

I-A 163 渦法による振動物体の圧力評価に関する考察

京都大学工学部 正会員 白土博通
京都大学工学部 正会員 松本 勝

1. まえがき 物体とその周囲の剥離を伴う流れを扱う問題について、流体数値解析 (CFD) の中で最も実際に近い答えを与えるものは、目下のところ 3 次元の Navier-Stokes 方程式を直接解く Direct Simulation (DS) や同じく 3 次元の Large Eddy Simulation (LES) といわれているが、いずれも大きな計算負荷が要求される。離散渦法は、ポテンシャル流れを基本とした解析法であり、その簡便性が大きな特徴の一つである。また、物体表面の剥離せん断層厚が十分薄く、流れの諸特性がレイノルズ数に依存しない高レイノルズ数流れの問題に対して開発された手法であり、粘性の扱いや物体表面近傍の渦の振る舞いに独特の配慮が要求されるものの、他の手法で大きな問題となるレイノルズ数を上げるための様々な工夫をほとんど必要としない点に大きな利点がある。

本研究は、流れの非定常性が強い渦励振（自己励起型）発生風速域における鉛直たわみ振動中の 2 次元矩形断面周囲の流れを離散渦法によりシミュレートし、物体側面の非定常圧力変動の再現精度について、風洞実験値および他の数値解析手法による値と比較し、検討を加えるものである。

2. 解析手法 物体形状は流れ方向の辺長 (B) と流れ直角方向の見つけ幅 (D) との比 (B/D) が 2 の矩形断面である。自己励起型渦励振が発生する風速として無次元風速 (U/fD , U : 接近流速, f : 鉛直たわみ振動数) を 5 とし、無次元振幅 $y/D = 0.1$ で流れ直角方向に定常振幅振動を与えた。物体表面に等間隔 (0.125D) に計 48 個の離散渦要素を固定し、時間ステップ $\Delta t = 0.1B/U$ ごとに物体表面より流体中へ放出する。固定渦要素の強度（循環）は、物体表面上の法線方向成分の流速を物体の運動速度と等値する境界条件、および全体の循環の総和が普遍である条件（Kelvin の渦定理）により決定される¹⁾。放出渦の空間移動量は、当該渦要素位置における流速成分 (u, v) に時間ステップを乗じることにより求める。流速成分の算出は Biot-Savart 式による従来の手法では、渦同志が非常に近接した場合に過大な誘起速度を与え、物体表面近傍の流れ場の再現精度に問題が生じる²⁾ことから、修正 VIC 法³⁾により渦度場に変換し、流れ関数の Poisson 方程式を解き速度場を求めた後、各渦要素位置における流速成分を決定した。渦度場、速度場を求める際には、図 -1 に示すメッシュ系を定義し物体の振動に伴って移動させた。

物体表面の圧力係数 (C_p) は、次式に示す非定常 Bernoulli 式により求めた。

$$C_p = 1 - \frac{\frac{\partial \phi}{\partial t}}{\frac{1}{2}U^2} - \frac{u^2 + v^2}{U^2} \quad (1)$$

ただし、 ϕ : 速度ポテンシャル

圧力評価点は物体表面上、固定渦要素間の中点とした。圧力評価点のごく近傍を通過する放出渦要素の影響によるノイズ状の圧力急変が目立つため、一定レベルを超えるもの

($|C_p| \geq 7.5$) を除いた信号について、平均値、分散値を求め、さらに鉛直たわみ変位との相互相関から、圧力-変位間の位相差を決定した。なお位相差は、物体の鉛直たわみ変位が最大（物体が最も上方に変位する位置）を基準に、各圧力評価点で負圧の絶対値が最大となるまでの時間遅れを正とした。

3. 考察 図-2 に非定常圧力の r m s 値 ($\overline{C_p}$)、図-3 に変位との位相差を示す。両図中には、併せて風洞実験値^{4), 5)} および DS による数値解析値⁶⁾ を併せて示す。 $\overline{C_p}$ の大きさ、および前縁よりも後縁で位

