

身近な流れ ーカルマン渦列ー

三重大学大学院工学研究科 システム工学専攻 教授 社河内 敏彦
 中部電力(株) 電力技術研究会 電源専門部会 委員

Prof. Toshihiko Shakouchi
 Division of Systems Engineering
 Graduate School of Engineering
 Mie University



はじめに

流体力学、工学は、一般に、気体、液体などの流体が管及び流路（例えば、送水管、ガス管、ポンプ、燃焼炉、血管、など）内、あるいは物体（例えば、自動車、航空機、ビル、橋、など）の周りなどを流れる際に生じ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、また生じる事象も多種多様である。ここでは、私達の生活にも密接に関係する "流れに生起する渦"、特に "カルマン渦" を取り上げその特徴、弊害、利用などについて概説する。"カルマン渦" という言は聞き慣れないと思うが、例えば、季節風の強い冬場に送電線がヒューヒューと唸っているのは、送電線の周りから流れがはく離し渦が規則的に放出される際の渦放出振動数に対応した流体音である。この渦を、研究者 von Karman に因んで "カルマン渦" または "カルマン渦列" と呼んでいる。

物体後流中の渦

(a) カルマン渦列とは？ 第1図に、円柱上流の速度 U がかなり遅い場合（レイノルズ数 $Re=Ud/\nu=71$ 、 d ：円柱の直径、 ν ：流体の動粘度）の円柱後流の様子を、染料による流れの可視化写真により示す。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）が生起するのが分かる。渦列は、カルマンの理論計算によると、渦列の間隔 h と渦のピッチ l との比が $h/l=0.281$ のとき安定である。この際、渦は円柱背面の上下から交互に放出される（第1図）ため、円柱は流れに直角な方向に渦放出振動数 f に対応する周期的な力を受ける。また、Roshko によると f （ストローハル数 $St=fd/U$ ）と U （ Re 数）との関係は、 $50 < Re < 5000$ の場合、実験的に次式で与えられる。

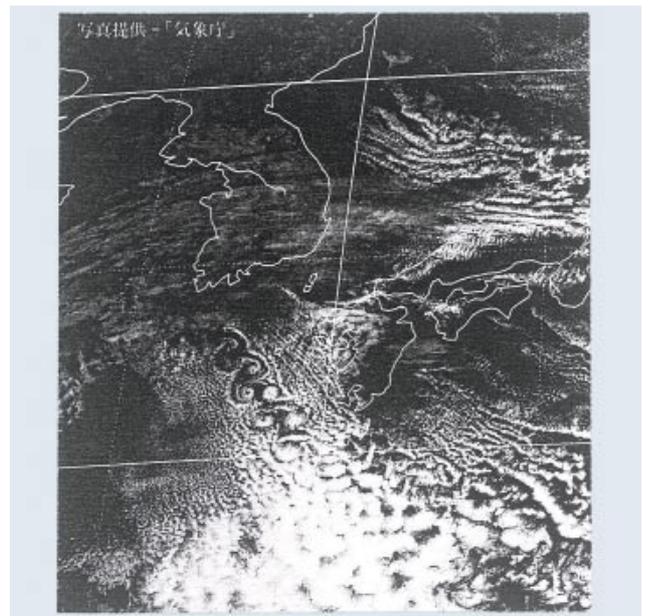
$$St=fd/U=0.203(1-21.0/Re)$$



第1図 カルマン渦列、 $Re=71$ (by F.Homann)

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下流の流れに不規則性が現れ乱流となる。しかし、速度分布の集合平均をとるとカルマン渦列に相当する渦構造がみられる。また、カルマン渦列は円柱以外の物体、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 第2図に、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。冬の北西の季節風が雲によって可視化され、濟州島、ハンラ山（標高1950m）の中腹からカルマン渦列が放出されているのが分かる。この場合、風速は $U=10\text{m/s}$ 、 $d=30\text{km}$ 、 $Re=2 \times 10^{10}$ 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。

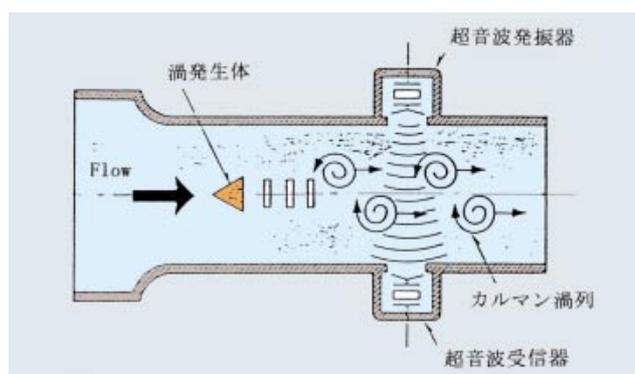


第2図 地球規模のカルマン渦列 (by 気象庁)

