

CS - 42

有限要素法による2次元円柱の渦励振問題の解析

前田建設工業技術研究所 正会員 志村正幸、魏然

1) はじめに

流れと構造物の相互作用に関する問題の一つに構造物の風による振動問題がある。構造物から放出される渦の放出周波数と構造物の固有振動数と一致すると振幅が増大する現象が見られる。構造物の長大化、軽量化が進むにつれて、その振幅の増大は無視できなくなっている。このような問題は以前風洞実験による照査が行われていたが、近年のコンピュータと数値解析の発達に伴い、これらの問題にも数値流体解析を適用する試みが始められている。しかし物体周りの乱流解析は大きな難問であるため、ここでは問題を単純化して層流に限定している。

本論文では、ALE法を用いて定式化された流体運動方程式を使って、2次元円柱の渦励振に対する数値解析的なアプローチを試みた。また計算結果を検証するために、AnagnostopoulosとBearmanの実験³⁾のシミュレーションを実施し、その比較を行った。

2) 支配方程式

ALE法を用いて定式化された、非圧縮粘性流体の運動方程式を式①に、連続方程式を式②に示す。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + (U - V) \cdot \nabla U + \nabla P - \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 U = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (2)$$

上式は無次元化を施されており、 U は流速、 V はALE領域内の節点移動速度、 P は圧力、 Re はレイノルズ数を表している。ALE法の特徴は移流項に表れており、節点での相対的な観測流速が移流成分となっている。構造物の運動方程式は一質点系の振動モデルを想定すれば式③ようになる。

$$M \ddot{x} + C \dot{x} + Kx = f \quad (3)$$

ここで、 x は構造物の変位、 f は流体力、 M は質量、 C は減衰係数、 K はバネ常数である。

3) 計算条件

解析モデルは、問題を単純化するために、構造物は剛体で、流れに直交のY方向の1自由度で、しかもバネ・減衰で支持されているものとする。解析対象となる領域の境界条件とBearmanの実験条件に等価となる計算条件を図-1に示す。ここで、流出境界条件はS-Kスキームを

用いている²⁾。

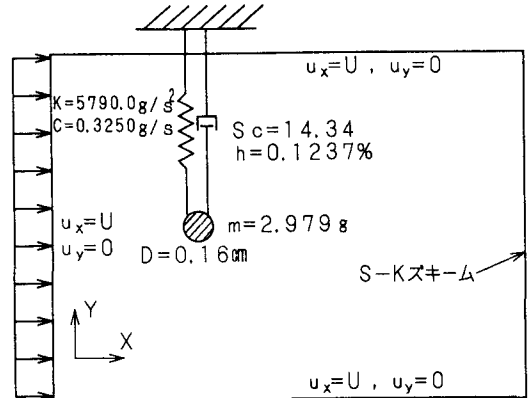


図-1 計算条件

4) 解析方法

流れ場の計算は、文献²⁾を参照されたい。計算のステップループの中では構造物の変形を引き起こす流体力が計算される。この力を利用して式③を解くことによって、構造物の変位が計算される。今回の計算では線形加速度法を用いてY方向に対して一自由度の計算が行われている。構造物の変位の計算後、ALE領域の中の節点の移動速度を固定境界と構造物上の節点の間で直線的に変化するとして与えている。節点の移動による新たな配置によって、ALE領域でのリメッシュが行われている。そして、次のタイムステップに入り、新しいメッシュと構造物表面の速度に関する境界条件に基づいて流れ場を

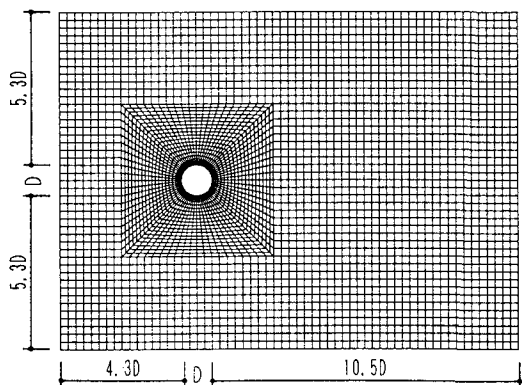


図-2 有限要素メッシュ

計算する。

リメッシュに伴う計算を節約するために円柱を囲む正方形領域内の要素だけを变形させ、ALE領域と設定する。その他の領域は固定メッシュ領域である。メッシュは図-2に示す。節点数3984、要素数3840、計算の時間刻み $\Delta t=0.02$ となっている。

