

TSS 文化大学一般教養講座
平成 27 年 6 月 16 日 10:00~
於 TSS 新館 9 階スタジオ

不思議な熱現象

菊地 義弘

(広島大学名誉教授)

1. 熱とは何か？

エネルギーがこれまで人類の文明を発展する上で担ってきた役割は極めて大きく、その重要度は将来も一層増大するに違いない。本講で述べる「熱」エネルギーは、言うまでもなく多様なエネルギーの中の一つの形態であり、しかも最も頻繁にかつ大量に扱われるエネルギーである。したがって、エネルギー問題を考え、有効な対策を講じるには、熱エネルギーを有効に利用する技術を発展させることが大切なことになる。

ところで、熱が高温の物体から低温の物体へと移動することは、我々が経験により知るところである。このような温度差に基づく熱の移動現象を伝熱とよび、この伝熱現象を扱う学問が伝熱学である。

ところで、熱を扱うもう1つの学問として熱力学がある。熱力学は温度が一様な平衡状態にある系を対象として、系がある平衡状態から他の平衡状態へ移るときの状態変化、それに伴う熱あるいは仕事の出入りについて議論する。熱力学における状態の変化は準静的なものであり、時間とか速度といった概念は含まれない。これに対して伝熱学は、温度の非平衡を前提として、温度の空間分布やその時間変化、あるいは熱の移動速度を議論の対象とする。

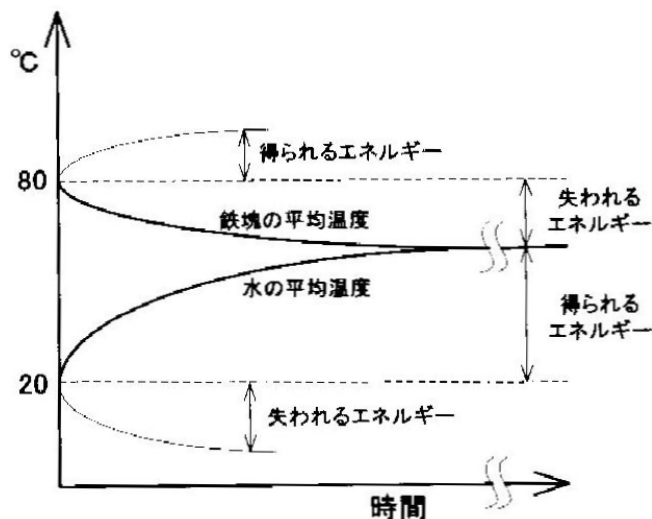


TSS 文化大学で講演する著者

この意味で、熱力学と伝熱学には本質的な違いがある。しかし、両者は共に熱現象を扱うものであるから、無関係であるはずがない。すなわち、伝熱にあっても熱は独りで生まれたり消えたりすることはなく、いかなる変化過程においても熱量の保存(エネルギー保存、熱力学第1法則)が成立する。また、熱は温度の高いところから低いところへと流れる。これは熱力学の第2法則に深く関わっている。

例えば、20 の水の中に 80 の鉄の塊を入れるものとしよう。周囲への熱損失が無いものとする、図1のように水と鉄塊の平均温度が変化する。すなわち、水温は次第に上昇し、鉄塊温度は次第に低下する。

そして十分に時間が経過すると水も鉄塊も同じ温度となることを我々は経験的に知っている。熱力学では、最初(0秒)と十分な時間が経過した平衡状態([無限大]秒)を予測できるが、途中の非平衡状態における熱が移動する速さを求める事が出来ない。この移動速度が伝熱学によって求められるのである。



熱力学(0秒) ——— 伝熱学 ——— 熱力学(秒)
 図1 80 の鉄塊を 20 の水中に投入した時の温度変化⁽¹⁾

2. ワットの蒸気機関は何が優れていたのか？

1759年にワットが蒸気機関を発明したが、その特徴は図2に示すように、シリンダーと復水器(コンデンサー)を分離したところにある。しかし、初期の蒸気機関では、燃料が発生する熱を仕事に変換する効率は1%前後で出力は約4kWであったと言われている。現在では、液化天然ガス(LNG)を燃料とするガスタービンと蒸気タービンの複合サイクルによる変換効率は50%以上で出力は80万kW以上である。

