

# 不思議な熱流体挙動

## Strange Thermal-Hydraulic Behavior

東京海洋大学海洋工学部

刑部真弘

by Masahiro OSAKABE

### 1. 層流と乱流

流れが層流の状態においては、流れている流体の各層は整然と並んで流れる。このため、ある層中に着色液を混入させても、その層中のみを流れ、周囲の層と混じり合うことがない。乱流の状態においては、巨視的にみれば流体層が互いに並んで流れているように見えるが、微視的にみれば各流体粒子の塊は前後左右に移動し、周囲の層間を行ったり来たりしている。このため、ある層中に着色液を混入させれば、間もなく周囲の層と混じりあってしまう。この層流と乱流の状態はレイノルズ数 (Reynolds) が 1883 年に、流れにインクを流した可視化実験を行い明らかにした。この流れの状態を表すレイノルズ数  $Re$  は、

$$Re = \frac{uD}{\nu_m} \quad (1)$$

で表される。ここで、 $u$ : 流速,  $D$ : 代表長さ,  $\nu_m$ : 動粘性係数である。 $Re$  数は、流体の慣性力と粘性力の比を表し、この値が大きい程、粘性によって流れの乱れを抑制させようとする作用が少ないことを示す。このため、あるレイノルズ数 (臨界レイノルズ数) で、流れは層流から乱流に遷移する。

このレイノルズ数の発見は、実験的な考察によって得られた貴重なものであるが、流れの運動およびエネルギー方程式の無次元化を行う過程でも容易に導かれる。ここでは、 $Re$  数が大きくなると粘性の影響が小さくなり方程式の解が暴走、すなわち乱流になることが示される。この解の暴走はカオス (混沌) 現象として知られている。

米国ニューメキシコ州に九州の阿蘇山の次に大きなカルデラがある。このカルデラの脇に、1940 年代にオッペンハイマーが原爆計画のための研究所をつくらせたロスアラモスという小さな町がある。この町に住むロスアラモス国立研究所の研究者で、1日 26 時間で生活するとか、コーヒーだけで生きているといった噂の絶えない男、ファイゲンバウムが 1970 年代にこのカオスを考え始めた。彼は、一つの数の入力に対してその出力をまた入力とするような簡単な関数に集中して研究を行った。

一例として、ある系におけるネズミの繁殖をここでは考えてみる。図 1 に示したように、 $n$  世代のネズミの数

を  $X_n$  とし、それから生まれる  $n+1$  世代の数を  $X_{n+1}$  とする。なお、ネズミの数  $X$  は 0 と 1 の間の数とする。前世代のネズミの数が多いほど次世代の数も多いと考えられるので、次世代の数  $X_{n+1}$  は前世代の数  $X_n$  に比例する。また、前世代の数があまりにも多いと食料が足りない等の環境悪化が起こるので、 $1-X_n$  にも比例すると考えると、以下の式が成立する。

