

方向分散法を用いた波変形アプリケーションの波高推定精度

金田友紀*

北海道立総合研究機構栽培水産試験場

Accuracy of estimating wave height based on the wave transform application with angular spreading method

TOMONORI KANETA*

Mariculture Fisheries Research Institute, Hokkaido Research Organization, *Muroran, Hokkaido, 051-0013, Japan*

A Windows PC application that estimates wave height transformation with the angular spreading method and can read values from existing cumulated energy curve graphs and the distances between wave rays from a refraction diagram was developed. The application automatically calculates the values, searching for energy cut areas by land boundary, executes the calculations of multiple data sets (i.e., wave height, wave period, and wave direction), and saves the results, which makes estimating operations easy to perform. Estimating wave height transformation of actual measured wave heights at an offshore observation point with the application showed that there is a correlation between the estimated wave heights and actual measured wave heights from a shore observation point. According to the results, setting the wave ray intervals to 5 times greater than the width of the designing facility, but shorter than the distance between the calculation point and land boundary, is appropriate.

キーワード：エネルギー分散法，屈折，波変形，波向線，方向分散法

現在，日本中の沿岸において大型海藻が衰退する磯焼けが進行しており（藤田ら，2008；水産庁，2015），藻場を利用する有用な水産資源の低迷が懸念されている。北海道の水産試験場では，北海道南西部沿岸において磯焼けが持続する要因をキタムラサキウニによる大型海藻への過剰な摂食であるとまとめた（吾妻，1995）。そのため，ウニ類を対象とした増殖礁において，不足する餌料海藻を継続的に生育させるには，ウニ類の個体数を低減させるか，またはウニ1個体当たりの摂餌量を低減させる必要がある（川俣，1994；川井ら，2002）。このような状況のもと，波による振動流速が増大するとウニの摂餌圧が低下する現象（川俣，1994）を利用して，磯焼けへの影響の大きい冬から春にかけてのウニ類の摂餌圧を低減させる高上げ礁の設置（または既存施設の高上げ）が北海道の「藻場・干潟ビジョン」において事業レベルで検討されている（<http://www.pref.hokkaido.lg.jp/sr/ssk/mobahigatavision.htm> 2019.5.31）。施設の設計にあたっては，ウニ類摂餌圧低減の効果を十分に検討しなければなら

ず，そのためには施設に作用する波の諸元（波高，周期および波向）を推算する必要がある（桑原ら，2000；桑原ら，2004）。波の推算には，地形による波エネルギーカットを考慮した方向分散法（エネルギー分散法）による波変形計算（水産庁，2003）を行うとされているが，その過程で波のエネルギー累加量および屈折図による波向線間隔を図面上から読み取る必要があり，施設設置箇所や沖波の諸元を変更するたびに屈折図を作図しなおす手間がかかっていた。

そこで，波のエネルギー累加量および屈折図による波向線間隔を数値として算出し，波の変形をパソコン上で簡易に推算できるアプリケーション（以下，波変形アプリと称する）を開発した。また，波変形アプリによる推算結果を実海域での波浪観測結果と比較し，有用性を検討した。さらに，適切な波向線の間隔についても検討した。なお，波変形アプリの開発は，北海道留萌振興局による平成26年度留萌地区増毛津田屋生物調査委託業務および平成27年度留萌地区増毛古茶内増殖場技術資料作成

委託業務の一環として行った。

材料と方法

方向分散法による波変形過程（合田，1998；水産庁，2003）をFig.1に示す。海底の影響を受けない深海域の波（沖波）の波高 H_0 が、陸地によるエネルギーの減少および海底地形による屈折の影響により変化した仮想の沖波の波高を換算沖波波高 H_0' といい、次のとおり求める。

$$H_0' = \sqrt{\sum_{i=1}^n D_i(Kr_i \cdot Kd_i)} \cdot H_0$$

ここに D はエネルギー分担率， Kr は屈折係数， Kd は回折係数， n はエネルギーの分割数で、後述する計算点の前面に島や岬がないことから原則に従って3分割とした。

