

地球環境変化の健康への影響

— 生気象学の立場より —

彼末一之・細野剛良・陳 小明・依田珠江 (大阪大学医学部保健学科基礎生体情報学講座)

摘 要

温室効果ガスによる地球温暖化が人類の大きな問題となり、ヒートアイランド現象による都市の高温化も毎年のように取り上げられる。温暖化にはエネルギーの需要増加が大きな要因であるが、エネルギー需要そのものも温度に影響を受ける。例えば電力消費は平均気温と強く関係し、気温が20℃を越えると急激に増加する。これはクーラー利用のためだが、都市部においてはクーラーの廃熱でますます気温が上昇しさらにクーラーの利用が増すという悪循環が生ずる。この悪循環を断ち切ることが出来れば数十%のエネルギーが節約できる。しかし快適さを一旦獲得すると、人間はそれを止めるのは難しい。ところでクーラーをつけるのは「暑い」からである。同様に暖房を入れるのは「寒い」からである。これらの「温熱的不快感」は体温調節に重要な役割を果たしている。例えば人が高環境温に曝されたままでいると体温は上昇する。しかし、暑さがその人をより低温環境に向かわせ(クーラーをつける)、その結果体温上昇は抑えられる。これは行動性体温調節と呼ばれる。空調の普及で行動性体温調節に頼るようになり、現代人は発汗などの自律性体温調節能力を喪失しつつある。もし何らかの方法で温熱的不快感を抑えることが出来れば、エネルギー節約に大きく貢献出来る。さらに行動性体温調節(クーラー)からの脱却は自律性調節を活性化し、本来の生物としての人間に戻るための第一歩でもある。それでは温熱的不快感はどのようにしたら抑えられるであろうか?これを考える上での大きな問題はどのようにして温熱的不快感が起こるのかが全く明らかになっていないことである。これからの課題は温熱的不快感の脳内機序、特にその物質的基礎を明らかにすることである。もし温熱的不快感に特定の脳内物質が関係していることが明らかになれば、薬物でそれを抑えるといったことも可能になるであろう。

キーワード：体温調節，行動性調節，温熱的快・不快感，エネルギー消費抑制

1. はじめに

生気象学とは「気象、気候(つまり地球環境)と生き物の関係を研究する学問」である。その中でもこれまでは「環境が生体にどのような影響を及ぼすか」の研究が主に行われてきた。実際これから地球環境がますます悪化したときに、われわれヒトを含めた生物がどう影響を受けるかを考えることは非常に重要で、本特集もそのような観点に立ったものである。ところで、その地球環境の悪化はそもそも生物(ヒト)の活動によってもたらされたものである。しかしその悪化を防ぐにはどうすべきかは、政治、経済あるいは工学の問題として扱われている。ここでは「ヒトが環境に及ぼす影響」を考え、またそれをコントロールしようとするときに、生気象学として何か出来ないかを考えてみたい。ただし生気象学といってもその範囲は広い。そこで、ここでは特に環境温

度上昇について生理学的な側面から考察してみる。

2. 都市のヒートアイランド

都市部では最近ヒートアイランド現象が問題になっている¹⁾。それにはエネルギーの需要増加が大きな要因であるが、エネルギー需要そのものも温度に影響を受ける。図1は大阪での月別電力消費量である。大阪では夏期に特に電力需要が多くなるが、それは気温が20℃を越えると急激に増加する。気温が30℃になると電力消費は最低の月に比べて50%以上も増加する。気温が1度変化すると最大電力がどの程度変化するか「気温感応度」はここ10年程で特に大きくなっている²⁾。それはクーラーの普及、大型化が大きな原因である²⁾。特に都市部においてはクーラーの廃熱でますます気温が上昇し、さらにクーラーの利用が増すという悪循環(positive feedback)が生じている。この悪循環を断ち切ることが出来

