

潮流エネルギーの推定に関する考察

SOME CONSIDERATIONS ON ESTIMATION OF TIDAL CURRENT ENERGY

経塚 雄 策
Yusaku KYOZUKA

正会員 工博 九州大学教授 大学院総合理工学研究院 (〒816-8580 春日市春日公園6-1)

Some considerations regarding the estimation of tidal current energy are discussed in this report. Since tidal current is driven by the tidal force governed by the planetary motions between the Earth, the Moon and the Sun etc., the tidal current is estimated by the summation of the tidal constituent components. Tidal power estimated by the four major constituents which were obtained from the current data measured at the pier of Ikitsuki Bridge in Nagasaki Prefecture, is compared with the result by direct calculation of the same data. Next, the effect of turbulent component of the tidal current on the tidal power is considered. Since the tidal power is proportional to the cubic of the tidal velocity, the tidal turbulence increases the tidal power at some amount. The turbulence of the tidal current was measured by the acoustic Doppler velocity meter with the sampling frequency of 32 Hz at the same bridge pier in a day during spring tide. Finally, a numerical model of high precision is emphasized to select a suitable site for the tidal current power generation.

Key Words : *Tidal current power, tidal current constituents, ocean turbulence, tidal current measurement, ADCP measurement*

1. はじめに

潮流・海流発電は、海水の運動エネルギーを利用するものである。海流は、黒潮に代表されるように大洋の大循環流れであり、力学的には風による風成循環流がコリオリ力の緯度による違いから生じるベータ効果によって大洋の西岸に生ずる強流のことである。その特徴は、幅約100km、水深数100mと大規模であり、ほぼ定常流とみなせるが、流路は時々蛇行する。一般には、強流域は、大水深で陸域から数キロ以上離れていることが特徴である。

一方、潮流については、潮汐力によって駆動されるので、干満に従って流れが周期的に変動する。また、潮流の速さについては地形の影響が大きく、瀬戸や海峡などでは一般に流速が速い。例えば、最大流速が10ノット(5m/s)と我が国で最も速い潮流で知られる鳴門海峡については、淡路島の東側と西側における潮位差自体は最大でも1m程度にすぎないが、大潮時には鳴門海峡をはさんで潮位が逆位相となり、速い流れが出現する。潮流の変動は規則正しく起こるので長期にわたって予測可能であり、信頼性の高いエネルギー源とみなすことができる。

海流・潮流については、以上の特徴を踏まえて最適な場所と発電システムを考えていくことが必要である。ただし、現在までのところ海流・潮流の観測データは限られており時空間的な変動に関する情報

はほとんどないに等しい。特に、潮流については地形の影響が大きいため今後、適地の選定のためにも信頼性の高いデータベースの構築も急務であると思われる。

本報では、我々が実施中の長崎県平戸市の生月大橋の橋脚を利用した潮流発電の実海域実験に関して計測した潮流データを基に、潮流パワーの推定について考察を行った。潮流パワーを潮流調和定数から求める場合の精度や潮流の乱れが潮流パワーにおよぼす影響について考察を行った結果について報告する。

2. 潮流エネルギーの推定法

海流が定常流であれば、そのパワー P_{FLOW} は、よく知られているように次式によって与えられる。

$$P_{FLOW} = \frac{\rho}{2} AU^3 \quad (1)$$

ここで、 ρ は海水密度、 A は投影面積、 U は流速である。海流の総エネルギー量の推定に関しては投影面積 A および流速 U の空間分布が問題であるが、潮流発電を考える場合には発電装置のサイズ内で流速は一様と考えてよい。

ただし、流れには一般に乱れがあるので、それが流れのパワーにどのような影響を及ぼすかについて

考えてる。流速を平均流速 \bar{U} と乱れ成分 u' に分けて次式で表現する。

$$U(t) = \bar{U} + u' \quad (2)$$

式(2)の両辺を3乗し、時間平均をとれば

$$U(t)^3 = \bar{U}^3 + 3\bar{U}^2 u' + 3\bar{U} u'^2 + \bar{u}'^3 \approx \bar{U}^3 + 3\bar{U} u'^2 \quad (3)$$