任意の計算点から沖波の入射方向に対し左右それぞれ 90° の範囲内にある陸地点のうち、沖波の入射方向から最も角度が小さくなる点をエネルギーカット領域と定める（Fig.2-A）。Fig.3はエネルギー累加曲線で、波浪のエネルギーが波の主方向の回りに分布している状況を、波の総エネルギーに対する累加百分率で表したものである。Fig.3中の S_{max} は方向集中度パラメータで、値が大きいほど波のエネルギーの方向的な集中度が高く、沖波の波形勾配（ H_0/L_0 ）によって次の値を与える。

$$H_0/L_0 > 0.03, \quad S_{max} = 10$$

$$0.03 \geq H_0/L_0 > 0.015, \quad S_{max} = 25$$

$$0.015 \geq H_0/L_0, \quad S_{max} = 75$$

波高計算を実行する地点（以下、計算点と称する）にエネルギーカット領域を除いたエネルギー量が作用するとして、このエネルギー量を n 等分し、それぞれのエネルギー量をエネルギー分担率とする。分割したそれぞれのエネルギーの中間値に相当する入射角度を新たな3方向からの沖波の入射角度として、3方向それぞれについ

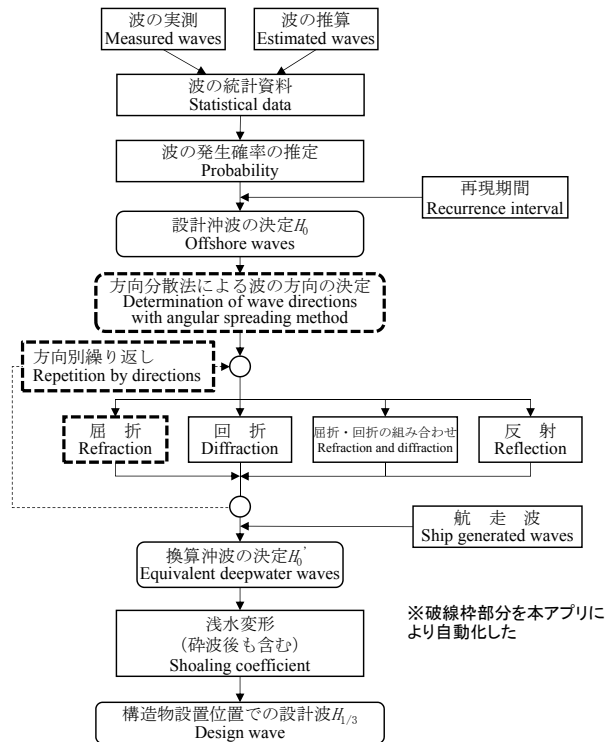


Fig.1 Calculation procedure for design wave.

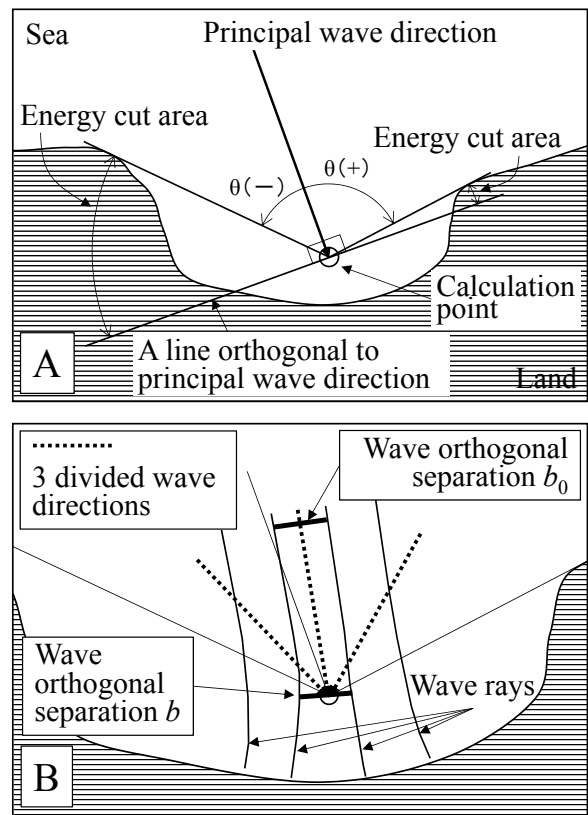


Fig.2 A: Energy cut area by land. B: Determination of wave orthogonal separation b_0, b .

