

Research and Development on Shapes of Non-Vibrational Thermocouple in the Pipe System of Industrial Plants

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-12-11 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: Okajima, Atsushi メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24517/00049363

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



プラント配管内用非振動型温度計の形状特定と その開発研究

(研究課題番号 14350091)

平成14～平成16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17年3月

金沢大学附属図書館



0500-04105-9

研究代表者 岡島 厚
(金沢大学・自然科学研究科・教授)

平成 14 ～ 16 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：14350091

研究課題：プラント配管内用非振動型温度計の形状特定とその開発研究

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事故当時、その主因である構造物の流れ方向流力振動の研究は、世界的にもほとんど研究されていなかった。僅かに、1968/69年、イギリスにおける海底油田の油輸送用の海洋構造物において潮流により振動が発生した事故が発生したが、Kingらは構造物の流れ方向振動を実験的に研究した。流れ方向振動は、流れに直角方向の渦励振とは異なり、共振流速の約1/2の低い流速領域で発生する。

その後、「もんじゅ」の事故を契機に、わが国では、大学、企業および研究所を中心として、特に、高レイノルズ数における流れ方向流力振動の発生挙動と振動機構、流力振動特性などの研究が精力的に行われた。他方、事故の再発防止などの社会的及び学術的重要性と緊急性を鑑み、また、それまでに蓄積された多くの有益な研究成果に基づき、日本機械学会では、すでに1995年制定されたアメリカ機械学会の設計基準とは異なる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」を、1998年に策定することが出来た。

一方、プラント内流れは益々高速化され、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、また溶接技術と加工技術の進歩によってプラント内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りうる流力振動現象であることも広く認識された。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い。このように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、さらなるデータの蓄積が必要である。

本研究では、プラント配管内用の非振動型温度計の形状特定を行い、流力振動の起こらない温度計の実用化の開発研究を行うとともに、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ことを試みた。すなわち、構造物の流力振動に関する水槽実験、風洞実験そして数値シミュレーションによる一連の研究成果に基づいて、プラント配管内用の非振動型温度計の形状特定を行い、実用可能な温度計の開発研究を行った。このように種々な断面形状の構造物で、アスペクト比やテーパ比などの流力振動特性に及ぼす影響を明らかにすることによって、流れ方向振動や直角方向の渦励振などの流力振動を回避抑制可能な非振動型温度計形状を特定し、それを実用化することを本研究の目的とした。

具体的には、①回流水槽による実験による円柱構造物のアスペクト比やテーパ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、流力振動を回避抑制するプラント配管内構造物の断

面形状、アスペクト比、テーパ比の特定を行った。

②構造物の振動応答特性に対する構造物周りの流れの特性を詳細に調べ、構造物の振動応答の減衰する様相及び減衰パラメータの臨界値の変化を調べることによって流力振動が回避抑制される流れのメカニズムを明らかにした。

③構造物周りの流れの3次元数値シミュレーションを行い、計算により得られた詳細な流れの様相および流力特性結果から、流れ方向振動、渦励振の発生メカニズムの解明を行った。

これら本研究によって得られた成果は、流力振動を起こさない温度計として実用化するとともに設計ガイドラインとして学会評価基準に反映し、基準の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、充実に寄与するものである。

以上、本研究は、プラント配管内用非振動型温度計の形状特定とその開発研究を行ったものであり、平成14、15、16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（金沢大学大学院 自然科学研究科 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）

木村 繁男（金沢大学 自然計測応用研究センター 教授）

中村 晶（(株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所 研究員）

木綿 隆弘（金沢大学大学院 自然科学研究科 助教授）

研究経費

平成14年度	5,700千円
平成15年度	5,400千円
平成16年度	2,600千円
計	13,700千円

研究発表

(1) 学会誌など

(1-1) 塩谷 篤, 岡島 厚, 六郷 彰

矩形柱周りの流れの三次元数値シミュレーション, 日本機械学会論文集, 68, 670B, pp.1601-1607, (2002.6).

(1-2) 塩谷 篤, 岡島 厚, 六郷 彰

流力振動する角柱の三次元数値シミュレーション, 日本機械学会論文集, 68, 670B, pp.1608-1613, (2002,6).

(1-3) 塩谷 篤, 岡島 厚, 木綿隆弘

矩形柱周りの流力特性に関する数値シミュレーション, 第17回風工学シンポジウム論文集, pp.213-218, (2002,12).

(1-4) Okajima, A., Nakamura, A., Kosugi, T., Uchida, H., Tamaki, R.

Flow-induced in-line oscillation of a circular cylinder, European Journal of

Mechanics, B/FLUIDS, 23, 1, pp.115-125, (2004.2).