となる。この結果から分かるように、流れの乱れを考慮すると流れのパワーが増大する。

次に、潮流は、流速および流向が時間とともにゆっくりと変化する。この変化は潮汐によって駆動されるので、潮汐調和定数を用いていくつかの分潮流速の和によって与えられると期待されるが、潮汐は水面変位というスカラー量であるのに対し、潮流は3次元の空間点におけるベクトル量であるので単純ではない。また、潮汐については古くから蓄積された計測データによって予測法が確立しているのに対し、潮流については観測データが皆無に等しいので、自前で現場観測を行うしかないのが現実である。潮流観測のためには、伝統的にはアンデラ式流速計が用いられてきたが、水平あるいは鉛直方向の流速分布や流速の時間変動なども計測しようとする超音波式多層流速計(ADCP)が必要となる。その様な計測器は(高価なため)ごく最近まで非常に特殊であり、今後の観測データの蓄積に待つべきところが多い。

とは言っても、実用的には潮流についても分潮による調和解析が成立するという仮定が大変便利であるので、ここではその様に取扱うことにする。また、流速の鉛直方向の変化は無視し、深さ方向に一樣な平均流速を考えることにする。この場合、流速は

$$v(t) = \sum_{n=1}^N V_n \cos\left(\frac{2\pi}{T_n} t + \alpha_n\right) \quad (4)$$

によって与えられる。ここで、 V_n 、 T_n 、 α_n は流速の各分潮成分であるとする。

潮流のパワーは、式(4)を使うと次式となる。

$$P_{FLOW}(t) = \frac{\rho}{2} A |v(t)|^3 \quad (5)$$

従来の推定法は、式(4)を主太陰半日潮 M_2 の潮流を想定し、

$$v(t) = V_0 \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right) \quad (6)$$

とおいて、一周期の流れの平均パワーを次式で求めていた¹⁾。

$$P_{FLOW} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot |v(t)|^3 dt = \frac{\rho}{2} \cdot \frac{4}{3\pi} A \cdot V_0^3 \quad (7)$$

ただし、 V_0 のとり方には任意性があり、科学技術庁資源調査所の調査²⁾においては、海上保安庁水路部作成の潮流図から当該地点の最大流速を用いて試算

した結果、エネルギー推定量はかなり過大な値となっていると思われる。

3. 生月大橋の橋脚横における潮流計測

我々の研究室では、2004年から長崎県平戸市の生月大橋の橋脚を利用した潮流発電の研究を行っており、潮流計測も継続的に行っている。生月大橋は辰ノ瀬戸に架かる全長960mの鋼トラス形式の橋である。辰ノ瀬戸は、最狭部が約700m、最大水深が約50mであり、橋の建設前の調査によって大潮時の最大流速が約3ノットであることが分かっている。長崎県道路公社の協力を得て、我々が使用している生月島側の橋脚は、平均水深7mで、直径25mの円柱状コンクリート土台の上に立っている。コンクリート土台の上面は海底面と一致しており、水平ではほぼ建設時と同じ状態が保たれており、装置の設置には大変好都合となっている。



写真-1 超音波式多層流速計 (ADCP)

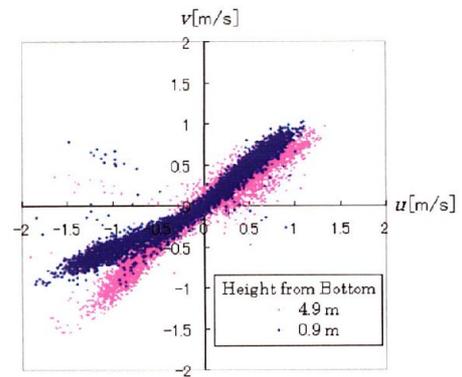


図-1 流速ホドグラフ

表-1 潮位の分潮振幅の比較

	現地観測		薄香湾 ³⁾	
	振幅(m)	相対値	振幅(m)	相対値
M_2	0.698	45.8	0.74	51.4
S_2	0.452	29.7	0.35	24.3
K_1	0.182	12.0	0.19	13.2
O_1	0.191	12.5	0.16	11.1
Sum	1.523	100	1.44	100

