

日本の排他的経済水域における海流・潮流エネルギーの 直線翼垂直軸型水流タービンによる回収

鳥井正志*¹・関田欣治*²・関 和市*³

Recovery of Sea and Tidal Current Energy in Japan's Exclusive
Economic Zone using Straight-Wing Vertical-Axis Hydro Turbine

Tadashi TORII, Kinji SEKITA and Kazuichi SEKI

Abstract

Even the sea and tidal current are widely distributed whole through the ocean, the density of their energy are relatively low same as the wind one. However, the flow of the sea current is steady, the flow of the tidal current is cyclic and the density of energy increases in the water where the fluid concentrated. Since the reduction of the global warming gas and the switching of energy resource from the fossil fuel to renewable energy are the common issue of the human beings at present, this paper focused to realize the recovery of the sea and tidal current energy as a utilization of the renewable energy in the Japan's Exclusive Economic Zone (EEZ). The first, the quantity of current energy passing through the Japan's EEZ is shown. Then, the Straight-Wing Vertical-Axis Turbine (SWVAT), which has a lot of truck record as wind turbine, is adopted as the hydro turbine to recover the energy from the current, and its applicability to the water flow with wave as a natural sea condition is studied. Finally, the recoverable amount of the current energy by using the SWVAT is calculated.

Keywords: Exclusive Economic Zone, Ocean current, Tidal current, Hydro turbine, Renewable energy

1. はじめに

海流・潮流に代表される海洋における水流の持つエネルギーは、地球全海域に広く賦存しているが、風と同様に平均的エネルギー密度が低い。しかし、空気に比べて密度が約800倍あり、海流のように恒常性や、潮流のように規則性が高く、海域によっては高いエネルギー密度を持つ。地球温暖化ガスの排出削減と、枯渇の道をたどる化石燃料からのエネルギー源の転換は、現在人類共通の課題である。わが国においても海洋基本法が施行され、海洋環境の保全を図りつつ排他的経済水域 (EEZ) の持続的な開発と利用を図ることが望まれる。海流・潮流エネルギーは、海洋の再生可能エネルギーのひとつとして期待されているもの

のその利用度合いは極めて低いため、課題を克服してその利用を推進する必要がある。

2. 研究目的

本研究は、日本の排他的経済水域 (EEZ) 内の海洋資源の利活用として、海流・潮流エネルギーの回収の実用化を目的とする。そこで、まず日本の EEZ 内の海流・潮流エネルギー賦存量を明らかにする。水流エネルギーの変換装置を選択し、海洋環境である水流や波浪中で使用するための課題を解決して適用可能性について検討する。最後に、この水流タービンを用いて EEZ から回収可能なエネルギー量を試算し、その有意性を明らかにする。

2008年1月17日受理

*1 新日鉄エンジニアリング(株) 海洋・エネルギー事業部 海外プロジェクト部 (Project Planning & Operation Dept. Energy Facilities, Civil Engineering & Marine Construction Division, Nippon Steel Engineering Co., LTD.)

*2 東海大学海洋学部海洋建設工学科 (Department of Marine Civil Engineering, School of Marine Science and Technology, Tokai University)

*3 日本風力エネルギー協会 会長(元東海大学教授) (Japan Wind Energy Association)

3. 日本の排他的経済水域における海流・潮流エネルギーの賦存量

日本の EEZ 内を流れる海流・潮流のエネルギー賦存量を把握するため、観測データ等を基に流向、流速、頻度分布を調査し、エネルギー量を算定する。

(1) 海流エネルギーの賦存量 (鳥井正志他, 2006)

日本近海の外洋域を緯度・経度 1 度メッシュに分割し、

日本海洋データセンター (JDOC) が提供する1992年から2002年までの過去の海流観測データの表層 20m 以浅の流向・流速分布を整理し、エネルギー密度を算出した。つぎに、黒潮等の海流が通過する代表断面を設定し、通過するエネルギー量を定量的に算出した。Fig. 1 にエネルギー密度の分布と設定した通過断面を示す。

Table 1 に通過エネルギー量の算定結果を示す。海表面 (表層 20m 厚) を通過エネルギーは年間総計約 7.1×10^{10} kWh あり、これは日本の一次エネルギー国内供給量 (2005年度) (経済産業省, 2007) の約 1.1% に相当する。

