

海流エネルギーを利用した水中浮遊式 発電システム

Development of Floating Type Current Turbine System Using Ocean Current Energy

加幡 安雄 久保 幸一 上田 隆司

■ KABATA Yasuo ■ KUBO Koichi ■ UEDA Takashi

わが国沿岸付近に年間を通じて流れる黒潮などの巨大な海流エネルギーを利用することにより、クリーンな安定電源を新たに構築できると期待されている。

東芝は、発電装置を海底に係留し海中に浮遊させる発電システムの開発に取り組んでいる。このシステムは、双発のタービンと大水深域の海域にも対応できるように単純な係留システムで構成され、高い設備利用率が期待できる。当社は、ゆっくりとした海流の流れに対応した高効率なタービン翼を開発し、水槽試験でその性能を確認した。また、潤滑油による環境汚染リスクを低減するため、増速ギアを用いないダイレクトドライブ方式の永久磁石発電機と、海水で潤滑する樹脂軸受の開発を進めている。

The Kuroshio is one of the ocean currents flowing near the coast of Japan throughout the year, and power generation technology using this ocean current energy is now attracting attention in Japan due to its potential as a clean and stable energy source.

Toshiba has been engaged in the research and development of a floating type current turbine system, moored on the seabed and floating on the sea. This system consists of large twin-turbines and a simple mooring for deep-sea deployment, and is expected to operate with a high level of system utilization. We have developed a high-efficiency turbine blade suitable for the slow velocity of ocean currents and have confirmed its performance through towing tank tests. In order to reduce environmental risk resulting from contamination by gearbox lubricating oil, we have also been developing both a direct-drive permanent magnet generator without a gearbox and a seawater-lubricated plastic bearing.

1 まえがき

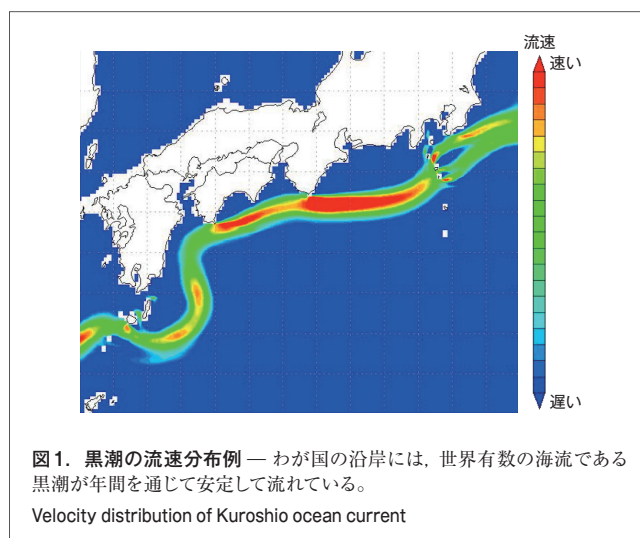
わが国は、四方を海に囲まれた海洋国家であり、図1に示すように、沿岸には世界有数の海流である黒潮が年間を通じて安定して流れている。そのエネルギー賦存量は200 GWと報告されており⁽¹⁾、この巨大なエネルギーを利用することで、クリーンな安定電源を新たに構築できると期待されている⁽²⁾。

東芝は、この海流エネルギーを有効かつ経済的に利用するために、水中浮遊方式の海流発電システムの開発に取り組んでいる。ここでは、当社が培ってきた火力及び水力発電技術を生かした海流発電システムの概要と主要な技術の開発について述べる。

2 水中浮遊式 発電システムの概要

水中浮遊式 海流発電システムの開発は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）が公募した「風力等自然エネルギー技術研究開発／海洋エネルギー技術研究開発／次世代海洋エネルギー発電技術研究開発」の委託研究として、当社、（株）IHI、国立大学法人 東京大学 新領域創成科学研究科、及び（株）三井物産戦略研究所がコンソーシアムを組んで実施している。

このシステムは、図2に示すように、双発タービンを用いた



大型発電システムを海底に係留し、海中に風（たこ）のように浮遊させて発電する方式である。この研究は、その要素技術を開発するとともに、事業性評価などを実施して将来の海流発電の実用化を目指している。

