

波浪観測の位置が海面抵抗係数の逆推定精度に与える影響について

EXAMINATION OF A WAVE OBSERVATION POSITION IN INVERSE ESTIMATION OF THE SEA SURFACE DRAG COEFFICIENT

横田雅紀¹・橋本典明²・西村大右³

Masaki YOKOTA, Noriaki HASHIMOTO, Daisuke NISHIMURA

¹正会員 工修 九州大学助教 工学研究院環境都市部門 (〒812-0395 福岡県福岡市西区元岡744)

²フェロー 工博 九州大学教授 工学研究院環境都市部門 (〒812-0395 福岡県福岡市西区元岡744)

³正会員 工修 鹿児島市役所 (〒892-0816 鹿児島県鹿児島市山下町 1 1 - 1)

A wave prediction model including data assimilation method 'ADWAM' was improved to estimate the appropriate sea surface drag coefficient in high speed winds. The accuracy of the estimated coefficients was evaluated for several numerical examination cases where the distance between wave observation station and strong wind condition area is different. As a result, it can be confirmed that the sea surface drag coefficient deduced by the proposed inversion method is accurate enough within the wind range from weak wind speed to the maximum wind speed observed at the wave observation station. Accuracy tends to decrease with the increase of the distance between wave observation station and typhoon track. To improve the accuracy of the inverse estimation further, some additional information such as wave direction, period is considered to be necessary.

Key Words : Data assimilation, adjoint WAM, identical twin experiment

1. はじめに

第三世代波浪推算モデルWAMのソース項の中で風から波へのエネルギー輸送項にはJanssenの式のほかWuの式や本多・光易の式が提案されている¹⁾が、いずれの算出式とも概ね風速25m/s以下の風データに基づいて検討されたものであるため、飛沫の発生を伴うような超強風下では波高が過大に推算されることが懸念される^{2), 3), 4)}。強風速下におけるエネルギー輸送メカニズムの解明は、今後の地球温暖化に伴う台風の強大化により甚大化が懸念される高波・高潮災害等を予測するうえで非常に重要なものと考えられる。しかしながら、暴風時における大気・海洋間の運動量輸送過程は複数の物理過程が複雑に組み合わさったものであり、実験や観測でこれらの物理過程を個別に検討することは一般に困難である。

これに対し、著者らは波浪推算モデルWAMにデータ同化手法 (4次元変分法) を適用したADWAMを用い、波高の観測値から海面抵抗係数を風速の関数として逆推定する手法の開発を進めている。超強風域の直下を波浪観測地点とした数値実験では開発したモデルの有効性を確認している⁵⁾ものの、実海域への適用に際しては超強風の発生域を狙った波浪観測が課題となる。一方、時空間を逆方向に遡って計算を進

める4次元変分法では、強風域外の観測地点であっても、強風域で発達し伝播してきた波高が観測されれば、強風速下の海面抵抗係数を逆推定できる可能性がある。本研究では、本データ同化手法の現地海域への適用に向けて、妥当な推定結果を得るために必要となる適切な観測地点の設定方法を明らかにすることを目的とし、波高観測地点を種々変化させて数値実験を行うことにより、波高観測地点の位置が海面抵抗係数の逆推定精度に及ぼす影響について検討した。

2. データ同化手法

データ同化は、観測が困難なパラメータの最適値について、これまで測得されている種々の観測データを手がかりとして、数値モデルを介してその内部構造を推定する逆問題解法である。このうち本研究で用いる4次元変分法は、最尤推定法を基礎とし、同化期間 ($t = 0 \sim T$) に観測された全てのデータを用いて、次式で定義される評価関数の最小値を求めることで、力学的整合性を満たしつつ自動的に対象とする状態変数の最適推定値を得るものである⁶⁾。

$$J(x) = \sum_{i=0}^T \frac{1}{2} (H_i(x) - y_i)^T R_i^{-1} (H_i(x) - y_i) \quad (1)$$

ここで x は状態変数, y_i は観測値, R_i は誤差共分散行列を表す. H_i は状態変数を観測値に変換する観測演算子であり, モデル空間から観測空間への内挿を含む.