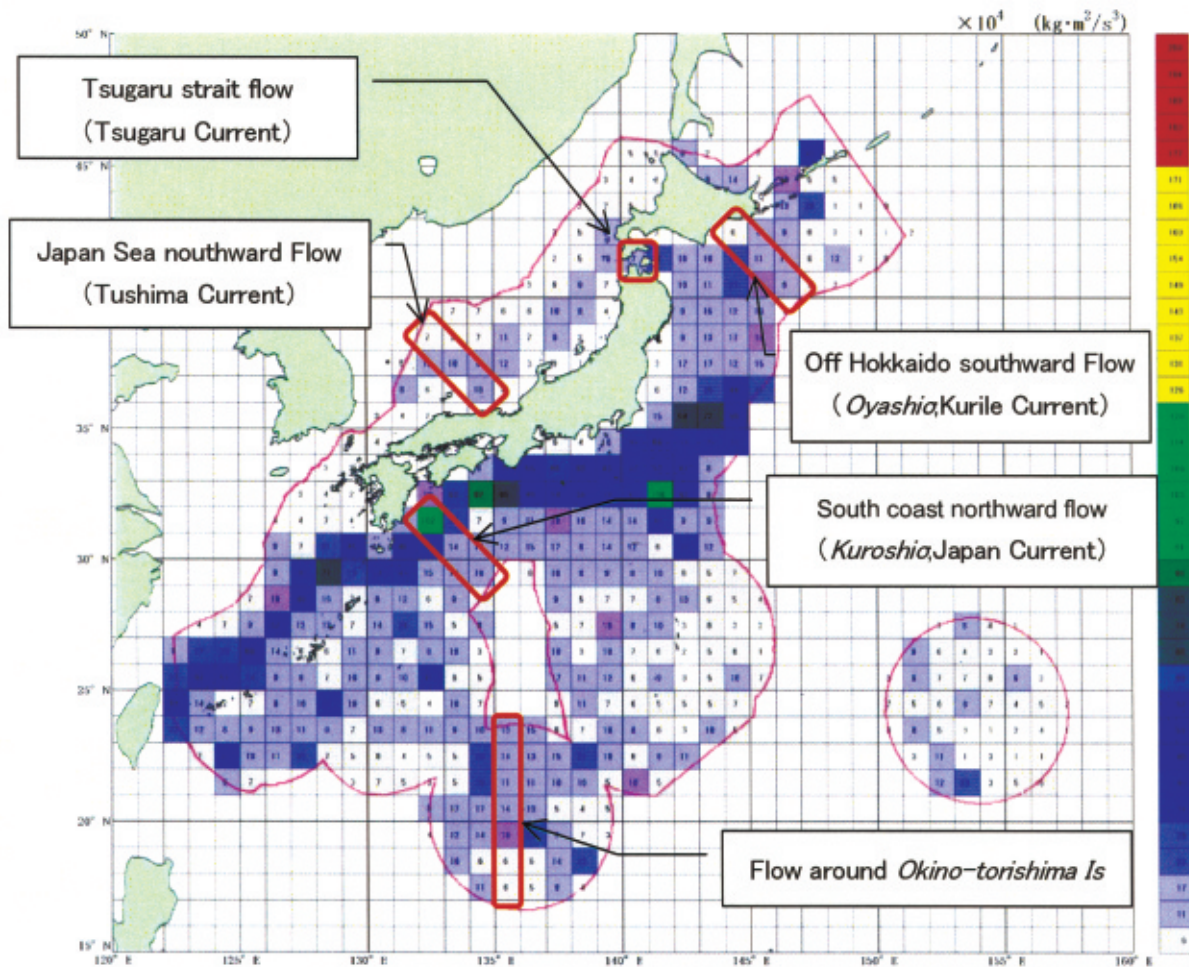


Fig. 1 Ocean current energy density passing through Japan's EEZ and the cross section set for passing energy calculation

Table 1 Ocean current energy passing through Japan's EEZ (surface with 20m thick)

Sea area	Major current	Passing energy amount $\times 10^9$ kWh/year
① South coast (Pacific ocean)	<i>Kuroshio</i> , Japan Current	26.1
② Japan sea	Tushima Current	13.0
③ Off Hokkaido	<i>Oyashio</i> , Kurile Current	06.9
④ Around Okino-torishima Is.		17.1
⑤ Tsugaru Strait	Tsugaru Current	08.2
Total		71.3

さらに、海流の深度分布を考慮することで、EEZ内を通過するエネルギー量が算出可能である。

(2) 潮流エネルギーの賦存量 (鳥井正志他, 2006)

瀬戸内海等を内海域と設定し、外洋との境界での流向・流速分布を海洋情報研究センターが提供する2006年の潮見表データから整理し、境界断面を通過する水流エネルギー量を定量的に算出した。Fig. 2 に設定した境界位置を示す。

Table 2 に計算結果を示す。通過エネルギーは年間総計約 2.7×10^{10} kWh であり、これは日本の一次エネルギー国内供給量 (2005年度) の約 0.4% に相当する。

4. 直線翼垂直軸型タービンの海流・潮流発電への応用

海流・潮流エネルギーの回収方法として、水流タービンによるエネルギー変換を検討した。タービンには、風力発

電に実績があり無指向性と簡素な機構・構造により高耐久性と経済性が期待できる直線翼垂直軸型タービンを選定した。このタービンを水流に応用するため、まず水流中の性能計算理論を検討し、タービンの水流中水理模型実験と比較・検証した。水理模型実験の供試体は、翼型 NACA0018、翼弦長 8 cm、翼長 40cm の二次元翼を回転軸周りに 120度ピッチ、直径 40cm で 3 枚配置した直線翼垂直軸型水流タービンである。試験水槽は幅 50cm、水深 50cm、長さ 20 m の曳航兼造波水路である。なお、タービンへ作用させる水流は、タービンを台車に固定して水路内を曳航させることで相対流速を与えた。

(1) 水流中タービンの性能計算理論 (鳥井正志他, 2005)

風車の性能解析理論である単一流管理論、多流管理論 (関和市他, 1984, 1990) (Ion Paraschivoiu, 2002) の水流タービンへの適用性を調べるため、流体として水 (海水) の特性値を用いて数値解析を行い、計算結果を水理模型実験と比較・検証した。