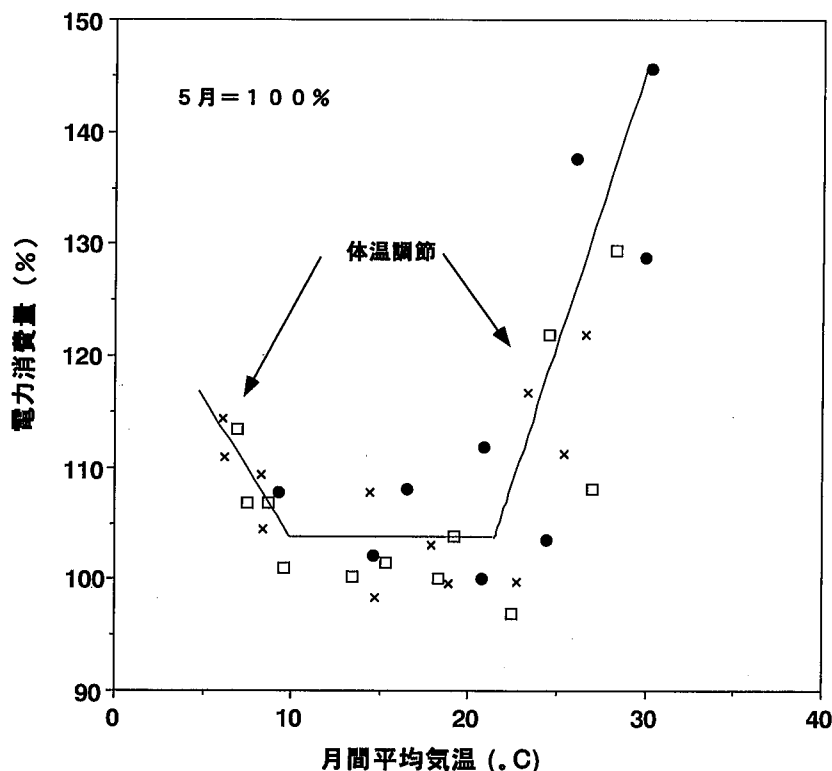


図1 大阪における月間平均気温と電力消費量の関係(1992-1994年)。電力消費量は各年の5月を100として%であらわす。

れば数十%のエネルギーを節約できるかもしれない。しかし楽に流れるのは人間の本性である。快適さを一旦獲得すると、それを止めるのは難しい。

3. 温熱的不快感

ところで、クーラーをつけるのは“暑い”から、同様にヒーターを入れるのは“寒い”からである。逆に言えば暑くさえないければクーラーもつけずに済む。何故われわれは“暑さ”・“寒さ”を感じるのだろうか？そこでこの感覚について少し考えてみる。“暑さ”・“寒さ”（温熱的不快感）は我々の体温を維持するのに重要な役割を果たしている。例えば人が高温に曝されたままでいると体温は上昇する。しかし、“暑い”という感覚がその人をより低温環境に向かわせ（クーラーをつけ）、その結果体温上昇は抑えられる。これは「行動性体温調節」と呼ばれる。つまりわれわれは体温調節のために膨大なエネルギーを消費しているのである。

4. 体温調節

われわれの体温はたとえ行動性調節をしなくとも維持することはできる。物質代謝の結果、体内では常に熱産生が行われ、体表面からは熱が体外へ放散されている。体温はこの両者のバランスで維持される。体温が上がれば、皮膚の血管は拡張して熱を体表面から外へ逃がす。

さらに汗をかくことで蒸散性の熱放散を盛んにする。一方体温が下がれば皮膚血管は収縮して熱放散を抑えると同時に、ふるえによって熱産生を盛んにする。このような行動によらない反応は行動性調節に対して「自律性体温調節」と呼ばれる。

「変温動物」と呼ばれるものでも体温調節をしないわけではなく、行動性体温調節は行っている。例えば、ワニは朝になると先ず夜間に冷えた体を日光浴して暖める。そして体温があるところまで上がると今度は日陰に入って涼む。そして体が冷えればまた日向に出るということを繰り返す。行動性体温調節の系統発生学的な起源は古く、ワニ（爬虫類）ばかりでなく魚、さらにミミズや昆虫もこれを行う³⁾。これに対しヒトを含めた哺乳類と鳥類（「恒温動物」）はこのような面倒なことをしなくとも体温を保てるが、それは自律性体温調節も行うからである。つまり自律性体温調節が出来るか出来ないかで恒温動物と変温動物とに分けられる。

4.1 効果器の動員

このように我々の体温は自律性、行動性と多くの効果器を動員して維持されているが、それはどのように使い分けられているのであろうか？図2はこれを模式的に表したものである。横軸は体温、縦軸はそれぞれの効果器の反応の大きさである。我々が高温に曝された時の反応を考えてみると、先ず起こるのはクーラーを入れたり、

