcal/h への22kcal/h の増加をもたらすことが, 限られた実験条件下ではあるが, 明らかにされた. また, ふるえ熱産生について言えば, 同一労作項目の同一寒冷刺激において背面刺激よりも, 前面刺激の方が大きいことが分った. 今回の冷氣ドラフトを負荷する実験条件のもとでは, 脊柱起立筋群, 前大腿筋群 M_3 にふるえ収縮が起こりやすいことが示された.

考 察

ヒトについての非ふるえ熱産生についての研究は基礎代謝量の測定を通して行われていた. 特に日本人については, 基礎代謝量が冬季に高く, 夏季に低いという報告がなされている(吉村, 1977; 等). 一方, 寒冷適応における非ふるえ熱産生の機序については, ラット等の小型哺乳動物を用いた研究が多くなされている(Janský, 1964; Janský, 1973; 黒島, 1981; 広重, 1981; 等). それらの研究を通じて Janský(1973)は非ふるえ熱産生を不可避的(基礎的)非ふるえ熱産生と体温調節性熱産生とに分類することを考えた. しかしながらヒトについてのそれぞれの実数値についての報告はほとんど見受けられず, 寒冷適応能に関連づけたヒトの不可避的非ふるえ熱産生に関する伊藤(1970; 1974)らの血漿遊離脂肪酸の代謝速度の研究が目をひくだけである.

著者らは総エネルギー代謝量と主要筋群のエネルギー代謝量の線形指標の同時測定から, 総エネルギー代謝量を各主要筋群のエネルギー代謝量とそれ以外の代謝量の準基礎代謝 B_1 に分割して求める局所筋エネルギー代謝量の推定方法(横山, 1980)を適用して, 至適温熱環境下の準基礎代謝量 B_1 の測定を行った. 夏季11名, 冬季10名の結果は, 従来の日本人の基礎代謝量の多くの報告と同様な傾向を示した. すなわち冬季に高く, 夏季に低いということが t 検定によって明らかにされた(表7参照). ただし, 表7の結果は被験者が異なっているので, 同一被験者 YS を縦断的に調べた. その結果表7と同様, 冬季に高く夏季に低いという結論が得られた. 準基礎代謝量 B_1 による表現は, 主要筋群すなわち筋器官のエネルギー代謝量が別個に推定されているので, その主体が内臓器官のエネルギー

Table 7. Seasonal variation of quasi-basal metabolic rate (B_1).

In summer (n=11)
$B_1 = 32.43 \pm 12.59$ [kcal/h]
$B_1/A = 19.81 \pm 9.26$ [kcal/m ² h]
In winter (n=10)
$B_1 = 67.32 \pm 7.83$ [kcal/h]
$B_1/A = 38.90 \pm 5.27$ [kcal/m ² h]

Table 8. Seasonal variation of quasibasal metabolic rate (B_1) in subject YS ($A = 1.760\text{m}^2$).

In August (08/18/79)
$B_1 = 29.87$ [kcal/h]
In December (12/20/81)
$B_1 = 57.84$ [kcal/h]
In March (03/06/82)
$B_1 = 55.55$ [kcal/h]
In March (03/13/82)
$B_1 = 57.92$ [kcal/h]

代謝量と考えられ, 非ふるえ熱産生の考察の上で多くの利点をもたらすと考えられる. しかも基礎代謝量測定に際し, 数多くの条件が付帯されている(沼尻, 1970; 佐々木, 1975)のに対し, 我々の準基礎代謝量の測定では, それらが大幅に軽減されている. 被験者 YS の至適温熱環境下の測定では再現性も良い(表8参照).

上記の著者らの方法を, 寒冷環境に適用することにより, 体温調節性の非ふるえ産熱ならびにふるえの産熱の定量への適用を試みた. しかしながら, ふるえ収縮における線形指標の表面誘導筋電図の積分値が至適温熱環境下の等尺性随意収縮時に明らかにされている張力との一次比例性(原, 1979; 等)がそのまま維持されるかについては明確にされていない. それは, ふるえ収縮における筋の張力ないしは外的仕事の定量が極めて困難性を伴うものであることに基因する. ふるえ収縮時に, 確証はないが赤筋線維と白筋線維の関与様式が随意収縮時のそれらの関与様式が異なるのではないかという考え方が提出されている(Hemingway, 1963; Janský, 1964; 中山, 1970). 同一負荷時の表面誘導筋電図の積分値が, 氷の接触による筋の冷却の

