

4. 適応策に関する普及啓発

4.1 暑熱ストレスと適応策のメカニズムの解説手法の検討

暑熱に対する適応については、暑さを感じるメカニズムを踏まえた対応が有効である。しかし、人が暑さを感じる要因は複雑であり、国民の理解が進んでいないだけでなく、関連技術を提供するメーカーにおいても、当該技術の暑熱改善効果を分かりやすくかつ適切に解説する手法を模索している。

そこで、人が暑さを感じるメカニズムや暑熱適応技術とその効果に関する分かりやすい解説資料を作成した。

作成の手順は、既往の関連資料を収集して課題等を整理し、人の暑熱ストレスに関する基礎的な知見を踏まえ、適切で分かりやすい解説資料を検討した。作成に際しては、既往の資料については多くの課題があったこと、人が暑さを感じるメカニズムは複雑であることから、当該分野の知見を有する本調査の検討委員に助言を求め、多くのご意見等をいただきつつ検討を進めた。

4.1.1 国民向けに分かりやすく解説している資料

人が暑さを感じる仕組みや夏を涼しく過ごす工夫などについて、WEB上でイラスト等を用いて比較的、丁寧に分かりやすく解説している資料（以下、「一般解説資料」という）を収集した。収集した資料の一例を示す。

- ・一般社団法人「涼しく過ごす夏の工夫」
- ・健康保険組合「残暑の涼しい過ごし方」
- ・大手通信事業者「猛暑を乗り切る涼しい夏の過ごし方」
- ・通信プロバイダー「猛暑を涼しく過ごす方法」 等

1) 構成

いずれの資料も、概ね以下のような構成になっていた。

- ①暑さを感じる仕組み
- ②涼しさが作り出される仕組み
- ③涼しくするための工夫

2) 内容

各資料の内容は共通点が多く、以下にその概要を示す。

- ①暑さを感じる仕組み
 - ・人は恒温動物で 37℃程度の体温を保つ
 - ・体内で発生された熱を発散する必要がある
 - ・熱は温度の高いところから低いところへと移動する
 - ・気温が高いと体内の熱を発散しにくく、体内に熱がこもり、暑く感じる

②涼しさが作り出される仕組み

- ・汗をかくことで皮ふから気化熱が奪われ、涼しく感じる（湿度が低い方が蒸発しやすい）
- ・風が吹くことでも涼しく感じる
- ・気温だけでなく、湿度や風、放射熱によっても暑さ、涼しさの感じ方が異なる
- ・木陰が涼しいのは、木の葉から水が蒸発する際に、葉と葉の間の空気の熱を奪い、気温が下がっているため

③涼しくするための工夫

住居の暑熱対策に関する情報が多く、その他には、食べ物や衣類、暑熱順化等のライフスタイルに関する情報もある。以下に住居等の熱環境の改善に関連する情報を抽出した。

- ・日射を家の外側で防ぐ
 - 緑のカーテン、すだれ、オーニング等
 - 緑のカーテンは植物の蒸散効果によって外気より低く保たれる
- ・家の周りに蓄熱させない
 - ベランダのウッドデッキ化
- ・風の通り道の確保
 - 向かい合う面の両方の窓を開ける
 - 室内の風速を増すには、入り口を小さく、出口を大きく
 - 室内の風速を減らすには、入り口を大きく、出口を小さく
- ・打ち水をする
 - 水が蒸発する際に、地面や周りの空気から熱を奪い、涼しく感じる
 - 日中に打ち水すると湿度が上がってムシムシするため、夕方が良い
 - 日中に打ち水するのであれば、日かげが効果的

4.1.2 暑さのメカニズムに関する基本的事項

体温調節や温熱環境に関する書籍を参考に、暑さのメカニズムに関する基本的な事項を整理した。

1) 人の体温調節システム

人は身体の核心温を一定に保つよう優れた体温調節機能を有している。夏における耐暑反応としての体温調節システムは、上着を脱いだり扇風機をつけるなどの「行動性調節」と皮膚血管拡張と発汗による「自律性調節」がある。以下、自律性調節について、概要を示す。

