

参考資料 1-7 「適応策の温熱指標に関するヒアリング結果」

以下の熱環境等に関する有識者に対して行った、人の熱ストレスを低減する適応策の評価指標についてのヒアリング結果を示す。

- ・ 浅輪貴史氏 (東京工業大学大学院 総合理工学研究科 准教授)
- ・ 栞原浩平氏 (釧路工業高等専門学校 建築学科 准教授)
- ・ 酒井敏氏 (京都大学大学院 人間・環境学研究科 教授)
- ・ 登内道彦氏 ((一財)気象業務支援センター 振興部 部長代理)
- ・ 成田健一氏 (日本工業大学 建築学部 教授)
- ・ 堀越哲美氏 (名古屋工業大学 建築・デザイン工学科 教授)
- ・ 三坂育正氏 (日本工業大学 建築学部 教授)

ヒアリング先：東京工業大学大学院 総合理工学研究科 浅輪貴史 准教授

日時：平成25年1月15日 10:00～11:30

質問者：石丸、辻

1. 適応策の評価に有用な温熱指標について

- ・評価指標は現時点では MRT（平均放射温度）が適していると思われる。体感温度の視点からは SET*等の総合指標で評価すべきとの意見もあるが、屋外に適用するには課題も多い。また、日射のある屋外空間では体感温度に対する MRT の感度が高いこと、風は地域の気象や様々なスケールの都市要素（建物配置、建物形状など）が関係し、また時々刻々変化するために評価が難しいこと、MRT を下げることは体感温度低下に直結するため対策効果を評価できることから、MRT により一定の評価ができると考えられる。なお、例えば緑陰創出などにおいて、放射と風のトレードオフが指摘されていたが、風速に対する感度が高い SET*においても、実際の空間では放射の寄与が大きいといった調査結果が多く出ていることから、近年ではあまり指摘を受けなくなった。

2. MRT の測定について

- ・簡便な方法としては黒球温度計を用いる手法があるが、日射吸収率がほぼ1であることから、日射下での使用は不適切である。例えば灰色に塗装するなど、日射吸収率や長波長放射率を適切に設定することができれば、黒球温度計を用いることも簡易的には適当であると考えられる。
- ・各面の表面温度を把握する手法として、全方位（ 4π ）の熱画像を合成した全球熱画像がある。全球熱画像では、表面温度が高い面やその面積（形態係数）が把握できるため、対策の検討・評価が可能である。MRT は全球熱画像で取得した表面温度と形態係数（適切な面積比に換算した形態係数を算出）より算出する。短波については、6方位（上下面、水平4方位）の日射計から取得することが多い。以前は、短波についても全球の画像を作成するシステムが研究室にあったが、故障により現在は稼働していない。その画像を取得できれば、長波と同様の計算により短波の散乱・反射成分についての計算が可能である。直達日射については、別途直達日射計の使用、もしくは日射計で測定した全天日射量を用いて直散分離の式により取得する。
- ・足永(1977)¹のトラバース法、6方位の放射照度の測定などを用いれば、放射照度の方位性については評価することができる。
- ・人体への影響評価という視点では、人体形状の考慮は重要である。6方位の放射照度について、人体を直方体とみなした重み付けを行う方法などがある。全球熱画像についても、測定した放射照度を6面に割り当てることのできるため、人体形状の重みの考慮は可能である。ただし、黒球温度計では、日射の受正面は球（円）になってしまうため、人体形状の考慮はできない。
- ・全球熱画像については、現在は東京工業大学 浅輪研究室・梅干野研究室でシステムを保有するほか、画像データの取得だけであれば民間会社（エアンドエー株式会社）でもシステムを

¹ 足永 靖信：屋外空間における短波および長波の放射強度の分布に関する実測，日本建築学会計画系論文集，500，71-77，1997

保有している（MRT の計算は不可）。

- MRT の算出はできなくても、対策の検討だけを行うのであれば、サーモカメラで複数の画像を取得し、周辺の表面温度の分布状況（温度、面積）を把握すればよい。最近では、サーモカメラにパノラマ撮影機能があるものもある。

3. その他

- 天空の放射温度はサーモカメラで測定すると、大気の透過率の高い波長帯を使うため、実際の放射温度よりも低い値が出力され、過小評価になることを理解して使うことが重要である。但し、補正は可能である。
- 対策推進のためには、MRT 等の低下について、快適性や健康リスク等の側面から意味づけることは重要である。

