

波と共存する流れ場による波浪エネルギーリソースの応答

Response of Wave Energy Resource to a co-existing Current

北海道大学大学院工学院 ○学生会員 米子佳広(Yoshihiro Yoneko)
北海道大学大学院工学研究院 正員 猿渡亜由未(Ayumi Saruwatari)

1. はじめに

世界各地で環境負荷の小さい再生可能エネルギーの利用が進んでおり、最も研究が進んでいる太陽光・風力発電では実用段階まで至っている。海洋においても波力・潮流・海流・海洋温度差等の海洋再生可能エネルギーの賦存量は大きく、陸上以上のポテンシャルがあると考えられ、活用しようという動きが世界各地で広まっている。周囲を海洋で囲まれた日本でも1980年代から90年代にかけて活発に研究が行われていたが、他国と比べて海洋エネルギーポテンシャルが小さい事などから近年あまり注目されなくなっていた。しかし2013年4月、総合海洋開発本部(<http://www.kantei.go.jp/jp/singi/kaiyou/>)が海洋再生可能エネルギー利用促進に関する今後の取り組み方針を定め、低炭素化社会の実現へ向けて海洋再生可能エネルギー発電の環境を整えることを決定した。そのためこの分野への注目が急激に高まっており、今後国内でも海洋再生可能エネルギーに関連した研究開発が増加していく見込みである。

本研究では波浪エネルギーを活用した波力発電に注目する。波浪エネルギーデバイスの設置サイトの選定を行う際にはリソースモデリングがしばしば行われる。著者らはリソースモデリングの際、波と流れが共存するサイトでは流れの影響によって波浪エネルギーに無視できない程の違いが表れる事を明らかにすると共に、正しい波浪リソースマッピングの為にはサイトによっては波浪と流れの相互作用について考慮する必要があることを示した(e.g. 猿渡,米子(2013))。本研究では流れが波浪エネルギー場に与える影響について調べることを目的とし、日本国内で潮流の速い津軽海峡に加え、日本よりも波浪・流れポテンシャルが大きいイギリス北西部のオークニー諸島を対象に波-流れ相互作用に注目して解析を行うと共に、数値実験を用いて波のピーク周期が波流れ相互作用に与える影響を検討する。

2. 計算方法

2-1 波浪推算モデル

波力エネルギーの分布は、デルフト工科大学で開発された波浪推算モデル Simulating Wave Model(SWAN)を用いる。これは沿岸地域と内陸水域において風波を計算できる第三代波浪モデルである。入力する海上風はヨーロッパ中期予報センター(ECMWF)が公開する再解析データ Interim, もしくは次節で述べる気象モデルによる計算結果を用いる。

2-2 メソスケール気象モデル

風速場の計算は米国大気研究センター(NCAR)等が開発した非静力学メソスケール気象モデル, Weather Research and Forecasting Model(WRF-ARW,ver3.4)で行った。本モデルは圧縮性流体のためのオイラー式を σ 座標系でとくことで、風速、温度、圧力等の分布を求めることができる。また本モデルでの境界条件に再解析データを入力するが、本研究では National Center for Environmental Prediction により6時間おきに提供される Final Analysis(FNL)データ(解像度 $1^\circ \times 1^\circ$)を用いた。本研究では3領域のネスティング計算を行った。

2-3 海洋流れモデル

海洋流れモデルとしてマサチューセッツ工科大学にて開発された MIT General Circulation Model(MITgcm)を用いる。本モデルは三次元流れモデルであるが、本研究では波と流れの相互作用について検討するため二次元での計算を行った。境界条件として海面高度測定衛星(TOPEX/Poseidon)の測定データによる調和解析とデータ同士を組み合わせることによって得られた潮汐解析解である TPXO7.2(最高解像度 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$)を補間して与え、8分潮(M2,S2,N2,K2,K1,O1,P1,Q1)について考慮した。

