

(I - 29) 数値解析による並列円柱ケーブルに伴うウェーク・ギャロッピング現象の解明

○中央大学 学員 中久保 慶介 中央大学 学員 丸岡 晃
中央大学 正員 平野 廣和 中央大学 正員 川原 陸人

1 はじめに

流れの中に複数の構造物が近接する場合、上流側にある構造物の後流渦等の影響により、下流側の構造物が複雑な挙動を示すことが知られている。複数構造物である斜張橋の並列ケーブルにおいては、ある風向きのあるとき下流側ケーブルに大きな振動を起こさせるウェーク・ギャロッピング現象の発生が問題となっており、近年多くの実験的研究が行われている。著書らは数値流体解析の面からこの現象の特性を把握する事を目的として基礎データ収集の研究を現在進めている。本報では、ウェーク・ギャロッピング現象の特性をつかむために最も重要だと思われる並列円柱に対する風向き（迎角）をパラメータとし、有限要素法による数値流体解析を行った。

2 数値解析の手法

解析手法の概要を以下に示す。連続の方程式に音速法の考え方を導入すると、次のように表される。

$$\dot{p} + u_i p_{,i} + c^2 \rho u_{i,i} = 0 \quad (1)$$

ここで c は音速で $\sqrt{\frac{\partial p}{\partial \rho}}$ で定義されている。音速 c を無限大とすれば式 (1) は通常用いられる非圧縮の条件を満たすことになる。すなわち式 (1) は非圧縮に非常に近い流れに対して圧縮性の効果を考慮した連続の式であるといえる。運動方程式としては、ナビエ・ストークスの方程式を用いる。

$$\rho(\dot{u}_i + u_j u_{i,j}) + p_{,i} - \tau_{ij,j} + \rho f_i = 0 \quad (2)$$

$$\tau_{ij} = \kappa d_{kk} \delta_{ij} + 2\mu d_{ij} \quad (3)$$

$$d_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (4)$$

ここで κ は体積粘性係数、 μ はせん断粘性係数、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタ関数をそれぞれ示す。

式 (1)-(4) にガレルキン法の手法を適用し、有限要素方程式を導くこととする。さらに時間方向の離散化には、3段階陽的解法を用いる。これにより、解くべき方程式系は完全な陽的となるので、時間方向に逆行列演算をすることが不要となり、解析時間の短縮と計算機容量の節約が可能とした。

3 並列ケーブルのモデル化

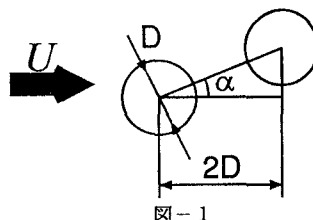


図-1

図-1に示すように、解析のモデルは並列円柱の水平間隔を $2D$ とし、迎角 α をパラメータとした。迎角 α は $4^\circ, 6^\circ, 7^\circ, 8^\circ, 10^\circ, 12^\circ, 16^\circ$ とし、円柱は固定とした。解析領域は $38D \times 19D$ で、上流側円柱より流入側領域が $10D$ 、下流側円柱より流出側領域が $25D$ である。境界条件は流入境界を一樣流速、流出境界をトラクションフリーの条件とした。また上下の壁面では鉛直方向の流速を 0.0 とし、円柱表面の流速成分を 0.0 とした。有限要素分割は総節点数 36939 、総要素数 72600 である。円柱まわりの最小メッシュ幅は約 $0.005D$ である。ここでのレイノルズ数は 1000 として解析を行った。

