

## 寒暖の指標としての相当温度について\*

松本 久\*\*

### 1. はじめに一暑さと高温の混同一

夏期、気温は同程度でも湿度が高いほど暑苦しく感じることは誰しもが実感していることである。特に梅雨期などには、気温は27~8°Cであっても、盛夏時の30°Cを越える時の暑さ以上のやり切れない蒸し暑さを感じる事が多い。報道関係者は、そうした市民の実感を数字の裏付けをもって伝えようとして不快指数を用いるわけである。しかし気象庁は不快指数を業務としては扱っていないということもあって、通常は気温の高低がすなわち暑さの程度であるとして報道が行われている。

平均的な気象状態であればそれでも特に問題はないのだが、極度の多湿または寡湿の場合には、気温の高低と体感の実感との食い違いが表面化してくる。

多湿の例は初めに挙げたが、寡湿の例としては、例えば春先のフェーンによる高温である。これを指して「7月上旬並の暑さ」などと報じられるのが常であるが、フェーンによる低湿のカラッとした暑さと、梅雨期のベトつく暑さが体感的に同等でないことは明らかである。また、「乾燥が著しいためほとんど発汗せず」(角田, 1992) という山形の40.8°Cを「日本一の暑さ」とするのと同様に適切な表現ではない。

気温は暑さの第1近似ではあるが暑さそのものではない。暑さと高温を区別しなければならないと考える。

筆者は気象台の現場でこの種の応待を経験したことがあるので、蒸し暑さの裏づけを求める社会の要望に応える意味でも、また用語の混同を正すためにも、何らかの寒暖の体感の指標となるべきものを持たなければならないのではないかと前々から考えていた。

### 2. 不快指数は気温を二度使っている?

現在一般に最も知られているのは不快指数である。不快指数 (Discomfort Index : DI) の本来の定義は

$$DI = 0.4(t + t_w) + 15 \dots\dots\dots(1)$$

である。t : 気温,  $t_w$  : 湿球温度, 単位は °F.

このように、DI の実体は  $(t + t_w)$  である。これは、 $t_w$  を水蒸気量の指標として t に加算することによって、気温のみでは表現できない蒸し暑さを指数として示そうとしたものである。

しかしながら、湿球温度  $t_w$  を

$$t_w = t - (t - t_w) \dots\dots\dots(2)$$

としてみればわかるように、 $t_w$  は、気温は変わらずとも、乾湿球差  $(t - t_w)$  が大きくなるほど、つまり水蒸気量が少なくなるほど低いのである。

すなわち、 $t_w$  は、水蒸気量の多少を t から減ずる形で蒸し暑さの程度を表現したそれ自身が一種の体感指数であることを意味している。

$t_w$  がそうであるとすれば、DI の実体である  $(t + t_w)$  とはどう違うのか。それは

$$t + t_w = 2t - (t - t_w) \dots\dots\dots(3)$$

であるから、式(2)の  $t_w$  の立場からすれば、式(3)の DI は t を重複して用いていることになる。

あるいは、式(3)を1/2にすれば、 $t - 1/2(t - t_w)$  であるから、DI は  $t_w$  に比べて水蒸気量の効果を1/2に評価した体感指数であると見ることもできる。

(注) 湿球温度と相当温度

湿球温度とは、アスマンなどの通風乾湿計の湿球の示す温度のことであるが、熱力学上での物理的な意味は「気塊中で水を飽和に達するまで蒸発させたとしたとき、蒸発の潜熱によって冷やされた気塊が達すべき温度」である(熱力学上正しくは、等圧湿球温度)。

湿球温度  $t_w$  と表裏一対の概念が、相当温度  $t_e$  である。  $t_e$  の物理的意味は「気塊中の水蒸気をすべて凝結

\* On the equivalent temperature as a hotness and coldness index.

\*\* Hisashi Matsumoto, 日本気象協会奈良支部.