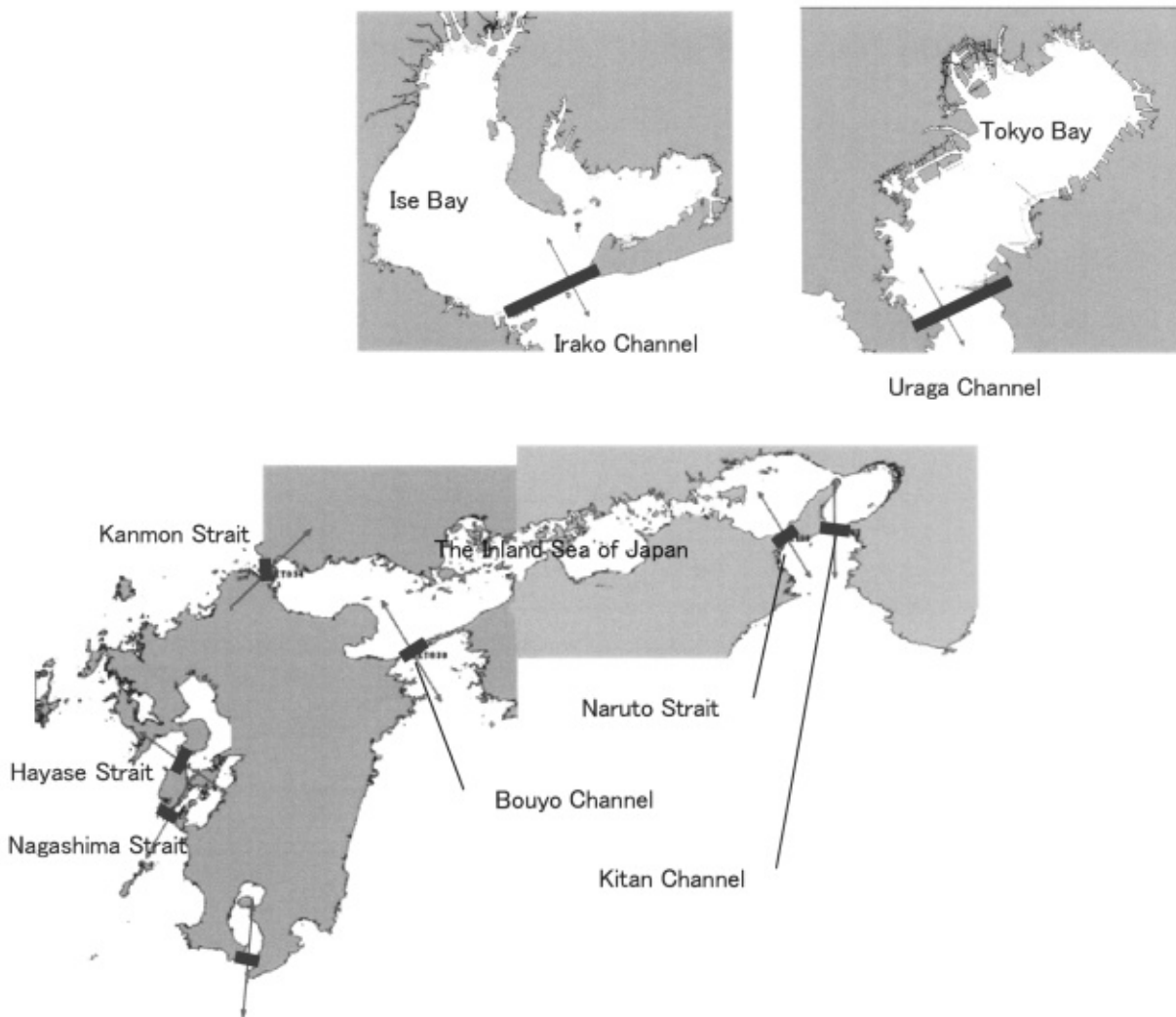


Fig. 2 The border line between inland sea and open sea, and the predominant direction of current

Table 2 Annual tidal current energy passing through border

Area	Border	Annual passing energy ×10 ⁹ kWh/year
Tokyo Bay	Uraga Channel	0.0
Ise Bay	Irako Channel	0.2
Osaka Bay ~ Inland Sea of Japan	Kitan Channel	1.1
	Naruto Strait	6.1
	Bouyo Channel	12.9
	Kanmon Strait	1.9
Ariake Sea ~ Yatsusiro Sea	Hayasaki Strait	4.2
	Nagashima Strait	0.4
Kagoshima Bay	Kagoshima Bay mouth	0.0
Total		26.8

実験では流速約 20cm/s (始動流速) から水流タービンが回転した。曳航開始後水流タービンが回転を始め、回転数および作用力 (曳航力) に若干の変動を伴いながら、ほぼ一定の回転数で回転した。Fig. 3 に流速 (曳航速度) 34 cm/s 中における水流タービン回転応答の時刻歴の一例を示す。Fig. 4 は、水流タービンに作用させた流速と水流タービンの応答回転速度を比較したものである。実験の平均回転応答値は数値解析値と良く一致している。Fig. 5 はタービンに作用した外力 (曳航力) の平均値、最大値および最小値を示す。計算値は単一流管理論により求めたものである。計算による変動値はタービンのブレードに作用する揚力と抗力の合力を軸の周りに 1 回転させた場合に生じる変動値を示す。比較の結果、実験値がやや大きい値を示すが、平均値および変動幅は相当の値を示している。

また、タービンの平均抗力は、水車を水流中の固定円筒と見なし算定した抗力値にほぼ一致している。以上から、水流タービンの性能計算には、風車の性能計算で用いられる単一流管理論や多流管理論を応用して計算することが可能であると考えられる。

(2) 波浪・水流共存場における水流タービンの性能 (鳥井正志他, 2006)

つぎに、海洋環境の特徴である波浪場中におけるタービンの挙動について検討する。波浪中の水の流れを波により生じる水粒子の運動として捉え、水流と波浪の共存場においては、定常流と波による水粒子運動とを合成した振動流場として扱った。この流場中の直線翼垂直軸型タービンの回転応答と作用外力の計算理論を検討し、曳航兼造波水路を用いた水理模型実験結果と比較・検証した。

水流・波浪共存場における水粒子の速度を、波による水粒子運動に微小振幅波理論 (日本土木学会, 1985) (小山健夫他, 1997) を用い、これと一定速度の水流流速を合成して表現した。水粒子運動は波周期、波高、波長および水深を変数として表され、粒子運動の振幅は水面で最大となり、水深に伴い減少する。また、作用外力はモリソン波力式 (日本土木学会, 1985) (小山健夫他, 1997) を応用し、水中の物体に作用する抗力と慣性力の合計として表されるものとした。

水理模型実験は曳航兼造波水路を用い、曳航速度 (43

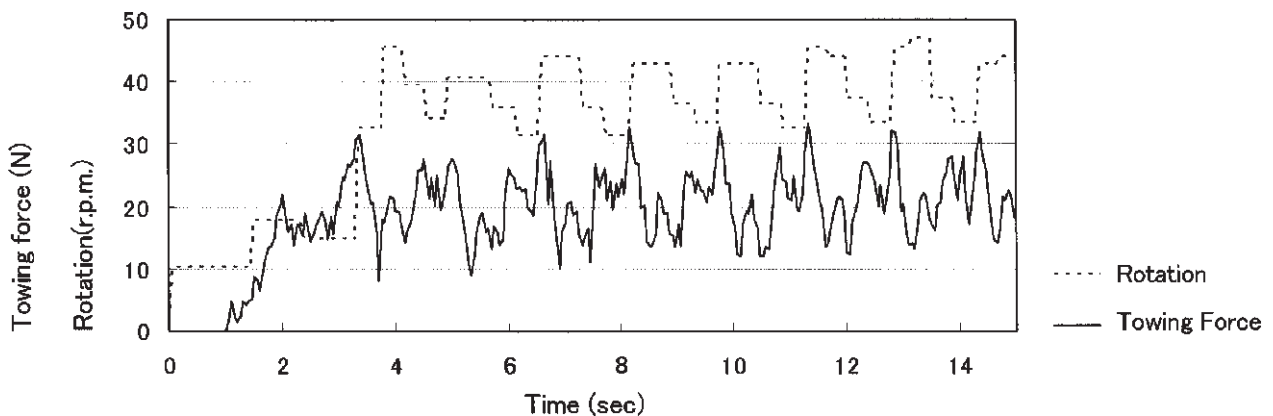


Fig. 3 Time history of the rotation and the load on the hydro turbine (towing force) ($V=34\text{cm/sec}$)

