

1 序論

1.1 はじめに

レイノルズ数が十分大きくなるとブラフな物体後流にはカルマン渦列が形成される。この渦は後流域を低圧にし、抵抗を大きくする原因となる。しかも周期的であるため、有害な振動や騒音が発生し、我々が生活する上で多大な被害を起こすことがある。熱交換器、冷却管などの機械類や、ケーブル、鉄橋、鉄塔、煙突、高層建築物、海洋構造物などのスレンダーな構造物では有害なカルマン渦列が発生しやすい。実際の被害例を挙げるなら、この渦放出は、もんじゅのナトリウム漏れ事故の原因となった温度計の破損や、旧 Tacoma 橋の崩落の原因と考えられている。したがって構造物の有効な設計を行なう上で渦放出のダイナミクスを理解することは工学的に非常に重要である。これまでに多くのカルマン渦列の制御に関する研究が行なわれている。

本章では物体後流の渦制御に関する過去の論文を概観し、本研究の位置づけを行ない、本論文の目的と構成を述べる。

1.2 物体後流の渦制御に関する過去の論文

流体中に置かれた物体からの渦放出を抑制する方法は、静的制御と動的制御の二つに分類される。それぞれに得失が論じられているが、本論文では静的制御を対象とする。静的制御には1) 物体形状を修正する方法と、2) 物体周囲に干渉要素を設置し後流渦を制御する方法がある。

1) の物体形状を修正する方法では、二次元ブラフボディのスパン方向に形状の変化を導入し規則的な渦放出を弱めることを利用する場合が多い。Bearman *et al.* [1] は、平板と角柱の前面を、図1のようにサイン波形とし剥離線を乱す方法を試み、適当な大きさの振幅により平板と角柱の平均抗力は約30%下がることを指摘した。吊橋では、ケーブルにテープを巻いて螺旋状に巻いたりする防振対策が試みられている。しかし螺旋形にすると抵抗

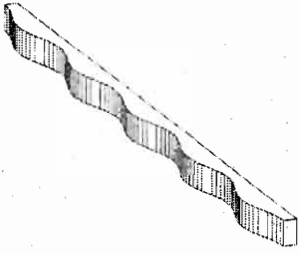


図 1: Sketch of a wavy model with a rectangular cross-section from Bearman *et al.* [1].



図 2: A view of circular cylinder fitted with a spiralling arrangement of surface control bumps from Owen *et al.* [2].

が増加するため、Owen *et al.* [2] は図 2 に示すように、円柱表面に螺旋状に半球状のこぶをつけて円柱の抵抗低減と渦励振の抑制を試みた（レイノルズ数 $Re \sim 10^5$ ）。その結果、円柱より抵抗を約 25 % 減らし、円柱のスパン方向最大振幅を 25 % 抑えたことから渦励振の抑制に効果があった。

以上のように角柱や円柱のスパン方向に形状を変化させる方法は、抵抗低減や渦励振の抑制に一定の効果があるが、物体形状が複雑になり製作のコストがかかるので費用対効果を十分に考慮しなければならない。

2) の物体周囲に干渉要素を設置し、物体後流渦を制御する方法では、Roshko[3] が先駆的な研究である。円柱後流渦を抑制するため、彼は短い仕切板を円柱後流中心線上でトラバースし、渦特性の臨界的な挙動を明らかにした。以来、仕切板を物体後方中心線上に設置する研究がいくつかなされた。

Bearman [4] は半楕円柱と角柱を組み合わせた二次元ブラフボディ背面に仕切板を取りつけ、主流方向に仕切板を伸張させ、渦は仕切板の後方に形成され、二次元ブラフボディから“十分に渦形成される”位置までの距離は、背圧係数の絶対値と反比例することを示した。

Unal *et al.* [5] は楔状の先端を持つ仕切板を円柱後流中心線上にトラバースし、変動速度や変動流体力を測定し、可視化とあわせて、剥離剪断層初期の不安定と絶対不安定の関係を実験的に調べた。

このように仕切板で流れを制御する研究は、後流中心線上に干渉要素を配置しているものが多い。しかし二次元ブラフボディに対して干渉要素を非対称に配置するような制御法の議論も必要である。なぜなら、上下の剥離剪断層が会う以前の一剪断層の初期不安定

に、干渉要素を作用させることも有力な制御法と考えられるからである。

坂本ほか[6]は、正方形柱の片側の剥離剪断層に小さな制御円柱を挿入し、流体力が低減する制御円柱の最適位置と大きさを調べた。平均抗力は最大20%低下し、平均流体力よりも変動流体力により著しい軽減の効果が見られ、変動流体力は片側の剪断層内に制御円柱を設置することによりほぼ抑制されることを示した。

Strykowski *et al.* [7]は低レイノルズ数 ($Re \leq 120$) で、円柱の片側の剥離剪断層に小さな円柱を挿入し、円柱後流渦の制御を試みた。その結果、速度変動の成長率から渦放出に至る乱れの成長率が制御円柱の存在によって減少することから、制御円柱は渦度を拡散し、流れの局所不安定性を変化させて渦を抑制することを示した。