させたとしたとき、放出される潜熱によって暖められた気塊が達すべき温度」である(同、等圧相当温度)。

このように、 $t_w$  と  $t_e$  とは共に潜熱を介して水蒸気量を温度の形にして湿潤空気の状態を表現したものである。ただしその過程が逆方向という相異である。

従って、体感指数としての  $t_w$  と DI の相異について指摘したことは同時に  $t_e$  と DI の関係でもある。

### 3. 体感指数としては相当温度が適当である

従来、DI の外にも、ヤグロー、リンケなど多くの人々によって各種の体感指数(体感温度)が提案されてきた。相当温度  $t_e$  もその一つである(神山, 1968)\*。

$$t_e = t + \frac{r \cdot L_v}{C_{pa}} \dots \dots \dots (4)$$

ただし、 $r$ : 混合比(水蒸気量)、 $L_v$ : 凝結の潜熱、 $C_{pa}$ : 乾燥空気の定圧比熱、である。右辺第2項が潜熱による昇温分に相当する。

体感指数として  $t_e$  が適当であると筆者が考える理由は以下のとおりである。

(1) DI その他の各種体感指数・体感温度がすべて単なる指数であるのに対して、 $t_e$  のみが熱力学的物理量である。すなわち、気温や露点温度・相対湿度などと同等の気象データである。

(2)  $t_e$  の物理的な意味は高校生なら理解できるはずだし、また蒸し暑さの原因である水蒸気量に相当する温度を加えるという考え方は受け入れやすいだろう。

(3)  $t_e$  は(冷房+除湿)の使用電力に対応する

夏期、高温・高湿の室内の空気を、快適な温度・湿度にまで下げるために必要とするエネルギー(電力)は、乾燥空気の冷却分に加えて、除湿によって生じた潜熱による昇温分も冷やさなければならないわけであるから、冷房・除湿をする前と後の  $t_e$  の差に比例するはずである。このことは式(4)から理解できる。

(4)  $t_e$  は(暖房+加湿)の燃料に対応する

今度は逆に、冬期、低温・低湿の室内の空気を、加温・加湿するために必要とするエネルギー(燃料、電力)もまた、その前後の  $t_e$  の差に比例するはずである。

従って、冷房の場合と併せて、ビルの空調管理や植物の温室栽培に、またそれらのための必要エネルギーの計算等に対しては、従来の温度のみ、または温度と

湿度を併用する経験的方式に代わって、 $t_e$  を用いる方法はより合理的な方式となりうるものと考えられる\*\*。あるいは、夏期の最大電力の予測などに対しては、より精度の高い予測の可能性が期待される。

(5)  $t_e$  は寒さの体感にも用いることができる

冬期においても水蒸気量の多少は体感に影響を与える。例えば、「空っ風」の身を切るような冷たさは、低温と強風だけではなく低湿度も原因となっている。また雪国が意外に寒くないのは高湿度のためだろう。

従って、暑さの場合と同様に、気温と水蒸気量によって与えられる寒さ(寒さの第2近似、と言ってもよい)として  $t_e$  を用いることができると考えられる\*\*\*。

以上を総合すると  $t_e$  は、暑さ~快適~寒さ、の全領域の(つまり、通年の)体感に適用できるはずである。

後述のように、筆者は夏期および冬期の自分自身の体感記録の分析からそのことを確かめている。

### 4. 風または放射を含む体感指数は適当ではない

筆者の考えに対して、体感を表現する目的なら風や放射の影響も取り入れなければならないのではないか、という意見があるので、気温と水蒸気量以外の要素を加えることは好ましくないと考える理由を述べる。

(1) 現在では大多数の人々は屋内にあり戸外の人はい少ない。その戸外の人でも地物の影響のため、自然の状態の風や太陽放射を受ける人はさらにその一部である。

(2) 戸外の人のおほとんどは地表付近で行動している。それに対して気象官署の風速計は地物の影響を避けるために高所に設置されているので、その風速は人々が地表付近で受けている風速よりも通常かなり強い。

また、気象官署ごとに風速計の設置高や周囲の障害物の状態に大きな差異があり、そのことに由来する官署間の風速差が小さくないことにも問題がある。

(3) 一般の気象官署で行われている放射の観測は「全天日射量」である。これは水平面への入射量を測つ

\*\* 空調は通常、温度と湿度によって管理されているが、 $t$  と  $t_e$ 、または、 $t$  と  $(t_e - t)$  を用いる方が合理的である。潜熱による昇温分  $(t_e - t)$  は、室温の範囲では水蒸気の絶対量に比例するとして扱えるので相対湿度とは違った利用面があるだろう。