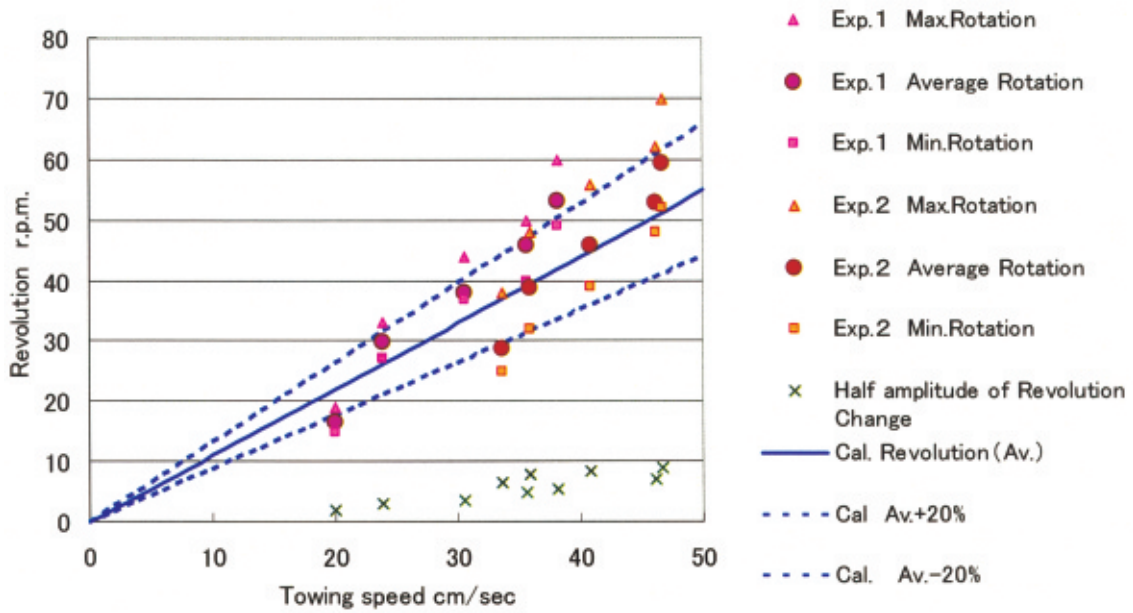


Fig. 4 Relation between current speed (towing speed) and turbine rotation

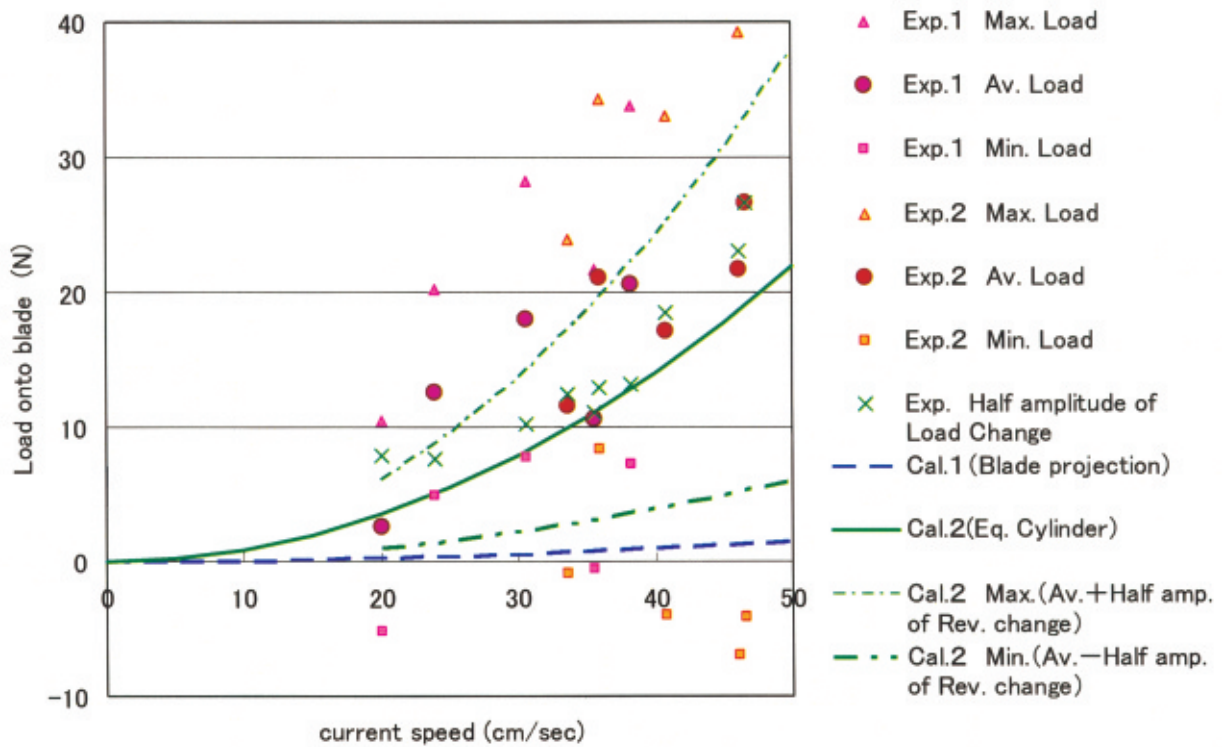


Fig. 5 Relation between current speed (towing speed) and load (towing force)

cm/s) および波高 (10cm) を一定とし、波周期を変化させて波浪中で水流タービンを曳航した。Fig. 6 は、横軸を波周期として、応答回転数の平均値、最大値および最小値を示したものである。計算値は平均流速および始動流速 (20cm/s) 以上の各流速に対する水流タービンの回転応答計算値を中心部に示している。また上下にはタービンの上端、中央、下端水深における波による水粒子速度 (水粒子速度の最大および最小値) を加算した水粒子速度に対する水流タービンの回転応答計算値を示す。タービンは、定常流速に対する回転数をほぼその平均値とし、波による水粒子速度に対応する回転数以内で周期的に変動している。