以上

ヒアリング先：釧路工業高等専門学校 建築学科 栗原浩平 准教授

日時：平成24年12月27日 10:00～11:30

質問者：石丸、辻

1. 適応策の評価に有用な温熱指標について

- ETFe や ETU、PET、SET*、UTCI は人体温熱生理モデルの計算等を介した濡れ面積率などが算出に必要なことから、シンプルで使いやすい指標としては WBGT が挙げられる。
- 放射の評価をするだけであれば、MRT がよい。
- 屋外の日射下で用いることができ、かつ人の感覚や熱中症リスク等、指標の値に意味づけがされている指標としては、快適性との関連性が研究されている SET*と、熱中症予防指針がある WBGT が挙げられる。PMV も温冷感を表すが、屋外の発汗が起きるような環境での適用例はない。ETFe も快適感との関係性を論じた報告はあるが、現時点では報告は少ない。

2. WBGT について

- WBGT の留意点として、湿球温度にかかる係数が大きく、湿度の感度が高すぎるという点が挙げられる。つまり低湿度条件ではより危険側の評価となる。救急搬送数との関係性も検討したが、WBGT より日最高気温との相関が高く、係数の大きい湿球温度の影響が示唆されている。
- また、黒球温度にかかる係数については、値が小さいことで黒球温度の吸収率がほぼ1である影響をキャンセルできているが(算出時の想定はカーキの迷彩柄)、体温予測モデルを用いて試算した結果と比較するとかなり小さく、より危険側の評価をしている。
- WBGT は、別室に移動した直後の申告に基づいた ET を簡単に求めようとした指標であることから、非定常な条件における評価と言える。
- 風については、湿球温度や黒球温度で間接的に評価しているが、パラメーターに直接風速が入っていないため、風速による体感温度の低下を適切に評価できているか疑問である。
- 測定の面では、黒球温度は応答性が悪いが、湿球温度は比較的良い。
- 小型の黒球温度計は、対流熱伝達率が大きくなるため気温の影響が大きくなるが、MRT 算出時に適切な補正計算を行えば利用には問題ない。なお、応答性については小型の方がよい。黒球の素材は測定値に大きく影響しないと考えている。
- 日射の影響を除いた長波長放射の影響のみを含む作用温度は、黒球温度と白球温度の測定により可能である。
- 日本体育協会の指針の策定経緯を調査する必要があるが、WBGT の値の人体生理的な意味づけについては議論の余地があるという認識である。

3. 今後の進め方について

- 基本的には WBGT を軸に進めるのがいいと思われるが、湿度の過大評価など、留意事項については整理を行う必要がある。なお、MRT だけが変わるような相対評価であれば、WBGT を使用することに大きな問題はないと思われる。

