

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 3 日現在

機関番号：31302

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560509

研究課題名(和文) 着脱自在な構造を有する複雑管内探査用球状型アクチュエータ群の開発

研究課題名(英文) Development of an actuator group capable of inspection in a complex pipes with removable structure

研究代表者

矢口 博之 (Yaguchi, Hiroyuki)

東北学院大学・工学部・教授

研究者番号：70192383

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：90度エルボ管およびT字部を有する内径40mmから50mmの複雑な小口径の配管内を、搭載したCCDカメラで、自由に検査が可能な電磁アクチュエータを開発した。更に、内径100mmの大口径配管内を走行可能なアクチュエータも試作し、大小2つの電磁アクチュエータをドッキングし、その着脱可能な構造についての検討を行った。これら2つのアクチュエータ群を用いて、配管内を走行させた。本電磁アクチュエータ群は、複数の電力増幅器と信号発生器およびパソコンのみで管内検査が可能であることを明らかにした。科学研究費交付期間の3年間において得られた結果は、海外雑誌5、国外発表3、国内発表2として纏めた。

研究成果の概要(英文)：This research develops a new type of magnetic actuator capable of inspection by using CCD camera loaded in a complex pipe with an inner diameter from 40 to 50 mm using a simple driving mechanism. The actuator is capable of reversible movement due to the opening and closing of a compound material by the elongation and contraction of shape-memory-alloy coils. The magnetic actuator undergoes linear and rotational movement based on the difference in frictional force between the forward and backward movement of the compound material. Furthermore, the magnetic actuator capable of movement inner diameter pipe of 100 mm inside diameter was produced. For two electromagnetic actuators, it was docked, and examination about the removable structure was carried out. It was confirmed that this actuator system is able to inspect the complex pipe system with only two amplifiers, one signal generator, a DC power supply, and a PC installed with software for video capture.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：アクチュエータ

1. 研究開始当初の背景

原子力発電は、我国の総発電量の約3割を占めており、資源に乏しい日本においては極めて重要な発電形式の一つである。この原子力発電設備には多数の配管が存在する。原子力発電所では、定期的に施設の動作を約6ヶ月間停止して、原子炉管内に存在する腐食および亀裂の検査を行っている。この際、超音波検査法および渦流探傷法により、管外部から管内部の状態を推定する手法が実施されている。しかしながら、前述のような検査方法では、内部の微小な亀裂の推定に限りがあるのも事実である。近年、原子炉内において、高圧給水加熱器から復水器に蒸気が移動するL字型の局所部分において亀裂が観察されたことが、各メディアを通じて報道された。原子力発電所内で発生した事故において、実際にその配管を切断し、断面を検査した際、外部検査法では検出できない亀裂が存在していた実例があった。このため安全上の理由から、誤りが許されない原子炉管の保守点検においては、渦流探傷試験などの管外部から管内部を推定する手法ではなく、管内部より壁面の状態を診断できるツールが必要となる。一般に、原子炉において使用されているステンレス製循環用の配管は、循環ポンプと連結されている内径450mmの大口径管から管継手を用いて内径200mmの配管へと分岐し、最終的には内径20mmの細管へ連結されている。このうち450mmの配管については、キャタピラ型および車輪型ロボットを用いた配管内探査が行われており、探査技術も確立されている。しかしながら内径100mmから250mm程度の管内走行用ロボットになると、研究例は極端に少なくなる。さらに内径20mm以下の複雑な管内を走行可能なツールに関する研究は、殆ど報告されていない。このため複雑な90度エルボ部およびT字部を多数有する原子炉管内を自由に移動し、管内壁面の状態を送信可能なツールはまだ存在しない。本研究の目的は、原子炉内の2つの異なる管内を走行可能で、かつ管径に応じて自由に着脱可能なアクチュエータ群を開発し、安全かつ確実に管内壁面の状態を目視により検査することである。すなわち、原子炉循環器内の管継手からアクチュエータ群を挿入し、内径200mmの配管内を50m、内径20mmの配管内を25m走行させて、配管内部の壁面の状態をモニタ

