

並列円柱周りの流れ場とウェークギャロッピング特性

高知工科大学 学生会員 ○中西勇太
高知工科大学 フェロー 藤澤伸光

1. 序論 筆者らの一人は、タウトモデルを用いた並列ケーブルの実験で、上流側ケーブルと下流側ケーブルの固有振動数を変えてもウェークギャロッピング応答が変化しないことを報告している¹⁾。また、ヘリカルワイヤによるウェークギャロッピングの制振を試みた結果、下上流の円柱に巻いたワイヤの向きや位置によって制振効果が複雑に変化することも報告している²⁾。このように、ウェークギャロッピングではメカニズムの理解を妨げる複雑な現象が発生することから、下流側のみ弾性的に支持した単純な並列円柱を用いて定常、非定常圧力を測定した結果、揚力の速度比例成分の特性から振動発生メカニズムを説明できると報告している³⁾。しかしながら、どのような流れがこのような揚力を発生させているのかは明らかにしていない。また、並列円柱に特有のギャップフローについても言及しているが、測定に基づく実証的なものではなく、想像の域を出ていないように思われる。これらの既往研究を踏まえて、本研究ではPIV(粒子画像速度計測法)を用いて並列円柱周りの流れを実測し、複雑なウェークギャロッピング特性の原因となっている揚力の特性に関して考察を加えることとした。

2. 実験方法 上流側円柱は固定とし、バネ支持した下流側円柱にパルスモーターで強制振動を与えた。トレーサーは専用スモークを用い、レーザーシートを上方から照射して可視化し、側方から高速度カメラで観測した。実験のセッティングを図1に、実験条件を表1に示す。本研究では下流側円柱の変位を振動1周期内の位相角で表すこととし、正の速度をもって中立位置にある場合を 0° とした。上死点は 90° 、下死点は 270° となる。

3. 流れの遅れとギャップフロー 図2, 3は非定常揚力と準定常揚力の代表的な測定例である(文献3)から再掲)。図2は振幅が安定なリミットサイクルより小さい場合で、非定常揚力の位相が準定常揚力に対して遅れていることが明らかである。これは、振動時には流れが形成されるのに時間を要するために生じる現象で、所謂、流れの遅れとして理解されているものである。

図3は振幅が安定なリミットサイクルを超え、空力減衰が正となっている場合の揚力である。この場合も非定常揚力は準定常揚力より遅れていることが明らかであるが、振幅の絶対値が増加している場合だけ鋭いピーク状の揚力が発生するため、1周期の波形全体としては位相進みとなっている。

表1 非定常流れ場計測 実験条件

円柱径 D(mm)	32
円柱長(mm)	790
円柱間隔	2D 3D
振幅(mm)	10 20
周期 (s)	4.2(131)
()内無次元風速	5.35(167)
実験風速(m/s)	1.0m/s

