

高解像度波浪エネルギーリソースマップと波力発電適地評価

High-resolution wave energy resource map and wave power generation suitability elevation

北海道大学大学院工学院

北海道大学大学院工学研究院

○学生会員 丸山 利幸 (Toshiyuki Maruyama)

正員 猿渡 亜由未 (Ayumi Saruwatari)

1. はじめに

近年世界的に、再生可能エネルギー利用への機運が高まっている。中でも波力発電や潮流発電などの『海洋エネルギー発電』は太陽光発電や風力発電に比べて発電出力の予測が立てやすいことから安定した電源として期待が持たれている。特に欧州では波浪、潮流エネルギー発電共に実現地実験が行われる程大規模なプロジェクトも進められており、実用化に向けて研究、開発が進められている。日本は欧州に比べ近海の波浪や流れが穏やかであるため近年まで海洋エネルギー関連の研究は消極的であった。しかし 2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災は、これまでベース電源を原子力発電に頼っていた日本の発電形態に大きな不安を投げかけ、国民にエネルギーリソースについて再考する大きな転換点となった。現在では国内各地で海洋エネルギーの利用に向けた取り組みが行われている。

波力発電の適地選定を行う際、波浪エネルギーの分布は海底地形に大きく依存し、数 km 離れただけでエネルギーが数倍も異なることがある。例えばスペインのイベリア半島沖では海底の起伏により波力の局所性が大きく表れるエリアの存在が確認されている(e.g. Iglesias and Carballo, 2010)。そのためブイ点のように特定の一点だけの特徴からサイト評価を行うだけでなく、数値計算モデルを用いて得た高解像度の詳細なエネルギーリソースマップと共に評価される必要がある。更に波力発電装置を一旦設置した場合その後数十年に渡り利用されると考えられるため、長期間に渡る過去の波浪エネルギー場の変遷を把握すると共にその将来予測を行う必要がある。

本研究は日本周辺における波浪エネルギー分布の長期的な遷移を明らかにすると共に、将来のエネルギー予測を行う事を最終的な目標としている。本稿はその為の準備として行った日本近海の波浪追算結果を示すと共に、計算結果の実測データ再現性、波浪エネルギー分布の季節変動について示し、波浪エネルギー場の特徴について考察を与える。

2. 計算方法

2-1. 波浪推算モデル

本研究の波浪場の計算は、デルフト工科大学で開発され海岸工学分野で広く使われている波浪追算モデル Simulating WAves Nearshore (SWAN)を用いた(e.g.van der Westhuysen et al, 2007)。本モデルは次の Wave action balance equation を解くことにより波浪場の計算を行う。

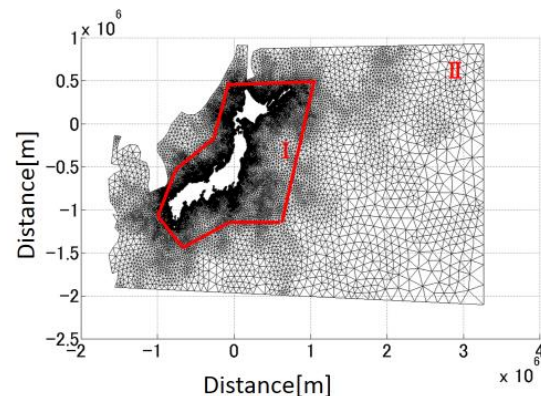


図 1 計算領域と非構造格子。格子点数 33617
要素数 63401

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (1)$$

$$S_{tot} = S_{in} + S_{nl3} + S_{nl4} + S_{ds,w} + S_{ds,d} + S_{ds,br} \quad (2)$$

$$N = E(t, x, y, \sigma, \theta) / \sigma \quad (3)$$

ここで $N = N(t, x, y, \sigma, \theta)$ であり波の energy density E を用いて定義される。 t は時間、 x, y は位置、 σ は各周波数、 θ は波向きである。また C_x, C_y は群速度、 C_σ, C_θ は σ, θ 方向のエネルギー伝達速度であり S_{tot} は外部からのエネルギーソースを表す。 S_{in} は風によるエネルギーの入力、 $S_{nl3}, S_{nl4}, S_{ds,w}, S_{ds,d}, S_{ds,br}$ はそれぞれ 3 波、4 波相互作用、白波砕破、底面摩擦、沿岸砕破によるエネルギーの減衰を表す。本研究では 3 波相互作用は考慮しておらず、白波砕破の作用は Westhuysen の方法により求めている。底面摩擦、沿岸砕破、4 波相互作用についてはデフォルトの係数を用いて求めた。

