輻射熱の体熱収支に及ぼす効果

Thermal Balance to Heat Radiation

慶応義塾大学医学部衛生学公衆衛生学教室

倉 田 正 一

Masakazu Kurata

Department of Preventive Medicine and Public Health, School of Medicine, Keio University

生体の内部環境の恒常性維持，ここでは体温の恒常性維持を前提として考える時，代謝，蒸発，輻射，伝導，対流等の物理化学的諸因子が，産熱放熱のため，主として気温の変動に対して果す役割は，C. Winslow 等の *Partitional Calorimetry*¹⁾ 以来急速な発展を示した方法論的分析の適用によって，かなり事情が明らかになってきている。しかし一方，外部温熱条件の変動は特殊な輻射熱による場合がなかなか多い。これは産業職場に限らず日常我々の家庭生活にも広く存在するのである。壁や天井や床の輻射暖房²⁾ は別としても，ストーブ類による採暖法はまだ当分我々の身边を去りそうもない。この場合，我々は着衣下で軽い仕事をしているのが普通である。従つて，熱平衡維持のための産熱放熱に関する諸因子の動きは，裸体時と異なつて非常に複雑であろうことは想像に難くない。体表面の温度を考えてみても，輻射熱に直面する皮膚面または軽い衣服下皮膚面の温度上昇は当然としても，輻射熱源に直面しない部位の皮膚温は熱平衡維持という生体の目的に向つてどのように動いてゆくであろうか。衣服下皮膚部，露出皮膚部によつても

その態度は異なるであろう。しかしこの複雑な状態こそ我々の日常遭遇している姿なのである。

元来，外部温熱条件のうち輻射熱単独の生理的な効果については記載が少なく，特に身体前面といつたある一方向から輻射熱を受けた場合の熱平衡の様子は不明といつてよい。最近著者は，実験室で日常の衣服を着て軽い作業をしていて熱平衡状態にある被検者や裸体横臥時の被検者の前面から一定の輻射熱を負荷して(第1図)，その際みられる産熱放熱に関する諸因子の動きを，季節を追つて測定した。実験成績の詳細については各々実験担当者が別に記載するが³⁾⁴⁾，ここでは熱平衡状態にある生体に及ぼす輻射熱の一般的な効果について検討してみたいと思う。

1. 身体熱平衡に関する諸因子計算の基礎

衣服を着て軽い作業をしている生体が前面から輻射熱を受けるといふ本実験のような場合に，体温の恒常性維持のために当然生体がとるべき産熱放熱に関する諸因子の動きを考えてみよう。まず生体の熱収支のうちでプラスに働く因子は，代謝による産熱(M)と場合によつては，輻射(R)，対流伝導(C)による環境からの侵入熱量であろうが，M以外はの場合複雑な関係にあると考えられる。即ち，直接照射を受けている部分からはRによつて熱が身体内に入ってくるであろうが，直接照射を受けていない背面等の皮膚からは，皮膚温や湿度にもよるが，Rによつて熱が出てゆくし，全体表面とも多くの場合Cによつて熱が出てゆくであろう。また，直接輻射熱を受けている皮膚面でも，輻射源のもつ波長よりもつと長波の熱線が例えば床の表面との間で熱交換を行うであろう。いずれにしても，以上の $M+R+C$ が熱収支の考えうるプラス側ということになる。これだけは生体にとつて何とかして放散しなければならない熱量となる。

これに対するマイナス側は，RやCも参加する場合はあろうが，この実験では大部分は蒸発(L)が主役を演

第 1 図

男子学生14名

着 衣

冬 → 夏

球温度 44~60°C

自転車エルゴメーター

80回/分 1kg 負荷

100回/分 2.2kg 負荷

ずるであろう。この蒸発による放熱量を律するものは、皮膚粘膜と空気の物理的な蒸気圧の差並びに気流であつて、主として皮膚温、気温がさらにこれを規定することになる。従つて蒸発によつて放散しうる最大熱量は、これらの因子によつて自ら決つてしまう。生体の発汗には制限のあることでもあり、放散しなければならない熱量がその時の「蒸発によつて放散しうる最大熱量」を超過すると平衡は破れて遂には耐えがたいものとなつてくる。著者の実験では数例を除いてかかる状態はみられなかつたが、産業高熱職場ではかかる状態がしばしば出現するわけである。なお、放熱に関する上述の気温、周囲物体温、皮膚温、皮膚並びに大気蒸気圧、気流等因子のほかに、放熱面積従つて姿勢や衣服が熱放散に大きな影響をもつてくることは当然である。

