

高レイノルズ数域のプラント内構造物の 流れ方向振動の発生機構の解明

(研究課題番号 11450074)

平成11～平成13年度科学研究費補助金(基盤研究(B)(2))研究成果報告書

平成14年3月

研究代表者 岡島 厚

金沢大学附属図書館 工学部・教授)



8011-05259-4

1117

KAF
2001

平成13年度科学研究費補助金（基盤研究(B)(2)） 研究成果報告書

研究課題番号：11450074

研究課題：高レイノルズ数域のプラント内構造物の流れ方向振動の
発生機構の解明

はしがき

1995年12月8日の動燃・高速増殖原型炉「もんじゅ」の試運転中のナトリウム漏洩事故の原因となった温度計さや管の破損は、今まで余り認識されていなかった構造物の流れ方向自励振動現象によるものであった。このような構造物の流れ方向励振について事故の社会的及び学術的重要性と緊急性から日本機械学会では既存のアメリカ機械学会の基準と異なる独自の「配管内円柱状構造物の流力振動評価指針」を1998年に策定することが出来た。この振動事例は1968/69年、イギリスにおける海底油田の採掘時に起こった質量比の小さい海洋構造物の潮流による振動発生があるが、通常生じ易い流れに直角方向の渦励振に対し、約1/2の低い流速の領域で発生する。しかし、この自励振動の発生機構や防振対策については未だ不明なことが多く、重要かつ緊急を要する研究課題である。近年の溶接技術と加工技術の急速な進歩によって構造物の振動に対する減衰率が極めて小さくなり、今後も流れ方向自励振動はプラント内構造物において起こりうる流力振動現象である。さらに、プラント内流れは益々高速化され、構造物周りの流れは臨界レイノルズ数以上の超臨界域及び極超臨界域に達している。この様な高レイノルズ数域におけるプラント内の振動は高速水流の実験の困難性などもあり、今日世界的にもこの種の実験データや参照資料はほとんど皆無である。このように高レイノルズ数域のプラント内構造物の流れ方向振動の発生機構の解明は今後の再発防止のため、また「評価指針」の確度の向上と適用範囲の拡大のためには不可欠な研究である。

本研究では、基礎データ及び研究の欠落している超臨界域を含む高レイノルズ数領域における円柱断面柱などの構造物の流れ方向及び直角方向渦励振に関して、自由振動法および強制振動法による水槽実験及び風洞実験、さらに数値シミュレーションを行い、その渦励振の振動特性と発生機構を解明する。特に、実用性の高い超臨界域及び極超臨界域の高レイノルズ数域における構造物の流れ方向に振動の際の対称渦流れと構造物の運動と間の相互干渉に注目して構造物の流れ方向流力振動の発生機構を解明する。プラント内構造物周りの流れの3次元性や構造物の振動モードの影響に留意して、レイノルズ数、乱れ、減衰質量比などを系統的に変えて換算流速に対する構造物の応答特性を調べる。さらに、高レイノルズ数における励振機構を解明、究明するために、円柱下流域にスプリッタ板を挿入して後流渦の制御を行い、特に流れ方向振動の振動発生メカニズムを調べた。同時にLES法、 $k-\epsilon$ 乱流モデル法、直接法などによる数値シミュレーションを行い、実験の成果と比較するとともにシミュレーションの詳細なデータから流れ方向渦励振の振

著 者 寄 贈

動特性の究明、その発生メカニズムの解明により、プラント内構造物の流力振動評価の確度の向上と適用範囲の拡大化に資するものである。

以上、本研究は、高レイノルズ数域のプラント内構造物の流れ方向振動の発生機構の基礎的な研究を行ったものであり、平成11、12、13年度科学研究費補助金（基盤研究(B)(2)）の援助を受けた。

研究組織

研究代表者： 岡島 厚（金沢大学 工学部 教授）
研究分担者： 岡野 行光（(株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所 副所長）
溝田 武人（福岡工業大学 工学部 教授）
上野 久儀（金沢大学 工学部 教授）
木村 繁男（金沢大学 工学部 教授）
木綿 隆弘（金沢大学 工学部 助教授）

研究経費

平成11年度	5,400千円
平成12年度	4,200千円
平成13年度	1,500千円
計	11,100千円

研究発表

(1) 学会誌など

(1-1) 岡島 厚, 大津山澄明, 永森稔朗, 中野智仁, 木綿隆弘
円柱および矩形柱の流れ方向流力振動特性, 日本機械学会論文集, 65, 635B, pp.2196-2203, (1999, 7).