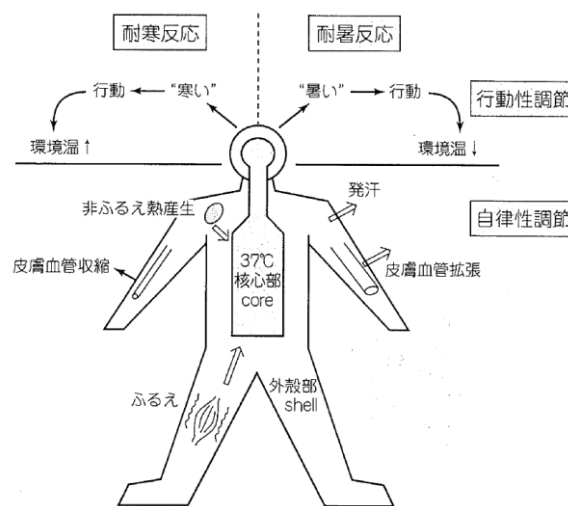


図 4.1 人の体温調節反応（耐寒反応と耐暑反応）¹

水分の蒸発によらない「非蒸散性熱放散」は、皮膚に近い血管の拡張によって皮膚血流量を増やすことで、核心部や筋で温められた血液が皮膚近くの血管まで運ばれ、皮膚温が高くなり、放熱して冷やされた血液は再び核心部に戻る。手や足先の抹消部位は、体積に対する表面積の割合が特に大きいため熱放散の効率がよく、この部位への血流量は 100 倍も調節されるといわれる。

環境温が皮膚温に近づくかそれより高くなると、身体表面から水分を蒸散させて熱を逃がす「蒸散性熱放散」すなわち発汗が主たる熱放散の手段となる。視床下部の体温調節中枢機構により調節され、運動時や安静時に体温が上昇した場合、発汗はある体温（発汗開始閾値）から始まり、体温上昇とともにほぼ直線的に増加する。また、環境温が高いほど発汗開始閾値が低下する。

¹ 井上芳光 他 編「体温Ⅱ 体温調節システムとその適応」NAP

2) 人体の熱放散

人体の熱は、主に次の3つの経路を経て体外に放散される。

- ①対流
- ②熱放射
- ③蒸発

- ・対流 : 気温が皮膚温より低いときには、皮膚温との温度差が大きくなるほど、また風速が強いほど、多くの熱が皮ふから空気に移動する。
- ・熱放射 : 周囲の壁温が低いときには体から壁体に向かって熱放射により放熱する。これを「冷放射」と表現することもある。逆に、壁などの表面温度が皮膚温より高ければ、人は熱放射を受ける。特に日射からは強い熱放射を受ける。
- ・蒸発 : 人の体温がある閾値より上昇すると発汗(温熱性発汗)が始まるが、1時間に150gの汗をかき、それを効率よく皮膚面で蒸発させれば、ほぼ100Wの体の熱を放熱できる。環境の湿度が低く、風速が強いほど汗が効率よく蒸発する。逆に、環境の湿度が高ければ汗の蒸発が抑制され、蒸し暑さを感じる。

また、上記3つの経路の他に、伝導による放熱がある。床や椅子など人体が直に接触するものへは、伝導によって熱が奪われる。木製と石製のベンチでは、石の方が冷たく感じるのは、石の熱伝導率が木の10倍以上大きいことによる。

