平成３年度　日本体育協会スポーツ医・科学研究報告

No.Ⅷ　スポーツ活動における熱中症事故予防に関する研究
―第１報―

財団法人　日本体育協会

平成３年度　日本体育協会スポーツ医科学研究報告

No.Ⅷ　スポーツ活動における熱中症事故予防に関する研究

―　第１報　―

班　　長　川　原　　　貴[1)]

班　　員　朝　山　正　巳[2)]　　北　田　韶　彦[3)]　　白　木　啓　三[4)]

　　　　　森　本　武　利[5)]　　中　井　誠　一[6)]　　小　松　　　裕[1)]

目　　　次

1）東京大学　2）中京女子大学　3）日本体育大学

4）産業医科大学　5）京都府立医科大学　6）京都女子大学

1. は じ め に

研究班長　川原　　貴[1)]

熱中症とは暑熱環境による障害の総称で，熱疲労と熱射病が主なものである．熱疲労は脱水や末梢血管拡張による末梢循環不全の状態であり，熱射病は体温調節破綻により異常な高体温をきたすものである．熱中症のなかでも重症な病型である熱射病の場合には，体温の異常上昇に伴い，血液凝固障害や脳，心，肺，肝，腎，筋などの全身の臓器障害を併発するため，治療が難しく死亡率も高い．

スポーツ活動に伴う非外傷性の死亡事故の原因としては，突然死と熱射病が主なものである．死亡事故の数では，突然死が圧倒的に多く，熱射病によるものはそれほど多いものではない．しかしながら，突然死を予防するのは難しい問題があるのに対して，熱射病による死亡事故は適切な予防措置により防げるものであり，予防という観点からは重要なものである．

熱中症そのものの研究の歴史は古く，古典的な部類に属し，その予防の原則はすでに確立されたものである．熱中症はかっては，労働現場や軍隊で多発し，問題となっていた．このような労働現場や軍隊での具体的予防策については，研究から暑熱環境下での活動基準が作られ，現在では熱中症の発生は非常に少なくなってきている．

わが国におけるスポーツ活動での熱中症発生全体の実態は明かではないが，小学校，中学，高校については，日本体育・学校健康センターの資料が参考になる．これによると学校管理下における熱中症による死亡事故は（表１），昭和50年以降むしろ増加しており，毎年数件発生している．また，熱中症で医療機関を受診した数は（表２），昭和62年の統計では，353件にのぼっている．これら熱中症のほとんどがスポーツ活動に関係したものである．

スポーツ活動の特徴としては，労働や軍事活動に比べ短時間にエネルギー消費が非常に高い活動であるということである．そのため，労働や軍事活動に比べ，より低い気温で熱中症が発生し，また，短時間の活動でも発生しうるということであろう．また，個人差が大きいということも特徴であろう．したがって，スポーツ活動での熱中症予防のための具体的運動指針は労働や軍事活動とは異なる基準で作成しなければならない．スポーツ活動での熱中症予防のための具体的指針は外国ではすでにいくつか出されているが，わが国では，責任ある団体からこのような指針は示されていないのが現状である．

表１　学校管理下の熱中症類似死亡件数（日本体育・学校健康センター）

区分/年度	S35	S36	S37	S38	S39	S40	S41	S42	S43	S44	S45	S46	S47	S48	S49
小学校	1件	-件	-件	1件	-件	-件	-件	-件	-件	-件	-件	-件	-件	-件	-件
中学校	1	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	2	-	-
高等学校	1	1	1	-	-	-	2	2	2	3	-	2	1	2	-
高等専門学校	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
計	3	3	1	1	-	-	2	2	2	3	-	3	3	2	-

区分/年度	S50	S51	S52	S53	S54	S55	S56	S57	S58	S59	S60	S61	S62	S63	H元	H2
小学校	-件	-件	-件	1件	-件	-件	1件	-件	1件	-件	-件	1件	-件	-件	-件	-件
中学校	1	-	-	-	1	-	-	1	1	4	3	-	-	3	2	4
高等学校	4	1	1	6	4	2	8	3	10	9	3	4	5	3	1	3
高等専門学校	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
計	5	1	2	7	5	2	9	4	12	13	6	5	5	6	3	7

1）東京大学

表2　学校管理下の疾病の種類別件数（日本体育・学校健康センター昭和62年）

区分	原因別計	食中毒	食中毒以外の中毒	日射病・熱射病	溺水	異物の嚥下	接触性の皮膚炎	外部衝撃等による									運動による									負傷による									その他
								脳・脊髄系の疾患	心臓系の疾患	肺・その他の内臓の疾患	骨疾患	関節疾患	筋腱疾患	皮膚疾患	精神疾患	その他	脳・脊髄系の疾患	心臓系の疾患	肺・その他の内臓の疾患	骨疾患	関節疾患	筋腱疾患	皮膚疾患	精神疾患	その他	脳・脊髄系の疾患	心臓系の疾患	肺・その他の内臓の疾患	骨疾患	関節疾患	筋腱疾患	皮膚疾患	精神疾患	その他	
小学校	(100.0) 15,219	(6.8) 1,032	(0.2) 35	(0.1) 17	(0.1) 19	(12.8) 1,947	(3.4) 521	(3.7) 560	(0.1) 10	(0.0) 7	(0.7) 102	(2.0) 309	(1.3) 189	(0.0) 7	(0.2) 24	(12.3) 1,874	(0.2) 29	(0.2) 31	(0.2) 23	(0.9) 134	(3.0) 454	(4.0) 624	− 0	(0.0) 4	(0.6) 88	(0.5) 72	− 0	− 0	(3.0) 454	(4.4) 666	(3.2) 492	(1.4) 217	(0.0) 5	(31.4) 4,780	(3.3) 493
中学校	(100.0) 15,754	(2.7) 426	(0.4) 58	(1.0) 157	(0.0) 1	(6.2) 978	(2.2) 347	(2.5) 399	(0.1) 22	(0.2) 24	(1.4) 221	(3.5) 557	(2.4) 381	(0.1) 11	(0.3) 44	(11.0) 1,720	(0.3) 49	(0.4) 60	(0.5) 84	(3.4) 531	(8.2) 1,293	(9.2) 1,449	(0.0) 4	(0.1) 12	(1.9) 298	(0.8) 126	− 0	(0.1) 8	(3.5) 546	(7.6) 1,197	(5.1) 800	(0.6) 96	(0.1) 14	(21.9) 3,448	(2.5) 391

〔単位：件，（　）内は発生割合〕

区分	原因別計	食中毒	食中毒以外の中毒	日射病・熱射病	溺水	異物の嚥下	接触性の皮膚炎	外部衝撃等による									運動による									負傷による									その他
								脳・脊髄系の疾患	心臓系の疾患	肺・その他の内臓の疾患	骨疾患	関節疾患	筋腱疾患	皮膚疾患	精神疾患	その他	脳・脊髄系の疾患	心臓系の疾患	肺・その他の内臓の疾患	骨疾患	関節疾患	筋腱疾患	皮膚疾患	精神疾患	その他	脳・脊髄系の疾患	心臓系の疾患	肺・その他の内臓の疾患	骨疾患	関節疾患	筋腱疾患	皮膚疾患	精神疾患	その他	
高等学校	(100.0) 10,149	(0.1) 12	(0.1) 9	(1.7) 177	(0.0) 4	(3.3) 335	(2.0) 207	(4.1) 418	(0.2) 19	(0.3) 28	(2.2) 225	(4.3) 433	(2.6) 266	(0.0) 4	(0.2) 20	(7.4) 747	(0.5) 48	(0.5) 55	(0.4) 44	(5.3) 537	(11.3) 1,141	(13.0) 1,316	(0.0) 5	(0.2) 19	(4.3) 433	(0.5) 46	(0.0) 1	(0.0) 4	(4.0) 406	(9.8) 990	(5.9) 602	(0.8) 77	(0.1) 9	(12.2) 1,241	(2.7) 271
高等専門学校	(100.0) 250	− 0	(0.8) 2	(0.8) 2	− 0	(3.6) 9	(0.8) 2	(2.8) 7	− 0	(0.4) 1	(3.2) 8	(6.8) 17	(5.6) 14	− 0	(0.4) 1	(6.4) 16	(0.4) 1	(0.4) 1	− 0	(7.6) 19	(14.4) 36	(14.8) 37	− 0	(0.4) 1	(2.4) 6	(0.4) 1	− 0	− 0	(4.0) 10	(7.2) 18	(5.6) 14	(0.8) 2	− 0	(7.6) 19	(2.4) 6

〔単位：件，（　）内は発生割合〕

したがって，本研究では，最終的には，環境条件に応じた運動に指針づくりを目指しているが，以下の課題に取り組んでいきたい．

1．スポーツ活動による熱中症発生の実態調査
2．熱中症事故例の調査
3．夏のスポーツ活動の実態調査
4．スポーツに関わる諸団体における熱中症予防の指導の実態調査
5．運動時の体温調節に関わる基礎的研究の推進
6．スポーツ現場における予防研究
7．環境条件に応じたスポーツ活動の指針の作成

本年度は，熱中症予防のための環境温度の測定方法，運動時の発汗，水分代謝，末梢循環に関するこれまでの知見を各班員にまとめていただいた．

2．運動時の発汗漸減と体熱出納

報　告　者　　朝山　正巳[1)]

研究協力者　　藤松　　博[2)]　宮側　敏明[3)]　大西　範和[3)]　小川　徳雄[4)]

はじめに

多量の発汗時には発汗開始数十分後に，発汗量が最大値を示し，その後徐々に減少する，いわゆる発汗漸減現象（hidromeiosis）が発現する[4),5),6),7),26),27),28),33)]．高温高湿環境下で安静状態にある被検者の体熱出納に関する報告[6),28)]によると，同程度の暑熱負荷であっても，空気中の水蒸気圧が高く無効発汗量が多い程，発汗漸減の程度は著しい．また発汗量の減少が見られるものの，その間の有効発汗量はほぼ一定に保たれる．高温高湿環境における貯熱量の増加は，暑熱負荷の増大に比して有効発汗量が伴わないことが主な原因となる．さらに，われわれは暑熱順化によって最高発汗量に達するまでの時間が延長し，発汗漸減の過程が延長することなどを明かにしている[28)]．

本研究では，高温，高湿環境下での運動時の発汗経過と，その間の体熱出納を観察し，運動時のhidromeiosisが，運動時の熱中症発生の成因としてどのように関与しているかを考察した．

実験方法

1）実験条件

環境：実験は室温（Ta）35℃，相対湿度（rh）75％または85％のいずれかに設定した人工気候室内で行った．室内の気流速度は常に0.12m/secであった．

運動負荷：運動はMonark社製自転車エルゴメーターを用いて，90分間行った．負荷強度は各被検者の$\dot{V}o_2max$の40％，及び50％に相当する相対負荷とした．ペダルの回転速度は，メトロノームを用いて調整し，50rpmとした．

以上の環境条件と，運動強度の組合わせにより，図1に示すI～IIIの実験条件を設定し，日を変えて各々の被検者に無作為の順序で実施した．

2）被検者

被検者は，いずれも6年以上の運動歴のある，年齢21～24歳の健康な男子学生5名である．被検者の身体的特性を表1に示す．

3）測定項目および方法

体温：直腸温（Tre）及び4ヶ所（前胸，前腕屈側，前大腿，前下腿）の皮膚温（Ts）をサーミスター温度計により測定し，ペンレコーダーにて連続描記した．また同時にミニコンピューターMEL-COM 70／10システム（三菱電気製）によってデータを収集し，平均皮膚温（$\bar{T}s$），平均体温（$\bar{T}b$）の算出などの計算処理を行った．$\bar{T}s$は，Ramanathan[29)]の式，

$$\bar{T}s = 0.34Tchest + 0.33Tthigh + 0.18Tleg + 0.15Tarm$$

によって算出し，また$\bar{T}b$は，

$$\bar{T}b = 0.8Tre + 0.2\bar{T}s$$ [12)]

によって求めた．

発汗量：Potter社製のベットバランス上に自転車エルゴメーターを固定し，運動中の体重変動を連続記録し，全身発汗量（$\dot{M}sw$）を求めた．滴下した汗は，流動パラフィンを満たした鉄製の受皿（縦25cm，横65cm，深さ3.5cm）に集め，その重量をロードセルスケール（守髄社製）で連続的に秤量し，これを無効発汗量（$\dot{M}dr$）とした（図1）．

なお$\dot{M}sw$は前記の方法で求めた体重変動値から，呼吸による水分蒸発量及びエネルギー消費に

1）中京女子大学　2）中京大学　3）大阪市立大学
4）愛知医科大学

伴う体重減少量を差引いて補正した[18]。有効発汗量（$\dot{M}e$）は$\dot{M}sw$と$\dot{M}dr$の差より求めた。

体熱出納：運動開始前の安静時及び運動中の呼気をダグラスバックで採集し，湿式ガスメーターによって呼気量を測定した。O_2およびCO_2濃度は労研式ガス分析機によって分析し，酸素消費量（$\dot{V}o_2$）及び炭酸ガス産出量（$\dot{V}co_2$）を求め，代謝量（M）を算出した。なお呼気の採気は，安静時には3回にわたり5分間，また運動中は5分間隔で2分間，計8回行った。

熱産生量（M－W）は，Mより自転車エルゴメーターによる仕事量（W）を差引いて求めた。また皮膚からの蒸発による熱放散量(Es)は，Meに0.58Kを乗じて求めた。

貯熱量（△S）については$\frac{\triangle \bar{T}b}{\triangle t}\times 0.83\times$体重(kg)より，さらに放射と伝導対流による熱放射量（R＋C）は，M＝E±R±C±W±△Sの式から算出した。

4）実験手順

ショートパンツのみを着用させた被検者に，皮膚温及び直腸温用サーミスターを装着したのち，あらかじめ設定された温湿度条件下の人工気候室に入室させた。入室15分後3回にわたって安静時の呼気を採集し，その後運動を開始させた。

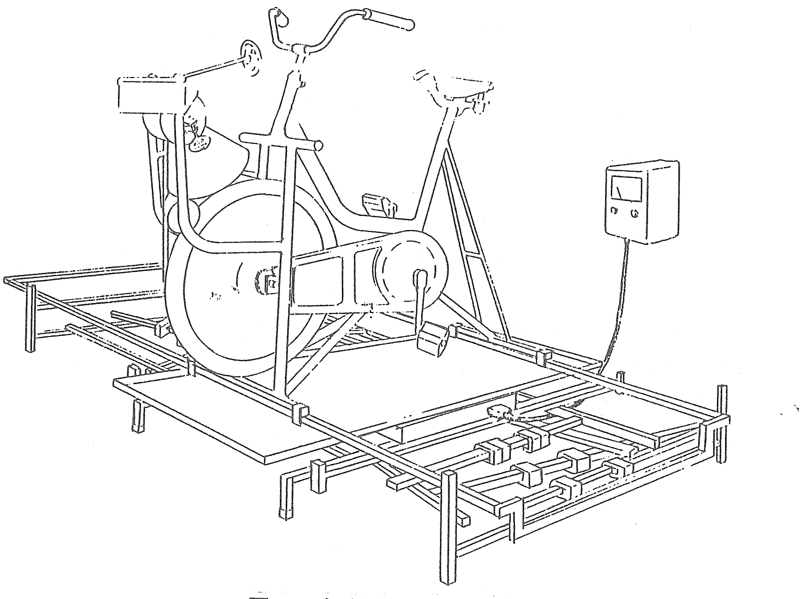

図1　実験のセットアップ

表1　実験条件

CONDITION	Ta（℃）	rh（%）	$\%\dot{V}O_{2max}$（%）
I	35.0	75	40
II	35.0	85	40
III	35.0	75	50

実験成績

a，体温

図2は Tre，$\bar{T}$s 及び $\bar{T}$b の時間経過を，実験条件別に5分毎の平均値，及び標準誤差で示したものである.

Tre は条件IIと条件IIIでほとんど同じ傾向を示し，時間の経過と共に緩やかに上昇し，終了時にそれぞれ平均39.4℃，39.5℃に達した．これは運動開始時に比べて，それぞれ1.99℃および2.03℃の上昇であった．条件Iでは，Tre の上昇は，他の条件に比して軽微であり，運動終了時の値は38.07℃で，平均1.11℃の上昇であった．これらTreは条件IとIIでは5％，IとIIIでは1％の危険率で有意な差を示した．

次に $\bar{T}$b は，Tre の値を反映し，条件IIとIIIではほとんど同じ値を示し，条件Iでは運動終了時で他の2条件より0.9℃程度低い値を示した（$p<0.01$）．

また，$\bar{T}$s は条件II，III，Iの順に高く，70～90分でIIとIの差は有意であった（$p<0.05$）．

b，発汗量

図3は5分毎の $\dot{M}$sw，$\dot{M}$dr，及び $\dot{M}$e の経時変動を示したものである．$\dot{M}$sw は条件III，II，Iの順で高い値を示した（$p<0.05$）．しかし，いずれの実験条件とも30分前後で最大値に達し，その後漸減する傾向を示した．その漸減の程度は条件Iに比べて，条件III，およびIIで顕著であった．

$\dot{M}$dr は条件IIIで最も多く，運動開始30分頃に最大値に達し，しばらく定常状態を示したのち，45分頃から漸減を示した．条件IIでは，運動開始15分後に最大値に達し，ほぼ15分間定常状態を示したのち漸減し，終了時では最大値に比較して約30％の減少を示した．条件Iでは，条件IIIの½程度の $\dot{M}$dr であったが，運動開始後30分で最大値を示したのち，ゆるやかに減少する傾向を示した．それぞれの各条件における $\dot{M}$dr の経時変化の傾斜は $\dot{M}$sw にほぼ等しく，条件IIでもっとも急峻であった．それぞれの各条件における $\dot{M}$dr の差は，IとIIではほぼ全時間経過にわたって有意な差を示した．（$p<0.01$あるいは$p<0.05$）．またIとIIでは20～70分の間に有意な差（$p<0.05$）を認めた．

$\dot{M}$e はもっとも高湿の条件IIで低く，運動強度の強い条件IIIで高い値を示した．しかし，いずれの条件とも $\dot{M}$sw や $\dot{M}$dr で見られたような漸減傾向は認められず，約30分以降はほぼ定常値を保持した．従って，$\dot{M}$sw の漸減は，もっぱら $\dot{M}$dr の減少によるものといえる．

図4は各々の実験結果から求めた最大無効発汗量（$\dot{M}$dr・max）と $\dot{M}$sw の漸減速度との関係を同一図にプロットしたものである．なお，ここで漸減速度とは，$\dot{M}$sw が最大値を示した後の，1分間

表2　被験者の身体特性

Subj.	Age (yr)	Height (cm)	Weight (kg)	BSA (m^2)
H.I	21	181.0	67.0	1.86
N.N	22	173.0	61.0	1.71
M.I	23	162.0	55.5	1.51
N.S	23	178.0	85.5	2.04
H.M	24	176.0	67.5	1.86

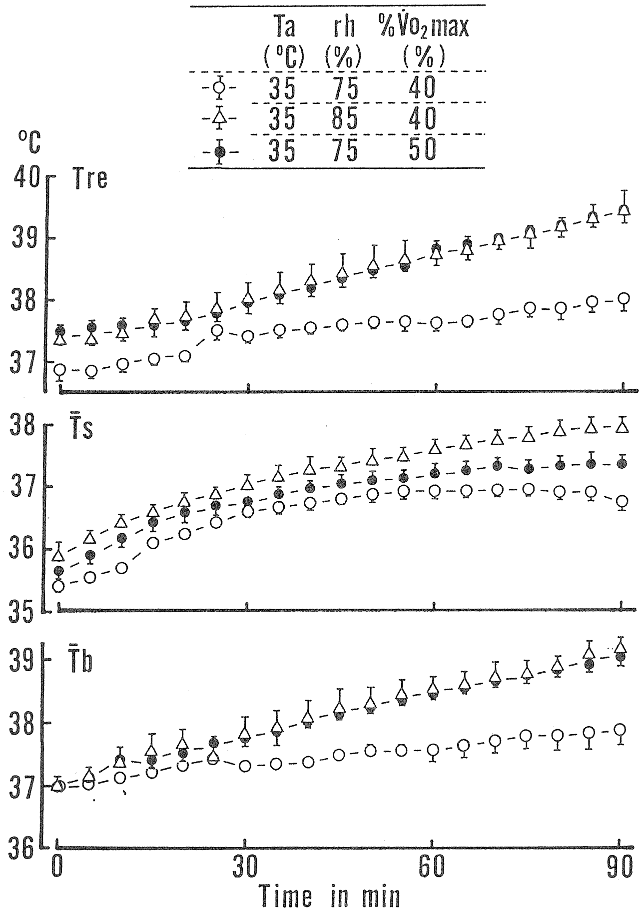

図 2　各実験条件下の体温の経時変動

当たりの Ṁsw の減少量（g ／min²）で表したもので，Ṁsw 減少開始から 1 時間はほぼ直線的に減少するとみなして求めた．また，図中に我々が先におこなった安静時の結果[27]が示してある．Ṁdr－max と漸減速度との相関係数は0.70で，安静時の0.89に比較して低い相関を示した．Ṁdr.max を従属変数（y），漸減速度を独立変数（x）としたときの一次回帰式は，運動時で y ＝0.0066x＋0.021 また安静時では，y ＝0.0044x＋0.0153で表され，運動時で明らかに急峻な回帰を示し，発汗漸減が安静時に比較して運動時で著しいことを示した．

c，エネルギー代謝

図 5 は酸素消費量（$\dot{V}O_2$）炭酸ガス産出量（$\dot{V}CO_2$）および呼吸商（RQ）の経時変動である．同程度の運動強度の条件 I と II との間には，各測定値ともに有意な差はなく，運動開始後十数分で定常値に達し，$\dot{V}O_2$は条件 I では1.08～0.25 ℓ ／min，II で1.14～1.27ℓ／min，また，$\dot{V}CO_2$は I で1.50～1.27 ℓ／min，II で1.06～1.20ℓ／minであった．またRQ も同様で条件 I および II とも0.92～0.98でほぼ一定した値を示した．

一方，条件IIIでは，運動の強度が高いことを反映して，他の 2 条件よりも RQ を除いて高い値を示し（$p<0.01$），$\dot{V}O_2$は1.46～1.69 ℓ ／min，$\dot{V}CO_2$は1.25～1.49 ℓ ／min で，経時的な動揺も大であった．また，運動終了20分前頃からこれらの値は上昇する傾向がうかがえた．RQ の変動については，他の 2 条件に比べ低い値を示し，0.84～0.93にとどまった．