\*\*\* 水道管の凍結事故等は気温の低さのみに関係する。寒さと低温の混同についても注意したい。

\* 神山(1968)は『 $(t_e)$  は室内で日射や放射のないところではかなり体感に平行するものである』としている。

ているのだが、立っている人間は縦長であるから、晴天時には戸外の人間が受ける放射量とは対応しない。つまり、風や放射の効果を組み入れたいとしても、気象庁は体感用に適した観測は行っていないのである。

(4) 風または放射の項を加えるとしても、それらのウェイトをどうするかについては定説はない。このため、風その他を付け加えることによって、かえって一般性が失われてしまうことになるだろう。

気象庁が一般に提供するデータは、その地域を代表するデータであり、また個別の目的に応じて様々に加工可能な基本量であることが望ましいはずである。

その点  $t_e$  であれば、例えば、ある都市の使用電力と気象条件との関係を求める場合、 $t_e$  を基本とし、それに太陽放射による都市の昇温（それには全天日射量に対応するデータとなるだろう）や、都市に溜った熱を風が運び去る効果（気象官署の風は今度は有効なデータとなるはずだ）、さらに気候変化への人体の馴化、といった項目を付け加えた解析を行えばよいわけである。それが、風や放射を含む指数では解析がかえって面倒なことになる。

## 5. 相当温度の観測と予想

水蒸気量を表す何らかの数値（相対湿度・露点温度・水蒸気圧・混合比…などのうちのいずれか）と気温とによって  $t_e$  を計算することができる。

(1) 現在気象官署では、デューセル露点計によって露点温度を自動的に観測する方式をとっている。その露点温度と気温を用いて観測装置内で自動的に  $t_e$  を計算し出力するような方法が可能ではないだろうか。

(2)  $t_e$  と  $t_w$  は互いに換算する関係にあるので、通風乾湿計の  $t_w$  から  $t_e$  を求めることができる。

(3) 一般には相対湿度を指示する湿度計が市販されているが、その湿度と気温から計算表などによって  $t_e$  を求める、という方法も考えられる。ただしこの方法の場合は湿度計の精度が問題になるだろう。

(4)  $t_e$  が寒暖の指標として用いられるようになった場合には、 $t_e$  の予想値が、生活情報として、また電力関係や空調管理などの面から求められることになるだろう。この予想は現行の気温予想の延長上の問題であるから、技術上には特に問題はないものと思われる。

## 6. 相当温度の一般名を「寒暖指数」としたい

$t_e$  の一般への普及を考えると、それは降水確率の場合よりも容易と思われる。けれども、相当温度という

用語はなじみにくいので、「寒暖指数」という一般名を用いることにしてはどうだろうか。もちろん外にもっと適切な名称があればそれでもよい。また潜熱昇温分 ( $t_e - t$ ) を、例えば、「潜熱温度」 $t_i$  などとして用いれば  $t_e$  の理解を助ける役目もするだろう。

## 7. 寒暖の体感と相当温度の関係についての考察

筆者は以前、自分自身の体感記録をもとに、寒暖の体感は気温と相当温度のいずれによりよく対応するのか、という調査をしたことがある（松本、1985）。今回は、その調査と解析を改めて整理し直してみた。

### 7.1 暑さへの対応は $t$ と $t_e$ のいずれがよいか

最初は、夏季（1985、6～8月）の「暑さ」を調べた。

#### 7.1.1 体感を記録する条件

(1) 場所は、奈良地方気象台の構内、または市内の自宅付近で、戸外、風を避け、日中は太陽の直射を受けない場所、時刻は気温の高い日中を中心に、朝や夜間も含めて、データに幅を持たせるようにした。

(2) 歩行や作業をせず、静かにしている状態での体感を記録した。衣服はその季節の一般的服装である。

(3) 暑さの程度は、「非常に暑い」から「涼しい」までを5段階に区分して記録した。

#### 7.1.2 体感記録の結果

以上の条件によって記録した体感の程度を、縦軸に相当温度  $t_e$ 、横軸に湿数（気温・露点差： $t - t_d$ ）をとった座標上にプロットしたのが第1図である。