2-4 計算条件及び計算領域

表1と図1にSWANにおける津軽海峡の計算条件及び計算領域を、表2と図2にオークニー諸島の計算条件及び計算領域を示す。本研究内の計算領域における地形は General Bathymetric Chart of the Oceans(Gebco)が提供している $30\text{sec} \times 30\text{sec}$ 解像度データを基に与えた。入力している海上風は領域1では2-1で述べたECMWFのInterim(グリッド幅 $0.75^\circ \times 0.75^\circ$)を用い、領域2と3ではWRFで計算した結果を使用した。さらにMITgcmで計算した潮流流速・潮汐データを領域3にて入力した。境界条件は領域2には領域1での、領域3には領域2のSWAN計算結果を使用することで、外海からの発達した波を再現した。

表-1 津軽海峡における計算領域および計算条件

| | 計算領域 | グリッド数 | グリッド幅 | タイムステップ |
|---|-------------------------|---------|--------------|---------|
| 1 | 北緯20°60度 東経120°180度 | 180×120 | 20分(37.08km) | 10分 |
| 2 | 北緯39°47度 東経136°150度 | 210×120 | 4分(7.416km) | 10分 |
| 3 | 北緯40.5°42度 東経139.5°142度 | 300×180 | 30秒(0.927km) | 10分 |

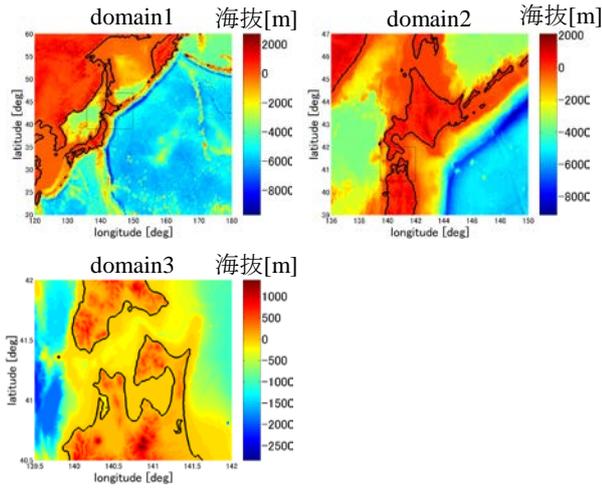


図-1 津軽海峡における domain1,2,3 計算領域

表-2 オークニー諸島における計算領域および計算条件

| | 計算領域 | グリッド数 |
|---|--------------------------------|---------|
| 1 | 北緯 30 度~70 度 西経 80 度~東経 10 度 | 270×120 |
| 2 | 北緯 54 度~62 度 西経 16 度~東経 0 度 | 240×120 |
| 3 | 北緯 58.5 度~59.6 度 西経 4 度~西経 2 度 | 240×264 |

| | グリッド幅 | タイムステップ |
|---|---------------------------|---------|
| 1 | 20 分×20 分(23.78km×37km) | 10 分 |
| 2 | 4 分×4 分(3.92km×7.4km) | 10 分 |
| 3 | 30 秒×15 秒(0.47km×0.463km) | 10 分 |