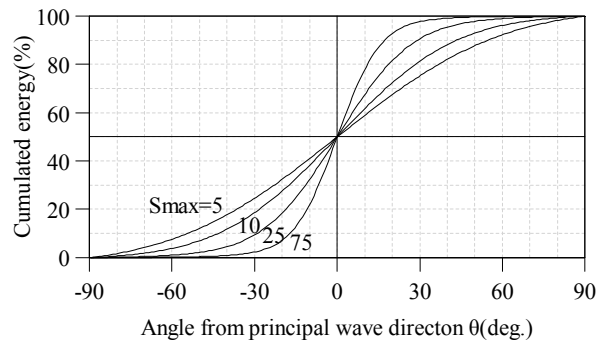


Fig.3 Cumulated energy curve. S_{max} is spreading parameter.

て波向線を描画する（例えば、 $S_{max}=25$ で、エネルギーカット領域が -30° 以下、 40° 以上だとすると、エネルギー量は10%~95%の85%で、これを3分割するとエネルギー分担率は、それぞれ28.3%となる。これら分割したエネルギーの中間値は24.2%(10%~38.3%)、52.5%(38.3%~66.6%)および80.8%(66.6%~95%)で、新たな波の3方向は、 -16° 、 2° および 19° となる)。Fig.2-Bに計算点を挟む2本の波向線と波向線間隔 b_0 、 b の概要を示す。波向線はスネルの法則に従って水深の変化にともない屈折し、水深の浅い方へ向きを変える。波変形アプリでは、この法則に則って微少な距離ごとに新たな波向を計算するが、計算点の近傍における波向のベクトルと、そのベクトルの基点から計算点までのベクトルとのクロス積を計算し、計算点が波向線の進行方向に対し左右どちらに位置するかを逐次把握しておく。また、合わせて波向線と計算点との距離を計算することで、計算点との距離が最短となる、計算点を挟む2本の波向線が選定できる。さらに、波向が屈折しても計算点を挟む2本の波向線を得られるよう、一方向につき複数本の波向線を描画する。得られた2本の波向線について、沖側（深海領域）における間隔 b_0 と計算点における間隔 b を用いて屈折係数 K_r を次のように定める。

$$K_r = \sqrt{\frac{b_0}{b}}$$

計算点における波向線間隔 b は、計算点を挟む2本の波向線と、計算点を通る直線との2つの交点間の最短距離とした。計算点を通る直線は、傾きを変化させ、交点間が最短となるよう決定した。波向線間隔 b_0 は深海領域における2本の波向線の法線方向の距離とした。なお、計算点は施設を設置する前の沖に向かって開けた自然海岸であるため、波が島や防波堤の背後に回り込む回折現象は無視できるので、回折係数 $K_d=1$ として波高変形には影響を及ぼさないとした。また、反射および航走波は条件外として無視した。

H_0' は波が水深の浅い領域に侵入することで地形の影響を受ける。これを浅水変形とよび、計算点の波高 $H_{1/3}$ は浅水係数 K_s を用いて次式で表される。

$$H_{1/3} = K_s H_0'$$

$$K_s = 1 / \sqrt{\left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh}\right) \tanh kh}$$

ここに、 k は波数で $k=2\pi/L$ 、 h は水深、 L は波長である。さらに波の高さや周期、海底勾配等の諸条件によっては碎波する場合があります、上述の K_s とともに、水深 h と沖波

波長 L_0 の関係から次の式により H_0' に各係数を乗じて計算点の有義波高 $H_{1/3}$ を求める。

$$H_{1/3} = \begin{cases} K_s H_0' & : h/L_0 \geq 0.2 \\ \min\{(\beta_0 H_0' + \beta_1 h), \beta_{max} H_0', K_s H_0'\} & : h/L_0 < 0.2 \end{cases}$$

ここに $\min(a,b,c)$ は a,b,c のうちの最小値とする。各 β の値はそれぞれ次式より求める。

$$\beta_0 = 0.028 (H_0'/L_0) - 0.38 \exp(20 \tan 1.5\phi)$$

$$\beta_1 = 0.52 \exp(4.2 \tan \phi)$$

$$\beta_{max} = \max\{0.92, 0.32 (H_0'/L_0) - 0.29 \exp(2.4 \tan \phi)\}$$

ここに $\max(a,b)$ は a,b のうち最大値とする。 ϕ は海底の傾斜角である。

開発した波変形アプリは、これら一連の手順を計算するものである。開発言語にはEmbacadero社のDelphi10.2を用い、作成したアプリケーションはWindows上で作動する。波変形アプリでは、計算点を含む周辺海域の水深データ（海底地形図）および計算点より沖側の地点における波（沖波）の諸元（波高、周期および波向）を用いる。