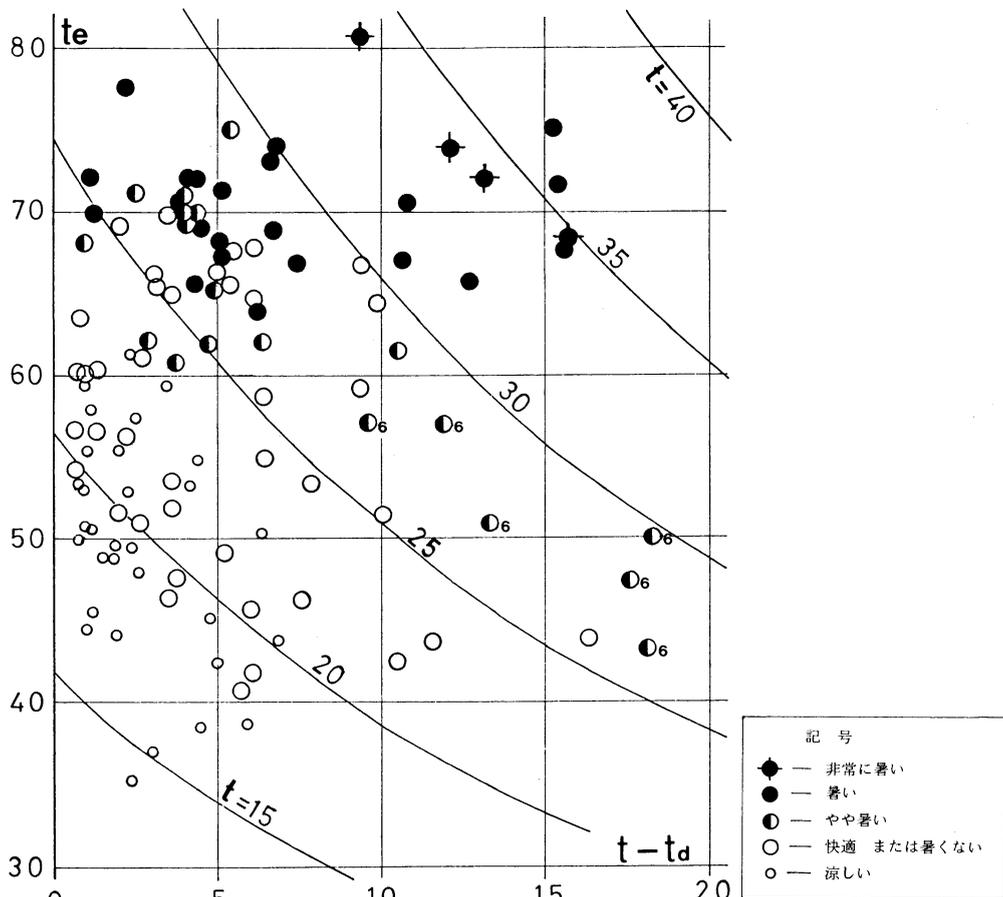
図において、同一記号が横に並べば、暑さは  $t_e$  に対応することを示し、右下がりの気温  $t$  の曲線に沿った分布になれば、 $t_e$  よりも  $t$  への対応がよいことになる。しかしながら、第1図を見る限りでは、どちらとも判定しにくい分布である。

#### 7.1.3 気温と水蒸気量以外の要素の影響について

はじめに示した体感を記録する条件は、気温と水蒸気量以外の要素の影響を極力避けるためのものであったが、実験室ではない自然条件の下では、風、放射、および生理的条件の変化などの影響を避けることはできなかった。その点について改めて検討してみる。

(1) 雨や曇の時に比べて、晴天時 ( $t - t_d$  : 大) には日陰でも太陽放射の間接的影響が感じられた。

(2) 梅雨期で、気温は高くないが高湿度 ( $t - t_d$  : 小、 $t_e$  : 高) の状態では、動かなければ暑くないが、歩行や作業を始めると急に蒸し暑さを感じてくる。それに対して、低湿度の状態 ( $t - t_d$  : 大、 $t_e$  : 低) でも動けばや



第1図 暑さの体感と、相当温度 ( $t_e$ :縦軸), 湿度 ( $t-t_a$ :横軸), および気温 ( $t$ :曲線) との関係。  
 ( $t_e$  以下第2図も同じ)  
 期間: 1985年6~8月。  
 図中添字6は6月の体感である。

