

機関番号：11301

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360122

研究課題名 (和文) 海中ロボット用電力供給・通信エネルギーネットワークシステムの構築

研究課題名 (英文) Construction of Contactless Power Transmission and Signal Transmission Network for Undersea Robot.

## 研究代表者

松木 英敏 (MATSUKI HIDETOSHI)

東北大学・大学院医工学研究科・教授

研究者番号：70134020

研究成果の概要 (和文)：海中ロボット駆動用の電力エネルギー，ならびに付随する通信システムを揺らぎのある海中にて供給可能なシステムについて検討を行った．電力エネルギーについては三角錐型のコーン型コイルを基本とした非接触伝送を基本に，模擬海中にて伝送の確認を行った．電解質である海中に於いても遜色なく電力供給が可能であり，通信システムの検証も併せ，海中充電ステーションの構築が可能である事がわかった．

研究成果の概要 (英文)：We study examining the contactless power transmission with signal control transmission system for a rolling undersea robot. The corn type power transmitter coil is shape of trigonal pyramid which is received the power for contactless transmission system in the simulated seawater. We confirm the constructible undersea contactless charging station for the undersea robot.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
2009年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2010年度	2,000,000	600,000	2,600,000
年度			
年度			
総計	8,000,000	2,400,000	10,400,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：電気機器工学，海洋工学，海洋探査，地球観測

## 1. 研究開始当初の背景

地震や地殻変動，海水温変化に伴う気候変動，海底資源の探査など海中に関わるニュースが日々伝えられているが，そのどれもが海中測定機器や水中ロボット，深海探査艇などの海中機器による成果であるところが大きい．これら海中機器の駆動源は電力であり，有線若しくは蓄電池による稼働が一般的である．そのため，有線による行動範囲の制限や蓄電池による稼働時間の限定など，様々な

制約を受ける事となる．また海中での電波吸収や深海の圧力といった海中独特の状況とも併せ，海中機器駆動エネルギーに関する画期的な技術革新は現状では無い．本研究は，電磁誘導を用いた非接触エネルギー伝送を海中にて行い，海中給電ステーションを設ける事で，広大な海中空間に電気インフラとしてのエネルギーラインを構築する事が目的である．これにより海中機器は，駆動源である電力エネルギーの制限から解放され，地上とは独立し

た稼働が可能となり自立型水中ロボットをはじめとする機器の能力を最大限に発揮する事が可能となる。また給電には電磁誘導方式を用いるため、海中に分散したロボット同士の電力融通が可能になり、併せて信号情報も同時に送受信可能なことから、海中空間での通信ネットワークも構築可能となる。将来は全地球規模的なシステムへと発展が可能であり、地球環境の改善と維持にも重要であると考えられる。電力と通信の送受システムは汎用的であり、海中機器の種類を問わず対応可能とするのは勿論である。水中ロボットについては予てより研究開発が行われてきたが、国内ではその重要性が新たに認知されている事から、近年様々な機関において開発が増えてきた。2006年には初めて第一回水中ロボットフェスティバルが日本で開催されるに至っている。その中でも以前より東京大学と海洋研究開発機構が小型から大型まで種々の水中ロボットを稼働させており、海中生態系の調査、深海探査等が積極的に行われている。また三井造船、川崎造船等の国内メーカーも研究開発を行っている。国外においては米国マサチューセッツ工科大学やニューハンプシャ大学、ウッズホール海洋研究所等もまた、様々な研究開発を行っている。水中ロボットにおいては特に自立航行型機器の開発が主であり、推進システムから制御アルゴリズム、蓄電池マネジメント、通信システム等、各機関がそれぞれ全くの独自規格で開発を行い、各種用途に見合った機能実現のために開発競争を行っている。しかしながらその何れもが、駆動源である電気エネルギーに関しては手つかずの状態であり、機器の省電力化や蓄電池マネジメントによる稼働時間の延長を図っているものの、根本的な対策には至っていない。現在でも母船を共にした有線ケーブルによる稼働、または有限の内蔵電池であり、本電力供給システムが最大限有効的に発揮されると考えられる。最近では、自立航行型ロボットを複数海中にて稼働させる実験において、海中ロボット子機が親機から離散し、消息不明になる事柄があった。この件は本システムが実現できていれば未然に回避できたとも考えられ、必然的に本給電システムへの要求が高まっているものと考えられる。現在のところ水中ロボットを主とする海中機器は、日本が世界の先導的な役割を果たしている。