この発電方式には、次のような優れた特長がある。

- (1) 安定した大きな発電電力量が可能 昼夜や季節による流れの速さと向きの変動が少ない安定した海流エネルギーを、長期かつ連続的に利用できることで、年間を通

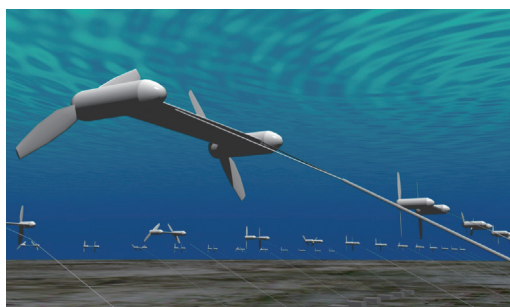


図2. 水中浮遊式 海流発電システム — 双発タービンを用いた大型発電システムを、水面から50 m 程度の中深に係留し浮遊させる。
Floating type current turbine system

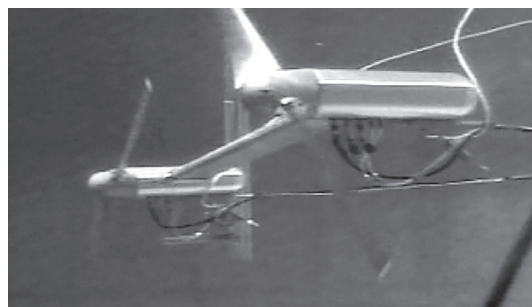


図4. 1/50スケールモデルによる水槽試験 — 双発タービンにより安定した姿勢を保持できることを確認した。
Towing tank test using 1/50th scale model

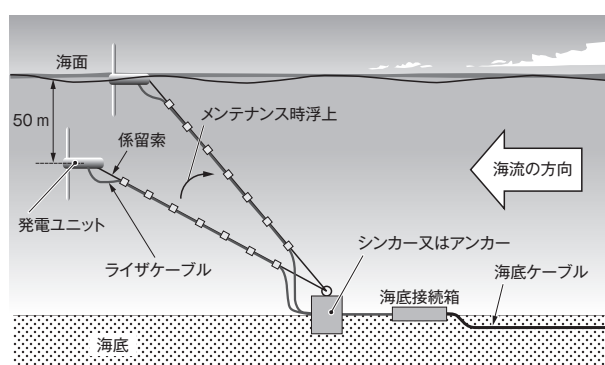


図3. 水中浮遊式 海流発電システム — 保守・整備時には、タービンの向きと浮力を調整して海上に浮上させる。
Conceptual diagram of floating type current turbine system

じて安定的な発電が可能で、ベース電源として大きな発電電力量も期待できる。

- (2) 設置が比較的容易で、安定した運用が可能 図3に示すように、発電装置を海底に係留し、水面から50 m 程度の海中に浮遊させることで、大水深域での設置にも比較的容易に対応できる。また、発電システムを全て海中に設置するため、波浪の影響を受けずに安定した運用が可能で、船舶の航行にも支障を及ぼさない。

このような特長により、この方式は設置海域の制約が少なく、多数の発電装置を設置する大規模発電ファームの展開が可能である。

- (3) 効率的な発電が可能 双発タービンを互いに逆方向に回転させてタービンの回転に伴う回転トルクを相殺することで、海中で安定した姿勢を保持し、効率的な発電が可能である。
- (4) メンテナンスや修理が容易 保守・整備時には、タービンの向きと浮力を調整することで、図3に示すように、必要に応じて海上に浮上させることができるため、メンテナンスや修理が容易である。

この発電システムは、水深200～1,000 m、離岸距離20～50 kmの海域を想定して開発を進めている。海流は、広いところでは幅が100 km以上もある。一例として、1台当たり2機のタービンを備えた発電容量2 MWの発電装置を10 km四方に600台(30(横)×20(縦)台)並べると原子力発電所約1基分の発電が可能になる。

図4は、1/50スケールのモデル⁽³⁾を用いて行った水槽試験のようすである。特別な姿勢制御機構を用いなくても、双発タービンにより安定した姿勢を保持できることを確認しており、このシステムの有効性を確認できた。