波変形アプリの有効性の検証のため、実測した沖波を基に波変形アプリで波高を推算し、計算点における波高の実測値との比較を行った。海底地形図として、増毛町古茶内海域の漁場図（平成6年旧留萌支庁作成）から読み取った、格子状（20 m間隔）の水深データを用いた。このうち同海域内の既存ウニ増殖礁近辺については、留萌振興局から詳細な水深測量データの提供を受け、これを格子状（20 m間隔）の水深データに変換して用いた。水深データを基に作図した等水深線図をFig.4に示す。波高・波向・流速計（アイオーテック社製WaveHunter 04および08）をFig.4中の沖側観測点（a点、水深25 m）および陸側観測点（b点、水深5 m）に設置して、2015年6月11日から2015年7月20日までの期間、

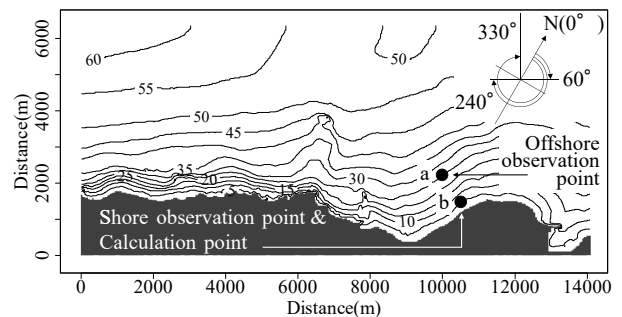


Fig.4 Bottom contour map surrounding Kochanai district, Mashike. a) offshore observation point. b) shore observation and calculation point.

1 hごとに10 min, 0.5 sのサンプリング間隔で波高, 周期および波向を観測した。1 hごとの観測値を1つのデータセットとし, このデータセットごとに統計処理により有義波の波高, 周期および主波向を得た。沖における波向線の間隔 b_0 は, 小さすぎると計算点において想定している施設の幅を捉えられず, 大きすぎると波向線が陸地境界によって途切れる可能性がある。そこで, 最適な波向線間隔を検討するため, 波変形アプリの画面上で10, 25, 40および55 pixels (pixelは波変形アプリの画面上における描画の最小単位。それぞれ実距離55, 138, 220および303 m相当)と設定し, それぞれについて計算を実行した。また, 計算点(陸側観測点)における波向についても検討するため, 分割した3方向の波向線それぞれについて波向線間隔を求めた直線の傾きを算出し, 3つの傾きの平均を計算点における波向とした。

北を 0° として時計回りに角度をとると, 今回用いた海底地形図の上方は 330° にあたり, 主波向および分割後の新たな波向が $60^\circ \sim 240^\circ$ にある場合, 理論上計算ができない (Fig.4)。そのため, 全934個の沖波データのうち波向が上記の範囲にある151個のデータを除いた783個のデータで比較を行った。

なお, 波速 C , 波長 L および周期 T の間には次の関係がある。

$$C = L/T$$

また, 波長 L は, $L=2\pi/k=gT^2/2\pi \cdot \tanh(2\pi/L \cdot h)$ で表され, 数値計算により求められる。今回得られた沖波の平均周期は4.7 sで, これを沖波の周期 T とみなし, 沖側観測点の水深 h を25 mとすると, 上式より波速は約7.3 m/sとなる。この場合, 沖側観測点と陸側観測点の間は約930 mであったので, 波が沖側観測点を通してから陸側観測点に到達するまで約2 minかかることになる。このため, 沖と陸の観測点で同じ波を観測した場合, 2 minのずれが生じていることになるが, 観測時間を10 minとしていること, 2 minで波浪の状況が大きく変化することはないことから, 沖・陸側観測点での同時刻のデータを比較することとした。

結果

沖側観測点および陸側観測点における波浪観測結果のうち, 波高の分布をFig.5に, 周期の分布をFig.6に示す。波高, 周期とも, 沖と陸の観測結果はほぼ同様な変動を示したが, スパイク状の荒天時を除く静穏な期間では, 波高, 周期とも沖側観測点での値が陸側観測点のものより大きかった。観測期間中の荒天時には波高および周期

