

流体力学（噴流・はく離流れ）の基礎と応用

三重大学工学部機械工学科

教授 社河内 敏彦 (Toshihiko Shakouchi)

1. はじめに

流体力学は、気体、液体などの流体が管内あるいは物体の周りなどを流れる事象を取り扱う学問分野であるが、その対象は非常に広範囲にわたり、また生起する事象も多種多様である。

本講義では、流体力学の基礎と応用について、特に噴流とはく離流れを取り上げその概略を述べる。はく離流れについては、主に物体後流中に生起する渦の特性、振動現象の基礎とその応用について述べる。

2. 噴流現象

速度をもった流体がスリットから噴出する現象、いわゆる噴流現象は各種の産業分野で多用されているが、例えば、空調機吹き出し口からの流れ、消防用ノズル・ジェット船からの水噴流、ジェットエンジン・ロケットエンジンからの高速高温噴流、燃焼バーナーからの噴流火炎、火山火口からの固体粒子を含む噴煙（固気二相噴流）、あるいは空気を水中に吹き込む操作（エアレーション）によって生じる気液二相噴流など、私たちの周囲でも数多くみることができる。また、噴流現象はその応用範囲が非常に広範囲にわたるため古くから多くの研究がなされてきたが、現在でもなお応用上ばかりでなく流体力学的にもその本質がせん断流・乱流現象であるため、非常に重要で且つ興味深い事象の一つである。

本稿では、噴流（乱流）現象の基礎的な事項の一部、すなわち、自由噴流、壁面噴流、衝突噴流の特性とその制御、噴流の混合・拡散特性とその制御、噴流の安定性、噴流の振動現象、など⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾について述べる。

詳細は、講述時に述べる。

3. 流体関連振動

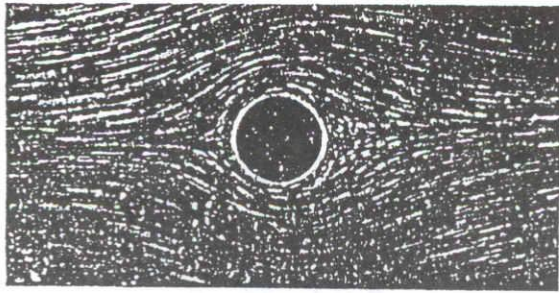
流れに起因して生起する流体振動（自励振動）現象には、一様流中あるいは管内に設置された物体後流の振動、物体と流体との干渉による振動（連成振動）、あるいは液面の揺動（スロッシング）、噴流の発振現象など、種々のものがある。

本稿では、特に高速増殖炉“もんじゅ”の温度計さや管の破壊事故に関連する物体後流の振動現象（カルマン渦、双子渦）について記述する。

3.1 物体後流中の渦

(a) カルマン渦列とは？

一様流中に円柱が設置されたとき、円柱後流中に渦列（カルマン渦列、Karman trail）が生



a



b



c



d

Abb. 271 a-d. Umströmung eines Zylinders im Bereiche sehr kleiner Re -Zahlen nach HOMANN (Ölversuche).
a) $Re = 4$; b) $Re = 32$; c) $Re = 55$; d) $Re = 71$.