可能なシステムを構築することを最終目標とする。さらに一つ付け加えると、これらの探査技術において、探査ロボット以外の装置の簡略化も実際の現場からは望まれている。仮に非常に性能の高い探査ロボットが存在しても、それを制御するために多数のコンピュータを必要とし、更に付加的機器が煩雑となれば、実際の管内探査は困難を極める。これまで幾つかの大口径用管内探査ロボットが提案されているが、ロボット本体と非常に簡略された機器で、複雑な配管内を自由に探査可能なシステムは、まだ報告されていない。アクチュエータ本体と非常に簡略された機器でのみで、小口径の複雑な配管内を自由に探査可能なシステムの開発は、急務であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、原子炉管内の点検・検査を行うために、CCDカメラを搭載した管内探査用の球状型アクチュエータ群を開発し、アクチュエータ本体と非常に簡略された機器のみで小口径の複雑な配管内を自由に探査可能なシステムを確立することにある。具体的には、まず走行中に管内を絶対に傷つけることが無いような柔軟支持構造を有し、CCDカメラを搭載した実機を試作して、内径20mmの複雑な配管内を自由自在に往復移動させて壁面内の検査を行う。次に、アクチュエータの拡大化を図り、内径200mm走行用アクチュエータを試作し、最終的にこれら大きさの異なる2つのアクチュエータをドッキングさせる。すなわち内径200mm走行用球状型アクチュエータ本体中に、内径20mm走行用の球状型アクチュエータ群を内蔵させる。また、これら2つのアクチュエータは、自由に着脱可能方式とする。本アクチュエータ群は、75mの長距離にわたり内径の異なる2つの管内を自由自在に走行して、原子炉管内の壁面状態を完全にモニターできることを目的とする。

3. 研究の方法

本研究テーマでは、ケーブル方式で90度のエルボ管、T字管および異径管内を走行可能で、アクチュエータ本体の保持力を可変可能な球状型アクチュエータ群の開発に当たる。アクチュエータの走行可能な管口径としては、原子炉配管の直径に適合するように、20mmおよび200mmの2つに設定し、内径

200 mm の配管内を 50 m, 内径 20 mm の配管内を 25 m 走行させて, 配管内部の壁面状態をモニター可能なシステムを構築する。また, 本アクチュエータは電磁型であることから, 小型で効率よく振動モデルを加振させるために, 推進部の電磁場解析を実験と有限要素シミュレーションソフトを用いて行う。さらに, 内径 200 mm 走行用アクチュエータの内部に内径 20 mm 用アクチュエータが複数個挿入できる構造に改良し, 自由に着脱可能な方式を開発する。

4. 研究成果

平成 23 年度は, 90 度のエルボ部を多数有する内径 23 mm から 30 mm の管内を長距離にわたり走行可能なアクチュエータを開発した。一般に, 曲がり管のエルボ部は絞り込まれているため, 入り口および出口とエルボ部の内径は異なる。アクチュエータがスムーズに曲がり管内を走行するためには, 異形管対策が必要となる。本研究では, アクチュエータに取付ける推進材として薄いプラスチックシートと自然ゴムとを組み合わせた 2 層複合材の形状を最適化することにより, パッシブ対処ながら管内径が 23 mm から 30 mm に変化しても安定して走行ができることを明らかにした。また, 磁場解析と振動解析を行い, 走行時における牽引特性を向上させる磁気回路の検討を行った。試作したアクチュエータにおいて推進部の電磁石に 0.2 A の電流を流した場合, 0.22 N の牽引力で垂直上昇速度 23 mm/s の推進特性が得られた。また, 設計したアクチュエータを 2 個結合したアクチュエータ群についての検討も行い, その走行特性を測定した。アクチュエータ群は約 0.5 N の牽引力を発生しながらで 30 mm/s の速度で垂直上昇することを確認した。なお, 本年度において得られた結果は, 論文 1, 国際会議論文 1 として纏めた。