以上

ヒアリング先：京都大学大学院 人間・環境学研究科 酒井敏 教授

日時：平成 25 年 1 月 25 日 13:00~16:15

質問者：石丸、辻

1. 温熱環境の測定手法について

- かつてはグローブ温度計による放射の測定を研究しており、ベルノン式への補正式を得ることで、小型のグローブ球（ピンポン玉製）による測定方法を確立した。しかし、グローブ温度は全ての放射成分の影響を受けるほか、風の影響も受けるため、何がその場所のグローブ温度を決めているのか検討できない。屋内作業場の溶鉱炉前など、熱源が明確な場合はいいが、屋外での放射の影響を検討する上では、評価に限界がある。
- 近年はサーモカメラも安価になってきたことから、それを活用した測定方法を検討してきた。サーモカメラの大きな欠点は撮影画角が小さいことである。レンズ変更での対応は費用が掛かるため現実的ではないが、いくつか対処方法は存在する。
- 1 つめは複数の熱画像を撮影し、画像処理ソフト（photoshop など）により、結合する手法である。この際、ソフトウェアが正しく画像結合できるように、認識しやすい重なり部分を含める必要がある。また、複数枚撮影するには時間がかかるため、その間に雲が日射を遮るなどの事象が起きないように留意しながら撮影を行う必要がある。なお、画像データとなるため温度情報はデータ上なくなるが、画像を白黒にすることで色のピクセルデータとして後で温度情報を読み取ることは可能となる。
- 高い解像度を必要としないのであれば、ステンレス半球を用いた撮影も可能である。無限遠からの撮影を前提とすると、ステンレス半球には全方位（ 4π ）の像が映るので、これをサーモカメラで撮影する手法である。ステンレス半球は、直径 30cm 以下の小型のものが機械で製造されているため、球面の精度が高く、価格も安い。
- ステンレス半球面では、赤外放射の反射率（ $1 - \text{放射率}$ ）が 1 ではないため、補正計算が必要になる。補正方法として、熱い物体と冷たい物体の熱画像をサーモカメラ直接とステンレス半球経由で取得し、その温度差から補正式を作る方法がある。なお温度差による放射率の違いは大きくない。
- 反射率は、ステンレスよりもアルミの方が高いため、アルミ面の半球が用意できれば、より精度は上がる。ステンレス半球の他では、アルミフィルムによる風船やカーブミラーのアルミ蒸着、ステンレスカーブミラーなどの活用が考えられる。
- 日射を含まない赤外放射の MRT は、ステンレス半球上の面積が立体角と一致するため、熱画像より算出することが可能である。ただし、現実には有限距離からの撮影となるために 4π すべてが撮影できるわけではないこと、反射率の角度依存性により外縁部の精度が落ちることなどから、 2π 程度の画像データを 2 方向で撮影し、統合して計算する方が精度は高い。
- 近赤外領域の放射については、ハンディカメラのナイトショットモードに可視光以下の領域の光を遮るフィルタと減光フィルタを装着することで測定することができる。ただし、測定範囲は $1\mu\text{m}$ 程度までである。

2. フラクタル日除けについて

- ・フラクタル日除けの下が涼しいメカニズムとしては、可視光領域を遮ること、近赤外領域を遮ること、日除け自体の空気に対する熱伝達率が高く、風が吹くと日除けが冷めて、その結果赤外領域の再放射が少ないことが挙げられる。
- ・費用としては、設計・材工込みで 20 万円/m² 程度である。今後普及に伴い価格が低下することを期待している。
- ・導入事例としては、東名阪自動車道・御在所サービスエリア、京都大学構内、ららぽーと豊洲などがある。
- ・フラクタル日除けの効果を十分に得るには、周辺地面の温度上昇を抑制しなければいけないため、4～5 m 角程度の規模以上で整備する必要がある。
- ・留意点として、降雪地帯における耐荷重の問題と、不燃材料ではない点がある。風にあおられることやボールなどがぶつかることによる破損については、試験により問題ないことが確認されている。かつては屋根として行った構造計算に基づき太い柱だったが、試験を重ねた結果、現在は細い柱での設置が可能となっている。

3. その他

- ・暑さをもたらすものが、気温なのか放射なのか明確にすることが重要である。
- ・熱放散効率には、物体のサイズが大きく影響しており、1 cm か 1 m かで大きく異なる。例えばミニカーで実験をすると、通常の自動車のボンネットが高温になる環境でも、ミニカーは熱くならない。
- ・植物は近赤外領域の反射率が高い特性がある。植物の表面温度が上がりにくい理由としては、蒸散効果が注目されがちであるが、近赤外の反射率が高いことや、葉が小さいことにより大気への熱放散効率が高いことの影響も大きい。
- ・近赤外領域の吸収率は、カーボンブラックが高く、染料系の黒ではカーボンブラックよりも低い。酸化チタンの白はほぼ吸収しない。
- ・アルミは近赤外の反射率が高いため、オーニング等の表面に蒸着することで表面温度の上昇を抑制することが可能となる。また、赤外の放射率が低いため、オーニング等の裏側に蒸着することで、再放射がほとんど起きなくなる。本来の目的は遮光と思われるが、裏側にアルミ蒸着が施されたパラソルやターフは実用化されている。
- ・既存の放射測定器では、近赤外領域については 2 μm 程度まで、赤外領域については約 5 μm 以上が測定領域となるため、その間の放射については調べられていない。

以上

ヒアリング先：(一財)気象業務支援センター 振興部 部長代理 登内道彦氏

日時：平成24年12月17日 10:00～11:00

質問者：石丸、辻

1. 観測高度による WBGT の違いについて

- ・都内の駐車場において高さ別(地上から 50cm、100cm、150cm)に WBGT の観測データによると、夏季日中で、100cm と 150cm では差はないが、50cm では 0.2～0.3℃高い値を観測した。
- ・この違いを WBGT の成分である乾球温度、湿球温度、黒球温度で見ると、黒球温度の寄与が大きい。そのため、幼児などの熱ストレスを低減するには、放射への対策が重要である。
- ・地面近傍の接地境界層では、気温や黒球温度は高い値を示す。
- ・湿度については測定精度が4%程度であり、わずかな違いを評価するには測定誤差が大きすぎる。そのため、50～150cm 程度の範囲での観測高度の違いを見る場合においては、湿度は一定とみなして評価するのが良い。