次章以降では、この発電システムを実現するために当社が開発を進めている主要な技術について述べる。

3 タービンの開発

水や空気などの流体の運動エネルギーを電気エネルギーに変換する場合、一般に大型風力発電のような水平軸揚力型タービンが用いられる。この方式のタービンは、流速の数倍の周速度で運転できるため高速回転を得ることができ、海流発電システムにおいてもこの方式を採用することにした。

水平軸揚力型タービン翼を用いて発電する場合、式(1)に示すように、発電システムの出力は、流速の3乗とタービン翼の掃過面積に比例して変化する。

$$P = (1/2) \eta \rho A V^3 \quad (1)$$

ここで、 P は発電システムの出力(W)、 A はタービン翼の掃過面積(m^2)、 ρ は流体の密度(kg/m^3)、 V は流速(m/s)、 η は発電システムの効率である。

一方、タービンの性能を示すもう一つの重要な指標として、式(2)に示す周速比がある。

$$\lambda = \pi D N / V \quad (2)$$

ここで、 λ は周速比、 D はタービンの直径(m)、 N はタービン

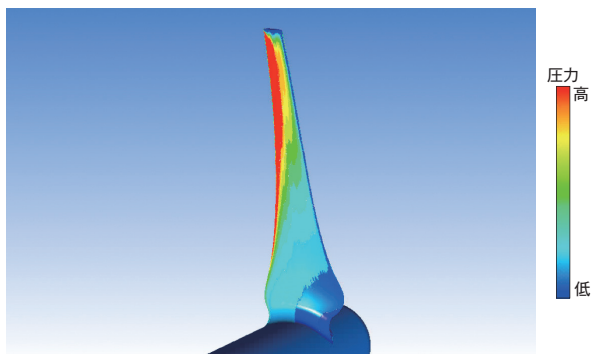


図5. タービン翼面の圧力分布の解析例 — 数値流体力学による解析技術を駆使して、遅い流速でも高回転で高出力のタービン翼の開発を進めている。

Result of simulation of pressure distribution on turbine blade surface

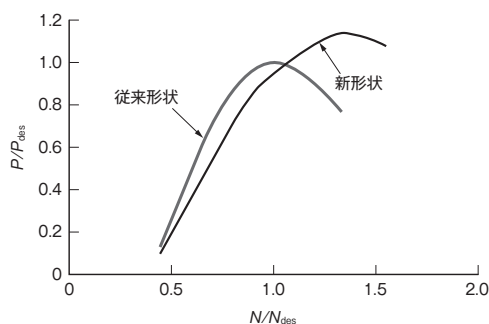


図6. タービン性能の解析結果 — 遅い流速に対応した新形状のタービン翼の開発により、同一直径の従来形状に比べて大出力で高速回転を達成した。

Results of turbine performance analysis

の回転数 (s^{-1}) である。

式(2)から明らかなように、同一の周速比で回転しているタービンは、直径が小さいほど回転数が速く、大きくなると回転数が遅くなる。したがって、高出力を得るために長大な翼を採用するとタービンの回転数が低下し、駆動軸トルクの増大や、発電機の効率の低下、発電機の直径及び重量の増大を引き起こす。

このように、海流発電システムを実用化するためには、遅い流速でも高回転で高出力のタービン翼を開発する必要がある。水力発電向けタービンで培ってきた数値流体力学による解析技術を駆使して開発を進めている。

図5は、解析の一例としてタービン翼面の圧力分布を示したものである。また、タービンの性能解析結果を図6に示した。図6の縦軸と横軸は、風力発電用タービン翼の設計手法を踏襲して設計された従来形状のタービン翼の設計出力 P_{des} 及び回転数 N_{des} で無次元化した、無次元出力と無次元回転数である。流速が低い状況を考慮した適切な形状を持つ新形状のタービン翼を採用することで、同一直径の従来形状と比べて大出力で高速回転が得られる見通しを得ている。