(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振動（共振）を起こす。煙突、冷却塔、吊り橋、送電線などの風による

破壊の原因は、風によるカルマン渦列とこれら物体との共振現象によると考えられる。カルマン渦の弊害に対し、カルマン渦が生起しない物体構造（形状を変える、物体表面に突起を設置する、など）にするなどの対策がとられている。

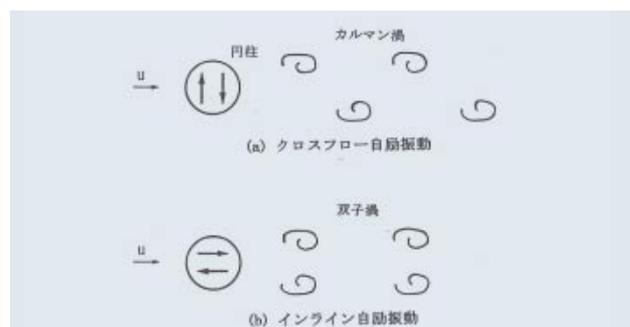
(d) カルマン渦の利用 カルマン渦の渦放出振動数が流速に比例することから、管内を流れる流体流量を測定する手段として利用され、近年、"カルマン渦流量計"として広範に実用に供されている。第3図に、カルマン渦流量計の一例を示す。より安定したカルマン渦列を生起させるため物体（渦発生体）形状が工夫されている。



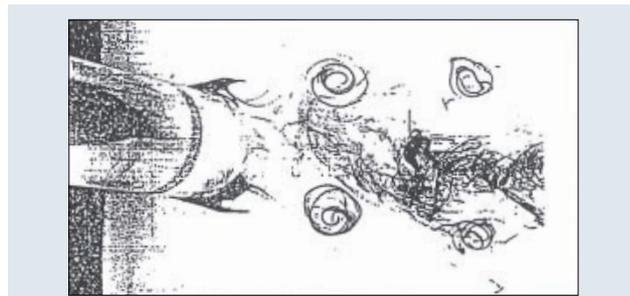
第3図 カルマン渦流量計 (by H.Yamasaki)

配電システムの電力品質劣化と対策

(a) 概要 1995年12月8日、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、二次系配管（ナトリウム冷却系、管直径558.8mm）内に設置された直径10mm、長さ154mmの温度計さや管の根元部の破損による。その後の調査により、温度計さや管破損の直接原因は、いわゆる"インライン自励振動"による金属の疲労破壊であるとの結論が出されている。インライン自励振動とは、カルマン渦列が生起する場合と異なり、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（第4、5図）。双子渦については、Kingらによる報告があり、第5図に、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 f_k 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）とがある（第4図）。また、各振動に対し渦放出のロックイン現象がある。



第4図 クロスフロー、インライン自励振動



第5図 インライン自励振動する円柱からの双子渦 (by R.King)

(b) 対応策 さや管破損前に行われた100%流量運転では、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。亀本は、自励振動の発達の前に直径10mmの円柱さや管が0.5mm程度の振幅でインライン振動したと算定している。対応策として、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挙げている。また、日本機械学会では配管内円柱状構造物の流力振動について詳細な検討を加え、その評価指針、対応策（S012）を明示している。上記のことは、現象に対する基礎的な理解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。

おわりに

流体力学、工学における身近な話題として、"物体後流中に生じる渦"、特に"カルマン渦、双子渦"を取り上げその特徴、弊害、利用などについて述べた。広い意味では、物の流れ（物流）、人及び車の流れ（交通流）、時の流れ（時流）なども流体力学、工学の範疇である。興味を持っていただければ、幸いである。

社河内敏彦（しゃこうちとしひこ）氏 略歴

三重大学大学院工学研究科システム工学専攻教授・工学博士(名古屋大学)、1971年 愛媛大学大学院工学研究科修了後、三重大学工学部助手、助教授、教授を経て、2001年より現職。1992～1993年エアランゲン・ニュルンベルグ大学(ドイツ)客員研究員。専門は、流体工学。日本機械学会流体工学部門、環境工学部門委員(1995～1998年)、日本混相流学会理事、評議員(1997～2001年)、日本混相流学会誌編集委員長(2000,2001年)、高速炉システム熱流動研究会委員(1994～1999年)、香港政府大学資助委員会外部評価委員(1995年～)、米国機械学会流体工学部門CGIT委員(1999年～)、日本混相流学会賞、論文賞(1999年)など