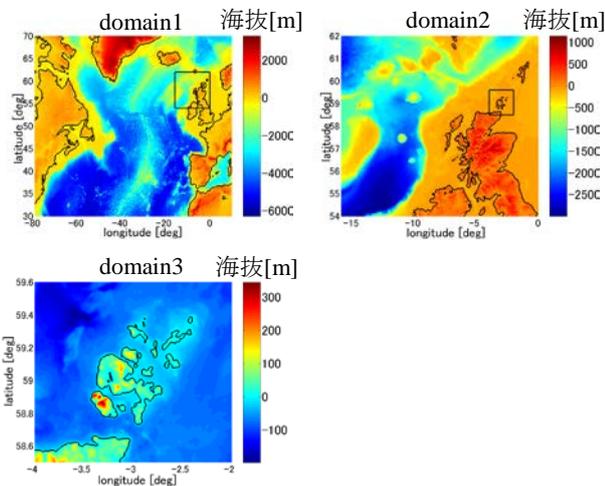


図-2 オークニー諸島における domain1,2,3 計算領域

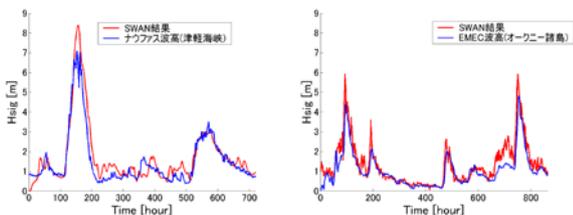


図-3 左…津軽海峡の SWAN 結果と実測値の比較
右…オークニー諸島の SWAN 結果と実測値の比較

3. 検証

SWAN の計算結果と波浪の観測結果を比較することで本研究での計算結果の妥当性の検証を行う。(図 3) 津軽海峡の計算結果は、国土交通省港湾局が全国港湾海洋波浪情報網(<http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/>)にて提供しているナウファス波浪観測データと比較を行った。検証の対象としている地域は青森県八戸(北緯 40 度 40 分,東経 141 度 45 分)で、計算期間は 2006/10/1 0:00 から 10/31 0:00 までの 30 日間である。オークニー諸島においてはヨーロッパ海洋エネルギーセンター(EMEC)の提供している観測データと SWAN 計算結果を比較した。検証対象地域は北緯 58 度 58 分,西経 3 度 23 分の地点であり、計算期間は 2006/7/9 0:00 から 8/14 0:00 までの 36 日間である。

計算結果と実測値を比較してみると両地点とも細かい波高の大きさや増幅のタイミングに若干の誤差はあるが、津軽海峡においては計算開始から 150hour,570hour 付近、オークニー諸島においては計算開始から 100hour,200hour,500hour,800hour 付近の高波浪時を含めた全体の大まかな傾向が一致しており、本研究での計算結果は実現象を再現できていることが確認できた。

4. 計算結果

4-1 実海域における波-流れ相互作用

波-流れの相互作用が波浪エネルギー場に与える影響を検討するために、潮流流速の発達している地点における有義波高の増幅率に注目する。図 4-1 は津軽海峡及びオークニー諸島の観測期間内における最大潮流流速分布を示したものである。観測期間は津軽海峡では 2006/10/1 0:00 から 2006/10/31 0:00,オークニー諸島では 2006/7/9 0:00 から 2006/8/14 0:00 となっている。津軽海峡での最大潮流流速は、松前半島と津軽半島または函館と下北半島との間の狭窄部分において確認でき、大きさは約 1.5m/s であった。一方、オークニー諸島は南部の水路で最大 4m/s 以上の流速を持っており、津軽海峡の 2 倍以上のポテンシャルを持っていることがわかった。本研究では波浪・潮流が共に発達している地点に注目し、津軽海峡では地点 A(北緯 41 度 20 分 東経 140 度 20 分),オークニー諸島では地点 B(北緯 58 度 45 分,西経 3 度 18 分)を対象とし解析を行う。潮流流速を考慮しないで計算した有義波高を H_{wave} , 考慮して計算した有義波高

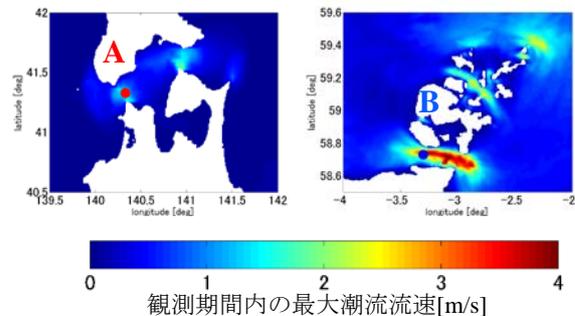


図 4-1 観測期間内における最大潮流流速空間分布
上:津軽海峡(2006/10/1 0:00~10/31 0:00)
下:オークニー諸島 (2006/7/9 0:00~8/14 0:00)

