

運動負荷時の体温調節反応に関する研究

九州大学 健康科学センター 藤 島 和 孝

(共同研究者) 福 岡 教 育 大 学 太 田 裕 造

九州大学 健康科学センター 小 室 史 恵

緒 論

運動負荷時の体温調節反応について、皮膚温や発汗量は環境温とともに変わるが、直腸温は変化せず、さらに発汗量と直腸温は運動強度に関係するが、皮膚温は変わらないといわれてきた¹³⁾。したがって、運動時の深部体温上昇は、受動的な変化や調節機能の不調によるのではなく、生理的な調節機構が積極的にはたらき、運動時には、安静時と異なる温度に温調節の設定点 (set point) がおかれていると考えられるようになった。しかし、運動時の設定点は上昇する¹⁴⁾、逆に下降する^{7,20)}、いや不変である^{2,11)}という種々の論議がなされている。

近年、運動時の体温上昇は、非温熱性刺激による皮膚血管収縮と温熱性刺激による皮膚血管拡張の結果、産熱量が放熱量より大きくなり高体温を誘発するという報告^{8,12)}や、運動負荷による局所的な血流の再配分という観点から、受動的な熱平衡の結果であるという考え方^{9,10)}がある。

いずれにしても、生体に対する運動負荷時の体温調節のメカニズムに関する見解は非常に複雑で、いまだ解明されていない。

著者らは、深部体温である鼓膜温が視床下部温を最もよく反映するという Benzinger¹⁾ の報告をもとに、鼓膜温と他の深部体温である食道温の変

化が運動時に異なる反応を示すのかどうか、さらに、これらの変化が皮膚温や発汗応答にどう関係しているかという点に興味をもっている。

本研究は、運動負荷時の体温変化と発汗応答を定量的に関係づけようとするものであり、その結果から、運動時の体温調節機構の手がかりを得る目的で行った。

方 法

1. 対 象

被験者は、年齢18～21歳の健康な男子大学生9名を対象とした。各被験者の身体的特性は表1に示した。

2. 環境条件と運動強度

被験者は、水着だけを着用し、運動負荷前に40～60分間、室温 $26 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ (湿度 $66 \pm 3\%$) で安静後、同環境条件下で自転車エルゴメーター (モナーク社製) を用いて、600kpm/min (2KP で50rpm) の運動を30分間行った。

3. 測定項目と方法

測定項目は鼓膜温、食道温、皮膚温、発汗量、発汗開始時間、血圧および心拍数とした。

1) 深部体温と皮膚温

鼓膜温は外耳孔から約 2.0～2.3cm、食道温は鼻腔から約 40cm の位置でそれぞれ測定した。

表1 Physical characteristics of subjects

Subj.	Age (yrs)	Ht (cm)	Wt (kg)	a SA (m ²)	b VO ₂ max (ml/kg/min)
K.M	18	175.3	56.25	1.63	54
Y.M	18	169.9	60.24	1.65	48
H.K	21	165.5	62.73	1.65	56
M.T	19	171.1	56.78	1.62	42
M.O	21	166.8	63.92	1.67	31
S.T	20	175.7	64.60	1.74	34
S.E	20	166.7	54.24	1.56	50
H.U	19	171.1	54.79	1.59	45
S.S	20	169.0	65.68	1.71	53
Mean	19.6	170.1	59.90	1.65	46
S D	1.1	3.4	4.20	0.05	8.3

a) Calculated from the formula ; $SA = Wt^{0.444} \times Ht^{0.663} \times 88.83 \times 10^{-4}$

b) Estimated according to Åstrand and Ryhming

皮膚温は胸，上腕，大腿および下腿で測定し，平均皮膚温 (T_{sk}) は，Hardy と Du Bois⁶⁾ による $T_{sk} = 0.3$ (胸部温 + 上腕部温) + 0.2 (大腿部温 + 下腿部温) から算出した。

鼓膜温，食道温および皮膚温は，多点式サーミスター (エラブ社製，DU 3-S 型) を使用し，1 分ごとに測定した。

2) 発汗応答

発汗量は，全身発汗量 (新光電子社製，DBS 型，精度 ± 10 g の体重計を用いて，運動負荷前後の体重差を計測) と局所発汗量 (胸部 65cm^2 で Ohara¹⁷⁾ の濾紙法により，負荷前後の濾紙の重量差から算出) を測定した。