Fig. 7 は、同実験における作用外力 (曳航力) を、横軸を波周期として示したものである。実験の平均値は平均流速に対するタービンの抗力計算値と良く一致している。つぎに、変動幅を示す最大値および最小値については、[計算 2] が良い一致を示している。回転するブレードにより生じる抗力と揚力の合力の変動に加え、振動する水粒子による水流タービンへの慣性力を、水流タービンを構成するブレードをそれぞれ分散した矩形平板とみなして計算したものである。一方 [計算 1] は、水流タービンをその直径に等しい円筒とみなして作用する慣性力を計算したものであり、過大な計算となっている。

以上により、波による水粒子運動速度に微小振幅波理論を用いて振動流流速を設定し、単一流管理論等による回転

応答計算理論を応用して解析可能であると言える。

また、水流・波浪共存場における水流タービンへの作用外力は、定常流速による抗力を平均値とし、周期的に変動する。その成分はタービンの回転によるものが大きく、次に波力である。作用外力は、定常流と波の水粒子運動速度を合成した振動流流速に対し、モリソン波力理論および単一流管理論等を応用し、下記の合計として解析可能である。

- ①タービンを円筒とみなし、そこに作用する抗力 または、単一流管理論の抗力の平均値
- ②ブレードを矩形板とみなし、そこに作用する慣性力 (波による水粒子の加速度による慣性力)
- ③タービンの回転により生じる翼の揚力と抗力の合力の変動

5. 直線翼垂直軸型水流発電の実海域実証

海洋環境下で直線翼垂直軸型水流タービンを用いた発電装置の有効性を確認するため、海流や潮流、波浪が共存する実海域に水流発電装置のプロトタイプを設置し、フィールドテストを実施した。実験は、兵庫県淡路島の南淡町 (現、南あわじ市) にある浮体式海上公園を用い、浮体基盤から潮流のある海中に直線翼垂直軸型水流タービンを懸架し、タービンの回転動力を軸とプーリーおよびベルトを