平成 24 年度は, 図 1 に示すような 2 個のカメラと 4 個の LED を搭載し, 分岐部を多数有する内径 40mm から 50mm の管内を長距離にわたり走行可能なアクチュエータを開発した。本アクチュエータは, 3 個の振動体を本体フレームに直行配置させて取付け, 各振動体へ入力する電力の位相を変化させることで, アクチュエータ本体を管内にて直進, 回転, ターン運動に対処できることを確

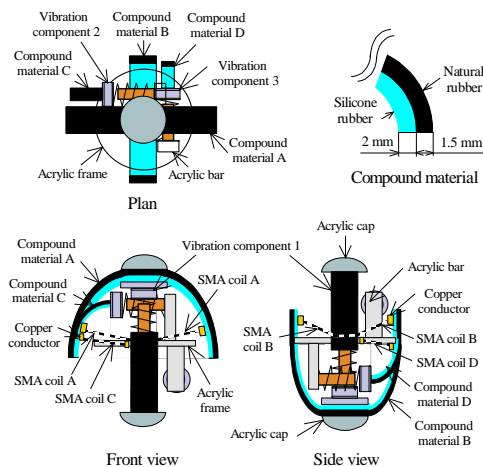


図 1. 複雑管内を検査可能な磁気アクチュエータ

認した。また, 振動体上部に取付けた薄いプラスチックシートと自然ゴム材を組合せた 2 層推進材の形状を最適化することにより, パッシブ対処ながら配管内径が 40mm から 50mm に変化しても安定して走行できることを明らかにした。試作したアクチュエータにおいて, 推進部の電磁石に 0.268 A の電流を流した場合, 0.7 N の牽引力を発生しながら 8 mm/s の速度で垂直上昇する推進特性が得られた。また, 本アクチュエータは, T 字などの分岐管を垂直方向に 10 mm/s 以上の速度でスムーズに走行可能であることを確認した。更に, 図 2 に示すようにアクチュエータは, 約 10 m の距離にわたり複雑な管内を目視検査が可能であることも確認した。なお, 分岐管内走行には対処できないが, 内径 23 mm から 30 mm の複雑管内を走行可能な小型アクチュエータ群も試作し, その走行特性を測定した。本アクチュエータ群は, U 字管内を 30 mm 以上の速度で走行できることを確認した。本年度において得られた結果は, 論文 2, 国際会議論文 1 として纏めた。