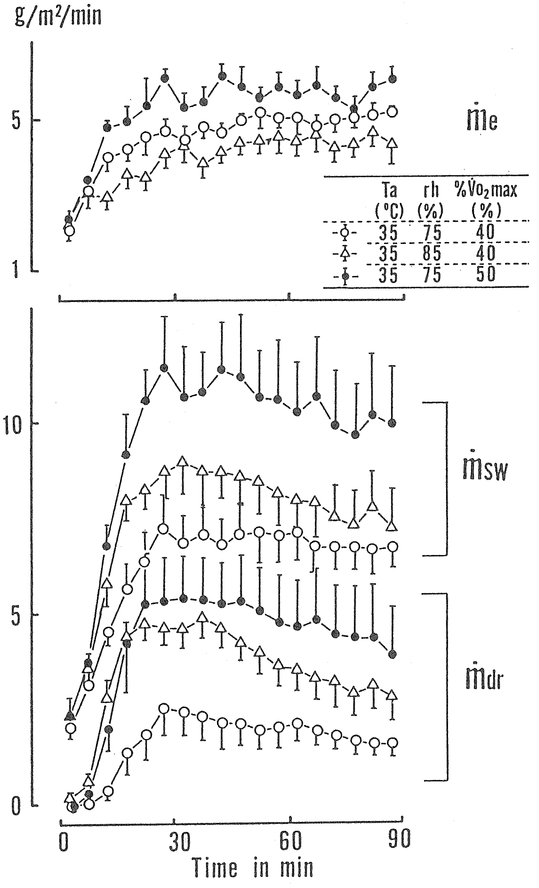

図 3　各実験条件下の発汗の変動

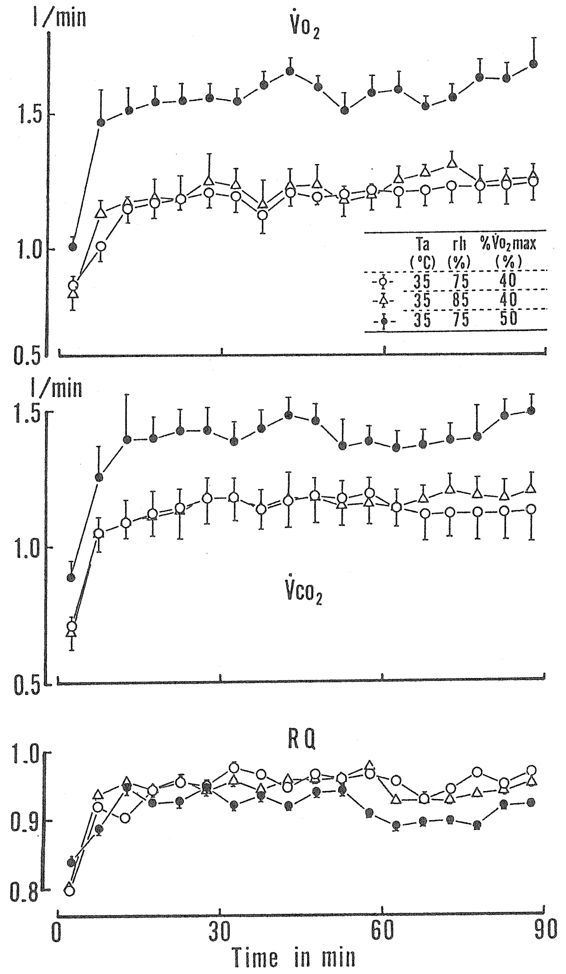

図 5　熱出納の経時変動

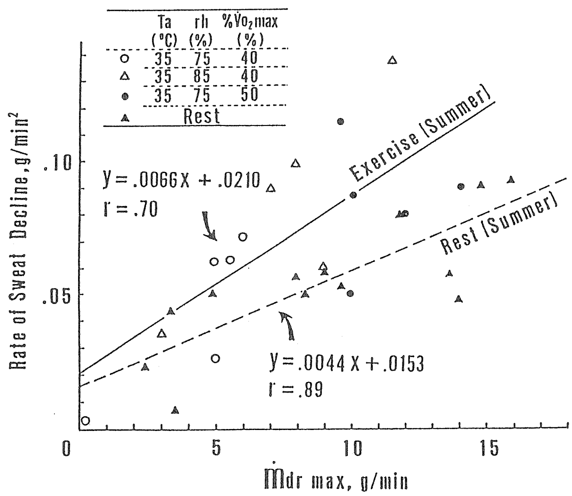

図 4　最大発汗量（Ṁdr－max）と発汗漸減現象との関係

d，熱出納

図6は15分毎の熱出納の推移を示したものであり，各コラムの全高は熱産出量（M−W）を表す．

呼吸による水分蒸発に伴う熱放散量（Eresp）は3.7～8.2W/m²と僅かであり，実験環境の水蒸気圧（Pa）と運動強度を反映して，条件IIIで最も高く，IIで低い傾向がみられたが，有意差はなく，また経時変化も殆んど認められなかった．

発汗による熱放射量（Esw）は図2に示したṀeを反映して，運動開始15分経過後には条件間にはっきりした差が現れた．すなわち，15分以降Eswは，平均値で160～168W／m²，IIでは131～162W／m²，IIIでは196～204W／m²で，3条件間に有意な

差が認められた（$p<0.05$）。貯熱量（△S）は，条件Ⅰでは当初15分はやや高く，以後20～23W／m^2となり，条件ⅡおよびⅢに比較して低値であった。ⅡおよびⅢの△Sの時間経過に伴う変動は比較的少なく，その平均値は両条件とも44～56W／m^2と類似した値を示し，Ⅰに比べてほぼ2倍の値を示した（$p<0.05$）。

放射および対流による熱放射量（R＋C）は条件Ⅲ，Ⅰ，Ⅱの順で高いが，条件間の差は有意ではなく，それぞれ0～30W／m^2，1～27W／m^2及び，7～23W／m^2の範囲であったが，関接法による測定のために誤差が大きく，経時変動でも一定傾向がみられなかった。

考　　察

1．環境温度が5～30℃の範囲であれば，運動による深部体温の上昇は，運動強度に比例することは周知のこととなっている[23),32),20)]。ただし，温度や湿度が一定範囲をこえた環境条件では，深部体温は運動強度のみならず，温度[16)]，湿度[24)]に影響される。本実験では，室温を35℃で一定とし，湿度と運動強度の組み合わせで，3つの実験条件を設定した。Treは実験条件Ⅰに比してⅡ，Ⅲで高く，かつ運動中漸時増加し，明らかに熱平衡に達していない。すなわち条件Ⅱでは，高湿度による熱放散の抑制，また条件Ⅲでは，重い運動負荷による熱産出量の増大によって，条件Ⅰより高い値を示したといえる。このことは，$\bar{T}s$にも反映され，実験条件Ⅱ，Ⅲ，Ⅰの順に高かった。

2．運動時の発汗量が，深部体温（Tcore）と皮膚温（Ts）とに密接に関係することは明らかであるが，その調節機序が安静時と全く同様であるか否かについては一致した見解が得られていない。運動時の発汗量がTcore, Tsの関数であるとすれば，Treは条件ⅡとⅢでほぼ等しい（$\bar{T}s$はⅡがⅢよりむしろ大）ことから，$\dot{M}sw$は条件ⅡとⅢでほぼ等しいか，前者の場合やや多くなってもよいことになる。ところが，実際には，図4で示したごとく，$\dot{M}sw$は条件Ⅲで高い値を示した。Nielsen[21)]は運動

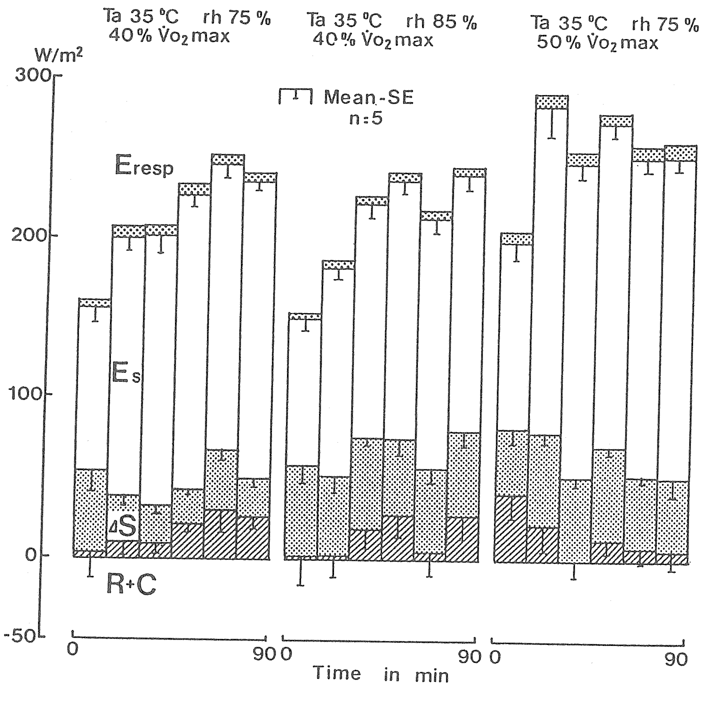

図6　熱出納の経時変動

時の発汗量は熱産生量と直線関係にあり，深部体温の上昇はむしろ熱産生と熱放散の不均衡の結果であるとしており，本実験結果と符合している．とくに本実験のごとく高温高湿状況下で熱平衡の得られていない条件では，Robinson & Gerkig[31]がすでに指摘しているように体温上昇は熱放散の抑制の結果とみなすべきであろう．

一方，体温上昇による発汗促進は，皮膚湿潤によるhidromeiosisなる局所的現象のために阻止されるものと考えられる．伊藤ら[14]やNadel et al[19]は，温熱発汗時の局部における発汗量と湿度との関係を検討し，発汗皮膚表面の湿潤が発汗量に大きく影響するとしていて，これは本実験の結果とも一致する．また，この場合の湿度の影響が，有効発汗量に最も顕著な抑制をもたらしたことは明らかであるが，hidromeiosisの発現により少なからず無効発汗量にも抑制的に作用していることがうかがえる．

3．発汗量が最大に達したのち，徐々に発汗量が減少するhidromeiosisは，多量発汗時ほど大きく，皮膚の湿潤の程度に密接に関連する[4),7)]．これは局所現象であり，局所の温浴や被覆によって局所の環境湿度を高めることにより，その部位の発汗量の漸減が促進する．その機序としては，皮膚の角質層，とくに汗腺の表皮内導管のケラチン環の膨潤による汗口部の機械的な狭窄ないしは閉塞によるとの見解が有力視されている[3),29)]．本実験でhidromeiosisによって無効発汗量のみが減少し，有効発汗量はほぼ一定値に保たれることを認めたが，これは安静時における所見[6),28)]と一致する．また安静時における最大無効発汗量（$\dot{M}$dr・max）と発汗漸減速度との間には，高い相関（$r = 0.90$）が認められ，無効発汗量が多くなるほど，発汗漸減の程度が著しくなることが示されている[5),28)]．なお，われわれは[28)]この関係が冬季においては発汗漸減が生じ易いことを示し，Fox et al[9)]やGonazalez et al[11)]の結果と一致したが，短期の人工暑熱順化によって無効発汗の漸減速度が亢進するとしているCandas et al[6)]の結果とは異なっている．

安静時の実験結果と比較すると$\dot{M}$dr・max に対する発汗漸減速度の回帰の傾きは大きく，運動時が安静時に比べて発汗漸減を生じ易いことを示した．但し，$\dot{M}$dr・max との相関が，安静時のそれに比較して低いのは，運動強度によって差が生ずるためと思われる．すなわち，運動強度の強い条件IIIでは他の，2条件に比較して発汗漸減の程度が低い傾向がみられる．かかる差異については，さらに例数を増して検討してみたい．また，運動時には，安静時に比較してhidromeiosisの程度が大きい理由については，体水分量の減少[9)]や血液浸透圧の上昇[34)]によって発汗が減少するといわれることから，このことを反映しているかもしれない．

4．暑熱環境下における運動時の体熱平衡の経時変動を，hidromeiosisとの関連で正確に検討した研究は見受けられない．前述したように，hidromeiosis下であっても，有効発汗量($\dot{M}$e)が不変であることを受けて，皮膚からの蒸発熱量(Es)はいずれの実験条件でも経時変動は認められず，ほぼ一定に推移している．また熱産生量(M－W)も同様であった．従ってhidromeiosisが体熱平衡を乱す原因とはならず，むしろ，余分な体液の損失を防いで，体液バランスの立場からみれば，却って有効な生理作用と考えられる．

ま と め

高温高湿環境下での運動時の体温や発汗量の変化と，その間の熱出納を観察し，さらに，先に報告した安静時の成績と比較することによって，運動時の発汗漸減現象hidromeiosisの特徴と，その際の体熱平衡を追究した．主な結果は次のとおりである．

1．安静時hidromeiosisの程度は安静時より運動時で大きく，高湿環境ほどその傾向は大であった．

2．発汗漸減中でも，有効発汗量はほとんど不変であり，無効発汗量のみが減少した．

3．従って，安静時の場合と同様，hidromeiosisは蒸発による熱放散を減じ，体熱平衡の均衡を乱す成因とはならず，却って余分な体液の損失を防ぐことに寄与すると思われる．

文　献

1) Van Beaumont, W. and Bullard, R. W. (1963) : Sweating : Its rapid response of muscular work. Science, 141, 643−645.

2) Bligh, J.(1973) : Temperature regulation in mammals and other vertebrates. North−Holland, Amsterdam.

3) Brebner, D. F. and Kerslake, D. M.(1968) : The effect of soaking the skin in water at various temperatures on the subsequentability to sweat. J. Physiol., 194, 1−11.

4) Brown, W. K. and Sargent, F. (1965) : Hidromeiosis. Arch. Environ. Health, 11, 422−453.

5) Candas, V., Libert, J. P. and Vogt, J. J.(1980) : Effect of hidromeiosis on sweat drippage during acclimation to humid heat. Eur. J. Appl. Physiol., 44, 123−133.

6) Candas, V. Libert, J. P. and Vogt, J. J.(1983) : Sweating and sweat decline of resting men in hot humid environments. Eur. J. Appl. Physiol., 50, 223−234.

7) Collins, K. J. and Weiner, J. S.(1962) : Observations on ARM−BAG suppression of sweating and its relationship to thermal sweat-gland fatigue. J. Physiol., 161, 538−556.

8) Dill, D. B., Edwards, H. T., Bauer, P. S. and Lavenson, E. J.(1931) : Physical performance in relation external temperature. Arbeits physiol., 4, 508−518.

9) Fortney, S. M., Nadel, E. R., Wenger, C. B. & Bore, J. R.(1981) : Effect of blood volume on sweating rate and body fluids in exercising humans. J. Appl. Physiol., 51, 1594−1600.

10) Fox, R. H., Goldsmith, R., Hampton, I. F. G. and Hunt, T. J.(1967) : Heat acclimatization by controlled hyperthermia in hot−dry and hot-wet climates. J. Appl. Physiol., 22, 39−46.

11) Gonzalez, R. R., Pandorf, K. B. and Gagge, A. P. (1974) : Heat acclimation and heat decline in sweating during humidity transients. J. Appl. Physiol., 36, 419−425.

12) Hardy, J. D. and DuBois, E. F.(1938) : The technic of measuring radiation and convection. J. Nutr., 15, 461−475.

13) Hetring, B. A., Riedsel, M. L. and Belding, H. S. (1962) : Time course of sweating in warm bath. In : ed. Montagna, W., Advances in Biology of Skin, Vol. 3, Pergamon Press, Oxford, 213−228.

14) 伊藤路子, 宮川敏明, 小川徳雄, 朝山正巳(1978) : 各種発汗定量法の吟味. 愛知医大誌, 6, 203−207.

15) Kerslake, D. M.(1972) : The stress of hot environments. Cambridge Univ. Press, London, 145−156.

16) Lind, A. R.(1963) : A physiological criterion for setting thermal environmental limits for everyday work. J. Appl. Physiol., 18, 51−56.

17) Michell, J. W., Nadel, E. R. and Stolwijk, J. A. J.(1972) : Respiratory weight losses during exercise. J. Appl. Physiol., 32, 474−476.

18) Nadel, E. R. and Stolwijk, J. A. J.(1973) : Effect of skin wettedness on sweat gland response. J. Appl. Physiol., 35, 639−649.

19) Nielsen, B.(1966) : Regulation of body temperature and heat dissipation at different levels of energy and heat production in man. Acta Physiol. Scand., 68, 215−227.

20) Nielsen, B and Nielsen, M.(1965) : Body temperature during work at different environmental temperature. Acta. Physiol. Scand., 56, 120−129.

21) Nielsen, B. and Nielsen, M.(1965) : On the regulation of sweat secretion in exercise. Acta. Physiol. Scand., 64, 314−322.

22) Nielsen, M.(1938) : Die Regulation der Korper−temperature bei Muskelarbeit. Scand. Arch. Physiol., 79, 193−230.

23) 丹羽健市, 中山昭雄 : (1978) 高湿度環境における運動時の体温調節. 体力科学, 27, 11−18.

24) 丹羽健市(1977) : 運動時の熱平衡におよぼす湿度の影響. 大阪大学医学雑誌, 30, 1−4 (昭53).

25) Ogawa, T. Asayama, M. and Miyagawa, T. (1982) : Effect of sweat gland training by repeated local heating. Jap. J. Physiol., 32, 971−981.

26) Ogawa, T. Asayama, M. Sugenoya, J., Fujimatsu, H., Miyagawa, T. and Terai, Y. (1984) : Temperature regulation in hot humid environments, with special reference to the significance of hidromeiosis. J. Thermal Biol., 9, 121−125.

27) Ramanathan, N. L. (1964) : A new weight system for mean surface temperature of the human body. J. Appl. Physiol., 19, 3, 531－533.
28) Randell, W. C. and Peiss, C. N. (1957) : The relationship between skin hydration and the suppression of sweating. J. Invest. Dermatol., 28, 435－441.
29) Robinson, S. and Gerking, S. D. (1947) : Thermal balance of men working in severe heat. Am. J. Physiol., 149, 476－488.
30) Robinson, S. (1963) : Temperature regulation in exercise. Pediatrics, 32, 691－702.
31) Sargent, F. II (1962) : Depression of sweating in man : so－called sweat gland fatigue. In : Advances in Biology of Skin, Vol. 3, Pergamon Press, Oxford, 163－211.
32) Snellen, J. W. & Mitchell, D. (1972) : Calorimetric analysis of the effect of drinking saline solution on whole－body sweating. II. Response to different volumes, salinities and temperatures. Pflugers Arch. 331, 134－144.
33) Winslow, C. E. A., Gagge, A. P. (1941) : Influence of physical work on physiological reaction to the thermal environment. Am. J. Physiol., 134, 664－681.

3．水分代謝と熱中症

報告者　　森本　武利[1]

1．はじめに

従来熱中症を含めた暑熱障害は高熱作業者において重要な問題であり，日本では炭鉱労働者や溶鉱炉での作業者に多数の報告がある．三浦によれば，1960年前後まで，熱中症の発生件数は単一の製鉄所でも年間200～300件にも及んだことが報告されている[1]．しかしその後産業界の技術革新と共に，これらの分野における熱中症の発生件数は著明に減少してきた．一方，丁度産業界での熱中症の減少と反対に，スポーツの現場での熱中症の報告が増加し，例年10例前後が新聞に報道されているが，その実数は明らかでない．いずれにしても，全く健康な人が単なる知識の欠如から，生命の危険にさらされるのであり，各種競技の主催者を含め，関係者の問題意識の有無にかかわり，充分な予防措置をとり事故を未然に防ぐ責任がある．また事故が発生した場合には訴訟によりその責任が問われるようになり，米国マサチューセッツ州は1988年９月に訓練中に熱射病で死亡した警察訓練生の未亡人に100万ドルの補償金を支払うことになったことが報告されている[2]．当然日本でも今後問題となって来るであろう．

従来スポーツ分野においては，身体のトレーニングと共に，口渇に耐えることが精神トレーニングと位置付けられていた[3]．しかし，過去10年の間に体液量の維持が体温の調節に不可欠であり，熱中症の予防要因の一つとして，充分な水分の補給を行う必要のあることが明かとなってきた．この項ではこの問題に付いて，現在までの我々の研究を中心にまとめて報告する．

2．体内の水分量と水分代謝の概要

正常人の全体液量は，体重のほぼ50-70％であり，水分含有量の少ない脂肪細胞の量などによって変動するが，ヒトの体の構成成分の中で最も大量に含まれるものである．全体液量は細胞膜及び血管により，３つの区分に分けられる．まず細胞膜により細胞内液と細胞外液に分けられ，細胞内液は体重の40-45％，細胞外液は体重の約20％である．一方細胞外液は血管内の血漿及び血管と細胞の間を満たす間質液からなる．細胞外液の主要イオンはNaとClで，血漿と間質液の相違は主として血漿中にはアルブミン等の血漿蛋白を含むことである．また細胞内液の主要イオンはKで，神経の興奮や筋の収縮に重要な役割を持っている．

体液の量および組成を一定に保つには，体からの水分の喪失と摂取のバランスをとる必要がある．暑くもなく寒くもない温和な環境条件下で安静な生活を営む成人では，水分の排泄経路として最も多いのは，腎臓からの尿で，その量は水分摂取量や汗の量の影響を受けて増減するが，ほぼ１日に1000～1500mlである．その下限は500mlで，これは代謝産物を尿として排泄するのに必要な水の量で，これを不可避尿と呼び，尿量がこれよりも少なくなると血中の代謝産物の量が増加してくる．皮膚面からは蒸発により絶えず水分が失われ，また呼吸器からも呼気と共に水分が失われる．これらは知らず知らずに起こるので，不感蒸泄と呼ばれ，１日に約900mlである．そのほか，気温が上昇した場合や運動時には，汗として水分が失われるが，その量は１時間に2000mlに及ぶこともあり，水分代謝に大きな影響を与える．このように，生体は最低1500ml（不可避尿：500ml＋不感蒸泄：900ml＋糞便：100ml），普通の生活では約2500mlの水分を毎日失い，運動量の変化や環境温の変化に際しては汗を介して，また下痢や嘔吐，腎不全など病的な状態では，さらにこの値が増加する．