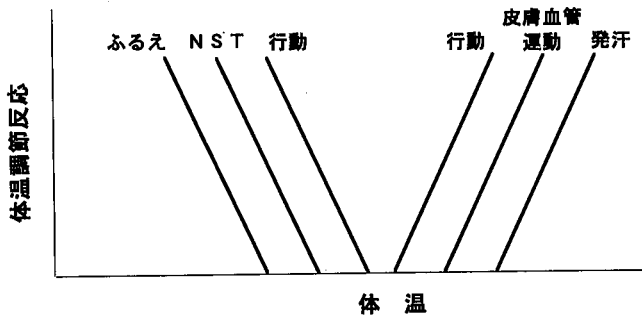


図2 体温調節のための効果器反応。対暑、対寒反応とも個体の生存に合理的な動員順序となっている。NST、非ふるえ熱産生。

服を脱いだりする“行動性調節”である。そしてこの行動が有効には働かないとき、皮膚血管の拡張により熱放散が増加し、さらに体温が上昇すれば、最後には発汗による蒸散性熱放散を動員する。この場合、もし行動性調節で体温維持に適当な温熱環境条件が得られれば、体温調節のためにはそれ以上何もする必要はない。また、発汗は熱放散という意味では強力であるが、体の貴重な資源である水を必然的に消費する。このように考えると①行動性調節、②皮膚血管拡張、③発汗、という動員の順番は個体の生存にとって非常に合理的である。一方、寒冷に曝された場合でも、最初に起こるのは暖房や着衣といった行動性調節で、それでは不十分な時に、ふるえ及び非ふるえ熱産生が起こる。非ふるえ熱産生はふるえによらない体熱の発生で、褐色脂肪組織が重要な効果器で

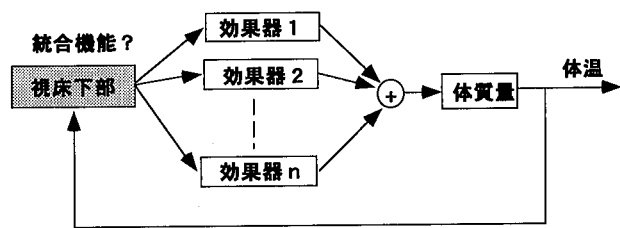


図3 体温調節系の模式図

ある。ヒトでは幼児期に特にみられる。ふるえと非ふるえ熱産生はともにエネルギー消費を必要とする。またふるえは骨格筋を効果器として使うので運動が大きく制約されるという点で非ふるえ熱産生より問題である。実際、非ふるえ熱産生の機構を持つ種ではふるえが起こる以前に非ふるえ熱産生が働いて体温を維持する。このように寒冷に対しても①行動性調節、②非ふるえ熱産生、③ふるえ、という動員の順番はエネルギー消費が少なく、運動を制約しない個体の生存にとって合理的なものである。

4.2 体温調節の脳機構

それではこのように合理的な調節はどのようにして実現されているのだろうか？体温調節は脳の制御の下に行われている。そのなかでも中心的役割を果たしているのが視床下部—特に視床前野—である。体温の調節も工学的な調節系と原理は同じである。まず温度を測るセンサーが必要である。実際我々の体には全身に温度計が分

