

平成21年6月18日現在

研究種目：基盤研究 (C)
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18560184
 研究課題名（和文） 実用プラント配管内構造物の流力振動評価と学会基準・指針の総括的検討
 研究課題名（英文） EVALUATION OF FLOW-INDUCED VIBRATION OF A CYLINDRICAL STRUCTURE IN A PIPE OF PLANTS AND VERIFICATION OF JSME GUIDELINE
 研究代表者
 岡島 厚 (OKAJIMA ATSUSHI)
 金沢学院短期大学・生活デザイン学科・教授
 研究者番号：80013689

研究成果の概要：日本機械学会基準／評価指針(JSME-S012)の適用範囲を発展するため、実用プラント配管内構造物の流力振動に対する研究を行った。(1)風洞実験、数値シミュレーションにより実用の温度計のような有限スパン長さ円柱構造物の流力振動研究の実施と流力評価・検証を行った。(2)複数円柱構造物などの流力振動評価。(3)表面粗さ導入による臨界レイノルズ数以上の流れにおける円柱流力振動の研究を行い、成果を公表した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,500,000	0	1,500,000
2007年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	600,000	4,100,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：数値流体力学、流体関連振動、配管内構造物、学会基準・指針、風洞実験、水槽実験

1. 研究開始当初の背景

我が国では、「もんじゅ」の温度計破損事故以来、その主因である配管内構造物の流れ方向流力振動に関する研究が精力的に行われてきた。しかし世界的には近年、ほとんど研究されていないのが現状であった。一方、1998年、日本機械学会は、学会独自の構造物の流力振動評価指針としてアメリカ機械学会基準(1995年制定)より正確度の高い学会基準「配管内円柱状構造物の流力振動評価指針」(JSME-S012、主査 岡島厚)を制定した。しかしプラント内流れはますます高速化され、配管内構造物周りの

流れは臨界レイノルズ数以上に達し、またプラント製作における溶接技術と加工技術の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、この種の自励振動はプラント内において頻繁に起こる流力振動現象である。申請者のグループは、流力振動評価指針の検証のため構造物の応答特性を詳細に調べ、流れ方向流力振動の応答特性が構造物のアスペクト比およびテーパ比によって大きく変容することなど多くの発見と新しい知見を得た。その研究成果は、それまで総計20編の論文を報告した。すなわち、流れ方向振動は、換算流速によつ

で第1励振域と第2励振域の励振発生機構の全く異なる2つの励振域で発生する。そのため温度計などの有限スパン長さ円柱では、その振動特性は、二次元円柱と比較して大きく異なり、振動が激しく、アメリカ機械学会基準では、規制が不可能なほど大振幅の振動が生じることも有り得ることを明らかにした。現行の日本機械学会基準の評価指針は、この点を充分留意している。然しながら、実際にプラント配管内に設置される構造物の設計の多様な環境、例えば、構造物の断面形状やスパン長さ、テーパ比、単独か複数かなど構造物の設置状況を包含できるような学会基準の評価指針に改善すべく努力することが重要である。そこで、今まで蓄積してきた研究成果に加えて、本研究の高レイノルズ数領域における円柱の振動実験や複数構造物の実験結果や近年、種々な分野で得られた研究成果を検証して、学会評価基準を今後、さらに充実、発展させ、設計ガイドラインとして高い確度と適用範囲の拡大化を図るところに本研究の位置付けがあり、意義がある。

2. 研究の目的

日本機械学会では、「もんじゅ」を始めとする原子力発電プラントの安全性確保のために申請者を主査として、アメリカ機械学会基準(1995年制定)より正確度の高い日本機械学会基準「配管内円柱状構造物の流力振動評価指針」(JSME-S012)を1998年策定した。策定後、本学会基準/流力振動評価指針は、配管内構造物に限らず広い工業分野で利用され、例えば、高さ百メートル以上の煙突や屋外アンテナの設計など、プラント配管内以外の多くの分野の構造物に対しても適用され、流れにより誘起されるあらゆる構造物の振動評価・設計に活用されている。一方、本学会基準/評価指針が、実際の広い範囲の条件下におかれた種々な形状の構造物の流力振動評価と設計に網羅的に耐えうるか総括的に検討して実証することは極めて重要である。元来、本学会基準/評価指針は、ある一定期間毎に常に見直し作業を行うというアメリカ機械学会基準と同様の性格を具備している。そのために、欠落している課題、例えば、高レイノルズ数流れにおける流力振動や複数円柱など管群における複数構造物の流力振動評価の検証研究を行うことなど、基礎資料の収集や検証実験は必須であり、このように、学会基準/評価指針は常に正確、充実、発展に努める必要がある。

