九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

橋脚を利用した潮流発電について

経塚, 雄策
九州大学総合理工学研究院流体環境理工学部門

郡司, 智博
九州大学総合理工学府大気海洋環境システム学専攻

若濱, 久敬
九州大学総合理工学府大気海洋環境システム学専攻

https://doi.org/10.15017/14552

出版情報：九州大学大学院総合理工学報告. 27 (4), pp.361-366, 2006-03. 九州大学大学院総合理工学府
バージョン：
権利関係：

九 州 大 学 大 学 院 総 合 理 工 学 報 告
第27巻　第4号　361-366頁　平 成 18 年 3 月

Engineering Sciences Report, Kyushu University
Vol.27, No.4 pp.361-366, MAR. 2006

橋脚を利用した潮流発電について

経塚　雄策*1・郡司智博*2・若濱久敬*2

(平成18年1月31日　受理)

Tidal Current Power Generation By Making Use of a Bridge Pier

Yusaku KYOZUKA, Tomohiro GUNJI and Hisanori WAKAHAMA
†E-mail of corresponding author: *kyozuka@esst.kyushu-u.ac.jp*

There are several kinds of energy resources in the ocean but the utilization of the ocean energy is far behind the other natural energies such as solar and wind. A feasibility study on the tidal current power generation by making use of a bridge pier in the narrow strait is introduced in this report. There are several advantages to making use of a bridge pier for the tidal power generation. Current velocity increases near the pier, therefore the tidal power generation becomes more efficient because the power is proportional to the cubic of the current velocity. Furthermore, the pier is convenient for the maintenance of the hydraulic turbine and the power unit. The project is now underway at the Ikitsuki Bridge in Tatsuno-Seto Strait of Nagasaki Prefecture, where the tidal current was measured by the bottom mount ADCP for one month. The numerical simulations of the tidal current were conducted by the MEC Ocean Model, and the results were compared with the measurements. A long term estimation of the tidal current power is presented and the variation of the power by the lunar period is discussed.

Key words: Tidal Current, Tidal Power, Bridge Pier, Narrow Strait, ADCP, Tidal Simulation, MEC Ocean Model

1. 緒　　言

地球温暖化対策として新エネルギーの利用拡大が求められているが、海洋エネルギーについては現在の「エネルギー白書」においては、その言葉すら出ていない。あるいは、2003年4月から「電気事業者による新エネルギー等の利用に関する特別措置法（RPS法）」が全面施行されたが、RPS法の対象となっているのは、風力、太陽光、地熱、中小水力、バイオマスの5種類であり、海洋エネルギーは対象となっていない。風力発電は、2002年度実績で46.3万KWの発電量があり、2010年における目標値は300万KWとされていることを考えると海洋における潮流発電は著しく立ち遅れていると言わざるを得ない。言うまでもなく、海水密度は空気の約800倍であり、流体のパワーは密度と流速の3乗に比例するので、2ノットの海流は約9m/sの風に相当する。日本沿岸では、鳴門海峡での最大流速10ノットを始めとして各地に潮流の強流域があり、そのエネルギー賦在量は膨大である。この一部にしろ海洋エネルギーの利用によって地球温暖化対策に寄与することは、まさに時節に適ったことであると思われる。

一方、国外ではすでにいくつかの潮流発電計画が実証実験に入ったことが報じられている。UKのSeaflow Project[1)]では、直径11mの水中プロペラ式潮流発電装置によって2.7m/sの流速時に300KWの発電を目指しており、2003年5月から実証実験を行っている。ノルウェーHammerfest付近のKvalsund海峡では、直径20mの全没プロペラ式潮流発電装置が駆動しており、2003年9月に世界に先駆けて商業電力網に接続された[2)]。また、韓国では朝鮮半島南西端のUldolmokの海峡における最大流速6.5m/sの潮流を利用して実機規模で90～130MWの潮流発電を目指しており、来年には 1,000KWのパイロットプラントの完成を予定して