はり暑く感じるが、高湿度の場合ほどではない。

このことは、もし体感記録を歩行や作業をしている状態とっていたとすれば(人間としてはむしろその方が常態かもしれない), 図の左側の高湿度のグループは、右側の低湿度のグループよりも相対的にはより暑い方の記号に変わっていたはずである。

(3) 初夏から盛夏に向かって体が次第に暑さに馴れてゆくのが確められた。例えば、第1図中の添字6の「やや暑い」のグループは6月の体感であるが、これは7・8月なら「暑くない」と感じていたはずのデータである。

(4) 風の強い日のデータは採用しなかったので、風の影響は少ないものと思われる。

以上の検討結果によって第1図の記号を見直したと

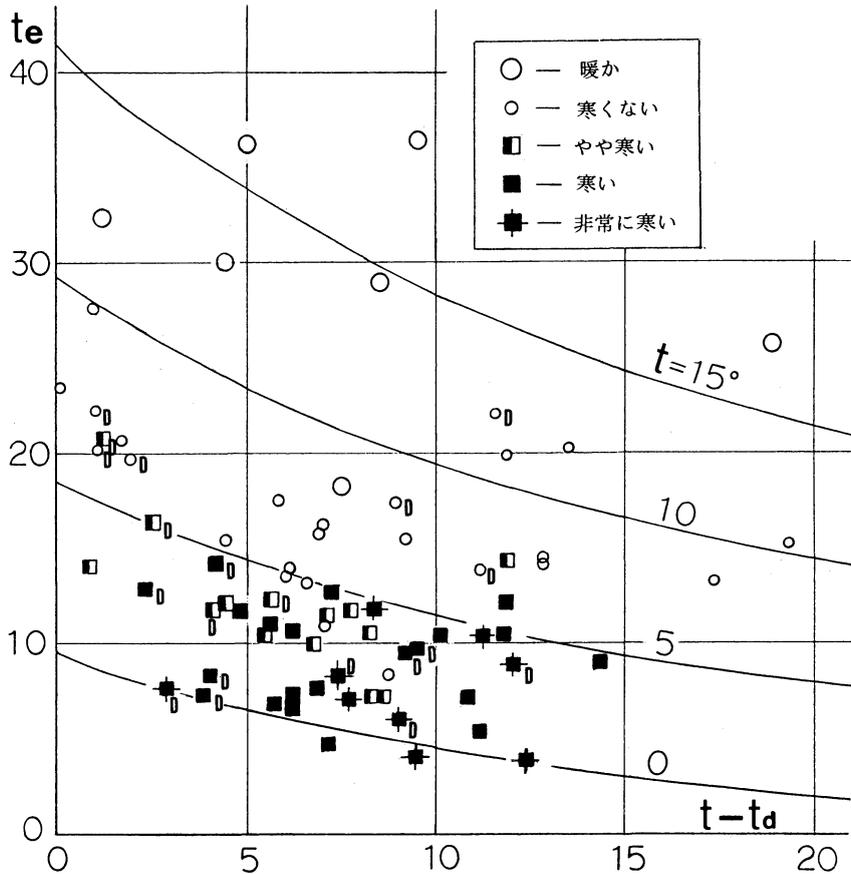
すれば、 $t$ の右下がりの曲線に沿う記号は左上から右下へ( $t$ は変らないが)次第に涼しい方の記号に変化してゆくことになり、全体としては横並び傾向の分布になるだろう。

従って、気温と水蒸気量によって与えられる暑さの程度は $t$ よりも $t_e$ への対応がよいと言えそうである。

7.3 寒さへの対応は $t$ と $t_e$ のいずれがよいか  
 冬期(1985, 12~1986, 2)にも「寒さ」について同様の調査を行った。結果を第2図に示す。

この場合も分布が乱れておりどちらとも判定しにくい。これについても他の要素の影響を検討してみる。

(1) 冬期は風の強い日が多く、風の影響を受けたデータも含めざるをえなかった。冬期季節風の強い日



第2図 寒さの体感と3要素との関係  
 期間：1985年12月～1986年2月。  
 図中添字Dは12月の体感である。

は通常低湿度 ( $t-t_d$  : 大) である。一方、冬期高湿度 ( $t-t_d$  : 小) になるのは、雨、曇、放射冷却の朝などであり、これらの時は一般に風は弱い。従って、第2図右側のデータには風によって寒すぎる体感となったデータが左側よりも多く含まれている。