この評価関数の最小値を得るためには以下に示す評価関数の勾配 ($g = \partial J / \partial x$) を求める必要がある.

$$g = H_T^T(x) R_T^{-1} \sum_{i=0}^T (H_i(x) - y_i) \quad (2)$$

H_i は H_i の接線形演算子であり, H_i^T を H_i のアジョイント演算子と呼ぶ. こうして得られた評価関数の勾配をもとに繰り返し計算を行うことで, 評価関数の最小値を求めることにより状態変数の最適値を推定するものである. この場合, 評価関数に拘束条件としてモデルが組み込まれているため, 同化結果は波浪推算モデルで考慮された物理に従い, 同化期間内の観測データに整合した推定値が得られる.

本研究では風速 U_{10} に関する離散的な一定値関数で定義した海面抵抗係数 (図-1) を状態変数とするため, 風速の分割数が未知パラメータ数となり, パラメータ数を増せば解の分解能は向上するが推定値が不安定になりやすい.

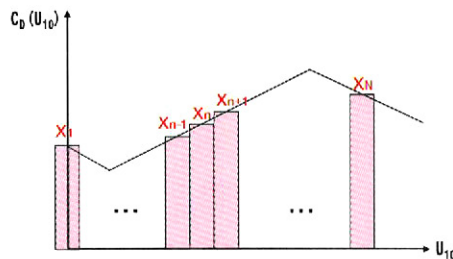


図-1 離散的な一定値関数で定義した海面抵抗係数

そこで C_D が U_{10} に関する連続関数と仮定し, 図-1 に示す離散化された C_D の状態変数 x_n が局所的には滑らかな連続関数であるとする先験条件 ($x_n - x_{n-1}$ が小さい) を背景誤差として評価関数に付加した.

$$J(x) = W \sum_{n=1}^N (x_n - x_{n-1})^T B_i^{-1} (x_n - x_{n-1}) + \sum_{i=0}^T (H_i(x) - y_i)^T R_i^{-1} (H_i(x) - y_i) \quad (3)$$

ここに B_i は背景誤差共分散行列, W は観測誤差項と背景誤差項の間の重み係数である.

以下の検討では同化の繰り返し計算回数は10回とし, パラメータについては1~50m/sまでを1m/s間隔の50個とし, 重み係数 W は 10^1 を与えた.

3. 海面抵抗係数の逆推定

(1) 計算条件

数値シミュレーションの対象海域は矩形の深海域 (格子間隔0.5度, 10度四方) とした. また, 風速30m/s以上の暴風を再現するため, 波浪推算に用いた海上風は, 台風モデルにより中心気圧850hPa, 最大風速半径100km, 移動速度50km/hの台風が北上し, 海域中央の1度西を台風が通過する条件で作成し, 1時間毎の風速分布を与えた.

対象海域に台風が侵入した直後 ($t=24h$) の風速分布を図-2 (a) に, 対象海域の中央における風速の時系列を図-2 (b) に示す. 対象海域の中央では, 最大で風速45m/s程度の風が吹いていることがわかる.

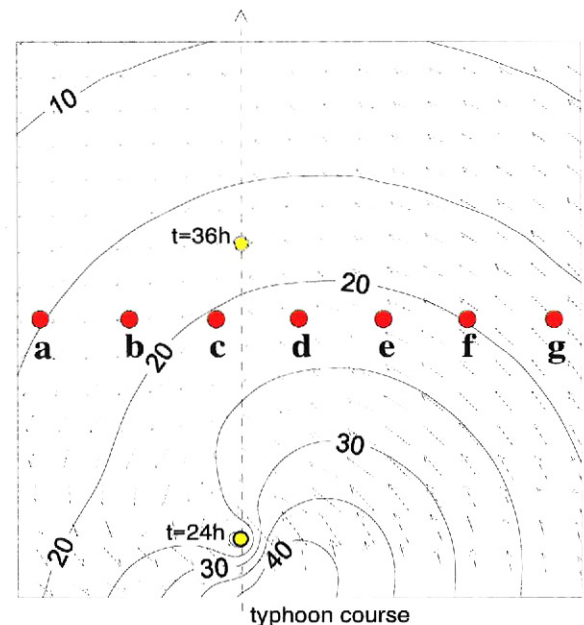


図-2 (a) 風速分布の一例 ($t=24h$)