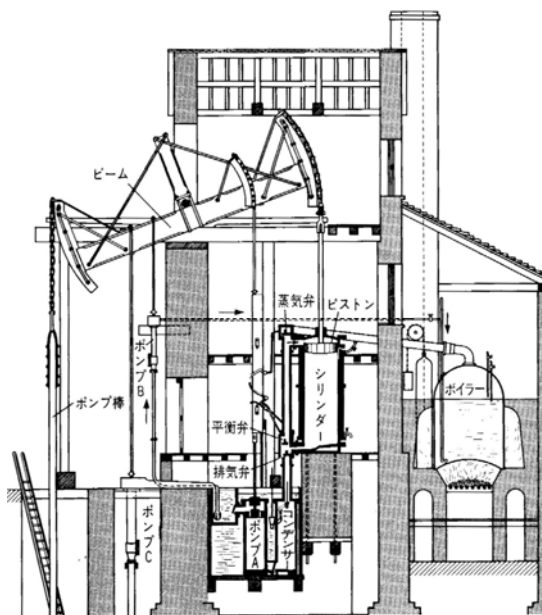


図2 ワットの蒸気機関⁽²⁾

[設問1] エネルギーの変換過程において、熱エネルギーの形態を経るのは何パーセントか。

- イ. 30%以下 口. 50% ハ. 80%以上

3. 炭酸ガスが温暖化の主原因か？

近年，図3に示すように，二酸化炭素など温室効果ガスの排出量が増加し，地球の急激な温暖化を起していると言われている。

しかし，このような温室効果ガスが主原因であると仮定する気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の考え方については，疑問を抱く科学者も少なくない。エネルギー・資源学会誌（2009年）や日本伝熱学会誌（2015年）の討論で見られるように，十分な科学的コンセンサスが得られていない状況である。赤祖父俊一アラスカ

大学名誉教授は，長年の観測データに基づき，気温上昇が1400年から1800年頃まで経験した「小氷河期」からの回復（すなわち，温暖化率=0.5 /100年）によるものであるとの学説を展開している。IPCCのデータでも，直近の数年については気温変化が停滞気味（気象庁）であり，小川克郎名古屋大学名誉教授は，NASA/GISSの気温データによると，2003年以降寒冷化の兆候があると指摘しているため，今後の推移を見守る必要がある。したがって，純粋に科学的な検討を徹底的に行うことも重要である。

[設問2] 通常，雲があると，太陽からの放射熱が妨げられるため，地球は寒冷化するのに対して，CO₂が存在すると，逆に，地球が温暖化するのはなぜか。

4. 原子炉は停止後もなぜ熱が発生するか？

原子炉を停止してもしばらく炉心から熱が発生し続ける。これは核燃料内にある放射性物質（核分裂生成物や超ウラン元素）の崩壊に伴って放出されるアルファ線，ベータ線あるいはガンマ線などの放射線がそのエネルギーを失って最終的に熱に変わるためである。これは崩壊熱と呼ばれる。崩壊熱 Q_d と運転中の熱出力 Q_f の比は，運転期間と炉停止後の時間の関数である。運転期間が長いほど， Q_d/Q_f は大きい。1年以上もの長時間運転した後，炉を停止した場合， Q_d/Q_f の経過曲線は図4のようである。3本の曲線が描かれているが，それぞれ指定された時間単位を横軸の単位とする。

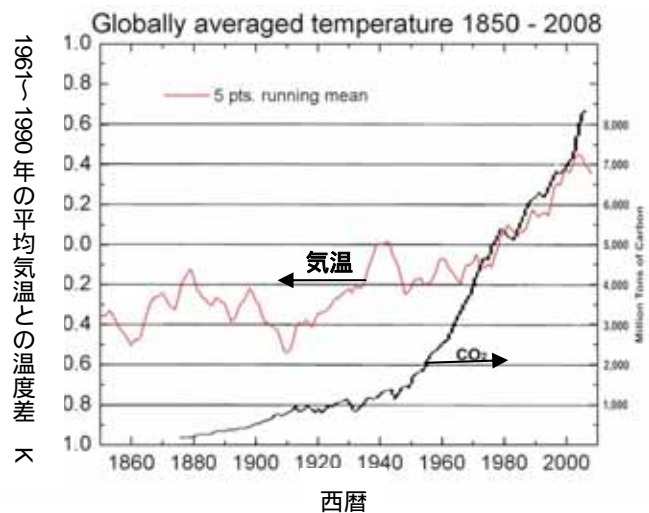


図3 地球の平均温度とCO₂量の変化⁽³⁾

$$Q_d/Q_f$$

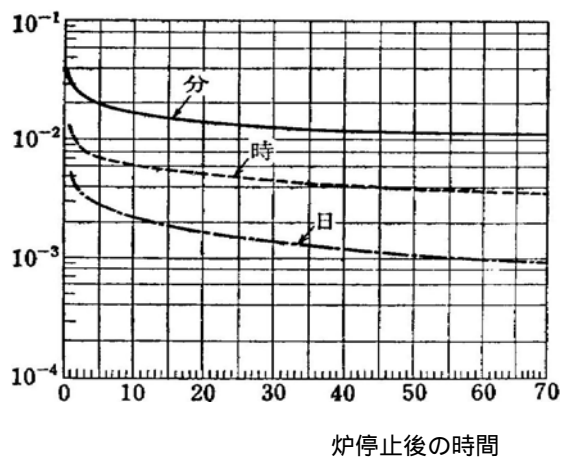


図4 原子炉停止後の崩壊熱の変化⁽⁴⁾

[設問3] 原子炉を1年間運転した後、停止した。停止後1時間経ったときの崩壊熱は運転中の熱出力の何パーセントまで低下するか。

- イ. 約10% ロ. 約1% ハ. 約0.1%

5. 沸騰のパラドックス現象（断熱膜による伝熱促進）

高温の金属を沸騰液中で急冷する技術は金属加工，低温機器のクールダウン，原子炉の緊急炉心冷却など，工業分野で広く利用されているが，表面に薄い断熱膜を被覆することによって，急冷が促進されるという不思議な熱現象（パラドックス現象）が過去に報告されていたが，この早期移行現象を満足に解釈できる理論的考察は殆ど行なわれていなかった。

そこで，筆者らは，膜沸騰状態でも液体が高温の表面の一部に間欠的に接触することにより局所的に表面温度の急降下が繰り返され，遂には，接触面温度が限界温度に達して早期に遷移沸騰へ移行するためであるとの仮説（間欠性固液接触モデル）を提案して理論展開を行ったところ，図5に示すように，テフロン被覆の銅板を液体窒素中で急冷した時に得られた銅板の温度履歴曲線とよく一致することが明らかになった。

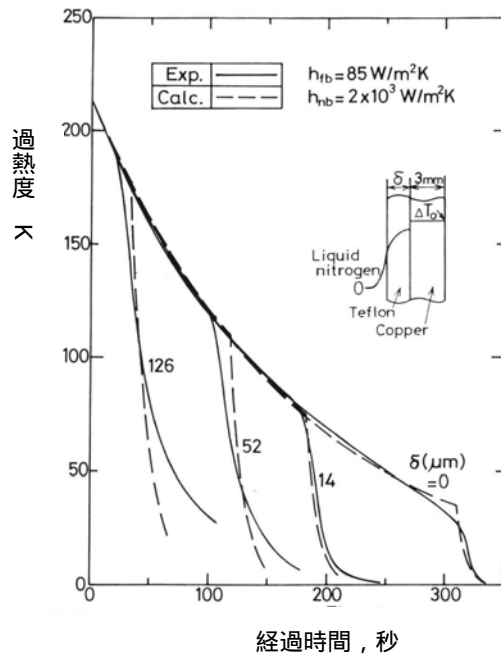


図5 急冷時の温度履歴曲線（液体窒素）

その後，膜沸騰状態における間欠性固液接触の存在を直接，実験的に検証するため，固液接触頻度，接触面積などを測定するとともに，被覆膜における二次元熱伝導効果を定量評価するため，二次元モデルによる詳細解析を行い，さらに，ミスト冷却への拡張を試みた。

[設問4] 水が沸騰すると，熱伝達性能は向上するか，それとも劣化するか？

- イ. 向上する ロ. 劣化する ハ. 変化しない

6. 強制・自然共存対流のヒステリシス現象

強制対流と自然対流が共存する流れは，排熱の回収や原子炉の崩壊熱除去など，比較的低い流速で見られる現象であり，純強制対流と純自然対流の重ね合わせによる考え方が主流であった。しかし，近年の研究によると，従来考えられていた単純な重ね合わせでは表せないことが明らかになってきた。