$$X_{n+1} = \beta X_n (1 - X_n) \quad (2)$$

ここで  $\beta$  は定数であり、0 と 4 の間の数をとる。 $\beta$  が 4 以上では  $X$  は 1 以上となってしまう。

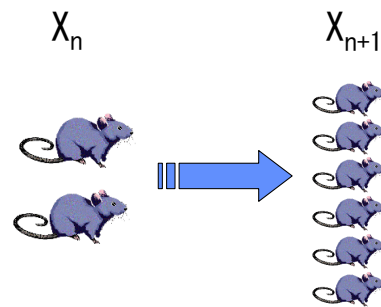


図 1 ある系におけるネズミの繁殖

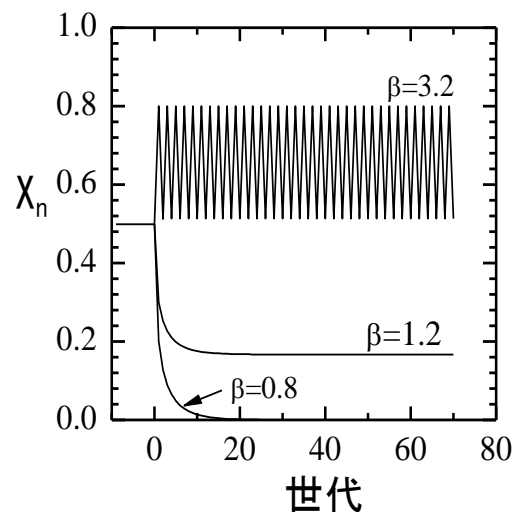


図 2 各世代のネズミの数の予測

図2に示したのは、初期世代のネズミの数  $X_0$  を0.5として、式(2)を用いて各世代のネズミの数を予測したものである。 $\beta$ の値を0.8とすると、ネズミの数は急速に0に近づき絶滅状態となる。 $\beta$ の値が1.2では、ある一定の数に近づく。 $\beta$ の値を3.2まで増やすと、0.8と0.5の間で周期的に増えたり減ったりを繰り返す。 $\beta$ の値を更にそれよりも少しだけ大きくすると、解はとんでもない暴走状態となる。 $\beta$ のわずかな変化によって大きく挙動が変化するのには驚きであるが、これはこの単純な方程式が、流れの方程式と同様な非線型性をもつためである。

## 2. 渦とその制御

乱流状態における速度や温度の変動も、前章で述べたネズミの数のように、ある条件を超えると予測不可能な暴走状態に変化する。乱流においてある一点で観測した速度変動は、予測不可能な乱れとして観測される。このとき流れの中には、比較的大きな渦が見られることがある。例えば、図3の衛星写真に示したように、韓国の済州(チェジュ)島や日本の屋久島の後ろに北西の季節風がふいている日にできる渦列である。すなわち、海面上に突き出た高い山である島の後ろに、その山の大きさほどもあるカルマン渦のような大きな渦列が、雲により可視化できているのである。衛星写真でみると、その大きな渦のみが目立つが、実は、大きな渦にはそれよりも小さな中渦がのった状態となっている。さらにその中渦には、それよりも小さな渦がのっているのである。遊園地にあるコーヒーカップの遊具に乗ると、自分の位置が予測不可能な状態になり気分が悪くなる。これと同じように大小の渦が重なった流れを1点で観測すると、予測不可能な状態まで乱れた状態として観測される。非常に乱れた状態である乱流においても、この大中小の渦で代表されるような組織的な構造が存在することは重要である。

なお、代表長さとして済州島の山の直径を20km、風速10m/s、空気の動粘性係数  $\nu_m = 1.6 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  とすると、 $Re$ 数は  $1.25 \times 10^{10}$  となる。実験室規模の実験で、円柱の後流にできるカルマン渦は、 $Re$ 数が40から150の範囲にあるとき明確に見られるので、奇妙に感じる。済州島の場合は、大きな渦に乗った小さな渦を、分子運動のように捉えれば理解できる。この小さな渦によって生じる分子粘性係数のようなものを渦粘性係数というが、この値を分子粘性係数の  $10^8$  倍程度と考えてあげれば、 $Re$ 数が125程度となる。すなわち、大きな渦にとって小さな渦は分子運動のように働き、みかけの粘性係数を増加させていると考えることができる。

ところで、壁面近傍を流れる乱流には特に際立った特徴がある。流れが壁面によって拘束されるため、壁面上に流れの方向を軸とした縦渦構造が存在するのである。回転方向の異なる縦渦が、図4に示したように交互に並んだ構造となるため、壁面上には壁面から離れた高速の

流れが壁面に叩きつけられる高速ストリークと、それと逆の低速ストリークが交互に並んだ構造となる。この縦渦構造は、主流から壁面に運動量および熱等を運ぶ重要な役割を担っている。

運動量を運ぶこの縦渦を抑制してあげれば、壁面への運動量輸送も減ることが想像できる。運動量輸送の減少は、乱流壁面摩擦の低減を意味している。例えば、ウナギやドジョウの表面は、触るとヌルヌルしているが、この粘度の高い分泌液が壁面の縦渦構造を効果的に減衰させていると考えられている。この効果をトムズ効果とよんでいる。人工的に高分子ポリマー等を用いて、配管や船舶の摩擦抵抗低減を図ろうとした研究が過去に多く行われてきたが、残念ながら実用化には至っていない。

流れ方向に沿って薄い“つい立”であるリブレットを設置し、縦渦を抑制する方法も米国NASAで開発され、流速に対して最適な間隔のリブレット等が提案されている。また、1980年代には、船舶や航空機等への応用実験が積極的に行われた。特に、1987年に行われたヨットレースのアメリカズ杯においてリブレットを用いた米国艇が、この年優勝したことは大きなセンセーションになった。

