

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 24 日現在

機関番号：12701

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011 ～ 2012

課題番号：23656548

研究課題名（和文）

機能性材料による船舶構造のインテリジェント化技術

研究課題名（英文）

Technology for Intelligent Ship Structures by using Smart Materials

研究代表者

和田 大志 (WADA TAISHI)

横浜国立大学・工学研究院・准教授

研究者番号：60359700

研究成果の概要（和文）：船舶において、センサーが状況を検知しアクチュエータが材料構造特性を能動的に変化させるインテリジェント構造が有効である。機能性材料を用いて試験体や模型を作り、(1) 船舶外板の構造健全性の常時モニタリング（ヘルスマニタリング）、(2) 排熱の電気エネルギー化、(3) 船体振動の能動制御と電気エネルギー回生、(4) 船首形状構造変形（＝モーフィング）、(5) 複雑な機構の機能性材料による簡素化の技術開発を行った。これらの機能を持つインテリジェント構造を設計製作し、性能試験を行い新技術の開発を行い、船舶インテリジェント化技術の開発を行った。

研究成果の概要（英文）：In ship structures, it is very useful to innovate the intelligent structures in which the sensors can detect the signs and the actuators can actively change the structural materials. By using the smart materials, lots of specimens and small models are manufactured and then the following technologies are developed. (1) In-site monitoring of structural safety in the outer shell of ships, i.e. health monitoring, (2) exhaust heat recovery system by regenerative control to get electric energy using Peltier element, (3) Passive control of ship vibration and recovery system to earn electricity by using Piezo element, (4) Structural shape change of bow of the boat, i.e. morphing technology, (5) Simplifying method of the complicated electric motor mechanism by alternative way due to smart materials, and so on.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：知能材料構造

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：船舶海洋工学材料、構造力学、インテリジェント構造、機能性材料、総合工学

1. 研究開始当初の背景

航空機では高コストの材料を採用できるため機能性材料を用いたインテリジェント構造（知能構造）の研究が米国 NASA などで活発に行われている。同じハコモノである船舶においても、コスト低減により、センサー

が状況を検知しアクチュエータが材料構造特性を能動的に変化させるインテリジェント構造が将来的に発展すると考えられる。そこで、多くの種類が存在する機能性材料のうちで、性能や機能は十分に高いがコストも低い形状記憶合金、圧電素子、熱電素子、光フ

ファイバー、誘電エラストマーに注目し、船舶構造のインテリジェント化（知能化）のさきがけ的な研究を行った。

平成12年度から15年度においてNEDOの航空機研究（プロジェクト名：知的材料・構造システムの研究開発）により、形状記憶合金おける階層モデルの確立や磁気感应型の新型の形状記憶合金アクチュエータの開発などを行っている。また平成19年度から、科学研究費の若手研究において、インテリジェント材料駆動の水中翼に関する研究開発を行っており、基礎的データを取得し、研究発表を行い始めた。これらの成果から、「研究目的」で述べたような5つの船舶海洋構造インテリジェント化技術を着想した。

2. 研究の目的

新型インテリジェント材料の開発は、ここ20年ほど世界中で活発に行われている。あまりに多くの種類が開発されているため、ここでは全てを紹介できないが、船舶海洋構造物に用いるにあたって高耐久性、高耐候性、高耐腐食性、安価、高出力であることを前提として、インテリジェント材料のグループを選定した。

形状記憶合金のなかで実用化されているのはTiNiであるが、本応募者は最近TiNiより数十倍安価（=ステンレスと同程度の値段）な(a)形状記憶合金FeMnSiの実用化に成功した。形状記憶合金は高出力であり、たとえば、「(5)プロペラ機構の簡素化」に用いるのに適している。

高分子材料のグループは、この10年間において世界中で最も研究された材料である。特にこの数年間において、極めて優れた特性を持つ材料、すなわち(b)誘電エラストマーが開発された。これは電圧を加えると大きく歪むが、逆に、歪を与えると歪量に比例して電気を発生する。現存するインテリジェント材料のうちで最も発電に適した材料である。そこで(b)誘電エラストマーを用いて「(4)波浪発電」を行うメカニズムを開発する。従来の波浪発電のようなタービンなどは用いず、波浪エネルギーをダイレクトに電気エネルギーに変換するものである。

(c)ピエゾ素子は、その特性から船体の振動制御に適しており、「(3)船体振動の能動制御と回生エネルギー技術」のために用いる。

(d)ペルチェ素子は、「(2)エンジン排熱の電気エネルギー化(エネルギー回生)」のために用いる。この材料は排熱の熱エネルギーを、直接に、電気エネルギーに変換できる点が大きな魅力である。