*1　総合理工学研究院　流体環境理工学部門
*2　大気海洋環境システム学専攻修士課程

いる[3]。米国ニューヨークのイーストリバーにおいては、水中設置プロペラ式装置6台によって最大200KWの潮流発電を行う計画が発表されている[4]。

このような状況から今後は、我が国においても潮流発電に対する期待は高まるものと思われるが、本研究では、潮流エネルギーの利用促進を目的として、海域の橋脚を利用した潮流発電の提案を行う。狭い海峡においては一般に潮流は速いので潮流発電の適地であるが、さらに、橋脚が存在すれば、橋脚による増速効果・整流効果が見込まれるので潮流発電には有利となる。橋脚の利点はこれ以外にもいくつがあるが、既存の施設を利用することによる経済的なメリットが特に大きい。ここでは、潮流発電のフィージビリティスタディとして、長崎県生月大橋の橋脚を利用する場合について考察をおこなった。潮流シミュレーションによって辰ノ瀬戸における年間の潮流エネルギー量を推定するとともに海底設置型ADCPによる潮流観測結果について報告する。

2. 潮流発電の立地条件

日本沿岸には、鳴門海峡、来島海峡、関門海峡などを始めとして強流域は少なくない。風力発電については、全国の「風況マップ」が整備されているが、海洋エネルギーについても同様なマップが今後必要となろう。潮流発電の立地条件としては、潮流が速いことに加えて以下の事項についても考慮しなければならない。

- 環境影響を評価し、潮流発電の適正規模を考える
- 発電した電力の利用法を考える（発電量の変動）
- 発電方法とコストの問題（沿岸か沖合か、固定式か浮体式か、係留方法など）
- 法律による制限事項（航路指定、漁業権など海域の利用に関する制限）

本研究で想定している橋脚を利用した潮流発電については、橋の所有管理者からの認可とその海域を管轄する漁協からの協力が不可欠であるが、それらがクリアできれば橋脚を最大限利用できるのでいろいろな点で有利である。本研究については、既に長崎県道路公社および舘浦漁協からの協力を得ている。今後、大潮、小潮による発電量の変動などについても、例えば電気分解によって水素として貯蔵することが可能となれば、定常性が確保できることや離島、遠隔地など不利な立地条件も払拭できることになる。このような周辺技術の発展も大きな追い風となろう。