を $H_{current}$ とし、波高増幅率 $R=H_{current}/H_{wave}$ とした。図 4-2 は R と流れの向きに対する波向きの相対角度 θ との関係を一極座標系で表したもので、図中における赤い線は R の中央値を、黒い点線は半径 1 の値を表している。地点 A・B どちらでも相対角度が 180° 付近(波と流れが逆行)では中央値は 1 よりも大きく、 0° 付近では 1 よりも小さくなっていった。これは波と流れの共存場において、波と流れが逆行していると波高は増幅し同方向だと減少する典型的な波-流れ相互作用が起きているからである。このことから津軽海峡・オークニー諸島の流速が速い地点において流れが波浪に影響を与えていることが確認できた。またオークニー諸島では、相対角度 θ が分散せずに 180° 付近と 0° 付近に集中している。これは北大西洋から発達した波浪が到達するため波向きが安定し、波と流れの相対角度が安定しているからだと考えられる。

4-2 数値実験を用いた波-流れ相互作用の検証

4-1 において潮流速の速い地点で波流れ相互作用による波高増幅が確認された。しかし過去の研究においては、波-流れ相互作用は相対角度 θ 、潮流速の大きさだけでなく、その波のピーク周期にも影響されることが指摘されている。手賀ら(1998)は流れと不規則波の干渉に関する水理実験を行い、波のピーク周期の違いによって波高スペクトルの変化に異なる傾向が表れる事を明らかにした。よって本研究でも SWAN を用いた数値実験を行い、波のピーク周期の違いによって波-流れ相互作用の影響に変化があるか検討する。

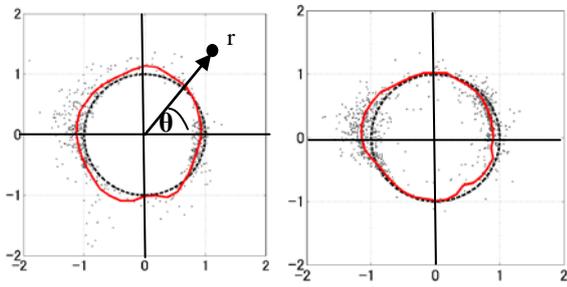


図 4-2 地点 A における波と流れの相互作用(左),地点 B における波と流れの相互作用(右)

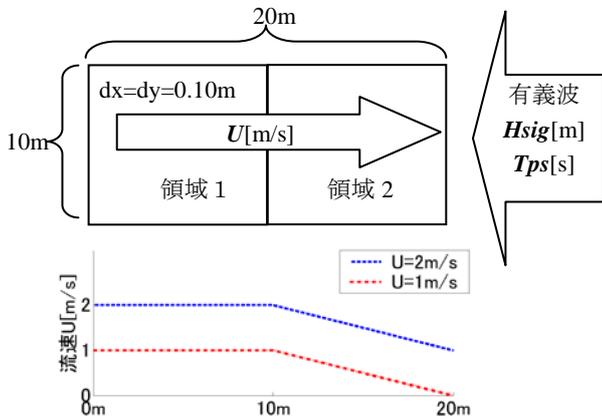


図 4-3 数値実験計算条件(上) 及び流速分布(下)

表 2 数値実験における流速・有義波高・ピーク周期

| Test | Hsig | Tps |
|-----------------------|------------|-------------------|
| Wave Only | | |
| Wave Current (U=1m/s) | 1,2,3,4[m] | 4,5,6,7,8,9,10[s] |
| Wave Current (U=2m/s) | | |

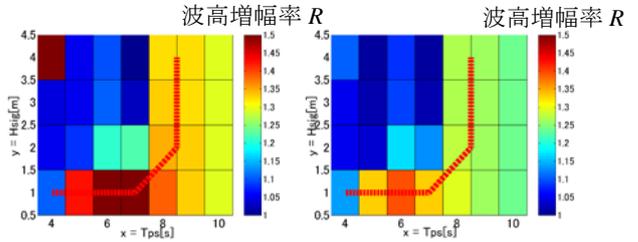


図 4-4 波高増幅率とピーク周期と有義波高の関係
流速 $U=2\text{m/s}$ (左), 流速 $U=1\text{m/s}$ (右)