このリブレットの技術は、人類が最初に見つけたものではなく、サメの肌は古くからリブレット構造を有していた。

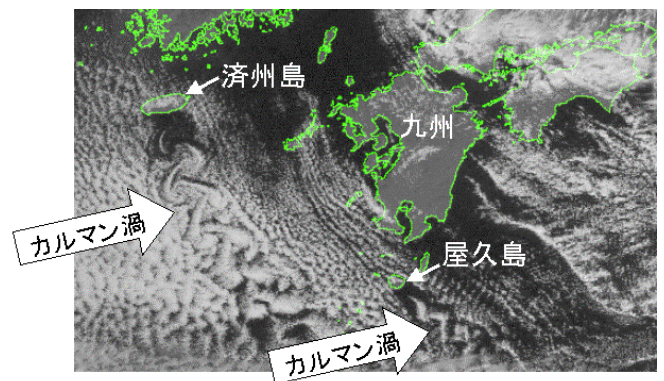


図3 島の後ろに出来る巨大渦

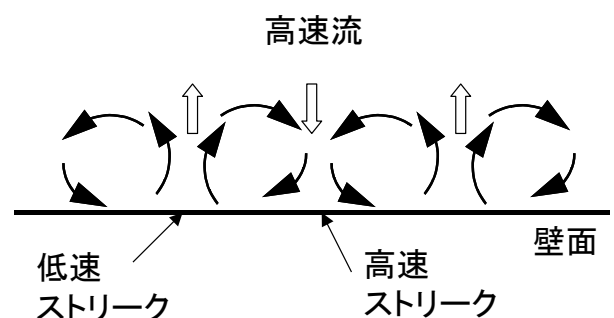


図4 壁面上の流れの方向を軸とした縦渦構造

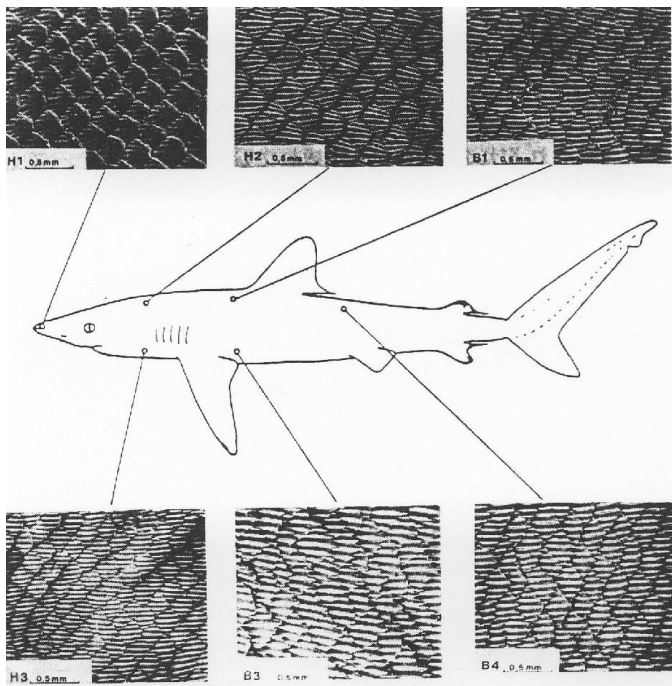


図5 D.W. Bechert ら(1985)による鮫肌

図5はサメの各部肌の拡大写真である。このような場合、 $Re$  数の代表長さは先端(サメの鼻先)からの距離となるため、同じ流速で回遊した場合、 $Re$  数は先端から尻尾に行くに従い増加する。なお、サメの回遊速度は20m/s(40 Knots)にも達する。縦渦は、 $Re$  数の増加とともにサイズが減少するため、リブレット間隔もそれに合わせて小さくする必要がある。サメ肌に見られるリブレットの間隔は、先端からの距離と共に細かくなることが写真で観察でき、NASA が1980年代に確立した最適形状とほぼ一致したものとなっている。

### 3. 沸騰現象

図6に示したのは日本刀の刃である。赤熱した刀を水に付け急速冷却させることにより焼き入れを行うが、その前に刀全体に熱伝導率の低い焼刃土を塗っておくことが行われる。刃先に波型の模様が見えるが、これは焼き入れの前に焼刃土をはがして薄く付着させた場所を表している。面白いことに、刃先を硬くしようというので、急速に冷やすために刃先の焼刃土を完全に除去してしまうと、薄く残っている場合よりもゆっくりと冷えて名刀はできない。

刀の焼き入れ時にみられる沸騰について、伝熱面の温度  $T_w$  を上げながら、伝えられる熱流束  $q_w$  との関係調べてみる。横軸に、 $T_w$  と飽和温度  $T_{sat}$  との差  $\Delta T_s = T_w - T_{sat}$  をとり、縦軸に  $q_w$  をとってそれぞれ対数目盛りで表すと、図7に示すような沸騰曲線となる。ここで、 $\Delta T_s$  を過熱度 (superheat) という。刃先を薄く覆った土表面は温度が低く核沸騰熱伝達となり熱流束が非常に高いが、完全に除去した面では温度が高く膜沸騰となり熱流束は低く

なってしまう。温度が高いほど熱流束が高い普通の伝熱とは逆の現象となるのである。

刃先は急速に冷え非常に硬くなるが、その他の焼刃土が厚く付着した部分はゆっくりと冷え、しなやかな材質となる。硬い刃先によって切れ味が良く、全体としては靱性が保たれるという世界に類をみない、優れたものとなっている。これが、沸騰曲線がまだ発見されていない時代に、刀鍛冶職人によって行われていたことは、物造りの得意な日本人のルーツをみる思いである。

この奥の深い沸騰現象は、浮力の働かない無重力状態でどうなるであろうか? 沸騰熱伝達式には重力加速度を含んだものが多いことから興味を持ち、北海道上砂川にある地下無重力実験センターの落下坑を用いて、15年ほど前に沸騰実験を行ったことがある。細い白金線を用いて行った無重力沸騰実験では、発生した気泡に浮力が働かないため伝熱面近傍に滞留し、焼き切れ(バーンアウト)が頻繁に起こり伝熱データを取得できなかった。

ところが、ある日突然、バーンアウトが発生しなくなった。得られたデータは、核沸騰熱伝達には重力の影響が無いという驚くべき結果であった。これは、発生した気泡が浮力で上昇し、伝熱面近傍を乱すために核沸騰熱伝達は良好であるという旧来からの説明を否定するものであった。世間はこれに注目してくれたが、我々は何故バーンアウトしないのか気になって仕方なかった。

これには、実験を繰り返していくうちに白金線表面に生成された炭酸カルシウム等のスケール(水垢)が重要な意味を持っていた。清浄な面では発生した気泡が伝熱面



図6 日本刀の刃

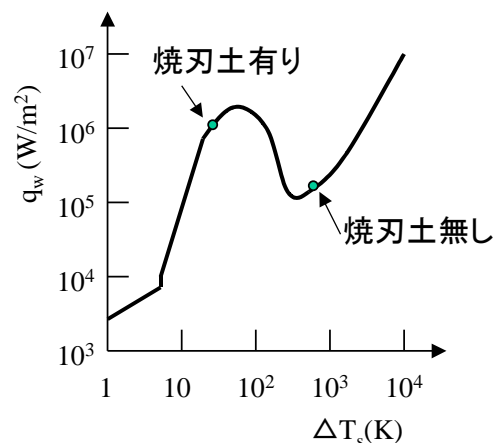


図7 焼刃土の影響

全体を覆いやすくなるが、多孔質で濡れ性の大きなスケール面では、気泡底部に液体が入り込みやすくなり、比較的小さな気泡が伝熱面から離脱しやすい。すなわち汚れがバーンアウトを抑制するのである。

#### 4. 温度計測

寒い冬の日室内にある金属製品を触ると冷たく感じるが、木製品は比較的暖かく感じる。広告等のキャッチコピーでも木の温もり等の表現が使われることがある。ところが、室内に長時間置かれた物体の温度が異なっているはずはなく、これは手と物体との間の接触温度が異なっているために生じる現象にすぎないのである。

図8に示したように、温度  $T_2$  の手で温度  $T_1$  の物体を触った瞬間の、手のひらと物体との間の接触温度  $T_m$  は、以下のような式で近似的に表すことが出来る。

$$T_m = \frac{m_1 T_1 + m_2 T_2}{m_1 + m_2} \quad (3)$$

ここで  $m_i = \sqrt{\rho_i c_i \lambda_i}$  ,  $\rho$ : 密度,  $c$ : 比熱,  $\lambda$ : 熱伝導率, 添え字 1 は物体, 2 は手の物性値である。この式は、触った物体の熱伝導率や比熱等に、手のひらが感じる接触温度が大きく依存することを示している。すなわち、触る物体によって、感じる温度はまったく違うのである。

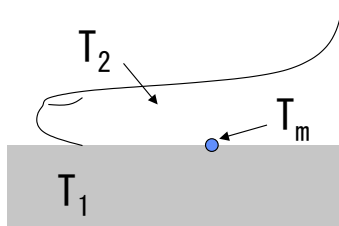


図8 接触温度

例えば、手の温度が  $20^\circ\text{C}$ 、物体の温度が  $100^\circ\text{C}$  の場合を考えてみる。物体が、熱伝導率等が大きな銅の場合には接触温度は  $98^\circ\text{C}$  となり非常に熱い。ところが、熱伝導率等が低い木（木炭）の場合には  $42^\circ\text{C}$  となり、ちょうど良い湯加減程度の熱さである。さらに、熱を伝えにくいゴム類では、接触温度は  $23^\circ\text{C}$  となり熱くもなんとも無い。修行僧が火渡りという荒行を行うことがあるが、踏むのが木炭だからできる・・・叱られるかもしれない。

次に、燃焼室温度を熱電対等の温度計で計測する場合を考えてみる。この場合に、火炎や炉壁温度がガス温度と異なっていれば、熱放射の影響を受けて温度計はガス温度と異なる温度を示す。これは、放射熱流束の大きな高温環境では注意すべきである。例えば、図9のように高温  $T_w$  の炉壁に囲まれた中を温度  $T_g$  のガスが流れている場合を考える。熱電対の計測部接点ビード部の放射率  $\epsilon$ 、熱伝達率  $h$  とする。熱電対の指示温度が  $T_c$  であった場合、定常状態としたビードの熱バランスより

$$\sigma \epsilon (T_w^4 - T_c^4) = h(T_c - T_g) \quad (4)$$

ここで、 $\sigma$  はステファン・ボルツマン物理定数である。よって実際のガス温度  $T_g$  は

$$T_g = T_c - \frac{\sigma \epsilon (T_w^4 - T_c^4)}{h} \quad (5)$$

ビード部の熱伝達率は、球や円柱での熱伝達率で近似的に評価可能である。例えばビード部の放射率 0.5、熱伝達率  $200\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$  とし、炉壁温度  $900\text{K}$ 、熱電対の指示温度  $500\text{K}$  とすると、実際のガス温度は約  $416\text{K}$  となり熱電対指示値より  $84\text{K}$  低いのである。

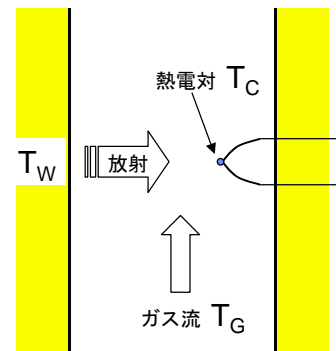


図9 高温壁に囲まれた温度測定

この場合の一つの対策として、図10に示したように熱電対等の温度計測部を、ガス流れ方向に貫通した筒等により放射シールドすることで、ある程度正確なガス温度測定が可能になる。正しい温度を認識することは、生活でも機械装置の中でも非常に重要なことである。

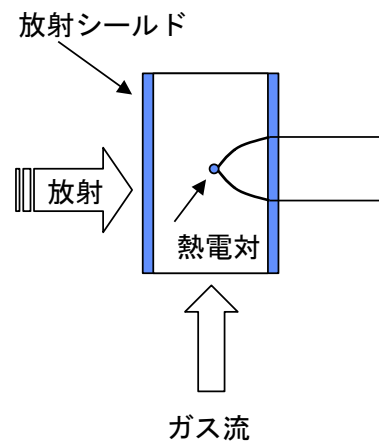


図10 温度測定のための放射シールド

#### 参考文献

- (1) 刑部真弘, エネルギー技術者の熱流体トレーニング, 海文堂出版, (2004)
- (2) 刑部真弘, ターボ動力工学, 海文堂, (2001)