写真-1は、海底に設置されたADCPの写真である。架台の固定にはアンカーボルトを用いた。写真に見られるように6月末の時点では海底面には“うみうちわ”が全面についているが前年の11月にはコンクリートがむき出しとなっていた。

ここでは、まず30日間の潮流データを用いて、潮汐と同様に潮流の調和解析を行った結果を示す。さらに、それらを用いて潮流パワーの算定を行った結果を紹介する。次に、大潮時の24時間について、潮流の乱れ観測を行った結果について述べる。

(1) 30日間の潮流観測結果⁴⁾

平成17年6月から現地に超音波式多層流速計(ADCP, $f=1\text{MHz}$)を設置して、潮流観測を行った。図-1は、平成17年8月26日から約1ヶ月間の観測データ(10分毎)から得られた流速ホドグラフであり、海底上0.9mと4.9mでの観測結果を示した。下げ潮時の南西方向への流れの方が上げ潮時の逆方向への流れよりもやや大きいこと、海底上0.9mの観測値では上げ潮時と下げ潮時の方向が正反対とはなっていない、などが分かった。この観測から、現地における最大流速は大潮時に約2.0m/sであることが分かった。生月大橋建設時の現地観測では、最大流速が3ノット(1.5m/s)であったということなので、橋脚によって約3割ほど増速していることが分かった。

表-1は、ADCPの水圧計のデータを調和解析して求めた主要4分潮振幅を薄香湾のデータと比較したものであるが、概略一致した結果となっている。表-2は海底から上方2.9mでの主要4分潮成分の流速振幅を比較したものであるが、それらの相対値を表-1の潮位振幅と比較するとほぼ同じ値となっていることが分かる。

図-2は、 M_2 流速成分(u, v)およびその絶対値の鉛直分布を示している。この結果から、海底付近の流速は表層と同じくらい大きなこと、中層で振幅がやや小さいこと、それでも鉛直方向には概略一様な流速分布となっていることなどが分る。

表-2 海底から2.9m上方での分潮流速

	振幅(m/s)	相対値%	位相(deg)
M_2	0.844	47.0	181.1
S_2	0.423	23.7	233.8
K_1	0.286	15.4	224.6
O_1	0.256	13.8	94.1
Sum.	1.809	100	---