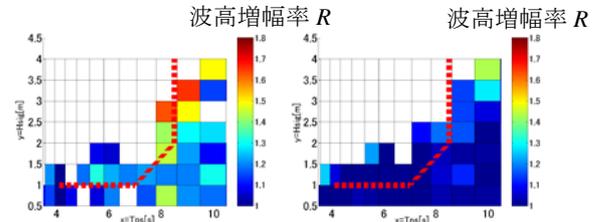


図 4-5 オークニー諸島における波向きに対する潮流流速ごとの波高増幅率・ピーク周期・有義波高の関係
流速 $U=1.8\sim 2.2\text{m/s}$ (左), 流速 $U=0.8\sim 1.5\text{m/s}$ (右)

図 4-3 と表 2 に数値実験の計算条件と流速の分布を示す。グリッド幅 $0.1\text{m}\times 0.1\text{m}$ で、東西方向 20m ,南北方向 10m の水路内に流れと波の共存場を生成した。流速は波に逆行するような向きで、領域 1 では一様な流れを、領域 2 では東に進むにつれて減少するように設定した。また流速の大きさと周期による相互作用の違いを確認するために $U=2\text{m/s}$ と $U=1\text{m/s}$ の 2 つのケースを計算した。波は境界条件として東側から規則波を伝播させ、その他の境界は開放条件とし、初期条件は東側の境界条件と等しい有義波高、ピーク周期の波を全領域に与えた。実験はピーク周期 $Tps=4,5,6,7,8,9,10\text{[s]}$ 、有義波高 $Hsig=1,2,3,4\text{[m]}$ の異なる周期・波高の組み合わせ 28 ケースを行い、定常状態に達した状態の解を用いて解析した。本研究では一様な流れと規則波の相互関係を検討するため、流速が一定な領域 1 の波高増幅率 R の最大値をそのケースの波高増幅率とした。図 4-4 は数値実験で求めた波高増幅率をその波のピーク周期・有義波高に対応させたもので、左が $U=2\text{m/s}$ の流速、右が $U=1\text{m/s}$ の流速を与えたケースである。どちらのケースも $Tps=4\sim 7\text{s}$, $Hsig=2\sim 4\text{m}$ 付近では、波高増幅率が 1 に近く波-流れ相互作用の影響が小さくなっていることがわかる。これは波-流れ相互作用によって波高が増大するが、ピーク周期の小さい波では増大に伴って波高が碎波限界を超えてしまい、その結果波高の増幅が抑えられてしまうことが原因である。一方ピーク周期が 8s 以上になる

と相互作用によって波高が増大しても砕波限界に達しないため、波高増幅が顕著に表れた。砕波限界を受け増幅率が小さくなってしまいうピーク周期・有義波高と、増幅率が大きく表れるピーク周期・有義波高の境目を図 4-4 中の赤色点線で示す。この数値実験の結果をオークニー諸島の計算結果と照らし合わせることで、砕波限界の影響を受けるピーク周期・有義波高の検証を行う。図 4-5 はオークニー諸島の計算結果にて、波向きに対する潮流流速成分ごとの波高増幅率・ピーク周期・有義波高の関係を示した図である。左図は $U=1.8\sim 2.2\text{m/s}$ 、右図は $U=0.8\sim 1.5\text{m/s}$ の流速の波高増幅率を示し、図中の赤い点線は図 4-4 で求めた砕波限界の影響を受ける境目である。 $U=1.8\sim 2.2\text{m/s}$ の図では $T=8\sim 9\text{s}$ の赤線付近で増幅率が增大しており、数値実験で明らかになった砕波限界の影響がオークニー諸島の計算結果でも表れていることが確認できた。また $U=0.8\sim 1.5\text{m/s}$ の図でも、 $U=1.8\sim 2.2\text{m/s}$ に比べると流速が小さいため増幅率は小さいが、同じく赤線付近で増幅率が增大していることから数値実験と同じ現象が確認できた。