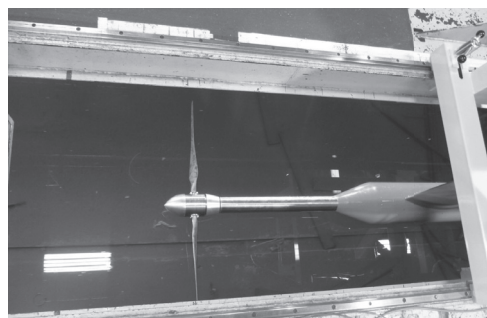


図7. タービンの性能試験 — 模型翼を用いた水槽性能試験により、直径40 mのタービン翼で1 MWの出力を達成できる見通しを得た。

Turbine undergoing performance test

数値解析により開発した翼形状は、模型翼を用いた水槽性能試験(図7)で検証を進めており、定格流速1.5 m/sにおいて、直径40 mのタービン翼で1 MWの出力を達成できる見通しを得た。

4 発電機の開発

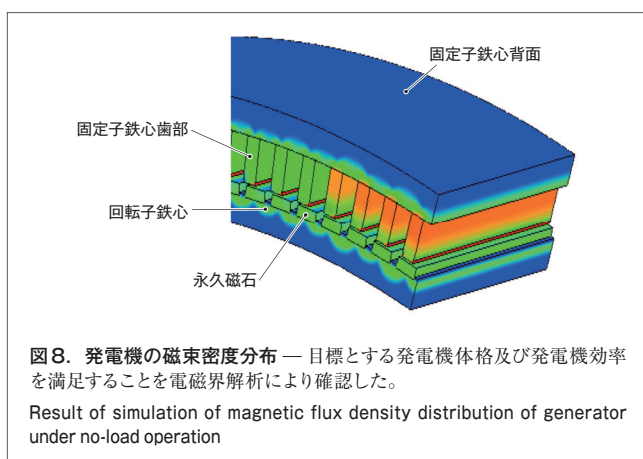
海流発電システムは、水面下約50 mの海水中に発電機を設置する構造を想定しており、定期的なメンテナンスの回数を抑制し運転コストを低減するため、長期のメンテナンスフリーが求められる。そのため、風力発電システムで用いられているタービンと発電機の間に増速ギアを入れる方式の採用は困難となる。

当社が提案する海流発電システムでは、増速ギアを用いず、タービンと発電機を直結したダイレクトドライブ方式の採用を検討しており、長期のメンテナンスフリーに加え、増速ギアで一般的に用いられる潤滑油を使用しないため、海洋汚染のリスクを低減するオイルレス化が期待できる。

しかし海流発電システムでは、発電機の定格回転数が一般的な風力発電機の約1/2と低速であるため、発電機の大口径化や重量増加につながる。また、発電機を収める圧力容器の大口径化は、製造性やコストの面から制約を受ける。

発電機を高効率化するには、電氣的損失の大半を占める、電機子で発生する銅損の低減が必要となる。しかし、電機子の巻線の断面積を増加し銅損を低減すると、固定子鉄心の磁束密度が高くなり鉄損が増加するなど、損失の低減は容易ではない。

このような課題に対し、電磁界解析により回転子の直径や鉄心長といった基本寸法と磁極数、及び電機子の巻線寸法などをパラメータとして、発電機の特性を最適化した。電磁界解析により求めた無負荷運転条件における発電機の磁束密度の分布を図8に示す。回転子を多極化することで1極当たりの磁束量を低減し、固定子鉄心の背面を通過する磁束量も低減するため鉄心外径の縮小が可能になり、発電機の小口径化を達成した。また、回転子の多極化に対応して、固定子鉄心の