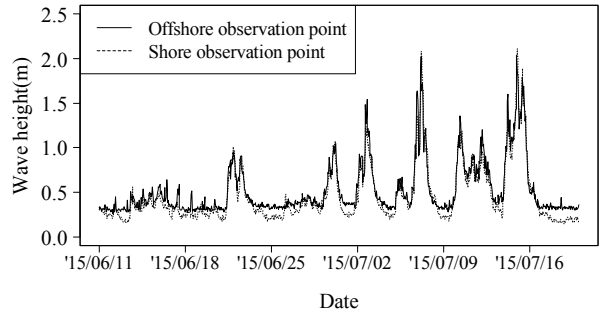


Fig.5 Significant wave height at offshore and shore observation points from June 11 to July 20, 2015.

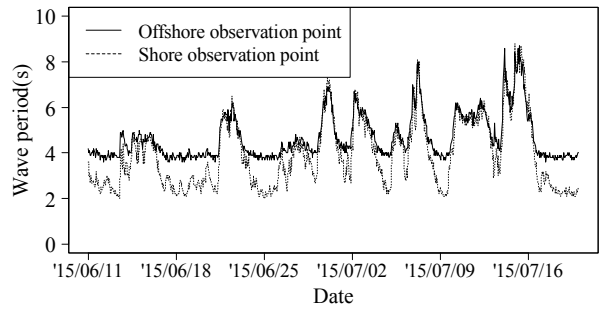


Fig.6 Significant wave period at offshore and shore observation points from June 11 to July 20, 2015.

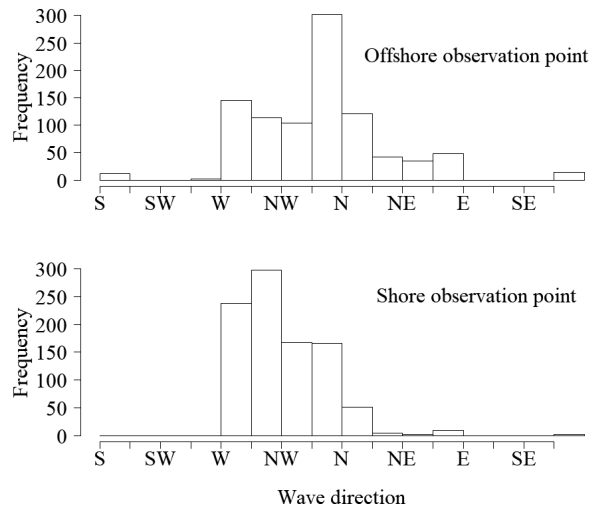


Fig.7 Frequency of significant wave direction at offshore and shore observation points from June 11 to July 20, 2015.

Table 1 The mean wave height and the mean wave period at offshore and shore observation points from June 11 to July 20, 2015.

	Wave height	Wave period
	Mean±S.D.(m)	Mean±S.D.(s)
Offshore observation point	0.53 ± 0.31	4.7 ± 1.00
Shore observation point	0.46 ± 0.33	3.9 ± 1.52

は沖・陸側観測点でほぼ同程度の値を記録し、波高2 m、周期8 sを超える、やや大きめの時化が記録された。またFig. 7に沖および陸側観測点における波向の頻度分布を16方位で示す。波向の最頻値は沖側観測点で北北西、

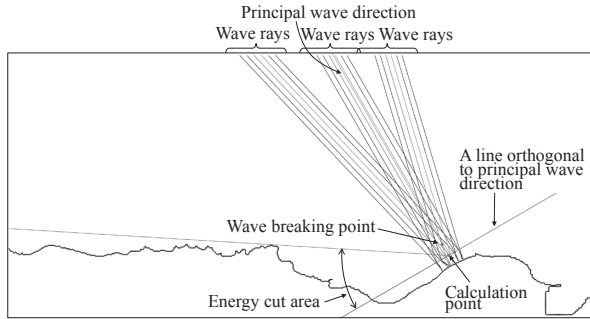


Fig. 8 A screenshot example of wave height calculation results with the wave height deform application.