## 2. 研究の目的

本研究における最大の目的は、地震発生に関する調査を含めた地殻変動の観測・調査、海中資源の探査及び海中環境調査等に使用される自立航行型水中ロボットへ、その駆動源である電気エネルギーを相対するコイル間の電磁誘導作用を用いた非接触電力伝送方式により海中の至るところで供給する事である。またエネルギー供給をロボット単体のみに限定せず、複数のロボット、多数の機器を対象とする事でマルチリンク的な海中エネルギーネットワークシステムを構築する事にある。特に、複数の海中ロボットが永続的に自立的に航行できる事は海中空間を把握し未知の領域を自在に利用する事を意味しその意義は大きい。また、気候変動時や地形異常、地震、津波といった身に迫る危機に対しても効果的な役目を果たすと思われる。特に先行研究（非接触電力伝送による3次元海中ロボットエネルギーネットワークシステム）において、塩分を有し、地上空気中とは電気的特性が異なる海中において本方式の実現性を確認しており、更なる検討を行う。本研究期間内に於いては下記の3つを柱に検討を進める。既に先行研究において、海中での電磁誘導による非接触伝送の実現が確認されていることから、以下の方法をとる。まず、海中の揺らぎを考慮した特殊形状である実サイズの三角錐型コイル開発と、その設計に必要な電磁気パラメータの算出、更に開発コイルを用いた1kW~3kWの実用を想定した伝送実験を行う。次に、海中給電ステーションの構築とスケールモデルの開発、そして本システムをあらゆる海中機器、水中ロボットへ適用させるための汎用インバータ、汎用コンバータを含む電力受給電ユニットの開発と海中におけるkWレベルでの電磁氣的振る舞いの挙動確認等を行う。これら基本方針により、海中給電システムの構築を行う。また、ここ数年日本を含む世界中の地域において、大規模な地震が発生し甚大な被害が起きており、また猛暑や厳冬など気候変動に関わる被害も増大している。そのどれもが、地殻活動や海流異変に伴う現象であり、海底や海中のモニタリングが担っている使命は大きい。併せて、限られた地球資源において、“海中資源”、“海中空間”は現在未知の部分が多く、水中ロボットの技術的進歩に伴ってようやく、その体系的な観測・調査が可能となって

きた。水中ロボットの役割から論ずれば、深海鉱物資源探査に始まり、海中生物調査、地殻変動の長期的広範囲測定における地震メカニズム解明、全地球規模での海流調査等、その責務は大きい。しかしながらそのロボット何れもが駆動源である電源を母船からの有線ケーブルや内蔵蓄電池に頼っており、その稼働には制限が付きまといロボットの持つ本来の性能が生かしきれていない。海中、または海底に“コア”となる電気エネルギー供給ステーションを設置し、そこからロボットが電力を受電した後、海中へ広範囲に散在したロボット同士が、各々で電力を送受電し、一方では通信を行えば、現在までは未踏であった海中に於ける電力エネルギーと通信システムの大規模な海中ネットワークが構築される。本システムが全地球上で実現可能となれば、海中生物調査が長期追尾可能となり、地殻変動等の調査は勿論、強いては海難捜索の強力な手段となり得るなど、既存の機器、システムでは実現できない全く新しい海洋空間の利用が可能となる。特に海中若しくは水中においては電磁エネルギーが吸収される事から、現在の信号通信は、局所的に低い信号伝送量と通信速度で行われており、電気伝導度が異なる海中における電磁気現象の解析という面から見ても意義は大きい。本研究が実現されれば、電気エネルギーのみではなく、海底鉱物資源を複数のロボットに海上まで運搬させる海中コンベアも実現可能となる。これらシステムの基本技術には、海中空間における電磁エネルギーの最適な調整が必要不可欠であり、これらの構想は正に筆者オリジナルのもので他に類を見ない画期的なものと考えられる。特に近年では地殻活動の活発な動きから地震が頻発しており、活動に由来する海底プレートや海底環境調査も益々重要になっている。また激しい気象変動の一因とされる海流の影響など我々の環境に関わる事項は海中状況の変化を以て知る事が多い。地殻変動には海中 GPS、ならびに海流の温度影響等の調査には様々な観測機器が用いられるが、その駆動源である電源の問題が必ずつきまとう為、一体化した地球規模での大きなシステム構築には至っていない。本システムが論ずるところの役割は海中機器の電源に始まり、個別の電力源、通信源がサブルーチンとなって地球的ネットワークを築くことが本研究の実質的な最大目的である。

