

周波数解析による円柱周辺の可視化画像の解析法に関する検討

徳島大学大学院
徳島県立阿南工業高等学校

学生会員 〇大西 慎也 徳島大学 正会員 野田 稔
松川 将大 徳島大学 フェロー 長尾 文明

1. はじめに

空力振動現象の1つとしてウェイクエクサイテーションが知られており、従来の研究では、並列円柱の上流側円柱が生成する後流が下流側円柱の空力不安定振動発現の原因であると考えられてきた。しかし、その発生機構は複雑でありこれまで様々な研究が行われてきた。応答実験の一例として、同じ風速域で下流側円柱の応答に2通りの安定なりミットサイクルが存在していると報告され¹⁾、1段階目のリミットサイクル、2段階目のリミットサイクルとよんでいる。これは円柱間における上流側円柱からのカルマン渦の有無が、2通りのリミットサイクルを生じさせていると考えられている。異なるリミットサイクルでの2円柱間の流れを可視化実験を通じて見ていくが、流れ場は時間的に変化しており、ある瞬間的な流れ場を抽出して流れ場の違いの議論をすることは難しい。特に瞬間的な流れ場からでは、上流側円柱から放出されるカルマン渦の有無についての議論は難しいと考えられる。そのため本研究では可視化実験で得られた時系列の画像の輝度値を使用し、周波数解析を行うことで異なるリミットサイクルでの流れ場の違いを定量的に評価する。

2. 実験概要

(1) 実験条件：並列円柱模型の配置状況を図-1に示す。実験に使用する円柱表面は滑面状態であり、円柱の直径 D は42mmである。2円柱間の中心間隔 L は $3D$ とした。上流側円柱は固定し、下流側円柱は2自由度バネ支持によって設置している。その際の円柱の固有振動数 f は、鉛直、水平方向共に振動数2.2Hzとしている。対数減衰率 δ は0.007に設定し、スクレトン数は、 $Sc=16.4$ である。

(2) 並列2円柱間の流れの可視化実験：オイルミスト法を用いて煙を発生させ、サンプリングレートを500fps、露光時間を1.990msecに設定した高速度カメラで、下流側円柱の定常振動時における円柱間の流れ場の撮影を行う。風洞風速は、井上らの研究¹⁾から得られた図-2の応答図より、同じ風速で2通りのリミットサイクルが生じ始める風洞風速 $U=6\text{m/s}$ (換算風速 $U/fD=65$) で可視化実験を行う。

3. 画像解析の概要

今回は可視化実験により得られた画像の輝度値を使用して流れ場の評価を行う。以下に、輝度値を使用した輝度の標準偏差 σ_k 、周波数解析 K_f の式を示す。

$$(1) \quad \sigma_k(x, y) = \sqrt{\sum_{t=1}^n \frac{\{K(x, y, t) - K_{ave}(x, y)\}^2}{n}}$$

$$(2) \quad K_f(x, y, \frac{fD}{U}) = \sum_{t=1}^n \{K(x, y, t) - K_{ave}(x, y)\} \exp(-i2\pi \frac{fD}{U} t)$$

式中の $K(x, y, t)$ は図-1に示す輝度値の座標関係から、 t 枚目の座標 $x(0 \sim 767)$ 、 $y(0 \sim 511)$ の輝度値を表す。また、 n は使用画像枚数を表し、今回は1024枚を使用した。周波数解析結果では無次元周波数 $fD/U=0.2, 0.4$ のカルマン渦とその倍周波数成分のパワースペクトルを求め、結果をカラーマップで表現する際には、ピーク周波数を中心に $\pm 2\Delta f$ (Δf は周波数分解能) の範囲の積分を行った。ここでは、輝度標準偏差では各座標での平均輝度で除し、周波数解析結果は輝度の分散値で除することで標準化している。

4. 画像からの流れ場の評価

(1) 輝度の標準偏差による流れ場評価：1段階目のリミットサイクル時の輝度の標準偏差の結果を図-3、2段階目のリミットサイクル時の結果を図-4に示す。以降は便宜上リミットサイクルをLCと表記する。また、図中の灰色の丸は上流側円柱の断面を表す。