(e)光ファイバーはFRPに埋め込んで歪測定に用いる研究がなされているが、最近、直径数ミクロンの光ファイバーが開発されたので、これを用いればFRPと光ファイバー

の間の剥離を防ぐことができる。さらに、歪測定用(e)ICチップを埋め込むことにより、損傷状況を測定し無線送信し、損傷の監視を行う。このように、「(1)FRPの構造健全性モニタリング(ヘルスマニタリング)」を行う技術を開発する。

(1)船舶外板の構造健全性の常時モニタリング(ヘルスマニタリング)、(2)排熱の電気エネルギー化、(3)振動の能動制御と回生エネルギー技術、(4)構造変形(=モーフィング)の4テーマに着手した。これらは航空機や自動車における構造のインテリジェント化技術として研究されつつあるが、船舶においても魅力的なインテリジェント構造であり、低コストであることから、実現可能性が高い。

(1)「FRPヘルスマニタリング」船舶構造としてFRPと発泡材の間に光ファイバーを挟み構造モニタリングを行い、さらにバッテリー内蔵の小型ICパッチを貼り付け、損傷状況を無線送信し、コンピュータで常時、損傷の監視を行うための知的構造を実現するために、まずICパッチ無線技術を確立した。また、(2)「エンジン排熱の電気エネルギー化」スターリングエンジンと誘電エラストマーを用いた温度差発電のデモ機的设计を行った。(3)「振動の電気エネルギー化」流体中の物体後方のカルマン渦列による振動により発電できるデモ機を作製した。(4)「形状記憶合金網」TiNiワイヤーを編むことにより、非常に大きなひずみを出力できることを見出した。

3. 研究の方法

本研究の4つのテーマ、(1)構造健全性モニタリング(ヘルスマニタリング)、(2)排熱の電気エネルギー化、(3)振動の能動制御と回生エネルギー技術、(4)構造変形(=モーフィング)の各々について述べる。

(1)においては、FRPと発泡材の間に光ファイバーを挟むことで製作が容易になるので、航空機よりは製作し易い。また、光ファイバーを内蔵し難い部位においては、バッテリー内蔵の小型ICパッチを貼り付け、損傷状況を無線送信し、コンピュータで常時、損傷の監視を行う。ICパッチ無線技術は、他分野で基礎研究が始まったばかりで、ICパッチ内蔵のバッテリー寿命の問題があり、実用化は困難とされている。しかし、船舶では、定期点検時に、安価なICパッチごと貼り替えて交換すればよいので、実用化が期待できる。データの無線送信距離は現状で数10mであり、基礎段階としては十分と考える。FRPに市販の極細ファイバーを埋め込み、購入したICパッチを貼り付け、試験板(大きさ50cm×50cm×3cm)を実際に製作する。ひずみ検知IC無線パッチの設計製作は2年がかりの予定

であったが、最初の1年目においてほぼ完成できた。このひずみ検知 IC パッチは、従来のひずみゲージを用いて、その精度が十分であることも確認できた。5つ以上のひずみ検知 IC 無線パッチからの情報を遠隔的に PC に取り組むことができた。当初の計画以上に進展しているといえる。

(2)においては、ペルチェ素子の表裏の温度差が起電力の大きさに対応するので、温度差が大きくなるようエンジンのどこにどのように素子を張り付けるかといった設計の工夫が最も重要である。まず、特性の異なる数種のペルチェ素子を購入する。それらを用いて起電力の測定を行った後、各種存在する船舶用エンジンの排熱量を調査した上で、その排熱を効率良くペルチェ素子へ伝達するために熱伝導解析を市販ソフトを用いて行う。すなわち当初は、熱電素子を使用する予定であったが、これまでにない新しい組み合わせである「スターリングエンジン+誘電エラストマー」方式によって発電する方式の方が効率が高くなる可能性を見出したので、発電方式を変更した。現在、スターリングエンジンの設計と誘電エラストマーダイアフラム型小型発電機の設計製作が終了したところであり、当初の予定よりも進展していると思われる。

(3)については、エンジンなどからの振動対策として、例えば、上部構造と主船体の間をラバーマウントで固定することがあるが、このラバーマウントの代わりに圧電素子を用いることによって、振動を電気エネルギーに変換する。図3の部位に限らず、振動が存在する様々な部分に圧電アクチュエータを装着すれば振動発電ができる。同時に、圧電アクチュエータによって振動の能動的な制御が可能になるので振動低減が可能となる。このとき、エネルギー回生回路をアクチュエータ制御に用いれば、振動により圧電アクチュエータが電流を発生し、生じた電流を用いてアクチュエータ自身を駆動出来ることになる。この回生回路を組み込めばアクチュエータ駆動のためのエネルギーが不要となり、アクチュエータを組み込んだシステムを、振動の大きな場所に貼り付けるだけで、振動の抑制と発電の両方が可能となる。エネルギー回生型のピエゾ素子アクチュエータの小型のものを設計する。振動吸収の周波数は、およそ 0.1Hz から数十 Hz に設定する。アクチュエータ出力は約 10N とし、まずは、模型船での振動制御を目的とする。このように当初は、しばしば多くの研究者が発想する圧電素子による振動発電を考えていたが、発電素子よりもさらに効率的に流体エネルギーを電気エネルギーに変換できる誘電エラストマー発電方式に切り替え、すでに発電に成功した。当初の計画より遥かに進展しているとい