4 解析結果

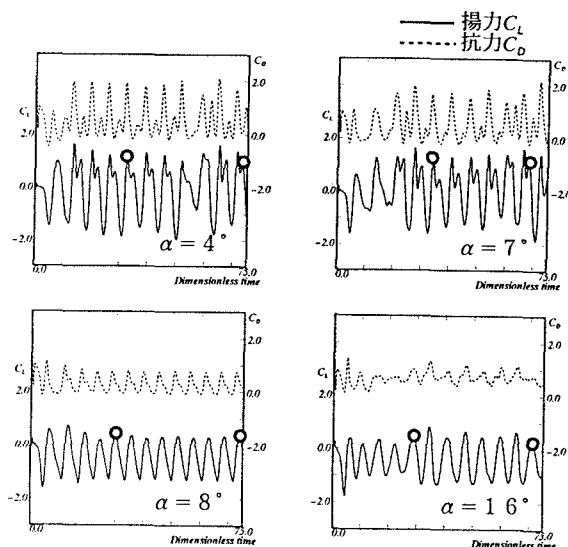


図-2 下流側円柱の抗力・揚力の時刻歴

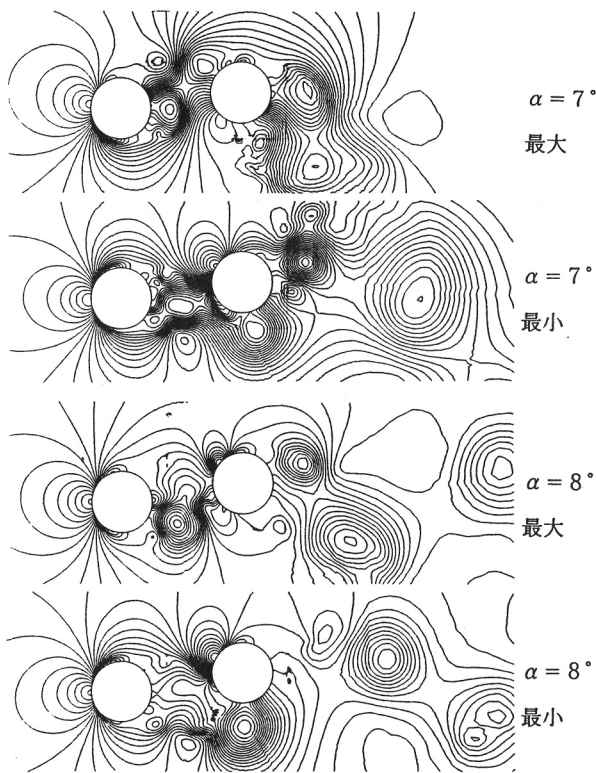


図-3 揚力の振幅が最大・最小のときの圧力分布図

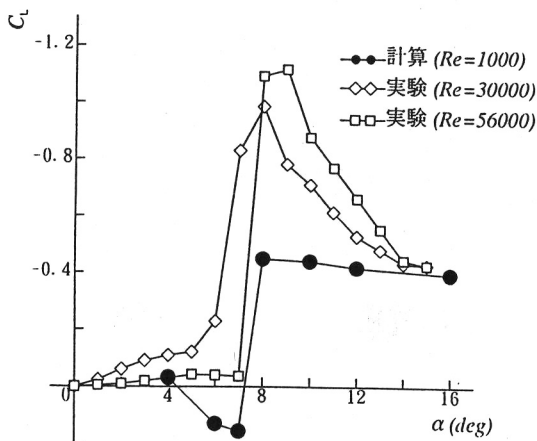


図-4 下流側円柱の平均揚力係数

図-2に下流側円柱の抗力・揚力の時刻歴、図-3に揚力の振幅が最大・最小のときの圧力分布図、図-4に下流側円柱の平均揚力係数の変化を風洞実験結果^[3]と解析結果とを合わせて示した図をそれぞれ示す。ここで、図-2中に示す2つの○印はその間で平均揚力係数を求めた区間を示す。また、図-5には三井造船(株)昭島研究所にて行った煙風洞による可視化実験と解析の平均流脈線図の比較を示す。尚、可視化実験のレイノルズ数は約25,000である。

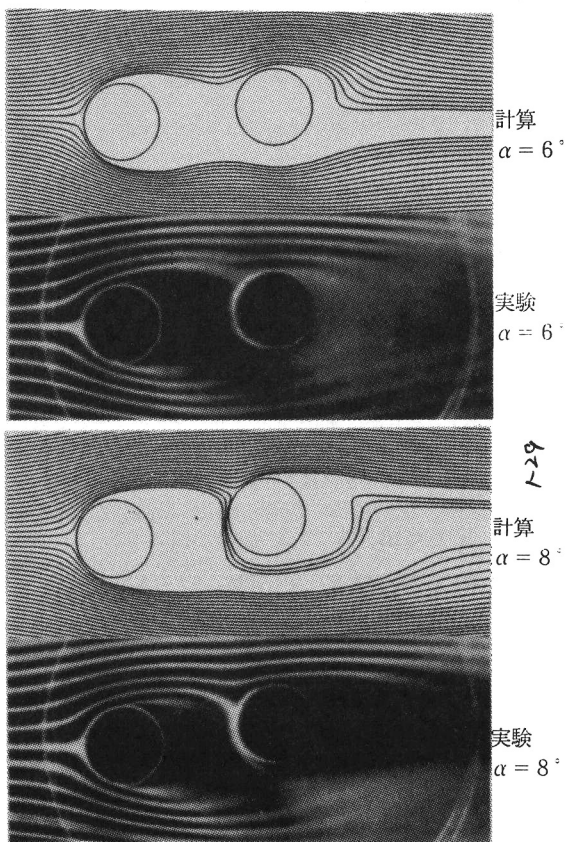


図-5 平均流脈線図と可視化実験の比較

5 おわりに

図-4に示す風洞実験によると、迎角が7°から8°にかけて揚力係数が大きく変化している。この傾向は解析結果においてもつかむことができています。一方、図-5によると、両者の結果とも迎角が6°から8°にかけてギャップ・フローの発生の有無が確認できています。このように、ギャップ・フローの発生に伴う流れの変化により、下流側円柱空気が大きく変化したものと思われ、この現象は、可視化実験ならびに解析の両面からとらえることができています。但し、解析結果では8°にみられる揚力の大きなジャンプはあったものの、風洞実験結果と比較して約半分程度の値しか示さなかった。この要因の一つとしては、レイノルズ数の違いが考えられる。

参考文献

- [1] 宇都宮英彦, 鎌倉米康: "近接する並列円柱系の空気力学的挙動", 土木学会論文報告集第336号, (1983).
- [2] 白石成人, 松本勝, 白土博通: "2本直列型柱の空力応答特性とその発生機構に関する基礎的研究", 風工学シンポジウム論文集, (1984).
- [3] 林健一, 赤瀬雅之, 井上浩男: "並列ケーブル振動時における振幅依存特性について", 風工学シンポジウム論文集, (1994).