### 3. 研究の方法

非接触電力伝送を海中機器へ適用する事について主眼を置く。

(1) 現存海中ロボットの実際の電力レベルである 1kW~3kW を想定した、実サイズコイルによる非接触電力伝送実験を行う。海中の揺らぎを想定した特殊コイル形状として、コーン型（三角錐型）のコイル製作を行う。その際コイルサイズは最大 3kW を実際に送受電可能なものとし、過去のスケールモデルデータを用い製作する。コイルには可撓性を持った磁性体を併用し、磁場解析シミュレーションを用い、効率の良い磁気回路設計を行う。この実用に適したコイルを用い、周波数帯を kHz オーダから上限 1MHz 程度まで可変させ、負荷変動に伴う伝送電力と伝送効率を確認する。その後汎用設計に必要な電磁気パラメータを算出しまとめる

(2) 海中給電ステーションの設計とスケールモデルの開発を行う。上記の確認後、電力給電基地となる送電ステーションの基本設計を行う。多数の送電側を配置し、隣接コイル間での磁気結合度、励磁コイルインピーダンス等を考慮し、海中での励磁条件（入力電圧、入力電流、励磁（共振）周波数、入力率など）を求め、海中に適した値を算出する。

(3) 海中での kW レベルにおける電磁気挙動の確認と、本システムをあらゆる海中機器、水中ロボットへ適用させるための汎用インバータ、コンバータを含む電力受給電ユニットの開発を行う。海中を模擬した塩分濃度の塩水中において、1~3kW の伝送を行い、海水の持つ電気伝導性に基づく渦電流等の影響を、送受電効率を中心に確認する。また給電ステーションと海中機器、ならびに海中機器同士の電力送受電を想定する場合において、送電側としては、ステーションには大型の送電インバータ、海中機器には 1kW 以下の小型インバータを搭載させる事を目指し、受電側としては、様々な海中機器における汎用的な受電を可能とするための受電コンバータユニット開発を目標とし、電圧変換範囲の設定を含めた設計を行う。最終的にこれらシステムを海水中にて稼働させ、通信システムも併せた機能の確認を行う。

### 4. 研究成果

海中ロボット用電力供給・通信エネルギーネットワークシステムの構築において、トラン

空間の結合係数とコイルの性能指数を表すQ値との関係について検討を行った。特に海中での使用を想定した場合には、媒質が電解質を含んだ海水となるため、大気中と比較すると伝送効率に与える影響が多少考えられる。つまり電磁氣的に弱い結合を保ちつつ、効率を最大限に得るための制御方法を見出す事が最良となる。今回は電磁誘導方式を用いて、電氣的結合を最大に高め、伝送コイル間でのエネルギー蓄積密度を大きくし、大電力を送電する事を行ってきた。特に本研究が目指す海中エネルギーネットワークシステムにおいては、多数の海中ロボット間での電力のやりとり、若しくは基幹送電ステーションでのドッキングにより電力伝送を行う事を想定しているために、近傍での電磁誘導給電システムは非常に有効である。このシステムに関する基礎検討については、本研究課題により進捗が図られたが、海中での揺らぎや、より多動性を有する海中ロボットの動作を支援するためには、距離を隔てたロボットに対しても電力伝送できる事が望ましいと考えられる事から更に本検討を行うに至った。検討結果としては、周波数をkHzオーダからMHzオーダまで従来よりも拡充し、コイルの銅損を制御する事で、コイルQ値を向上させた。その結果、結合係数とQ値の積で示される伝送効率において、Q値に依存する割合が大きくなり、一方、電磁氣的結合係数の依存割合を低減させる事ができた。この事は、電力伝送コイル間の空隙を大きくしながらも伝送効率を補償する事を意味しており、揺らぎの多い、3次元的自由度を持つ海中空間においては有効に動作すると考えられる。この検討結果では、伝送電力を100Wレベルで確保する事に成功し、過年度までの方式との併用を想定して、今後システム構築を更に進める事とする。続いて送受電コイル形状として、コーン型（三角錐型）形状のコイルを更に発展させて、送電側には空間的に広い電磁場領域が確保可能なスクエアコイル形状を用いて、海中ロボットのスケールモデル給電システムを検証した。また海中での揺らぎが発生する状況を、更に厳密な電磁氣的シミュレーションで検証し、コイル間電磁氣的結合の特性を確認した上で送電励磁側コイルの検討を進めた。給電ステーションの基本形として、正四面体の水平方向に4つのコイルが設置される場合から検討を始めたが、前述のコイルを検討した理由として、海中での揺