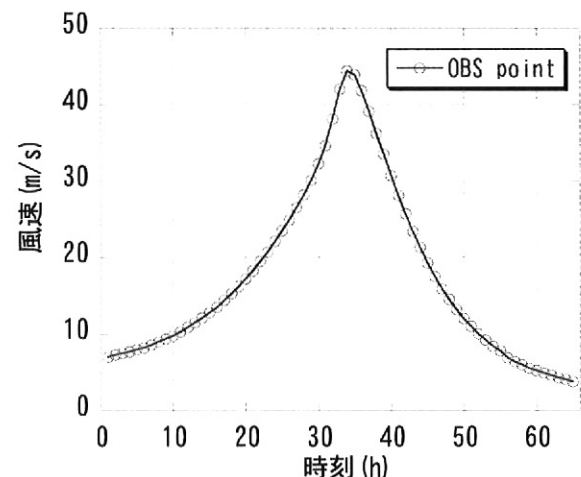


図-2 (b) 対象海域の中心における風速の時系列

(2) 観測地点別の逆推定結果

本検討では強風速域でパラメータの変動傾向が大きく変化する場合であっても高精度の逆推定が可能なモデルであることを確認する目的から, 目標値 (真値) として風速30m/s以下では本多・光易の式,

風速 30m/s 以上では単調減少する一次関数を仮定した（図-3 参照）。また、データ同化において使用した観測値は c_d に目標値を与えた場合の波浪推算結果（1 時間毎の波高データ 65 個）とした。観測地点は図-2 (a) 中に示す 1.5 度間隔（約 150km）で配置した a, b, c, d, e, f, g の 7 ケースとし、各地点の観測波高をデータ同化することにより、状態変数が

真値とは異なる 2 種類の初期値から出発して、実際に目標値（真値）に近づくことを確認した。

初期値を 1×10^{-3} で一様とした場合に逆推定された海面抵抗係数を図-3 右に、初期値を本田・光易の式とした場合に逆推定された海面抵抗係数を図-3 左に示す。ここで図-3 中の矢印は各観測地点で発生する風速の上限値を示す。

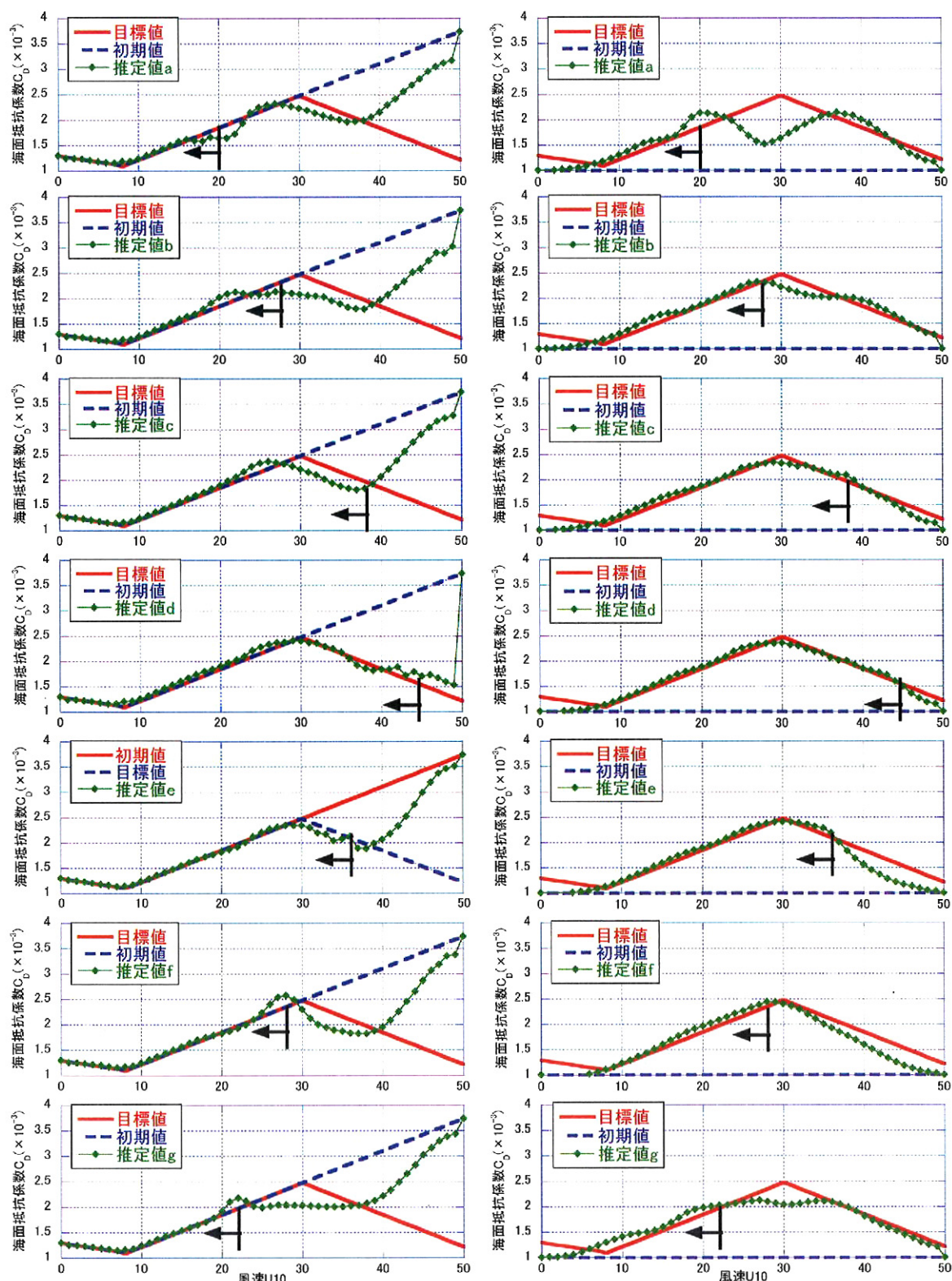


図-3 逆推定された海面抵抗係数

初期値を 1×10^{-3} で一様とした場合についてみると、各地点とも状態変数（海面抵抗係数）は初期値から目標値周辺に修正される傾向がみられており、特に各地点で発生する風速範囲内の海面抵抗係数については、海面抵抗係数が風速の関数として精度良く逆推定されている。また、比較的台風中心の移動経路から近い地点 b, c では観測地点で発生していない風速域まで海面抵抗係数が精度良く逆推定されており、他の強風域で発達した波が伝播し対象地点で観測されたために修正されたものと考えられる。これに対して台風中心の移動経路から比較的離れている地点 a, e, f, g では発生範囲の風速を超えると推定精度が低くなる傾向がみられている。

初期値を本田・光易の式とした場合についてみると、初期値を一様とした場合と同様に各地点で発生する風速範囲内の海面抵抗係数については海面抵抗係数が風速の関数として精度良く逆推定されている。発生範囲外の風速域における推定精度については、初期値を一様とした場合とは異なる地点で精度良く推定される傾向がみられたものの、台風中心の移動経路から離れた地点gで特に推定精度が低くなっており、強風域からの距離が大きすぎる場合には、逆推定が困難であるものと考えられる。

観測地点で発生していない風速域における推定精度が、初期値の設定により異なる傾向を示した地点については、一要因として、本実験では10回としている同化計算の繰返し回数が十分でなかったことが想定される。初期値の設定によらず、精度良く推定するためには、更なる工夫が必要であるといえる。また、いずれを初期値とした場合においても精度良く逆推定できない風速域が生じている地点については、本検討で設定したパラメータ数50を小さく設定することで一定の改善効果が期待されるものの、強風発生域からの距離が大きすぎるために波高が減衰していることや、多方向からの波が干渉したことが想定される。

(3) 推算波高の比較

図-4は観測地点で発生していない強風域において目標値を精度良く逆推定できていなかったケースの一例として、初期値一様から地点aを観測地点として同化を行ったケースにおける地点a, bでの推算波高の時系列を示したものである。

観測地点におけるデータ同化後の推算波高は初期値を用いたデータ同化前の推算波高から修正され、目標値を用いた場合の観測波高近くの値に修正されているものの、観測地点から離れた地点bでは波高が十分に修正されていない。このことから、観測値を波高のみとする条件では評価関数に与えるべき観測情報が十分ではないことが示唆される。