(1-2) 岡島 厚

ブラフボディーの流力振動(解説), 日本機械学会論文集, 65, 635B, pp.2190-2195, (1999, 7).

(1-3) Okajima,A., Nagamori,T., Matsunaga,F., Kiwata,T.

Some Experiments on Flow-Induced Vibration of a Circular Cylinder with Surface Roughness, Journal Fluid and Structures, 13, pp.853-864, (1999,12).

(1-4) 岡島 厚

振動するブラフな物体周りの渦流れと流力特性(解説), 日本機械学会論文集, 66, 644B, pp.948-953, (2000, 4).

(1-5) 中村 晶, 岡島 厚

円柱構造物の流体励起振動, Journal Institute of Nuclear Safety System, 7, pp.201-215, (2000, 9).

(1-6) 岡島 厚, 岩崎友秀

物体の流れ方向流力振動の可視化, 第16回風工学シンポジウム論文集, pp. 213-218, (2000, 11).

(1-7) 岡島 厚

円柱構造物の流力振動の基礎, 機械の研究, 養賢堂, 52, 12, pp. 1207-1213, (2000, 12).

(1-8) Okajima, A., Nakamura, A.

Experiments on Flow-Induced In-Line Oscillation of a Circular Cylinder in a Water Tunnel (1st-Report, The Difference on the Response Characteristics When a Cylinder is Elastically Supported at Both Ends and Cantilevered), JSME International Journal, Series B, Vol.44, No.4, pp.695-704, (2001, 11).

(2) 口頭発表

(2-1) Okajima, A.

In-Line Oscillation of a Structure with a Circular or Rectangular Section, Proceeding of the 3rd Joint ASME/JSME Fluids Eng. Conf.(CD-ROM), San Francisco, U.S.A., FEDSM99-7173, pp.1-6, (1999, 7).

(2-2) Okajima, A., Enya, A.

Wavelet Analysis of CFD (LES) Results of Vortex Shedding From a Rectangular Cylinder, Proceeding of the 3rd Joint ASME/JSME Fluids Eng. Conf.(CD-ROM), San Francisco, U.S.A., FEDSM99-7174, pp.1-6, (1999, 7).

(2-3) 岡島 厚

円柱及び矩形柱の流れ方向の流力振動特性, 原子力分野における流体関連振動研究会(IX)報告書, 東京大学工学部附属原子力工学研究施設, pp. 65-72, (1999, 8).

(2-4) 中村 晶, 岡島 厚

構造減衰のある円柱の流力振動の数値シミュレーション, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, pp. 321-322, (1999, 10).

(2-5) Okajima, A., Yasuda, T., Iwasaki, T.

Flow Visualizations of In-Line Oscillation of a Cylinder with a Circular or Rectangular Section, Proceeding of 6th Triennial Int'l Sympo. on FLUCOME (CD-ROM), FL-048, pp.1-6, (2000, 8).

(2-6) 岡島 厚, 小野和秀

円柱構造物の流力振動(回流水槽による2次元模型実験結果), 日本機械学会2000年度年次大会講演論文集, Vol. I pp. 839-840, (2000, 8).

(2-7) 岡島 厚, 小野和秀

円柱構造物の流れ方向流力振動, 日本機械学会流体工学部門講演会講演概要集, pp. 67, (2000, 9).

(2-8) 中村 晶, 岡島 厚

弾性支持円柱の流れ方向振動のシミュレーションと渦構造, 日本機械学会流体工学部門講演会講演概要集, pp. 73, (2000, 9).

(2-9) 岡島 厚, 木村繁男, 岩崎友秀

物体の流れ方向振動の可視化, 日本機械学会流体工学部門講演会講演概要集, pp. 80, (2000, 9).

(2-10) Nakamura,A., Okajima,A.

A Numerical Simulation and Vortex Structures of In-Line Oscillation of an Elastically Supported Circular Cylinder, Proceeding of ASME-PVP Conference 2001, "Symposium on Flow-Induced Vibration-2001", Atlanta, Georgia, U.S.A., PVP-Vol.420-1, pp.177-184, (2001,7).

(2-11) 岡島 厚, 小杉 崇

回流水槽における円柱構造物の流れ方向流力振動, 日本機械学会 2001 年度年次大会講演論文集, Vol. V, pp. 135-136, (2001, 8).

(2-12) Okajima,A., Kiwata,T.

