

CS 3-11〔I〕

円柱の渦励振の数値シミュレーション

東京大学 正会員 野村 卓史

1. はじめに

土木の耐風工学の分野で風による建造物の振動が重要な問題であることはいうまでもない。したがってこの分野では建造物の運動と流れとが連成した問題を対象とし得る数値シミュレーション法の開発が必要と考えられる。筆者らはこれまで、ALE有限要素法に基づいて、バネ支持された剛体と非圧縮性粘性流れとの相関問題の解析法の開発を行ってきた[1]。ここではこの方法を円柱の渦励振問題に適用し、ロックイン現象を捉えることができたので報告する。

2. 解析対象

AnagnostopoulosとBeamanは円柱の直径 $D=1.6\text{mm}$ 、振動系の総質量 35.75g という試験装置によって水流の中における円柱の渦励振実験を行い、レイノルズ数 $Re=106\sim 126$ の範囲でロックイン現象が生じることを報告している[2]。本研究ではこの実験を対象として解析を行った。図1(a)に解析に用いた諸定数を示す。実験の円柱は水中に 12cm 浸かっているため、解析では振動系の質量等を $1/12$ し、単位厚さ当りの数値に直している。実験では構造減衰の値を空気中の自由振動により求めているが、解析でもその値を用いた。なお、振動系の固有振動数 $f_0=7.016\text{Hz}$ である。

図1(b)は解析に用いた有限要素メッシュで、円柱の変位にともなって正方形領域の部分のメッシュが変形するようにしている。円柱振動の解析に先立って静止円柱の解析を行って得られたストローハル数は $S=0.149$ であった。この値はRoshkoの式 $S=0.212(1-21.2/Re)$ [2]による値 0.166 よりは低いが、対象とした実験で報告されている値とはよく一致している。この $Re=100$ の静止円柱まわりの流れを初期条件とし、円柱の流れに直交する方向の変位の拘束を解除して振動を開始させた。以後上流流速の値を増加させ、 $Re=100, 110, 120, 130$ の4ケースの流れの解析を行った。なお、各 Re 数のときの時間積分間隔の値はいずれも無次元時間で 0.03 程度の値とした。

3. 解析結果

図2(a)~(c)には $Re=100, 110, 130$ のそれぞれの状態で流れが定期的な周期変動を呈する状態になったときの円柱変位 $[y/D]$ 、揚力係数、および円柱の後方 $1.0D$ の位置における圧力係数の時刻歴を示す。 $Re=100$ のとき、図2(a)に示すように円柱はビートしている。また、圧力係数の時刻歴から求めた渦放出の周波数は $Re=100$ のときのストローハル数と等しい。この状態から上流流速を増加し $Re=110$ としたところ、図3に示すように円柱変位が増大して、最終的に図2(b)のような応答が得られた。この状態では渦放出周波数は振動系の固有振動数 f_0 と等しい。さらに上流流速を上げて $Re=120$ のときの時刻歴の波形は図2(b)とほぼ同じで、円柱変位の振幅と揚力係数はいずれも減少しているが渦放出周波数は f_0 に等しいままである。最後に $Re=130$ まで上流流速を上げたところ、円柱の振幅は単調に減少し、最終的には図2(c)に示すように再びビートの状態となった。また、渦放出周波数もストローハル数に復帰した。このように一連の解析結果はロックイン現象の典型的な特徴を捉えている。

図4は解析結果をまとめて実験結果[2]と比較したものである。渦放出周波数の変化は実験結果とよく対応しているが、円柱の振幅は実験値の約半分程度である。なお、AnagnostopoulosとBeamanは彼らの実験についてロックイン時の揚力係数をParkinsonの式によって推定している[2]。その結果を本解析で求め値と比較すると、 $Re=110$ のとき $[0.30/0.30]$ 、 $Re=120$ のとき $[0.21/0.20]$ (いずれも前者が解析値)でありよく一致している。

このように、解析結果は定量的にはやや不十分であった。その理由としては以下の要因が考えられる。

- ・実験で報告されている振動系の減衰係数は空気中の振動から評価したものであり、解析ではそこから空気抵抗分を減じた値を使うべきかも知れない。
- ・筆者らの経験では、付加質量に比べて付加減衰の値は円柱まわりの有限要素メッシュの粗さに影響されやすい。本解析で用いたメッシュがその意味で十分に細かくないことも考えられる。
- ・流れに直交する方向の解析領域の幅が十分でないかも知れない。

また、実験ではこのように低い Re 数のときにも、ロックする前と後では、3次元性のある流れから2次元的な流れへ変化していることが観察されている[2]が、本解析は2次元解析であり、この点は考慮されていない。

これらを今後の検討課題とするつもりである。

参考文献

- [1] T. Nomura and T.J.R. Hughes: An arbitrary Lagrangian-Eulerian finite element method for interaction of fluid and a rigid body, *Comput. Meth. in Appl. Mech. Engrg.*, 95 (1992) 115-138.
 [2] P. Anagnostopoulos and P.W. Bearman: Response characteristics of a vortex-excited cylinder at low Reynolds numbers, *J. of Fluids and Structures*, 6 (1992) 39-50.