らぎや、海中空間が3次元的自由度を保つことを最大限利用するために、海中空間に於いて広範囲な3次元の磁場分布を得られる様な送電側励磁コイルについて形状を決定した。海中ロボットに於いては、簡易的なスケールモデルを用い、また実際の水中を模擬した水中モデルを製作して実働させた。また送電側給電ステーションの検討には、海中ロボットスケールモデルに内蔵される受電側コンバータに、機能性を持たせるシステムを組み込んだ。具体的には、将来エネルギーと通信の海中ネットワークを構築するに当たり、給電ステーションのみならず、ロボットに内蔵された受電コイルが送電コイルへとその役割を変えて、他のロボットへ電力エネルギーと通信情報を送電・送信する事を理想とする旨の実験計画のもと、超小型インバータを内蔵した。実際は、内蔵コンバータを送電コイルユニットとして機能する様に製作した。実験結果として、海中を模擬した水中空間において、範囲を限定された空間に磁界を分布させ、スケールモデルである海中ロボットに実際に充電を行う事を確認した。また、スクエアコイルの効果としては、海中空間を模擬した揺らぎのある水中にて、安定給電を確認する事ができた。以上により、電磁誘導を用いた非接触充電システムを主とした海中ロボット用の海中充電ステーション構築が可能である事がわかり、本検討期間終了後も引き続きその実現を目指す所存である。

##### 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4件)

1. 太田 佑貴, 佐藤 文博, 松木 英敏, 他, 民生機器向け電磁誘導型非接触電力伝送に関する研究, 電気関係学会東北支部連合大会講演論文集, 査読無, 2010, 194
2. 吉藤 寿高, 佐藤 文博, 松木 英敏, 他, 磁界共鳴型非接触電力伝送におけるアンテナ間ギャップと効率に関する基本的な検討, 電気関係学会東北支部連合大会講演論文集, 査読無, 2010, 314
3. 加藤 健太郎, 佐藤 文博, 松木 英敏, 他, 直接給電 FES 用体外給電・通信コイルの制作 J. Magn. Soc. Jpn, 査読有, vol. 34, 2010, 161-164

4. 宮森 潤, 佐藤 文博, 松木 英敏, 他,  
Examination of Phase Excitation  
in a Desktop CLPS, J. Magn. Soc. Jpn,  
査読有, vol. 33, 2009, 110-113

[学会発表] (計6件)

1. 太田 佑貴, 佐藤 文博, 松木 英敏, 他,  
民生機器向け電磁誘導型非接触電力伝送に関する研究, 平成22年度電気関係学会東北支部連合大会, 平成22年8月27日, 八戸工業大学
2. 吉藤 寿高, 佐藤 文博, 松木 英敏, 他,  
磁界共鳴型非接触電力伝送におけるアンテナ間ギャップと効率に関する基本的な検討, 平成22年度電気関係学会東北支部連合大会, 平成22年8月27日, 八戸工業大学
3. 吉藤 寿高, 佐藤 文博, 松木 英敏, 他,  
磁界共鳴型非接触電力伝送システムのコイル形状に関する検討, 平成22年電気学会全国大会, 平成22年3月19日, 明治大学
4. 吉藤 寿高, 佐藤 文博, 松木 英敏, 他,  
非接触共鳴式給電に関する研究, 平成21年度電気関係学会東北支部連合大会, 平成21年8月21日, 東北文化学園大学
5. 中嶋 紀之, 佐藤 文博, 松木 英敏, 他,  
第32回日本磁気学会学術講演会, 移動体用非接触給電システムの要素構成に関する実験的検討, 平成20年9月12日, 東北学院大学
6. 中嶋 紀之, 佐藤 文博, 松木 英敏, 他,  
移動体適用を目標とする非接触給電システムの最適設計に関する基礎的検討, 平成20年度電気関係学会東北支部連合大会, 平成20年8月21日, 日本大学

[図書] (計1件)

1. 松木 英敏, シーエムシー出版, 「非接触電力伝送技術の最前線」, 2009, 監修, 1-9

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

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

松木 英敏 (MATSUKI HIDETOSHI)

東北大学・大学院医工学研究科・教授

研究者番号: 70134020

(2)研究分担者

佐藤 文博 (SATO FUMIHIRO)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 60323060

(3)連携研究者

( )

研究者番号: