

お湯の 100°C は熱いが、油の 100°C は熱くない？

Is it true that boiling water at 100 °C is hot, but oil at 100 °C is not hot?

姫野 修廣 (信州大学)

Nobuhiro HIMENO (Shinshu University)

e-mail: nhimeno@shinshu-u.ac.jp

表題の「お湯の 100°C は熱いが、油の 100°C は熱くない？」だが、お湯も油も 100°C なら両方とも熱いに決まっていると思われるだろう。実は以前、あるテレビ局の番組担当者から次のような問い合わせがあった。

視聴者から「油の不思議」ということで表題のような情報が寄せられた。それによると、かなり昔の記憶なので詳しいことまでは覚えていないが、実際に試したことがあるとのことである。これが本当なら番組で取り上げたいが、さすがに科学的根拠がはっきりしないまま人体を使って実験するわけにもいかず、アドバイスをしてもらえないかということであった。具体的には

- (1) 実際に、油の 100°C が熱くないということが考えられるか？
- (2) (もし熱くないのであれば) どのような理由が考えられるか？
- (3) (もし熱くないのであれば) 指を入れることによって、やけどの危険性などはないか？

もっともな質問である。常識的に考えて 100°C の油に指をつけてやけどをしないなどということはありそうにない。しかし大学の授業で伝熱工学を教えている身としては、ややピンとくるものがあった。まんざら嘘というわけでもなさそうに思えたのである。100°C の油に指をつけた時に熱いと感じるかどうかは、詳細に考えると指の表面温度が何度になるかという問題に帰着する。100°C の熱い油に指をつけるのだから、当然指の表面温度は 100°C になり、やけどをすると考えるのがふつうだろう。しかしこれは熱いものにさわってやけどをしたことがある人間の被害者意識から来る発想というものだ。100°C の油の立場に立って考えると、36°C などという低温の人間の指などに触れると冷えてしまうと心配するかもしれない。人間にとっては 100°C の油は熱いが、100°C の油にとっては 36°C の人間は冷たいのである。したがって人間の指が

油に触れた瞬間には、指の表面温度が 100°C になることは決してない。100°C と 36°C の間の温度となり、その温度が何度になるかによって、熱いと感じるかどうか、あるいはやけどをするかどうかが決まるのである。

それでは指の表面温度は、どのようにして求めればよいのか？

ここから先は伝熱工学の知識を活用しよう。油は液体なので、本来、対流の影響を考えなくてはいいけないが、人間の指が油に触れた瞬間には流動が起こらず、油側も指側も熱伝導のみによって伝熱が生じると考えてよいだろう。しかも触れた瞬間には伝熱の影響は油側も指側も表面近傍に限られるため、半無限体の非定常熱伝導問題と捉えることができる。伝熱工学の教科書によれば[1]、図 1 に示すように初期温度 T_i の半無限体の表面温度がある瞬間に T_s となったときの温度分布は、非定常熱伝導方程式を解くことによって、次のように求まる。

$$T - T_s = (T_i - T_s) \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{at}} \quad (1)$$