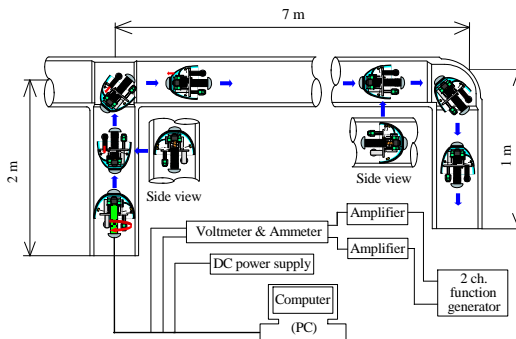


図 2. 簡単な装置による複雑管内検査。

平成 25 年度は、平成 23 および 24 年度で試作した、小口径アクチュエータの走行原理を適用しても大口径管内走行には対処させることができない。平成 25 年度では、電磁力を用いて振動系を励振させ、生じる慣性力を推進力として有効利用する新たな手法に取組んだ。アクチュエータ本体支持部に永久磁石を設置し、振動体を傾斜することにより発生する慣性力で、支持部の保持力を周期的に変化させて一方向移動を実現することを明らかにした。また、本移動原理により平面は勿論、円筒などの曲面上を走行可能で、減速器などの付加的装置を必要としないことを予備実験において確かめた。この原理を適用して、電磁振動体 4 個を配置し、大口径の配管内を往復移動が可能な電磁アクチュエータを設計した。寸法は、全長 40 mm、外径 100 mm、総質量は約 60 g で、内径 100 mm 以上での管内走行が可能である。また、本アクチュエータの中心部付近に空洞部を設けて、平成 23 および 24 年度で試作した内径 35 mm の小口径配管内走行用アクチュエータを本体内に挿入した。更に、永久磁石を用いた大小 2 つのアクチュエータについての着脱構造について検討を行った。大口径用のアクチュエータの走行特性を実機試験により測定した。入力 0.3 W(入力電圧 2 V、入力電流 0.16 A)の電力をアクチュエータに入力した場合、本アクチュエータは 100 g の質量を牽引しても垂直上昇することが確認された。最後の集大成として、大小異なる 2 つのアクチュエータを結合させたアクチュエータ群を用いて、配管内を走行させた。本電磁アクチュエータ群は、複数の電力増幅器と信号発生器およびパソコンのみで管内検査が可能であることを明らかにした。これらの知見をもとに、内径 25 mm の管内を数十 m の距離にわたり自由に探査可能なアクチュエータの開発し、原子炉内および各種のプラン内での探査に活用させたいと考えている。本年度の成果は、海外雑誌 1、国内講演発表 1 として纏めた。科学研究費交付期間である平成 23 年 4 月から平成 26 年 3 月までの 3 年間にわたり得られた結果は、海外雑誌 5、国外国際会議発表 3、国内発表 2 として纏めた。

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 5 件)

1. Hirovuki Yaguchi and Kazuhiro Sasaki : New Type of Magnetic Actuator System for Inspection in a Complex Pipe, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 49, No. 7, pp. 3905 - 3908 (2013).
2. Hirovuki Yaguchi and Noriaki Sato : Effect of Loaded Mass on Moving Properties of In-Piping Magnetic Actuator Group, Sensor Letters, Vol. 11, No. 1, pp. 26 - 31 (2013).
3. Hirovuki Yaguchi and Kazushige Kamata : In-piping Magnetic Actuator Capable of Inspection in a Thin Complex Pipe, Mechanical Engineering Research, Vol. 2, No. 2, pp. 1 - 9 (2012).
4. Hirovuki Yaguchi, Noriaki Sato, Arimitsu Shikoda and Kazumi Ishikawa : Novel Globular Magnetic Actuator Group Capable of Free Movement in a Complex Pipe, Journal of Electromagnetic Analysis and Applications, Vol. 3, No. 9, pp. 387 - 393 (2011).
5. Hirovuki Yaguchi, Noriaki Sato and Arimitsu Shikoda : Magnetic Actuator Group of Globular Type Capable of Free Movement in a Complex Pipe, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 47, No. 10, pp. 4159 - 4162 (2011).

[学会発表](計 5 件)

1. Hirovuki Yaguchi and Kazuhiro Sasaki : New Type of Magnetic Actuator System for Inspection in a Complex Pipe, 2 頁, The 12th Joint MMM - INTERMAG Conference, DQ-05 (2013), USA.
2. Hirovuki Yaguchi, Kazushige Kamata and Kazuhiro Sasaki : In-piping Actuator Capable of Free Movement in a Thin Complex Pipe, 4 頁, The 8th IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE 2012), ID350 (2012), Seoul.
3. Hirovuki Yaguchi and Noriaki Sato : Magnetic Actuator Group of Globular Type Capable of Free

Movement in a Complex Pipe, 2 頁,
The 2011 IEEE International Magnetism Conference,
GO-03 (2011), Taipei.

4. 菅原 悠・矢口 博之：小口径配管内を検査可能なアクチュエータの走行特性，日本機械学会東北支部第 48 期総会・講演会（仙台），2 頁，2013 年 3 月。
5. 佐藤 智矢・矢口 博之：複雑管内検査用磁気アクチュエータの走行原理，日本機械学会北海道支部第 51 期講演会（北見），2 頁，2012 年 10 月。

〔図書〕（計 件）

〔産業財産権〕
出願状況（計 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況（計 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織
(1) 研究代表者 矢口 博之
(YAGUCHI Hiroyuki)
東北学院大学 工学部 教授
研究者番号：70192383

(2) 研究分担者
()

研究者番号：

(3) 連携研究者
()

研究者番号：