本研究は、アスペクト比やテーパ比のある複雑な形状構造物の流力評価と基準化を行い、さらに、水槽実験、風洞実験、数値シミュレーションによる複数円柱構造物や高レ

イノルズ数流れにおける流力振動など、現在でも未だ欠落している課題の検証研究を行う。そして実用プラント配管内で使用されている各種構造物の流力振動に対する学会基準/指針の妥当性の評価と総括的検討を行い、学会基準/指針の普及と高度化を促進させることを目的とする。具体的には、実際に使用されているアスペクト比やテーパ比をもつ断面構造物の流力振動の評価、複数円柱など管群における複数構造物の流れ方向振動は、むしろ単独円柱の場合より振動が発生する可能性が大きいと予想される。超大型煙突や「もんじゅ」などのプラント内高速高温金属ナトリウム中における構造物まわりの流れは極超臨界域となる。このような高いレイノルズ数の流れ領域における渦励振などの流力振動特性の検証実験をして学会基準の適用範囲の拡大化を図る。3次元数値シミュレーションによって、構造物周りの流れの様相および流力振動特性を検証する。その結果は、配管内円柱状構造物の設計ガイドラインとして学会評価基準に反映され、基準のより高い確度と適用範囲の拡大化など、配管内構造物の流力振動評価指針の発展、充実に寄与する。

3. 研究の方法

本申請研究は、構造物の流力振動評価指針の充実と種々な構造物に対する指針の適用拡大化を図るために、各種プラント内構造物の流力振動に関する研究活動の研究連絡、意見交換の場はもとより、研究成果の集約を行う。

本申請研究(平成18~21年の3ヵ年)で検証する課題:

- (1) 実際に使用されているアスペクト比やテーパ比をもつ形状の構造物の詳細な流力振動メカニズムの評価をする。
- (2) 3次元数値シミュレーションによって、有限スパン長さ構造物周りの流れの様相および流力振動特性を明らかにする。
- (3) 複数円柱や管群における複数構造物の流れ方向振動の風洞実験を行い、周辺構造物による相互干渉効果を明らかにする。
- (4) 臨界レイノルズ数以上の超臨界域や極超臨界域における構造物の流れ方向振動や渦励振などの流力振動特性を解明するため、表面粗さを導入して風洞実験をする。
- (5) 研究成果は、配管内円柱状構造物の設計ガイドラインとして学会評価基準に反映させて、基準のより高い正確度と適用範囲の拡大化など、配管内構造物の流力振動評価指針を充実、発展させる。

平成18~21年の3ヵ年にわたる申請課題

「実用プラント配管内構造物の流力振動評価と学会基準／指針の総括的検討」について、金沢大・金沢学院短大、福岡工大、(財)電力中央研究所、(株)原子力安全システム研究所の研究者が協力し、それぞれの得意な分野で風洞や水槽の実験装置やコンピュータを利用して各課題の研究を行い、学会基準／指針化の是非について検討した。

4. 研究成果

(1) アスペクト比変化による有限スパン長さ円柱の振動特性と流れ構造の研究

風洞実験、数値シミュレーションによって実用の温度計のような有限スパン長さ円柱構造物の流力振動実験の実施と流力評価を行った。図1には、片端支持円柱においてアスペクト比を $AR=5, 10, 14, 21$ ($C_n=0.24 \sim 0.37$) に変化させた場合の振動特性を2次元円柱 ($C_n=0.77$) と比較して示す。図から、いずれも $V_r = 1.2 \sim 2.0$ の流速範囲ではほぼ一致した振動特性を示すが、アスペクト比が最も小さい5の場合、 $V_r = 2.5$ の高流速域まで振幅が急増し、 $V_r = 2.5 \sim 3.2$ の間では緩やかに応答振幅が減少して対称渦を伴う励振域を形成する。