Ozono[8]は円柱や角柱の後流に、短い仕切板を非対称に設置し、背圧やストローハル数の臨界的な挙動を明らかにした。仕切板が中心線上にある場合と異なり、非対称配置された場合は、仕切板が臨界配置を越えて近づく時、ストローハル数が単独円柱のそれより上昇しうることを示した。

主物体後流に干渉要素を挿入する方法では、干渉要素は様々な形状が考えられる。極端な場合、主物体と同一の形状を採用すれば二円柱周り流れや二角柱周り流れに帰着する。つまり二円柱、二角柱のような二物体周り流れは干渉要素を挿入した場合の一つの拡張と考えることができる。次節は、この二物体周り流れについて過去の研究を概観する。二物体、特に二円柱周りの流れの研究は多くの蓄積があり干渉要素を挿入した場合の流れを見通す際に多くの示唆を与えるものと思われる。

1.3 二物体周り流れに関する過去の論文

二物体周り流れの研究には、a) 二円柱、b) 二角柱、c) 垂直二平板などがある。a) の二円柱周り流れに関する論文は非常に多い。ここでは代表的な論文として以下の文献を挙げる。

Zdravkovich [9]は二円柱周りの流れパターンを相対位置によって分類し、弾性支持された円柱が渦励振を生じるかどうかを調べた。図3に二円柱配置と流れパターンの関係を引用した。二円柱が十分離れている時、各円柱からの渦放出は単独円柱と同じであるが、二

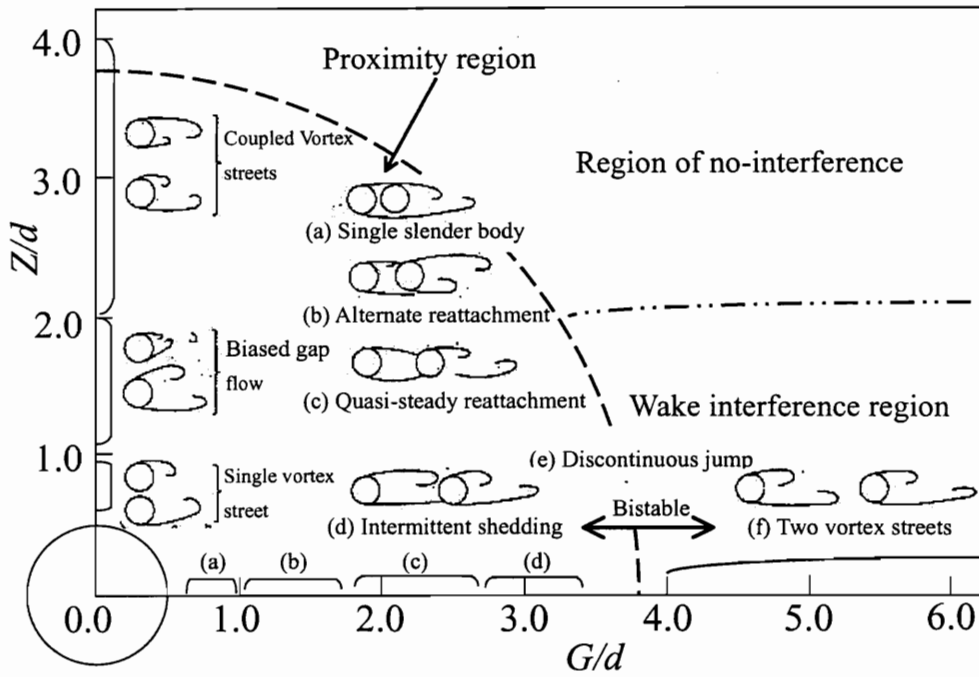


図 3: Classification of interference regions adapted from Zdravkovich [9].

円柱を直列に接近させると、一つの物体のようになり、後流幅は変わらないが、二円柱を並列に接近させると後流幅が約 2 倍の一つの物体からのような渦放出となる。二円柱が並列に約 $2.0d$ 離れるとギャップフローが生じ、双安定となり、このような双安定は直列配置の $G/d=3.0\sim 4.0$ でも現われた。Zdravkovich の記述には曖昧な点もあるが二円柱周りで生じる主要な現象は尽くされている。

Gu *et al.* [10] は二円柱 (直径 d) 中心間距離 N を固定し、二円柱間の迎角 β を変化させ、主に $N/d \leq 2.0$ の迎角が小さい範囲で、二円柱の相対位置による流れパターンの変化と対応する圧力特性を調べた。彼らは、特に下流円柱での不連続な圧力分布とスイッチングがどのように起こるかに注目し、相対位置によって三つの流れパターンが存在し、臨界的な配置において二つの流れパターンの間でスイッチングが生じると述べている。