陸側観測点で西北西であった。また、沖側観測点では北から東にかけての波の分布が、陸側観測点より多かった。

沖側観測点および陸側観測点における毎時間ごとの有義波の波高および周期について、観測期間を通じた平均値を比較した (Table 1)。その結果、平均波高および平均周期とも、陸側観測点の方が沖側観測点より有意に小さかった (ともに $p < 0.01$, Welch's t -test)。

沖側観測点における有義波を沖波として、波変形アプリにより陸側観測点における波高を推算した。計算結果の画面の一例をFig. 8に示す。計算結果画面ではエネルギーカットの範囲、分割した新たな波向、碎波した場合は碎波地点が表示される。また、波高、屈折係数などの計算結果はcsvファイルに自動保存される。

波高の推算値と、その沖波データに対応する陸側観測点における実測値との関係を、沖側 (深海領域) におい

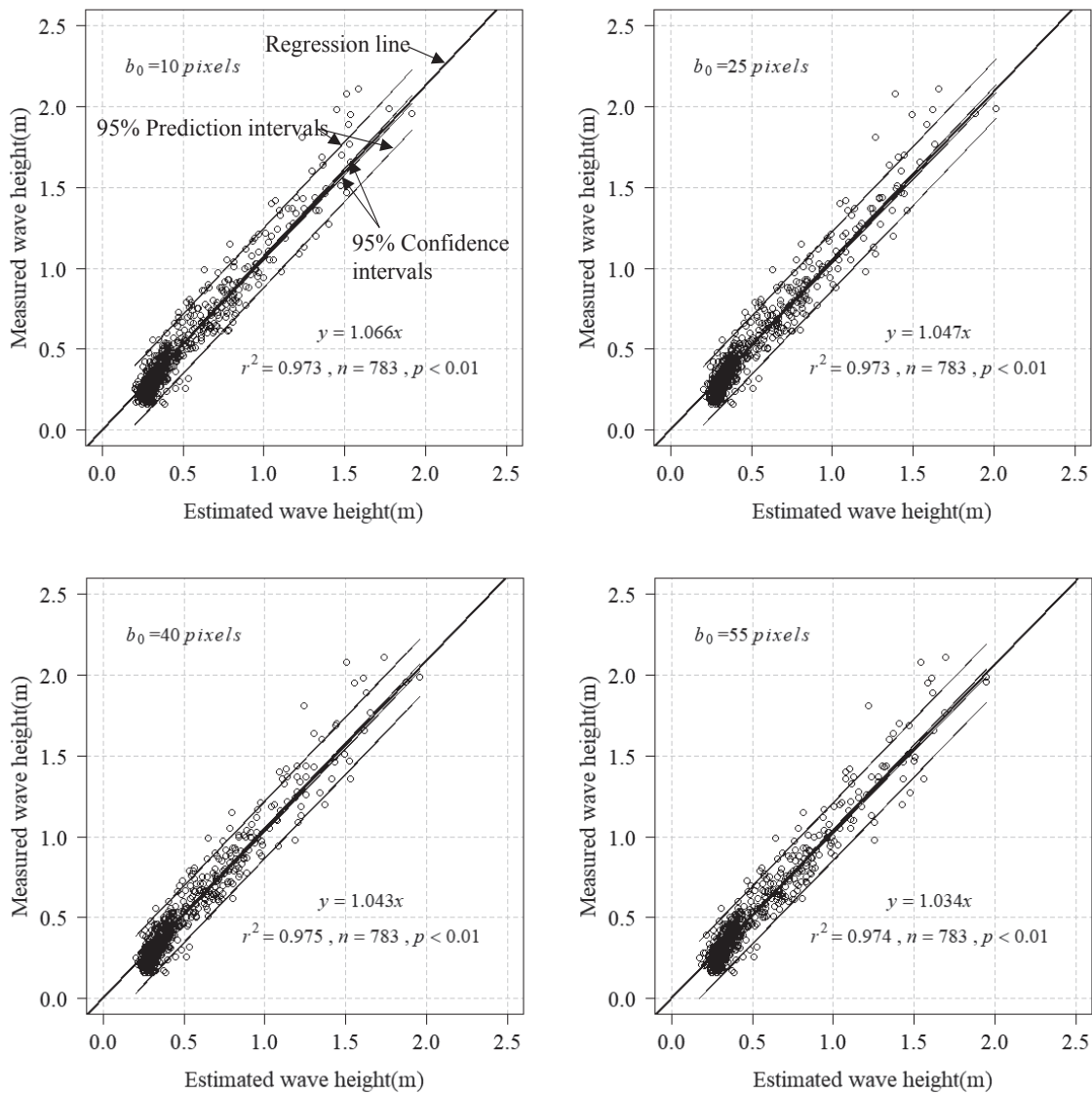


Fig. 9 Relationship between estimated wave height and measured wave height.