3. 長崎県生月大橋の橋脚を利用する潮流発電

3. 1 現地の概況

Fig.1 Panoramic landscape of Ikitsuki-Bridge from Ikitsuki-Island

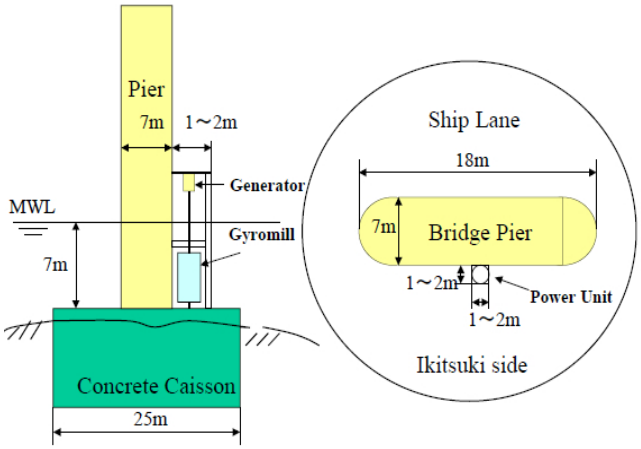

Fig. 2 Configuration of Gyromill, Generator and bridge pier

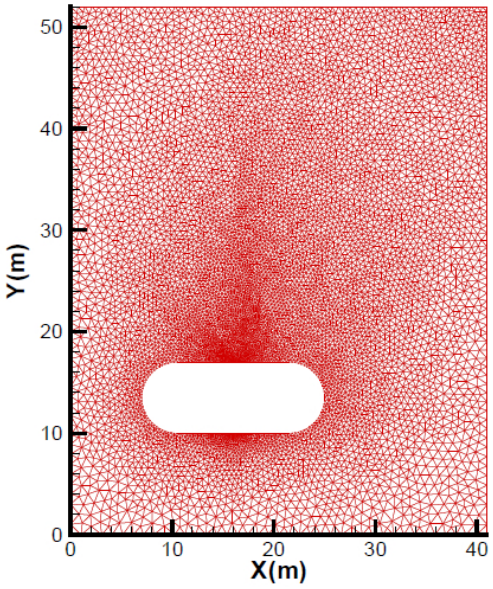

Fig.3 Bridge pier and the FEM meshes (N=8876)

生月大橋は、Fig.1のように長崎県平戸市にある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、古くから潮流が速い海峡として知られている。生月大

橋は、2ヶ所の海中橋脚によって支えられており、海中橋脚間距離400mはこの形式の橋としては世界最大であり、1991年に完成している。2ヶ所の橋脚部のうち、平戸側は海底が岩盤であり、１辺が22m、高さ13mの矩形コンクリートケーソンが海底上に据え付けられている。一方、生月島側は、直径25m、高さ23mの円柱状フーティングコンクリートが水面下30mまで埋め込まれており、フーティング上面が海底となっている。橋脚は、その上に長さ18m、幅7mの長楕円柱のコンクリートによって作られている。

本研究では、Fig.2のように生月島側の橋脚を利用して潮流発電を行う。発電装置は鉛直軸周りに回転するジャイロミル式水車を採用し、おもに模型実験によって現在開発中である。2006年6月頃に実機を現地に設置する予定である。設置予定位置はフーティングの上面であり、水深は7mである。橋脚は完成から既に14年を経ているが、フーティング上面には堆積物もなく平らなコンクリート面となっている。おそらく、流速が速くて大型の藻類は定着できないものと思われる。橋脚の橋中央部側は、航路指定がされているので、発電機の設置はその反対側、生月島側を想定している。

3. 2 橋脚による増速効果

橋脚による流れの増速効果を有限要素法[5]による二次元計算によって推定してみよう。Fig.3は、生月島側橋脚の水平断面形状および流れ解析に用いた有限要素メッシュを示している。実際には自由表面などの3次元影響もあるが、ここでは全没水車を考えているので2次元計算で十分である。Fig.3のx=0から一様流を流し、橋脚表面における境界条件をスベリの有無によって2種類の流場解析を行った。Fig.4は、スベリ有の場合の流速分布であり、最大流速は橋脚が円弧から直線に変化する辺りに現れていることが分る。

潮流発電の水車は、橋脚の中央部に設置予定であるので、そこでの流速分布を求めるとFig.5の結果を得る。スベリの有無によって橋脚付近の流速はかなり異なっているが、一様流速を0.5m/sとし、橋脚の幅7mとして求めたレイノルズ数は $Re = 3.5\times10^6$ であり、橋脚表面では乱流境界層であると考えられるので水車設置位置での流速はスベリ有の計算結果を採用すべきである。水車は直径2mで、橋脚から1m程度離して設置の予定である。従って、橋脚の増速効果は約1.4倍でありパワーは約2.7倍になるので、潮流発電にはかなり有利になることが分る。

3. 3 数値シミュレーションによる潮流の推定

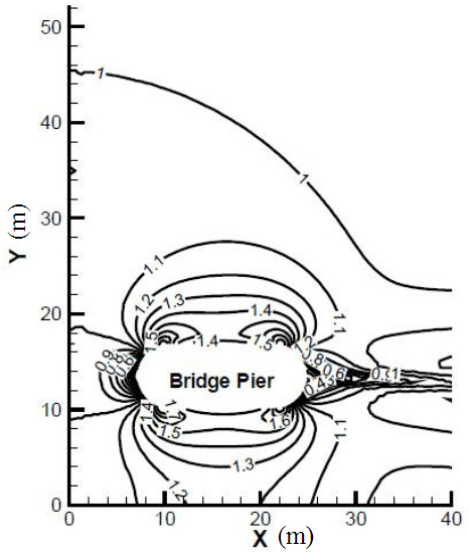

Fig. 4 Velocity distribution around a pier (Free-Slip)