(2) 日陰における太陽放射の影響は、夏期と同様、晴の日の方が曇や雨の日よりも大きいはずである。

その結果、風が強くて晴の日 (冬型の場合に多い、 $t-t_d$  : 大) の日中は、風と放射が体感に与える効果は互いに打ち消し合う方向に働くことになる。

- また、( $t-t_d$  : 大) のグループの中には、外に、
- ・風：強、放射：小 (冬型で曇) → 寒
  - ・風：弱、放射：大 (移動高で晴) → 暖
- というデータも混在している。

このように、風と放射の効果は寒暖まちまちである。ここでは大変大まかではあるが、その両者の効果は全

体としては相殺されているものとしておく。

(3) 歩行や作業をした時の体感と湿度との関係は、暑さの場合ほどに差があるとは感じなかったが、体を動かしている状態での体感であれば、夏期と同様に高湿度 ( $t-t_d$  : 小) の方が低湿度 ( $t-t_d$  : 大) の場合よりもより暖かく感じる程度が大きいはずである。

(4) 初冬から真冬に向かって、体が次第に寒さに馴れてゆくのが確認された。特にこの年の12月は真冬並の低温の日が多く、とりわけ寒く感じられた。従って、第2図中の12月のデータ (添字D) は、もし1・2月ならば、1ランク暖かな方へ変わっているものが多いはずである。

以上を総合すると、(1)と(2)は相殺されると考えるわけであるから、(3)と(4)の補正をして図を見直してみると、例えば、気温の5°Cまたは0°Cの曲線に沿って、左上から右下へ ( $t$  は変らないが)、次第に寒い記号に

変わってゆく傾向を示すことになり、この場合も、記号は全体として横並びの傾向に分布することになるだろう。

#### 7.4 結果について

以上の結果として、暑さ・寒さ共にtよりも $t_e$ の方が体感への対応がよい、という結論が得られたと思う。

従って、 $t_e$ は通年の体感の指標として用いることができる、と考えるわけである\*\*\*\*。

#### 8. 相当温度と不快指数の比較

2項で見たように、DIは $t_e$ に比べて乾湿球差( $t-t_w$ )の効果を1/2としているので、DIは $t_e$ よりもtに近く、 $t_e$ とtの中間の性格の指数である。DIを第1図、第2図に描き入れると、 $t_e$ が水平の直線、tが右下がりの曲線であるのに対してDIはその中間のゆるやかな右下がりの曲線になる。

そこで、筆者の体感データへの対応は $t_e$ とDIとのいずれがよいかという問題だが、このデータは、tと $t_e$ という大きな開きに対してもそのままでは判定困難であったことを考えると、その差が1/2である $t_e$ とDIの判定には使えそうもない。 $t_e$ とDIの比較が目的であれば、気温と水蒸気量以外の要素の影響を受けない実験室によるデータを用いる必要があるだろう。

しかしながら、筆者が $t_e$ を支持するのは3項で述べ

たような諸種の理由によるものであるから、 $t_e$ はtよりも体感に近い、ということが裏づけられればよいのであって、 $t_e$ とDIの比較はの場合あまり大きな意味を持たないと考えている。

#### 9. むすび

以上のように、相当温度は、産業・環境の基礎データとして、また生活・報道のための情報として活用範囲の広い気象データである。会員諸賢並びに気象庁当局がこの問題を検討されることを希望している。

#### 謝 辞

このテーマをまとめるにあたっては、荒川正一氏から資料の提供と多くの有益な助言を頂いた。記してここに感謝の意を表する次第である。

#### 参 考 文 献

- 角田東洋男, 1992: 紅花の山形路, 気象, 1, 16.  
 神山恵三, 1968: 身体を通じての熱収支, 生気象学, 日本生気象学会, 351-356.  
 松本 久, 1985: 寒暖の体感と相当温度の関係についての考察(1), 大阪管区府県研究会誌, 100-101.

\*\*\*\* もっとも、t単独よりも、tに水蒸気量の影響が考慮された $t_e$ の方が対応がよいのは当然である。

だがその当然の結論に至る経過に曲折があったということは、風・放射・生理的条件等が体感に与える影響もまたそれぞれに小さくない、ということの意味していると思われる。体感は複雑である。