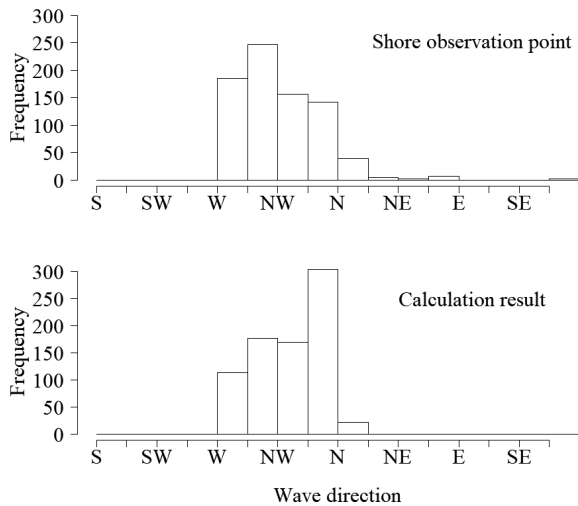


Fig. 10 Frequency of significant wave direction at shore observation point based on calculated results.

る2本の波向線の間隔別にFig. 9に示す。推算値と実測値を2群の独立した変数、切片を0として回帰分析を行った。その結果、回帰係数は1.066 ($r^2=0.973$; $b_0=10$ pixels), 1.047 ($r^2=0.973$; $b_0=25$ pixels), 1.043 ($r^2=0.975$; $b_0=40$ pixels) および1.034 ($r^2=0.974$; $b_0=55$ pixels) であった。

計算点における波向の頻度分布を、陸側観測点における計算条件外の波向を除外した実測値とともにFig. 10に示す。計算結果では、計算条件のため東～南よりの波は出現しなかったが、実測では東北東や南南西の波向が観測された。また、Fig. 7の沖波の実測値と比較すると最頻値は北北西で同じであったが、北および西の頻度が低下し、西北西および北西の頻度が高まった。

考 察

今回の結果では、 $b_0=10$ pixelsの場合で推算値と実測値との関係における回帰係数が1.066であり、回帰係数1.000が最も推定精度が高いとすると5%以上の誤差となった。一方で $b_0=25\sim 55$ pixelsでは回帰係数は1.034～1.047であり、誤差は5%以下といずれの場合でも本波変形アプリの推算精度は高いと考える。ただし、これ以上 b_0 を大きくすると、沖波の波向によっては波向線が計算点付近に到達する前に陸地の境界に接してしまい、正しく波向線間隔 b を捉えられない場合があった。これは、エネルギーカットに伴うエネルギー分担率に従った新たな波向に対し、その垂線方向における計算点と陸地境界との距離を、沖の波向線間隔 b_0 が超えた場合に顕著であった。また、計算点は一つの点であるが、既存の囲い礁は、1基の幅が浜なりに30 m程度の設計であることが多い。 $b_0=25$ pixelsは、実距離で138 mに相当するので、波向線

間隔 b_0 は想定している施設の5倍程度以上、かつ、より広い範囲の波向の情報を取り入れるため、計算点と陸地境界との距離以下とすることで精度の高い推算結果が得られるものと思われる。

すべての b_0 の場合において、回帰係数は1以上で、推算値は実測値よりも過小に推定された。その理由の一つとして、実海域には海底地形図では捉えきれない微少な地形変化があり、これが屈折率、浅水係数および碎波の有無に影響を及ぼしていたことが考えられる。そのため、より詳細な海底地形図を用いれば推定精度の向上が期待できるが、それに伴いデータ量は増大して、その準備が煩雑になることが予想される。一方で、格子間隔が大きすぎると推定精度の低下が懸念されるため、作業量と推定精度を勘案すると少なくとも設計を想定している施設の大きさよりも小さな格子間隔であることが望ましい。