Sumner *et al.* [11] は比較的低レイノルズ数において、広い範囲での相対位置について二円柱周り流れの PIV 計測と可視化を行ない、流れパターンを九つに分類した。流れパターンを、剪断層の再付着、誘起された剥離、渦の合体、渦の衝突などの特徴から詳細に定義し、ストローハル数と流れパターンを対応づけた。二円柱が十分に近づいた時の卓越周波

数は個々の円柱の一組の剪断層の相互作用によって放出される渦放出周波数ではなく、個々の剪断層に固有の周波数が関係していることを示した。

b) 小林 [12] は並列配置での二正方形柱の流体力特性と流れパターンを調べ、二円柱周り流れと比較し、並列配置の二正方形柱にも二円柱と同様に双安定のギャップフローが生じることを示した。

c) 平野ほか [13, 14] は垂直二平板周り流れを調べ、上流側平板のストローハル数は、二平板の配置によってその変化が著しいことを示した。また、二円柱周り流れと同じように、垂直二平板の並列配置でも抗力とストローハル数が不連続に変化する相対位置の範囲が認められ、その範囲は二円柱の場合よりも拡大した。

以上の二物体周り流れの研究では、その目的から当然であるが二物体全体の流れを把握することに重点が置かれている。しかし上流側柱体の渦放出に注目して、その強度がどのように変化するかについては必ずしも明確に述べたものはないようである。

1.4 本研究の目的

これまでにブラフな物体後流のカルマン渦列の制御に関して様々な視点から、様々な方法が試みられてきた。なかでも代表的なものの一つは、後流中心線上に仕切板を挿入し柱体後流の渦を制御する方法であり、後流にある程度接近させると渦放出特性に臨界的变化が生じる。しかし、近年、仕切板を後流中心線上からはずれた位置に非対称に配置してもそのような臨界的挙動が現れることが知られるようになった [15]。対称な状況では、仕切板が剪断層を分離するので臨界性はほとんど自明であるが、非対称な状況でも臨界性があるのは不思議なことである。後流を非対称に変位させるような状況では、いかなる場合でも、このような臨界性が見られるのではないかと予想される。

そこで、本論文では目的を以下のように設定した。すなわち、主円柱後流に干渉要素として“仕切板”，および後流を容易に変位させる幅を持った柱体である主円柱と同一径の“副円柱”を十分遠方から接近させ、主円柱後流渦の臨界性と対応する流れパターンを調べ、これら二つの流れの共通性から臨界性のメカニズムを一般的に理解することである。

この目的を達するために広い範囲での主円柱後流渦の流れ構造を知る手法として、二次元断面での瞬間又は平均渦度分布、平均流線、速度変動の r.m.s. 分布などの物理量を定量的に得ることのできる粒子画像流速計測法 (Particle Image Velocimetry 略して PIV) を採用した。

同一径の副円柱を干渉要素とした場合は二円柱周り流れと同じ状況になる。この二円柱周り流れについては非常に多くの研究がなされており、あえて本論文でとりあげる意義を述べておく。二円柱周り流れの研究の多くは、その全体の流れを把握することに重点を置いている。本研究では主円柱の渦放出の臨界性に限定しており、両者の視点は明らかに異なる。従来の二円柱周り流れの研究は、殆んどが二円柱間距離と迎角を相対位置のパラメータにしている。これに対し本論文では、水平距離 (ギャップ) と鉛直距離 (レベル) を相対位置のパラメータにしている。この方法によって主円柱の後流がディフレクターによって変位を受ける場合の渦放出の臨界性が初めて捉えられると考える。

1.5 本研究の内容

本論文は以上述べた研究の背景と目的に基づいて行なった研究結果を全五章にまとめたものである。以下に本論文の構成と各章の内容について記述する。

- 第一章は序章である。円柱後流渦の制御に関連する過去の研究を概観し、本研究の位置づけを行ない、本論文の目的と構成を述べた。
- 第二章では本研究で使用した水槽装置と風洞装置を概説した。実験状況を説明し、本論文でとりあげた二つの状況の“仕切板のケース”と“二円柱のケース”を説明する。背圧とストローハル数の測定方法を示す。PIV (Particle Image Velocimetry 略して PIV) の特徴と計測原理を述べ、実験方法と、パラメータの検討を行なう。
- 第三章では、まず背圧のレイノルズ数効果を述べ、臨界ギャップを定義する。次に仕切板のケースと二円柱のケースで背圧とストローハル数などの渦放出特性を述べ、両ケースで比較する。

- 第四章では、PIV 計測から得られた瞬間渦度分布から、流れパターンの変化を調べ、両ケースでその特徴を比較する。さらに臨界ギャップの空間トレースから、両ケースの渦の臨界的挙動について議論する。三種類の渦形成長さを定義し比較検討を行なう。ディフレクターの位置によって、渦形成長さがどのように変化するかを調べて両ケースでその特徴を比較する。
- 第五章は以上の研究の総括である。