図1 円柱後流⁽⁵⁾

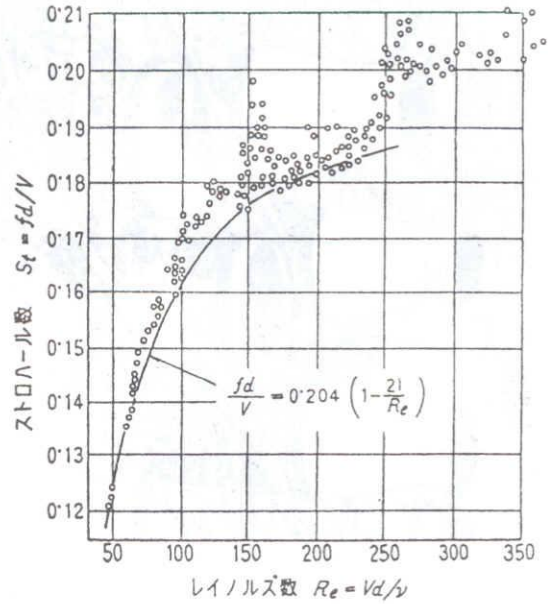


図3 St数 vs. Re 数⁽⁷⁾

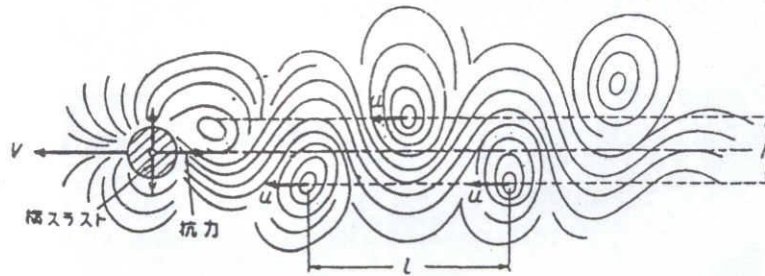


図2 カルマン渦列⁽⁷⁾

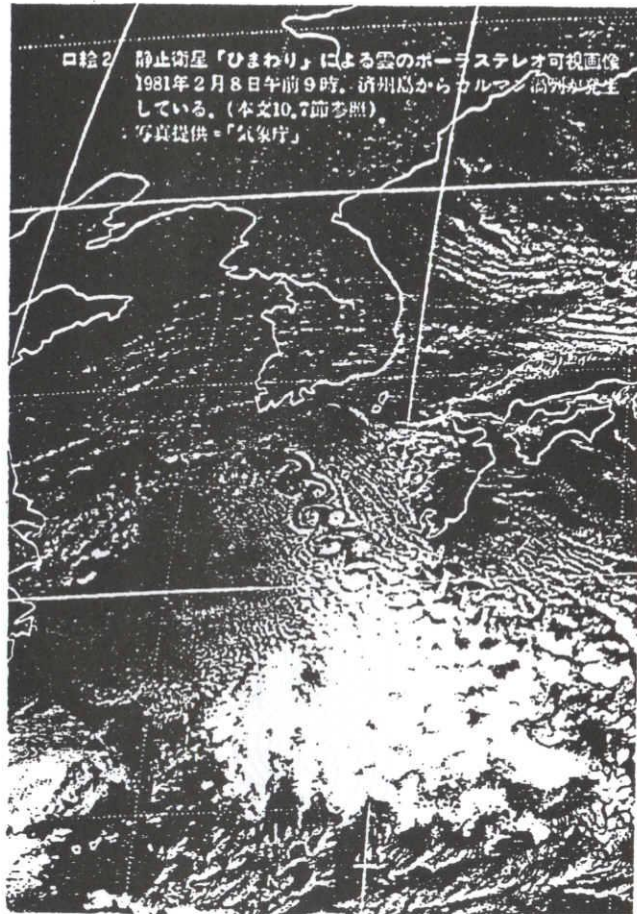


図4 地球規模のカルマン渦⁽⁸⁾

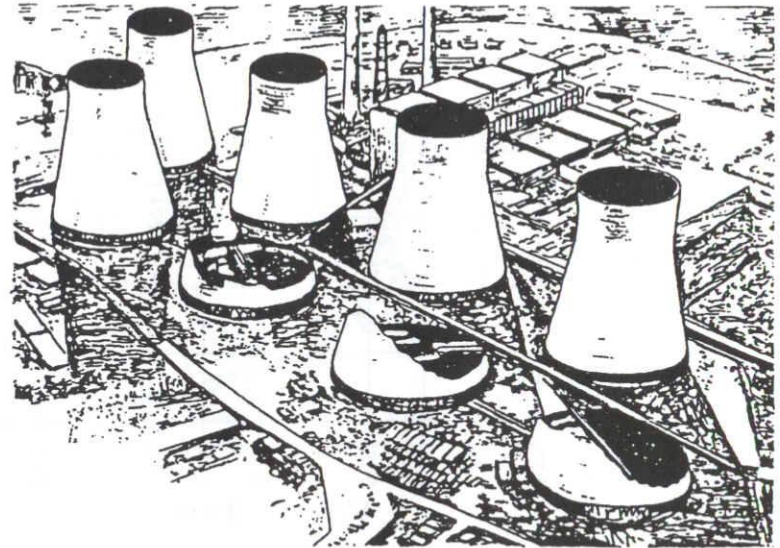


図5 冷却塔の破壊⁽⁹⁾

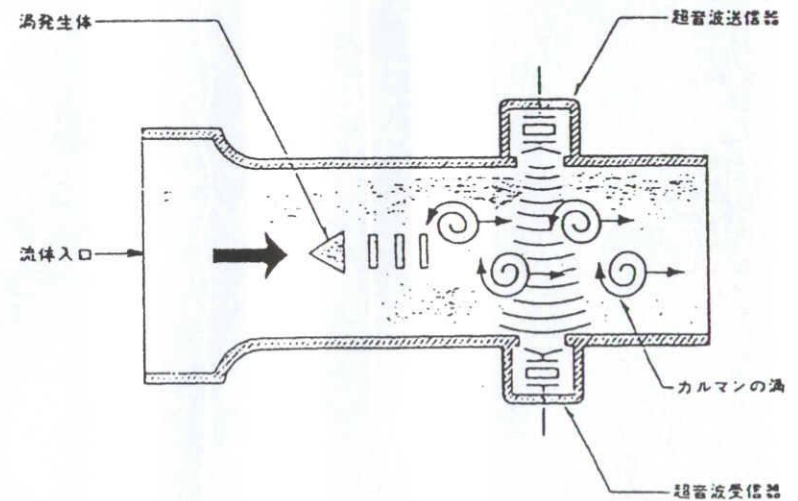


図6 カルマン渦流量計⁽¹⁰⁾

起することは良く知られている⁽⁶⁾⁻⁽⁷⁾。

図1は、レイノルズ数 $Re=Ud/\nu$ (U : 円柱上流の速度、 d : 円柱の直径、 ν : 流体の動粘度) による円柱後流の変化の様子を、染料による流れの可視化写真により示す⁽⁶⁾。Re数が増加すると物体後流は不安定となり、この場合 $Re=71$ では物体後流中に規則的な渦列、いわゆるカルマン渦列(千鳥配列)が生起しているのが良く分かる。

いま、図2⁽⁷⁾に示すように渦列の間隔を h 、渦のピッチを l とすると、カルマンの理論計算によると

$$h/l = (1/\pi)\cosh^{-1} = 0.281 \quad (1)$$

のとき、渦列は安定であるとした。

また、図1.d、2に示すように、渦が円柱背面の上下から交互に放出されるため、円柱は流れに直角な方向へカルマン渦の渦放出振動数 f に対応する周期的な力を受ける。