2. 地表面構成による WBGT の違いについて

- ・芝地とアスファルト上での WBGT の観測データ(夏季)によると、午前中は芝地のアルベドが高いため反射日射の影響により芝地とアスファルトの違いは見られないが、午後は芝地に比べて蓄熱効果によって高温化するアスファルトが高い値を示す。WBGT の違いとして 1.9℃程度だが、そのうち約 1.4℃は観測手法の違い(強制通風と自然通風)であり、実質的には約 0.5℃である。

3. 適応策の進め方について

- ・気温は観測手法にも大きく依存するため、放射(黒球温度)に着目した熱環境改善の誘導は分かり易く、評価もしやすいと思われる。

以上

ヒアリング先：名古屋工業大学大学院 工学研究科 産業戦略工学専攻 堀越哲美 教授
日時：平成25年1月18日 15:00～17:00
質問者：石丸、辻

1. 適応策の評価に有用な温熱指標について

- 人体の熱収支に基づいた指標であれば、指標間で多少の差異はあっても、理論的に大きな違いではないので、採用する立場を明確にして使用すれば良い。
- 一部の温熱指標で考慮している路面からの熱伝導については、路面温度が50℃を超えるよう状況では無視できなくなる。ただし、評価するかどうかは目的による。
- 総合指標は様々あるが、放射の項（MRT）をどのように入力するかが重要である。人体側のパラメータとして、一般的には着衣量等に注目しがちであるが、MRTには短波の吸収率および長波の放射率が大きく影響し、この値は着衣の物性に依存する。そのため、着衣の表面材質等の物性の違いにより評価にどの程度の幅が出るのかは示しておいた方がいいと思われる。
- また子供・大人の身長の違いは、特に床面の形態係数に影響するため、身長の違いによる評価の変動幅の把握も重要である。
- また人体形状を考えた場合、直達日射の方位によって受ける面の大きさが異なるため、その変動幅についても把握しておくことが重要である。把握手法としては、人体を直方体に見立てて等価形態係数^{※1}で重み付けをする方法や、微小球であっても入射量算定に人体の Projected area factor^{※2}を考慮することで放射の方位性を評価する方法がある。
- 熱伝達率については、現在は椅座状態の値が通常用いられているが、屋外では特に今後立位状態の値を通常としていくべきであると考えている。
- PMVは椅座・安静の場合発汗しないことを前提とした快適方程式に基づいた指標であり、発汗するような暑い環境には向いていない。暖房環境向きと言われている。PET^{※3}はその点を改良し、屋外でも適用できるようにした指標であると認識している。
- ETU^{※4}の利点は、体感温度に各温熱要素がどれだけ寄与しているかを一目で分かるようにした点であり、どの温熱要素に対策が必要かすぐに把握することができる。指標の値自体はSET*と本質的な違いはない。ただ、用いている特性値が新しく導出したものを用いたりしているので、それが異なることが影響している。
- ある地点の熱環境について時間変化も含めて評価するには、熱収支について積算することで、評価ができる。

※1：人体を直方体と見立てた場合における、立方体の6表面のそれぞれに対する等価な形態係数。

※2：投影面積率。有効放射面積（放射を受ける体表面積）に対する投影面積の割合。

※3：PMVから発展した指標。評価地点における皮膚温度・深部体温の値となる標準的な室内環境（気温＝平均放射温度、風速0.1m/s、水蒸気圧が12hPa）における気温。

※4：日射・伝導の影響を加味しつつ、不均一な熱環境の場を成分ごとに分離表現できる温熱指標。

2. WBGT について

- ・元々が軍隊におけるイスラエルの砂漠での熱環境評価に用いられていた指標であり、日本では夏季の日なたや溶鉱炉前などの作業環境では有用だが、一般的な使用には適さない。
- ・実験値に基づき作られた式であり、熱収支に基づいていない点も問題である。既往研究では熱収支から WBGT 式を導出した場合に、各項の係数が異なるという指摘もある。
- ・気流に関する感度が悪い。黒球表面の対流における熱交換に風速が関係するが、応答速度が遅く、瞬時的な評価はできない。したがって、屋内の気流や放射熱が安定した環境であれば問題ない。
- ・ただし、現状では行政においても学会においても WBGT が最も頻繁に使われている指標であり、日本で独自に提案された指標などは簡単には広まらないのも事実である。

3. 観測方法について

- ・全球熱画像など、放射の方位性や形態係数が把握できる観測手法は、対策検討がしやすい点で優れている。6 方位（上下、水平方向 4 成分）の放射について、放射収支計などにより把握する手法も同様である。
- ・黒球温度についても、黒球だけでなく白球・銀球（ぴかぴか面）・発熱球を使うなど放射成分ごとに分離できる観測ができれば、対策の検討がしやすくなる。

4. 行政における適応策推進について

- ・名古屋市は暑さに対する市民の意識が高く、暑さ対策としての施策が進みつつある。このように市民の関心が高くなれば、施策として実現性が増していく。名古屋市都市マスタープランでは「風の道づくり」と「環境軸（緑と水の回廊ゾーン）を設定」「ヒートアイランドの緩和」「クールスポット」という下りが入っている。
- ・ただし、単に暑さ対策として進めるのではなく、快適な屋外空間の創出により、市民の屋外活動の促進や居場所の創出等を行うデザインとすることが重要である。
- ・また、対策効果として、緑陰による放射環境改善効果や水景施設による気温の低減効果等を示していくことも効果的である。

以上

ヒアリング先：日本工業大学 工学部 建築学科 成田健一 教授、三坂育正 教授

日時：平成 25 年 2 月 21 日 17:00～19:00

質問者：石丸、辻、大場

1. 適応策の評価指標について

- WBGT には注意点多いため、代替指標として、熱収支が考慮され、人体生理との関連があり、測定も容易な指標が今後確立できればいいと思うが、学会等を巻き込んで長時間をかけて検討する必要があり、現実的ではない。そのため WBGT を使わざるを得ない状況であると思うが、そうであれば、測定方法の標準化など適切な運用基準を検討する必要があると思われる。そうすることで、文献間の WBGT 値が比較できるようにもなる。(成田先生 以下敬称略)
- 測定方法については、歴史的な定義はそれとして、測定精度だけでなく、多くの人が使えるように、測定の容易さや取扱い・維持管理の容易さ、機材の費用なども念頭に検討すべきである。(成田)
- その際、WBGT の定義と標準化された WBGT の値には誤差が出る事が考えられるので、その差を把握する必要がある。(三坂先生 以下敬称略)
- SET*は快適性を評価するために考えられた指標なので、熱中症のような危険域での感度があるか不明である。(成田)

2. WBGT (湿球黒球温度) の留意事項について

- WBGT は、熱収支に基づいていない点や軍隊の安全管理という特異な条件下での指標という点などから、注目度は高くなかったが、近年になって熱中症の話題が出てから、注目されはじめた。(成田)
- WBGT は ISO の指標になっているが、熱収支に基づいていない指標がそのようになった経緯については把握していない。(三坂)
- 多くの方は湿球温度を求める時、WBGT の定義にある自然湿球温度ではなく、相対湿度と気温から求めているのではないか。(三坂)
- WBGT は屋外指標として利用されることが多く、建築に限らず様々な分野で扱われているが、測定方法について精査されているかは疑問である。文献を参照する際には、湿球温度を含め、測定条件について確認する必要がある。(三坂)
- 簡易な WBGT 測定器が市販されているが、測定器の機種の違いにより値に差が出る可能性が考えられる。WBGT 測定器では、湿球温度を測定していないと思われるが、湿球温度がどのような計算により算出されているのか把握していない。また黒球温度も球が小型のため、補正が必要と思われるが、風速も測定していないと思われ、計算過程は不明である。(三坂)
- WBGT の算出に必要な湿球温度について、気温と湿度から計算するには煩雑な計算が必要となる。(三坂)
- ただし、一度プログラム化してしまえば大きな問題ではない。(成田)
- WBGT は短波長波を個別に把握できない。そのため、例えばオーニング設置時における短波の低減と長波の増加など、対策検討時の効果把握を十分にできない可能性がある。(成田)

以上