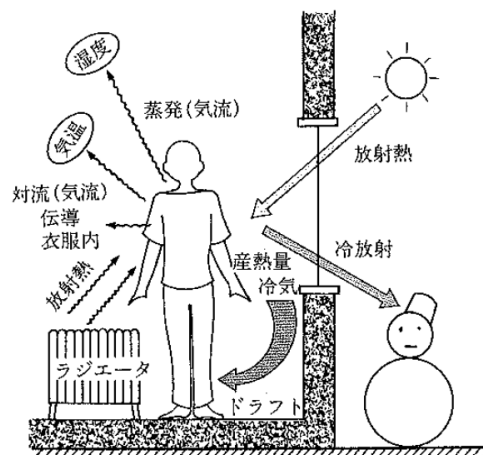


図 4.2 人体からの熱放散と環境因子²

² 空気調和・衛生工学会 編・発行「快適な温熱環境のメカニズム」

3) 人体熱収支

環境と人体の間の熱収支を考え、人体の熱平衡を表現し、その結果としての体温の形成、及び環境の総合的な温度の表現をとらえる必要がある。人体に影響を与える環境側の要素と人体側の要素を抽出する(図4.3参照)。

標準的な人体として着目する条件は、温熱環境条件、人体側条件、時間的条件である。温熱環境条件は、気温、湿度、気流、熱放射の温熱環境4条件、人体側条件は活動量(代謝量と外部仕事量)と着衣量である。時間的条件は曝露時間とその間の各条件の時間的変動性である。

熱収支は、人体内での産熱と皮膚表面からの放熱との差し引きによる。室内の場合の皮膚表面での熱収支式を以下に示す。

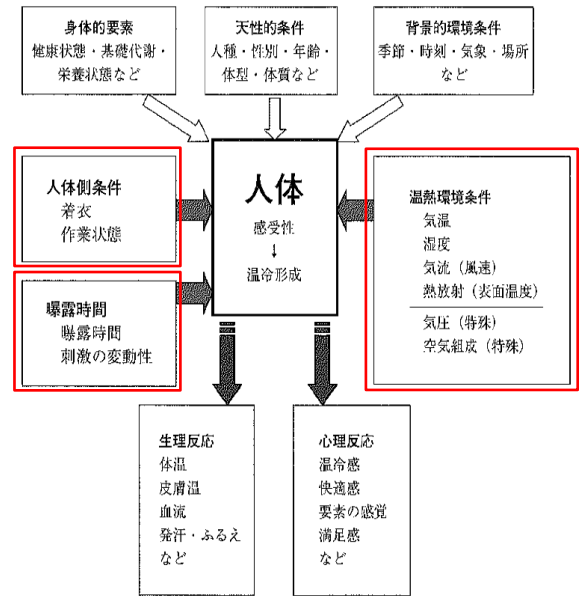


図 4.3 温熱要素と人体の反応³

①産熱 M と外部仕事 A

代謝による熱産生 M (W/m^2) で、自転車こぎなどの外部仕事 A (W/m^2) がある場合は減じる。

②対流放熱 C

皮膚表面温度 t_s と気温 t_a との温度差に比例して放熱される。 $C = h_c(t_s - t_a)$ (W/m^2)

対流熱伝達率 h_c は気流の状態に関係する。

③放射放熱 R

熱放射は、人体表面と周囲の物体表面との温度差に比例する。周囲の各表面温度の影響を総合化したものが平均放射温度 (mean radiant temperature : MRT) である。

$R = h_r(t_s - MRT)$ (W/m^2) 放射熱伝達率 h_r はほぼ一定値 $4W/m^2 K$ である。

皮膚表面温度より MRT が高い場合は、放熱せずに受熱することになる。

④蒸発放熱 E

発汗および不感蒸泄による放熱である。皮膚表面の水蒸気圧 p^*_s と周辺空気の水蒸気圧 p_a との差に比例する。比例乗数は Lh_c である。 L はルイスの関係の係数で $16.5K/kPa$ である。