さて、以上の実験条件下の熱収支をいかなる方法でみたらいだろうか。John B. Pierce Laboratory of Hygiene で発展を示したように、個別的に因子を計算して求めたいところである。しかしこの方法は彼等も述べているように⁹⁾、身体の一側からくる輻射や気流の影響については触れておらず、彼等の導いた実験式を使用することはできない。もつとも、大阪労研¹⁰⁾は産業職場の熱環境の強さを、Winslow 等の熱平衡実験式を使用して、熱収支の総決算としての熱貯蔵量 S の大きさをみてゆくことを述べて輻射熱職場にも適用している。即ち、 $M - L \pm R \pm C = \pm S$ の M, L, R, C を計算して S を知つて、 $S = 0$ よりプラス側になつた時の S の大きさに意味をもたせているのである。しかし著者は、元来 S の値は三浦等の算出しているような $200 \text{ Cal/m}^2/\text{hr}$ といった大きな値¹¹⁾ がどうして生ずるのか疑問に思つている。試みに体温が 1°C 上昇した場合の S を計算してみると、体重 55 kg として、身体の比熱を Du Bois に従つて 0.83 とすれば約 $50 \text{ Cal/m}^2/\text{hr}$ となるにすぎず、代謝や蒸発による熱量に比べると問題にならない。 200 Cal という直腸温が約 4°C 上昇することになる。もつともこれは、身体の熱を直腸温で代表させた場合であつて、全身の皮下 1 cm 位までの熱を皮膚温で代表させるとすれば $1/5$ (Du Bois) は皮膚温に帰せられるから直腸温としての上昇度は減少するであろうが、冷却時と異なつて、皮膚温と直腸温の差はさほど大きいとは考えられないから¹²⁾、直腸温で代表させても大差なかろう。また、三浦は M, L, R, C の加減によつて計算した熱貯蔵量 S から体温上昇に要した熱量を差引くべきだと述べているが、それでは S は一体何なのか理解に苦しむ。 M, L, R, C から計算された S が即ち体温上昇となつて現われてくる

のではないだろうか。それが直腸温で現わしうるかどうかはまた別問題である。もし、直腸温上昇から計算される熱量と M, L, R, C から計算された熱量がはなはだしく異なる場合は、体温の代表として直腸温をとることが不適当なためか、あるいは個別的に M, L, R, C を計算するについて含まれる多くの仮定の上に積み重ねられた誤差 (計算の精度から当然予想される) をみていることになるのではないだろうか。ただし、直腸温の高さは、三浦のいうように、安静時を基準とすることはできないことは勿論で、Berggren 等⁸⁾は筋肉運動後 $40 \sim 50$ 分で体温があるレベルに落ち着くと酸素消費量と体温はよく相関するといつており、気温についても同様であろう。実験開始はこの時期を選ぶべきであつて、体温があるレベルに落ち着かないうちに早期に実験を始めて、熱平衡式から各因子を算出することは適当とは考えられない。大きな S 値はこの辺に原因の一半があるのではなかろうか。

