中央大学大学院 学生員 佐藤 亮

## 中央大学 正会員 平野 廣和 中央大学 正会員 佐藤 尚次

## 1. はじめに

1995 年 12 月 8 日, 高速増殖原型炉もんじゅで二次主冷 却系配管からのナトリウム漏洩事故が発生した. 配管に差 し込まれた温度計のさやが流体振動による疲労破壊を起こ したことが原因である、円柱構造物である温度計のさやは、 後流への Karman 渦列の放出に伴い揚力が加わり、ナトリ ウムの流れと直角方向に振動現象を起こす.この事故は、 渦列の周波数がさやの固有振動数に一致することで共振が 起き、いわゆる渦励振によりさやの応答振幅が増大し疲労 を加速させたことにより破壊に至った、一方、近年の長大 傾向にある橋梁構造物において、主要構造物であるケーブ ルは典型的な円柱構造物である、比較的低風速域において 発現する渦励振現象は、円柱が流れ直角方向に激しく振動 する応答振幅は限定的であるものの、共振風速近傍に至る と急激に応答振幅や空気力の性質が変化することが知られ ている.また、斜張橋や吊橋において、並列ケーブル形式 が多く採用されている。この並列円柱構造は、高風速域に おける上流側円柱の後流の影響により、ウェークギャロッ ピング現象と呼ばれる下流側円柱の複雑な振動現象を起こ すことがある.したがって、ケーブルの耐風安全性や機能 維持の観点から、これらの現象における最大振幅や発現風 速などの振動特性を予め見積もっておくことは重要である. このため、実橋における観測や、現象の把握及び対策をす るための風洞実験が行われている.

本報では、これらの風洞実験結果を基に、振動する円柱 まわり流れの2次元及び3次元解析を行うことで、渦励振 の空力特性及び発現機構を把握する.これにより、実問題 への CFD の適用性を論ずる.具体的には、実際に斜張橋 や吊橋のケーブルが置かれる Reynolds 数域(104<Re<106) の流れを念頭に置き、まずは2次元解析により、渦励振時 における応答特性の急変現象を明らかにし、空気力特性や 剥離渦の振動及び配置を予想する.

- 2. 解析諸元
- 2.1 流れ場の支配方程式
- (1) 非圧縮性 Navier-Stokes 方程式

流れ場を非圧縮性粘性流れとして扱うと、支配方程式は 非圧縮性 Navier-Stokes(NS)方程式で表される.また、物 体の振動に合わせたメッシュの変形に対処するために Arbitary Lagrangian-Eulerian(ALE)法を用いてメッシュ 速度を支配方程式に取り込む.この場合の NS 方程式は次 式で表される.

$$\rho(\frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t} + (\boldsymbol{u} - \boldsymbol{v}) \cdot \nabla \boldsymbol{u}) - \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}(\boldsymbol{p}, \boldsymbol{u}) = 0 \quad \text{in } \Omega \tag{1}$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{u} = 0 \quad \text{in } \boldsymbol{\Omega} \tag{2}$$

ここで, $\rho$ は密度,**u**は流速,**v**はメッシュ速度,*t*は時間,pは 圧力, $\Omega$ は解析領域を示す.また, $\sigma(p, \mathbf{u})$ は応力テンソルで あり,次式となる.

$$\sigma(p, \boldsymbol{u}) = -p'\boldsymbol{I} + 2\mu\varepsilon(\boldsymbol{u}), \quad \varepsilon(\boldsymbol{u}) = \frac{1}{2}(\nabla\boldsymbol{u} + (\nabla\boldsymbol{u})^{\mathrm{T}}) \quad (3)$$

ここで, μ(= )は粘性係数, は動粘性係数, また, *Ι*は 単位テンソルである.

(2) 構造モデルの支配方程式

構造モデルの振動は,鉛直たわみ変位 η およびねじれ変 位 θについての次式の振動方程式で表される.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = p \tag{4}$$

 $\begin{array}{l} \boldsymbol{\Box} \boldsymbol{\Box} \boldsymbol{C}, \quad \boldsymbol{M} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{m} \boldsymbol{D}^2 & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{I} \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{C} = \begin{bmatrix} 2\boldsymbol{m} \boldsymbol{D}^2 \delta_{\eta} f_{\eta} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & 2\boldsymbol{I} \delta_{\theta} f_{\theta} \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{K} = \begin{bmatrix} 4\boldsymbol{m} \boldsymbol{D}^2 \pi^2 f_{\eta}^2 & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & 4\boldsymbol{I} \pi^2 f_{\theta}^2 \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{x} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\eta} / \boldsymbol{D} \\ \boldsymbol{\theta} \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{p} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{D} \boldsymbol{L} \\ \boldsymbol{M} \end{bmatrix} \boldsymbol{\nabla} \boldsymbol{\sigma} \boldsymbol{\upsilon} \boldsymbol{\upsilon},$ 

δ, δ は構造減衰率, f, f は固有振動数, m, Iは質量と 慣性モーメントを表している. また, スクルートン数は無 次元量として次式のように定義される.

$$S_{C\eta} = \frac{2m\delta_{\eta}}{\rho D^2} \quad S_{C\theta} = \frac{2I\delta_{\theta}}{\rho D^4}$$
(5)

(3) 動的解析における自由振動法

自由振動法は、ばねによって弾性支持された断面に初期 条件を与え、その後の振動応答を求めるものであり、たわ みおよびねじれの1自由度振動方程式に直接時間積分法の 線形加速度法を適用して振動応答を求めている.