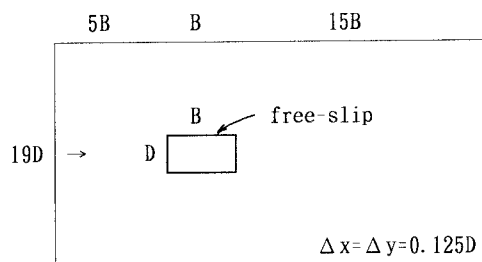


図 -1 解析領域およびメッシュ系

相差が増加する傾向は、本解析による値は風洞実験値とほぼ同様であると言える。しかしながら、実験値やDSでは物体の運動に伴う物体側面における剥離バブルの非定常な伸縮と、それより下流側で放出される自己励起渦による $\overline{C_p}$ の2つのピークが現れているのに対し、本解析結果は前縁より後縁にかけて単調に $\overline{C_p}$ が増加する結果となり、実現象との間に依然差が認められる。位相差についても、風洞実験値やDSによる解析結果に見られるような、前縁より位相差が徐々に増加する傾向は本解析結果には現れず、断面中央付近で位相の急変が現れる結果となっている。

上のような差の原因は次のように考えられる。物体の表面圧力を求める際、式(1)の右辺第3項はほとんど寄与せず、非定常圧力分布形はほとんど第2項に支配される。この項はさらに、(a)物体表面に固定された渦強度の時間変化、(b)放出渦の移動速度、(c)物体の振動速度による項より成る。いくつかの補足計算の結果、非常圧力特性はほとんど(a)で決定されることが明かとなった。このことより、本解析結果は前縁角部の渦強度が他より強く、式(1)の速度ポテンシャルの時間微分項が断面側面ではほぼ均一な値となり、実験値に見られる圧力分布を再現しない可能性が考えられる。また物体表面近傍の分解能が低く（固定渦要素間隔＝メッシュ間隔＝0.125D）、十分に実際の流速場を表現するに不十分である可能性もあり、今後更に解析精度についての検討が必要である。

4. まとめ

本研究の結果は次のようである。

1) 離散渦法による振動物体表面の非定常圧力は、定性的に実験値及び他の数値解析結果（DS）と一致した。 2) 解析精度の更なる改善のためには、渦強度をはじめとする非定常 Bernoulli 式の各項の検討と、表面近傍の分解能に検討を加える必要がある。

参考文献

- 1) R. Inamuro, T. Adachi, H. Sakata, JWEIA, vol.46&47, 1993
- 2) H. Shirato, M. Matsumoto, N. Shiraishi, JWEIA, vol.46&47, 1993
- 3) H. Shirato, M. Matsumoto, N. Shiraishi, Proc. of 9ICWE, 1995
- 4) 白石, 松本, 土木学会論文集, 1982
- 5) 山田, 風工学会誌, vol.38, 1989
- 6) 嶋田, 第13回風工学ソサエティ論文集, 1994

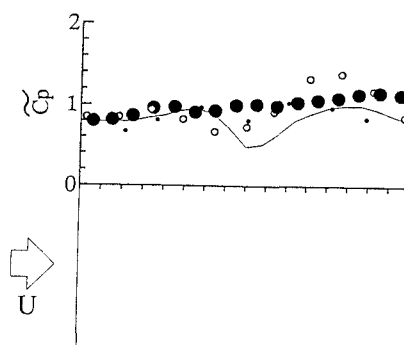


図-2 側面における C_p のrms値

- : 本解析 (U/ID=5, y/D=0.1)
- : 白石・松本⁴⁾ (U/ID=4.95, y/D=0.05)
- ・ : 山田⁵⁾ (U/ID=5.5, y/D=0.1)
- : 嶋田⁶⁾ (U/ID=5, y/D=0.114, DS)

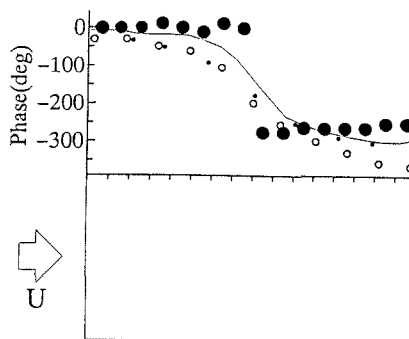


図-3 側面における圧力-変位の位相差

- : 本解析 (U/ID=5, y/D=0.1)
- : 白石・松本⁴⁾ (U/ID=4.95, y/D=0.05)
- ・ : 山田⁵⁾ (U/ID=5.5, y/D=0.1)
- : 嶋田⁶⁾ (U/ID=5, y/D=0.114, DS)