１）京都府立医科大学

これらの場合には，失われる体液の組成によってそれぞれの障害が生じてくる訳である．

一方人体は，このようにして失われた水分量に見合った水分を補給する．水分補給の主要なルートは飲食物であり，食事としてほぼ1000ml 前後の水分を摂取し，さらに不足分をその他の飲料水として補給している．そのほかに飲食物としてとった養分が体内で酸化される際に生じる酸化水があり，これが１日当りほぼ300ml である．

水分出納のバランスをとるためには，生体は体液の量および体液のイオン組成の変化に応じ，口渇 thirst や塩分に対する食欲 salt appetite によって，水および塩分の補給を行う．さらに腎臓において尿量およびその組成を変化させて，体内の水分量および塩分濃度の調節を行う．腎における水分塩分排泄量の調節には，糸球体濾過量（GFR）の変化による調節とホルモンを介する尿細管での再吸収の調節とがある．すなわち血液量の変化や交感神経の作用による腎血圧の変化を介して糸球体濾過量が変化し，尿量が調節される．ホルモンによる調節としては，生体より水分が失われると，体液量が減少すると共に体液の浸透圧が上昇し，これらの変化がそれぞれ固有の受容器，すなわち体液量の減少は心房などの圧受容器，浸透圧の上昇は中枢神経系や肝臓にある浸透圧受容器によって感知され，脳下垂体からの抗利尿ホルモン（ADH）の分泌を促し，腎臓における水分の再吸収を増加させる．また腎循環系の受容器を介して血中アルドステロンが上昇し，これは腎臓におけるナトリウムイオンの再吸収を促し，ナトリウムの貯留，ひいては体液の増加に働く，一方水分が過剰に摂取された場合には，抗利尿ホルモンの低下により腎臓における水分の再吸収の低下が起こると共に，心房より心房性ナトリューム利尿ホルモン（ANP）が分泌されて尿量が増加し，体液の量および体液のイオン濃度を正常値に戻すように働く．

３．運動時の体温調節と体液

運動時，ことに高温環境下での運動時には運動筋において大量に熱が産生され，体温が上昇し体熱の放散機転が作動する．この熱放散機転としては，皮膚血流量の増加による熱放散と発汗による熱放散とがある．皮膚血管拡張による皮膚血流量の増加は，皮膚の熱還流率を増加させ，輻射，伝導，対流によって体熱を皮膚表面より外界へ放散する．環境温が体温を越える場合には，体熱の放散は専ら発汗による体表面からの気化潜熱により行われる．ヒトは発汗能が大きく他の動物に比べて体温の調節能が非常に大きいが，発汗による水分の喪失量は，極端な場合には１時間に約２リットル，１日に10～15リットルにも及び，体液のホメオスターシスに対し，また循環機能に対して大きな負荷となり，極端な場合には循環不全を生じる．

図１はイヌを用いて，体温を次第に上昇させた場合の平均動脈圧および中心静脈圧を連続的に測

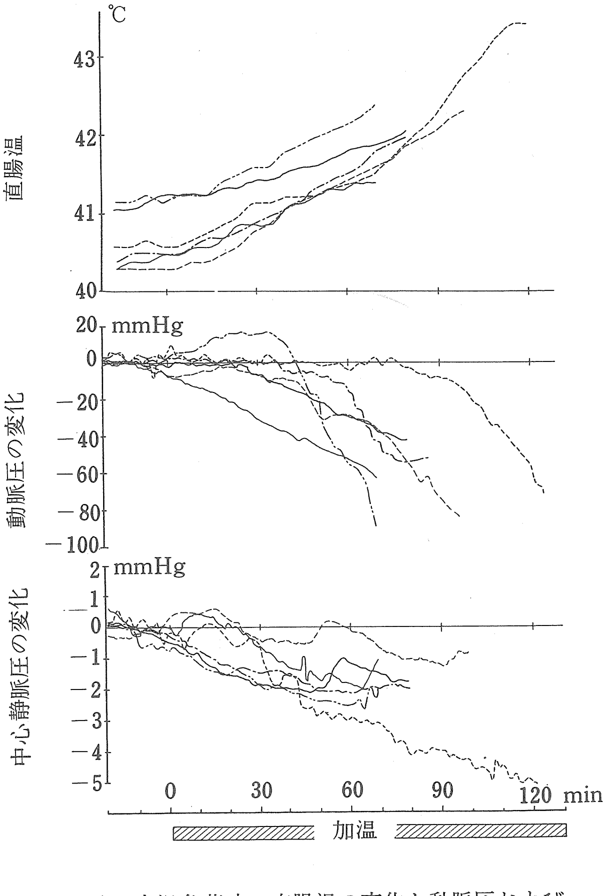

図１． イヌ高温負荷時の直腸温の変化と動脈圧および中心静脈圧の変化

定したものである[4]．中心静脈圧は体温の上昇と共に次第に低下し，個体差は見られるが，一定の値にまで低下すると動脈圧が急激な低下を示し，循環不全に陥ることを示している．この動脈圧の低下は，体温の上昇と共に皮膚血管が拡張し，ここに大量の血液がプールされるために，また運動筋への血流量の増加が加わって心臓へ還流される血液量が減少し，中心静脈圧が低下して心拍出量を維持できなく為である．

生体はこのような循環不全に至るまでに，水負債の程度に応じて種々の症状を示す．図２は高温環境下における水負債の程度と直腸温の増加の関係を示したAdolphら[5]のデータであるが，このように水負債による１％の体重減少はほぼ0.3度の直腸温の上昇をきたす．これと同様な変化は心拍数にも見られ，水負債が１～２％までは心拍数の増加は比較的少ないが，水負債がそれ以上増加すると，その負債量に比例して心拍数が増加し，その増加率には個人差はあるものの，水負債が１％増えるごとに１分あたり５～10拍で，心拍数を増加させることによって心拍出量を維持することになる．これら体温および心拍数の変化は体重の減少量に相関する．すなわち水分の摂取を行えば体重の減少率は少なくなり，直腸温ならびに心拍数の上昇が抑えられる．しかし水負債が４～６％に及ぶと血漿量，唾液分泌量，尿量が減少し，血液の濃縮，心拍数，呼吸数，体温の上昇および口渇が著明となる．５－10％の水負債により脱水による疲はい（dehydration exhaustion）が起こり，精神身体機能の低下をきたす．動物実験では脱水が体重の10～14％に及ぶと直腸温が直接的に上昇を初め，15～20％で循環不全，昏睡をきたして死の転帰をとる．

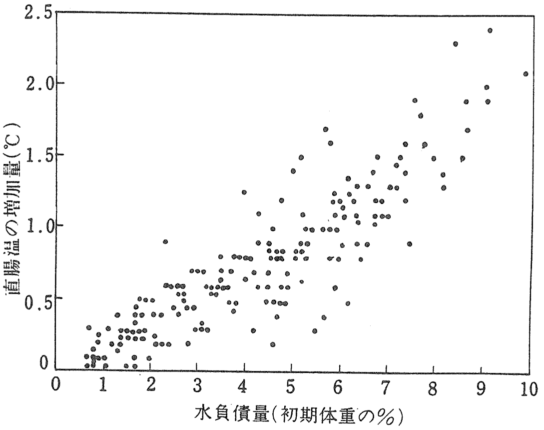

図２． 温熱負荷による体重の変化と直腸温度の上昇との関係（Adolphら(5)より引用）

４．運動時および脱水時の体液変動

図３はラットに３種類の強度のトレッドミル運動を負荷し，その際の血液量の変化を血液のNaおよびKの変動と共に連続的に測定した結果である．図の様に，運動負荷は運動強度と比例して低下し，同時に血中のK濃度の上昇が認められる．同様な運動時の血液量の低下は，図４に示すようにヒトでも認められ[7]，最大運動負荷時には８～15％の血漿量の低下を示す．この血漿量の変化は，運動筋における代謝産物の増加により浸透圧が上昇し，水が一過性に筋および間質へ移動するためであり，浸透圧の上昇には運動により生じたKイオンや乳酸が関与する．

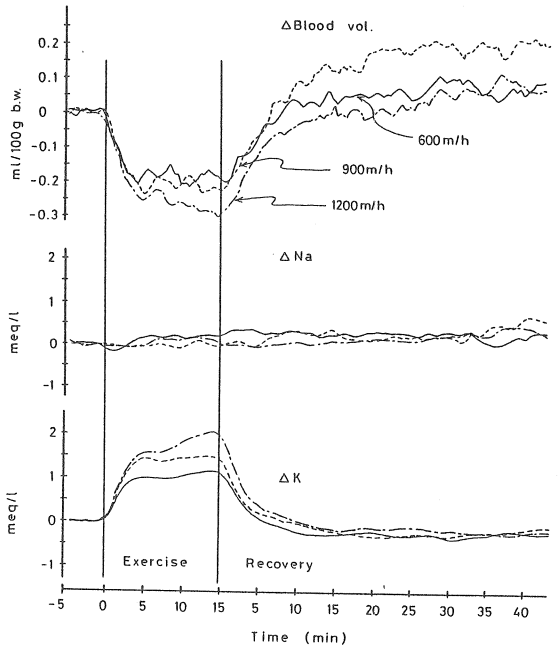

図３． ラットのトレッドミルによる運動時の血液量および血液NaおよびK濃度の変化
（値はいずれも７例の平均値でしめした．）

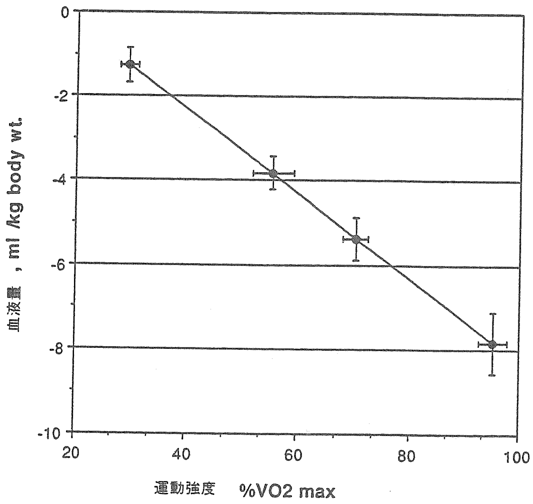

図４．ヒトにおける運動強度と血液量の低下度
（n＝6）

一方このような血液量の低下に対し，生体は体重の45％の水分を含む細胞内液および体重の15％の水分を含む間質液からの水分を動員し，血液量を保ち，循環機能を維持する調節反応を示す．図5はラットに体重の約10％の脱水を負荷した場合の体内からの水分喪失の割合を，体液区分別，および臓器別に測定したものである．図から明らかなように，血漿量の低下は失われた水分喪失量の10％であるが，間質から約50％，細胞内から約40％の水分が失われ，臓器別に見ると，主として筋および皮膚の水分が失われ[8]，生体としては血液量の維持機構が働き，循環機能の維持に働いていることが見てとれる[9]．

５．飲水による体液量の調節

以上は脱水などに際して生じる生体内での調節

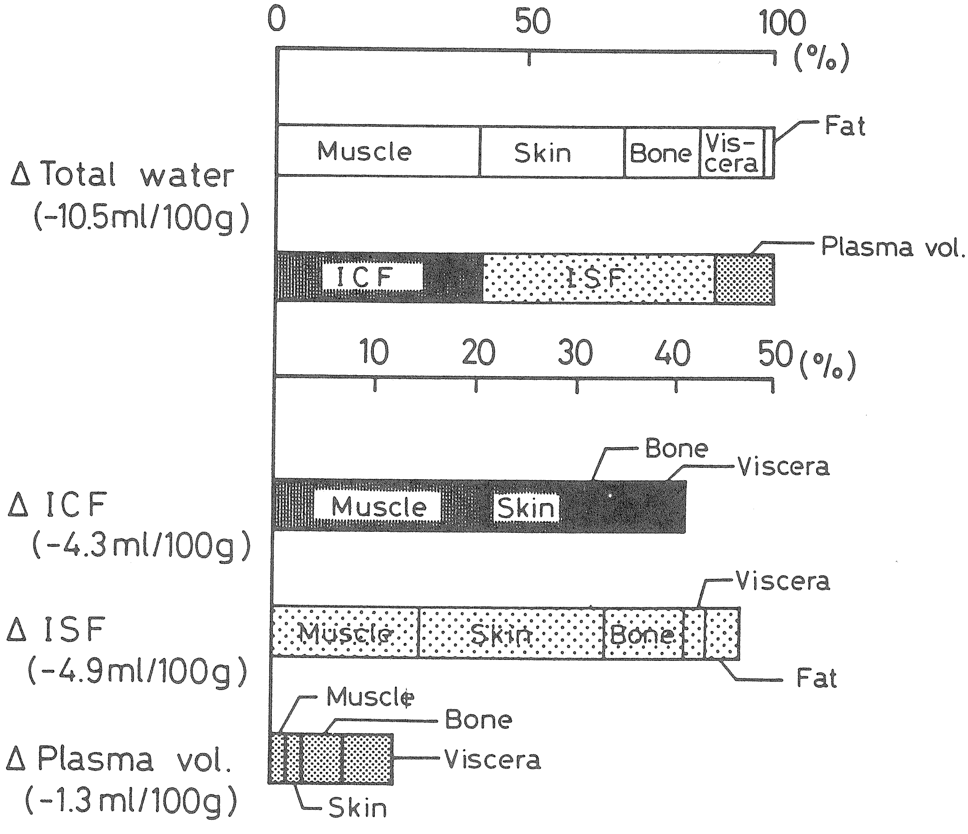

図５．脱水時の水分喪失量の体内分布（ラット６例の平均値で示す）．

に関して述べてきた．しかし一旦体から失った水分および塩分は，摂取行動によりこれを補うことによって始めて回復し，バランスを取ることが出来る．

水分の摂取行動に関しては，一次的飲水 primary drinking と二次的飲水 secondary drinking に分けられる．一次的飲水とは脱水状態に際して口渇により生じる飲水行動であり，二次的飲水とは食事や嗜好品とともに水分を摂取する飲水行動のことである．一般にヒトの場合には，発汗や下痢などによる脱水状態の場合を除き，二次的飲水が主であり，経験や好み，さらには心理学的な要因に基ずいて，必要量より幾分多くの水分を摂取し，この過剰分を腎から排泄してバランスをとっている．従って二次的飲水には摂取溶液の味，匂，温度，嗜好などが関与することになる．また離乳時以来，塩味の濃い食事を摂っていたヒトでは，塩分の多い飲食物を好んで摂取する傾向が認められ，離乳時の経験の関与を指摘する研究者もある．

一方，一時的飲水は大量の発汗が起こった後や下痢などの脱水により引き起こされる飲水行動であり，体液の調節に必要なものであって，二次的飲水とは区別して考える必要がある．一次的飲水が起こる機序としては，尿量の調節機構と同様に，血液の浸透圧と血液量の変化により調節される．即ち大量発汗，水分摂取の制限，塩分の多い食事などにより血液ないしは細胞外液の浸透圧が上昇すると，細胞外液との浸透圧の差により細胞内から水がひきだされるために生じる．また出血や嘔吐，下痢などによって水が体から失われ，細胞外液が減少した場合にも渇きを訴える．前者を細胞内脱水と呼ぶこともあるが，この場合には中枢神経系および肝臓にある浸透圧受容器が働く．また後者の場合は細胞外脱水と呼ばれ，循環系における低圧系の容積受容器およびホルモン（アンギオテンシンやアルドステロン）の関与が知られている．しかし飲水行動の調節に関しては，多くの未解決の問題があり，口渇を引き起こす中枢の部位やホルモンの役割もまだ完全には解明されていない．また口に水を含んだ場合や，少量の水を飲んだ場合でも一過性に渇きが消えるが，これは口腔の湿潤度や胃粘膜による飲水量の計測機能の存在することを示唆している．

ここでは飲水行動による体液量の調節について，イオン，ことに食塩のバランスとの関連についてわれわれの実験結果を報告する．

1）発汗と水分の補給

ヒトでは，発汗により脱水が生じた後に自由に飲水をさせても直ちに脱水量に相当する水分を摂取することが無く，一般にその後食事などと共に脱水を回復することが知られていた[5),10)]．ところがイヌ等では脱水量が体重の５％程度までであれば，水を与えられた場合直ちに脱水量に相当した飲水を行い，脱水を補う[11)]．ヒトの様に直ちに脱水を回復できない動物としては，ほかにラット，ウマ，モルモット等が含まれ，slow drinker と呼ばれる．一方イヌは rapid drinker と呼ばれ，イヌのほかにロバ，ラクダ，ヒツジ等がこのグループに含まれる．この slow drinker における脱水回復の遅れは自発的脱水 voluntary dehydration と呼ばれ，古くからその存在は知られていたが，なぜこれが起こるかに関しては不明であった[12)]．この自発的脱水の機序に関し，ヒトおよびラットを用いて一連の実験を行った．なおヒトでは発汗時に汗と共に食塩を失い，またラットでは高温環境下では体温調節のために体表面に唾液を塗布するため，やはり体液から食塩が失われる．

この実験には健康な成人男子８名と被験者として高温室（36℃，RH：90％）にて２時間の発汗負荷を加えた．この実験を水分を摂取しない場合（脱水群），水道水を自由に摂取する場合（水道水群）およびスポーツ飲料を自由に摂取する場合（Ｇ－Ｅ群）の３条件で繰り返し，水分摂取量の差を，発汗負荷中および負荷後３時間にわたって測定した．その際の発汗量はいずれの条件下でもほぼ1.6 kgであった．一方水分摂取量は水道水群で２時間の発汗負荷中に387ml，Ｇ－Ｅ群では２時間の発汗負荷中に中に425mlであった．この水分摂取量を，発汗量に対する割合として計算すると，それぞれ22％と24％にとなり，著明な自発的脱水を示している．発汗負荷中の水分摂取量に発汗負荷後３時間の回復過程における水分摂取量を加え，５時間の水分摂取量として計算すると，水道水群で862ml，Ｇ－Ｅ群で1262mlと後者で高値を示すものの，い

ずれも2時間の運動負荷中の発汗量に達せず，自発的脱水を示している．この自発的脱水の程度を，各被験者についてプロットしたのが図6および7である．すなわち横軸はいずれも2時間の高温室での運動負荷中の発汗量で，縦軸はその間の水分摂取量（図6）およびその後の3時間の回復期間をも含めた5時間の水分摂取量（図7）である．水道水を与えた場合の結果が○印と点線で，またG－E群の結果を●印と実線で示した．その回帰係数は発汗量の何%に相当する水を飲んだかを示すわけであるが，図中に示すごとく水道水群では発汗負荷中には発汗量の28%，その後3時間の回復期間を含めても44%の水分を補給しているに過ぎない．一方G－E群では発汗負荷中に48%，回復期を含めた5時間で88%の水分摂取が認められている．すなわち回復期を含めた5時間の自発的脱水量は，水道水群では56%であったに反し，G－E群では12%で，運動負荷後約3時間で，ほぼ脱水から回復している．すなわち発汗による脱水の回復には汗から失われたイオンの補給が必要であり，水のみを与えると血液が希釈され，飲水が停止することが明らかである[13]．

2）摂取溶液のイオン濃度と水分のバランス

この自発的脱水の機序をさらに詳しく解析する目的で，ウィスター系雄ラットを用い，高温環境下(DBT：36℃，RH：20%)に6－8時間暴露し体重の7－8%の脱水を起こさせた後，各種濃度の食塩水を与え，脱水回復過程を比較検討した．ラットは前胸部への唾液塗布によって体温調節を行い，汗によって体温調節を行うヒトの場合と同様に水分と塩分の喪失が起こる．

図8は温熱脱水負荷後，ラットを7匹ずつ3群に分け，蒸留水，0.45% NaCl水，および0.9% NaCl水を自由に摂取させ，その際の水分摂取量から尿量を差し引いて水分の出納を求めたものである．温熱負荷による体液量喪失量の平均値と標準

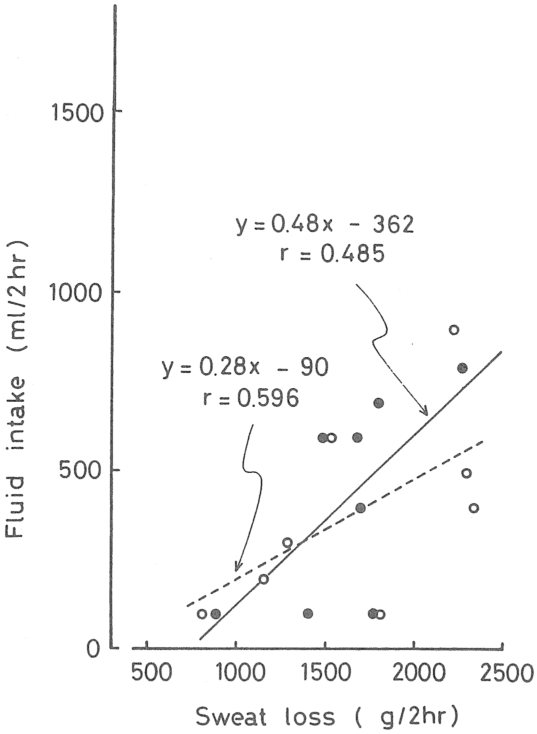

図6． ヒトの高温下運動時の発汗量と水分摂取量の関係
○印と点線は水道水，●印と実線はスポーツ飲料自由摂取時の値．

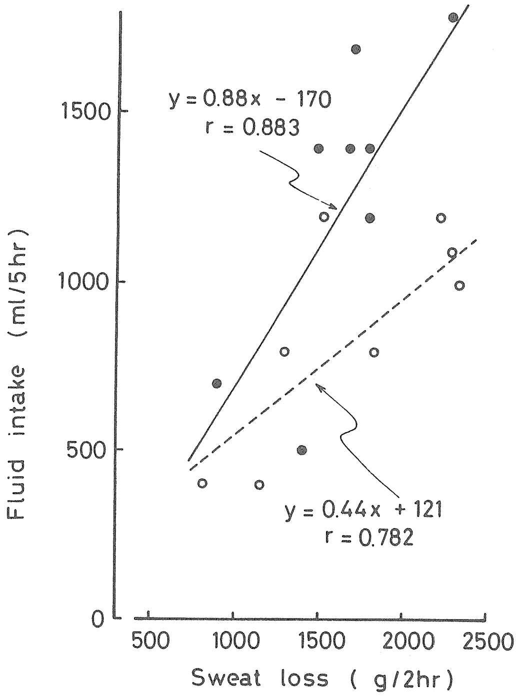

図7． ヒトの高温下運動時の発汗量と回復期の3時間を含めた5時間の水分摂取量の関係．記号は図6と同じ．

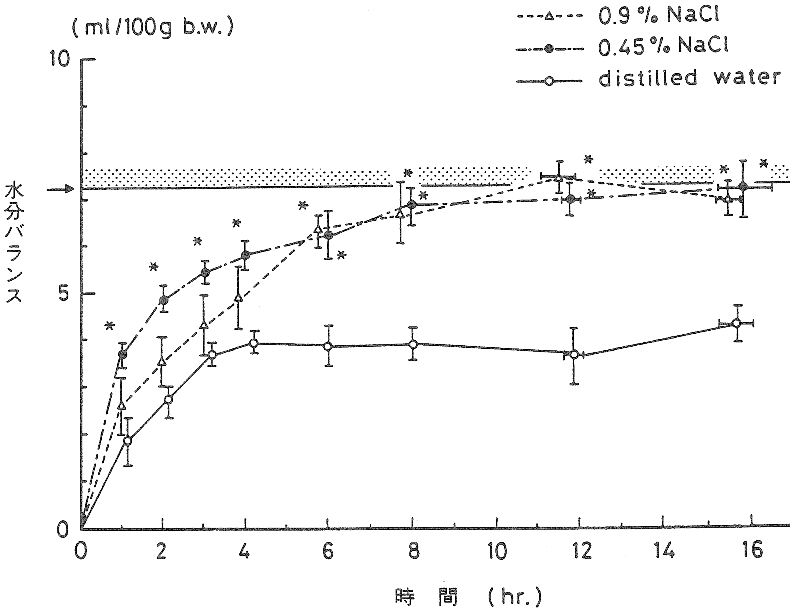

図 8． 温熱脱水ラットの水分回復に及ぼす食塩濃度の影響．
水分バランスは水分摂取量から尿量を差し引いて求めたもので，７例の平均値とS.E.で示した．

誤差を，矢印を付した直線とその影で示したが，食塩を含んだ水を与えられたラットでは，その濃度にかかわらずほぼ８時間でこの脱水量を回復する．一方蒸留水を与えたラットは約４時間までは水分を摂取するが，その後飲水が停止し，脱水量のほぼ半分が補給されるに過ぎない[14]．