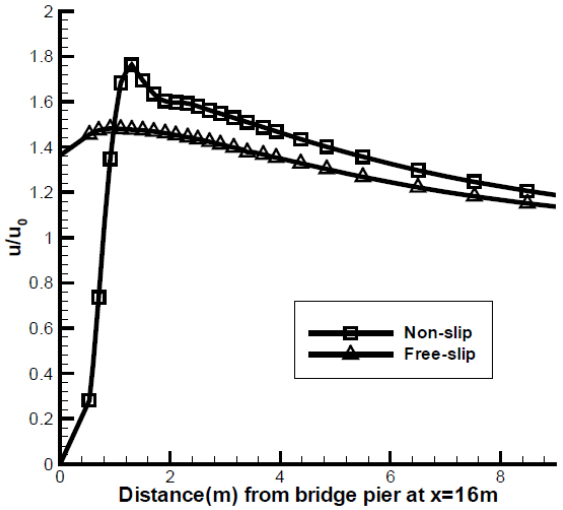

Fig.5 Velocity distribution apart from bridge pier

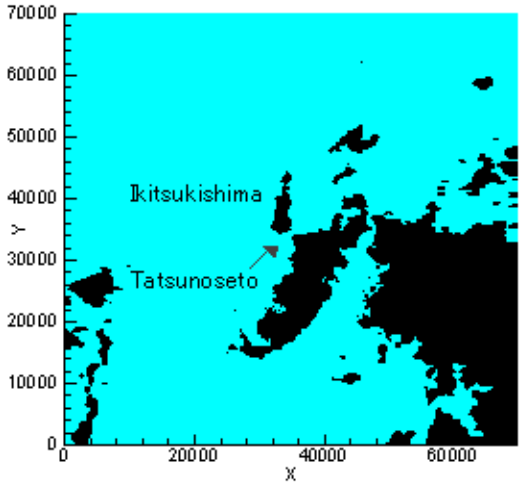

Fig. 6 Calculation area (70km × 70km)

辰ノ瀬戸における潮流速の推定に関しては、MECモデル[6]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た。最終的には主要な複数の分潮を与えて計算する予定だが、ここでは、手始めにM_2分潮のみを与えたシミュレーションについて述べる。

計算領域はFig.6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とした。メッシュ系はバリアブルメッシュとし、辰ノ瀬戸付近で最少メッシュ250mとした。メッシュ数は水平方向には160とし、鉛直方向には12層とした。計算領域の北、西、南側では開境界、東側では閉境界を仮定した。開境界条件としては、そこでの水位を松本モデル[7]による調和定数の推算値から計算して与えた。

ここでは、M_2分潮のみを12時間周期と近似して与えた計算結果を示す。Fig.7は、下げ潮最強時の流速ベクトルの計算値を示す。また、Fig.8は辰ノ瀬戸の中間点における流速のホドグラフを描いたものである。この結果から、辰ノ瀬戸での潮流の流速ベクトルは上げ潮時と下げ潮時においてその絶対値と偏角を変化させていることが分かる。つまり、下げ潮時の南西方向への潮流の方が、上げ潮時の逆方向への潮流よりも大きくなっている。この原因は、辰ノ瀬戸付近の地形の影響によるものと思われる。