Flow Visualizations of the Wake Pattern of a Rectangular Cylinder Undergoing Flow-induced Streamwise Oscillations, Proceeding of the fifth Asia-Pacific conference on wind engineering, pp.145-148, (2001,10).

研究成果

目次

第1章 総括	1
第2章 プラント内構造物の直角および流れ方向流力振動特性に関する研究	
2.1 高レイノルズ数における円柱の流力振動特性に関する実験(1-3)	3
2.2 円柱の流力振動特性に関する数値シミュレーション(2-4, 2-8, 2-10)	15
2.3 角柱の流力振動特性に関する数値シミュレーション(2-2)	30
第3章 プラント内構造物の流れ方向流力振動特性に関する研究	
3.1 両端弾性支持した円柱・矩形柱の流力振動特性に関する風洞実験 (1-1, 1-6, 2-1, 2-3, 2-5, 2-9, 2-12)	36
3.2 両端弾性支持した円柱の流力振動特性に関する水槽実験 (1-8, 2-6, 2-7, 2-11)	78
第4章 ブラフボディーの流力振動特性についての総括(1-2, 1-4, 1-5, 1-7)	97

第1章 総括

工業プラントの配管内センサーに用いられるブラフな断面構造物は後流の剥離による複雑な渦構造を呈し、様々な自励振動現象が生じる。高速増殖炉「もんじゅ」のナトリウム漏洩事故の主な原因であった温度計さや管の破損は、このような流れ方向運動と周辺流れとの相互作用によって生ずる自励振動によって起こったものである。流れの中にある構造物は流速が丁度、共振換算流速に等しい付近では流れに直角方向の比較的大振幅の振動、すなわち渦励振が生ずる。そして共振換算流速の半分の流速付近の領域では、換算質量減衰率の小さい場合に限り、流れ方向振動が卓越する2つの発振領域が認められる。この場合、より低い方の流速域の第一励振域では振動時の円柱背面下流に対称渦が形成される。このように、様々な自励振動現象は構造物の断面形状によって、その振動挙動や発生機構が異なる。本報告は、円柱や矩形柱断面柱などの構造物の流れ方向流力振動の発生機構に関し、主として両端弾性支持円柱した自由振動法により風洞実験、水槽実験、数値シミュレーションによって、以下のことを明らかにした。

まず、第2章の2.1節では、風洞実験において円柱表面に表面粗さをつける方法によって円柱表面の境界層の層流から乱流への遷移を促進させて比較的低い風速で臨界域以上の高いレイノルズ数領域の円柱周りの流れを実現させた。粗面円柱の自由振動結果によると、超臨界域においては明確な後流渦が形成されないことから円柱構造物に振動系として適当な構造減衰があれば、亜臨界域や極超臨界域におけるような直角方向の大振幅の渦励振は極端に抑制されることを見出した。次に、2.2節の円柱の流力振動特性および2.3節の角柱の流力振動特性に関する三次元数値シミュレーションでは、有限スパン長さに周期境界の条件を与えて一様流中に置かれた二次元円柱模型を表現し、レイノルズ数 10^3 程度までは層流三次元計算を、 10^4 以上ではLESモデルによる三次元乱流計算を行った。計算結果は、円柱および角柱の低流速域における流れ方向励振および共振流速付近で生じる直角方向の渦励振の応答特性の挙動を再現して実験結果と良い一致を示した。数値シミュレーションによっても、共振流速の1/2付近の低流速領域で生じる二つの励振領域、すなわち物体の運動と後流渦の相互干渉によって生じる自励振動の第一励振域と渦による励振の第二励振域が再現されるが、二つの励振域の励振メカニズムが相違するため、数値シミュレーションによる円柱や角柱などの後流渦の渦強さは強めに再現されることから、必ずしも二つの励振域の応答特性は定量的には一致しなかった。このことは種々な実験結果によっても裏付けられた。主な結論は、

- (1) 三次元の数値計算手法は、換算流速に対する振動範囲、振動振幅を良好な精度で再現している。
- (2) 物体の振動振幅の卓越周波数と後流の周波数を比較することによって振動物体のロックイン現象を確認した。
- (3) 振動振幅の大きさと渦構造を比較することによって渦構造の三次元性の強さが変化することを明らかにした。
- (4) 第一励振域では対称渦が現れ、後流で三次元的な渦構造が崩壊する。真ん中の減衰域では静止円柱に近い渦構造が現れ、第二励振域では第一励振域や減衰域に比べて渦構造に強い三次元性が現れ、後流のロックイン現象との関連を調べた。