とにかく、Winslow 自身が著者の試みんとする一面輻射の影響については実験していないのであつて、彼の実験式から各因子について個別的に特に輻射の効果だけを見ることは危険であり、最近 Belding, Hatch 等の提唱している Heat Stress Index⁹⁾¹⁰⁾にしてもやはり同様の関係にある。即ち、 R, C 両因子を彼等は次の式から算出している。

$$R = 22 (t_w - 95) \\ C = 2 \sqrt{V} (t_a - 95)$$

ここに壁温 (t_w)、皮膚温、気流 (V)、気温 (t_a) が関係しているが、実験式の基礎となつている人体はいわゆる standard man であつて、健康男子で体表面積 20 平方フィート、身長 5 フィート 8 インチ、体重 154 ポンドで裸体となつており、平均皮膚温は 95°F と仮定している。熱負荷の程度を指標化するには、このような標準化は避けがたいし、Belding は兵士に適用してよかつたと著者に語つたが、少なくとも著者等の実験目的にはこのように R, C を個別的に扱うにはあまりに複雑である。例えば皮膚温は、輻射に直接曝される部位と背中では大差があろうし、運動によつて熱分布状態も変つてくるであろう。気流にしても、運動によつて生ずる相対的な気流、衣服と体動による気流変化を考えると、単なる外部環境気流とはかなり異なつたものとなるであろう。

さて、輻射や対流の動きを個別的に求めることができなければ、残る方法は、熱平衡式を基礎として測定可能なものの値から算出することである。即ち、代謝による産熱、蒸発による放熱量の差から輻射対流の効果を求め

ることになる。幸い、E. Adolph は太陽直射下の砂漠熱地行軍兵士について熱出納を調査して¹¹⁾、環境からの熱侵入として Environmental heat gain (E)¹²⁾を用いている。前述のように、外部から体内に侵入してくる熱(R+C)と体内で産生される熱(M)に対抗して熱の平衡を維持してゆくための放熱因子は蒸発(L)である。即ち、

$$L = M + E \pm S \cdots (1)$$

ここで Environmental heat gain (E) は環境から侵入してくる熱の合計であつて、勿論RやCがその中に含まれる因子であつて、著者等の実験の場合、前述のように直接輻射熱に曝されている前面からは輻射による熱侵入、背面では輻射による熱放散、対流による熱放散等々輻射対流によつて出入する熱の総決算として差引結局体内へ侵入すると計算される熱量と考えてよい。この方法によれば、RやCを個別的に計算する危険はなく、誤差も最小に止めることができるであろう。E. Adolph は(1)式から

$$E = L - M \pm S$$

彼はEを熱環境の烈しさを現わす一つの指標として用いている。著者はこのEを用いて、前面からの輻射熱が実際に被検者に対して熱の侵入となつて効いてくる時即ち、 $E = 0$ ($L = M$) として作用するところを知り、前面輻射のない場合とどれほどの差があるかをみることにしたのである。

Lは体重減少量に付着汗量の補正を加えてこれに蒸発潜熱0.56 Cal/g を乗じて求め、Mは呼吸分析から、Sは体重に比熱0.83 (Du Bois) を乗じてこれにさらに体温変化を乗じて求めた。

2. 輻射熱の体内侵入

上述のEを算出するためには、まずM, L, Sを観察しなければならない。第2図は、自転車エルゴメーター1分間80~100回転、負荷1~2kgの労作を課した時の体内代謝による産熱量を、輻射熱を与えない場合と比較したものである。これによると、代謝は輻射熱によつて上昇を示している。即ち、同気温、同作業下において、輻射熱のない場合に比べておよそ16~33%の増加を認めたのである。元来、代謝による産熱は温熱因子とは独立して主として筋肉活動によつて決つてくるものである。しかし気温が非常に高い場合には安静時酸素消費量が高まることは一般に知られている¹³⁾¹⁴⁾。本実験では気温による代謝亢進は明らかでないが、輻射熱による亢進は明らかである。ただ、4, 5月に測定したもの

第2図 代謝と室温

自転車エルゴメーター 80回/分 1kg 負荷

自転車エルゴメーター 100回/分 2.2kg 負荷

に輻射熱を負荷しない時とほぼ同値を示したものがあつた。これは測定が冬から夏にわたつたため現象を複雑にしてしまつたと考えられるのであつて、この4, 5月にみる代謝亢進の減弱は、かつて著者¹⁵⁾が手背からの不感蒸泄水分量を季節を追つて観察した際に、4, 5, 10月に異常な低値をみたのと何か関連があるように思われるのであつて、生体のもつ刺激に対する反応性に何か季節的な弾力性の差を感じるのである。原島¹⁶⁾は自律神経緊張度を血液成分を通じて季節的に観察した場合、4月並びに10月に交感神経、副交感神経緊張の移行があることを図示しているし、長屋¹⁷⁾は血清コリンエステラーゼ活性値が季節的に5, 10月頃大きく方向を変えて夏型、冬型に移行すると述べているので、この4, 5月の生理機能の変動は特別な目でみてもよいのではないかと考えるのである。