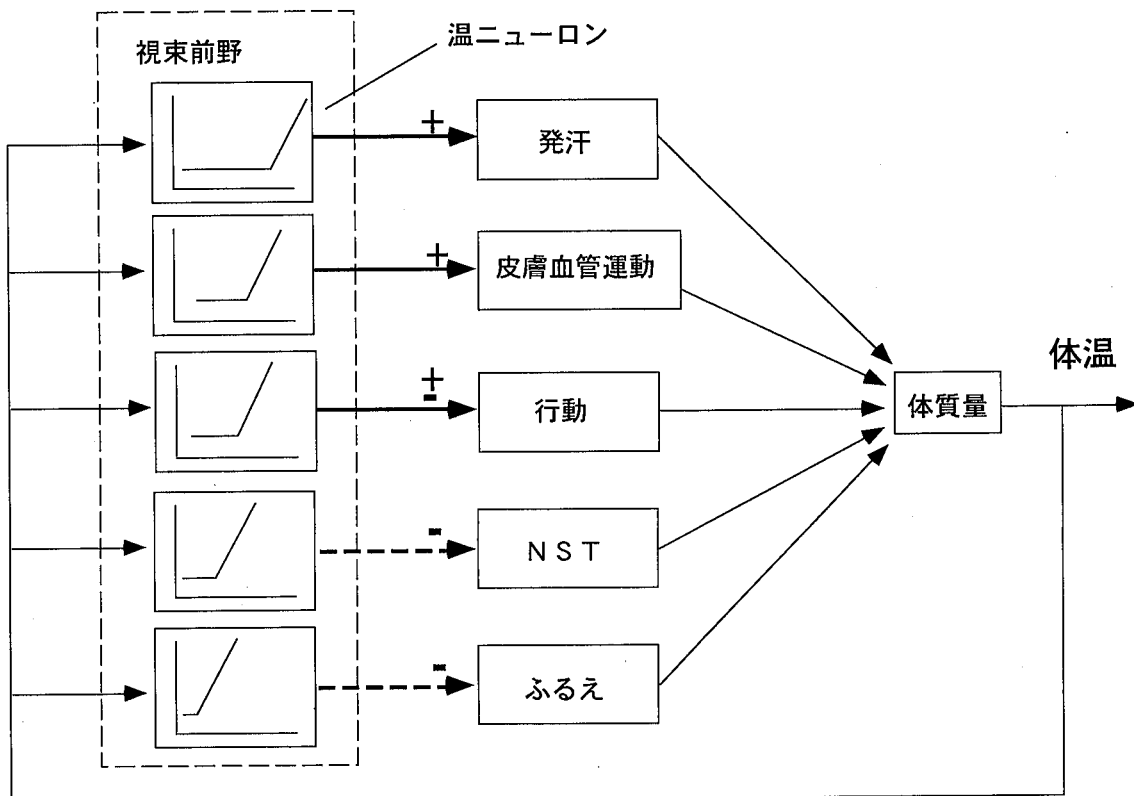


図4 体温調節における機能モジュール、各効果器は独立に働く「適切な」閾値の温ニューロンと接続している。ふるえ、非ふるえ熱産生(NST)へは温ニューロンが抑制性信号が送られる。

布している。代表的なものは視床下部にある「温感受性ニューロン」で、このニューロンは脳の温度が上がると活動が増加する特性を持っている⁴⁾⁵⁾。このニューロンからは効果器（皮膚血管や汗腺）へ遠心性の信号が送られている。そこで例えば体温が上がると、その信号により引き起こされた血管拡張や発汗の作用で体温は低下する。つまりネガティブフィードバックがはたらいている。それでは、このように多くの効果器が個体の生存に有利な形で動員されるのはどのような機構によるのだろうか？ 先ず考えられるのは、脳のどこかに「中枢」が存在し、深部体温と外界温の情報に基づいて動員すべき効果器に指令を与える、という可能性である。実際、これまで視索前野はこのような「統合機能」を持つと漠然と考えられていた（図3）。しかしその統合が具体的に何を意味し、どのような神経機構が関係しているかは全く不明であった。例えば、全ての体温調節の効果器を全て統括する「統合ニューロン」が存在するのだろうか⁶⁾。筆者等はラットの唾液塗布行動（この種における蒸散性熱放散手段）、温熱性唾液分泌、皮膚血管運動、ふるえ、非ふるえ熱産生それぞれの視床下部内神経回路網を解析することで、この問題を検討した^{7)~11)}。その結果は視索前野を含む視床下部には遠心性信号を送るニューロン群（モジュール）が効果器毎に別々に存在し、しかもそれぞれのモジュールは互いに独立に働いていることを示唆している。つまり体温調節に「統合ニューロン」は存在しない¹²⁾。