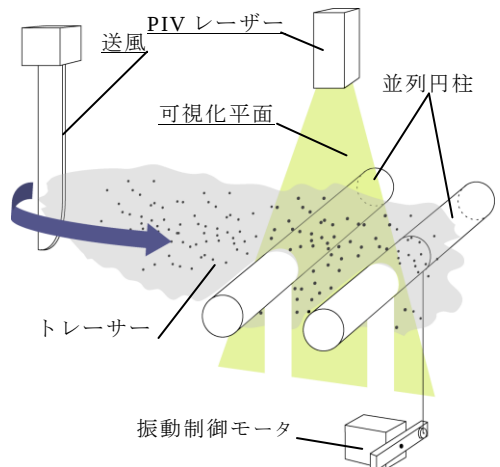


図1 実験セッティング略図

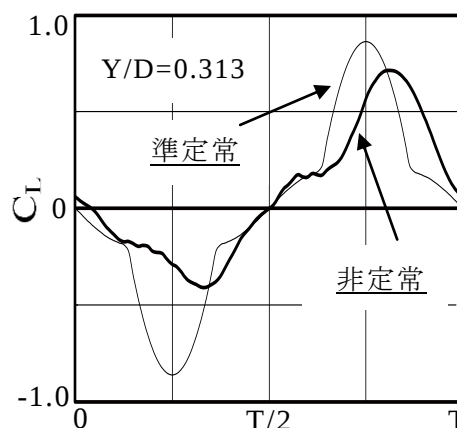


図2 準定常揚力と非定常揚力

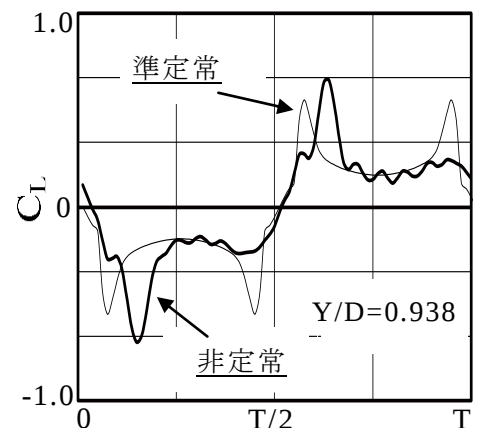


図3 準定常揚力と非定常揚力

この揚力ピークは、上流側からの剥離流が両円柱の間に流れ込むギャップフローの発生と関連付けて理解されてきた。即ち、ギャップで流れが収束して、圧力低下を招いているとの理解が一般的であった。図 4 は円柱間隔 $2D$ 、振幅 20mm で、ギャップフローの発生が確認されている変位 67.5° において測定した平均流速ベクトルである。一般流の流速は 1m/s 、ギャップフローでの流速は、最大 0.7m/s 、平均 0.4m/s 程度である。円柱間隔 $3D$ の場合の測定結果もほぼ同様であり、下

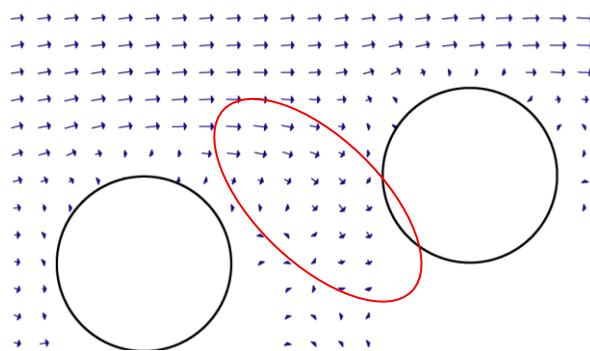


図 4 円柱間隔 $2D$ -変位 67.5° のベクトルマップ

4. カルマン渦 揚力特性の把握には円柱周りの詳細な流れを知る必要があるが、PIV による速度計測では時間的にも空間的にもある程度の平均化が行われるため、微細な流れの把握が困難である。このため、高速度カメラで撮影したトレーサ画像（動画）を直接に観察したところ、上流側円柱からの剥離流の中に規則的な渦の発生が確認された。目視で周期を測定した結果、渦の発生周期は 0.17s であった。ストローハル数 $S=0.2$ とすると、この実験条件におけるカルマン渦の発生周期は 0.16s であり、観測された渦の発生周期と極めて近い。このことから、下流側円柱の存在にもかかわらず上流側円柱からはカルマン渦が安定して放出されており、この渦がウェークギャロッピングの挙動に大きく影響していると考えてよいのではないと思われる。



図 5 変位 205° (25°)



図 6 変位 221° (48°)

図 5 は変位 205° の流れで渦は下流側円柱に衝突して壊れているように見える。さらに変位が増すと図 6 のように渦が下流側円柱に沿って流れるようになる。上流側円柱から放出されて流下する渦が下流側円柱に接触する時、接触のタイミングと下流側円柱の位置や速度によって揚力ピークが発生すると考えれば、揚力ピークが変位の絶対値が増加する場合にしか発生しないという現象を説明できる可能性があるかもしれない。渦の発生が下流側円柱の運動と独立とすれば、揚力ピークの発生時刻と大きさは偶然に支配される可能性が高いが、これは揚力の測定データに見られたランダムな変動と整合する。また、上流側円柱からの渦の発生が下流側円柱の運動とは独立であるとすれば、上下流のケーブルの振動数を変化させても応答が変わらないという問題も、理解不可能とは言えないようにも思われる。さらに、ヘリカルワイヤが、元来、渦励振対策として開発されたものであることを考えれば、ワイヤ付き円柱の複雑な応答に対しても、渦の存在を前提とすることで説明できる可能性があるかもしれない。

5. 結論 下流側円柱の揚力ピークはギャップフローの収束によるものではない。上流側円柱からはカルマン渦が放出されており、下流側円柱の非定常揚力には平均的な流れよりも、この渦の影響の方が大きい可能性が高い。今後は、この渦の存在を前提としてウェークギャロッピングの特性を再考することが望ましい。

<参考文献>

- 1) 藤澤伸光：並列ケーブルのウェークギャロッピングに関する一実験，第 13 回 風工学シンポジウム (1994)
- 2) 田中佑典，藤澤伸光：ヘリカルワイヤによるウェークギャロッピングの制振，土木学会四国支部 第 12 回技術研究発表会講演概要集 2006 年
- 3) 藤澤伸光：並列円柱のウェークギャロッピングと定常および非定常圧力分布，土木学会論文集 2009 年