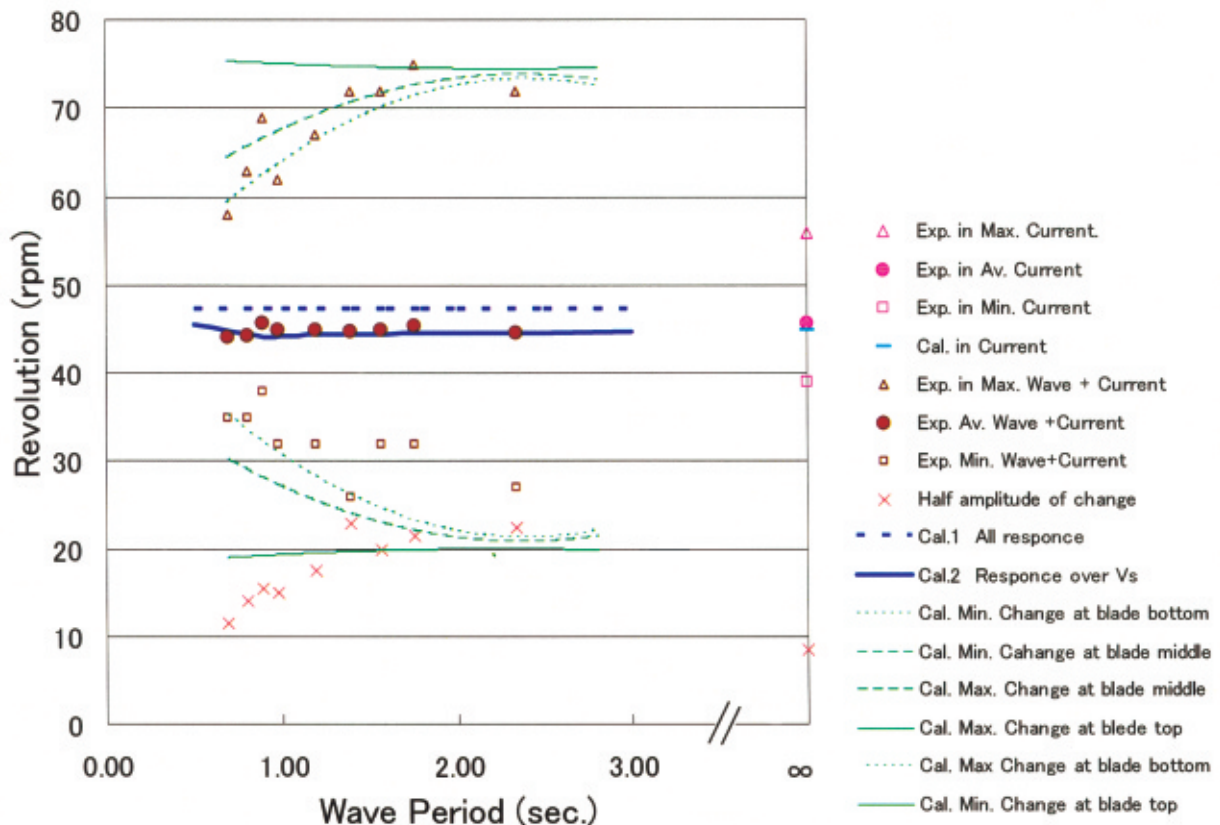


Fig. 6 Rotation of hydro-turbine in the field of wave and current

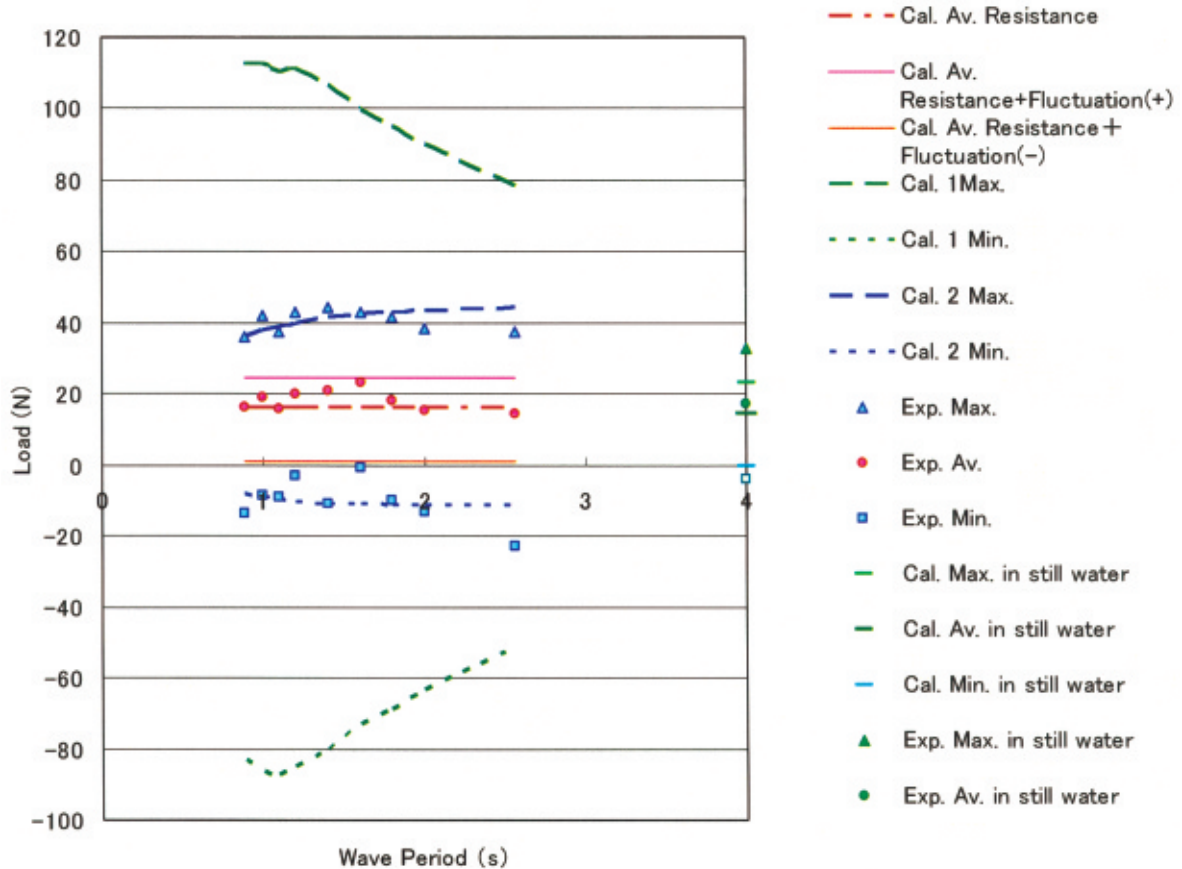


Fig. 7 Load onto hydro-turbine during towing experiment in regular wave

介して発電機を回転させた。供試体は翼型 TWT 型，翼弦長 30cm，翼長 1.0m の二次元翼を回転軸周りに 120 度ピッチ，直径 1.0m で 3 枚配置した直線翼垂直軸型水流タービンである。実験では潮流の流向，流速，およびタービンの回転数，発電機出力等を計測・解析した。Fig. 8 に実験装置と設置状況を示す。また，Fig. 9 には計算で求めた性能曲線と実験値を示す。両者は良い一致を示している。

この結果，直線翼垂直軸型水流タービンは流向に係わらず，始動流速（約 0.25m/s）以上の流速に対して回転し，発電装置から出力を得られることを確認した。また，流速と発電機の出力から求めた水流タービンのパワー係数は，単一流管理論により導いたパワー係数計算値と良く一致した。これにより，刻々と流況が変化する実海域においても，考案した直線翼垂直軸型水流タービンを用いた発電装置により，実際に発電が可能であることを実証した。（鳥井正志他，2004，2005）（Torii, T. *et al*, 2006）



Fig. 8 Panoramic view of Field test at sea

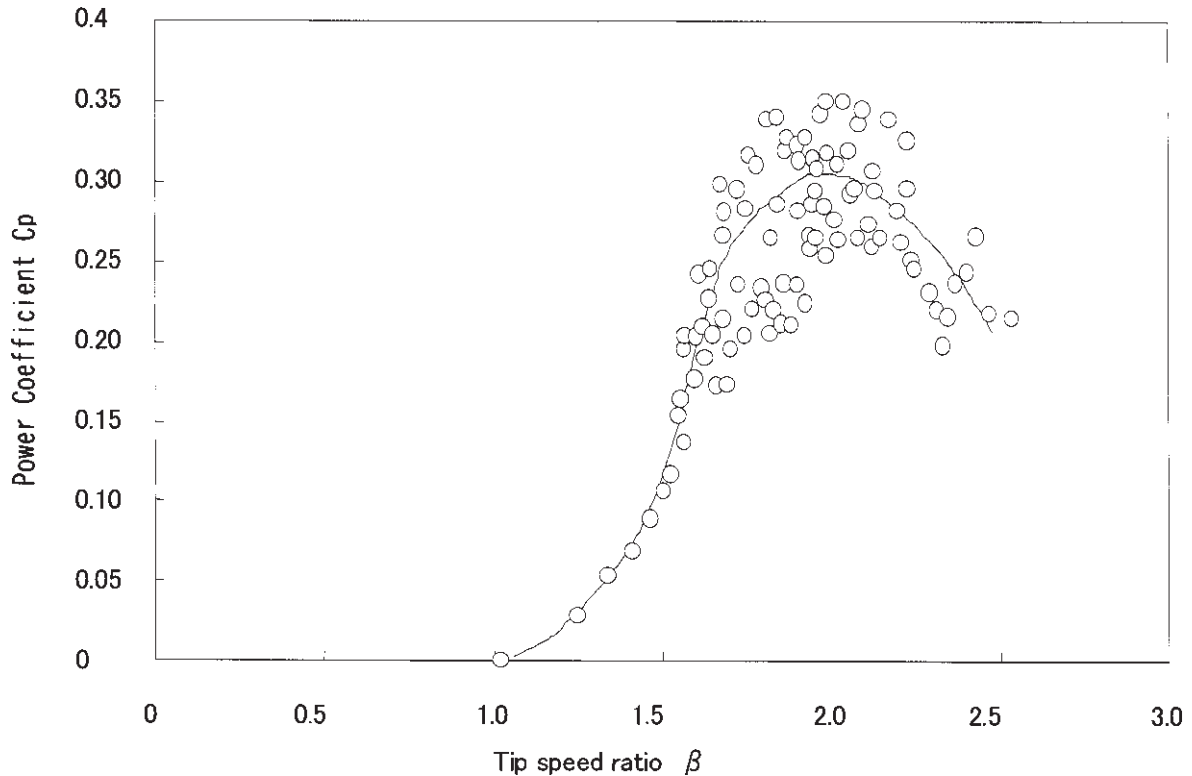


Fig. 9 Performance curve

6. 海流・潮流発電の実用化と 水流エネルギーの回収

直線翼垂直軸型水流タービンによる海流・潮流エネルギー回収の具体化として、日本の200海里排他的経済水域 (EEZ) からの海流・潮流エネルギーの回収を検討する。そこで、現実の海域を想定して、直線翼垂直軸型水流タービンを用いた海流・潮流発電の設置深度や配置等を検討し、さらに、実際の海域に設置した場合に回収可能なエネルギー量を試算する。