図3に、Roshko によって得られたストローハル数 $St=fd/U$ と Re数との関係を示す。図中の曲線は、次の実験式を示す。

$$St = fd/U = 0.203(1 - 21.0/Re) \quad \text{for } 50 < Re < 5000 \quad (2)$$

ただし、規則正しい渦列が生起する Re数範囲は $50 < Re < 200$ で、Re数がこれ以上大きくなるとせん断層が乱流となり渦列は不規則となる。

カルマン渦は円柱以外の物体、例えば角柱などにおいても生起する。

(b) 地球規模のカルマン渦

図4に、静止衛星“ひまわり”から撮影した日本付近の雲の分布(1978年 2月 3日正午)を示す⁽⁸⁾。冬の季節風が雲によって可視化され、濟州島(ハンラ山、1950 m)からカルマン渦列が放出されている様子が分かる。この場合、流速は $U=10$ m/s、 $d=30$ km、 $Re=2 \times 10^{10}$ である。

また、渦列の間隔 h/d 、渦のピッチ l/d は、驚くべきことに先に示した実験室レベルの結果と同様である。

このような渦列の発生は地球上の他の幾つかの場所、例えばカリフォルニア半島沖合いの島などでも観察されている。

(c) カルマン渦の弊害

カルマン渦の振動数が円柱(物体)の固有振動数と一致するかあるいはこれに近いとき円柱は、流れと直角な方向へ共振を起こす。煙突あるいは送電線の風による破壊の原因は、風圧によるよりカルマン渦とこれら物体との共振現象によると考えられている。