える。

(4)については、プロペラを、形状記憶合金 FeMnSi (うまくいかなかった場合には、すでに実用化されている高性能 TiNi 系の形状記憶合金) で作製し、推進速度などに対応して、3次元的にプロペラ形状を変形させ性能向上させることを将来的に考えているため、本研究では、その前段階を行う。すなわち図6のように、可変ピッチプロペラのボス部分は構造が複雑で大きなボス形状となってしまうが、ピッチ角変化を形状記憶合金で行うことによりボスを小型化することとする。形状記憶合金駆動による可変ピッチプロペラ模型の設計を行う。設計に必要なデータは、構造面では、形状記憶合金の加熱量と変形量の関係が最も重要であるので、構造-熱解析ならびに実験により設計データを取得する。設計した小型ボス式形状記憶合金駆動の可変ピッチ機構を、実際に製作する。水中や海中においては、形状記憶合金は十分なスピードで自然水冷されるので、形状記憶合金に埋め込んだヒーター加熱だけを制御すればよい。形状記憶合金を加熱冷却制御し、図6で考えている翼の作動確認を行い、プロペラ性能変化を確認する。

TiNi 形状記憶合金のバルク材を当初考えていたが、さらなる熟慮により、TiNi 形状記憶合金ワイヤー網目型アクチュエータの発想に至った。ワイヤーならば市販されているうえ、網目状にすることにより軽量化でき安価になるうえ、加熱冷却がさらに容易になり、その動作スピードは遥かに速くなり、非常に高性能なアクチュエータを作り出すことができた。

4. 研究成果

本研究の4つのテーマ、(1)構造健全性モニタリング (ヘルスマニタリング)、(2)排熱の電気エネルギー化、(3)振動の能動制御と回生エネルギー技術、(4)構造変形 (=モーフイング) の各々について述べる。

(1)においては、船体構造を模した疲労試験体実際にひずみ検知 IC 無線パッチを貼り付け、疲労実験を行い、疲労亀裂の発生の検出を試み、検知 IC 無線パッチがヘルスマニタリング技術として使い得ることを示す。また、バッテリーが長年は持たないことを考慮して、(3)の振動発電技術を用いて、充電式バッテリーを用いて、永久的にひずみ検知 IC 無線パッチが使用可能となるよう、研究を進める。

(2)においては、設計した超小型スターリングエンジンを作製し、誘電エラストマーダイアフラム発電機と組み合わせて、温度差発電ができることを示す。また、その発電効率や、発電量についても、実験を行い、定量的データを得るものとする。

(3)においては、すでに90%完成したといえるが、主として実験により、さらなる発電効率の追求を行う。また、水流れだけでなく空気流れにおいても同様の効果が得られることも視野に入れ研究を推進することとする。

(4)においては、網目状の編み方の工夫をさらに加えて、さらなる大出力（荷重とストローク）を目指す。これは、ワイヤーという1次元物体を用いて、2次元あるいは3次元物体を作り出すことを意味するので、幾何学の一つであり、実用的価値のみならずアカデミックな価値も非常に高いので、実用化と新しい幾何学の追求の両者を行う予定である。

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2件)

- ① S. Chiba, M. Waki, T. Wada, Y. Hirakawa, K. Masuda, T. Ikoma, "Consistent ocean wave energy harvesting using electroactive polymer (dielectric elastomer) artificial muscle generators", Applied Energy, Vol.104 (Oct. 2012) pp. 497-502 (査読あり)
- ② 千葉正毅, 和氣美紀夫, 和田大志, “進化する誘電エラストマー人工筋肉 一省エネルギーアクチュエーターおよび高効率発電素子の可能性一”, PETROTECH, VOL.35, NO.7 (July. 2012) pp.501- 506 (査読あり)

[学会発表] (計2件)

- ① Taishi WADA, “Electric Generators using Dielectric Elastomers driven by Propeller Screw in Water Flow”, IUMRS-ICEM 2012, 2012年09月23日～2012年09月28日, Yokohama
- ② Taishi WADA, ” Innovative Electric Generators using Dielectric Elastomers driven by Karman Vortex in Water Flow”, IUMRS-ICEM 2012, 2012年09月23日～2012年09月28日, Yokohama

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ
<http://ynfp.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

和田 大志 (WADA TAISHI)

横浜国立大学・工学研究院・准教授

研究者番号：60359700