発汗開始時間は，Minor 法¹⁶⁾ によるヨード・でんぷん反応を用い，背部皮膚面において“歴然と黒点が認められた時間”で決定した。

3) 血圧と心拍数

血圧は，左上腕で通常のマンセットを用いて，5 分ごとに測定し，心拍数は胸部双極誘導によって，連続記録した心電図から算出した。

結 果

1. 体温と皮膚温

鼓膜温，食道温および皮膚温については，表 2 と図 1 に示すとおりである。

鼓膜温は，運動負荷開始 9 分後から有意の上昇を認め，負荷終了時値は 37.3°C で，負荷前値 36.62°C に比し 0.68°C 上昇した。負荷終了後は，経時的に下降傾向を示したが，終了 10 分後値は，負荷前値より 0.39°C 高かった。

食道温は，負荷開始 6 分後から有意の上昇を認め，負荷終了時値は 37.77°C で，負荷前値 37.03°C に比し 0.74°C 上昇した。負荷終了後は，経時的に下降傾向を示したが，終了 10 分後値は，負荷前値より 0.33°C 高かった。

平均皮膚温は，運動開始 9 分後から有意の上昇を認め，負荷終了時値は 35.93°C で，負荷前値 33.83°C に比し 2.05°C 上昇した。負荷終了後は，徐々に下降したが，終了 10 分後値は，負荷前値より 0.89°C 高かった。

2. 心拍数および血圧

表2 Temperatures, systolic blood pressure and heart rate during exercise

	min	Before	During Exercise							After Exercise		
			1	5	10	15	20	25	30	1	5	10
T _{ty} (°C)	N	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
	M	36.62	36.64	36.62	36.80	36.99	37.12	37.21	37.30	37.31	37.20	37.01
	SD	0.13	0.12	0.13	0.16	0.19	0.21	0.25	0.27	0.26	0.22	0.18
	sig.				***	***	***	***	***	***	***	***
T _{es} (°C)	N	9	7	7	6	6	6	6	7	7	7	8
	M	37.03	36.96	37.13	37.57	37.55	37.57	37.72	37.77	37.79	37.46	37.36
	SD	0.24	0.26	0.37	0.15	0.13	0.09	0.18	0.12	0.14	0.20	0.24
	sig.				***	***	***	***	***	***	**	*
T _{sk} (°C)	N	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
	M	33.88	33.83	33.99	34.83	35.69	35.91	35.90	35.93	35.94	35.36	34.77
	SD	0.50	0.50	0.57	0.66	0.33	0.25	0.27	0.34	0.30	0.22	0.21
	sig.				**	***	***	***	***	***	***	***
BP (mmHg)	N	9	—	9	9	9	9	9	9	—	9	9
	M	113.0	—	166.6	166.4	164.0	162.0	158.4	156.7	—	104.7	102.0
	SD	8.4	—	12.6	14.4	11.4	9.9	9.6	9.8	—	9.7	9.2
	sig.			***	***	***	***	***	***			*
HR (beats/min)	N	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
	M	80.0	107.6	127.3	141.3	145.9	149.6	152.9	155.6	118.4	102.9	95.8
	SD	8.3	10.5	16.9	20.7	19.7	23.0	21.1	22.2	24.3	19.5	15.6
	sig.		***	***	***	***	***	***	***	***	**	*

T_{ty} ; tympanic temperature

T_{es} ; esophageal temperature

T_{sk} ; mean skin temperature

BP ; systolic blood pressure

HR ; heart rate

* p<0.05 ** p<0.01 *** p<0.001 from corresponding control value.

心拍数および血圧の結果は、表2と図1に示した。

心拍数は、運動負荷直後から有意の増加を認め、その後経時的に上昇し、負荷開始10分以降ほぼ定常状態を示した。負荷終了後は、一過性に減少したが、終了10分後値96拍/分は、負荷前値80拍/分に比し有意に高かった。

収縮期血圧は、負荷開始5分後値から有意の上昇を認め、負荷開始5分後値から有意の上昇を認め、負荷終了時までほぼ定常状態を維持した。負荷終了後は、急激な回復傾向がみられ、終了10分後値 102mmHg は、負荷前値 113mmHg よりむしろ有意に低い値を示した。なお、拡張期血圧は、負荷中および同終了後とも、負荷前値に比し下降傾向を示した。

3. 発汗開始時間と発汗量

運動負荷中の発汗開始時間と鼓膜温、食道温、平均皮膚温および心拍数との関係は表3に示しておりである。

発汗開始時間は、平均7.2分であり、この時の鼓膜温 36.71°C、食道温 37.43°C、平均皮膚温 34.33°C、心拍数134拍/分であった。発汗開始時の食道温および心拍数は、表2で示した運動開始前値に比べて、それぞれ有意の上昇・増加を示した。