すなわち、アスペクト比が10よりも小さい場合、第2励振域が消滅して単一励振域のみとなる。一方、アスペクト比の大きい $AR=14, 21$ の場合、 $V_r = 2.4$ 付近では振幅は減衰して谷を形成し、再び増加して $V_r = 2.7$ 付近で最大振幅となる第2励振域を形成する。アスペクト比によって最も振動特性に差が見られるのは、 $V_r = 2.5 \sim 3.2$ の領域で、2次元円柱や $AR=14, 21$ 円柱に見られる第2励振域であり、この流速域がアスペクト比によって大きな影響を受ける。このように有限スパン長さ円柱ではスパン方向には交互渦と対称渦が混合して形成されるので、渦構造

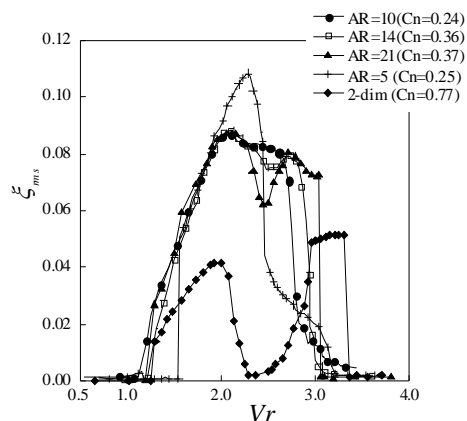


図1. 種々なアスペクト比の有限スパン長さ円柱の流れ方向の応答振幅特性

によって大きな影響を受ける。このように有限スパン長さ円柱ではスパン方向には交互渦と対称渦が混合して形成されるので、渦構造の相違による励振の様相は複雑である。そこで、種々なアスペクト比の有限スパン長さ円柱の流れ方向の流力振動特性と渦構造分布に注目して、振動円柱の渦構造のスパン方向変化をアスペクト比による相違など詳細に調べて励振機構との関係を明らかにした。

さらに、下流にスプリッター板を挿入することにより対称渦形成を促進して円柱の流れ方向励振域の拡大と応答振幅の増大を確認した。

(2) 直列2円柱の流れ方向流力振動特性と流れ構造に関する研究

一様流中に直列に2円柱を置き、注目する円柱を弾性支持し、もう一方を固定し、2円柱の間隔を変化させ、流れ方向の振動振幅と円柱後流の渦放出周波数を測定した。さらにスモークワイヤー法によって流れの可視化を行って振動特性と後流渦との関係を調べた。図2に円柱間距離 s の変化による上流側円柱の発振流速域の範囲を示す。縦線部は対称渦による第一励振域、横線部は $s=0.3 \sim 1.5$ に生ずる交互渦による励振域、および $s=1.75 \sim 3.0$ で生ずる第二励振域（交互渦）の範囲を示す。また同図には単独円柱の励振域を右端に、スプリッター板設置時の励振域を左端に示す。第一励振域が発振する V_r は、単独円柱の値と同じくほぼ $V_r=1.5$ である。 s の増加に伴い静止2円柱のストローハル数値が単独円柱のストローハル数 $St_w = 0.20$ に近づき、振動が減衰する V_r は小さくなり、第一励振域は狭くなる。 s が大きい $s \geq 1.75$ では単独円柱と同様な第二励振域が現れる。

このように、直列2円柱の上流側円柱の応答特性には、低い流速領域で対称渦を伴う流れ方向のMovement-Induced-Excitationによ

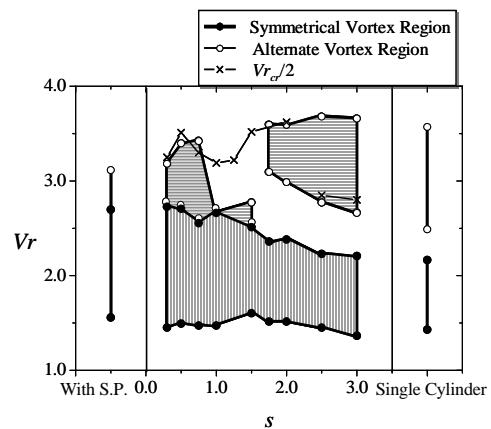


図2. 間隔 s と換算流速 V_r に対する上流側円柱の発振領域、 $C_n = 0.99$

る単一励振域が現れる。このような対称渦を伴う物体の励振は、管群など下流域に他の物体によって交互渦の形成が抑制される際に現れ易いことは注目される。一方、下流側円柱の流れ方向振動特性は、下流側円柱と上流側円柱の剥離せん断層との干渉によって変化する。