(1-5) 中村 晶, 岡島 厚, 小杉 崇, 玉城 怜士, 木綿 隆弘
片持ち弾性支持されたテーパ円柱の流れ方向流力振動, 日本機械学会論文集, 71, 701B, pp.88-95, (2005,1).

(1-6) 杉本 高志, 岡島 厚, 木綿 隆弘, 斉藤 忍, 松田 一俊
有限長円柱のインライン振動に関する水槽実験, 日本機械学会論文集, 71, 703B, pp.753-759, (2005,3).

(2) 口頭発表

(2-1) 岡島 厚, 木綿隆弘, 中村 晶, 玉城怜士
弾性支持円柱の流れ方向振動特性と後流渦構造, 日本機械学会 2002 年度年次大会講演論文集, Vol. VII, No.02-1, 東京大学工学部, pp.123-124, (2002,9).

(2-2) 中村 晶
円柱構造物の流力振動に及ぼすパラメータに関する研究動向, 日本機械学会 2002 年度年次大会講演資料集, Vol. VIII, No.02-1, 東京大学工学部, pp.147-148, (2002,9).

(2-3) Nakamura, A., Okajima, A., Kosugi, T., Tamaki, R.
Experiments on Flow-Induced In-Line Oscillation of Cantilevered Circular Cylinder, Proc. of the 5th JSME-KSME Fluids Eng. Conf. (CD-ROM), pp.1663-1668 (2002,11).

(2-4) Okajima, A., Nakamura, A., Kosugi, T., Uchida, H.
Flow-Induced In-Line Oscillation of a Circular Cylinder, Proc. of Conf. on Bluff Body Wakes and Vortex-Induced Vibrations, Port Douglas, Australia, pp.61-64, (2002,12).

(2-5) Sugimoto, T., Saito, S., Matsuda, K., Okajima, A., Kiwata, T. and Kosugi, T.
Water Tunnel Experiments on In-Line Oscillation of a Circular Cylinder with a Finite Span Length, Proc. of Conf. on Bluff Body Wakes and Vortex-Induced Vibrations, Port Douglas, Australia, pp.65-68, (2002,12).

(2-6) Enya, A., Okajima, A.
Numerical Simulation of Flow-Induced Vibration of a Rectangular Cylinder, Proc. of 4th Joint ASME/JSME Fluids Engineering Conference (CD-ROM), Honolulu, Hawaii, U. S. A., FEDSM2003-45623, pp.1-6, (2003,7).

(2-7) Rokugou, A., Okajima, A., Isogawa, T.
3-D Numerical Simulation of Flow Around a Rectangular Cylinder, Proc. of 4th Joint ASME/JSME Fluids Engineering Conference (CD-ROM), Honolulu, Hawaii, U. S. A., FEDSM2003-45624, pp.1-6, (2003,7).

(2-8) 岡島 厚, 玉城怜士, 和田宗幸, 木綿隆弘
気泡流における円柱の流れ方向振動, 日本機械学会 2003 年度年次大会講演論文集, Vol. II, No.03-1, 徳島大学, pp.359-360, (2003,8,7).

(2-9) 杉本高志, 松田一俊, 岡島 厚, 木綿隆弘
実構造物の振動特性と接近流の乱流効果を考慮した円柱インライン振動特性の研究, 土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集 (CD-ROM), I-085, pp.169-170, (2003,9).

(2-10) 上田俊弘, 六郷 彰, 岡島 厚
スパン方向に有限な長さの柱状物体まわりの流れの数値シミュレーション, 第 17 回数値流体力

学シンポジウム講演要旨集, p.143, (2003,12)

(2-11) 六郷 彰, 上田俊弘, 岡島 厚

有限長柱状物体周りの流れの数値解析, 日本機械学会年次大会講演論文集, No.04-1, Vol.2, pp.511-512, (2004,9)

(2-12) Okajima, A., Morishita, M., Nishikara, T., Nakamura, A.

Guideline for Evaluation of Flow-induced Vibration of a Cylindrical Structure in a Pipe, Proc. of the 6th International Conference on Nuclear Thermal Hydraulics, Operations and Safety (NUTHOS-6), Nara, Paper ID N6P160, p.209, pp.1-18(CD-ROM), (2004,10).

(2-13) 安井 聡, 岡島 厚, 木綿隆弘, 木村繁男

直列2円柱の流れ方向振動, 日本機械学会第82期流体工学部門講演会, 九州工業大学, (2004,11).

(2-14) 六郷 彰, 上田俊弘, 岡島 厚, 塩谷 篤, 木綿隆弘

スパン方向に有限な長さを持つ円柱の流力振動に関する数値解析, 第18回数値流体力学シンポジウム講演要旨集, p.220, (2004,12)

(2-15) 安井 聡, 岡島 厚, 木綿隆弘, 木村繁男

直列2円柱の流力振動に関する研究, 第34回北陸流体工学研究会資料, 富山県立大学工学部, pp.1-7, (2005,3).