$E = \omega Lh_c(p^*_s - p_a)$ (W/m^2) ω は、皮膚のぬれ面積率である。

⑤呼吸放熱 H

呼吸放熱には顕熱と潜熱によるものがあり、一般に皮膚表面からの放熱に比較して小さいので、省略することが多い。

³ 彼末一之監修「からだ温度の辞典」朝倉書店

⑥伝導放熱 C_d

人体が椅子や床に座るときに伝導により放熱する。皮ふ温より熱いものに触れれば受熱する。

⑦食物摂取放熱・排泄放熱 F

食物摂取による直接放熱と、排便・排尿による放熱である。

これらを総合すると、人体の熱収支式は以下の通りとなる。

$$M - A = C + R + E + H + C_d + F + S$$

一般には相対的微量などを除外して、以下の式を用いる。

$$M - A = C + R + E + S$$

ここで S は熱収支のバランスを示す量であり、産熱・受熱と放熱の収支が一致すれば 0 となり、熱平衡の状態になる。体温が変化しない定常的な状況であり、これが暑くも寒くもない場合の必要条件になる。 S は、産熱量が大きくなる、すなわち運動量が大きくなる場合や、環境温が高く対流放熱や放射放熱が抑制され、加えて湿度が高く蒸散放熱が少なくなる場合などに蓄熱側になり、体温が上昇することで暑く感じる。

屋外における人体の熱収支では、日射が当たる場合には、作用温度が上昇し、放射受熱が大きくなり、発汗による蒸発放熱量が大きくなる。場合によっては放熱より産熱と受熱の方が大きくなり、熱収支のバランスを示す量 S が蓄熱側を示す。

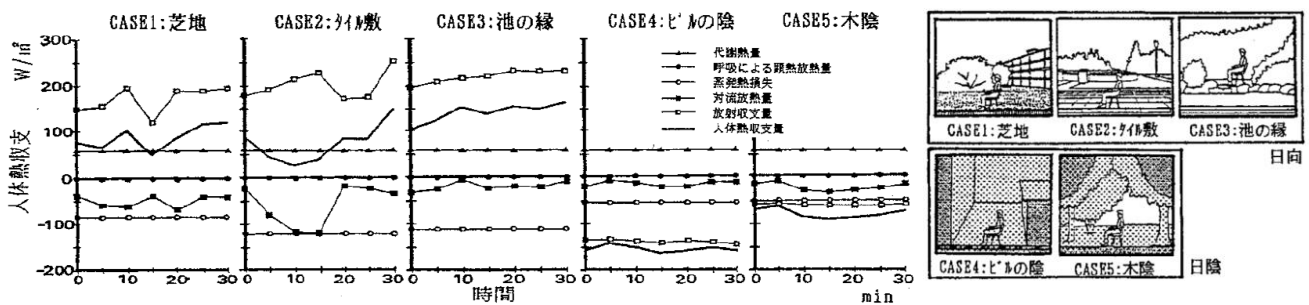


図 4.4 諸熱量と人体熱収支の時間変動

加藤伯彦、堀越哲美、伊藤文恵、石垣秀圭、都市部における建築外部空間での熱環境及び視環境の実測調査：人体の熱収支、生理・心理的反応について、空気調和・衛生工学会、学術講演会論文集、1990年10月

4.1.3 一般解説資料の課題

1) 熱放射が扱われていない

人が体温調節システムを有していることが示されているが、暑さを感じる仕組みとして、気温が上昇することで対流放熱が抑制されることが主たる要因として説明されている。

湿度や風までは言及しているものの、熱放射についてはほとんど触れておらず、人の熱放散全体の説明が不足している。

2) 暑さを感じる仕組みの説明と対策内容が整合していない

暑さを感じる仕組みには熱放射が取り上げられていないが、涼しくするための工夫としては日射の遮蔽や外壁等の高温化防止などの放射環境改善が数多く取り上げられており、整合していない。

3) 緑や打ち水の蒸散効果の表現が誤解を招く

植物が蒸散する際に周囲の空気を冷却するという表現は、今回対象とした資料以外にも多数見られる。単体の木陰や緑のカーテンが涼しく感じられるのは、必ずしも気温が低いためではなく、熱放射が低減されていることの寄与が大きいと思われるが、熱放射についての説明はほとんどされていない。このことは打ち水も同様であり、地表に撒かれた水が蒸発する際には、主として地表の熱が奪われて地表面温度が低下し、熱放射が低減されることで涼しさを感じるものと考えられるが、一般解説資料には水が蒸散する際に空気の熱を奪い、気温を下げると説明されていることが多い。

4.1.4 解説資料の構成

上記の課題を踏まえ、種々の暑熱対策の効果を人が暑さを感じる仕組みの観点から理解するのに必要な情報を、以下の構成で説明した。

表 4.1 解説資料の構成

| | |
|------------------|---|
| 1. 人の恒温性 | ・ 人の体温は一定 体内で生じた熱を放散する機能を有している |
| 2. 人の体温調節機能と放熱経路 | ・ 2つの機能 「皮ふ血管拡張機能」→「対流」「放射」で放熱 「発汗機能」→「蒸発」で放熱 |
| 3. 夏に暑く感じるのはなぜ? | ・ 熱収支のバランス バランスが崩れる要因と体温の上昇 |
| 4. 涼しい環境づくりのポイント | ・ 4つの熱環境要素 「気温」「湿度」「気流」「放射」 ・ 総合的な体感温度の改善 気温が下がらなくても体感温度を改善できる |

4.1.5 作成した解説資料

以下の3枚のパネルとして作成した。

人が涼しさを感じるしくみ

1

1. 人は体が熱くならないようにできています。



人の体の中心部分の温度は、冬も夏も約37℃で一定に保たれています。食物などからエネルギーを得ると、体の中で熱が生まれます。また、運動することでも筋肉から大量の熱が発生します。体内で発生した熱を逃がすために、人は熱を放散する機能を持ち、一定以上に体温が上がらないようにしています。



2. 人はどのようにして体温が上がらないようにしてるの？

人は、2つの機能で放熱しています。

A 血流を増やして → 空気に放熱

皮ふの近くに血液を多く流すことで放熱する機能です。特に手や足の抹消部分は、暑いときには寒い時より血流量が100倍程度も多くなると言われています。体の中心より温度の低い皮ふ近くで血液を冷やし、中心に戻すことによって体温の上昇を防ぎます。

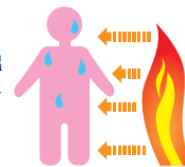
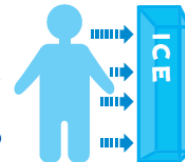


皮ふに直接当たる空気に放熱することで、皮ふを冷やします。風速が強くなると放熱も大きくなります。



まわりのモノに放熱

まわりのモノに向かって電磁波として放熱すること（放射といいます）で皮ふを冷やします。モノの温度が皮ふ温（夏は35℃程度）より低いほど、冷やす効果が高くなります。逆にまわりのモノの温度が皮ふ温より高いと皮ふが受ける熱が多くなります。



B 発汗して → 気化熱で放熱

空気やまわりのモノに放熱するだけでは足りずに、体温が上昇してしまう場合に発汗が始まります。発汗すると体内から水分が失われるので、水を飲む必要があります。

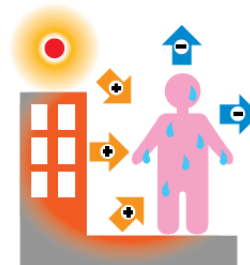


汗が蒸発するときに皮ふから気化熱を奪うことで皮ふを冷やします。風速が強くなると放熱も大きくなります。



3. なぜ、夏は暑く感じるの？

人は安静状態でも一定の熱を発生しています。運動するとより多くの熱が発生しますが、その熱がきちんと放散されていれば体温は一定に保たれます。しかし、気温が高いと空気への放熱が進まず、さらに湿度が高くて汗の蒸発が進まないと熱が体にこもってしまいます。また、日射に当たったり、高温化したアスファルトなどに囲まれると、放射熱を受けてしまいます。体の中で発生する熱や受ける熱が、放散する熱より多くなると体温が上昇してしまい、人は「暑い」と感じるようになります。ただし、気温が一定以上になると、体温が上昇しなくても暑いと感じ始めます。



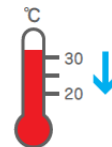
体の中で発生する熱や受ける熱が、放散する熱より多いと「暑い」と感じます。

4. 涼しい環境づくりのための4つのポイント

私たちのまわりには暑さや涼しさに影響する4つの熱環境要素（気温、湿度、気流、放射）があります。それらの熱環境要素ごとに涼しい環境をつくるためのポイントをまとめてみました。

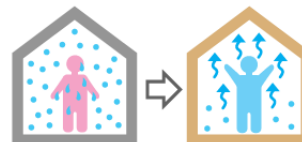
A 気温⇒下げる

室内であればエアコンを使います。屋外であれば、まち全体の気温を下げるのは簡単ではありませんが、ミストなどで自分がいる場所の気温を局部的に下げることで空気に放熱しやすくなります。



B 湿度⇒下げる

室内であれば、エアコンの「ドライモード」を使います。また、調湿作用のある木材、紙などの建材を使って湿度を抑えることで、汗が蒸発しやすくなります。



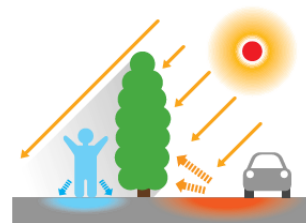
C 気流⇒利用する

気流を利用することで、空気に放熱しやすくなったり、汗が蒸発しやすくなります。扇風機、うちわなどが涼しいのは気流を利用しているためです。室内であれば、向かい合う2面の窓や高低差のある高窓と掃き出し口を開けると空気の入り口と出口ができ、気流が生じます。



D 放射⇒受けない、利用する

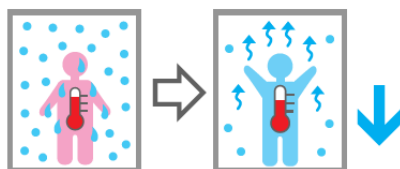
日陰に入る、よしずを立てる、日傘を使うなど日射をさえぎる工夫が大切です。熱い道路を生垣などでさえぎると放射を受けにくくなります。また、日陰で打ち水すると、地面がよく冷えるので、皮ふから地面への放熱が進みます。



5. 体感温度を下げよう！

気温とそれ以外の熱環境要素である湿度、気流、放射の効果も含めた総合的な暑さの指標を体感温度といいます。たとえば、気温が1℃上がれば体感的にも1℃上がったと感じます。しかし、同時に湿度が10%下がれば、体感温度はほとんど変わりません。つまり、気温が下がらなくてもそのほかの熱環境要素によって、人は体感的に涼しく感じることができるのです。

A 湿度が10%下がると体感温度は約1℃下がります。



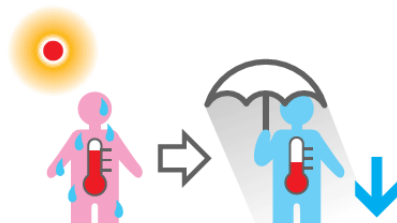
体感 エアコンで除湿してみよう！

B 風速が秒速1メートル増えると体感温度は約3℃下がります。



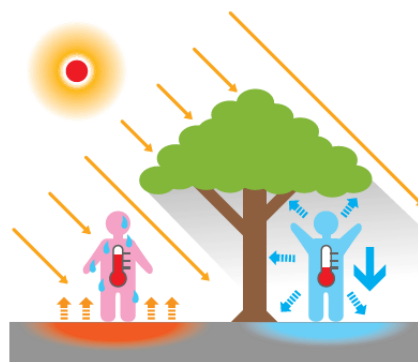
体感 扇風機に当たってみよう！

C 日射を80%カットすると体感温度は約6℃下がります。



体感 日傘をさしてみよう！

D 日射を90%カットして、まわりが日陰の路面だと体感温度は約9℃下がります。



体感 木陰に入ってみよう！

体感温度 (SET*) の計算条件

気温: 30℃ 湿度: 50% 風速: 0.5m/s 日射: 900W/m² 着衣: 0.5clo 代謝: 1.7met 路面温度: 60℃