図5に、カルマン渦による冷却塔の破壊例を示す⁽¹⁰⁾。

カルマン渦の弊害に対しては、カルマン渦が生起しない物体構造とするなどの対策がとられている。

(d) カルマン渦の利用

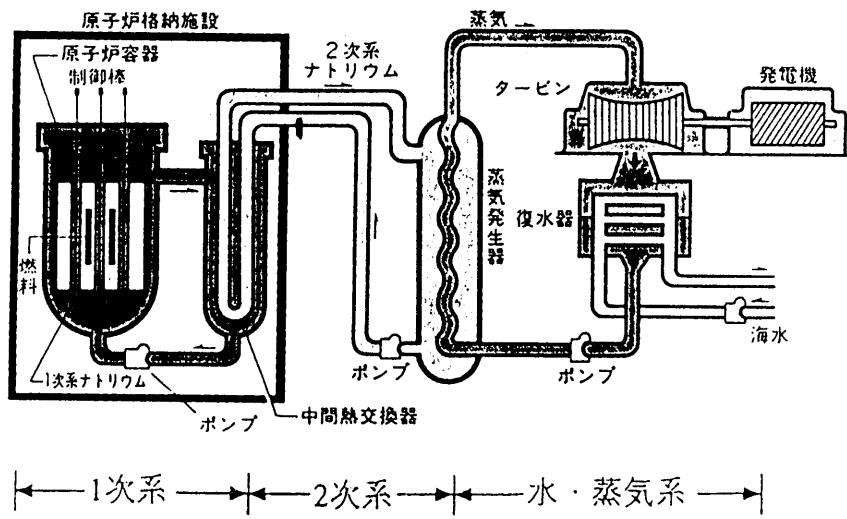


図7 “もんじゅ”のしくみ⁽¹¹⁾

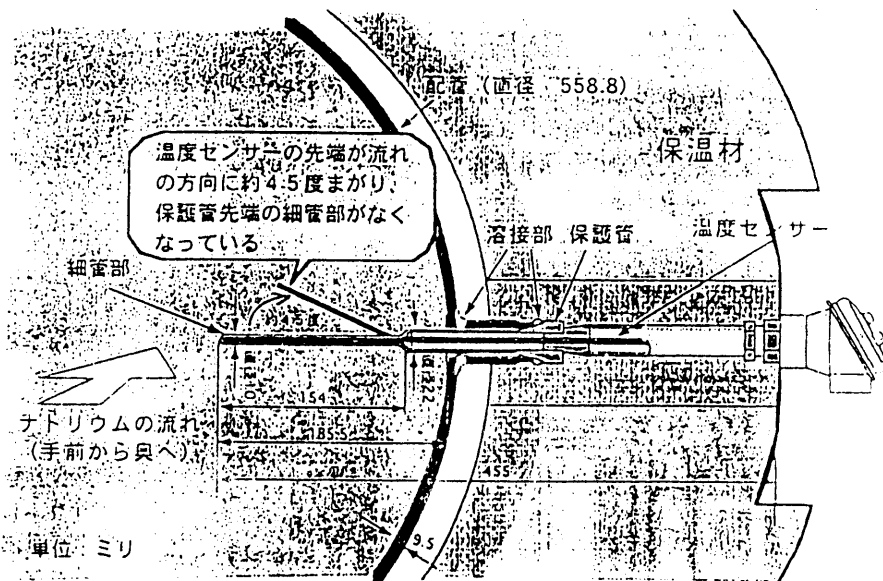
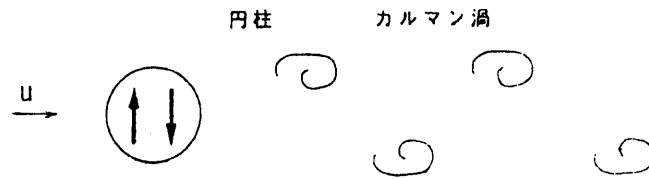
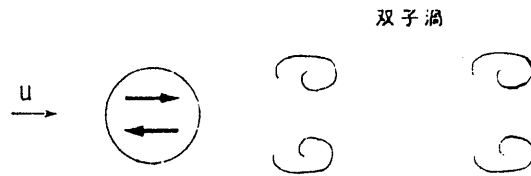


