

# 暑い気温とぬるいお風呂

白井光雲

November 10, 2018

今年（2018年）の暑さは単に暑いという平凡な表現を通り越し「生命に危険な暑さ」と表現される。そういう夏のある日、ネットを覗いてみると、「38°Cという気温はものすごく暑いと感じるのに、風呂の温度が38°Cであればぬるいと感じるのはなぜ」という素朴な疑問を、中学生が自由研究のテーマに取り上げたことがネットで紹介されていた。この中学生は、様々な仮説を立て、それが正しいかを一つ一つ検証していく。その過程が実に見事である。例えば風呂では首から上が出ていることが原因ではないかと考え、シュノーケルをくわえて湯に潜って実験する。結果は熱いと感じることはなかったのでこの仮説は誤っていた。そのような仮説・検証を積み重ねた結果、「皮膚表面の温度と外気の温度差」が体感としての熱さ・寒さを決めるという結論を導く。外気の場合、発汗により気化熱が奪われるため、皮膚の温度が下がっていき、外気との温度差で熱く感じるという。大学の先生のアドバイスも受けながら、皮膚表面温度、皮膚深層部温度を測り、それをいろんな条件下で比較することでこの結論を導いた。見事である。この研究は優秀賞を獲得したのも当然で、翻ってみて専門家であるべき筆者など恥ずかしいながらとてもまねできない。熱い・冷たいという感覚が生体反応としてどう起きるのかということは筆者は知らない。おそらくこの中学生の結論は正しいだろう。そのような見事な研究に冷や水をかけるつもりは毛頭ないが、物理学者の端くれとして、このテーマの物理的側面から一言コメントしたい。

真夏の外気が非常に熱いという場合、我々は本当に気温に対して熱い冷たいを語っているのだろうか？よく「肌を刺すような」とか「じりじりする」熱さという言い方がされる。室内では同じ気温でもこのような表現はない。温度がもっと高いサウナでもこのような感覚はない。この「刺すような」という感覚は温度が高いというより、太陽の光そのものに起因するのではないか？肌刺される結果生じるのが日焼けであり、その原因は紫外線である。風呂と外気の熱源の主な違いはこの紫外線であるから、「外気が熱いという」原因は紫外線ということだろう。<sup>1</sup>

では紫外線ではなぜ刺すような熱さを感じるのであろうか？生理学を知らない筆者にとり、エネルギーの高い光粒子だけが日焼けを起こす「痛い」化学反応を引き起こすからと答えるしか能がない。痛いという感覚は熱いということとは違うので、物理としてはこれで話を終え、後は生理学者に託すということもできるが、それでは責任逃れの誹りを免れない。確かに化学反応と熱いという感覚は違うが、しかし光の引き起こす反応も最終的には熱エネルギーに転嫁することを考えると、全く違うというものでもない。実際、赤外線では日焼けはしないといえ、その強度が強ければ火傷する。しばらく光反応の詳細は無視し、エネルギーバランスから熱い・冷たいを議論しよう。

<sup>1</sup>物理を学ぶ日本人学生は朝永振一郎の「量子力学」で、光が量子（光粒子）であることの証拠としてこの日焼け現象があることを知り感銘を受けた人も多いはずだ。

そこでともかくも体を感じる「暑さ」を体内に流入する（単位時間、単位面積当たりの）熱流  $Q$  と仮定しよう。熱伝導の理論では、 $Q$  は体温と周囲温度との差  $\Delta T$  に比例する。つまり  $Q = K\Delta T$  の関係が成り立つ。比例定数  $K$  が周囲媒体の種類に依存するだろう。特に媒体の密度は重要で、密度に直接的に比例する。気体の密度は液体の密度に比べてケタ違いに小さいので、同じ温度差  $\Delta T$  であれば、入る熱流  $Q$  は気体の方がはるかに小さい。これでは外気の方が暑く感じるということと合わない。

熱の移動は、熱伝導によるもの以外に輻射によるものがある。部屋の外と内での一番の違いは日光による輻射があるかないかである。現代的な量子力学からは、光は粒々（光量子）である。光量子一個一個のエネルギーは  $h\nu$  で与えられる（ $\nu$ ：振動数、 $h$ ：プランク定数）。日焼けするということは（反応の詳細は筆者は知らないが）、分子をエネルギーの高い励起状態にするということである。励起エネルギーはもちろん物質で違うが、典型的には 1 eV（エネルギーは温度に換算することができるがそうすると 10000 °K くらいに相当）のオーダーである。このような高い励起を起す光とは  $h\nu$  が 1 eV くらいのもので、つまり可視光そして紫外線ということになる。肌を刺すような暑さの原因は、この一つ一つの光の持つ高いエネルギーに因るものであった。