それでは上で述べた合理的な閾値の分布はどのようにして実現されているのだろうか？ 一般に温ニューロンは閾値温を持ち、その閾値温以上の温度域で高い温度感受性を示す。この閾値温はニューロン毎に異なる。そこで効果器の動員閾値に対応した閾値温を持つ温ニューロンが遠心性信号を送るように接続されていれば、統合ニューロンがなくとも全体が統一体として機能できることになる（図4）¹³⁾。そこで各効果器は適当な閾値温を持つ温ニューロンから信号を受けるよう、長い進化の過程で試行錯誤が繰り返されたのであろう。例えば、皮膚血管拡張より、発汗が低い閾値温を持つ、あるいは血管収縮よりふるえが先に起こる種がかつて存在したかもしれぬ。しかしそのような種では発汗とふるえが同時に起こってしまうので、水分やエネルギー利用が非効率になり生存競争を勝ち抜くことは出来なかったと思われる。結果として、今存在する我々を含めた種は、統合機能を持った神経回路が存在すると仮定させる程に、非常に合理的な閾値分布を持つまでになったに違いない。今後さらに検討を加えてゆきたい。

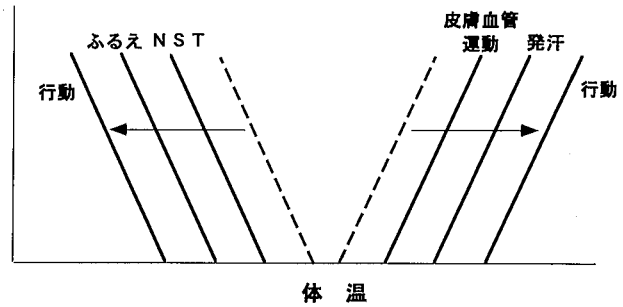


図5 エネルギー消費量抑制実現のための体温調節効果器反応の動員順序

5. 個体の生存と環境

ただしその合理性はあくまでも個体（個人）の取りあえずの状況を考えたときのものである。文明が未発達するときのことを考えてみよう。暑いといってする行動は木陰を求めるとか、水を浴びるかするくらいのことであろう。これだけでは体温維持は難しい。そこで汗もかかねばならなかった。つまり行動性調節と自律性調節が協調して体温は維持されていたのである。またその時には環境はほとんど影響は受けない。このような暮らしを人はつい最近までしていたのである。ところが現代では、クーラーを一度入れれば体温を維持するという目的は完全に達成され、それ以上何もする必要はない。ただしこれはその個体が何もする必要はないという意味で、クーラーは働き続けている。つまりエネルギーを消費して個体の維持（快適性）を実現しているのである。いうまでもなくこのエネルギー消費が今環境に大きく影響し始めている。つまり個体の快適性を追求し続ければその個体の生存すら危うくなるほどに環境に影響を与えるようになってしまったのである。

クーラーに頼ることの問題は環境への悪影響だけに留まらない。例えば、我々の発汗能力は生まれつき決まっているのではなく、生後の環境に大きく影響を受ける。汗腺の総数は200万から500万である。ただし全ての汗腺が発汗能力を備えているわけではなく一部の汗腺のみが働いている（能動汗腺）。能動汗腺の数はロシア人：180万、日本人：230万、フィリピン人：280万といわれている¹⁴⁾。これは遺伝的に決まっているのではない。日本人でも2歳以下で熱帯に住めば能動汗腺数は現地の人と同じ程度にまでなる¹⁴⁾。そこで逆に、たとえば母親が夏にいつもクーラーをつけているとその子供も暑さに曝されないうちに成長してしまうかもしれない。その結果その子は能動汗腺を発達させるチャンスを失うことになる。これは実験的に確認されていないが、実体の調査

は是非とも必要である。現代の若者の能動汗腺は上の数字よりずっと少なくなっているかもしれない。つまり行動性調節に頼る効果、本来持っている自律性調節の能力も失ってしまうのである。

6. 将来の展望

それでは我々はこれからどうしたらよいであろうか？ 上で述べたように諸悪の根元は我々が行動性の体温調節をする、つまり“暑さ”を感じることである。しかしエネルギー節約に暑くともクーラーを入れるな、といった精神論は無効である。