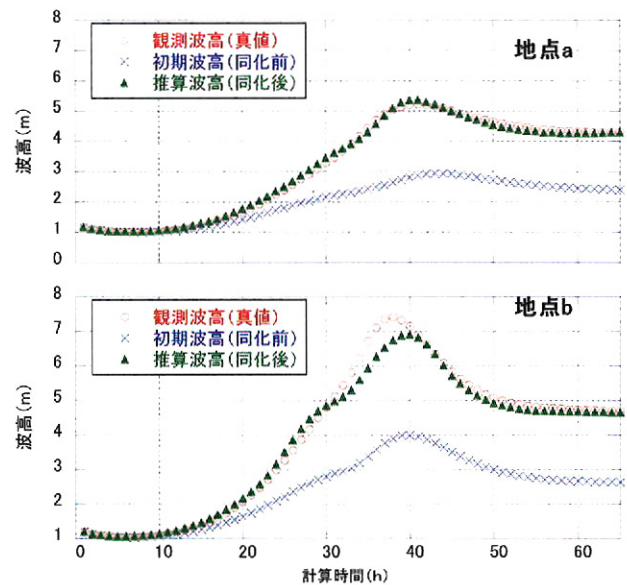


図-4 推算波高の一例（初期値一様、観測地点a）

(4) 推定精度の改善に関する検討①

観測地点で発生していない風速域の海面抵抗係数を精度良く推定する方法として、観測地点を複数にすることにより、観測情報に波向や伝播に伴う波高減衰などの情報が加えることが期待される。そこで、観測地点で発生していない風速域の推定精度が低い地点について、観測地点を複数にすることによる精度の向上効果について確認を行った。

図-5は図-2(a)中に示す地点e及び地点e'の0.5度東の地点e'の2地点の観測値をもとに初期値を本田・光易の式としてデータ同化を行った際に推定された海面抵抗係数を示したものである。隣り合う2地点としたが、推定結果に大きな改善はみられなかった。ここでは示していないが、推定精度の異なる複数の地点における観測波高を用いてのデータ同化も試みたが、比較的推定精度が高い地点の推定結果と同様の結果となる傾向がみられ、観測地点を複数にすることによる相乗効果はみられなかった。

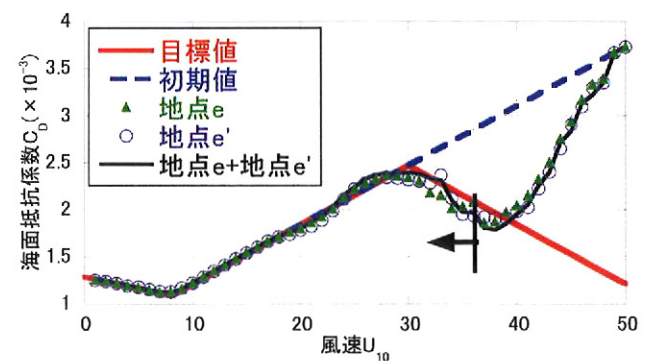


図-5 複数地点により逆推定された海面抵抗係数

(5) 推定精度の改善に関する検討②

観測地点に多方向から周期の異なる波が伝播する地点では観測情報に周期や波向などの情報を加える必要があるものと考えられる。ここでは波高と周期を観測情報としてデータ同化を行うことによる逆推定精度の改善効果について検討を行った。

図-6上は地点aについて初期値一様から波高及び周期を同化した際に逆推定された海面抵抗係数、図-6下は地点gについて初期値を本多・光易の式として波高及び周期を同化した際に逆推定された海面抵抗係数を示したものである。地点aにおいては、波高のみを用いたデータ同化の結果と比べて逆推定精度が向上しているが、地点gでは大きな改善はみられなかった。