4 現地観測結果

4.1 潮流観測結果

平成17年6月29日に現地に超音波式多層流速計（ADCP, f=1MHz）を設置して、潮流観測を開始した。Fig.9は海底に設置されたADCPの写真である。設置位置は生月島側の橋脚のフーティング上、水深7mの平らなコンクリートの上面であり、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月末の時点ではフーティング上面には"うみうちわ"が全面についている。前年の11月にはコンクリートがむき出しとなっていたので以外だった。

Fig.10は、平成17年8月26日から約1ヶ月間の観測データ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Fig.8の計算値と一致した特徴が出ていることが分かる。この観測から、現地における最大流速は大潮時に約2.4m/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5割ほど増速されたことになり、前述の2次元計算と概ね合った結果が得られた。

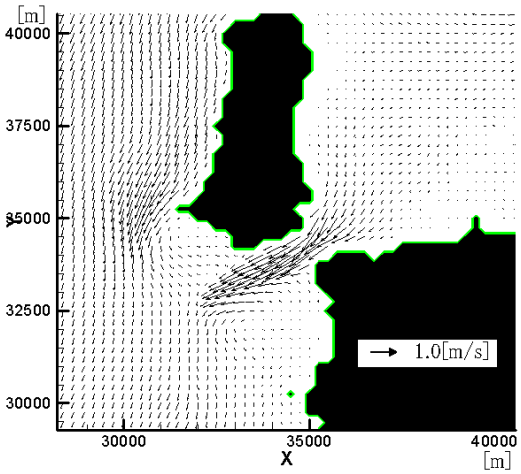

Fig.7 Velocity distribution near Tatsuno-seto in ebb tide

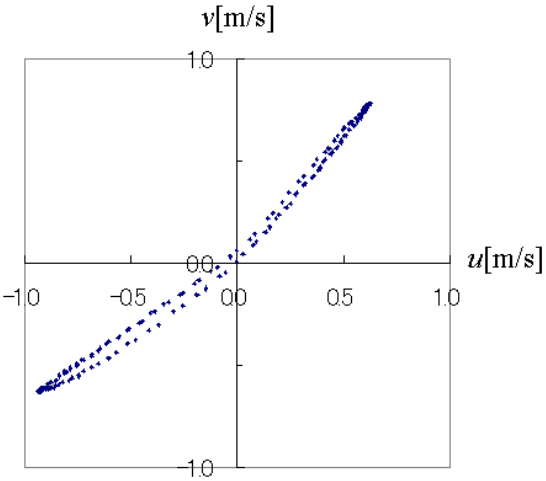

Fig.8 Hodograph of the velocity near Tatsuno-seto by the simulation

Fig.9 Photo of ADCP on the top of concrete caisson

4.2　潮流データの解析

以上の観測データをもとに、M2、S2、K1、O1の主要４分潮について調和解析を行った。求められた潮位、及び潮流の調和定数をTable.1,Table.2に示す。

潮位については、現地から最も近い検潮所である志々伎湾や薄香湾の値と比較的一致している。また、一般的に潮位と流速の位相差は90°であると考えられるが、本結果ではいずれも50°前後の差となっている。実際に、現地での観測において干潮･満潮時と潮止まりが約２時間半ずれることが確認されている。この原因については、局所的な地形の影響が強いものと思われるが、今後、数値シミュレーション結果との比較によって明確にしたいと考えている。

Fig.11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、大潮時をはさむ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。

次に、Fig.12は、単位面積あたりの流れのパワーP_{th}を計算したもので、観測値および調和定数から合成された流速値を使って次式によって求めた。

$$P_{th} = \frac{\rho}{2} U^3 \qquad (1)$$

ただし、ρ ：海水密度、U ：流速

この結果をみると、一般には潮流パワーは1日2回の干満によって安定的に存在すると考えられているが、実は大きな変動があることが分かる。大潮時には、2,000W/m²であるが、小潮時は500W/m²以下となっている。調和解析結果による推定値については、Fig.11における流速値の不一致が強調された形で表れており、観測値より低めとなった。