2.2 解析手法

離散化手法として、丸岡らが提案している IBTD/FS 有限要素法 <sup>1)</sup>を用いる. また、乱流モデルには RANS の SA モデルを用いる.

- 2.3 解析条件
- (1) 解析領域と解析条件

解析領域は、円柱直径をDとした場合、円柱前方と側方 を7.0D、円柱後方を20.5Dとしている.境界条件は、流入 境界で一様流速、側面でslip、流出境界で移流型流出境界 条件、円柱表面は円柱の移動速度を与え、円柱上の視点で 考えると、円柱表面でnon-slipとしている.

解析条件を表-1 に示す.一様流入風速 U。は円柱直径 D を用いて次式で無次元化される.

$$U_{r\eta} = \frac{U_{\infty}}{f_{\pi}D} \quad (6)$$

表-1 解析条件

メッシュ分割は,断面近 傍で節点を集中的に配置し ており,総節点数は14190, 総要素数は14000となって いる.また,河井らの円柱 の振動実験<sup>20</sup>と対応させ, スクルートン数を 1.5, Reynolds数を2.0×10<sup>4</sup>とす

Reynolds数	$2.0 \times 10^{4}$
総節点数	14190
総要素数	14000
周方向分割数	160
最小分割幅	0.0005D
時間増分 t	0.02D/U
無次元風速 $Ur_\eta$	1.0 ~ 10.0
構造減衰率 $\delta_\eta$	1%
スクルートン数 S <sub>Cy</sub>	1.5
質量比 m/pD <sup>2</sup>	75

る. なお,本報においては,鉛直たわみ変位ηに着目し,流 れ方向の変位およびねじれ変位 θ については拘束されてい るものとする. 自由振動の初期条件は,静的解析を十分に 行った後の結果を用いる.

- 3. 解析結果
- 3.1 静的解析結果

亜臨界領域における平均抗力係数は、約 1.2 であると 様々な風洞実験などから知られている. 解析結果における 平均抗力係数は 1.5 を示しており、2次元解析により若干 の過大評価をしている. また、ストローハル数については、 0.23 となった. これも、亜臨界領域においては約0.21 であ ることからここでも差を生じている.

## 3.2 動的解析結果

図-1に鉛直たわみ変位 nの, 無次元風速 Urn による振動 応答を風洞実験結果と共に示す.振動応答について,解析 結果では,無次元風速 Urn が5付近で急変しているのがわ かる.実験値との最大振幅における乖離については,解析, 実験の間での諸条件の若干の差及び,2次元解析による揚 力の過大評価が原因と考えられる.

図-2に後流渦の卓越振動数特性を示す.ここで,fは振動 円柱から発生する後流渦の卓越振動数,f<sub>n</sub>は円柱の固有振 動数である.円柱が振動している風速領域,無次元風速 *Urn*=4.5~6においては,後流渦の卓越振動数fと円柱の固 有振動数f<sub>n</sub>が一致している,すなわちロックイン現象が生 じているのがわかる.なお風洞実験においては,無次元風 速*Urn*が5.7~7の領域においてロックイン現象を示して いる.風洞実験においては,ロックイン領域外においても 円柱の振動振幅が確認されているが,解析結果においては ロックイン領域外での渦励振は確認されていない.

図-3 に無次元風速 Ung=4~7 における振動変位と揚力との位相差および揚力のパワースペクトルを示す. 振動振幅がピークを示す無次元風速 Ung=5 までは, 振動変位と揚力との位相差はみられないが, 無次元風速 Ung=5 になると位相差が急変し、以降の風速域においては位相差が生じている. また, 無次元風速 Ung=5 においては, 揚力のパワースペクトルにおいて, 卓越した振動数がいくつか生じているのがわかる.

図-4 に無次元風速 Unn=4~7, 変位 n=0, dn/dt>0 における圧力コンター図を示す. ロックイン領域内においては, 後流が大きく振動した渦形成となっているのに対し, ロックイン領域外においては,後流の振動が少ない渦形成が生じている.

## 4. おわりに

本報では、ロックイン領域外での渦励振は再現されなかったが、無次元風速 Um=4.5~6 においてロックイン現象の発生による渦励振の発現を再現できた.また、振動振幅が ピークを示す風速以降、振動変位と揚力との位相差が生じることがわかった.さらに、円柱から生じる後流渦が、ロックイン時においては大きく振動することが確認された. 今後、3次元解析を行い、より詳細に渦励振の空力特性及び発現機構の把握を行う.

<参考文献>

- 丸岡他: 同次補間を用いた陰的有限要素法による非圧縮粘性流れの解析,土木学会構造工学論文集 Vol. 43A, pp383-394, 1997.3
- 河井宏允,二井啓,藤波潔:リブ付き円柱の渦励振とギャロッピン グ,第15回風工学シンポジウム論文集,pp.461-466,1998



(c) 無次元風速 *Ur* =6 (d) 無次元風速 *Ur* =7 図-4 無次元風速 *Ur* =4~7における圧力コンター図 (変位 =0, 上向き移動時)