(3) 高レイノルズ数領域で後流渦がない流れにおける円柱の流力振動特性

ストランド形表面粗さを導入して、臨界レイノルズ数以上の高いレイノルズ数流れにおける流力振動の流れ方向及び直角方向の自由振動風洞実験を行った。表面粗さは $r/D=1.92 \times 10^{-2}$ でストランド形を用いた。次のような結果を得た。

- ① まず静特性実験から、円柱表面にストランド粗さをつけることによって、渦放出がない超臨界域、再び渦放出が現れる極超臨界域を比較的低レイノルズ数で実現することがわかった。
- ② 渦放出のない超臨界域の流れでは、図3に示すように流れ方向振動(固有振動数： $f_c=4.57[\text{Hz}]$)は、対称渦による振動のみ現れる。図中、亜臨界域では、後流ストローハル数 $St=0.2$ のピークが確認され、臨界域では、後流渦の周期性は低いが、対称渦による応答振幅が約0.4%の流れ方向振動が生じる。流れ直角方向の励振は抑制され、ほとんど振動しない。
- ③ 渦放出が再び現れる極超臨界域の流れでは流れ方向振動において、亜臨界域と同様、第一励振域、第二励振域が生じ、流れ直角方向振動においてもロックインによる励振が生じる。

これらの得られた関連研究の成果は、平成18、19、20年度、科学研究費補助金による「研究会」を開催して研究成果の検討および意見交換をした。

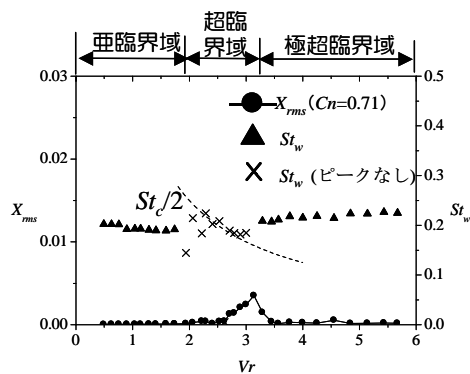


図3. 表面粗さ円柱の流れ方向振動特性

(1) 「流力振動研究会」

開催日：平成18年12月14日午後2時～4時
開催場所：金沢学院大学(金沢市末町10)
参加者：金沢工業大学、富山県立大学、金沢大学の研究者、学生を含む、約50名。

(2) 「第2回流力振動研究会」 共催：北陸流体力学研究会

開催日：平成19年9月8日午後2時～5時、
開催場所：金沢学院大学(金沢市末町10)
参加者：金沢大、福井大、富山大、金沢工大、富山県立大、石川工専、金沢学院短大の研究者及び学生、約90名。

(3) 「第3回流力振動研究会」

開催日：平成20年12月9日午後1時～5時
開催場所：福岡工業大学(福岡市東区)、
参加者：福岡工業大、九州大、金沢大、金沢学院短大、(財)電力中央研究所の研究者及び学生、約100名

研究会では、配管内円柱状構造物の設計ガイドラインとして学会評価基準に反映させて基準のより高い確度と適用範囲の拡大化など、配管内構造物の流力振動評価指針の充実について検討した。結論として、「臨界レイノルズ数以上の超臨界域および極超臨界域における円柱の流力振動に対する検証は実験的にも、数値シミュレーションによっても未だ不十分である」とした。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計18件)