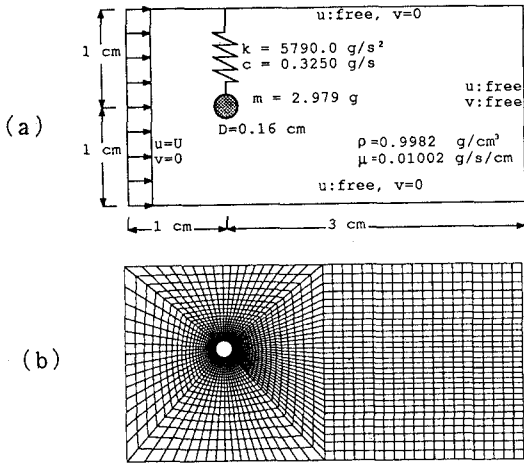


図1 (a) 解析領域と諸定数; (b) 変形時の有限要素メッシュ

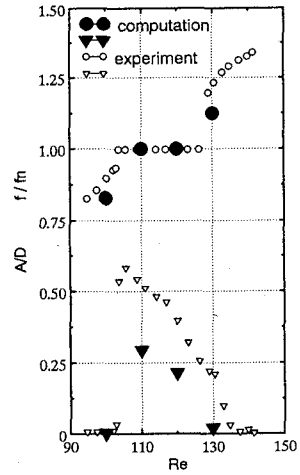


図4 円柱振幅および渦放出周波数の実験結果[2]との比較

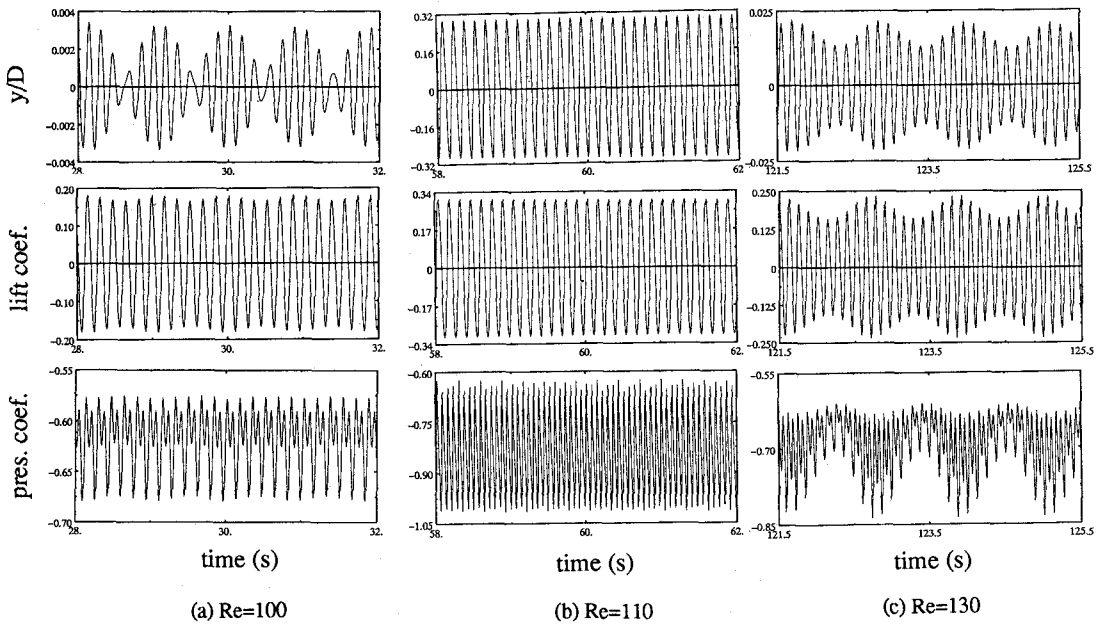


図2 解析で求めた時刻歴; (上から) 円柱の無次元変位(y/D)、揚力係数、圧力係数(円柱の後方1.0Dの位置)

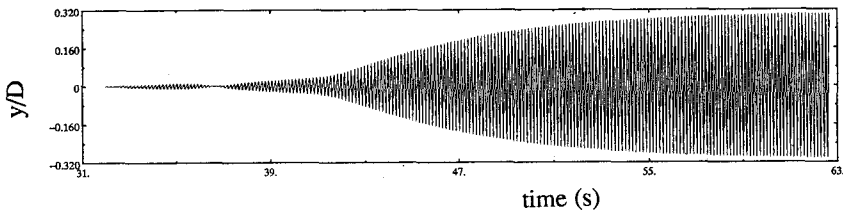


図3 Re=100からRe=110へ上流流速を増加させたのちの円柱変位の時刻歴