次に、第3章のプラント内構造物の流れ方向流力振動特性に関する研究の3.1節では、両端弾性支持した円柱・矩形柱の流力振動特性に関する風洞実験による結果を示した。風洞実験の欠点は、作動流体が空気であり、水や金属ナトリウムなどの液体流中とは異なり、質量比の値が大きく、構造減衰率が等しい場合には、両者の積からなる換算質量減衰率は比較的大きいことであ

る。しかし自由振動模型を出来るだけ軽く大きくして振動し易くすることによって流れ方向振動を発生させ、スモーク・ワイヤー法によって対称渦と交互渦の様相を可視化映像で明らかにした。円柱及び矩形柱周りの流れの可視化映像による結果から、

円柱の場合：第一励振域の振動は円柱運動により励起される後流の息づき運動に起因する対称渦による励振の様相を呈示し、第二励振域では、交互渦による流れ方向渦励振によることを可視化パターンで示した。

矩形柱の場合： $b/h=0.4$ 断面柱の流れ方向振動は、せん断層が前縁で完全剥離する交互渦によるものである。 $b/h=0.6$ 断面柱の場合は、前縁で剥離して形成される渦に相互干渉が見られる。そのため振動振幅は時間的に不規則で、ほとんどロックイン現象は生じない。 $b/h=1.0$ 断面柱および $b/h=1.67$ 断面柱では、円柱の場合と同様で換算流速により励振機構に変化が見られ、低速側では対称渦、高速側では交互渦が支配的である。 $b/h=2.5$ 断面柱の場合、周期的再付着流れの生じて対称渦を伴う息づき運動による励振であることを示し、矩形断面形状によって、流れ方向励振のメカニズムが順次変わっていくことを、可視化画像によって示した。

さらに、渦電流式ダンパーによって対数減衰率を精密に変化させて、円柱の振動を抑制し得る換算質量減衰率の限界値を特定した。また、種々な断面比の矩形断面柱の流れ方向振動に関して、同様に風洞実験によって流力振動特性を示し、可視化実験によって振動物体の後流渦パターンを明らかにした。断面比が小さく垂直平板に近い場合には交互渦による第二励振域が断面比が大きくなり、アフターボディーが長くなると対称渦を伴う第一励振域が支配的となることを明らかにした。またこの場合、物体下流域にスプリッター板を挿入して、後流域に生じる交互渦の発生を抑制して対称渦の形成を促進することを試みた。このことにより対称渦と交互渦によって物体にフィード・バックされる作用の相違を明確にした。そして、3.2節では、水槽実験による両端弾性支持した円柱の流力振動特性の結果を示した。水槽実験の場合、質量比の値が小さいが、構造減衰率を変化させることが難しい。しかし、実際のもんじゅの作動状態に近い条件下の振動実験を行い、風洞実験による流力振動特性とよく一致する結果を得た。

第4章ではブラフボディーの流力振動現象について全般的なまとめを解説として示した。

以上、一連の研究による総合的結論として、次のようなことが明らかになった。

- (1) 振動する円柱及び種々な断面比の矩形断面柱周りの流れ(レイノルズ数 $Re=10^4$) をスモーク・ワイヤー法によって可視化し、振動特性と流れパターンの対応を示し、共振流速の1/2を境にして二つの励振域において、それぞれ振動円柱周りの対称渦及び交互渦の鮮明な可視化映像を得た。
- (2) 表面粗さを導入して、臨界域以上の高いレイノルズ数領域の円柱周りの流れを実現して、高レイノルズ数領域の渦励振の様相を明らかにした。臨界域では直角方向振動が極端に抑制されることを見出した。
- (3) 矩形断面柱の流れ方向振動に関しては、断面比が小さく垂直平板に近い場合には交互渦による第二励振域が断面比が大きくなりアフターボディーが長くなると、対称渦を伴う第一励振域が支配的となることを明らかにした。
- (4) 二自由度弾性支持円柱の流れ方向の流力振動時の対称渦及び交互渦の渦構造を数値シミュレーションして、それぞれの後流の三次元構造の様相には、相違があることなどを見出し、2つの励振現象は後流の交互渦の形成強さと密接に関係していることを示した。

これらの主な研究成果は、関連学会の論文集に8編の論文(1-1, 1-2, 1-3, 1-4, 1-5, 1-6, 1-7, 1-8)、そして関連学会において12編の口頭発表論文(2-1, 2-2, 2-3, 2-4, 2-5, 2-6, 2-7, 2-8, 2-9, 2-10, 2-11, 2-12)として報告した。