- ① 安田孝宏, 岡島 厚, 振動流中の正方形柱周りの流れの三次元数値解析: 日本機械学会論文集 B, 74-739, pp.515～522, (2008-3), 有。
- ② Taketo MIZOTA, Kouhei KUROGI, Yuji OHYA and Atsushi OKAJIMA, Strange 3-D Trajectory Mechanism of Less Rotation Soccer Ball Flight, Proceedings of 8th UK Conference on Wind Engineering, University of Surry, Guildford, England, 1-6, (2008-7), 有。
- ③ 岡島 厚, 対称渦による円柱の流れ方向の流力振動, 日本風工学会誌, 33-3, pp.196～203, (2008-7), 有。
- ④ Akira ROKUGOU, Takahiro KIWATA, Atsushi OKAJIMA, Shigeo KIWATA, Hiroki YAMAMOTO, Numerical Analysis of Aerodynamic Sound Radiated from Rectangular Cylinders, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 96, pp.2203～2216, (2008-10), 有。

- ⑤ Takahiro KIWATA, Atsushi OKAJIMA, Flow-Induced Streamwise Oscillation of Square Cylinders, Flow-Induced Vibration (Proc. of 9th Inter. Conference on Flow-Induced Vibration - FIV2008, Prague, Czech Republic), pp. 675-680, (2008-7), 有.
- ⑥ Takashi NISHIHARA, Yuzuru EGUCHI, Flow-induced vibration of a sphere up to critical Reynolds number, Flow-Induced Vibration (Proc. of 9th Inter. Conference on Flow-Induced Vibration - FIV2008, Prague, Czech Republic), pp. 853-858, (2008-7), 有.
- ⑦ Atsushi OKAJIMA, Satoru YASUI, Takahiro KIWATA, Shigeo KIMURA, Flow-Induced Streamwise Oscillation of Two Circular Cylinders in Tandem Arrangement, International Journal of Heat and Fluid Flow, 28, pp. 552-560, (2007), 有.
- ⑧ Atsushi OKAJIMA, Takahiro KIWATA, Satoru YASUI, Yoshiki MORI and Shigeo KIMURA, Flow-Induced Streamwise Oscillation of Two Square Cylinders in Tandem Arrangement, Proc. of PVP2007/CREEP8, 2007, PVP2007-26123, San Antonio, Texas, USA, July 22-26, (2007), 有.
- ⑨ 岡島 厚, 安井 聡, 森 快貴, 木村繁男, 木綿隆弘, 直列2角柱の流れ方向流力振動に関する研究, 日本機械学会論文集 B, 73-725, pp. 76-84, (2007-1), 有.
- ⑩ 岡島 厚, 安井 聡, 木村繁男, 木綿隆弘, 直列2円柱の流れ方向流力振動に関する研究, 日本機械学会論文集 B, 73-726, pp. 428-436, (2007-2), 有.
- ⑪ 岡島 厚, 巻頭言「地球温暖化とクリーンエネルギー2題」, 日本風工学会誌 32-3, pp. 333-334, (2007-2), 有.
- ⑫ 六郷 彰, 岡島 厚, 上田俊弘, 山本浩輝, 木綿隆弘, 木村繁男, スパン方向に有限な長さをもつ円柱の流力振動に関する数値解析(流れ方向振動の場合), 日本機械学会論文集 B 73-726, pp. 411-418, (2007-2), 有.
- ⑬ 六郷 彰, 岡島 厚, 木村繁男, 木綿隆弘, スパン方向に有限な長さをもつ円柱の流れに直角方向振動に関する数値解析, 土木学会・構造工学論文集, 53A, pp. 614-621, (2007-3), 有.
- ⑭ 岡島 厚, 坂本 匠, 塩谷 篤, 観音立三, 断面の変化する円管内を通過する単一気泡挙動の数値シミュレーション, 日本機械学会論文集 B, 72-717, pp. 1146-1151, (2006-5), 有.
- ⑮ Atsushi OKAJIMA, Satoru YASUI, Takahiro KIWATA and Shigeo KIMURA, Flow-induced in-line oscillation of two circular cylinders in tandem arrangement, Proc. of PVP2006-ICPVT-11, 2006 ASME PVP2006-ICPVT11-93873, Vancouver, BC, Canada, (2006), 有.
- ⑯ Akira ROKUGOU, Atsushi OKAJIMA, Shigeo KIMURA, Takahiro KIWATA, Hiroki YAMAMOTO, Numerical Analysis of Aerodynamic Sound Radiated from Rectangular Cylinders with Various Side Ratios, Proc. of the Fourth International Symposium on Computational Wind Engineering, pp. 613-616, (2006-7), 有.
- ⑰ Atsushi OKAJIMA, Satoru YASUI, Takahiro KIWATA, Shigeo KIMURA, Flow-Induced Streamwise Oscillation of Two Circular Cylinders in Tandem Arrangement, Conf. on Modelling Fluid Flow (CMFF' 06), The 13th International Conference on Fluid Flow Technologies, Budapest, Hungary, September 6-9, (2006), 有.
- ⑱ 金岡佳充, 木村繁男, 木綿隆弘, 岡島 厚, 木村 修, 谷川純也, 周期的に温度変動する熱源を用いた新しい流速測定方法とMEMS技術により作製した流速センサの特性, 日本機械学会論文集 B, 72-723, pp. 2596-2601, (2006-11), 有.