(1) 設置水深

一般に海流・潮流の流速の鉛直分布は、一般に深度と共に緩やかに減少するが、波浪による水粒子速度は深度が増すと共に急激に減少する。前章で述べたように、タービンへの作用荷重は波と流れの合成流速の二乗に比例するが、タービンは流れの平均流速に対応して回転し、波により変動はするが影響は小さい。このため、外洋等の大波高海域では作用荷重の影響が大きい水面近くを避け、かつ海流・潮流の流速減少の少ない浅深度の範囲に設置するのが適切である。

(2) タービンの支持構造

水中に直線翼垂直軸型水流タービンを設置し発電するには、海底に設置した固定式支持構造物や海面に位置保持し

た浮体式基盤構造等を用い、水流タービンを起立支持または懸架することで実施できる。いくつかのコンセプトを Fig. 10 に示す。

(3) 日本の EEZ からの水流エネルギーの回収 (鳥井正志, 2006) (Torii, T. *et al*, 2006)

水流発電装置を日本の排他的経済水域内に設置して回収可能な水流エネルギー量の定量的な把握を試みた。水流発電装置の設置条件は、主流向に対し隣接タービン間隔をタービン径の3倍、流れ方向のタービン間隔をタービン径の10倍、エネルギー変換率を30%、設備稼働率を90%と仮定した。

外洋において、Fig. 1 で設定した通過断面に水流発電装置を配置すれば、その鉛直断面を通過する海流エネルギーの約9%を回収可能と算出された。ここで、全 EEZ 海面に発電施設を設置すると仮定すると、理論上の回収可能海流エネルギー量は $58,100 \times 10^6 \text{kWh/年}$ と試算された。これは日本の一次エネルギー国内供給量 (2005年度) の約9.2倍、同自然エネルギーによる供給量の5,280倍に相当する。しかし、これは海面全域を対象としており、膨大な発電装置基数となる。そこで、より現実的な設置条件として、外洋に位置する島嶼周辺海域および海流の通過する海峡について、経緯度各1度メッシュあたり $1/1000$ の面積 (島嶼、陸地のある海域毎に約 10km^2) を設定すると、回収可能な海流エネルギー量は $351 \times 10^6 \text{kWh/年}$ と試算された。これは、日本の一次エネルギー国内供給量の約5.6

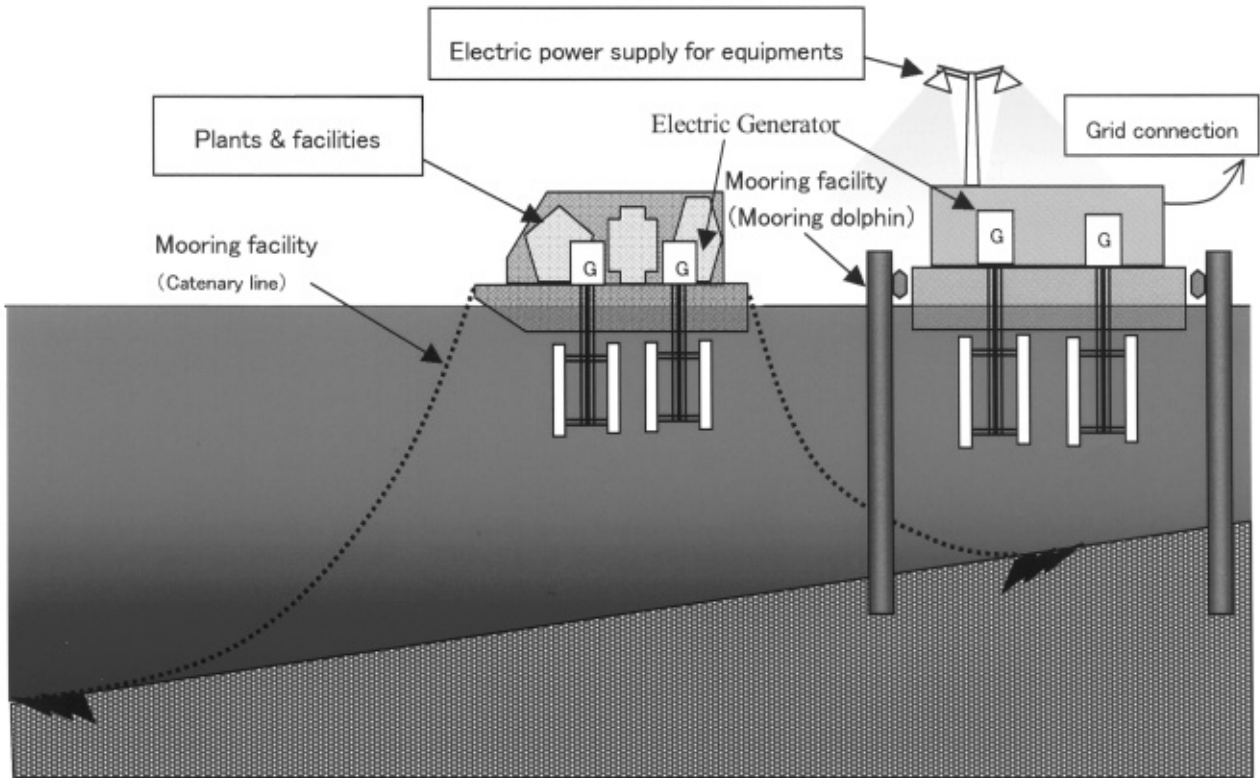


Fig. 10 The conceptual drawing of hydro turbine generation system with floating support structures