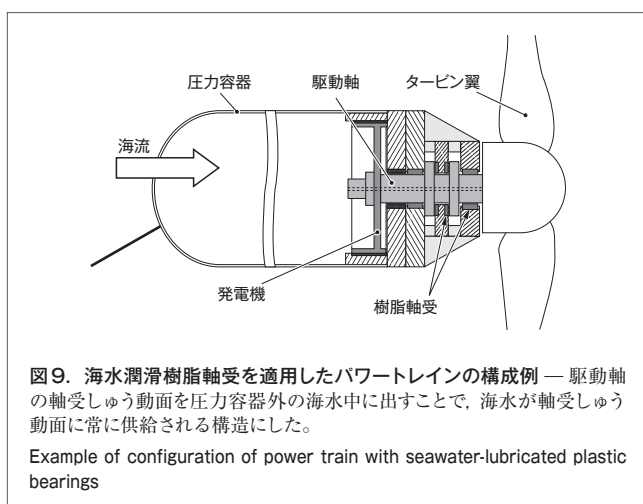


歯部1本に対して1コイルを巻回する集中巻きコイルを採用することで1コイル当たりの巻線断面積を増加し、電機子銅損を低減して高効率化を達成した。その結果、目標とする発電機体格及び発電機効率を満足することができた。今後、製造性を含めた発電機構造の設計検討を進めるとともに、更なる小型化と高効率化を目指した設計検討を進めていく。

5 海水潤滑 樹脂軸受の開発

海流発電システムにおいては、海洋汚染のリスクを低減し、環境にやさしい発電システムを目指しており、潤滑油などの使用を最小限にとどめることが課題になる。また、この発電システムは海中に発電機を設置するため、機器の信頼性をできるかぎり向上させ、メンテナンスの周期を長くして発電コストを削減する必要がある。特に潤滑油の使用は定期的な点検を伴うため、メンテナンスの周期を長期化することは困難となる。

この発電システムでは、水力発電で実績のある水潤滑樹脂軸受⁽⁴⁾を海水に応用することを検討している。図9は、海水潤滑樹脂軸受を適用したこの発電システムのパワートレインの構



成例である。駆動軸の軸受しゅう動面を圧力容器外の海水中に設置することで、常に海水が軸受しゅう動面に供給される構造になっている。

従来の水力発電システム用と比較して、海流発電システム用の軸受は軸受面の周速が著しく遅く、粘度の低い海水で潤滑するためには、摩擦係数の小さい樹脂材の開発が不可欠である。そこで、当社が現在水力発電に適用している水潤滑樹脂材料と比べて摩擦係数を半減した樹脂材料を開発した。今後、実負荷条件での軸受特性などを検証していく。

6 あとがき

水中浮遊式 海流発電システムは、海底から風のように発電装置を浮遊させて発電する、海流の流れる大水深域での発電に適した方式である。安定しているが、ゆっくりとした流れである海流エネルギーを回収するために、高効率のタービン翼とそれに直結したダイレクトドライブ発電機の開発を進めている。また、環境負荷を低減するためオイルフリー化を指向し、海水で潤滑する樹脂軸受を開発している。

今後、2015年までに発電システムに必要な要素技術の開発を行った後、実証機による発電試験を目指しており、高効率で低コスト、かつ環境にも優しい水中浮遊式 海流発電システムの早期実現を目標に開発を進めていく。

文 献

- (1) 新エネルギー・産業技術総合開発機構. 海洋エネルギーポテンシャルの把握に係る業務 平成22年度成果報告書. 2011, p.74.
- (2) 新エネルギー・産業技術総合開発機構. “NEDO再生可能エネルギー技術白書 - 新たなエネルギー社会の実現に向けて-”. 2010-07, p.476-488. <<http://www.nedo.go.jp/content/100116325.pdf>>, (参照2013-05-17).
- (3) Takagi, K. et al. "Development of a Floating Current Turbine". OCEANS MTS/IEEE 2012 HAMPTON ROADS. Virginia, USA, 2012-10.
- (4) タン トロン ロン 他. 水力発電用水車の水潤滑樹脂軸受. 東芝レビュー. 67, 4, 2012, p.48-51.



加幡 安雄 KABATA Yasuo, D.Eng.

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 回転機器開発部主幹, 博士(工学)。回転電機の通風冷却技術の開発に従事。日本機械学会, 電気学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center



久保 幸一 KUBO Koichi, D.Eng.

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 回転機器開発部, 博士(工学)。水車技術の開発に従事。日本機械学会, ターボ機械協会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center



上田 隆司 UEDA Takashi

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 回転機器開発部。回転電機の電磁気技術の開発に従事。電気学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center