図8 “もんじゅ”二次配管系で破損した温度計⁽¹¹⁾



(a) クロスフロー自励振動



(b) インライン自励振動

図9 クロスフロー自励振動とインライン自励振動

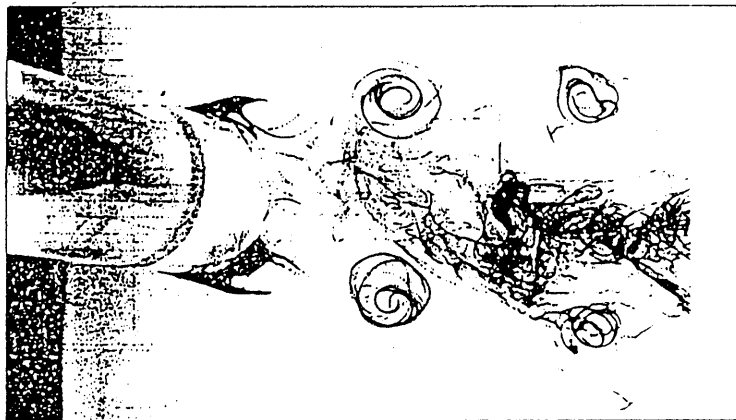


図10 インライ自励振動する円柱からの双子渦⁽¹³⁾

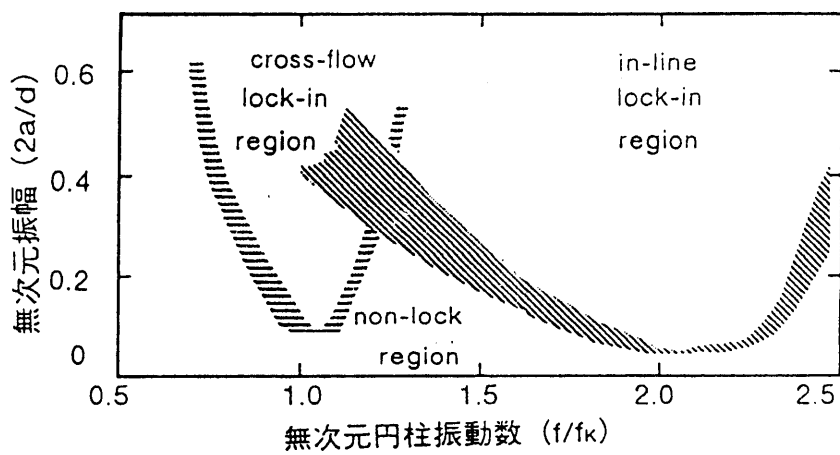


図11 円柱振動数と振幅 (ロックイン限界)⁽¹²⁾

カルマン渦の放出振動数が流速に比例することから、管内を流れる流体流量を測定する手段として利用され、“カルマン渦流量計”として広範に実用に供されている。

図6に、カルマン渦流量計の一例を示す⁽¹¹⁾。より安定したカルマン渦列を生起させるため物体（渦発生体）形状が工夫されている。

3.2 高速増殖炉“もんじゅ”の事故

1995年12月8日に、高速増殖炉“もんじゅ”にナトリウム漏えい事故が発生した。これは、図7⁽¹¹⁾に示す二次系配管（ナトリウム冷却系、Cループ）内に設置された直径10mmの温度計さや管（図8⁽¹¹⁾参照）の根元部が破損しそこからナトリウムが漏えいした。

温度計さや管破損事故の直接原因は、いわゆる“インライン自励振動”によるとの結論が出されている。

インライン自励振動とは⁽⁹⁾⁽¹³⁾、カルマン渦列が生起すると場合と異なり、流れの中に設置された円柱から放出されるカルマン渦列の放出振動数の二倍前後での双子渦と円柱（弾性体）の振動が連成して生じる自励振動である。この場合、円柱は流れ方向に振動する（図9参照）。