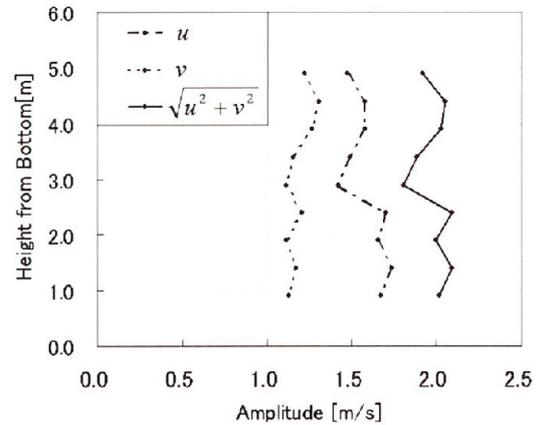


図-2 M_2 流速振幅の鉛直分布

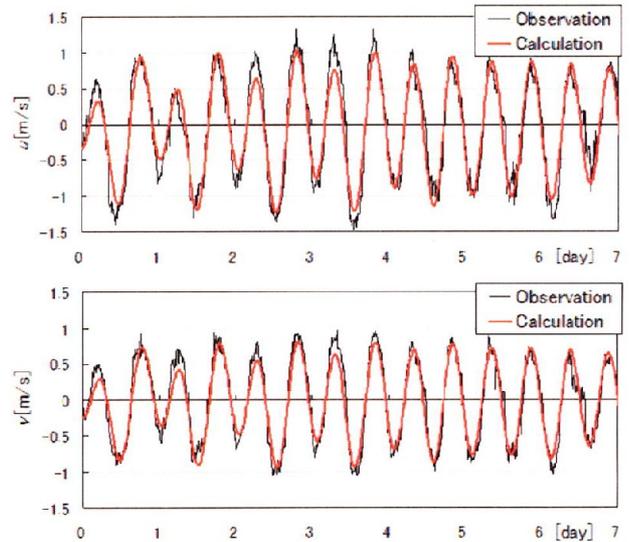


図-3 流速観測値と主要4分潮成分の合成値との比較

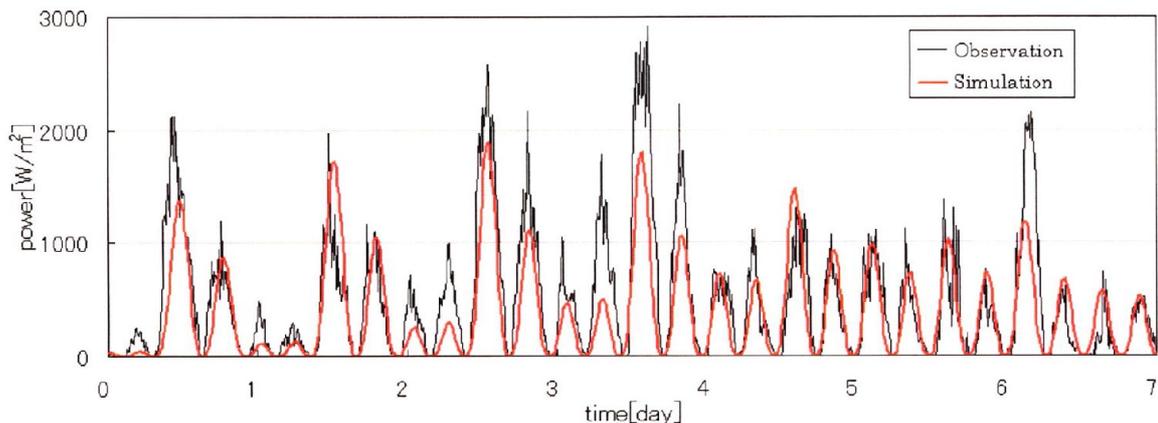


図-4 7日間の単位断面積当りの潮流パワー(実測流速と主要4分潮成分による比較)

図-3は、調和解析の一致度をチェックするために主要4分潮の流速を合成して元の観測値と比較したものであり、大潮時をささむ7日間をとった。一般的には両者が良く一致していると言えるが、特にピークのところでは推定値は低めとなっており、精度を上げるには分潮数を増すべきと思われる。

図-4は、大潮を含む7日間について、流速の観測値と潮汐主要4分潮の流速から単位面積当たりの潮流パワーを計算した結果を比較したものである。この結果から潮流の憩流に応じて1日4回潮流パワーは0となり、各憩流間のパワー変動が大きいこと、主として半日周潮と日周潮の足し合せによって潮流パワーが大きいのは1日1回であること、大潮時の最大値については主要4分潮による計算値は過小評価となることなどが分かる。

これらの結果から、式(7)などを用いて単位面積当たりの平均潮流パワーを求めて比較したものを表-3に示す。観測値は図-4の7日間から求めたものである。主要4分潮および M_2 と S_2 を考慮したものは1年間の平均値をとった。 (M_2+S_2) は、振幅のみを足し合せた、周期は M_2 潮を仮定して計算したものである。これらの結果から、平均潮流パワーの推定値としては、主要4分潮による計算値が良い近似となっていること、あるいは M_2 だけの計算値を2倍すればほぼ良い近似値となることが分かる。

(2) 潮流乱流の観測および潮流パワー

潮流の乱れに関する情報は、潮流発電装置の疲労強度に関係するほか、潮流発電装置が作動するレイノルズ数によって水車効率にも関係していると考えられるが、海洋乱流の計測データについては現在までのところほとんどないと思われる。海洋乱流は、場所、季節、潮の状態などによって変わることが予想されるので、今回の場所の一般性については議論の余地があるが、潮流発電実施位置において潮流の乱れを計測できることと、流速計の設置が容易であることから選択の余地は無かった。現地は平均水深が7mであり、流速計は海底から約3.5m、橋脚から約4mの位置に設置した。流速計設置状況を写真-2に示す。観測は、大潮の2008年7月17日午前10時からの24時間で、計測時間は10分毎にサンプリング周波数32Hzで3分間とした。