進行とともに増大し、その回復とともに戻ることが報告され (Hayami *et al.*, 1967), 筋電図のパワースペクトルにも違いがみられるという報告 (早弓, 1979) が、式(1)あるいは式(11)から成る連立方程式の成立に対しての疑念を増長させている。著者らは以前倚坐位の各種ふるえ収縮時の筋電図積分値と総エネルギー代謝量の同時測定を行い、今回と同様なふるえ収縮時の局所筋エネルギー代謝量の推定を試みた (横山, 1978) ふるえ筋群数に対する項目数の不足によるものか上述したふるえ収縮時の筋電図—エネルギー代謝関係の変異によるものか不明であるが、成功をみなかったという経験をもっている。そこで、今回は倚坐位を主体とするのではなく、これまで静的労作時の局所筋エネルギー代謝量の推定に成功している各種労作項目を寒冷環境に導入することを考えた。それとともに、ふるえが出来る限り、推定対象筋群を中心に生起するよう実験方法に改良を加えた。推定対象筋群が下肢部を中心とするものであったので、ふるえ筋群の限定を図るために、冷氣ドラフトを寒冷刺激として採用した。また、背面刺激と前面刺激とを設定することにより、ふるえ収縮に変動を与え、連立方程式を解き易くする (横山, 1980) よう配慮した。倚坐位だけでなく、各種労作項目を寒冷環境下に導入する利点は、筋電図増大の主体を等尺性随意収縮におき、それにふるえ勢縮が付加される様式をとることによって、筋電図—エネルギー代

Table 9. The predicted coefficients a_j ($j=1, \dots, 9$) [kcal/ $\mu V \cdot sec$] and quasi-basal metabolic rate B_1 [kcal/h] from items under optimal, back cold ($T=-10^\circ C$) and front cold ($T=-10^\circ C$) conditions.

1 Ant. Crural M.	$a_1 = 7.7$
	[cal/ $\mu V \cdot sec$]
2 Post. Crural M.	$a_2 = 75$
3 Ant. Femoral M.	$a_3 = 233$
4 Post. Femoral M.	$a_4 = 36$
5 M. of the Buttock	$a_5 = 46$
6 Erector Spinae M.	$a_6 = 129$
7 M. of the Ant. Abdominal Wall	$a_7 = 377$
8 M. of the Pectoral Region	$a_8 = 0.07$
9 M. Exten. of Upper Arm	$a_9 = 64$
Quasi-Basal Metabolic Rate	$B_1 = 64.13$ [kcal/h]

Table 10. The predicted coefficients M_{jmax} ($j=1, \dots, 6$) [kcal/h] and quasi-basal metabolic rate B_1 [kcal/h] from items under back cold ($T=-5^\circ C$) and front cold ($T=-5^\circ C$) conditions.

1 Ant. Crural M.	$M_{1max} = 48.17$
2 Post. Crural M.	$M_{2max} = 312.56$
3 Ant. Femoral M.	$M_{3max} = 342.43$
4 Post. Femoral M.	$M_{4max} = 131.08$
5 M. of the Buttock	$M_{5max} = 456.66$
6 Erector Spinae M.	$M_{6max} = 170.06$
Quasi-Basal Metabolic Rate	$B_1 = 78.19$

Table 11. The predicted coefficients M_{jmax} ($j=1, \dots, 8$) [kcal/h] and quasi-basal metabolic rate B_1 [kcal/h] from items under back cold ($T=0^\circ C$) and front cold ($T=0^\circ C$) conditions.

1 Ant. Crural M.	$M_{1max} = 5.45$
2 Post. Crural M.	$M_{2max} = 32.51$
3 Ant. Femoral M.	$M_{3max} = 180.59$
4 Post. Femoral M.	$M_{4max} = 97.77$
5 M. of the Buttock	$M_{5max} = 93.98$
6 Erector Spinae M.	$M_{6max} = 49.04$
7 M. of the Ant. Abdominal wall	$M_{7max} = 596.75$
8 M. Exten. of Upper Arm	$M_{8max} = 46.56$
Quasi-Basal Metabolic Rate	$B_1 = 83.13$

謝関係性の変異の懸念が押しとどめられると考えられることにある。その結果、ふるえ熱産生について、冷氣ドラフト温 $T=-5^\circ C$ (表10)と $0^\circ C$ (表11)について、局所筋エネルギー代謝量を求めるエネルギー換算係数を同定することが出来た。また、冷氣ドラフト温 $T=-10^\circ C$ の寒冷条件からは項目数が $T=-5^\circ C$ や $0^\circ C$ の実験の時よりも4組少なかったことがあって、換算係数を同定出来なかったが、至適9項目と寒冷14項目の合併によって、至適項目からは7筋群であった筋群数が9筋群及び準基礎代謝量 B_1 すなわち10の未知数の同定は可能であった (表9)。このことは、逆に考えれば今回の実験条件では、等尺性随意収縮とふるえ収縮との間の筋電図—エネルギー代謝の一次比例性