双子渦については、Kingらによる報告⁽¹³⁾があり、図10に、インライン自励振動する円柱から放出される双子渦の様子を示す。放出渦が千鳥状に配置されるカルマン渦列の場合と異なり、渦列の配置が対称であることが分かる。

ところで、渦放出振動数が物体の固有振動数に同期する現象（ロックイン現象）がある。

流れにより生起する円柱の振動には、カルマン渦の放出振動数近傍で現れる流れに直角方向への振動（クロスフロー自励振動）とその2倍の振動数近傍で現れる流れ方向への振動（インライン自励振動）とが在る（図9参照）。また、各振動に対し渦放出のロックイン現象が在る。

ロックイン現象についてはGriffinとHall⁽¹⁴⁾によるレビューがあり、亀本⁽¹²⁾は、レビューに紹介されている実験結果を下に強制振動数する円柱からの渦放出のロックイン限界を求めた。図11に、その結果すなわち、無次元振幅 $2a/d$ と無次元円柱振動数 f'/f_k の関係（ a :振動の片振幅、 f' :円柱振動数、 f_k :静止円柱からのカルマン渦放出振動数）を示す⁽¹²⁾。クロスフロー自励振動は $f'/f_k=1.0$ を中心に、インライン自励振動は $f'/f_k=2.0$ を中心に、振幅が大きい場合にはかなり広範囲な領域で渦放出が円柱の振動に同期することが分かる。

“もんじゅ”の温度計さや管破損事故

事故前におこなわれた100%流量運転では、無次元円柱振動数は $f'/f_k \approx 2.0$ で、双子渦放出のロックイン現象が発生し自励振動に至ったとされている。

亀本⁽⁹⁾によると、その際、自励振動の発達の前に $2a/d=0.05$ 以上の振幅のインライン振動が生じ、直径10mmの円柱さや管が0.5mm程度の振幅で振動したことになっているとしている。さらに、事故対策として、温度計さや管の固有振動数が $f_k, 2f_k$ に一致しないこと、ロックイン現象が生じないようにさや管の振動振幅を十分小さくすること、さや管に自励振動が生じないように十分大きな構造減衰を与えること、さや管の構造を応力集中を軽減する形状とすること、などをあげている。

いずれにしても今回の破損事故は、現象に対する基礎的な理解が十分なされていなかった結果であり、基礎研究の重要性を再認識させるなど多くのことを示唆している。

4. まとめ

流体力学（噴流・はく離流れ）の基礎と応用についてその概略を述べるが、本稿では紙面の都合上、はく離流れについてその一部、すなわち物体後流中に生起する渦の特性、振動現象について記した。

その他の話題については、講義の中で述べることとする。

参考文献

- (1) 社河内、噴流の振動現象、日本機械学会 講習会（流体関連振動 - 基礎と実際）、No. 97-28, 1997, pp. 13-20.
- (2) 社河内、噴流工学の基礎、日本機械学会 講習会（噴流とその応用技術）、No. 98-11, pp. 1-12.
- (3) 社河内、粉粒体のジェット粉砕と分級、ターボ機械、24-11, 1996, pp. 661-666.
- (4) 社河内、噴流現象の基礎・特性と最新応用技術、講習会テキスト（株テクノシステム）、1999, pp. 1-56.
- (5) Eck, B., Technische Strömungslehre, 7. Aufl, 1966, Springer-Verlag.
- (6) Shlichting, H., Boundary-Layer Theory, 6th Edition, 1968, McGraw-Hill.
- (7) 池森、水力学、1976、コロナ社。
- (8) 松永・富田・西・塚本、流れ学 -基礎と応用-、1991、朝倉。
- (9) 佐藤・日野、NHK 市民大学 - 流れの科学、1984。
- (10) 日刊工業新聞、センサー、1984。
- (11) 動力炉・核燃料開発事業団資料、高速増殖原型炉 もんじゅ、1996, 9-3.
- (12) 亀本、JSME FED NEWS LETTER, No. 24, 1996, pp. 3-4.
- (13) King, R., Prosser, M. J. and Jons, D. J., J. Sound and Vib., 29-2, 1973, pp. 169-188.
- (14) Griffin, O. M. and Hall, M. S., J. Fluid Eng., Trans. ASME, 113, 1991, pp. 403-416.