図-5は、各計測データの3分間の平均流速を示したもので、 u は主流成分として橋脚の方向に合わせた。図-6は、7月17日の12:00からの3分間の潮流の時系列データである。この結果から実海域の潮流は比較的低周波数で変動していることが分かる。

図-7は、144回の潮流計測データから平均値および標準偏差を求め、潮流の乱れ度を求めたものである。この結果は、風力発電において計測されている海上風の乱れ特性よりも乱れの少ない流れとなっている。特に、水深が7mと浅いため鉛直流速の乱れ

表-3 単位面積当たりの平均潮流パワーの算定値の評価

Tidal constituents	$P_{FLOW} (W/m^2)$	Ratio
Measured	265	1.0
M_2, S_2, K_1, O_1	253	0.955
M_2, S_2	174	0.657
M_2	131	0.464
(M_2+S_2)	343	1.294



写真-2 超音波流速計設置状況

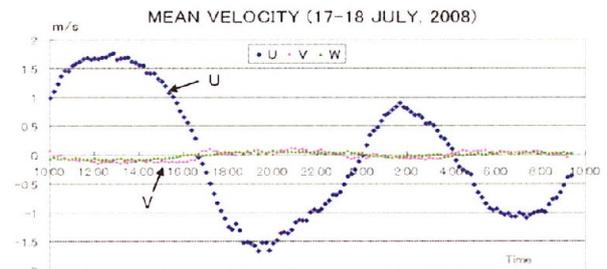


図-5 平均流速の変化 (2008年7月17-18日)

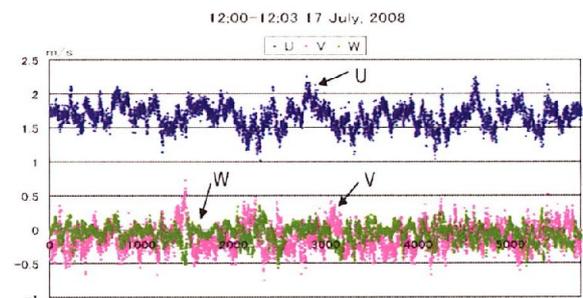


図-6 7月17日12:00からの3分間の流速(u,v,w)

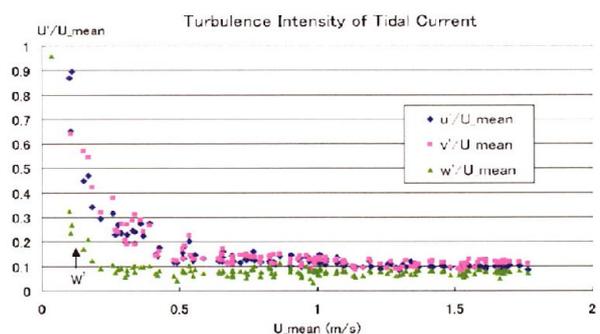


図-7 流れの乱れ度の比較

w'は水平流速の乱れよりも小さいことが分かる。

図-8は、図-6の流速データ(u, v, w)から

$$R(\tau) = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} \{u(t+\tau) - u_m\} \{u(t) - u_m\} dt \quad (8)$$

(ただし、 $u_m (=1.653 \text{ m/s})$ は平均流速) によって自己相関関数 $R(\tau)$ を求めたものである。この結果から図-6の流速 u には周期30秒および60秒程度の長周期の変動があることが分かる。

さらに、 $R(\tau)$ のフーリエ変換から流速のパワースペクトルは

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) \exp(-j2\pi f\tau) d\tau \quad (9)$$

によって計算される。図-9は、図-6の流速のパワースペクトルを示したもので、縦軸は対数となっている。この結果から、実海域の潮流は4Hz以上の高周波数成分はほぼ一定値であるが4Hz以下の成分については低周波側で連続的に大きくなっている。また、鉛直流速の乱れ w' は高周波数側で水平流速のそれよりも1桁小さいことが分かる。これは計測点が水深7mと浅く、水面と海底で鉛直流速が制限されたためであると思われる。