4.3 年間発電量の推定

潮流発電は、基本的には風力発電と同じであるが、潮流の特徴である周期性、方向性が風とは大きく異なっているので、現地での潮流の特徴を最大限に活かした最適な発電装置を考えることが必要である。ここでは発電装置の詳細については考えないで、生月大橋の橋脚を利用して潮流発電を行った場合の発電量の見積を行う。

流速をUとすると、潮流発電のパワーは次式で求められる。

$$P = \alpha \cdot \frac{\rho}{2} A_P U^3 \qquad (2)$$

ただし、α ：発電効率、ρ ：海水密度、A_P ：潮流発電装置作動面の投影面積である。

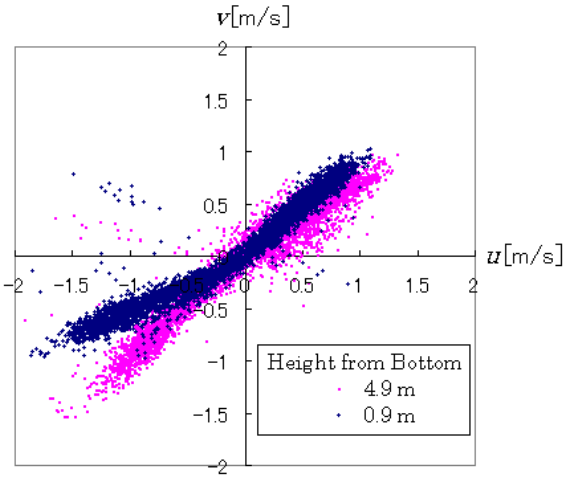

Fig.10 Hodograph of velocity measured near footing of Ikitsuki-Bridge

(2)から分かるように電力はUの3乗に比例するので、橋脚まわりで流速の大きな場所をえらぶ、あるいは付加物などの設置によって流速を大きくすることができれば小さな潮流発電装置によっても効率的な発電が可能となる。例として、平成18年度に計画している実海域モデルの水車として$\alpha = 0.3$とすれば、Fig.12 の7日間における日平均電力量は

$$\left.\begin{array}{l} \overline{E} = 11.43\ KWh/m^2 \cdot day \\ \overline{E} = 9.55\ KWh/m^2 \cdot day \end{array}\right\} \begin{array}{l} \text{：観測値} \\ \text{：調和解析} \end{array} \qquad (3)$$

となった。

Table 1 Tidal constants of surface elevation

	Amp. (m)	%	Phase(d)
M_2	0.698	45.8	221.0
S_2	0.452	29.7	279.4
K_1	0.182	12.0	271.8
O_1	0.191	12.5	145.3
Sum.	1.523	100	---

Table 2 Tidal constants of current velocity at 2.9 m above the bottom

	Amp. (m/s)	%	Phase(d)
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	---

5. まとめ

海洋エネルギーの普及・実用化を目指して、狭い海峡に架けられた橋脚を利用する潮流発電の提案を行った。例として、長崎県北松浦郡生月島の生月大橋の橋脚を利用する場合を考えて、潮流シミュレーションを行うとともに現地での流速観測も行った。シミュレーション結果と約１ヶ月間の観測データにより、現地の潮流の一般的な特徴が分かった。また、両者の比較により、シミュレーションの計算精度についても概略、確認できた。

橋脚を用いる利点は、既存のインフラが使えること、橋脚の存在による整流・増速が期待できること、発電した電気の利用が容易であることなどである。発電装置については、鉛直軸をもつ全没ダリウス型水車を想定しているが、発電パワーは発電装置の形式によらず、流速の3乗に比例するのでできるだけ流速の大きな場所に設置することによって効率的な潮流発電が可能となる。

潮流発電に関する未解決な問題としては、生物付着による発電効率、防触とメインテナンス、異常気象時の環境条件と発電装置の強度などが考えられる。これらについては、今後の実海域での実験を通して解決できるものと期待している。

参 考 文 献

1) *http://www.marineturbines.com/home.htm*

2) *http://www.e-tidevannsenergi.com/index.htm*

3) *http://www.kordi.re.kr/file/project/2004/eng/56-59.pdf*

4) *http://radio.weblogs.com/0105910/2004/08/14.html*

5) 日本数値流体力学会有限要素法研究委員会編：有限要素法による流れのシミュレーション、シュプリンガー・フェアラーク東京、(1998)

6) MEC モデルのホームページ：
http://mee.k.u-tokyo.ac.jp/mec/model/

7) 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, (2000), pp.567-581.