波向線はスネルの法則に従って水深の変化にともない屈折し、海岸線に垂直な方向にその向きを近づけて進行する。陸側観測点付近の海岸線は約 29° で、これに垂直な方向は 299° （西北西～北西）となる。Fig. 7の沖波の波向に比べFig. 10の計算結果において西北西および北西の頻度が高まったのは、この現象によるものと思われる。

陸側観測点における波向の実測と計算による波向で頻度分布が異なっていた (Fig. 10)。また、Table 1に示したとおり、沖側観測点と陸側観測点における周期の実測値が異なっていた。本波変形推定手法は単一波が沖から陸に来襲するときの波高、波向の変形を推定する手法であり、基本的に周期は変化しないものと仮定している。しかし、実海域では、波は不規則波であり、様々な波高、周期、波向の波が合成されているものであり、沖側観測点と陸側観測点での周期の観測値の違いからも明らかとなっており、本手法で扱った単一波の変形過程とは異なる変形作用があったと考えられる。このような不規則波を解析の対象とし、今回、考慮しなかった回折現象を取り入れる場合、エネルギー平衡方程式、非定常緩勾配不規則波動方程式、ブシネスク方程式などによる数値計算を行うことによって、詳細に精度よく推算することは可能である (海岸工学委員会, 1994)。しかし、これらの数値計算を実行するには専用のアプリケーションが必要である上、専門的な知識をもって諸条件を設定する必要がある。本波変形アプリは、不規則波も考慮した数値計算ほど精度は高くないものの、これまで手作業により設計図面を作成していたものが、簡易で、早く結果が得られ、かつ、計算点を自由に設定できるなど有益なものであると考える。

通常の施設設計においては、主波向が岸から沖へ向かう波は評価対象外となるため問題なく本波変形アプリを

運用できる。しかし、波変形過程においてエネルギー分担率に従って分割した後の波向が、波変形アプリ画面上において下方から上方へ向かう波向は計算ができない。その場合には、水深データの上方向きを回転させるなど工夫が必要となる。

なお、漁港・漁場の施設の設計参考図書2015年版（水産庁、2016）では波向を分割する分担率 D が無くなっており、方向分散という考え方は回折係数 K_d を求めるのに使っている。また、屈折係数 K_r は沖波の波向1方向のみで描画し、 K_d および K_r を掛け合わせて波高変形を求めている。今後は本波変形アプリの計算プログラムを改変、バージョンアップし、新しい計算方法との整合性の検証を行い、さらなる推定精度向上に努めたい。

謝 辞

増毛漁業協同組合の職員諸氏には、観測機の設置、用船の手配、漁業との調整等を行っていただいた。ここに記してお礼申し上げます。

引用文献

吾妻行雄. 北海道日本海南西部沿岸の磯焼け. 北水試だより 1995 ; 31 : 3-9.
藤田大介, 町口裕二, 桑原久実. 「磯焼けを起こすウニ」.

成山堂書店, 東京, 2008.

海岸工学委員会研究現況レビュー小委員会. 「海岸波動【波・構造物・地盤の相互作用の解析法】」. 土木学会, 東京, 1994.

川井唯史, 金田友紀, 新井章吾, 桑原久実. 磯焼け地帯におけるウニ侵入防止フェンスによるホソメコンブ群落の造成とキタムラサキウニ生殖巣の発達. 水産工学 2002 ; 39(1) : 15-20.

川俣 茂. 磯根漁場造成における物理的攪乱の重要性. 水産工学 1994 ; 31(2) : 103-110.

桑原久実, 金田友紀, 川井唯史. 北海道南西部磯焼け地帯の囲い礁によるホソメコンブ群落の形成条件. 海岸工学論文集 2000 ; 47 : 1181-1185.

桑原久実, 寺井 稔, 畑谷 勇, 酒向 章. ウニ漁場造成に係る事前評価手法の開発とその運用. 海岸工学論文集 2004 ; 51 : 1091-1095.

合田良實. 「わかり易い土木講座17 二訂版 海岸・港湾」. 彰国社, 東京, 1998.

水産庁. 「改訂磯焼け対策ガイドライン」. 全国漁港漁場協会, 東京, 2015.

水産庁. 「漁港・漁場の施設の設計の手引き 2003年版」. 全国漁港漁場協会, 東京, 2003.

水産庁. 「漁港・漁場の施設の設計参考図書2015年版」. 全国漁港漁場協会, 東京, 2016.