最後に、潮流の乱れを考慮して潮流パワーを求める場合と平均流速から求める場合を比較すると、図-6については

$$\bar{U}^3 / (\bar{U}')^3 = 1.028 \quad (10)$$

となった。この値は、それほど大きなものではないが潮流発電を行う場合には効率を押し上げることになり、好ましい影響であると予想される。

(3) 潮流の水平分布

辰ノ瀬戸における潮流速の推定に関しては、以前からMECモデル⁵⁾の静水圧近似モデルであるバリアブルメッシュモデルを用いている。計算領域は図-10に示すように、橋脚部付近を中心として南北に70km、東西に70kmである。メッシュ系はバリアブルメッシュで、辰ノ瀬戸付近で最少メッシュ250mとなっている。開境界での水位を松本モデル⁶⁾による調和定数の推算値から M_2 分潮のみを12時間周期と近似して与えた。図-11は、下げ潮最強時の流速ベクトルの計算結果である。

このような流れのパターンはごく自然な感じであり、これまでは疑問なく受け入れてきたが、(2)の乱流観測を行ったのは大潮時であり、正午頃が引潮の最強流時であった。その時に、辰ノ瀬戸全体の流れパターンは図-11とはかなり異なったものであった。実際に著者が見たのは丁度“海の中の川の流れ”のようなもので、海峡部の中央部200mくらいが速い流れで波打って流れているのに反し、岸に近い方はゆっくりと流れ、場所によっては下方から湧き上り、逆流しているところもある、といったように

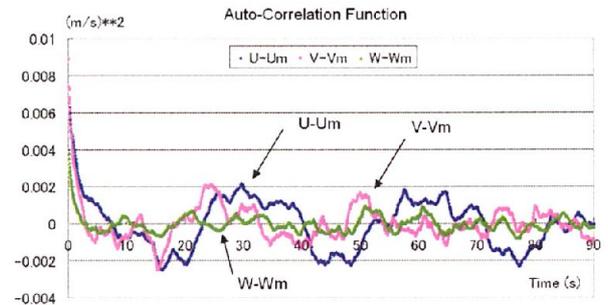


図-8 流速の自己相関関数

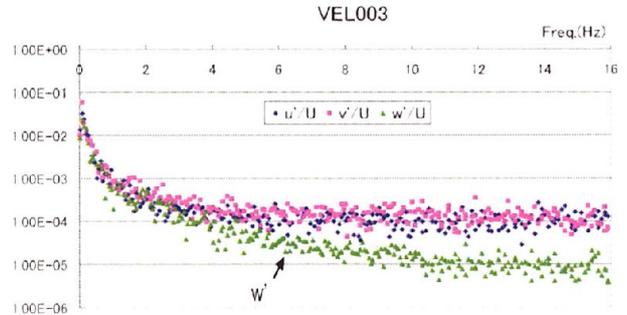


図-9 流れの変動のパワースペクトル

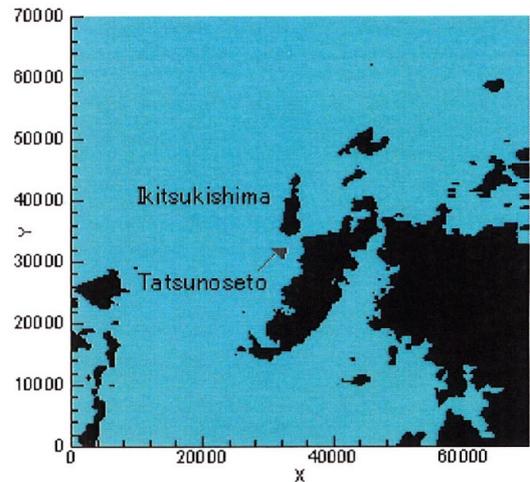


図-10 潮流計算領域(70km×70km)

複雑な流れであった。図-12は、Webからダウンロードした鳴門海峡における同様な流れの航空写真⁷⁾であるが、海峡の中央部においてジェット流のような速い流れが生じており、海峡断面における流速は一樣ではないことを明確に示している。