4-3 サイト選定

波-流れ共存場のサイトにおいて波浪エネルギーを見積もる際には、波-流れ相互作用による波高増幅を考慮する必要がある。しかし本研究の数値実験から、波のピーク周期や有義波高によっては砕波の影響で波高増幅率が小さくなるため、波浪エネルギーが見積もりよりも小さくなることがわかった。したがって波-流れ相互作用を考慮して波浪エネルギーの見積もりを行う際には、サイトでの波の有義波高・ピーク周期の出現頻度を考慮し、数値実験で求めた砕波限界の境目と照らし合わせる必要がある。図 4-6 は地点 A,B における観測期間内の有義波高・ピーク周期の出現頻度分布を表しており、赤色点線は図 4-4 によって求めた砕波限界の影響を受けるピーク周期・有義波高の境目である。地点 A では $Tps=4\sim 6\text{s}, Hsig=1\sim 2.5\text{m}$ の波の頻度が高く、砕波の影響を受け、波-流れ相互作用による波高増大は小さくなくと考えられる。一方地点 B では $Tps=3\sim 5, 8\sim 10\text{s}, Hsig=1\text{m}$ の波の頻度が多くなっている。この有義波高・ピーク周期では相互作用により波高が増大しても砕波限界には達しないため、波高増幅率は大きくなり、波浪エネルギーの見積もりも小さくならないと考えられる。

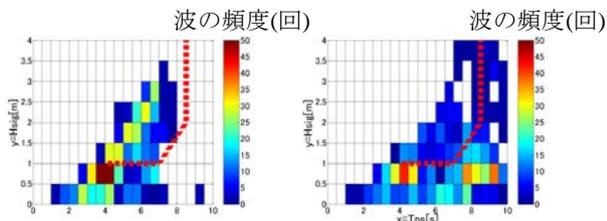


図 4-6 地点 A における有義波高・ピーク周期の出現頻度分布(左)、地点 B における有義波高・ピーク周期の出現頻度分布(右)

5. 結論

- ・第三世代波浪モデル SWAN を用いて計算した津軽海峡・オークニー諸島の波浪場の再現性が確認できた。
- ・潮流流速の速い地点において波-流れ相互作用が起こり、波高が増大した。また外洋からの発達した波を受けるオークニー諸島では波向きが安定する為、相互作用の起こる角度が集中している。
- ・数値実験を用いて、波-流れ相互作用時に砕波限界の影響を受けるピーク周期・有義波高を求めた。
- ・実海域の計算結果内でも数値実験同様、砕波限界の境目を確認した。

参考文献

- 1) Longuet-Higgins, M.S. and R.W. Stewart: The Changes in Amplitude of Short Gravity Waves on Long Waves and Tidal Currents, Jour. Of Fluid Mechanics, Vol.8, pp.565-583, 1960
- 2) Hong, S.Y., and J.-O.J. Lim: The WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme (WSM6), J. Korean Meteor. Soc., 42, pp.129-151, 2006
- 3) Mlawer, E.J., S.J. Taubman, P.D. Brown, M.J. Iacono, and S.A. Clough: Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave, J. Geophys. Res., 102, D14, pp.16663-16682, 1997
- 4) Chou, M.D. and M.J. Suarez: An efficient thermal infrared radiation parameterization for use in general circulation models, NASA Tech. Memo, 104606, 3, pp.85-85, 1994
- 5) Zhang, D.-L. and R.A. Anthes: A high-resolution model of the planetary boundary layer-sensitivity tests and comparisons with SESAME-79 data, J. Appl. Meteor., 21, pp.1596-1609, 1982
- 6) Chen, F. and J. Dudhia: Coupling an advanced land-surface/hydrology model with the Penn State/NCAR MM5 modeling system. Part I: Model description and implementation, Mon. Wea. Rev., 129, pp.569-585, 2001; Hong, S.Y., Y. Noh, and J. Dudhia: A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes, Mon. Wea. Rev., 134, pp.2318-2341, 2006
- 7) Kain, J.S.: The Kain-Fritsch convective parameterization: An update, J. Appl. Meteor., 43, pp.170-181, 2004
- 8) 米子佳広, 猿渡亜由未: 津軽海峡において潮流が波浪及び波浪エネルギー場に与える影響の特徴化, 土木学会北海道支部論文報告集, 69 B-39, 2013
- 9) 手賀夕紀子, 小林信久, 多田彰秀: 不規則波と流れの干渉による波動場の変化, 土木学会海岸工学論文集, 第45巻, 36-40, 1998