Sは、熱平衡が体温のある高さで安定している状態にあつては、さほど大きな値をとるべきではないことは前述した。実際、この実験では口腔温を通じてみた体温上昇は室温38°C以下では0.2~0.4°Cの上昇を示すにすぎなかつたが、室温がこれ以上になると1.0~2.0°Cの上昇がみられた。この場合は勿論熱平衡状態にはないと考えられる。これらの例を除けば、計算されたSはおおよそ5~30 Cal/m²/hrにすぎなかつたのである。

L (有効な蒸発による放熱量) については、気温上昇に伴つて汗量が増加することは当然であるが、前面からの輻射熱の負荷によつて同気温でもこの負荷のない時に比べて汗量は増加する。しかし、気温に対する発汗量

第3図 E, 口腔温, 脈搏と室温 (輻射のない時)

増加の率は輻射熱の負荷のない場合に比べて劣るようである。発汗率に個人差のあることは認められている¹⁸⁾。この場合にも相当な個人差を認めたが、最大 300 Cal/m²/hr を超えるものはなかった。

さて、以上のM, S, Lから目的のEを計算してみると第3, 4図のようになる。即ち、 $E=0$ を中心としてプラス側は生体への熱の侵入、即ち輻射対流によつて生体から放出される熱と、同じく輻射対流によつて侵入してくる熱を差引してみれば結局体内への熱侵入となつて現われてくることを示している。両図とも相当各点は散っているが、本図は気温との関係のみについてみたものであつて、気温はEに及ぼす一つの因子にすぎないからである。また各点は1人1回の実験結果であつて、被検者1人について季節の影響を除いて短期間に観察を進めればこれとは変つた形をとると考えられる。まず第3図の輻射熱を負荷しない状態で観察すると、 $E=0$ のところは、著者の実験条件では、気温およそ30°C付近にあるようである。この気温ではまた、口腔温が37°C台に入る即ち口腔温37°C台で熱平衡が維持されてゆく状態に入つてゆく点でもあり、脈搏もこの辺から増加の率を増していることは第3図に示す通りである。一方、輻射熱を

第4図 E, 口腔温, 脈搏と室温 (輻射時)

負荷した場合には、実験中口腔温上昇が1°C以上のものを除くと、 $E=0$ のところは少しく低気温側にずれておおよそ25°C付近となつている。この気温25°C付近から体温(口腔温)が37°C台となり、37°C以下の常温より一段高いところで熱平衡が成立つてゆくことを示しており、また脈搏の増加率も大きくなるのであつて、 $E=0$ からさらに熱の体内侵入への経過は口腔温や脈搏にとつても一つの変化の推移点として関連をもつていとみられる。

著者はかつて夏季の紡績工場について女子織布精紡作業者の身体熱出納を調べたことがある¹⁹⁾。勿論この場合の環境はいわゆる高温多湿であつて輻射熱は問題とするにたならぬ環境であつたが、しかし $E=0$ は湿球温度27°C付近にあつて、口腔温や脈搏がこの温度付近から大きな変化をみせたことは本実験と全く一致するのであつて、体内への熱侵入がここから始まるとともに、一段と強力な蒸発によつてこの熱を捨ててゆくが、しかも次第により高い体温のもとで熱平衡が維持されてゆくことを示しているといえるのである。