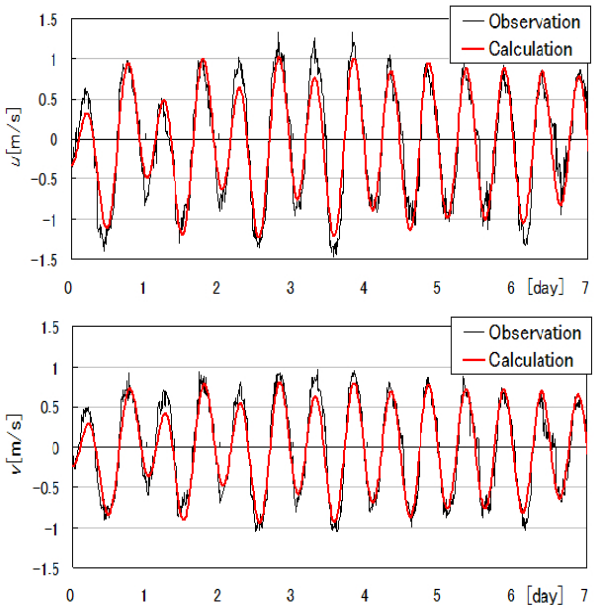

Fig.11 Comparison of tidal velocities (u,v), observation vs calculation by 4 tidal compornents

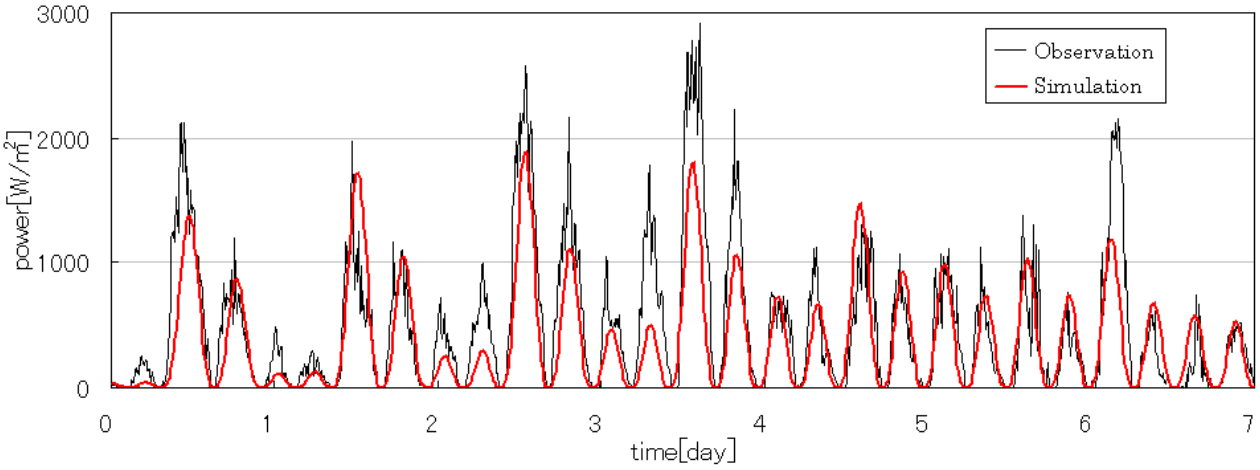

Fig.12 Comparison of the power between observation and reproduction by tidal components