(2-16) 六郷 彰, 上田俊弘, 岡島 厚, 木村繁男, 木綿隆弘

スパン方向に有限な長さを持つ円柱の流れ方向振動に関する数値解析, 日本機械学会北陸信越支部第42期総会・講演会講演論文集, No.047-1, pp.541-542, (2005,3)

研究成果

目次

第1章 総括		1
第2章 高レイノルズ数域における構造物の後流渦構造と流力振動特性に関する研究		
2・1 静止矩形柱周りの流れ構造の数値シミュレーション	(1-1) (1-3) (2-7)	4
2・2 矩形柱の直角及び流れ方向流力振動の数値シミュレーション	(1-2) (2-6)	23
第3章 有限長円柱構造物の流れ方向流力振動と流れ構造に関する研究		
3・1 有限長円柱構造物周りの流れの数値シミュレーション	(2-10) (2-11)	35
3・2 有限長円柱構造物の流れ方向流力振動と後流渦構造に関する実験	(1-4) (2-1) (2-3) (2-4) (2-8)	43
3・3 有限長円柱構造物の流れ方向流力振動の数値シミュレーション	(2-14) (2-16)	69
3・4 テーパ付き有限長円柱構造物の流れ方向流力振動に関する実験	(1-5)	77
3・5 2自由度弾性支持の有限長円柱構造物の流れ方向流力振動に関する実験	(1-6) (2-5) (2-9)	85
第4章 直列2円柱構造物の流れ方向流力振動に関する研究	(2-13) (2-15)	98
第5章 プラント内ブラフボディーの流力振動特性についての総括	(2-2) (2-12)	111

第1章 総括

非流線形状のブラフボディーは物体表面のはく離流れや物体後流領域に生成される渦によって様々な流力振動が発生する。工業プラントの配管内センサーに用いられるブラフな円柱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じる。作動流体が液体の場合には気体に比べて構造物と流体の密度比(質量比)が小さいため、換算減衰率が小さくなり振動が励起しやすくなる。そして共振換算流速の半分の流速付近の領域では、この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つの発振領域が生じる。高速増殖炉「もんじゅ」のナトリウム漏洩事故を切っ掛けとして、流れ方向運動と周辺流れとの相互作用によって生じる自励振動に関して、様々な実験および解析的な検討が加えられるようになった。これまでの研究により、二次元円柱構造物の場合は、低い方の流速域の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が明かとなっているが、この自励振動現象は構造物のアスペクト比やテーパ比などの断面形状、そして乱れ強さや気泡流など流れの状態によって、その振動挙動が異なることが予測される。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、主として片持ち弾性支持した円柱構造物について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、LESモデルによる三次元乱流計算を臨界断面比を含む断面辺長比が0.2~6.0の矩形柱周りの流れについて数値シミュレーションし、流体力の時間的不規則性と断面辺長比との関係をウェーブレット解析を用いて、実験結果ともよく一致した。次に、2.2節では、同様にLESモデルによる三次元乱流計算で弾性支持された矩形柱の直角及び流れ方向流力振動の数値シミュレーションを行い、構造物の流力振動問題を取り扱う場合にLESが有効な手段となることを確認した。主な結論は、

- (1) 臨界断面比付近の矩形柱の背圧係数や抗力係数が不規則に変化する時の流れパターンと流体力の変化との関連を明らかにした。
- (2) 臨界断面比付近でのカプス状に生じる抗力係数や背圧係数の特異性を三次元数値シミュレーションを行い、後流渦形成領域の大きさと密接に関係することを示した。
- (3) 断面比3矩形柱においてレイノルズ数の増加に伴い周期的再付着流れのモードが強くなること、断面比6矩形柱においてはレイノルズ数にかかわらず定常再付着流れとなること、揚力係数の周期性は流れの三次元性に依存することを示した。
- (3) 弾性支持された正方形柱では共振換算流速よりも高速域で生じる流れに直角な方向の渦励振やギャロッピング振動、1/2共振換算流速付近の対称渦や交互渦を伴う流れ方向振動現象をシミュレート出来た。
- (4) 断面比が0.6の角柱では、1/2共振換算流速付近の流れ方向振動は生じ難く、むしろ扁平な角柱に特有な直角方向の低流速励振(Low-speed galloping)が発生することを示した。

次に、第3章の有限長円柱構造物の流れ方向流力振動と流れ構造に関する研究についての3.1節では、静止した有限長円柱構造物周りの流れの数値シミュレーションによる結果を示し、先端からの巻き込む流れの影響について明らかにしている。3.2節では1自由度弾性支持された有限長円柱構