の関係はほとんど変異していないという傍証を得たといえる。

体温調節性の非ふるえ熱産生は, 今回の寒冷条件下では, $T = -5^{\circ}\text{C}$ において $B_1 = 78.19\text{kcal/h}$ (表10), $T = 0^{\circ}\text{C}$ において $B_1 = 83.13\text{kcal/h}$ (表11) であり, 同時期の至適温熱環境下の B_1 がそれぞれ $55.55, 57.12\text{kcal/h}$ ということから, その差約 22kcal/h がその実体であると考えられた。

ふるえ熱産生については, 表5と表10, 表6と表11の組合せ, あるいは表4と表9の組合せから個々の筋群毎の実数値が推定される。これは表3の同一項目の総代謝量の至適温熱環境と寒冷環境下の測定値から定量化するふるえ効率 (shivering efficiency) による従来の表現 (小坂, 1981; 等) に比較し, 格段の進歩と考えられる。また, 筋電図単独によるふるえ熱産生の評価 (横山, 1978; 小坂, 1981; 等) と比較しても, 今回の方法による方が大きな利点をもつことは, 推定される量の普遍的な単位 [kcal/h] ないし [watt] であることを考えれば理解されよう。

文 献

- 原敏子, 1979: 筋電図積分値—張力関係の筋間の比較。人類誌, 87: 339~345.
- Hayami, A., H. Sato and M. Sato, 1967: Cooling effects on the muscular activity. J. Anthropol. Soc. Nippon, 75: 201~205.
- 早弓惇, 1979: 筋電図よりみた温熱適応能。日本人の温熱適応能に関する総合的研究 (吉田敬一編)。昭和大学, 東京。53~56.
- Hemingway, A., 1963: Shivering. Physiol. Rev., 43: 397~422.
- 広重力, 1981: 寒冷への適応—体温調節の生理一。人間工学, 17 (Supplement): 46~47.
- 伊藤真次, 1970: 寒冷馴化・日本人の適応能 (生物圏動態ヒトの適応能分科会編)。講談社, 東京。46~66.
- 伊藤真次, 1974: 適応のしくみ—寒さの生理学一。北海道大学図書刊行会, 札幌。
- Janský, L., 1964: Adaptability of heat production mechanism in homeotherms. Acta Univ. Carolinae Biologica, 1965: 1~91.
- Janský, L., 1973: Non-shivering thermogenesis and its thermoregulatory significance. Biol. Rev., 48: 85~132.
- 小坂光男, 1981: ふるえ。温熱生理学 (中山昭雄編)。理工学社, 東京。111~121.
- 黒島晨汎, 1981: 非ふるえ熱産生。温熱生理学 (中山昭雄編)。理工学社, 東京。95~111.
- 中山昭雄, 1970: 体温とその調節。中外医学社, 東京。
- 沼尻幸吉, 1970: 労働の強さと適正作業量。第8版, 労働科学研究所, 東京。
- 佐々木隆, 1975: 代謝と栄養。新生理学 (下) 第4版 (問田・内菌編)。医学書院, 東京。467~503.
- 横山真太郎, 1978: 寒冷適応に関する研究 (I) 心拍数変化および局所産熱の観点から。人類誌, 86: 347~355.
- 横山真太郎, 1980: 局所筋エネルギー代謝量の推定方法。人類誌, 88: 97~108.
- Yokoyama, S., 1980: The Estimation of Local Muscle Energy Metabolism Value in Human Static Postures. Man and his Environment (edited by I. P. Singh and S. C. Tiwari). Concept Publ. Company, New Delhi. 88~92.
- Yokoyama, S., 1982: Local Muscle Energy Metabolic Rate in Human Static Postures. J. Anthropol. Soc. Nippon, 90: 25~35.
- Yokoyama, S., T. Namioka and Y. Ogata, 1982: Improvement of the Prediction Method of Local Muscle Metabolic Rate and its Application to the Determination of Metabolic Rates during Different Working Postures. Bull. Fac. Engin. Hokkaido Univ., 107: 13~22.
- Yokoyama, S., 1983: Prediction of Maximum Local Muscle Energy Metabolic Rate in Voluntary Sustained Contraction. J. Anthropol. Soc. Nippon, (in submission).
- 吉村寿人, 1977: ヒトの適応能—気候変化への適応を中心として—。共立出版。東京。

(1982年12月24日受付)