ただ、実験時間60分のうちに1°C以上も体温が上昇するということは、まだ一定のレベルに体温が着かぬ時

か、あるいは一定のレベルを保持できない即ち熱平衡が成立しえない状態と考えるべきで、かかる状態下でEを論ずることはできない。勿論 $M+E$ を放散するだけ充分なLは、常に許されるものではないからであつて、前述したように、理論的には $M+E>L$ 、即ち放散さるべき熱量がその時の蒸発によつて放散しうる熱量（皮膚と空気の蒸気圧差、気流、蒸発有効面積等によつて律せられる）を超過すれば熱平衡は破れ、体温の上昇度いかに、即ち身体に蓄積されてゆく熱いかんによつては耐えがたくなるわけである。本実験でもこのような数例に遭遇したのであるが、いわゆる高熱環境の忍限度といつた問題はEとは別で、指標は自ら別のものについてみるべきであり、ここでは全く触れない。

3. 前面からの輻射熱と体表面温度

熱負荷によつて皮膚への血液循環量の増加を、従つて皮膚の温度上昇をきたし、これによつて皮膚と環境の温度差を増大し、蒸気圧を高めようとするのは生体のもつ反応であろう。

しかし、輻射熱を前面から与えた場合には一般的熱負荷にみられる体表面温度分布とは異なつた分布を示すはずである。直接照射された部位の皮温が上昇することは当然であるが、その他の部位については、前記エルゴメーター実験条件下では次のような結果を得た。室温20°C付近では、胸部背面の肩胛棘部皮温は運動開始後下降を示して上昇がなかなか起らず、室温が30°Cを越すようになると初めて下降から上昇に転ずる。下腿後面も同様な傾向にある。しかし室温がさらに高い場合、例えば室温40°C付近では測定点温度（全身11箇所²⁰⁾は一齊に上昇をみたのである。下腿後面の皮温下降は、自転車エルゴメーターによる下腿運動の結果相対的に生ずる風速の冷却効果²¹⁾に主な原因があるのかもしれないが、背部の皮温下降は特異な現象といわねばならない。運動を開始してから25分後の肩胛棘部皮温は第5図に示すように、輻射熱の負荷のない場合に比べて低下し、従つて気温との差は小さくなるが、室温30°C辺でこの差がなくなっている。背面皮温下降現象については三浦²²⁾も裸体椅坐安静時室温28°C、実効輻射熱10°Cの場合に認めているのであつて、発汗が主役を演ずるものであろうと述べている。さて、元来輻射熱に対する皮膚温の反応性には部位的な差のあることが認められており、M. Bader²³⁾は気温15~24°C裸体時顔面を輻射熱加温した時手足では皮温上昇を認めたが背中、上腿、上膊には変化が認められなかつたと記載している。また、著者が冬季裸体横臥時前面から

第5図 輻射熱と肩胛棘部皮膚温

第6図 皮膚温分布

3月20日 D.B.T. 19°C T_a 37°C

23歳学生 裸体横臥

輻射熱を与えて全身の皮温の消長を観察した結果⁴⁾は、第6図のように背面皮温は物理的な冷却を思わせる直線的な下降を示し、輻射熱の影響が特に現われていない。しかもこの間、ヨード澱粉による Minor 法で汗滴の出現を調べると、胸部前面より少し遅れて横臥している生体の上半身にまず出現するのである。これらの事実から考えると、やはり背面は手足のように熱負荷に対して敏感に皮膚温にその変化を現わしえない部位と考えざるをえないのである。従つて第5図から類推されるように、肩胛棘部皮温と気温との差は、気温上昇に伴つて輻射熱を負荷しない場合と一致して直線状に小さくなってゆくであろうが、やがて発汗が輻射熱負荷のない場合より早く強く起つてくるので、これによる体温が大きくなってより早く気温との差を縮める。輻射熱負荷のない場合に