2-2. 計算条件

本研究では海上風速として欧州中期予報センター (European Center for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) が公開する再解析データ、ERA-Interim (解像度 $0.75^\circ \times 0.75^\circ$, 6 時間毎に公開) を入力した。また、地形データは General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO, 解像度 $30 \text{ s} \times 30 \text{ s}$) から取得した。日本近海を広域かつ高解像度で再現するために本研究では非構造格子を用いて計算した。非構造格子の大きさは、外洋は荒く、沿岸は細かく設定することにより計算コストの短縮を計った。図 1 に計算領域と使用した非構造格子を示す。領域 I は最少格子サイズに設定した。湾内の波高は小さく波力も微小な為、計算コスト削減のため計算領域には含まず瀬戸内海、有明海の中には格子を設定していない。潮流、

海流，気圧変動による水位変動については考慮していない．前報(猿渡，丸山，2013)で冬季における波浪変動について調査したので本研究の計算期間は1990-1999 年及び，2010 年の March 1, 00:00 – December 31, 23:00 (UTC)の10 ヶ月×11 年間である．計算のタイムステップは 10min である．いずれの年においても March 1, 00:00 の初期条件として海上風速に対応した予測波浪分布を与えた．波浪場が十分発達するまでには計算開始から 2 日間程度を要する為，解析には $t \geq 3$ 日の期間のデータを用いる．

3. 計算結果の検証

本計算により求められた 2010 年の有義波高 H_s ，有義周期 T_m を港湾空港技術研究所により公開される全国港湾海洋波浪情報網(NOWPHAS)による実測波浪データと比較し計算結果の再現性について図 2 上の P1~P5 において検証した．紙面の都合上全てのデータを示すことはできないが，図 3 に P4 における有義波高，有義周期の比較結果を示す．横軸は 2010 年 3 月 1 日 00:00(UTC)からの経過時間である．有義波高においては相関係数が 0.9325 と高い相関を示した．有義周期は相関係数が 0.8470 であり実測値よりもやや過小評価となった．他の地点においても同様の結果を得た．

4. 結果

4-1, 波浪エネルギー分布

波の energy density E は次式によって求められる．

$$E = \rho g^2 T H^2 / 64 \pi \quad (4)$$

ここで ρ は海水の密度， g は重力加速度， T は周期， H は波高である．即ち T と H が波浪エネルギーポテンシャルを決定するファクターである．

計算期間中の平均波浪エネルギーとその時間変化の標準偏差の分布を図 4 に示す．太平洋側及びオホーツク海側の沖合において大きなエネルギーを持つ波浪が分布しているのが確認できる．これらの波浪は沿岸部に近づくにつれ，底面摩擦や砕波などの影響によりエネルギーが減衰していく．エネルギーの大きな波浪はその変動も大きい為，標準偏差も大きくなった．