Table 3 Current energy and recoverable amount passing through Japan's EEZ

			Energy amount passing through cross section*1	Recoverable amount	
				Total area	Realistic area
Open sea	Energy amount	×10 ⁹ kWh/year	71.3	58,100	351
	Ration to preliminary energy supply*3	%	1.1	919	5.6
	Ration to renewable energy*4	times	6.5	5,282	32
Inland sea	Energy amount	×10 ⁹ kWh/year	26.8	(124)*2	25
	Ration to preliminary energy supply*3	%	0.4	(2.0)*2	0.4
	Ration to renewable energy*4	times	2.4	(11.3)*2	2.3
total	Energy amount	×10 ⁹ kWh/year	98.1	58,224	376
	Ration to preliminary energy supply*3	%	1.6	921	5.9
	Ration to renewable energy*4	times	8.9	5,293	34.2
Note	*1: for the elevation of surface with 20m thick *2: Assuming tidal current generation facilities can be installed in all area across strait *3: Annual preliminary energy supply in Japan 6,320×10 ⁹ kWh/year (2005financial year) *4: Supply amount by renewable energy in*3 11×10 ⁹ kWh/year (2005 financial year)				

%, 同自然エネルギーによる供給量の32倍に相当する。

つぎに、内海における潮流エネルギーについては、Fig. 2に示す内海の各境界線上に発電施設を一行に配置したとすれば、海峡を通過する潮流エネルギーの8%程度を回収可能であると試算された。しかし、内海では海域に海上交通や漁業区域があるため、発電施設の設置に一定の制限が予測される。このため、日本沿岸で流速の大きい海峡や瀬戸等に対して、水路幅の20%が利用可能と仮定し、さらに流れ方向の配置は地理的な条件を考慮して個別に2.5 kmから10 kmの範囲で海域設定して試算したところ、回収可能な潮流エネルギー量は 25×10^9 kWh/年と試算された。これは、日本の一次エネルギー国内供給量の0.4%、同自然エネルギーによる供給量の2.3倍に相当する。

以上、日本の排他的経済水域内を通過する海流、潮流、および同水域から回収可能なエネルギー量の総括をTable 3に示す。

7. 結 論

日本の排他的経済水域 EEZ 内に賦存する海流・潮流エネルギー量について、流況データに基づき試算した。この結果、日本の一次エネルギー供給量を遙かに越える海流・潮流エネルギーが EEZ を通過していることが判明した。

この水流エネルギーについて、直線翼垂直軸型水流タービンによる回収を検討した。タービンの水流中における性能計算理論に、風車の性能計算理論が応用可能であることを明らかにした。さらに、波浪が共存する流れ場では、波による水粒子の運動に微小振幅波理論を、また、作用波力の計算にはモリソン式を応用可能なことを明らかにした。

そのうえで、日本の EEZ を通過する海流について現実的な水流発電装置の配置を仮定し、さらに内海の潮流についても現実的な海域占有を仮定して試算した結果、日本の一次エネルギー供給量の6%程度に匹敵するエネルギー回収が可能であると試算された。

要 旨

海流・潮流は、地球全海域に広く賦存しているが、その平均的エネルギー密度は風と同様に低い。しかし、海流は恒常性が高く、潮流は規則性があり、また流れの集中する海域では高いエネルギー密度を持つ。地球温暖化ガスの排出削減と、化石燃料からのエネルギー源の転換は、現在人類共通の課題である。このため、日本の排他的経済水域 (EEZ) 内の海洋資源の利活用として、海流・潮流エネルギーの回収の実用化を図る。本研究は、まず日本の EEZ 内の海流・潮流エネルギー賦存量を明らかにする。つぎに、水流エネルギーの変換装置として直線翼垂直軸型タービンを選択し、海洋環境である水流や波浪中で使用するための課題を解決して適用可能性について検討する。そのうえで、この水流タービンを用いて EEZ から回収可能なエネルギー量を試算する。

参考文献

- Ion Paraschivoiu (2002): Wind Turbine Design with Emphasis on Darrieus Concept, POLYTECHNIC
- 経済産業省 資源エネルギー庁 (2007): 平成17年度 (2005年度) エネルギー供給実績 (確報) 概要。
- 小山健夫, 藤野正隆, 前田久明, 元良誠三監修 (1997): 船体と海洋構造物の運動学, 成山堂書店。
- 日本土木学会 (1985), 水理公式集。
- 関 和市, 大谷 勇 (1990): 直線翼垂直軸風車の性能, 太陽エネルギー, 日本太陽エネルギー学会, Vol. 16, No.3, 31-38.
- 関 和市, 他 (1984): 直線翼垂直軸風車の性能に関する研究, 東海大学産業学科研究所研究報告, 15号, 1-7.
- 鳥井正志, 大久保 寛, 山根 信, 相良啓太, 関 和市 (2004): 直線翼垂直軸型潮流発電システムの応用, 太陽/風力エネルギー講演論文集2004, 73-76.
- 鳥井正志, 大久保 寛, 山根 信, 相良啓太, 関 和市 (2004): 直線翼垂直軸型風力発電システムの応用, 第26回風力エネルギーシンポジウム。
- 鳥井正志, 山根 信, 大久保 寛, 関 和市, 関田欣治, 相良啓太 (2005): 直線翼垂直軸型水流発電システムの検討, 土木学会, 海洋開発論文集, 第21巻, 559-562.
- 鳥井正志, 大久保 寛, 山根 信, 関 和市, 関田欣治, 相良啓太 (2005): 直線翼垂直軸型タービンの海洋への適用検討, 太陽/風力エネルギー講演論文集2005, 439-442.
- 鳥井正志, 大久保 寛, 山根 信, 関田欣治, 関 和市 (2006): 海洋における水流エネルギーの賦存とその回収の検討, 第31回土木学会海洋開発論文集, 第22巻, 835-839.
- 鳥井正志, 大久保 寛, 山根 信, 関 和市, 関田欣治, 相良啓太 (2006): 直線翼垂直軸型水流タービンの海洋環境下への適用検討, 第31回土木学会海洋開発論文集, 第22巻, 841-844.
- Torii, T., Ookubo, H., Yamane, M., Sagara, K., Seki, K. and Sekita, K. (2006): A Study of Straight-Wing Vertical-Axis Hydro Turbine Generation System in the Ocean Environment, Proceedings of International Conference and Exhibition of Renewable Energy 2006, 1462-1465.