次に摂取する食塩の濃度により脱水回復過程にどの様な差が認められるかについて検討した．同様に温熱脱水を加えたラットに水道水，0.2%，0.45%，0.9%，2.0%の食塩水を自由に飲ませ，その後の水分と塩分のバランスを求めた結果が図９である．図に示すように，水道水を与えた場合にはまず脱水量のほぼ半分を回復した時点より尿量が増加し，ナトリウムが更に失われ体液の量も元に戻らない．一方0.2%の食塩を与えるとほぼ３時間でイオンバランスを回復し，その後等浸透圧的に脱水前の値へと回復していく．0.45%および0.9% NaClの場合にはいずれも水分，ナトリウムとも過剰に摂取し，その後徐々に腎からの水分および塩分の排泄により，等浸透圧の線（Y＝150X）に沿って脱水前の値へとへ戻るが，その over shoot の程度は0.9%において顕著である．さらに2.0% NaClではナトリウムの摂取量は多いが，体内に過剰に摂取されたナトリウムを尿として排泄し，この際水も一緒に排泄されるため，浸透圧利尿が起こって水分を体内に保持することが出来ないことを示している[15]．

３）食塩の摂取と脱水の回復

以上の実験では，水道水ないしは食塩水のいずれか１種類の溶液を与えているが，次のステップとして，自由にラットの欲する食塩濃度を選択させると，どのような濃度の食塩水を選ぶかを検討した[16),17)]．同様な脱水負荷を加えたラットを用いて，水道水と1.8%の食塩水を同時に与えて選択させ，脱水回復過程における水およびイオンの摂取量を測定すると共に，血液量と血液の Na 濃度を連続的に測定した．その結果を図10に示したが，ラットは脱水後水分の摂取を許すとまず水道水を飲み，その結果血液の Na 濃度は急速に低下し，ほぼ１時間で脱水前の値にまで低下する．その後ラットは1.8%の食塩水と水道水を交互に飲み，血液量は増加を示すが血液の Na 濃度は比較的一定に保たれている．いま飲水開始約２時間迄に摂取された食塩水の濃度を計算すると，低濃度（約50meq／１）の

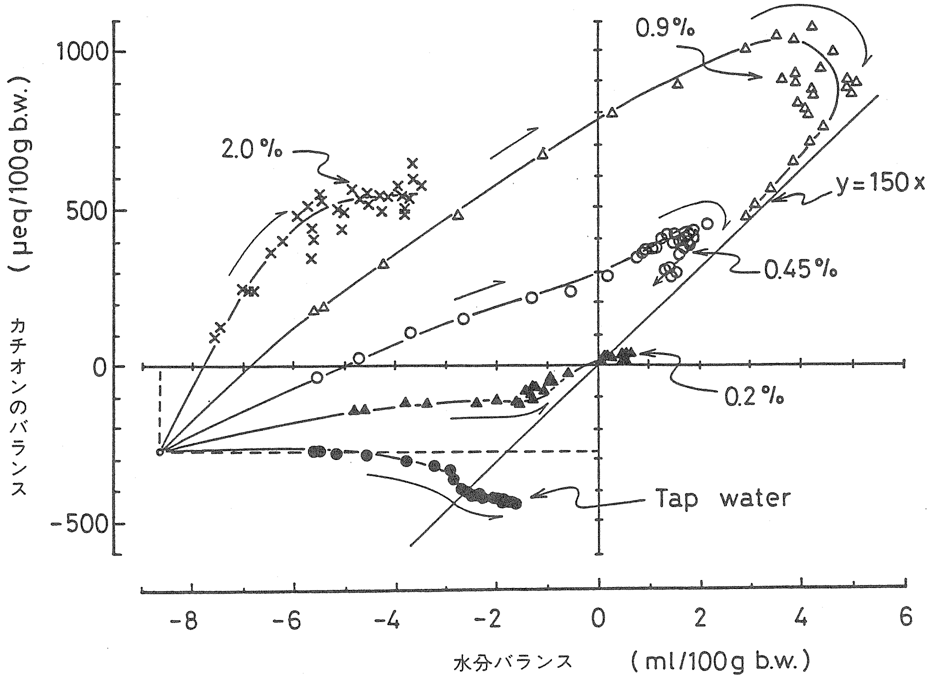

図9． 温熱脱水ラットの水分およびカチオン（Na＋K）回復過程に及ぼす食塩濃度の影響．
各グループ（n＝8－11）につき，30分ごとの積算値を脱水後の値（点線の交点）からの変化として示した．

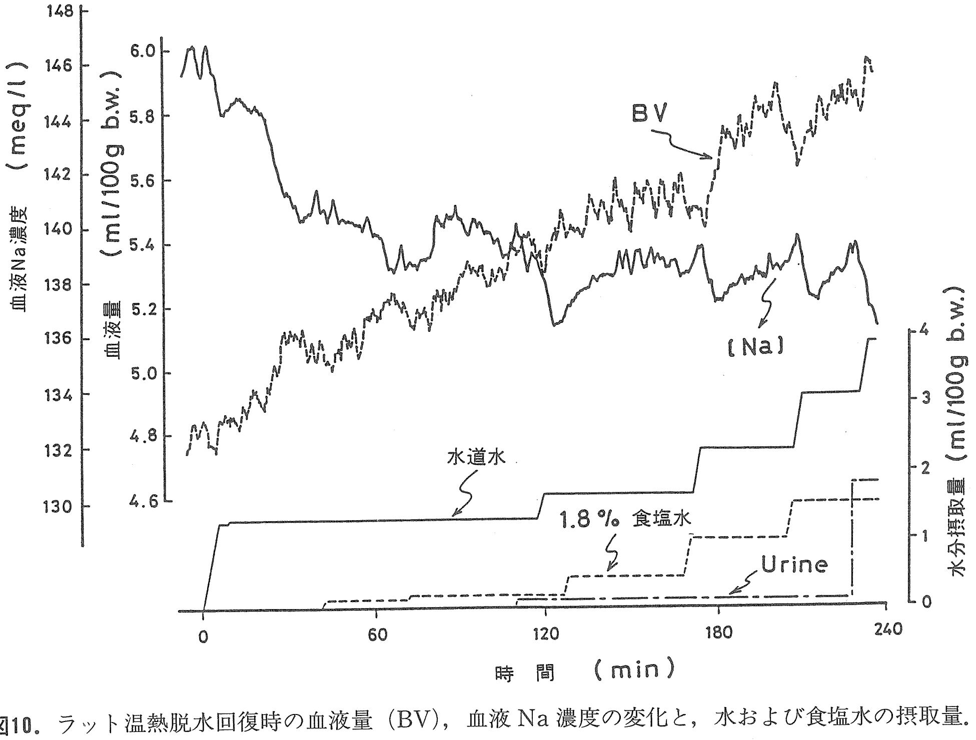

図10． ラット温熱脱水回復時の血液量（BV），血液 Na 濃度の変化と，水および食塩水の摂取量．

NaCl 水に，また2時間以降の血液量の増加の認められる時期には，血液の Na 濃度とほぼ等しい食塩水（約120meq／l）に希釈して飲水していることが明らかとなった．また尿への排泄はイオンおよび水分を充分補給した4時間後より増加を示し，摂取量とほぼ等しくなる．

以上の結果は図11に示すように説明することが出来る．この図では脱水前の状態を2つの点線の交点で示し，脱水後の値を原点にとってある．この状態にある脱水ラットに食塩水と水道水を自由に選択させると，ラットは約50meq／lの食塩水に希釈して飲水を行い，上昇していた血液の浸透圧を正常値にまで低下させるとともに脱水中に失ったイオンを回復し，次いで血液の浸透圧とほぼ等しい濃度の食塩水を摂取することによって，血液量を回復させる．約4時間以降は，飲水と腎臓の機能の両者によりほぼ回復したイオンおよび血液量の微細な調節を行うものと考えられる[12]．

以上の様に，温熱脱水からの回復時には，水のみを与えた場合，血液の希釈が起こり脱水を回復出来ず，自発的脱水が認められる．水分と共に塩分を与えると，まず血液の浸透圧を回復させ，次いで温熱負荷時に失った血液量を等浸透圧溶液を摂取することにより回復させることが明かである．またこの結果は飲水行動はまず血液のイオン濃度により調節され，その上で，イオン濃度を一定に保ちながら，血液量を回復して行くことが明かとなった．

4）摂取溶液の組成と消化管吸収

次に摂取した溶液が消化管にて吸収される速度を，溶液の組成を変えて比較検討した[18]．実際にはラットを用い，実験の24時間前にエーテル麻酔下に前胃に胃瘻を作成した．試験溶液としては，水道水，0.9％および1.8％の食塩水，0.45％の食塩と2％グルコース混合液，5％のグルコース液および市販のスポーツ飲料（0.13％の食塩および6％のグルコースを含む）を用い，それぞれ37℃に加温したものを，10分間に体重100g当り1mlの割合で胃瘻より注入し，循環血液量の変化を連続的に測定した．試験溶液注入後の循環血液量の変化を，それぞれ5例の平均値として図12に示したが，血液量の変化を0.9％の食塩水をあたえた群の変化と比較すると，0.45％の食塩と2％のグルコースをあたえた群において最も速く増加してピークに達し，水道水群および5％グルコースをあたえた群では0.9％食塩水群とほぼ同じ経過で増加した．

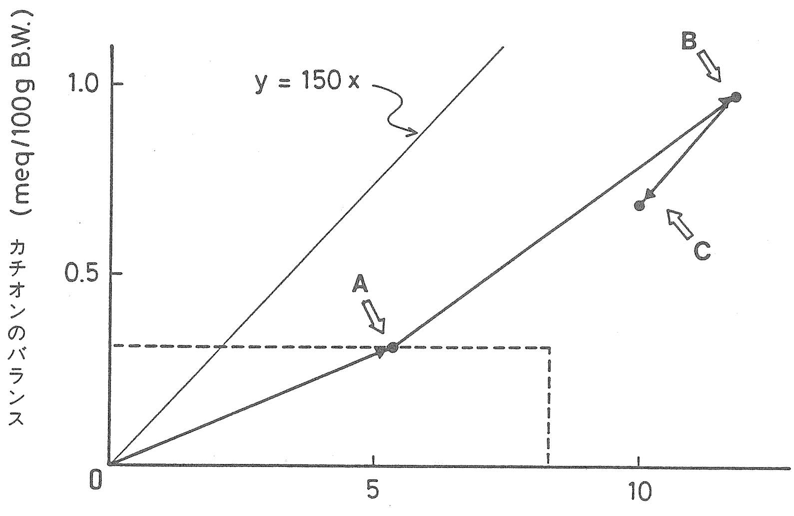

図11． ラット温熱脱水回復過程の模式図．
ラットはまず薄い食塩水（約50meq／l）を摂取し血液の浸透圧を低下させると共に失ったイオンを回復させる（0からAの間）．その後ほぼ血液の浸透圧に近い食塩水を摂取して血液量を回復させ（AからBの間），最終的な調節は腎機能で調節する（BからCの間）．

一方1.8%の食塩水群では胃注入直後より血液量が一過性に減少を示し，その後血液量は増加を示した．スポーツ飲料群では注入後血液量が増加を始めるまでに9.1分の遅れを示したが，0.9%食塩水群に比べ血液量はより速くピークに達した．血液量の平衡に達する時間は1.8%食塩水群と0.9%食塩水群で遅く，それぞれ31.8分と29.9分を示した．また0.45%の食塩と2%グルコース混合溶液群が最も短い15.0分を示し，次いでスポーツ飲料群が19.4分と短く，共に0.9%食塩水群の平衡時間との間に有意差を認めた．水道水群と5%グルコース群は上記2群の間の値を示し，それぞれ23.4分，24.7分であった．これらの結果から，1）高張性食塩水の投与では血液量が一過性に減少を示すこと2）等張性の食塩とグルコースの混合溶液の投与では，血液量の増加速度が最も大きく，消化管での水分の吸収にはナトリウムとグルコースの存在がプラスに働くことが示された．

6．運動能と血液量

以上体温調節能に体液量が関与し，脱水条件下では体温が上昇すること，またその機序として中心静脈圧の低下による心拍出量の低下ならびに皮膚血管の収縮による放熱の低下が関与すること，および脱水からの回復には，単に水のみを摂取するのではなく，食塩の補給が必要であることを示した．一方最近になって，最大酸素摂取量と循環血液量との間に非常に良い相関の認められることが報告されている[19]．我々はその機序について，運動時の循環維持機能並びに酸素運搬能の立場から検討し，また暑熱順化と運動能の間に認められる交叉順化の機序に付いて，血漿量の増加との関係から検討した．

この実験では，13名の被験者について最大酸素摂取量と血液量，血漿量，および心拍数等を測定し，これらの値と最大酸素摂取量との関係を検討

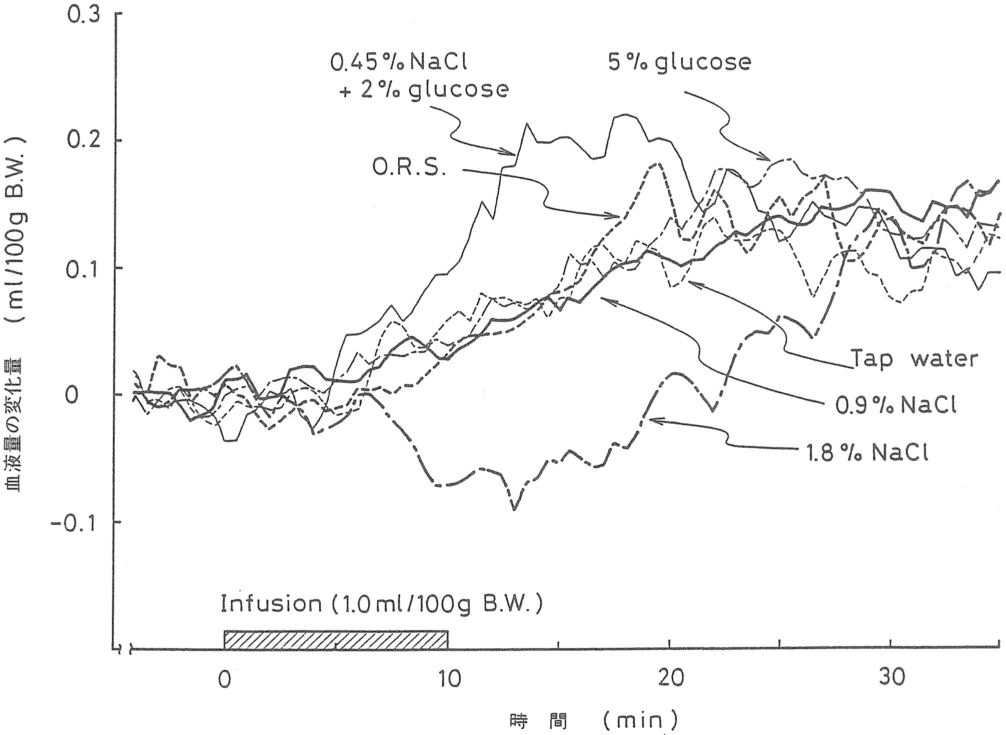

図12．ラットの胃内へ各種の溶液を注入した際の血液量の変化．
それぞれ6例の平均値を示す．

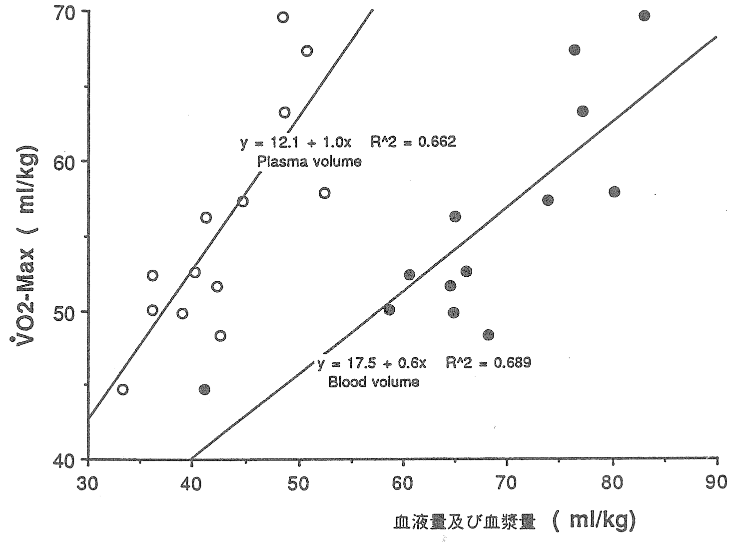

図13. 血液量および血漿量と最大酸素摂取量の関係.
血液量よりも血漿量の変化の方が最大酸素摂取量を大きく変化させる.

した. その結果, 最大心拍数と最大酸素摂取量の間には有意の相関は得られなかった. また最大酸素摂取量と血液量および血漿量の関係を見ると, 図13に示すように, 血液量の増加による最大酸素摂取量増加比率よりも, 血漿量の増加による最大酸素摂取量の増加比率の方が大きい値を示した[20]. 一般に最大酸素摂取量は血液の酸素運搬能と心拍出量, すなわち心拍数と一回拍出量との積により決定される. しかしこの結果は血液量の増加による最大酸素摂取量の増加には, 赤血球量の増加による酸素運搬能の増加よりも, 血漿量の増加による心拍出量の維持がより重要であることが示唆される. また運動時の動脈血酸素飽和度を, 運動強度を次第に増加させながら測定すると, 最大運動負荷時においても92%の値が維持され, 肺機能および血中のヘモグロビン量も酸素供給能の制限因子とは考えられない.

運動時には著明な循環機能の亢進が起こるが, これは運動筋へのエネルギー源および酸素の供給の他に, 運動筋にて産生された老廃物と熱の除去に働く, したがって運動時には運動強化に比例して運動筋への水分移動が生じ, 血漿量の減少が起こる. 同時に運動筋にて産生された熱の放散のため, 体温調節反応としての皮膚血流量の増大と発汗が起こる. 皮膚血流量の増加は血管床に対する血液量の相対的な低下を来し, 発汗は血漿量の低下を来たす. これら血液量の相対的および絶対的な減少は中心静脈圧の低下を介して心拍出量の減少を来し, 運動能の制限因子となることが考えられる.

暑熱および運動に対する順化の過程では, 血液量および体液量の増加が生じる. この体液量の増加が運動時, ことに高温環境下において生じる血液量の低下に抗して心拍出量を維持し, 運動能と体温調節能の両者を維持すると説明することが出来る. このことは高温環境および運動の両者の間に認められる交叉順化, すなわち暑熱の順化したヒトでは運動能が高く, また運動能の高い人では暑熱に対する耐性が高いことの機序として, 体液量の増加による心拍出量の維持が重要な役割を持つことを示していると考えられる.

6. ま と め

以上は運動時等, 大量発汗時に生じる脱水からの回復の機序について, 食塩の補給が必要であることを示す実験結果を中心に紹介した. また最大酸素摂取量と血液とのあいだに非常に良い相関が認められることが明らかとなった. このことは脱水状態ではスポーツ競技において決して良い結果を出すことが出来ないことを意味しており, 世界

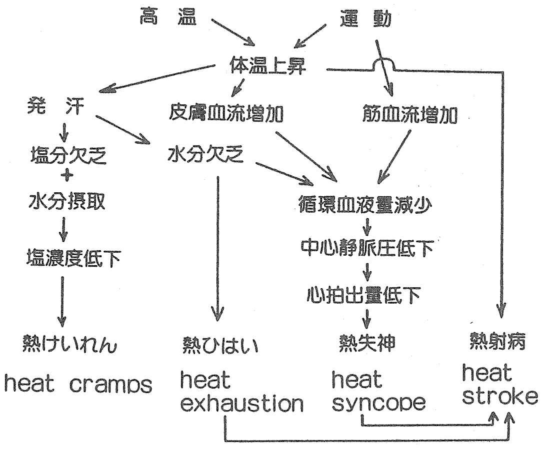

図14. 高温下での運動時に認められる生体反応と暑熱障害.

的にもスポーツ界，特にマラソン等の耐久性スポーツでは如何に脱水を予防するかが問題となっていることに対する実験的なな基礎データでもある．また脱水は高温環境下での運動時に体温の調節機能に影響を及ぼし，図14に示すように各種の熱障害の原因となる．事実，元来市民の健康を目的として行われるスポーツ大会やマラソン大会等で，熱中症等が発生し，時には死亡事故まで起こっているのが現状である．

従来わが国のスポーツ界ではともすれば根性論が先にたち，喉の渇きに耐えるのも１つのトレーニングとされて来たことはすでに述べたと通りである．しかし水分補給が運動能とも関係することが明かとなった以上，この考えを捨てなくては良い結果は得られない．また一部の論文でもまだ水分摂取は自然に起こり，特にスポーツ飲料をとる必要はない．とするものを散見するが，ここで問題となるのは脱水の程度であり，体重の2.5−3.0％以上の脱水が起こった場合にさらに運動を続ける際には，塩分の補給無しには希釈性の飲水の停止が起こり，体液量を保持することが出来ない．このような状態で高温下で運動を続けると上述の様な熱中症の原因となる．これらの事故予防のためにも，科学的なデータに裏うちされたスポーツ飲料が望まれるところであり，単に味の問題に止まらず，食塩濃度およびグルコースの濃度を決定する必要がある．

以上は主としてスポーツと飲料との関係で話を進めた．しかし開発途上国では小児の下痢による脱水症が問題で，WHO ではその予防対策として経口補水液を用いることを推奨し，成果を挙げている．WHO の経口補水液はナトリウム90meq／ｌ，クロール80meq／ｌ，糖20ｇ／ｌであり，下痢などの等張性脱水に効果があることは，われわれの実験結果からも明かである．また1991年に起こった湾岸戦争に際しては，米国軍環境医学研究所が中心となって，高温環境下での注意をまとめ，ことに水分摂取の必要性を強調したパンフレット(21)を作成し，関係者に配布することにより暑熱障害を殆ど出すことが無かったとのことである（同所長，G.P. Krueger，私信）．

少しでも多くの体育関係者が，体液量の維持が運動能ひいては記録に結び付いていること，また暑熱障害の予防に不可欠であることを理解頂くことを祈っている．

文　献

1）三浦豊彦(1985)：夏の暑さと健康，労働科学研究所出版部．
2）D. Brahams：Compensation for heat illness-death, USA, Lancet 1990：336：303．
3）坂本ゆかり(1983)：運動時の水分摂取をめぐる史的背景．J. J. Sports Sci., 2：452－458．
4）K. Miki, T. Morimoto, H. Nose, T. Itoh, S. Yamada (1983)：Cirulatory failure during severe hyperthermia in dog. Jpn. J. Physiol. 33：269－278．
5）E. F. Adolph and Associates (1947)：Physiology of Man in the Desert. Hafner Pub. C., New York.
6）T. Okuno：Changes in blood volume and potassium concentration during exercise in rats. Jpn. J. Physiol. in submition.
7）H. Nose, A. Takamata, G. W. Mack, Y. Oda, T. Okuno, S. Kang, and T. Morimoto (1991)：Water and electrolyte balance in the vascular space during graded exercise in humans. J. Appl. Physiol. 70：2757－2762．
8）H. Nose, T. Morimoto, and K. Ogura (1983)：Distribution of water losses among fluid compartments of tissues under thermal dehydration

in the rat. Jpn. J. Physiol. 33 : 1019－1029.

9) T. Morimoto (1990) : Thermoregulation and body fluids : Role of blood volume and central venous pressure. Jpn. J. Physiol. 40 : 165－179.

10) Y. Kuno (1956) : Human perspiration. C. C. Thomas. Publisher, Springfied, Ill.

11) T. Itoh, Y. Oda, H. Asaeda, A. Sohma, K. Shigemi, and T. Morimoto (1988) : Central-venous pressure and plasma Na concentration during drinking behavior in the dehydrated dog. Jpn. J. Physiol. 38 : 101－108.

12) T. Morimoto (1987) : Restitution of body fluid after thermal dehydration. In "Heat Stress, Physical Exertion and Environment". Eds. J. R. S. Hales and D. A. B. Richards, Elsevier, Amsterdam. 149－160.

13) T. Morimoto and H. Nose (1987) : Regulatory responses to thermal dehydration. In "Man in stressful envrionments : thermal and work physiology" Eds. K. Shiraki and M. Yousef, C. C. Thomas, Springfield, 131－144.

14) H. Nose, T. Yawata, and T. Morimoto (1985) : Osmotic factors in restitution from thermal dehydration in rats. Am. J. Physiol. 249 : R166－171.

15) T. Okuno, T. Yawata, H. Nose and T. Morimoto (1988) : Difference in rehydration process due to salt concentratio of drinking water in rats. J. Appl. Physiol. 64 : 2438－2443.

16) Yawata, T. Okuno, H. Nose and T. Morimoto (1987) : Change in salt appetite due to rehydration level in rats. Physiol. & Behavior 40 : 363－368.

17) E. Sugimoto (1988) : Analysis of salt and water intake by continuous determination of blood volume and plasma sodium concentration. Jpn. J. Physiol. 38 : 519－529.

18) 森田雅弘, 能勢博, 森本武利 (1988) : 経口補水液投与による循環血液量の変化. 医学のあゆみ145 : 773－774.

19) G. W. Mack, X. Shi, H. Nose, A. Tripathi, and E. R. Nadel (1987) : Diminished baroreflex control of forearm vascular resistance in physically fit humans. J. Appl. Physiol. 63 : 105－110.

20) 森本武利 (1992) : 運動能と血液量. 体力科学41 : 46－47.

21) US Army Research Institute of Environmental Medicine (1990) : USARIEM Technical note 91－2, Sustaining health and performance in the desert : A pocket guide to environmental medicine for operations in southest Asia.

4．暑熱環境における運動時の体温調節と循環動態との総合的な考察
― 末梢循環の観点から ―

報告者　　白木　啓三[1)]　佐川寿栄子[1)]

緒　　論

生理学的に考えられる範囲で外界から生体に加わる侵襲の内でおそらく最大のものは，暑熱と激しい運動との総合的な負荷によるものであろう．この様な二つの侵襲が同時に加わる事は，スポーツ活動の実施中においては必ずしも非常に稀な事でない．しかしながら生理学的な観点からはこの様な負荷は生命の危険をも引き起こすほどに生体に大きな歪を生じさせる事が判明している．特に非常にモチベーションの高く自ら進んで暑熱環境で激しい運動鍛錬を試みるような運動選手においてはこの危険は大きいと言わなければならない．

何故暑熱環境下での激しい運動が危険なのか？

では何故暑熱環境下での運動がそれほど危険を伴う行動であるかについて少し触れてみる．生命を脅かす最も大きな生体の反応は言うまでもなく，循環系の障害（循環不全）と，中枢神経系の障害（脳神経機能の不全）とが起こる事である．不幸な事にこれらの機能不全が暑熱環境での激しい運動時に稀にではなく起こる事が大きな問題になっているわけである．生命活動が正常に行われるには，我々の体温，特に中枢神経系を含む内部体温（中核部温）がある範囲内に保持されされなければならない．熱そのものが細胞レベルから全身の臓器に及ぶ広範囲なしかも不可逆な生体の崩壊を速かに進行させる事が知られている．一方では，運動により血液の循環動態の変化が起こり，循環不全を起こし易い状態を速かに生じる事も知られている．これら両者の発生する根元は一つであって，それは血液の流れの問題に行き着く．何故かというと運動によって筋肉内で発生した大量の熱（代謝性産熱）は身体の表面（皮膚）から放散されなければならない．この熱を身体の中核部から体表面に運搬するのが血液の流れである（対流性熱放散という）．この血液の流れ（血流）が阻害されれば中核部の体温は急速に危険な域値に達する．この一方では運動を継続するには，筋肉組織に酸素と栄養素を運搬し同時に代謝産物の除去を行なわなければならない．この役目を果たすのは言うまでもなく，やはり血液の流れである．

以上で理解されるように暑熱環境での運動時には二つの問題が提起されるであろう．

その第一は体温を調節するための皮膚への血液循環と，運動継続のための筋肉組織への血液循環との競合作用（血流の奪い合い）が起こることである．すなわち皮膚及び筋肉組織での血液循環の必要量が，心臓が送り出すことのできる血液量（心拍出量）を上回ってしまうことである．

その第二は皮膚での血管拡張が起こる結果，大量の血液が皮膚領域に貯留されてしまい，心臓への血液の還流（中心静脈還流）が低下しその結果，心臓の収縮によって送り出す血液量（一回心拍出量）を減少させることである．従って暑熱環境での激しい運動時には心充満圧は危険なほどに低下していると考えなければならない．明らかに筋肉組織への酸素輸送の需要及び皮膚への熱の輸送の需要は心臓のポンプの働きをはるかに越えるものである．運動中の筋肉組織に必要なだけの血液の

1）産業医科大学

持続的な供給がなされないときに運動は中断される事になる．同様に皮膚への適当な血液の供給がなされなくなったときに，高体温，或いは我々が最も恐れなければならない熱中症が起こるわけである．

ここでは急激に起こる高体温について解説しこの原因因子としての末梢循環の重要性を述べるが，以上述べた観点からも理解されるように，末梢循環だけが独立して調節されるわけではないので，筋肉組織の循環動態との兼ね合いを考慮しながら話を進めて行く予定である．

運動中の体温調節

運動中は身体内部の体温（中核温度）は環境温度があまり高くなくても非運動時に較べてある程度高く保たれている．この中核温は運動強度（熱量発生度合と比例する），皮膚表面温度，環境湿度（蒸発力の強さと言い替えられる），皮膚への血流量，汗の量，及び蒸発性の熱放散量の大きさに依存する事は間違いのない事実である．

高い環境温度は単純に中核温度の上昇速度を早める事に寄与する．何故ならば高温環境では皮膚表面の温度は当然高く保たれ，この様な皮膚温の上昇によって身体の中核部と皮膚表面との温度差（温度勾配）は少なくなるからである．ある点までは汗が気化熱を奪うため（蒸発性熱放散量）皮膚表面温度を低くし，中核部と体表面との温度の差（勾配）を維持する事ができる．

しかし我々は常に二つの相反する問題を抱えているのである．すなわち，高温環境での運動時には第一に皮膚，筋肉組織，及びその他の生命維持のための重要な内蔵器官への血流の確保をしなければならないという事と，第二に体温を低下させるのに役立つ発汗機能が発揮されるに必要な血液量の確保の問題とさらに長期に亘る運動においては，発汗にともなう大量の水分喪失（脱水状態）の問題とがある．この様に重要な事柄が，我々の体の中では同時に進行するのだと言う事をよく理解しなければならない．

運動中の循環系の変化

運動がある程度以上の長期になると，中心静脈

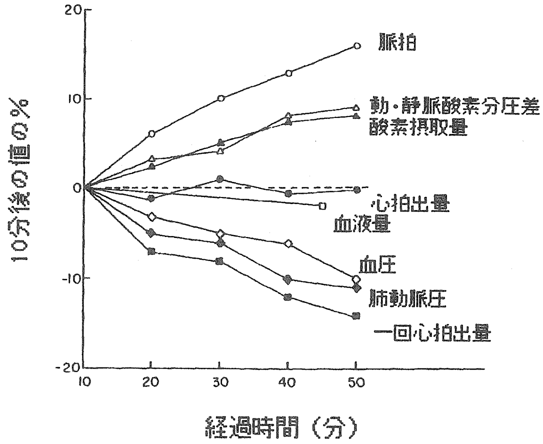

図1　運動中の循環系の変動（時間経過）(Ekelund, 1976)

圧（右心房圧に相当する），一回心拍出量，血圧，心臓への血液還流の低下がみられる．しかしながら脈拍の上昇により，単位時間あたりの心臓から拍出される血液量即ち心拍出量（一回心拍出量×脈拍）はほぼ一定に保たれる．このような心臓循環系に起こる一連の変化はどのように理解されるのであろうか？何故循環系の変化がおこるのか？運動時に特別に心臓の機能が低下するわけではないから，答は末梢循環の変化にあるように思える．従って皮膚領域での血液の循環に問題が絞られるのではなかろうか．

(1)皮膚循環

図1には1時間に亘る（環境温度20℃）ある程度激しい運動中の循環系の変化を，脈拍，酸素分圧の動静脈差，酸素消費量，心拍出量，血液量，血圧，及び一回心拍出量の変化として示したものである．すべての値は運動開始後10分で得られた値との比較値（%変化）として表現されている．血液量の低下は，運動開始10分以内に起こり，これは筋肉内の浸透圧及び，静水圧の変化の結果起こるとされている．この図に示すように運動開始10分以降の血液量は一定である．この図で明らかなように次第に進行する血圧及び，肺動脈圧の低下は，循環血液量が低下する結果ではないと言える．むしろこのような圧の低下は，一回心拍出量の低下と一致する．心拍出量は脈拍が増加する事

によって一定に保たれている。

図2には1時間（環境温24℃）に亘る中等度に激しい運動中の循環系の変化，特に血流の変化を，脈拍及び，中核温（食道温）の変化と共に示したものである．運動中の循環系の変化は皮膚への血液循環の増加によるのではないかと考えられる．運動に対する皮膚血管の反応は，初期には血管収縮である（Bevegard and Shepherd, 1966）．中核温度が上昇するにつれて血管収縮の程度は少くなり，積極的な血管拡張反応にとってかわる．運動開始後約20分までは皮膚血流（前腕血流量）は増加しない．運動中は中核温度がある程度上昇するまでは，皮膚血流量を低下させる．これは安静時とは異なる現象である．この減少は運動中の血液の流れを理解する上で非常に重要である．

理解を助けるために図3を参照して頂きたい．この実験では一定の温度の水を循環させたスーツを着用させて皮膚温を一定に保持している(38℃)．この図で明らかなように，ある中核温（食道温）で比較してみると皮膚血流量（前腕血流量）は運動時には安静時よりも低い．また運動を立位で行った方がこの現象は顕著である．即ち運動そのものが皮膚血流を上昇させるときの中核温度の域値を高める働きがあるのである．言い替えれば運動時，特に立位での運動時には，同じ中核温度であっても，皮膚血流量は，安静時よりも低いということである．このことの生理学的な意義は次のように解釈される．中核温度の上昇に比して皮膚血流の上昇が少ない事は，運動中に中心への血液の還流が低下することを防ぎ，1回心拍出量及び血圧が大きく低下しないようにする事に役立つ，即ち運動継続のためには都合のよい生体反応である（Johnson et al., 1974）．

(2)静脈系の働き

末梢の静脈系への血液の分布の変化は運動時の循環機能に大きな影響を与える．我々が立位にあるときに心臓への血流の還流に影響を与える最も大きな因子は筋肉の収縮によって促進される静脈血の流れである．このように筋肉が収縮する事によって血液の流れを助ける作用の事は〝筋ポンプ〟とも或いは〝第2の心臓〟ともよばれている（図4参照）．正常なヒトではこのような筋肉のポンプ作用は，ごく軽い運動中でも有効に働くものであり，例えば仰臥位から立位での運動に切り替えたとき当然おこる中心血液量の低下を代償するのに十分な働きをする．このような一種の〝静脈緊張度の増加〟は運動中に存在すると考えられており，

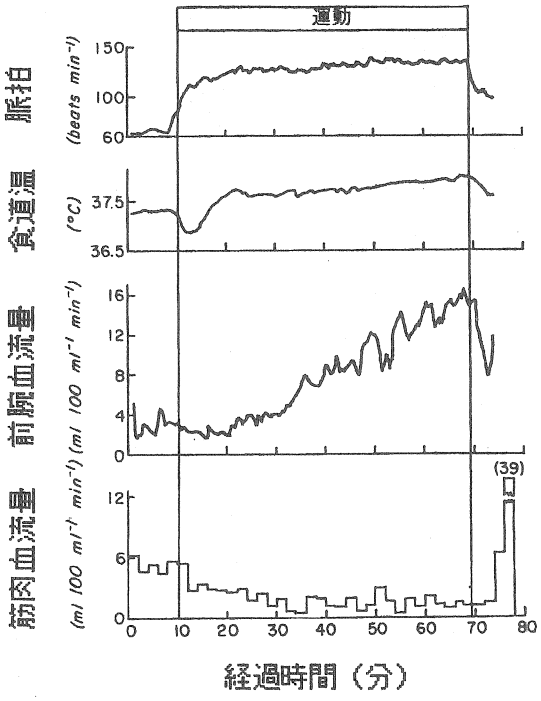

図2　運動中の皮膚及び筋肉の血流量の変化
(Johnson and Rowell, 1975)

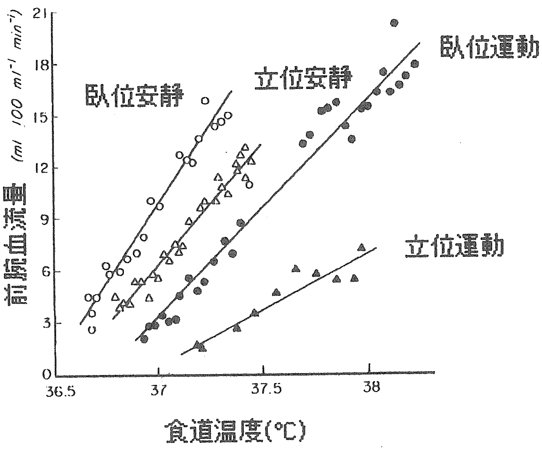

図3　運動中の皮膚血流量と中核温度との関係
(Johnson et al., 1974)

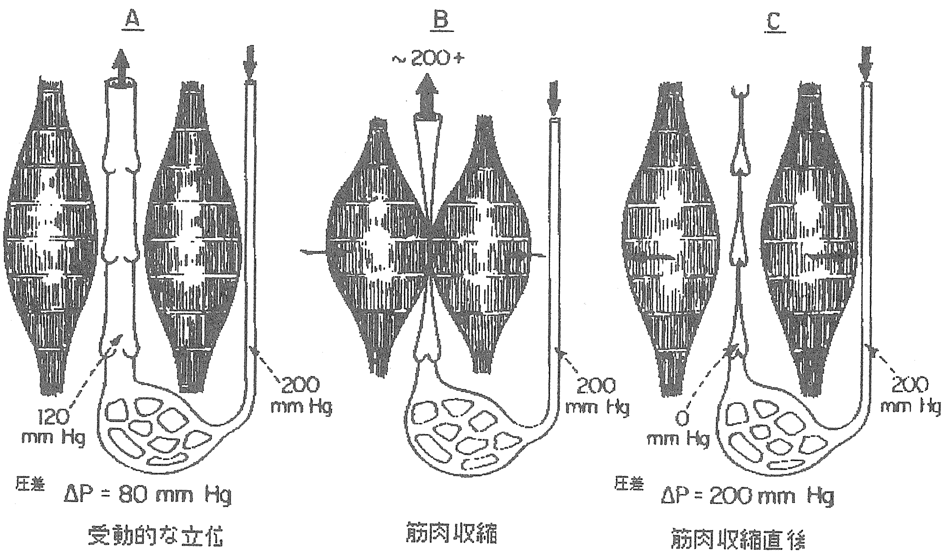

図4　筋ポンプの原理
(Rowell, 1986)

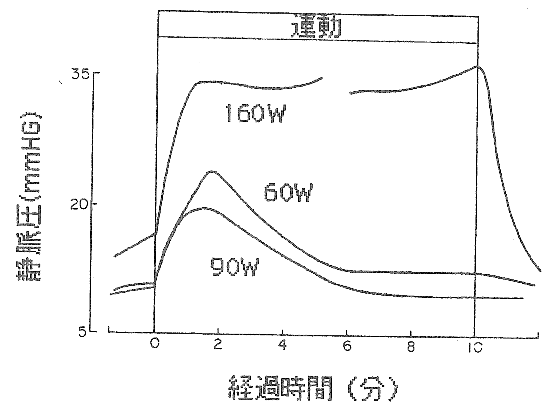

図5　運動強度と静脈系の緊張度（静脈圧）との関係（時間経過）（Hanke et al., 1969）

これが心充満圧を増加させたり或いは保持したりするのに役だっていると解釈されている．

皮膚における静脈緊張の増加（静脈収縮）は運動強度に比例して増加すると言われている（Bevegard and Shepherd, 1966：Hanke et al., 1969）．このようにしてこの静脈の収縮は筋ポンプを補佐するとされている．中核温度が余り大きく上昇していず，皮膚温も上昇していないときには皮膚血管の拡張も顕著ではないわけであるから，静脈緊張による働きは中心静脈還流の増加のためにさほど大きな貢献は果たさないであろう．しかしながら長く続く運動によって，皮膚の血管が拡張しているときには，このような皮膚静脈系の血管収縮は大量の血液を全身循環に動員するための有効な働きをする事になる．もし皮膚の静脈系が中核温度や皮膚温度が上昇しても収縮したままであったなら，この静脈系へ動員される血液の量は最小で済むはずである．

図5に運動中の静脈緊張度（静脈圧）の変化を示した．中等度までの運動中（60ワット，及び90ワット）では運動初期に上昇した静脈の緊張度は時間の経過と共に減少して行き，5分後には運動前の値に戻る．しかしより激しい運動中（160ワット）にはこれに反して皮膚の静脈緊張は運動の終わりまで継続している（Hanke et al, 1969）．運動強度が大きいときには，当然中核温は上昇するわけであるからこれは既に述べたように皮膚血管を拡張する方向に働く．激しい運動中には血管拡張をしようとする中核温度の刺激と静脈系の緊張を増加させようとする（静脈収縮）相反する二つの刺激がお互いに 反対方向に働く事になる．この両者によってもたらされたバランスが静脈収縮の方向に傾いた結果が図5に示されたものである．

一つ明らかな事は，もし長時間の運動中でしかも中核温度や，皮膚の血流量が大きいときに，皮

膚の静脈緊張度が減少するような事があるならば，この静脈系への血液の保留量は非常に大量となり，運動中の中心静脈圧は確実に低下するであろう．即ちこのような静脈系の緊張度の増加は，暑熱環境での運動継続の為に大きな貢献をしている事が理解される．

前腕血流量は運動中に時間の経過と共に低下するという報告がある(Fortney et al., 1983)．前腕血流量は中核温度の上昇にともなって上昇するのが常であるから（図3参照）この様な運動中の血流量の低下は受動的な血流の低下とは考えがたい．しかしこれと相反する報告もあって(Wenger and Roberts, 1980)，運動中の中核温度の上昇にともなって，皮膚血流量が増加するかどうかについては，さらに研究が必要である．

以上を要約すると長期間の運動中の心臓の前負荷及び後負荷が時間の経過と共に低下する原因としては，皮膚への持続的な血流量の増加によると考えられる．筋肉への血流量は一定に維持されているようである(図2参照)．ここでは示さなかったが，運動中は腹部内臓器官への血流量は確実に低下するようである(Rowell et al., 1968；Castenfors, 1977)．

この様にして皮膚への血流量の増加は全血管コンダクタンス（抵抗の逆数）の増加によると言える．運動のごく初期には皮膚の静脈は収縮しているが，時間の経過と共に中核温度が上昇するに従い，その緊張度は低下する．より激しい運動中では運動初期の静脈緊張（収縮）はさらに大きく，中核温の上昇によっても緊張の低下は余り顕著とはならない．何れにしても伸展性（コンプライアンス）の高い静脈系への血流の増加は中心血液量と心充満圧の低下という犠牲のもとに行われると考えてよい．

高温環境における運動負荷による循環系の調節

外気温が5－30℃であれば中等度の運動では中核温度の上昇は外気温にあまり影響されないと言われている(Nielsen, 1970)．この温度幅よりも外気温が高くなると，中核部と皮膚表面との温度勾配が少なくなり，発汗の増加と，皮膚血流量の増加を促し体熱の放散を増加させる．運動強度が増加すれば，当然体温の上昇につながる熱産生量が増加するわけであるから中核温度を一定に保つには環境温度の最高の許容範囲は低く設定しなければならない．この最高温度を越えるような環境設定では，中核温度は急速に上昇し，しかも皮膚領域への血流量の要求量も急速に増加し，次第に皮膚温度と中核温度とが接近して生体は運動に耐え難い状態になる．

皮膚温と中核温度が急速に変化するときの血液動態

運動と高環境温度とが組合わさったときには今まで述べてきた事から理解されるように運動を継続すれば生体は危険な状態に近づく事が予想される．この時点で運動継続のために重要な生理反応の代償機能が喪失してしまう事になる．したがってこの機序を考えてみることは異常な高体温（熱中症）の発生機序を解明する事につながり非常に重要である．

(1)中心循環動態

何故皮膚の血管拡張反応が運動時の心充満圧を低下させるのか？筋肉の静脈系でのポンプ機能は高温環境では作用しないのか？
もしそうならば何故なのか？

図4を再び参照して頂きたい．この図は暑くない環境では一回の筋肉の収縮が皮膚静脈の血液を空にする事を模式的に示してある．快適な環境で皮膚への血液量が多くないときには空になった皮膚の静脈はゆっくりと再充満される．ところが運動負荷が高温環境でなされた場合には，筋肉ポンプは働くには働くが余り有効ではない．その理由を図6で説明する．暑熱環境でも下脚筋肉の一回毎の収縮によって下肢静脈の血液は空になるはずである．しかし血流が非常に速いためにこの空になった下肢の静脈は各収縮の間に非常に早く再充満される．従って平均静脈圧や容量が低下する暇がなくこれらは高いままである．その結果中心への血液の還流は停滞する事になる．この様な血液動態の特性が，中心充満圧を低下させる原因である．皮膚血流量が増加するにつれて静脈での容量は増加し運動中の心充満圧及び心拍量の確保が困

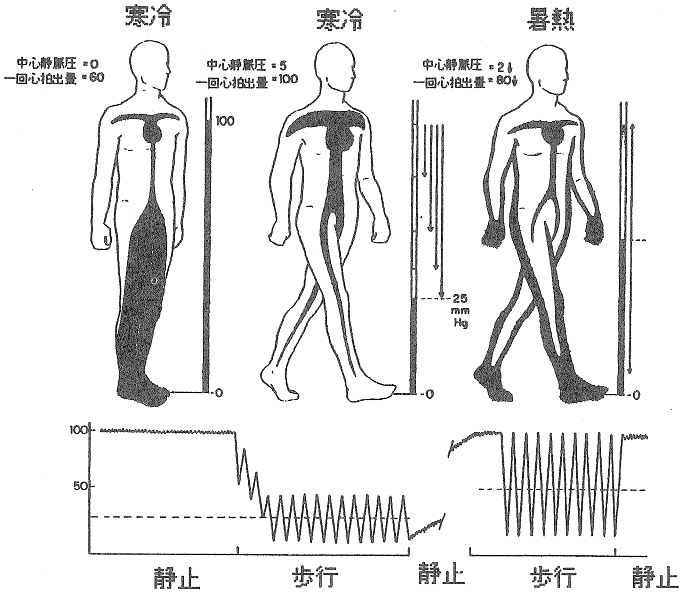

図 6　運動中の静脈系の働きの環境温による差
(Rowell, 1983)

難になる.

⑵末梢血液循環動態

運動中の皮膚温と皮膚血流量との関係を検査するのは困難を伴う実験である. なぜならば運動によって皮膚血流は変化するし, この血流の変化が皮膚温を修飾するために, 皮膚温度を一定温に固定して実験を行うのは従来無理であった. しかし最近温度をコントロールした水を還流させるスーツを着用する事によって, 従来困難であった運動中の皮膚温の制御を比較的容易に行えるようになった.

図７は皮膚温が中心循環動態にどのような影響を与えるかを見るために行った実験結果を示したものである(Rowell, 1969.). 中等度の自転車エルゴメーターによる運動 (酸素消費量１１/分) を負荷し, スーツの循環水温を上昇させて皮膚温を急速に上昇させると (図７の30及90分) １回心拍出量, 中心血液量, 大動脈及び右心房圧の減少を引き起こす事が明らかに観察される. また皮膚を冷却すると (同60分) これらの変化が急速に改善される事がみられる. 皮膚の冷却を続けている間は (同60−90分の間) 運動による中心循環系の低下

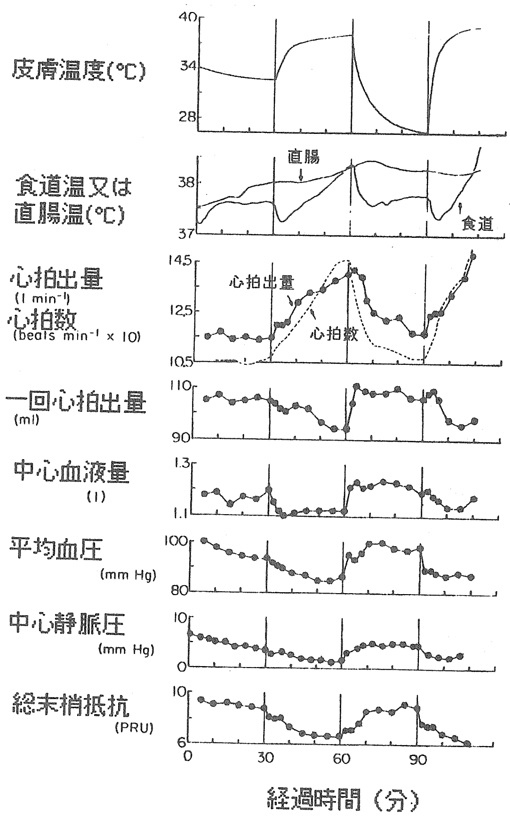

図 7　運動中の皮膚での熱交換が循環系に及ぼす影響
(Rowell, 1969)

が阻止されている．ところで食道温は動脈血温度と同等であり，中核の温度と考えられている(Shiraki et al., 1986)．またこの温度は体温調節中枢の温度と考えても間違いない(Shiraki et al., 1988)．この実験から判るように食道温は皮膚冷却によって確実に低下する．これに反して，直腸温は殆ど反応しない．ここではっきりといえる事は直腸温の反応は非常に遅いために運動時の体温特に中枢温を推定しようとする時には直腸温を測定したのでは時間のずれがあるために（15－30分程度）ある瞬間の正確な値を得る事は出来ないという事である．このような理由から熱中症発生の危険性のあるときに的確な体温の上昇を知りその結果を迅速に反映させて必要な処置を施そうとする時には，食道温か，これが困難なときには直ちに口腔内温を測定する事を強く奨めたい（Brengelmann, 1987, 佐川，1991)．スーツを介しての皮膚での有効な熱交換は，血液温度（中枢温）を急速に低下させる．脈拍，１回心拍出量，中心血液量，大動脈及び右心房圧が急速に正常化するのは皮膚血管収縮の結果である．このような望ましい方向への反応は皮膚温の低下によって即座に反射的に起こったものと，少し時間の経過があって中核温の低下によって惹起されたものとの両者の複合した結果であると解釈されている．図７は皮膚血管の拡張が心臓循環系の変化を引き起こす大きな要因である事を強く示すものである．

ま　と　め

血圧維持か体温調節か？

生命維持のためには血圧の維持も，体温を一定に維持する事も両方重要である．

心拍出量と皮膚血流量とが同時に増加するのは運動中で皮膚での熱放散量を増加させようとする体温調節の為の要求があるような状況に限られている．心臓循環機能にはよく調節された上限があるのは周知の事実である．運動負荷と他のストレスとが同時に加わり心臓のポンプ機能が限界に達したときには血圧を調節するような生体機能が優先する．よく考えてみれば皮膚への循環血液量の調節は体温を調節するという働きがあるのと同時に一方では血圧をコントロールするための反射機能のひとつの現れと考えてよいわけである．つまり循環調節反応の選択肢の一つである．

高温環境では体温の調節が必要であるにもかかわらず，運動継続のためには代謝活動は高く保たれ熱産成量は増加し体温は上昇しようとする．この様に特別な状況では血圧調節と代謝の維持（筋肉活動の維持）が先行するらしい．従ってこの時には皮膚への血流は必ずしも十分に保たれるとは限らず，筋肉で発生した熱量が体表面に運搬されずに中核部温は急速に上昇する．これは重症な高体温を招来する．皮膚への血液供給が十分でなくなると発汗機能も十分に発揮されなくなり皮膚表面の温度は低下しない．致命的な熱中症はこのような状況で発生する．

文　　献

1）Bevegard, B. S., and J. T. Shepherd(1966). Reaction in man of resistance and capacity vessels in forearm and hand to leg exercise. J. Appl. Physiol. 21, 123-132.

2）Brengelmann, G. L.(1987). Delemma of body temperature measurement in man. In Stressful Environments;Thermal and Work Physiology (K. Shiraki, and M. K. Yousef eds.), pp. 5-22, Charles C. Thomas, Springfield, IL.

3）Casternfors, J.(1977). Renal function during prolonged exercise. In The Marathon: Physilogical, Medical, Epidemiological, and Psychological Studies(P. Milvy, ed.). Ann. NY. Acad. Sci. 301, 151-159.

4）Ekelund, L.-G.(1967). Circulatory and respiratory adaptation during prolonged exercise. Acta Physiol. Scand. 70(Suppl. 292), 1-38.

5）Fortney, S. M., C. B. Wenger, J. R. Bove, and E. R. Nadel(1983). Effect of blood volume on forearm venous and cardiac stroke volume during exercise. J. Appl. Physiol. 55, 884-890.

6）Hanke, D., M. Schlepper, K. Westermann, and E. Witzleb(1969). Venentonus, Hautund Muskeldurchblutung an Unterarm und Hand bei Beinarbeit. Pflugers Arch, 309, 115-127.

7）Johnson, J. M., and L. B. Rowell(1975). Forearm skin and muscle vascular responses to prolonged leg exercise in man. J. Appl. Physiol. 39, 920-924.

8) Johnson, J. M., L. B. Rowell, and G. L. Brengelmann (1974). Modification of the skin blood flow-body temperature relationship by upright exercise. J. Appl. Physiol. 37, 880-886.

9) Nielsen, M. (1970). Heat production and body temperature during rest and work. In Physiological and Behavioral Temperature Regulation(J. D. Hardy, A. P. Gagge, and J. A. J. Stolwijk, eds.), chapt. 14, pp. 205-214, Charles C. Thomas, Springfield, IL.

10) Rowell, L. B. (1983). Cardiovascular adjustments to thermal stress. In Handbook of Physiology. The Cardiovascular System Peripheral Circulation and Organ Blood Flow(J. T. Shepherd and F. M. Abboud, eds.)sect. 2, vol. III, part 1, chapt. 27, pp. 967-1023. American Physilolgical Society, Bethesda, MD.

11) Rowell. L. B., G. L. Brengelmann, J. R. Blackmon, R. D. Twiss, and F. Kusumi (1968). Splanchnic blood flow and metabolism in heat-stressed man. J. Appl. Physiol. 24, 475-484.

12) Rowell, L. B., J. A. Murray, G. L. Brengelmann, and K. K. Kraning II (1969). Human cardiovascular adjustments to rapid changes in skin temperature during exercise. Circulation Res. 24, 711-724.

13) Rowell, L. B. (1986). Adjustments to up-right posture and blood loss. In Human Cirulation Regulation during Physical Stress. pp. 137-173, Oxford University Press, Oxford, NY.

14) 佐川寿栄子, 白木啓三 (1991). 目的にかなった深部体温はどのようにして測定できるか？臨床体温, 11, 17−28.

15) Shiraki, K., N. Konda, and S. Sagawa (1986). Esophageal and tympanic temperature responses to core blood temperature changes during hyperthermia. J. Appl. Physiol. 61, 98-102.

16) Shiraki, K., S. Sagawa, F. Tajima, A. Yokota, M. Hashimoto, and G. L. Brengelmann (1988). Independence of brain and tympanic temperatures in an unanesthetized human. J. Appl. Physiol. 65, 482-486.

17) Wenger, C. B., and M. F. Roberts (1980). Control of forearm venous volume during exercise and body heating. J. Appl. Physiol. 48, 114-119.

5．運動時熱中症予防のための環境温度の測定方法の検討

報告者　　中井　誠一[1)]

はじめに

スポーツが盛んに行われることと関連して運動時熱中症の発生も跡を絶たないのが現状である．高温環境下での運動時には熱中症発生の危険性が増加するだけでなく運動能力が低下する．夏季において陸上競技の競技会が開催されることや，高等学校野球大会が開催されるなど，体育スポーツ活動が盛んに行われるので，熱中症などの暑熱障害の発生が懸念される．

運動時熱中症は環境温度に対応した適切な予防措置により予防可能である[4,5,6)]．そのためには運動場の環境温度を適切に評価することが重要である．本稿においては運動時熱中症予防のための環境温度の測定方法，特にWBGTの測定について検討した．

1　温熱環境の評価

温熱環境の評価について，松岡[12)]は与えられた温熱環境の意味を組み取り，それに基づいてその環境の格付けをすることであり，具体的には環境・身体・精神を対象としてそれぞれ物理的・生理学的および心理学的方法を用いて測定されるとしている．

物理学的にみた人体と環境の間の熱収支は伝導，輻射，対流，蒸発の過程に依存している．その具体的な環境条件としては気温，気流，湿度，物体表面温度（輻射熱）があげられ，これら4つの環境条件の組み合わせが温熱環境を成していると言える[18)]．

2　温熱指標

温熱環境における人体の反応は上記4つの環境因子の影響を受けるので，こうした反応を単純化された温熱指標で表現することが試みられている．種々の温熱指標が提案されているが，運動時熱中症の予防措置に用いられているものは乾球温度，湿球温度，黒球温度およびWBGTである[19)]．

a　乾球温度（Dry－bulb temperature）は一般的に気温と称され，大気の温度分布から生じる気象現象との関連や寒暖の違いとして人間生活を支配する基本要素の1つとされている[15)]．しかし，これは気流，湿度，及び輻射の影響を反映しないので人体の生理学的反応の指標としては適当ではない[26)]．

b　湿球温度（Wet－bulb temperature）は乾球温度計の感温部をガーゼで包み水で濡らしてあるため，周囲の空気の湿度が飽和に達しないかぎり，その水分は蒸発を続ける．そのため水の気化による熱損失が起こり，球部の温度は低下して湿球温度を示す指標となる[21)]．

これらの乾球温度と湿球温度の測定には通常August温度計[13)]（図4）またはAssmann通風温度計[13)]図4）が用いられる．後者は気流と直射日光などの影響を取り除くためにニッケルメッキした金属でおおわれ，一定の気流（3.7m／sec）条件下で測定される．

c　黒球温度（Globe temperature）は黒球温度計（Globe thermometer）で測定される．これはVernon[25)]により考案されたもので，銅の薄板で作った中空の球体をつやけしの黒塗りにし，球部の中心に棒状温度計の感温部が達するように挿入したものである．大きさは直径6 inch（Vernon原型）と3 inch（石川改良型）がある[13)]．これは輻射熱を測定するもので，黒球内部の空気が輻射熱により熱せられるため挿入された棒状温度計の示度を上昇させる．熱せられた黒球は環境空気に暴露さ

1）京都女子大学

れているので対流により冷却されて平衡状態になるが，このための時間として少なくとも15分間を必要とする．輻射熱の測定装置であるが合わせて気温及び気流の影響も受ける総合的な温熱指標[21]と言える．

d　WBGT（Wet－bulb Globe Temperature）は Yaglou と Minard[27]により提唱（1957年）されたもので，経験的な温熱指標[21]である．これは乾球温度，湿球温度及び黒球温度により以下の式[9,14,22,27]で算出される．

屋外で日射のある場合の算出式

WBGT＝0.7NWB＋0.2GT＋0.1NDB

室内で日光照射のない場合の算出式

WBGT＝0.7NWB＋0.3GT

ただしここで

NWB　：自然気流に暴露された湿球温度

GT　：黒球温度（6 inch 黒球温度計）

NDB　：輻射熱を防ぎ自然気流に暴露された乾球温度

である．

このように WBGT は人体の熱収支に係わる環境因子4つのうち気温，湿度，輻射熱の3つを取り入れたものである．黒球温度は輻射熱だけでなく気流の要素も含んでいるので，NWB,GT,NDB の3つの値で環境の4要素を積極的に取り入れていると考えられる．

その際，乾球温度および湿球温度は自然気流に暴露された温度計を用いることになっている．つまり前述の Assmann 通風温度計ではなく August 温度計による測定値を用いる．さらに乾球温度は直射の影響を取り除く必要があるので，筆者は感温部が日陰になるようにカバーを取りつけて測定している．

表1　湿球温度と WBGT による運動時熱中症予防対策

湿球温度	WBGT	運動種目，予防措置	著者
		フットボール	
15.6	16.6	対策必要なし	Murphy, et al., 1965
16.1	17.2	体重減少大の者注意	
18.9	20.8	水と塩を与える	
21.7	24.4	30分ごとに休憩	
24.5	28.0	練習を短縮する	
19.4	21.4	水と塩を与える	Fox, 1983
23.5	**26.5**	軍隊の訓練短縮	Yaglou, et al., 1957
24.5	**28.0**	長距離走（16 km以上）中止	米スポーツ医学会，1975
		テニス，サッカー，ホッケー，陸上	
23.5～25.1	**26.5～28.8**	未馴化の時は慎重に	McArdle, 1981
25.7～26.4	**29.5～30.5**	激しい運動は中止	
27.0～	**31.2～**	運動は中止する	
		長距離走	
～16.6	**～18.0**	障害の可能性あり，注意必要	Hughson, et al., 1983
16.6～19.9	**18.0～22.0**	障害の兆候に注意	
20.6～24.5	**23.0～28.0**	低速走，体調の悪い時走行禁止	
24.5～	**28.0～**	レースは中止	

ゴジックで示した温度は原著者により用いられた温熱指標である．この表では湿球温度と WBGT にそれぞれ比較し，統一的な表にしたものである[19]．

e　各種温熱指標による熱中症予防対策

乾球温度と相対湿度を指標としたものは，26.5～32.2℃で70％以上では1時間の練習で10分の休憩が必要とされている（Mathews, 1966）[10]．また，表1に湿球温度とWBGTによるこれまでに報告された運動時の熱中症予防措置を示した．表中ゴジックで示された温度がそれぞれの原著者により示された予防措置である．それをグラウンドの環境温度実態の測定から湿球温度とWBGTの対比ができるように統一的な表にしたものである[19]．Murphy と Ashe（1965）[15]は湿球温度を指標としてフットボールの予防措置を示している．WBGTを指標とした対策は Yaglou と Minard[27]が軍隊の訓練についての対策を示して以来1975年にはアメリカスポーツ医学会[2,3]が長距離走の熱中症予防措置を示している．その後 MacArdle（1981）[11]や Hughson たち（1983）[7]も予防措置を提案している．一方，労働衛生現場の予防措置として1983年に日本産業衛生学[22]が WBGT を温熱指標として採用している．また ISO[8]も1982にこの指標を採用している．このように温熱指標はいくつかあるが熱中症予防のための温熱指標としては WBGT を用いることがおおくなっている．しかしながら WBGT は主観的経験的指標であるので，運動時の生理学的反応との関係や熱中症発生との関係について更に検討する必要がある．

3　WBGTの測定

WBGT は前述のごとく乾球温度（NDB：natural dry bulb temperature），湿球温（NWB：natural wet bulb temperature），および黒球温（GT：globe temperature）から算出される．乾球温度と湿球温度は自然気流に暴露された状態で測定した値を用いる[9,14,22]．

黒球温度の測定は6 inch型の黒球温度計を用いる．

図1はアメリカ陸軍[1]で用いられているものをスケッチしたものである．図2，3，4は著者がグラウンドにおいて測定している写真である．乾球温度と湿球温度については前述の条件（自然気流を損わない，直射日光を遮る）を考慮して August 温度計（図4の写真では右端にみられる）を使用

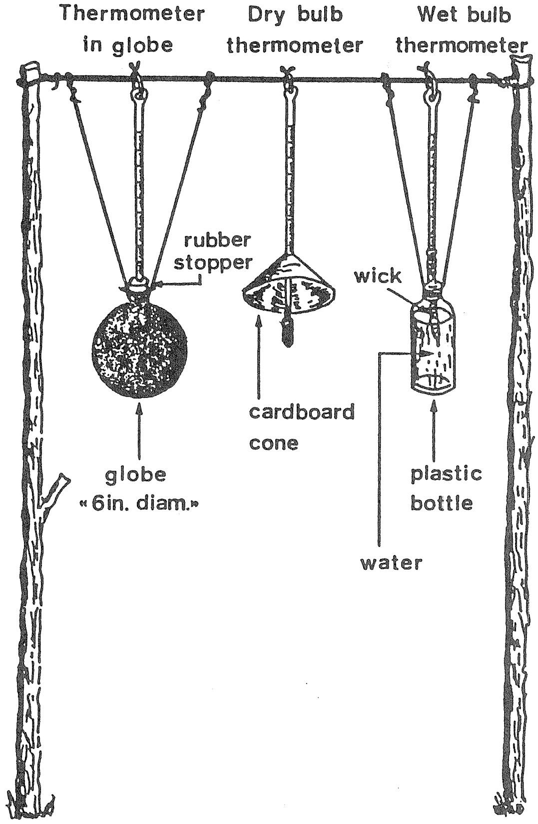

図1． 米陸軍で用いられている WBGT 測定装置[1]

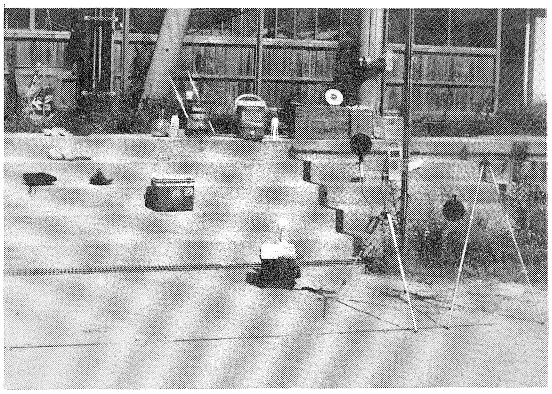

図2． グラウンドにおける測定風景　1

している．同じ写真の左端は黒球温度計であり，中央部は Assmann 通風温度計（小型）である．

測定装置はグラウンドの地上1～1.2mに置き，1時間ないし1時間半ごとに測定する．測定場所

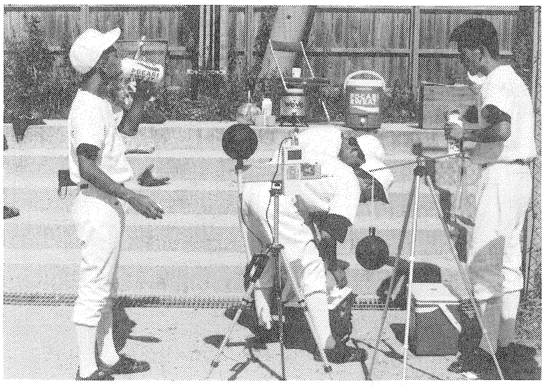

図３． グラウンドにおける測定風景　２

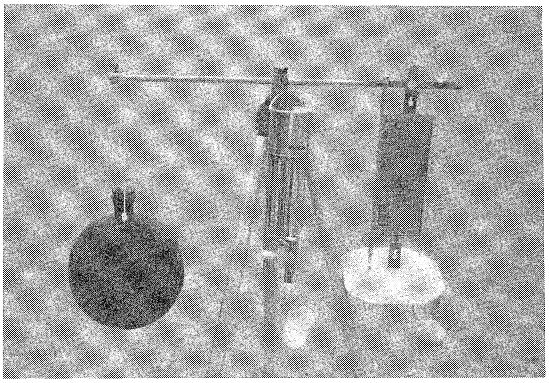

図４． WBGT の測定装置，左より黒球温度計，
Assmann 通風温度計，August 温度計

は，主としてグラウンドであるが，道路などで練習する場合は道路わきで測定することが望ましい．練習などの妨げにならない場所で，日陰にならないところに設置することが必要である．

4　WBGT－meter の検討

WBGT は４つの環境因子を取り入れた温熱指数で運動時熱中症予防のためには有効であることはすでに述べたが，その測定に当っては３種の測定値の読み取りと，さらに演算をする必要がある．また，湿球温度の測定には水の取扱いが必要である．

そこで，こうした煩雑さを取り除き WBGT をリアルタイムで演算算出し，かつポータブルな測定装置を試作した．

図５に今回試作した WBGT－meter の構成を示した．測定項目は空気温度，グローブ温度と相対湿度である．本器は水を使用せず湿度計により測定した湿度から湿球温度を求め，WBGT を算出することが特徴である．本来，乾球温度と相対湿度からだけでは湿球温度を一意的には決められない．しかし，３番目のパラメーターとして湿り空気の全圧力（P）を導入しＰの変化に対応する湿球温度の影響度を評価すると小さいので，相対湿度に対する乾球温度と湿球温度の関係から湿球温度を算出する．誤差は相対湿度が低い場合に大きくなるが，相対湿度10％の時において±0.3℃程度である．最も WBGT 値に対する湿球温度の寄与率が大きいが高温条件下では誤差は少ない．

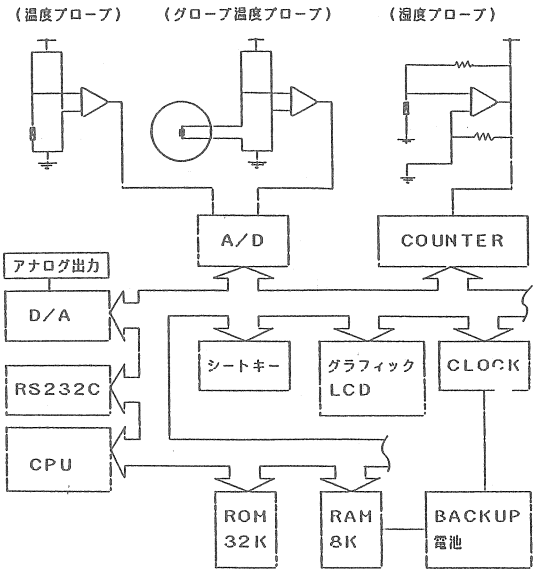

図５． WBGT－meter の構成

測定値は LCD により各測定項目をスイッチにより選択表示できる．表示の組み合わせは，Ａ測定日時と WBGT，Ｂ乾球温度，黒球温度，相対湿度，Ｃ乾球温度，黒球温度，湿球温度の３種画面の選択が可能である．また最大600データまで記憶可能のメモリーがあり，RS232C によりデジタル出力することもできる．また演算した WBGT をアナログ出力することも可能である．なお，装置の大きさは76(95)×213×36㎜，重量は本体600ｇ，プローベ部1.5kg，電源は単３電池６本を使用する．固定

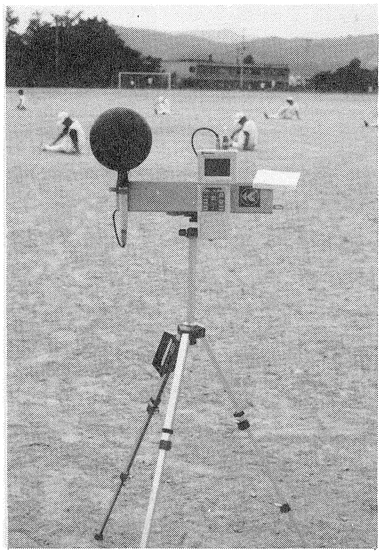

図6．グラウンドに設置した WBGT－meter

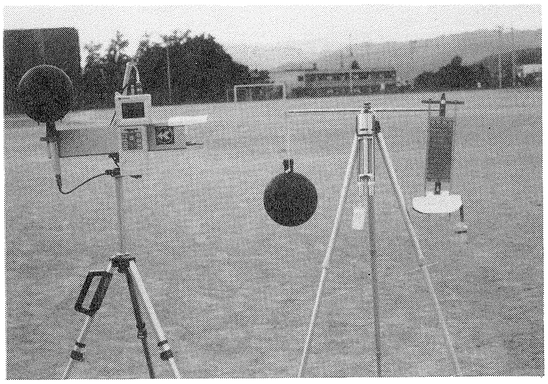

図7．グラウンドに設置した WBGT－meter と従来型の測定装置

用の三脚が別に必要である．

そこで，グラウンドにおける本器と従来型の装置の測定値について比較検討した．

図6，7は本器をグラウンドに設置した状態である．黒球温度は 6 inch の黒球温度計を用いた．湿度センサーは熱輻射に対して特異的に反応するので日陰を作るために被いを設置した．その際自然気流を損うことがないように注意した．

測定結果から各項目毎に WBGT－meter と従来型についての相関図を図8，図9に示した．図8上段は乾球温度，中段は黒球温度，下段は湿球

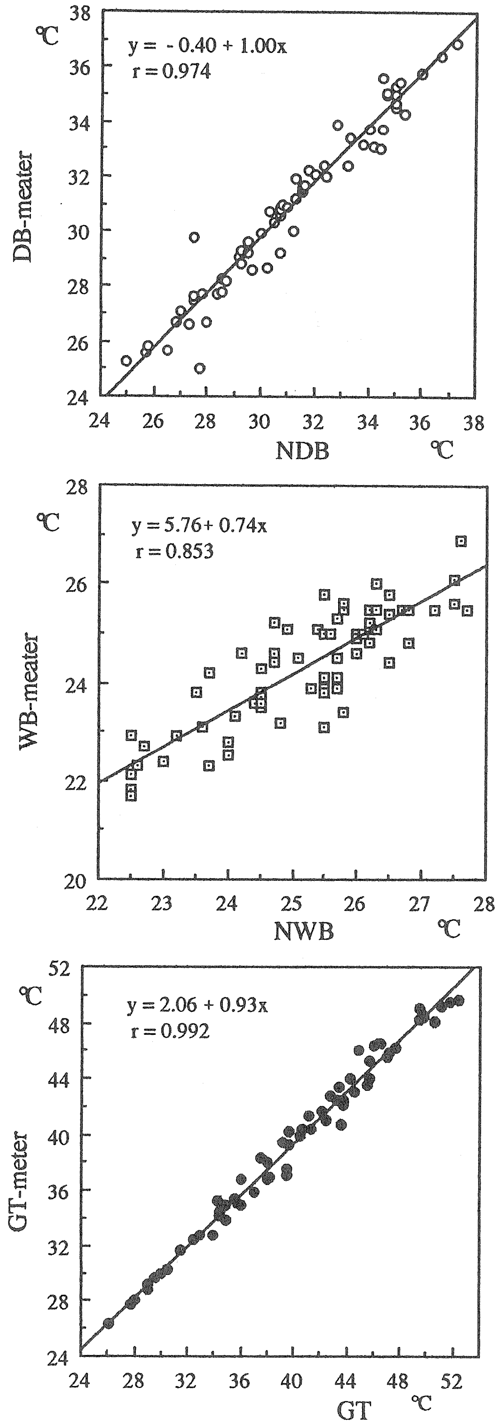

図8．WBGT－meter による測定値（縦軸）と従来型の測定値（横軸）の比較，上段は乾球温度，中段は黒球温度，下段は湿球温度

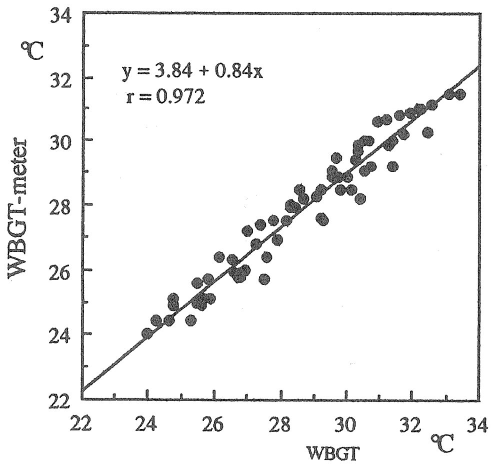

図 9. WBGT－meter と従来型の WBGT の比較

温度である．相関係数はそれぞれ0.1%水準で統計的に有意な直線関係が認められる．図 9 の WBGT についても同様に0.1%水準で有意な直線関係が認められる．しかしながら図 8 の下段に示した湿球温度については少々バラツキが大きいようである．測定温度範囲が湿球温度で22度から28度であり，22度より低温の範囲も含めてさらに検討することが必要と思われる．しかしながら演算された WBGT については従来型との相関関係が認められるので本装置の妥当性が示唆される．

5　夏季運動場の温熱環境の実態

熱中症予防のための環境温度の重要性についてはこれまで述べたとおりであるが，日本国内において夏季の運動実施時に環境温度の測定が実施されることは極めて少ない．特に黒球温度の測定はスポーツ現場には普及していないのが現状である．労働衛生においては古くから現場での測定が実施され，それをもとにして高温労働の許容基準が作成されている．

スポーツ場面における熱中症予防のための温熱指標も WBGT だけでなく湿球温度あるいは乾球温度と相対湿度で示される場合があり，統一されていないのが現状である[19]．

こうしたことから夏季運動現場の実態を把握することが必要と考えられる．運動現場は環境条件が極めて複雑であるので，その実態として一般化することは不可能であるが，一つの事例として資料を提供することも意義があると思われる．1981年より1988年まで数ヶ所において観察した資料をもとにして報告する．

a　測定方法

測定項目は乾球温度(NDB：Natural Dry Bulb Temperature)，湿球温度（NWB：Natural Wet Bulb Temperature)，黒球温度（GT：Globe Temperature）であり，これらの測定は前述（3 WBGT の測定)の方法に従った．さらに乾球温度，湿球温度について Assmann 通風温度計の測定値と比較するため同時に Assmnn 通風温度計による測定も実施した．

測定場所は1981年から1985年までは東京都世田谷区内の某大学グラウンドであり，1986年と1988年は京都市内の某大学グラウンドにおいて測定した[20]．

測定時間は運動選手がグラウンドにおいて練習を実施している時間内である．なお練習を実施していない日は測定を中止した．測定間隔は 1 時間ないし 1 時間30分ごとである．

b　測定結果

イ　グラウンド温度の実態

世田谷区内で測定した結果を図10（1984年）と図11（1985年）に示した．○印は湿球温度，▽印は乾球温度，▼印は黒球温度，●印は WBGT である．

黒球温度（▼印）は毎日高温を示し，35度以上が続いている．1981年から1985年までに280例の測定値が得られたが，各温度指標の最大値は乾球温度37.5℃，湿球温度28.0℃，黒球温度52.3℃，WBGT33.2℃であった．輻射熱の指標である実効輻射温度（黒球温度と乾球温度の差）を算出すると最大値は，17.5℃（平均7.5±4.1℃）である[20]，輻射熱が大きい環境であることがわかる．

京都市内で1986年と1988年に観察した結果は図12[20]に示した．これはアメリカンフットボールチームの練習時に観察したものである．それぞれの最大値は，乾球温度39.5℃，黒球温度57.0℃，WBGT33.8℃であった．

アメリカスポーツ医学会は WBGT28℃以上では

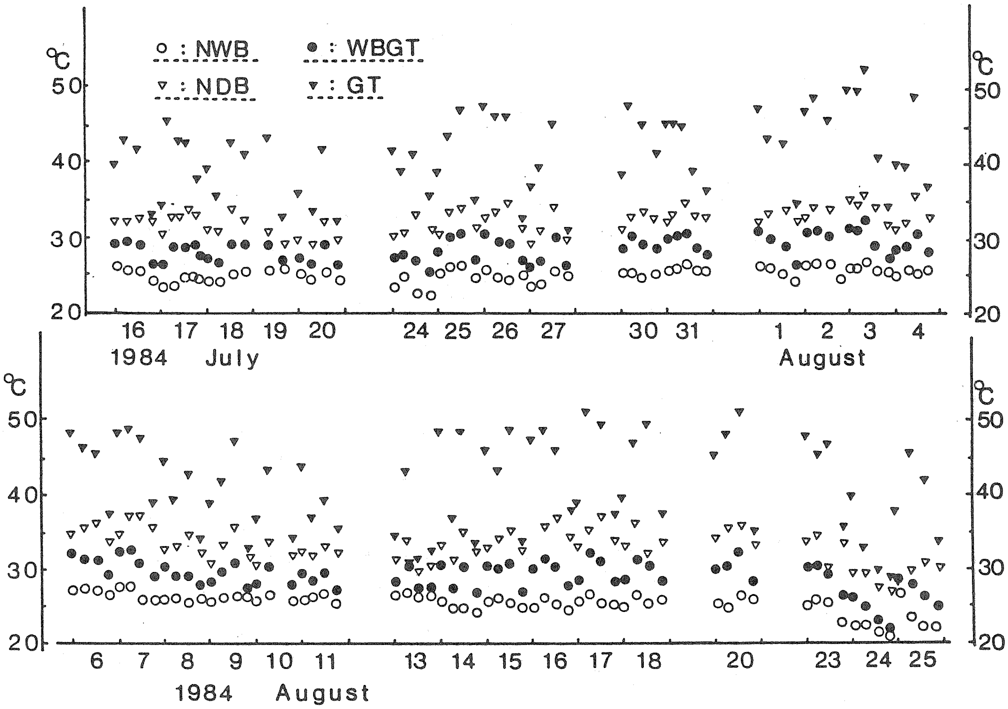

図10. グラウンド温度の変動，1984年，東京世田谷[19)]

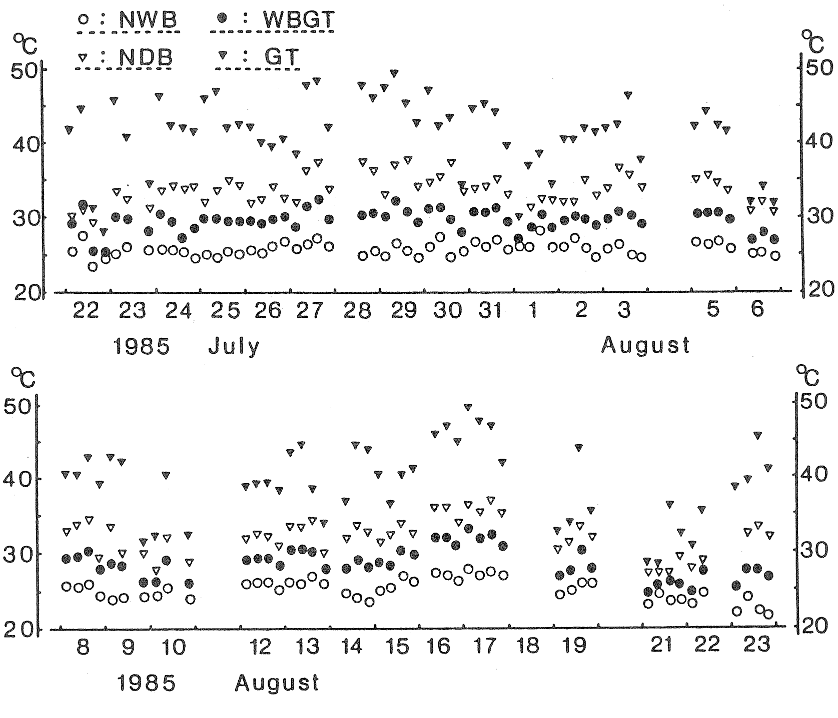

図11. グラウンド温度の変動　1985年，東京世田谷

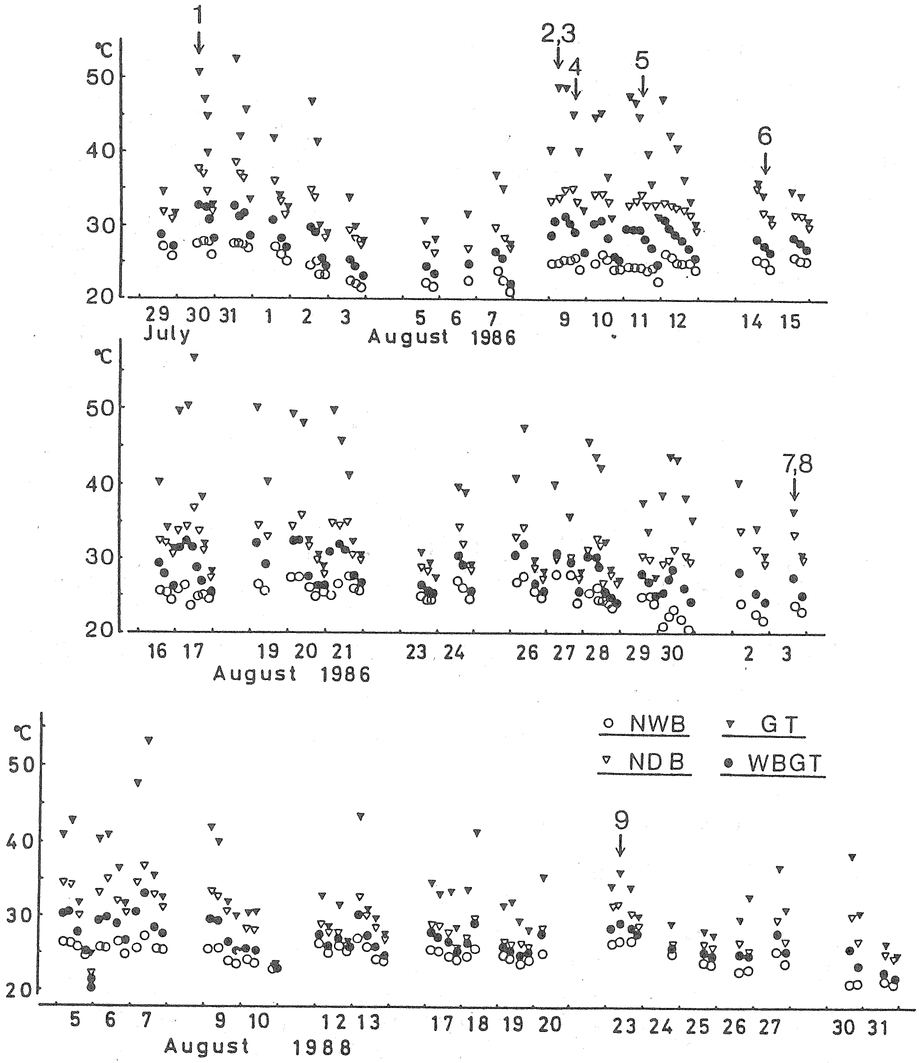

図12. グラウンド温度の変動　1986年，1988年　京都
1から9の数字と矢印は暑熱障害の発生を示す[20].

長距離走は中止するほうがよいとしている. また，MacArdle[11]は31.2℃以上は運動を中止するとしているが，実態としてはこのような温度条件で運動の練習が実施されている.

ロ　練習時の熱中症発生と環境温度

1986年と1988年に観察された練習中のグラウンドの環境温度（図12）の中に1から9までの数字と矢印は暑熱障害の発生を示している. 1986年に8例，1988年に1例合計9例の発生が観察された[20]. 1から9の矢印は強化練習開始第2日目と，練習を休み再び開始した日から1日目ないし2日目に示されている. さらに8月3日から7日まで平均温度が24.5℃（WBGT）と比較的低温が続いたのち8月9日はWBGTで30.7℃高温になり2例の発生を見ている. 前日8月8日の練習は休であり練習再開第1日目で，前述の条件と重複する日でもある.

障害発生時の最低温度は，WBGTで27.6℃(乾球温度33.5℃，湿球温度24.0℃，黒球温度37.0℃)であった.

これら9例の障害の症状は気分が悪いから入院による治療を受けたまでであった．医師が立会っていないので医学的な検査に基づく確定診断はしていないが高温環境下であり，その後の経過などから暑熱による障害との判断は妥当であると考えられる．

涼しい日が続いたのち高温（30.7℃：WBGT）になった日に発生していることおよび全てが1年生であること等の特徴は，暑熱障害の発生に暑熱馴化が関与していることが考えられる．

発生時の環境温度であるが，自衛隊での暑熱障害発生時の温度[23]は26.8℃から30.9℃（WBGT）である．Hughsonら[7]の大衆マラソン時の報告は気温24.3℃（1978年6月）と31.8℃（1978年8月）である．高橋ら[24]のマラソンレースで死亡事故が発生した時の気温は31.2℃と報告している．中井ら[17]は新聞に発表された暑熱障害事故時の温度を気象庁の観測資料に基づいて，気温25.0℃以上で発生していることを報告している．今回観察された暑熱障害発生時の温度はWBGTで27.6℃（乾球温33.5℃，湿球温24.0℃）以上である．高橋ら[24]の気温31.2℃をWBGTに換算する（WBGTと乾球温度の相関関係から算出）と28.0℃になる．

Hughsonら[6]による23.4℃，31.8℃はWBGTにすると22.8℃，28.4℃となる．中井ら[17]の報告した気温25℃以上はWBGTで23.4℃である．WBGTで22.8℃および23.4℃は他の報告例と比較すると低値であるが，22.8℃はWaterlooでのマラソン（1978年6月11日1250人参加，15人の障害発生）時であり，大会前6月の気温が17℃から21℃の範囲であったのが大会当日24.3℃となった．また，雲が少なくコースの温度は輻射熱によりもっと高くなっていたとしている．後者の23.4℃は4月（マラソン実施時）に発生した例で，発生前1週間の日平均温度の平均が13.7℃であり当日25℃以上（25.5℃，湿度74%）になったために発生したものと考えられる．またここで用いた温度はその地域の測候所で測定した値であり，事故発生現場での環境条件がより厳しかったと考えられる．

MacArdleら[11]は運動時暑熱障害予防措置としてWBGT26.5℃では，未馴化の時は慎重に運動するとしている．YaglouとMinard[27]は湿球温度23.5℃（WBGTにすると26.5℃）で練習を短縮するとしている．今回の観察で得られた温度では障害の発生危険率は極めて高い範囲であり十分予防対策が必要な温度条件である．また，これらの予防対策が必要な環境温度条件でも図2に見られる如く練習が実施されているのも実態である．練習時の温度条件に対する対策は当然のことであるが，環境条件の変動，暑熱馴化に関する要素について十分考慮する必要がある．Wyndham[28]は1週間25.0℃（WBGT）が続くと暑熱障害の発生危険率が高いのでレースを中止するほうがよいとしている．このような環境条件の一定期間の経過を考慮することも必要であり，練習現場の環境温度を観察し，練習実施に対する対策とすることが必要であると考えられる．

ハ　WBGTと乾球温度，湿球温度の関係

熱中症予防措置を示す温熱指標として用いられているWBGTと湿球温度及び乾球温度の相関関係を図13に示した．図中湿球温度（NWB）は●印で，乾球温度（NDB）は○印で示した．

回帰式はそれぞれ，$Y=2.466+1.052x$，$Y=2.814+0.804x$で，それぞれの相関係数は0.957，0.961で高い相関が得られた．温度尺度同士であるので測定項目間に相関関係が認められるのは当然であるが，予防措置がそれぞれ独立の温熱指標で提案されているので，それらを比較するには温熱指標間の関係を明らかにしておく必要がある．WBGTと湿球温度及び乾球温度の間には極めて高い相関関係が認められたので，回帰式を用いて温熱指標の相互関係を比較することができる．また，黒球温度が測定されなくても湿球温度あるいは乾球温度からWBGTを予測することができる．

ニ　測定方法による乾球温度と湿球温度の差

グラウンドで環境温度を観察する際，測定方法に差があることはすでに述べた．気象観測においては気温と湿球温度はAssmann通風温度計を用いるのが通例であるが，WBGTの測定方法は自然気流に暴露された状態で測定される．今回グラウンドの実態を観察する際に2種の方法にて乾球温度と湿球温度を測定し，それらの関係について図14，15に示した．相関係数は0.970と0.976と高い相関が得られた．しかし図にみられる如く，自然

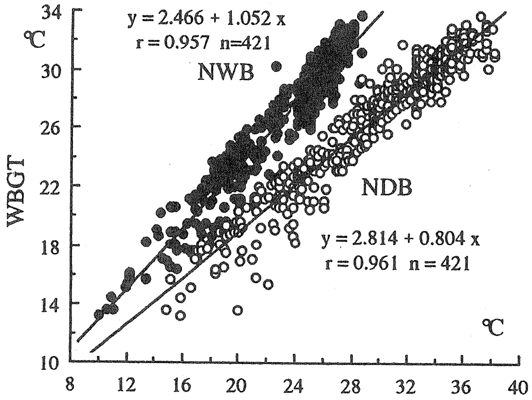

図13．WBGT と乾球温度及び湿球温度の相関

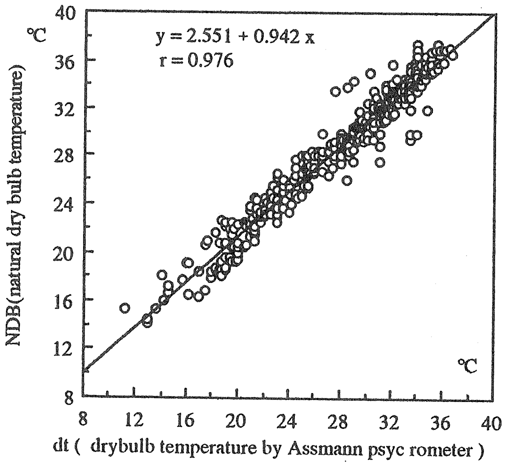

図14．Assmann 通風温度計と August 温度計による乾球温度の比較

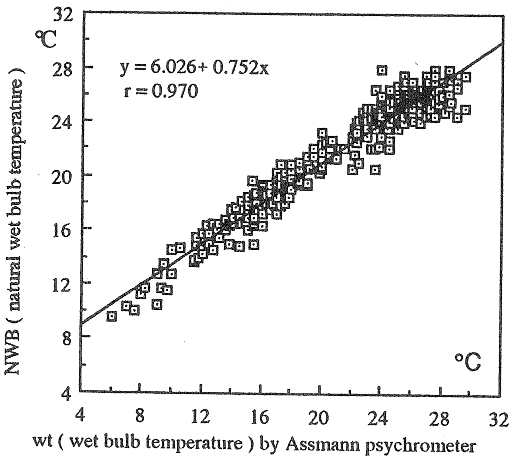

図15．Assmann 通風温度計と August 温度計による湿球温度の比較

気流に暴露された値が全体的に高値を示す．これは Assmann 通風温度計は輻射熱の影響を取り除くように装置が設計されている．また気流を一定にしていることがこのような差となっている．グラウンドにおいて環境温度を観察する際には測定方法による差を十分に考慮する必要がある．

6　気象台観測値とグラウンド温度との関係

新聞記事に運動時熱中症事故が報道される．発生時の環境温度は気象庁から発表される観測資料から推定することができるが，これらの温度はグラウンドの温度とは差が認められ，グラウンドの温度と気象台の観測値とを比較する必要がある．

グラウンド温度と気象台温度の関係が明かになると天気予報を参考にして運動場の環境温度が予測ができ，運動の際に予防措置を実行することができると考えられる．

そこで，数年にわたりグラウンドの環境温度の実態を把握してきた資料を基にして気象台で観測された資料と比較しそれらの関係について検討した．

a　方法

資料は1986年，1988年及び1989年京都市内の大学グラウンドにおいて測定したものである．気象台資料は京都地方気象台地上気象観測日原簿によりグラウンドでの測定日及び時間の気温，相対湿度を閲覧した．

グラウンドの資料は August 温度計による乾球温度（NDB），湿球温度（NWB）及び黒球温度（GT）である．これらから相対湿度及び WBGT を算出した．

一方京都地方気象台の気温（Td）と湿度（RH）から湿球温度（Tw）を次式（お天気相談所資料）により算出した．

不快指数（D.I.）＝0.81 Td＋0.01 RH（0.99 Td－14.3）＋46.3……………………………（1）

D.I.＝0.72（Td＋Tw）＋40.6 …………（2）

b　結果と考察

図16は1986年のグラウンド温度（○印）と気象台観測値（◆印）を示したものである．グラウンド温度が高値を示すとき，低値を示すときがあり一定の傾向を認めることはできない．図17は気象

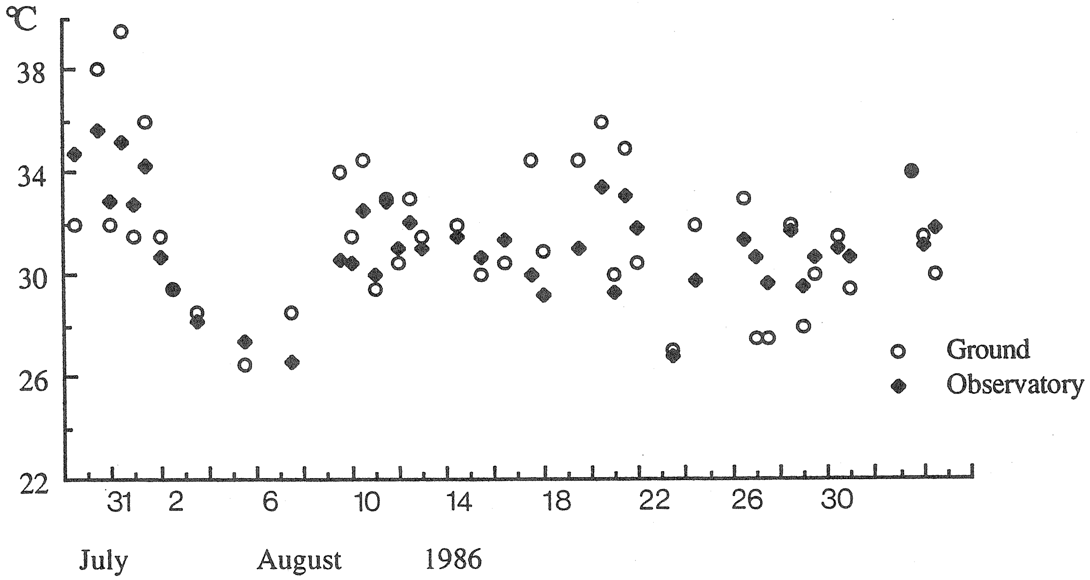

図16. グラウンドにおける気温（○印）と気象台観測の気温（◆印）の変動．1986年，京都市内で測定

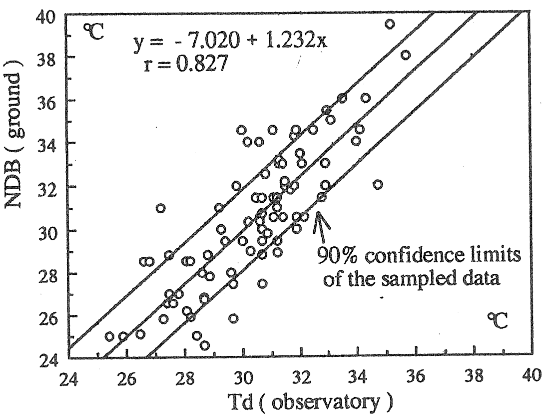

図17. 気象台測定の気温（Td）とグラウンドの乾球温度（NDB）の比較．回帰直線と90%信頼区間

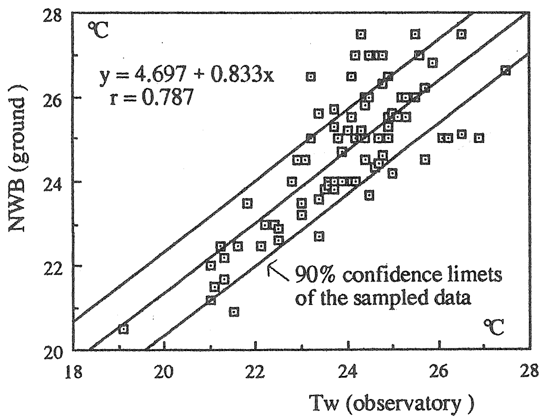

図18. 気象台測定湿球温度（TW）とグラウンドの湿球温度（NWB）の比較

台での気温（Td）とグラウンドでの実測乾球温度（NDB）の相関図である．回帰直線とともに90%信頼区間を示したが，気温31度以下の場合にはグラウンドでの乾球温度が低値を示し，31度以上では実測乾球温度が高値を示す傾向がある．90%信頼区間を越えるものについてグラウンドでの天候を見ると，信頼区間の上限を越える場合は14例，全て晴れのときであり，信頼区間の下限を越えるものは11例中６例までが曇り，雨または雨の後である．図18は湿球温度の相関図であるが，図17と同様に回帰直線と90%信頼区間を示した．信頼区間を越えるものは，上限で11例，下限で10例ある．上限を越えるものは11例中２例だけが曇りで残りは晴れのときであり，下限を越えるものは10例中７例までが曇りのときである．

気象台観測値とグラウンドの測定値との差につ

いて，乾球温度および黒球温度との相関図を図19に示した．上段はグラウンド温度と気象台観測値の差を示したが一定の差はみられない．下段に示した黒球温度との差は相関関係がみられる．つまり気象台温度とグラウンドで測定した温度との差は黒球温度即ち輻射熱の影響を受けていることになる．特に31度以上では気象台観測値よりグラウンド温度が高値を示す．

図20は湿球温度について黒球温度の関係を示したものである．湿球温度について気象台の測定値とグラウンドの温度の差は一定の傾向はみられないが，黒球温度とでは相関関係が認められる．乾球温度と同様に輻射熱の影響をグラウンドでは受けていることになる．このように気象台の観測値とグラウンドでの測定値の差は輻射熱が関与していることになる．気象台では輻射熱の影響を取り除いて測定しているのでこの結果は当然であるが，気象台の資料を利用する際にはこの点について注意する必要がある．特に晴天の場合は輻射熱の値が大きくなるので生体影響についても十分考慮する必要がある．

おわりに

運動時熱中症予防に関する対策は１．水分塩分の補給，２．高温馴化，３．運動・着衣・環境の組み合わせによる限度に対する認識[6]によって行われる．この際グラウンドの環境温度条件を適切に評価することは極めて重要なことである．温度の測定は測定装置，測定方法によりその値は大きく変化する．

運動時の熱中症予防措置を検討する研究の一端として，温度条件の測定方法について，著者の経験を基にいくつかの事例を紹介した．

健康作りを目的とした体育・スポーツを実施す

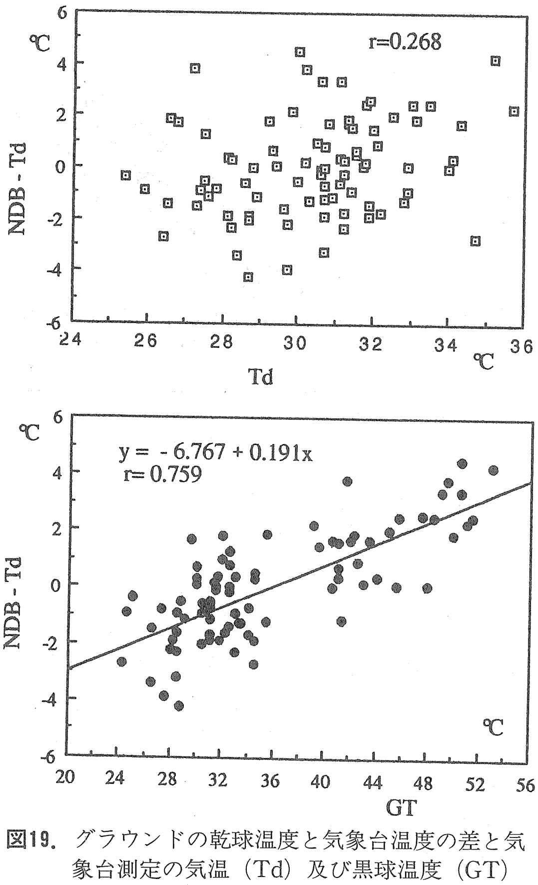

図19． グラウンドの乾球温度と気象台温度の差と気象台測定の気温（Td）及び黒球温度（GT）の関係

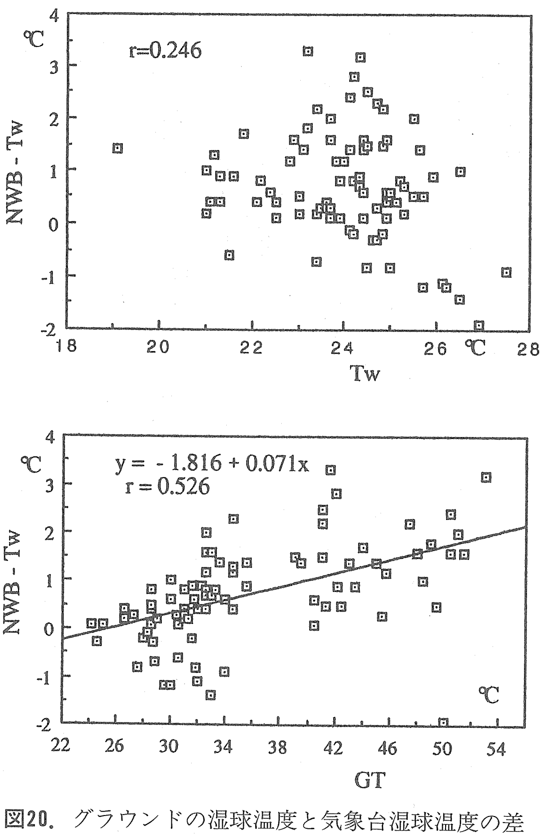

図20． グラウンドの湿球温度と気象台湿球温度の差と湿球温度（Tw）および黒球温度（GT）

る中で全く逆の現象である障害の発生率が減少することの礎になれば幸いである。

本報告の作成に当り寄本明滋賀県立短期大学保健体育学助教授の協力を得た。また森本武利京都府立医科大学第一生理学教授には指導と校閲を賜った。ここに記して感謝の意を表す。

文　献

1）Academy of Health Sciences, U S Army (1972) Millitary Sanitation, Study Guide, 516, 158.

2）American College of Sports Medicine (1975) Prevention of heat injuries during distance running. Med. and Sci. in Sports, 7(1), vii−viii.

3）American College of Sports Medicine (1984) Prevention of thermal injuries during distance running. Med. and Sci. in Sports and Exercise, 16(5), 427−443.

4）deVries, H.A. (1986) Physiology of Exercise for Physical Education and Athletics. 4th Ed., Brown, Dubuque, Iowa, 511.

5）Fox, E.D.(1983) Sports Physiology. 2nd. Ed. Holt−Sanders, Japan, 326−328.

6）Fox, E.D., & Mathews, D.K. (1984) The Physiological Basis of Physical Education and Athletics. 3rd. Ed., Saunders, New York, 476−479.

7）Hughson, R.L., Staudt,L.A., & Mackie, J.M. (1983) Monitoring road racing in the heat. Physician and Sports Medicine, 11(5), 94−105.

8）International Organization for Standardization (1982) Hot environments estimation of the heat stress on working man, based on the WBGT index. ISO Ref. №7243, 1−8.

9）肝付邦憲（1983）職場における高温の許容基準案（昭和57年度日本産業衛生学会の暫定値）に求められる測定法の解説．労研維持会資料，№984．

10）Mathews, D.K. (1966) Recognition and prevention of heat stroke. Mich. Osteopathic J., 31(8), 10.〔Klafs, C.E.,& Arnheim,D.D.(1981) Modern Principles of Athletic Training. 5th. Ed.,MosbyCompany, St.Louis, 535−539.より引用〕

11）McArdle, M.D.,Katch, F.I.& Katch, V.L.(1981) Exercise Physiology−Energy, Nutrition, and Human Performance−, Lea & Febiger, Philadelphia, 350.

12）松岡脩吉（1989）熱環境評価の考え方，人間−熱環境系，人間−熱環境系編集委員会編，日刊工業新聞社，東京　345−352.

13）松岡脩吉，田多井吉之介（1966）環境衛生測定法，第８版，南江堂，東京，7−9.

14）三浦豊彦（1982）労働衛生についての最近の話題．労研維持会資料，№948.

15）Murphy,R.J. & Ashe, W.F.(1965) Prevention of heat illness in football players. JAMA, 194(6), 180−184.

16）毛利茂男（1974）気象観測の手引き，気温の観測，日本気象協会，東京，55.

17）中井誠一，高野清江，伊藤孝（1981）運動時の暑熱障害発生と気象条件，保健の科学，23(3)，205−208.

18）中井誠一（1983）夏季運動時の温熱環境と温熱ストレス，日本体育大学紀要，12，85−91.

19）中井誠一，寄本　明，森本武利（1990）夏季運動時温熱環境の実態と温熱指標の比較，体力科学，39(2)，120−125.

20）中井誠一，寄本　明，岡本直輝，森本武利(1991) 運動時の暑熱障害発生と温熱環境の関係−グラウンドの温熱環境の観察から−臨床スポーツ医学，8(1)，41−45.

21）西　安信（1983）人体と環境の熱交換，温熱生理学，中山昭雄編，理工学社，東京，33−72.

22）日本産業衛生学会（1983）許容濃度等の勧告．産業医学，25，288−305.

23）野沢福巳，岡本昌一，岡田芳明（1988）暑熱障害について，救急医学，12，(5)，569−576.

24）高橋潔，岡邦行，佐藤正，後藤勝博，佐々木寿子（1978）マラソンと熱射病について−２冒険例の検討−，医学のあゆみ107(12)，782−784.

25）Vernon, H.M.(1932) The measurement of radiant heat in relation to human comfort. J. Ind. Hug. 14, 95−111.

26）渡辺厳一（1971）基礎環境衛生学，温熱環境，朝倉書店，東京，26

27）Yaglou, C.P., & Minard C.D. (1957) Control of heats casualities at milltary training. Am Med. Ass. Archs. Ind. Health ,16,302−316.

28）Wyndam,C.H(1977) Heats stroke and hyperther mia in marathon runners, Ann. NY Acad. Sci., 301, 128−138.