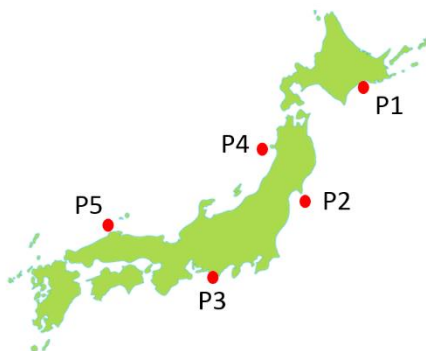


図 2 実測波浪データの観測地点

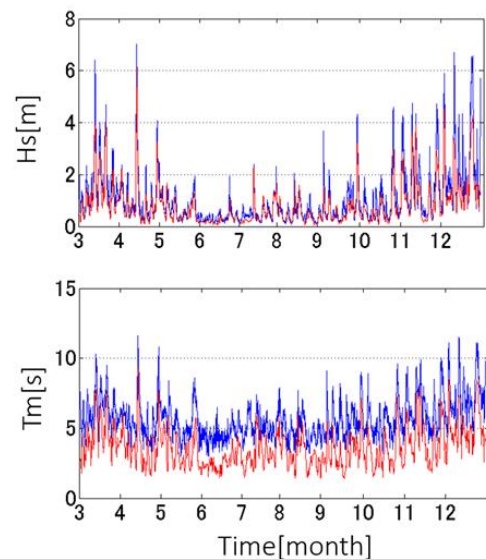


図 3 P4(深浦)における有義波高 H_s ，有義周期 T_m の計算結果(赤線)，及び実測値(青線)との比較

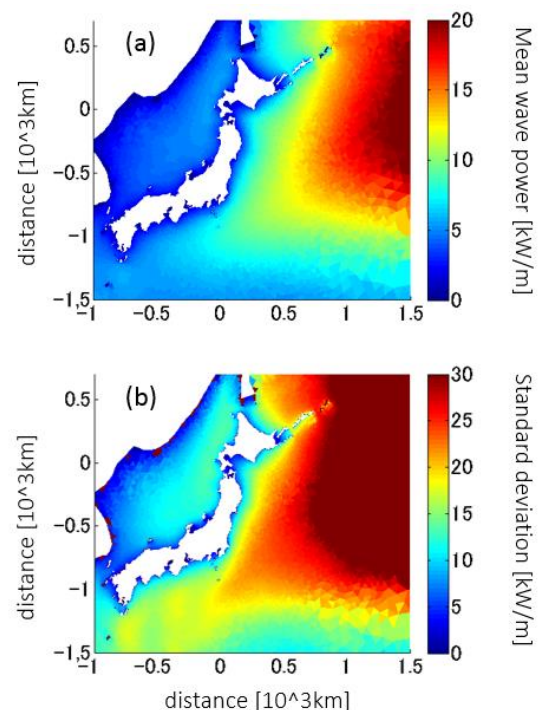


図 4 本計算における平均波浪エネルギー分布(a) 及びその標準偏差の分布(b)

これまで開発されてきた多くの波力発電デバイスは，設置や維持管理の為に水深数十m以内程度の場所に設置することを想定している．そこで図 5 のように日本周りの水深 50m 等深線上に沿って S1 軸(北海道周り)，S2 軸(本州周り)を定義し，S 軸上の波浪場の特徴を見ていく．カラーバーは始点からの距離を示している．1000km 毎にリファレンスポイント

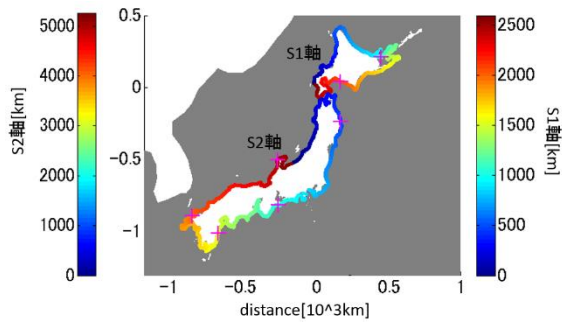


図5 50m等深線に沿って定義したS1,S2軸

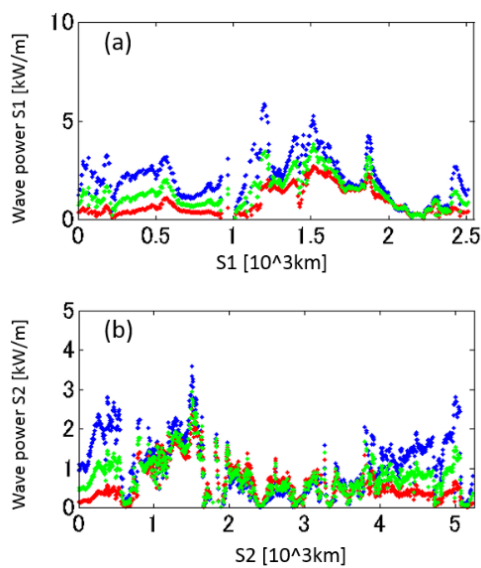


図6 (a)S1軸, (b)S2軸に沿った平均波力(青点は3~12月の平均, 赤点は5~9月の平均, 緑点は3~4, 10~12月の平均)

を設定した。図5で設定したS1軸, S2軸上における平均波力の分布を図6に示す。冬場の波力は大きく, 夏場は小さいといった季節変動が確認できた。

4-2, 発電量の見積もり

実際に発電デバイスを設置した際の発電量の見積もりを行った。今回はDrakoo(Hann-Ocean Technology Pte Ltd), Oyster(EMEC ltd), Pelamis(PWP Ltd)の3つのデバイスの設置を想定した。

図7はDrakooを設置した際のS軸上の季節ごとの平均波力を表している。年間を通じて安定した出力を得られていることが分かる。特に北海道周辺では海域によって発電量に大きな差がないため設置に有利