造物の流れ方向流力振動と後流渦構造に関して水槽実験を行い、二次元円柱と有限円柱構造物との比較、アスペクト比と流れ方向の振動現象との対応、さらに後流の渦構造と流れ方向の振動現象との関係を明らかにしている。また、気泡混入時流れ方向振動の様子も調べている。3.3節では2自由度弾性支持された有限長円柱構造物の流力振動の数値シミュレーションを行い、流れ方向及び直角方向の振動現象と詳細な後流の渦構造との対応をアニメーションなどで明らかにしている。3.4節では1自由度弾性支持された有限長円柱構造物の流れ方向振動特性に及ぼすテーパ比の影響について調べられている。3.5節では、2自由度振動の有限長円柱構造物の流れ方向流力振動に関する実験が行われ、1自由度との振動の違い、接近流の乱れ強さの影響などが明らかにしている。主な結論は以下のようです。

「数値シミュレーションにおいて」

(1) 静止した円柱の数値シミュレーションより、アスペクト比が小さい $AR=2.5\sim 5$ 円柱の場合は、吹き下ろしの流れの影響が下部まで及び後流に渦列が形成されにくくなることを明らかにした。
(2) 円柱の流力振動のシミュレーションより、アスペクト比が5,8においては先端からの巻き込みの影響で交互渦が抑制されることで、1つの励振域のみが生じる。また、円柱スパン方向位置で渦構造は換算流速 V_r によって変化し、例えば、 $V_r=2.75$ では根元付近では交互渦、先端付近では交互渦が形成されることを示した。

「水槽実験において」

(3) アスペクト比が5, 10の円柱においては1つの励振域、14, 21のアスペクト比の円柱においては2つの励振域が生じ、円柱先端に端板を付けた場合にはアスペクト比が5の円柱でも2つの励振域が生じる。
(4) 気泡混入により、第2励振域の振動振幅は減少するが、第1励振域の振動はあまり抑制されない。
(5) テーパ比が1%以下では有限スパン長円柱と同様に1つの励振域しか生じないが、2.5~10%では2つの励振域が生じる。
(6) テーパ比5, 10%の円柱は換算減衰率に対して二次元円柱より敏感に振幅が減衰する。
(7) 2自由度弾性支持円柱の場合、アスペクト比20円柱の流れ方向応答特性のリサージュ図形は第一励振域は流れ方向のみ、第二励振域では8の字の軌跡を描く。
(8) 乱流中では第二励振域が抑制される。

第4章では、上流側円柱を弾性支持した場合の接近した2本の直列の円柱構造物の流力振動に関する研究が風洞で行われた。主な結論は以下のようです。

(1) 上流側と下流側の円柱間距離が直径の0.3~1.5倍では大きな一つの励振域が現れ、間隔の増加に伴い励振域の範囲が狭くなる。円柱間隔が小さい場合は対称渦による励振であることから、後流に円柱を設置することは単独の振動円柱後方にスプリッタープレートを設置した場合と同様の効果があり、交互渦の発生を妨げ、対称渦による自励振動を促進する。
(2) 円柱間距離が直径の1.75以上では下流側円柱の影響が小さくなり、単円柱と同様に第1と第2励振域が現れる。第1励振域は対称渦、第2励振域では交互渦が形成される。

最後に、第5章ではプラント内の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) 弾性支持された円柱及び種々な断面比の矩形柱の振動特性と流れパターンの対応を示し、共振流速の1/2付近で流れ方向振動が生じることを実験及び数値シミュレーションで明らかにした。
(2) アスペクト比が小さい場合は1つの励振域、大きい場合は2つの励振域を生じ、アスペクト比

が大きくなるに従い第2励振域が明瞭になる。

(3) 換算減衰率 C_n に対する応答振幅の影響は、2次元円柱は第2励振域より第1励振域の方が敏感に C_n に対して敏感に振幅が抑制されるが、片持ち支持円柱の場合は、2次元円柱の2つの励振域の中間的な減衰特性を示す。

(4) テーパー付き円柱は先端から $1/3$ の直径を用いることで特性が整理できる。テーパー比5, 10%の円柱は換算減衰率に対して2次元円柱より敏感に振幅が減衰することより、日本機械学会の「配管内円柱状構造物の流力振動評価指針」での流れ方向の抑制条件 $V_r < 3.3$ かつ $C_n > 2.5$ がテーパー付き円柱でも適用可能である。

(5) 接近流の乱れ強さや気泡の混入は、第二励振域の振動が抑制されることを明らかにした。

これらの主な研究成果は、関連学会の論文集に6編 (1-1 ~ 1-6)、そして関連学会において16編の口頭発表論文 (2-1 ~ 2-16) として報告した。