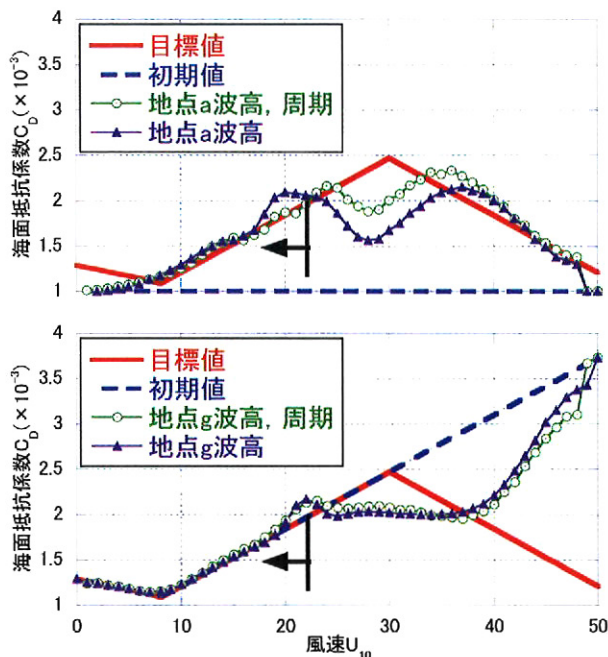


図-6 波高、周期を用いて逆推定された海面抵抗係数

十分な改善が得られなかった要因については、強風域からの距離が大きすぎるために推定精度向上が困難な地点であったことが考えられる。今後は、50~100km程度と比較的近距離に強風域が存在し、波浪が伝播してくる条件で検討を行う必要があるものと考えられる。

また、現在の波浪観測技術及びデータ解析技術では、有義波高、有義周期だけでなく、方向スペクトルなどの情報を取得することが可能であることから、今後は、方向別の波浪情報を用いてデータ同化を行うことで、さらに高精度な逆推定が可能になるものと期待される。

4. おわりに

本データ同化手法の現地海域への適用に向けて、適切な観測地点の設定方法を明らかにすることを目的とし、波高観測地点を種々変化させてデータ同化の数値実験を行った。主な結果は以下に示すとおりである。

- ・観測地点で発生する風速範囲内の海面抵抗係数は任意の初期値から目標値近くに精度良く逆推定される。
- ・観測地点で発生していない風速範囲における海面抵抗係数は、逆推定の精度が不十分となるケースがみられた。
- ・観測地点を複数にすることによる逆推定精度の改善効果は小さいものと考えられた。
- ・波高に加え、周期を同化することにより、逆推定精度が向上することが確認できた。

以上より、現地の波浪観測地点で発生した風速域の海面抵抗係数は精度良く逆推定されることが期待できる。一方で、超強風域における海面抵抗係数を明らかにするためには、波高や周期などの情報だけでなく、方向スペクトル成分を観測情報とするなどの工夫により、他の海域で発生し伝播されてきた波浪の観測情報から逆推定が可能なモデルに改良することが重要と考えられる。

謝辞：本研究は科学研究費補助金（課題番号：20360222、代表者：橋本典明）の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 本多忠夫・光易恒：水面に及ぼす風の作用に関する実験的研究，第27回海岸工学講演会論文集，pp. 90-93, 1980
- 2) Andreas E. L. : An algorithm to predict the turbulent air-sea fluxes in high-wind, spray conditions, 12th Conf. on interaction of sea and atmosphere, CD-ROM, 3.4.
- 3) Powel, M.D., Vickery, P.J and T.A. Reinhold: Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones, Nature, 422, pp.279-283,2003
- 4) 横田雅紀，児玉充由，橋本典明，田中雄太，春元崇志，河合弘泰：気象擾乱時の波浪推算精度に関する基礎的検討，海洋開発論文集，No.1102, pp.7-8, 2005
- 5) 橋本典明，横田雅紀，川口浩二，吉松健太郎，河合弘泰：暴風時における海面抵抗係数の逆推定法の開発，海岸工学論文集，第56巻，pp181-185, 2009
- 6) Hersbach, H. Application of the adjoint of the WAM model to inverse wave modeling, J. Geophys. Res. Vol.103,(C5), pp.10469-10487, 1998
- 7) 橋本典明，川口浩二，松浦邦明，宇都宮好博：Adjoint WAM(cycle5)のデータ同化における評価関数の検討，海岸工学論文集，第50巻，pp. 186-190, 2003