運動負荷中の発汗量については、表4で示しており、全身発汗量 328±52.7g/30分および 199±31.0g/m²/30分であった。局所発汗量（胸部皮膚面）は、3.10±1.04g/65cm²/30分であった。

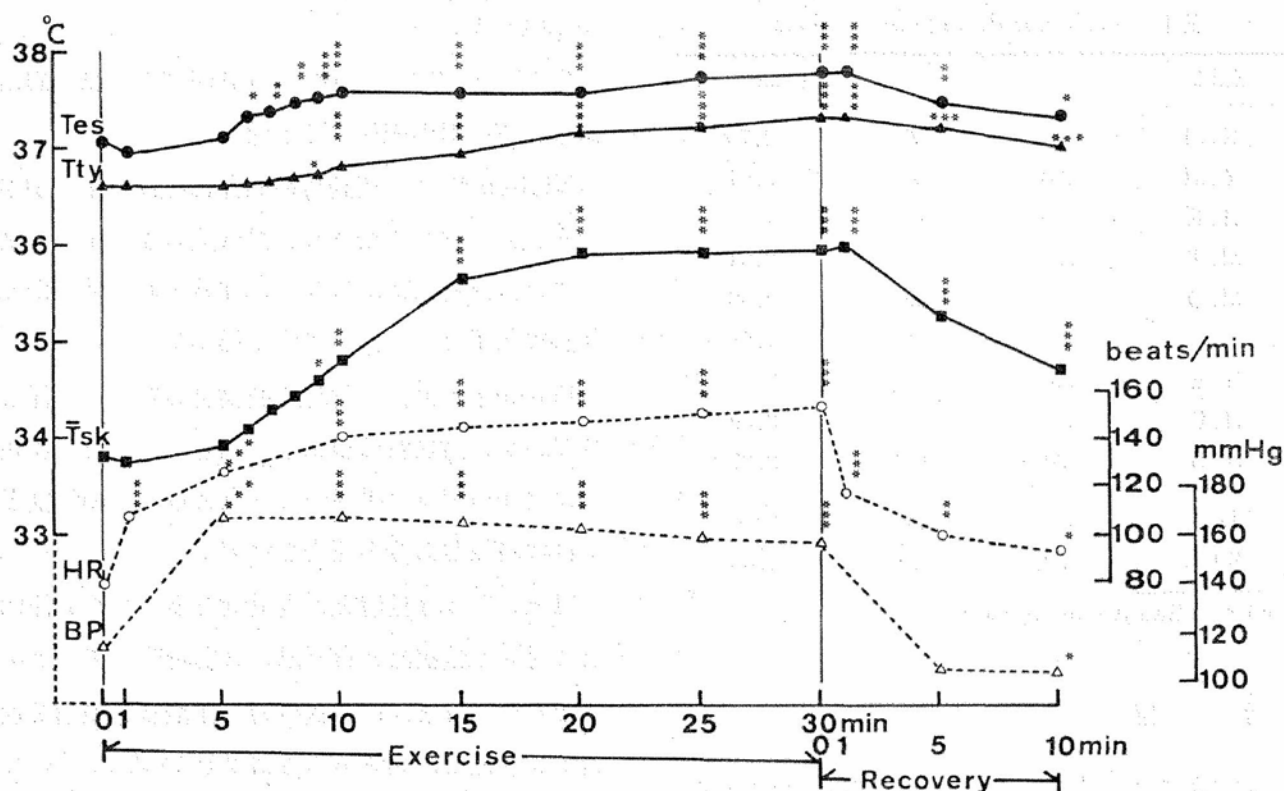


图1 Changes in temperatures, systolic blood pressure and heart rate during submaximal exercise.

Tes, esophageal temperature ; Tty, tympanic temperature ; $\bar{T}_{sk}$, mean skin temperature ; BP, systolic blood pressure ; HR, heart rate.

*** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, $p < 0.05$ in comparison with pre-exercise.

表3 Temperatures and heart rate at sweating onset

Subj.	SO (min)	T _{ty} (°C)	T _{es} (°C)	$\bar{T}_{sk}$ (°C)	HR (beats/min)
K.M	8	36.5	—	34.25	130
Y.M	8	36.9	37.4	34.92	132
H.K	6	36.5	37.4	35.26	108
M.T	7	36.7	—	34.32	148
M.O	4	36.8	37.4	33.92	155
S.T	10	36.9	37.7	34.18	160
S.E	4	36.8	37.2	34.31	124
H.U	8	36.7	—	33.59	143
S.S	10	36.6	37.5	34.23	110
Mean	7.2	36.71	37.43	34.33	134
SD	2.1	0.14	0.15	0.47	17.5

SO ; sweating onset, Tty ; tympanic temperature, Tes ; esophageal temperature, Tsk ; mean skin temperature, HR ; heart rate

** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$ in comparison with pre-exercise value.

表4 Sweat rate during exercise load

Subj.	g	g/m ²	g/65cm ²
K.M	340	208	3.79
Y.M	330	200	3.67
H.K	350	212	4.70
M.T	260	161	2.94
M.O	440	263	3.66
S.T	320	184	1.08
S.E	260	167	2.05
H.U	360	227	3.59
S.S	290	170	2.37
Mean	328	199	3.10
S.D	52.7	31.0	1.04

65cm² : Sweat rate on chest area.

考 察

本実験では、深部体温として鼓膜温と食道温を用いたが、運動時の深部体温および平均皮膚温は、いずれも数分間の潜伏時間を経て上昇した。さらに食道温は、負荷開始6分後から有意の上昇を認め、負荷開始10分後から定常状態となり、同25分後から再上昇した。鼓膜温は、負荷開始9分後から有意の上昇を認め、その後、負荷終了時まで経時的に上昇傾向を示した。平均皮膚温は数分間の潜伏時間後、経時的に上昇し、負荷開始15～20分後から同終了時まで定常状態を示した。この定常状態は、発汗による皮膚冷却現象に起因していると考えられる。運動時における深部体温および平均皮膚温上昇の潜伏時間の存在については、丹羽と中山¹⁵⁾、黒田ら⁹⁾の報告がある。

発汗開始は、鼓膜温の上昇を伴わず、食道温の有意な上昇後に誘発した。この時の平均皮膚温は、個体間のデータのバラツキが大きく有意差を認めなかったが、潜伏時間を脱し、すでに上昇期であった。このように、発汗開始時間に対する鼓膜温、食道温および平均皮膚温の反応から、運動時の発汗が鼓膜温の上昇に先立って開始し、食道温および平均皮膚温の上昇に伴って誘起すること

を示唆した。

Robinson¹⁸⁾は、運動時の発汗調節には皮膚温および直腸温が関係すると報告している。

Nielsen¹³⁾は、運動時の発汗は直腸温や皮膚温の変化に先立って始まり、温度受容器によって誘発される温度反応ではなく、神経・筋の活動が発汗調節因子として関与すると述べている。

Benzinger は、運動時の鼓膜温の変化は発汗より遅いが、鼓膜温は視床下部温を最もよく反映し、発汗速度は直腸温、皮膚温よりもこの温度と密接な関係があると報告した^{1,3)}。

以上のような見解と、本実験でみられた発汗開始に対する鼓膜温と食道温の反応時間のずれとを併せて考えると、運動負荷時の体温調節機構を検索するうえで、興味あふる結果といえよう。なお、この点に関しては、発汗開始時間の決定法の再検討も含めて、その再現性を追試したい。

発汗量については、全身発汗量および局所（胸部皮膚面）発汗量とも個体差があり、特に局所発汗量が全身発汗量より発汗率が高い傾向を示し、データのバラツキも大きかった。

Gonzalez ら⁵⁾は、局所発汗量（前腕皮膚面）の増加にもかかわらず、全身発汗量が抑制されると報告している。

なお、本実験における測定では、全身発汗量として体重減少量を用いたので、Ekblom ら⁴⁾による不感蒸泄および Mitchell ら¹⁰⁾の呼吸ガス交換による体重損失を考慮すると、実際の全身発汗量は実測値より数十グラム少ないと思われる。

心拍数および血圧は、運動開始に追従して反応し、体温ならびに発汗応答より、その反応速度が敏感であった。運動時の心拍数と血圧が体温調節機能にどう関与しているかについては、運動強度や身体適正との関係も併せて、今後詳細に検討したい。

要 約

健康男子を対象に、自転車エルゴメーターを用いて、強度 600kpm (2kp・50rpm) で30分間の運動を負荷し、運動時の体温調節反応について検討した。その結果を要約すると次のとおりである。