この原因は、明らかに水深と海岸地形の影響であって、計算で用いた250mメッシュでは表現できないためであると思われる。現実の流れをそれなりに表現しようと思えば、地形データの問題はあるが、出来るだけ細かなメッシュを用いるべきである。

このことは、潮流発電には直接的な影響を及ぼすものではないが、海峡部の潮流エネルギーの総量を算定する場合には少なからず影響するものと思われる。

4. おわりに

潮流発電に関連して、我々の研究室で観測した実海域の流速データを用いて、潮流パワーに関するいくつかの考察を行った。冒頭でも述べたが、潮流については地形の影響が大きいのでここで示した結果が当てはまらないケースも予想される。今後、各地で潮流データを蓄積することで信頼性を高めることが求められる。

昨年以降、複数の潮流発電に関するプロジェクトが進行しつつあるが、今回の特別セッションで公表できるまでには至らなかったことは残念であった。ただし、NEDO、財団、学会、企業、地方行政団体の各レベルにおいて海洋エネルギーの利用に関する研究開発の支援制度が充実してきたことは、近い将来この分野において大きな成果が得られることは間違いないものと予想される。今後、共同で使用可能な実海域実験場を整備し、いろいろな潮流発電装置の実海域実験をやりやすくすることで実用化を促進することが必要であると考え、今後の課題としては、

- ・ 潮流発電適地に関する詳細な情報
- ・ 高性能水車システムの開発
- ・ 海水中における材料の腐食対策
- ・ 生物付着による発電性能の経年変化
- ・ 変動する発電量の平滑化と送電方法

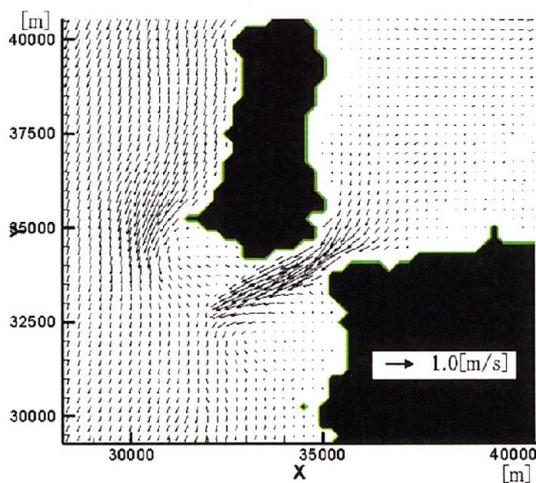


図-11 生月瀬戸の流れパターン（下潮時）

・ メンテナンスの方法

など多いが、各分野の技術を結集することによってそれらを解決し、できるだけ早期に実現できることを期待している。

謝辞

実海域用のメモリー式超音波流速計(Vector)はアレック電子(株)から借用しました。ここに、記して御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 科学技術庁資源調査所：潮流エネルギーの開発利用に関する調査/サボニウス型水車の開発について、1984.
- 2) 広瀬学, 角湯正剛, 田中寛好：海・潮流エネルギー利用技術に関する調査, 電力中央研究所報告, 調査報告:U86033, 1987.
- 3) 海上保安庁：日本沿岸潮汐調和定数表, 平成4年2月.
- 4) 経塚雄策, 郡司智博, 若濱久敏：橋脚を利用した潮流発電について, 日本船舶海洋工学会論文集, 第3号, pp.47-52, 2006.
- 5) MEC モデルのホームページ：
<http://mee.k.u-tokyo.ac.jp/mec/model/>
- 6) Matsumoto, K., Takanezawa, T., Ooe, M. : Ocean Tide Models Developed by Assimilating TOPEX/POSEIDON Altimeter Data into Hydrodynamical Model: A Global Model and a Regional Model around Japan, *J. of Oceanography*, Vol. 56, pp.567-581, 2000.
- 7) <http://133.31.110.195/D/inetpub/wwwroot/www/uzu.htm>



図-12 鳴門海峡の流れパターン⁷⁾