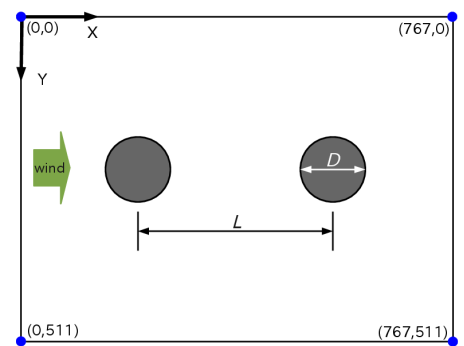


図-1 撮影画像座標関係

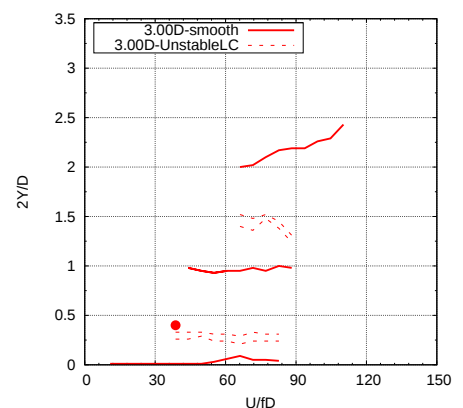


図-2 中心間距離3Dにおける下流側円柱の応答図

両者の結果を比較すると、1LC発生時の下流側円柱の応答は図中の破線に示すように上流側円柱からの剥離流による乱れ成分の幅である後流幅と等しいことが確認できる。また、2LC発生時では円柱間の輝度値の乱れが大きいため、円柱間に流れが存在することが分かる。このことは井上らが行った研究¹⁾で指摘されていた。しかし、本研究の解析方法を用いることで時間平均的にも1LC発生時の下流側円柱の応答は上流側円柱の後流幅と等しいことが分かり、上流側円柱からの剥離流に拘束されていることが分かる。

(2) 輝度の周波数解析による流れ場の評価: 1LC発生時の無次元周波数 $fD/U=0.2, 0.4$ 成分のパワースペクトルの結果を図-5、図-6、2LC発生時の無次元周波数 $fD/U=0.2, 0.4$ 成分のパワースペクトルの結果を図-7、図-8に示す。 $fD/U=0.2, 0.4$ の結果を比較すると、2LC発生時の方が1LC発生時のものよりも成分が大きいことが分かる。これらは、円柱間にカルマン渦が発生していることを示し、2LC発生時には円柱間にカルマン渦が巻き込んでいることを表す。

予め単独円柱で周波数解析を行い、2LC発生時の結果と同様な結果を得られたため、2LC時では下流側円柱の応答は上流側円柱からのカルマン渦の影響を受けていると言える。また1LC発生時の $fD/U=0.4$ 成分の結果(図-7)ではカルマン渦の交差成分である倍周波数成分の値が2LC発生時と比べて非常に小さいことから、1LC時の下流側円柱の応答には上流側円柱からのカルマン渦の影響を受けていないと言える。

以上に述べたように、瞬間的な流れ場では定量的なカルマン渦の有無に関する議論が難しかったが、周波数解析によってカルマン渦とその倍周波数成分を求めて比較することにより、異なるリミットサイクルでの円柱間の流れ場の違いを評価できた。今回は並列円柱間の流れ場について解析を行ったが、本解析手法は汎用性があるため、様々な形状の周りの流れ場に適用できると考えられる。

5. おわりに

以上の結果が得られ、2LC発生時には円柱間に上流側円柱からのカルマン渦が流れ込んでいるという事が定量的に評価できた。流れ場の変化を輝度値の変化と捉え、その変動の波形に対して周波数解析を行うことによって流れの規則性を求めることができた。本解析を用いることで、従来までは難しかったカルマン渦の有無に関する議論や、カルマン渦が流れ場に与える影響の範囲も求めることができるようになったと考えられる。以上のような結果が得られたが、円柱間に流れ込む上流側円柱からのカルマン渦の有無と下流側円柱の応答には議論の余地がある。下流側円柱の応答は円柱の振動と同期した流れや、下流側円柱からの剥離流の影響等も考えられ、今後はそれらにも焦点を当てていく必要がある。

参考文献

- 1) 井上真尋 他 「ウェイクエイクサイテーションのレイノルズ数依存性に関する研究」 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.64, 751~752 頁, 2010 年