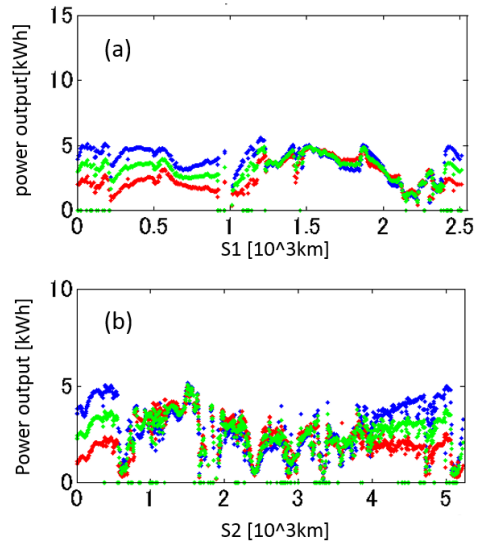


図7 (a)S1軸, (b)S2軸に沿ったDrakooの季節ごとの平均発電量(青点は3~12月の平均, 赤点は5~9月の平均, 緑点は3~4, 10~12月の平均)

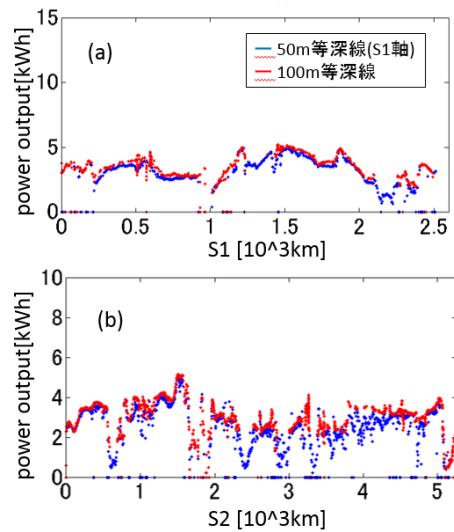


図8 (a)S1軸, (b)S2軸と100m等深線上における3~12月のDrakooの平均発電量の比較

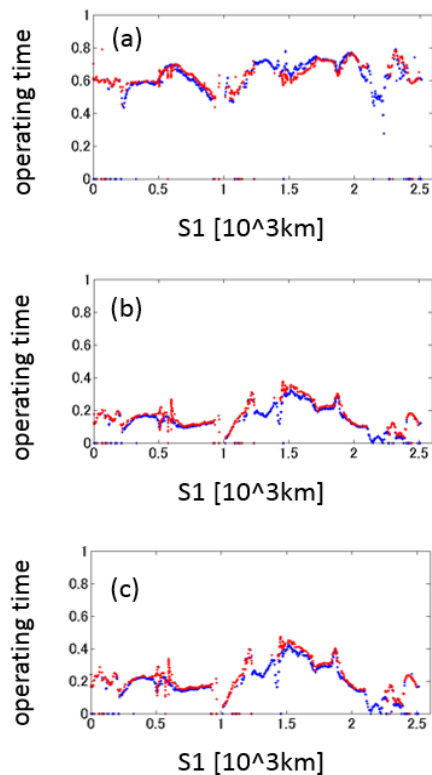


図9 S1 軸上においてデバイスが稼働可能な時間の割合(a)Drakoo,(b)Pelamis,(c)Oyster

な地点が多い。

図8はS軸上と更に沖合の100等深線上でのDrakooの3~12月の平均発電量を表している。50m等深線上と100m等深線上では出力に大きな差が見られなかった。これはDrakooのパワーマトリックスの性質上、波高や周期がある一定以上に達すると出力が漸近していくためである。PelamisやOysterは図9に示すように稼働率が低いため発電ポテンシャルを生かすきれない。実用化には小スケール化するなどの対策が必要である。以上の理由から小さな波浪場を対象としているDrakooは日本の波浪場に適していると考えられる。

5. 結論

本研究では波浪追算モデル SWAN により過去 11 年間の日本周りの波浪場の再現計算を行った。計算結果と実測との比較を行い波浪場が妥当に再現できていることを確認した。波力の季節変動を確認した。波力発電デバイスを設置し、発電量の見積もりを行った。今後も波力発電設置サイトの選定のため更なる長期間の波浪追算を行い、季節変動や年変動などについてデータの蓄積を続けていく。

参考文献

- 1)G.Iglesias , R.Carballo(2010) : Wave energy resource in the Estaca de Bares area (Spain)
- 2)Tsai Ching-Piao, Hwang Ching-Her, Hwa Chien, Cheng Hao-Yuan(2012) : Study on the wave climate variation to the renewable wave energy assessment
- 3)Westhuysen, van der A. J., Zijlema, M. and Battjes, J.A.(2007): Nonlinear saturation-based whitecapping dissipation in SWAN for deep and follow water
- 4)猿渡亜由未, 丸山利幸,北海道沿岸における冬季の波浪エネルギー賦存量評価,土木学会論文集B3 (海洋開発, 69, 2, pp.I_91-I.96(2013)