5) 計算結果

計算は $Re=90, 100, 110, 120, 130, 140$ の6ケースについて行った。図-3に、 $Re=90, 100, 130$ の場合の円柱の無次元変位、揚力係数、抗力係数の4秒間の時刻歴変動を示す。 $Re=90$ の時、円柱の振幅は非常に小さく、円柱の固有振動数と渦の放出周波数に差があるため変位について‘ビート’現象が見られた。流速を $Re=100$ に上げると、円柱の固有振動数と渦の放出周波数が一致するため円柱の振幅が急に大きくなった、その影響で流速が $Re=130$ になるまで渦の放出周波数が流速に寄らず円柱の固有振動数に一致したままとなり、ロック・イン現象がみられた。流速を $Re=130$ になるまで上げていくと、円柱の振幅が大幅に低減し、揚力係数の‘ビート’現象がみられた。

円柱の振幅と渦放出周波数についての計算値と実験値との比較を図-4に示す。本手法の計算結果によるとロック・イン現象が実験値より低レイノルズ数から始まっている。野村^[1]の計算手法ではそれと逆にロック・イン領域が狭くなっている。本手法の円柱の渦放出周波数/固有振動数のパターンが実験値より若干低いレイノルズ数にシフトしているが定性的にはよく一致する。振幅の比較についてみると本手法による結果の方が野村^[1]の計算結果よりも実験結果にさらに近づいている。

6) まとめ

大変形を伴った渦励振問題をALE法を用いて安定に解くことができた。Bearmanの実験との比較により、計算の方はロック・イン現象が若干早めに出るが、両結果は良い一致を示していることが分かった。

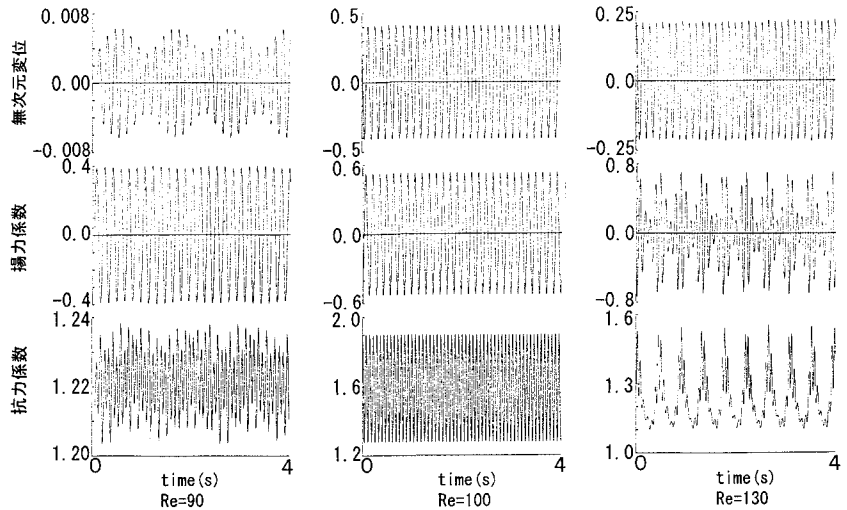


図-3 円柱変位、揚力、抗力の時刻歴

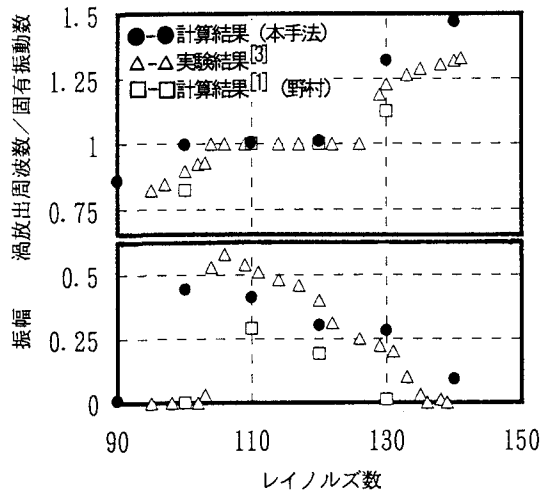


図-4 振幅と渦放出周波数の実験値との比較

【参考文献】

- [1] T.Nomura, Finite element analysis of vortex-induced vibrations of bluff cylinders, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 46&47 (1993)587-594 Elsevier
- [2] Shimura, M. and O.C. Zienkiewicz, Interaction analysis between structure and fluid flow using the Direct Laplacian Method, Proc.4th Int. Conf. on Computing in Civil and Building Engineering, Tokyo, Japan (1991), pp. 267-274
- [3] Anagnostopoulos, P. and P.W. Bearman, Response characteristics of a vortex-excited cylinder at low Reynolds numbers, Journal of Fluids and Structures(1992)6, 39-50
- [4] Shimura, M., and A. Sekine, Interaction analysis between structure and flow for wind engineering, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 46 & 47 (1993)595-604 Elsevier.