第 1 表 輻射と体表面積

23歳♂学生 身長 166.8 cm
体重 54.9 kg

乾球温度 17.0°C
球 温 度 37.0°C

身体区分	全 体 表 面		輻 射 面		非 輻 射 面		接 着 面	
	%	cm ²	%	cm ²	%	cm ²	%	cm ²
頭 部	4.3	698	1.2	193	2.3	372	0.8	133
顔 面 部	3.1	503	2.7	444	0	0	0.4	59
頸 部	2.4	390	0.5	82	1.2	197	0.7	111
上 膊 部	8.2	1331	3.4	553	2.5	412	2.3	366
前 膊 部	6.1	991	3.2	529	2.3	376	0.6	86
手 部	5.3	861	2.5	419	2.5	400	0.3	42
胸 部	16.6	2695	6.6	1064	8.4	1364	1.6	267
腹 部	8.1	1315	3.0	481	2.8	456	2.3	378
大 腿 部	25.3	4108	3.7	608	2.8	444	18.8	3056
下 腿 部	13.4	2176	5.8	940	6.3	1021	1.3	215
足 部	7.2	1169	2.3	362	4.4	726	0.5	81
合 計	100.0	16237	34.9	5675	35.5	5768	29.6	4794
平均皮膚温	31.0°C		33.8°C		28.3°C		30.9°C	

は、より高気温においてやがてこれと同じ現象が起つて、皮温と気温との差は気温上昇に対してゆるやかになつてゆくのであろう。

なお、前記裸体横臥実験で、全身の平均皮膚温度を面積比率の重みづけをして算出してみると、前面後面の複雑な皮温の動きにも拘らず、一定の気温下ではほぼ一定した値を示したのである。即ち熱平衡状態が成立していることが示されたのである。A. Burton によると、オーストラリアの土民中には冬厳寒にも拘らず裸体で焚火を囲んで横臥する習慣があるというが²⁴⁾、このことは種々な寒気馴化が成立していることは確かにしても、熱平衡から考えると、焚火という輻射源から身体前面に熱を取入れる反面には背面から放熱し、両者のバランスがとれていることを物語っている。また、著者の実験例について、輻射受熱面積と輻射熱を直接受けていない面積とが第1表のようにほぼ等しくなっており、皮膚と床との接触面からの放熱も考えねばならぬとしても、おおよそ身体前面から取入れられた熱が蓄積しないように後面から適度に放散されて両者の釣合がとれ熱平衡が維持されてゆくと考えられるのである。

文 献

- 1) C. Winslow 他: Amer. J. Physiol., 120, 1~22, 1937.
- 2) F. Chrenko: Brit. J. Ind. Med., 14, 13~21, 1957.
- 3) 田中竜男: 慶応医学, 34, 285~296, 昭32.

- 4) 倉田正一他: 日本衛生学雑誌, 掲載予定.
- 5) C. Winslow: Temperature and Human Life, P. 56, 1949.
- 6) 三浦武夫: 予防医学, 1, 115~123, 昭25.
- 7) 三浦武夫他: 労働科学季報, 1, 1~8, 昭28.
- 8) Berggren 他: Arbeitsphysiology, 14, 255~260, 1950.
- 9) H. Belding 他: Heating, Piping & Air Conditioning, August, 129~136, 1955.
- 10) G. Haines 他: Reprint from Heating and Ventilating, Nov. 1952.
- 11) E. Adolph: Physiology of Man in the Desert, 1947.
- 12) E. Adolph: Amer. J. Physiol., 123, 486~499, 1938.
- 13) 緒方維弘: 文部省科学研究費関係季節生理班報告書, 昭28.
- 14) 戸田嘉秋: 国民衛生, 23, 1~7, 1954.
- 15) 倉田正一: 日新医学, 37, 343~350, 昭25.
- 16) 原島進: 日新医学, 40, 574~580, 昭28.
- 17) 長屋信美: 日新医学, 38, 176~181, 昭26.
- 18) D. Dill: Amer. J. Physiol., 123, 412~419, 1938.
- 19) 倉田正一他: 労働科学, 30, 752~762, 昭29.
- 20) 倉田正一: 労働科学, 30, 332~337, 昭29.
- 21) A. Burton: J. Nut., 7, 481~496, 1934.
- 22) 三浦豊彦他: 労働科学, 32, 610~619, 昭31.
- 23) M. Bader: J. Appl. Physiol., 1, 215~226, 1948.
- 24) A. Burton: Man in the Cold Environment, 1955.

(受付: 1957年7月23日)