そこで，筆者らは水平円柱まわりの流れ形態および熱伝達特性を数値計算と実験によって，詳細に調べた。図6は，流体として水を用いた時に観察された流脈線の変遷を示す。 Gr^* が自然対流の強度を示す因子であるが，初期条件として $Gr^*=0$ （純強制対流）と $Gr^*=150$ 万（純自然対流）を採用している。 Gr^* が小さい場合（ $Gr^* \leq 1.5$ 万）には，純強制対流の時と同じように円柱背面に周期的なカルマン渦が放出されて流れが変動する（非定常解）が， Gr^* が

大きい場合 ($Gr^* \geq 50$ 万)には,カルマン渦の放出はなく,円柱背面で浮力によって加速されて中心軸に沿った定常な流れ(定常解)となって純自然対流に近づく。

強制対流から自然対流に遷移する領域 ($15万 \leq Gr^* \leq 19$ 万)では,初期条件の違いにより異なった流れ形態をもつ。 $Gr^*=0$ から Gr^* を上昇した場合,まだ,周期的なカルマン渦が放出される強制対流的な流れが残るのに対し, $Gr^*=150$ 万から Gr^* を下降した場合,自然対流特有の定常な流れが支配的となる。

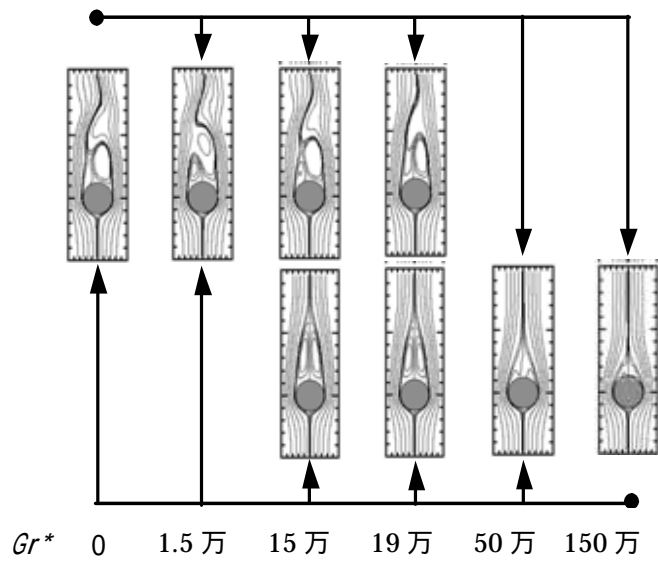


図6 共存流の流脈線(水)

このような遷移領域における初期条件の違いによるヒステリシス現象は,共存対流熱伝達特性にも影響を与え,同じ Gr^* に対して相異なる2つの熱伝達率が存在し,単純に純強制対流熱伝達と純自然対流熱伝達の重ね合わせにより求められないことを意味する。

その後,水以外の流体について数値計算を行ったところ,ヒステリシス現象は油でも生じますが,空気や液体ナトリウムの場合,生じないことが明らかになった。

[設問5] 空気によって高温の物体を冷却する場合,熱伝達性能が良いのは何れの場所か?

- イ. 上流 □. 中間領域 八. 下流

7. 脈動流のロックオン現象

水の一様流中に置かれた円柱周りでは,円柱背面で死水領域が形成されるため,円柱前面に比べて背面の熱伝達性能が悪化する。そこで,流れに脈動を与え,円柱背面に周囲から流体を流入させることにより背面の熱伝達を向上させることが考えられる。

図7は脈動流の熱伝達特性に及ぼす振動周波数の影響である。縦軸の Nu が熱伝達特性の因子であり,横軸の Sr_p が振動の周波数因子である。また, Re^+ が振幅因子である。脈動を与えた場合,1

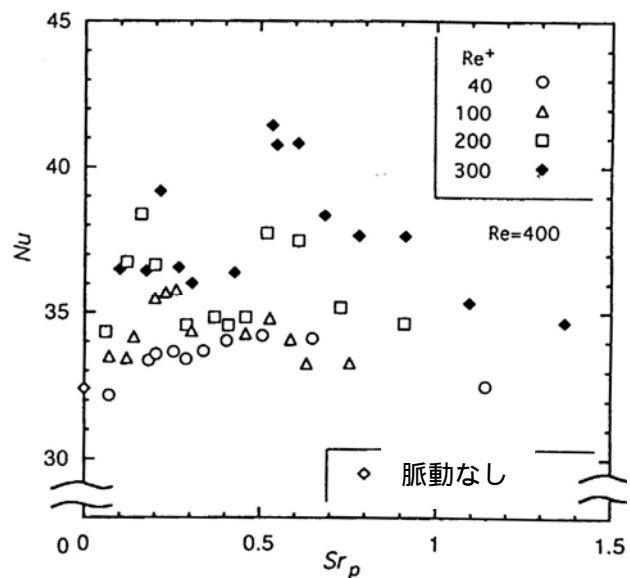


図7 水の脈動流の熱伝達特性

ケース ($Re^+ = 40$ かつ $Sr_p = 0.07$) 以外, いずれの Nu も, 脈動を与えない場合 ($Sr_p = 0$) に比べて大きくなる。この熱伝達促進効果は Re^+ が大きいほど顕著である。

一方, Sr_p の影響は単純ではない。 $Re^+ = 40$ の場合, Sr_p が増加すると, Nu はいったん減少した後, 緩やかな増加傾向を示すが, $Sr_p = 0.5$ 付近で減少に転じ, $Sr_p = 0$ の場合の値に近づく。しかし, $Re^+ \geq 100$ の場合, Sr_p が増加するに従って Nu ははじめ急上昇し, $Sr_p = 0.2$ 付近で第 1 のピークをとる。そしていったん減少し, $Sr_p = 0.4$ 付近で極小となった後, 再び増加し, $Sr_p = 0.6$ 付近で第 2 のピークをとる。その後徐々に減少し $Sr_p = 0$ の値に漸近していく。

その後, Nu に二つのピークが生じる原因を調べるため, 流れの可視化実験が行われ, 円柱背面の渦放出が脈動周期と同期して生じるロックオン現象に深く関係していることが明らかになった。

8. 液体金属の自然対流振動現象

液体金属は, 非常に優れた熱伝導性を有するため, 多くの工業分野で利用されているが, 水や空気などの通常流体と異なる熱流動特性を生じることがある。例えば, 液体金属 MHD 発電や半導体製造において振動流が発生することが報告されているが, その発生原因については不明な点が多い。そこで, 筆者らは密閉容器内の液体金属の自然対流における振動現象を解明するため数値計算を行った。

図 8 は, 2次元計算により得られた液体ナトリウムの熱伝達特性因子 Nu の時間変化である。パラメータは自然対流の強度 Gr であるが, いずれの Gr についても, Nu は初め急に増加し, 準定常状態になると周期的な振動を繰り返す。そして, 振幅は Gr とともに大きくなる傾向にある。

その後, この振動現象を詳細に調べるため 3次元計算を行い, 2次元より振動が減少し, Nu の時間平均値も小さくなることも明らかになった。これは, 3次元では奥行き方向の流れによって振動現象が緩和されるためである。

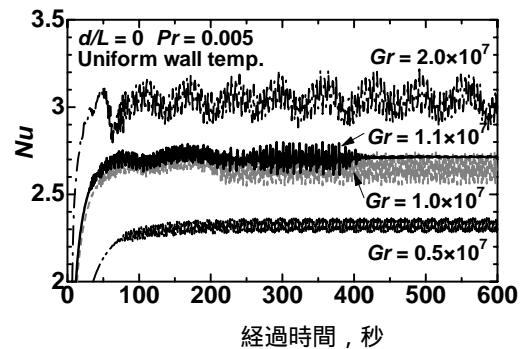


図 8 液体ナトリウムの熱伝達特性の時間

引用文献

- (1)「JSME テキストシリーズ熱力学」日本機械学会 (2002)
- (2)「科学の事典」岩波書店 (1985)
- (3)「地球温暖化: その科学的真実を問う」エネルギー・資源 30 巻 1 号 (2009)
- (4) 岐美格「原子核工学概論」理工学社 (1984)

(本稿は 2015 年 6 月 16 日に行われた TSS 文化大学における講演の概要です)