[学会発表] (計9件)

- ① 溝田武人, 風洞実験による弱回転サッカーボールなどの飛翔軌道解析について: 全国共同利用研究所, 九州大学応用力学研究所, RIAM フォーラム 2008 ポスター発表 P-6, 最優秀賞受賞, 2008. 6. 6, 春日市.
- ② 岡島 厚, 後流に渦放出がないレイノルズ数領域における円柱の流力振動, 非定常空気力学研究会・構造物の空気力研究会 (AHL0S), K K R ホテル金沢, 2008. 8. 4, 金沢市.
- ③ 溝田武人, 風洞実験によるサッカーボールの弱回転ミドルシュートの後流観察と非定常流体力, 日本機械学会 2008 年度年次大会, [No. 08-1]講演論文集 (2), 1813, pp. 147-148, 横浜国大, 2008. 8. 3-7, 横浜市.
- ④ 岡島 厚, 表面粗さによる超臨界域および極超臨界における円柱の流力振動 (実験), 第3回流力振動研究会, 福岡工業大学, 2008. 12. 9, 福岡市.
- ⑤ 岡島 厚, 学術講演=物体周りの流れの可視化と流体関連振動研究の現状: 第9

回可視化情報研究センター講演会，新潟大学可視化情報研究センター，2008. 12. 15，新潟市.

- ⑥ 木綿隆弘，2次元角柱から放射される空力音の数値解析，第38回北陸流体工学研究会，富山大学 工学部，2007. 3
- ⑦ 溝田武人，サッカーボールの低回転ミドルシュートの挙動解析. 日本流体力学会年会 2007，日本流体力学会誌「ながれ」26 巻別冊，東京大学教養学部，2007 年 8 月.
- ⑧ 溝田武人，風洞実験による低回転サッカーボールに作用する非定常空気力の測定，日本機械学会流体工学部門講演会講演概要集 No. 07-16, 1202, p. 208, 東広島，2007. 11.
- ⑨ 岡島 厚，直列 2 角柱の流力振動に関する研究，平成 18 年度非定常空気力学懇談会・構造物の空気力研究会，長野，2006. 7. 30.

〔図書〕（計 2 件）

- ① 岡島 厚，他，風工学ハンドブック — 構造・防災・環境・エネルギー —，日本風工学会編，朝倉書店，pp. 50～53, pp. 83～86, p. 107, (2007-4)
- ② 岡島 厚，他，機械工学便覧 基礎編 流体工学，日本機械学会編，日本機械学会，pp. α 4-120～α 4-122, (2006-1)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡島 厚 (OKAJIMA ATSUSHI)
金沢学院短期大学・生活デザイン学科・教授
研究者番号：80013689

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

溝田 武人 (MIZOTA TAKETO)
福岡工業大学・工学部・教授
研究者番号：10038557
木村 繁男 (KIMURA SHIGEO)
金沢大学・学内共同施設・教授
研究者番号：70272953
木綿 隆弘 (KIWATA TAKAHIRO)
金沢大学・自然科学研究科・准教授
研究者番号：40225107
西原 崇 (NISHIHARA TAKASHI)
(財)電力中央研究所・地球工学研究所・研究員
研究者番号：80371475