しかしこれで話は終わらない。ではそれほど光粒子のエネルギーが高いなら、なぜ気温は 40°C とかの風呂の湯と同じくらいの温度に留まるのであろうか？外気という場合の温度は何であらうか？確かに気温 40°C というときのその温度は外の空気の温度に違いない。正確に言えば空気分子の温度である。しかし上の議論からすると、熱いと感じる周囲温度は「紫外線の温度」というべきものだ。「紫外線の温度」とは何かというと、太陽からの光放射の温度ということになる。太陽からの光放射は熱平衡と考えると、地球は太陽と離れているとはいえ、光放射の平均温度は太陽表面温度であり具体的な数値は  $T = 6000^\circ\text{K}$  である。直射日光を浴びているときの熱さというものは結局外気温度  $T = 6000^\circ\text{K}$  を感じているからということになる。このような高温では通常の意味ではあらゆる物質が即刻、跡形もなく蒸発してしまう温度であらう。しかしそうならないのは、蛍光灯内の電離気体の温度が一万度を超えるのにそのガラス管が融けないのと同じ理由である（「現代の熱力学」p. 57）。直射日光の  $h\nu$  がいくら大きいとはいえ、その粒子数  $N$  が圧倒的に小さいからである。

光の強さ（ $I$ ）とは、光量子一個一個のエネルギー（ $h\nu$ ）とそのような光粒子がどれだけ（単位時間当たり  $N$  個）入射するかその積で決まる。したがって  $\nu$  がいくら大きくても  $N$  が小さければ全強度（単位時間当たり入射エネルギー）は小さくなる。逆に  $h\nu$  が小さくても  $N$  が大きければ入射エネルギーは大きくなる。熱輻射と気体分子からの粒子束  $N$  を比較してみよう。

$$\text{気体の粒子束} = 2.3 \times 10^{23}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$$

$$\text{日光の粒子束} = 1.6 \times 10^{18}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$$

となる。この数値計算は下記参照。気体粒子の入射数が圧倒的に大きいことが分かる。したがって外気にさらされた物質の温度は空気の温度で決まる。日光の熱的な効果はほとんどない。寒暖計の指す  $T$  とは、全ての分子に平均化された後の分子当たりの平均エネルギーに他ならない。

もし比喩的に言い表すならば、太陽光の粒子一つの温度は  $T = 6000^\circ\text{K}$  に相当し、それが入射した皮膚の一分子は局所的な温度（というものが定義されるとして）として  $T = 6000^\circ\text{K}$  相当の温度となる。これがちくちくさす生体反応である。しかし周りにはまだ光粒子が入射していない分子が数多くあり、皮膚の平均温度としてはすぐに体温程度まで緩和する。この結果、日中太陽光を浴びても、体温はほとんど変わらない。

い。ただ光粒子の当たった分子レベルでの励起は大きく、これがさすような温度として認知されるということである。

筆者も暑さというものを単に太陽光からの物理的過程のみで理解できると主張するつもりはない。同じ太陽光強度でも、夏と冬ではその効果は違う。冬山でも晴れた日にスキーをすると肌が焼ける。場合によっては夏よりも危険なこともある。しかしうだるような暑さを感じることはない。それは上で述べた意味の局所的な火傷（分子レベルの反応）があっても、冷たい空気が火傷反応の結果として生じる熱を奪い取るからであろう。このプロセスは冒頭の中学生の述べた生体の温度を感じる機構が効くのだろう。

#### 参考文献

理科自由研究コンクール「自然科学観察コンクール」、2002年文部科学大臣奨励賞受賞作品「38℃の日は暑いのに38℃の風呂に入ると熱くないのはなぜか」

#### 計算詳細

気体の粒子束は  $\Phi_g = (1/6)nv_g$  ( $n$ : 気体の密度,  $v_g$ : 気体の速度) で与えられる。常温の  $N_2$  のデータ,  $n = 2.7 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ ,  $v_g = 520\text{m/s}$  より直ちに得られる。

一方、日光の粒子束とは太陽からの光子の粒子束  $\Phi_R$  のことである。地表上の太陽からのエネルギー束は  $\Phi_E = 1.3\text{kW}/\text{m}^2$  である（太陽定数と呼ばれる）。 $\Phi_E$  は粒子束  $\Phi_R$  と  $\Phi_E = h\nu\Phi_R$  の関係にある。太陽からの平均光子エネルギー  $h\nu$  は  $h\nu = 6000\text{K} = 0.52\text{eV}$  である。これより

$$\begin{aligned}\Phi_R &= \frac{\Phi_E}{h\nu} = \frac{1.3 \times 10^3 (\text{W}/\text{m}^2)}{0.52 (\text{eV}) \times 1.6 \times 10^{-19} (\text{J}/\text{eV})} \\ &= 1.6 \times 10^{18} (\text{/cm}^2 \cdot \text{s})\end{aligned}$$

となる。

<https://www.m-therm.info> 「議論の広場」