ところで体温調節の種々の効果器は脳の別々の神経モジュールで独立に制御されていることを上で述べた。そこで暑熱に対する行動性調節（暑さ）の閾値を高い体温側にシフトさせ、同様に寒冷に対する行動性調節（寒さ）の閾値は低い体温側にシフトさせてはどうであろうか（図5）。こうなれば少々の体温変動では“暑さ”・“寒さ”を感じないので、すぐにクーラー、ヒーターのスイッチを入れることもない。一方、自律性調節はそのまま保たれているので、体温調節に支障はない。むしろ自律性調節を積極的に使うことで暑熱、寒冷に適応した強靱な体ができる。つまり上で述べた悪循環から抜け出ることが出来る。ただ問題はこのような閾値変化が自然淘汰で起こるまで待てないことである（もし起こるにしても）。そこで閾値変化を人工的に起こすのである。例えば薬物を使う。それを飲めば、“暑さ”・“寒さ”は感じなくなるが、自律性調節は影響を受けぬような薬物の開発は可能であろう。このようなことはいまの段階ではあまりにも荒唐無稽に映る。これまでエネルギー需要抑制の対策を考える際、人間は今ままでであると仮定されてきた。しかしエネルギー消費が人類の存亡にすら影響するのだとすれば、人間自身が変わることも視野に入れざるを得ない。既にわれわれは感覚、情動を制御するために種々の薬物を用いている（鎮痛薬、鎮静剤etc.）。それならば鎮暑剤、鎮寒剤があってもよいだろう。

薬物の開発には“暑さ”・“寒さ”が起こるメカニズムを知る必要がある。もちろんそれは脳が関係している。ところが、この身近な感覚の起こる脳内機序が全く明らかになっていない。そこで“暑さ”・“寒さ”の脳内機序、特にその神経回路と物質的基礎を先ず明らかにする必要がある。それが出来れば薬物の開発への道も開けるであろう。

7. おわりに

生気象学に携わる者として常々、地球温暖化（都市温

暖化）やエネルギーの問題は体温と直接に関係するので、何とかこれらの問題に貢献したいと常々考えていた。そこで牽強附会の誇りを覚悟で、上のような論を展開してみた。しかし上で述べたようなことを具体化しなければならぬ状況になれば、それはもはや絶望的であると筆者自身感ずる。そのようなアンチテーゼとして本稿を考えてもらえれば幸いである。

文 献

- 1) 山下脩二 (1992) 都市機構. 生気象学の辞典 (日本生気象学会編), 332-333.
- 2) 服部恒明・門多 治・渡邊尚史 (1991) 夏季電力需要逼迫の分析と展望. エネルギー経済, 17, 16-22.
- 3) 村上 恵 (1987) 行動性体温調節. 新生理科学体系 22, エネルギー代謝・体温調節の生理学 (中山昭雄, 入来正躬編), 286-296.
- 4) Nakayama, T. (1985) Thermosensitive neurons in the brain. *Jpn. J. Physiol.*, 35, 375-389.
- 5) Hori, T. (1991) An update on thermosensitive neurons in the brain: from cellular biology to thermal and non-thermal homeostatic functions. *Jpn. J. Physiol.*, 41, 1-22.
- 6) 彼末一之, 細野剛良 (1997) 体温調節中枢の新しい考え方. *Clinical Neuroscience*, 15, 380-381.
- 7) Tanaka, H., K. Kanosue, T. Nakayama, *et. al.* (1987) Grooming, body extension, and vasomotor responses induced by hypothalamic warming at different ambient temperatures in rats. *Physiol. and Behav.* 38,
- 8) Kanosue, K., T. Nakayama, H. Tanaka, M. Yanase, and H. Yasuda, (1990) Modes of action of local hypothalamic and skin thermal stimulations on salivary secretion in rats. *J. Physiol.*, 424, 459-471.
- 9) Yanase, M., K. Kanosue, H. Yasuda, and H. Tanaka, (1991) Salivary secretion and grooming behaviour during heat exposure in freely moving rats. *J. Physiol.*, 432, 585-592.
- 10) Kanosue, K., T. Hosono, and M. Yanase-Fujiwara, (1994) Hypothalamic network for thermoregulatory vasomotor activity. *Am. J. Physiol.*, 267, R283-R388.
- 11) Kanosue, K., Y.-H. Zhang, M. Yanase-Fujiwara, and T. Hosono, (1994) Hypothalamic network for thermoregulatory shivering. *Am. J. Physiol.*, 267, R275-R282.
- 12) Kanosue, K., T. Hosono, Y.-H. Zhang, and X.-M. Chen

(1997) Neuronal networks controlling thermoregulatory effectors. Prog. Brain Res., (in press).

- 13) 彼末一之・細野剛良・陳 小明 (1997) 体温調節と内側視索前野. 自律神経, 34, 61-66.
- 14) Kuno, Y. (1956) Human Perspiration. Thomas, Springfield.