1. 深部体温 (鼓膜温と食道温) および平均皮膚温は、数分間の潜伏時間を経て上昇した。鼓膜温は潜伏時間後、負荷終了時まで経時的に上昇し、食道温は一時定常状態期がみられ、その後、再度上昇傾向を示した。平均皮膚温は潜伏時間後上昇し、負荷開始15~20分後から終了時まで定常状態を維持した。

2. 発汗開始は、鼓膜温の上昇を伴わず、食道温および平均皮膚温の上昇後に誘起する傾向を示した。運動中の発汗量は、全身発汗量に比し、局所発汗量 (胸部) の発汗率が大であった。

3. 心拍数および血圧は、運動開始と同時に反応し、心拍数は運動開始10分、収縮期血圧は同10分以降から、それぞれ定常状態を維持した。

以上の結果は、運動負荷時の体温調節機構を検討するうえで、興味ある知見を提供している。

文 献

1. Benzinger, T.H. ; Physical heat regulation and the sense of temperature in man, *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 45, 645—659 (1959)
2. Benzinger, T.H. ; The diminution of thermoregulatory sweating during cold-reception at the skin, *Proc. Nat. Acad. Sci.* 47, 1683—1688 (1961)
3. Benzinger, T.H. ; Heat regulation : homeostasis of central temperature in man, *Physiol. Rev.* 49, 671—759 (1969)
4. Ekblom, B., C.J. Greenleaf, J.E. Greenleaf and L. Hermansen ; Temperature regulation during exercise dehydration in man. *Acta Physiol. Scand.*, 79, 475—483 (1970)
5. Gonzalez, R.R., K.B. Pandolf and A.P. Gagge ; Heat acclimation and decline in sweating

- humidity transients, *J. Appl. Physiol.*, 36, 419—425 (1974)
6. Hardy, J.D. and E.F. DuBois ; The technique of measuring radiation and convection, *J. Nutr.* 15, 461—475 (1938)
7. Jackson, D.C. and H.T. Hammel ; Hypothalamic 'set' temperature decrease in exercising dog, *Life Sci.* 8, 554—563 (1963)
8. Johnson, J.M., L.B. Rowell and G.L. Brengelmann ; Modification of the skin blood flow-body temperature relationship by upright exercise, *J. Appl. Physiol.*, 37, 880—886 (1974)
9. 黒田善雄, 伊藤静夫, 塚越克己, 雨宮輝也, 北嶋久雄, 松井美智子 ; 運動時における体温の動的様相—運動開始時の深部体温の変化について—, 日本体育協会スポーツ科学研究報告, p1—10 (1976)
10. Mitchell, J.W., E.R. Nadel and J.A. Stolwijk ; Respiratory weight losses during exercise, *J. Appl. Physiol.*, 32, 474—476 (1972)
11. Nadel, E.R., I. Holmer, U. Bergh, P.O. Åstrand and J.A. Stolwijk ; Thermoregulatory shivering during exercise, *Life Sci.*, 13, 983—989 (1973)
12. Nakayama, T., Y. Ohnuki and K. Niwa ; Fall in skin temperature during exercise, *Jap. J. Physiol.*, 27, 193—230 (1977)
13. Nielsen, M. ; Die Regulation der Körpertemperatur bei Muskelarbeit, *Skand. Arch. Physiol.*, 79, 193—230 (1938)
14. Nielsen, B. and M. Nielsen ; Body temperature during work at different environmental temperatures, *Acta Physiol. Scand.*, 56, 120—129 (1962)
15. 丹羽健市, 中山昭雄 ; 高湿度環境における運動時の体温調節, 体力科学, 27, 11—18 (1978)
16. 緒方維弘 ; 体温とその調節, 生理学大系IV—1, p678, 医学書院, 東京 (1970)
17. Ohara, K. ; Chloride concentration in sweat : Its individual, regional, seasonal and some other variations and interrelations between them, *Jap. J. Physiol.*, 16, 274—290 (1966)
18. Robinson, S. ; The regulation of sweating exercise : In : *Advances in Biology of Skin*, New York, Pergamon Press. 3, 152—162 (1962)

19. Snellen, J.W. ; Set point and exercise : In :
Essays on temperature regulation, ed. J.
Bligh and R.E. Moore, North-Holland,
Amsterdam, p 139—148 (1972)
20. Tam, H.-S., R.C. Darling, H.-Y. Chen and

J.A. Downey ; Sweating response : a means
of evaluating the set-point theory during
exercise, *J. Appl. Physiol. : Respirat. Environ.*
Exercise Physiol. 45, 451—458 (1978)