ここで x は半無限体表面からの距離、 a は温度伝導率、 t は時間、 erf は誤差関数である。この結

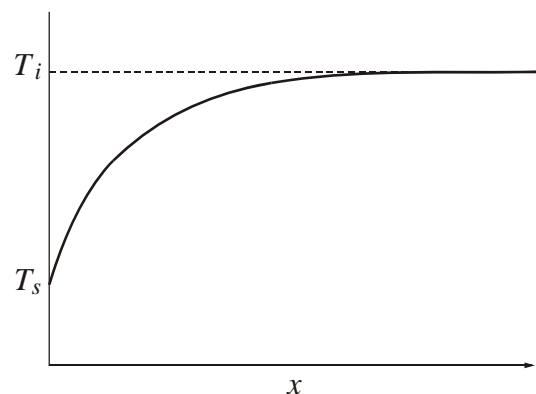


図 1 半無限体の温度分布

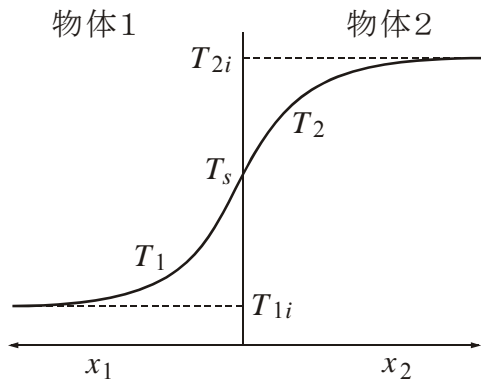


図2 2つの半無限体が接した場合の温度分布

果を利用すると、2つの半無限体が接触した場合の温度分布も求めることができる。

図2に示すように、初期温度 T_{1i} の半無限体1と初期温度 T_{2i} の半無限体2が接触する場合について考える。接触面での条件としては、両方の表面温度が一致する（温度 T_s とする）ことに加え、熱流束の連続性が保たれる必要がある。すなわち半無限体1, 2の温度、熱伝導率、表面からの距離をそれぞれ $T_1, T_2, \lambda_1, \lambda_2, x_1, x_2$ とすると、熱流束の連続条件は

$$-\lambda \frac{\partial T_1}{\partial x_1} = \lambda \frac{\partial T_2}{\partial x_2} \quad (2)$$

となる。式(2)で両辺の符号が異なっているのは、式(1)の結果を各物体にそのまま適用できるように、 x 座標を図2のように物体1, 2それぞれ独立にとり逆向きとなっているためである。式(2)の T_1, T_2 に式(1)を適用し、誤差関数の微分が両辺共通であることを考慮すると

$$-(T_{1i} - T_s) \frac{\lambda_1}{2\sqrt{a_1 t}} = (T_{2i} - T_s) \frac{\lambda_2}{2\sqrt{a_2 t}} \quad (3)$$

という式が得られる。式(3)をさらに整理し、 T_s について解くと

$$T_s = \frac{T_{1i} \frac{\lambda_1}{\sqrt{a_1}} + T_{2i} \frac{\lambda_2}{\sqrt{a_2}}}{\frac{\lambda_1}{\sqrt{a_1}} + \frac{\lambda_2}{\sqrt{a_2}}} \quad (4)$$

となり、境界面温度 T_s を、両物体の初期温度、熱伝導率、温度伝導率の関数として表すことができる。

このように計算式が求まったので、実際に指の

表1 熱物性値と表面温度の計算結果

	a [m ² /s]	λ [W/(m·K)]	T_s [°C]
ヒトの皮膚	0.12×10^{-6}	0.45	—
水	0.167×10^{-6}	0.676	71.8
潤滑油	0.074×10^{-6}	0.137	53.9
鉄	20×10^{-6}	74	95.3
空気	32.9×10^{-6}	0.0314	36.3

表面温度を計算してみよう。指の温度（ヒトの体温） $T_{1i} = 36^\circ\text{C}$ 、それに触れる物体の温度 $T_{2i} = 100^\circ\text{C}$ とし、式(4)に各物性値を代入して計算した結果を表1に示す。表1には計算した表面温度 T_s の他に、計算に用いた物性値も示してある。ヒトの皮膚の物性値については、個人差があるうえ水分含有量によっても異なるためははっきりしないが、妥当そうな値を採用した。また指に触れる物質としては、水、潤滑油、鉄、空気について計算を行った。これら4つの物性値はいずれも 100°C における値である。油としては、今回の趣旨からすると天ぷら油など食用油が望ましいと思われたが、物性値が不明のため潤滑油で代用した。また鉄と空気については、今回の問題には直接関係ないが、物性値の影響を明らかにする意味から参考のため計算した。

さて表1の計算結果について見てみよう。

表面温度 T_s は、指に触れる物体が水の場合には 71.8°C 、油（潤滑油）の場合には 53.9°C となっており、やはり視聴者の投稿どおり油の 100°C の方が熱くないのである。この大きな原因は、水の熱伝導率が際だって大きいことにある。

式(4)を見ると、表面温度 T_s は、両物体の初期温度 T_{1i}, T_{2i} を λ/\sqrt{a} の重みをつけて内分した形となっている。物理的に考えれば、 λ は温度勾配（の逆数）、 \sqrt{a} は表面の温度変化が内部へ伝わる距離に対応している。図2を見ながらこのことを考えると、表面温度 T_s の決まり方がよくわかると思う。例えば物体2の熱伝導率が一定のまま温度伝導率が大きくなると、温度勾配が一定のまま温度変化領域が深くなるのであるから、表面温度 T_s は低くなる。逆に物体2の温度伝導率が一定のまま熱伝導率が大きくなると、温度変化領域の深さは一定のまま温度勾配が小さくなるので、表面温度 T_s は高くなる。

このように表面温度 T_s は熱伝導率と温度伝導

率によって決まるが、定量的には、温度勾配は熱伝導率 λ の 1 乗に関係するのに対し、温度変化領域の深さは温度伝導率 a の平方根に比例する。したがって熱伝導率 λ の影響は、温度伝導率 a の影響の 2 乗で効くので、熱伝導率の影響が圧倒的に大きいことがわかる。例えば熱伝導率が 5 倍になると、温度伝導率が 25 倍になってようやくその影響をキャンセルすることができる。表 1 の水と潤滑油の物性値を比較すると、水の温度伝導率 a は潤滑油に比べて 2 倍程度大きい、熱伝導率 λ は 5 倍程度大きいので、温度伝導率 a の影響は熱伝導率 λ の $2/25$ となり相対的に無視できるほど小さい。このように表面温度 T_s は、熱伝導率の違いによって大きく支配されることがわかる。

ご存じの方も多いと思うが、水は我々にとって非常になじみの深いありふれた液体であるが、熱物性的には非常に特異な物質である。これは分子量が小さい極性分子であることと関係しており、比熱や熱伝導率の値は他の一般的な液体に比べて非常に大きい。例えば熱伝導率の場合、多くの有機液体では $0.1 \sim 0.2$ [W/(m·K)] 程度であるが、水は 0.6 [W/(m·K)] 以上である。冒頭で書いたように、今回の相談を受けたときに、ややピンとくるものがあり、まんざら嘘でもなさそうに思えたのは、こうした事情が頭をよぎったからだ。

ここから先はやや蛇足となるが、接触する物体によって表面温度がどのように変わるか、さらに明らかにするために、手近な物質として鉄と空気が接触した場合についても計算した。表 1 に示すように、鉄と空気の温度伝導率はヒトの皮膚とは随分違うが、定量的には上述のように熱伝導率の違いの影響が圧倒的に大きい。熱伝導率はヒトに比べて、鉄では 100 倍以上、空気では $1/10$ 以下で

ある。したがって表面温度 T_s は、鉄の場合には鉄の温度、空気の場合にはヒトの体温に近くなる。冬の寒い日に鉄のベンチに腰掛けると非常に冷たく感じたり、サウナ風呂でやけどしたりしないのはこうした理由による。

なお以上の話では、接触物体が液体であっても接触直後では対流が無視できるとして議論を進めてきたが、液体の中にしばらく指を突っ込むなどした場合には、当然、対流の影響は大きくなる。筆者が子どものころ、熱い風呂が好きな父親に褒められたくて、いくら熱くてもじっと我慢して湯船に入っていたが、まさに「じっと」していざるを得なかったのである。少しでも動くとも熱さがピリピリと体を刺すように襲ってきた。これは、動くとも対流境界層が薄くなり、熱伝達率が大きくなるためと納得したのは、大学で伝熱工学を学んだからのことである。

さて冒頭の「お湯の 100°C は熱いが、油の 100°C は熱くない？」の件だが、油は水に比べて熱くないのはわかったが、 53.9°C ではやはりやけどをするだろうし、 100°C の油の中に長時間指を入れた場合には当然これ以上の温度となるので、人体実験をしない方がいいのは言うまでもない。相談があったテレビ番組担当者の方には、数式は省略したが計算値を含めて以上の経緯を説明したところ、十分納得されたようで、テレビ番組で今回の実験を取り上げることはなかったようである。

参考文献

- [1] 例えば, Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C., *Conduction of Heat in Solid*, 2nd edition, Oxford (1978).