# 暴風時における海面抵抗係数の逆推定法の開発

Development of an Inverse Estimation Method of Sea Surface Drag Coefficients under Strong Wind Condition

## 橋本典明<sup>1</sup> · 横田雅紀<sup>2</sup> · 川口浩二<sup>3</sup> · 吉松健太郎<sup>4</sup> · 河合弘泰<sup>5</sup>

## Noriaki HASHIMOTO, Masaki YOKOTA, Koji KAWAGUCHI Kentarou YOSHIMATSU and Hiroyasu KAWAI

The sea surface drag coefficient used in the energy transfer function is simply described as a linear function of wind speed extrapolated from weak wind to strong wind condition. Accordingly, the accuracy of estimated waves under strong wind conditions seems to be unreliable. To deduce appropriate drag coefficient in high speed winds, the data assimilation method is considered to be a powerful tool, and is applied to WAM. Then the validity of the new method was examined by numerical experiments. As a result, it is confirmed that the drag coefficient deduced by the model is accurate when the observation data is enough. It is also confirmed that the accuracy of the deduced coefficient can be improved by adding a priori condition if the observation data is not enough.

## 1. はじめに

波浪推算モデルにおいて,風から波へのエネルギー輸送過程の重要なファクターである海面抵抗係数 $C_D$ は,例えば式(1)(本多・光易,1980)のように,一般に風速 $U_m$ に関する1次式で与えられる.

 $C_{\scriptscriptstyle D} = (1 - 1.89 \times U_{\scriptscriptstyle 10} \times 10^{-2}) \times 1.28 \times 10^{-3} \qquad U_{\scriptscriptstyle 10} \le 8 \text{m/s}$  $C_{\scriptscriptstyle D} = (1 + 1.078 \times U_{\scriptscriptstyle 10} \times 10^{-1}) \times 5.81 \times 10^{-4} \qquad U_{\scriptscriptstyle 10} \ge 8 \text{m/s} \qquad \cdots \cdots (1)$ 

ただし、これらの実験式は概ね風速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、大災害をも たらすような超強風での適用には疑問が残る.事実、風 速30m/sを超える超強風下では*C<sub>D</sub>が減少*するという報告 (Powell ら、2003)がある.この*C<sub>D</sub>の減少*は、砕波や飛 沫の発生によるものと考えられている.この知見は、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,暴風時の波浪現象を検討しようとして も,暴風で砕波や飛沫を伴う海面を対象として理論的に 検討することは難しい.また,実験的検討も施設整備面 で相当な困難が予想される.風速30m/sを越えるような 超強風を伴う台風を狙った観測を試みたとしても,有用 なデータを測得できる保証は無く,予算的目処も立ちに

1	フェロー	工博	九州大学教授工学研究院環境都市部門
2	正会員	工修	九州大学助教工学研究院環境都市部門
3	正会員	工博	(独法)港湾空港技術研究所海洋・水工部
			主任研究官
4	正会員	工修	いであ株式会社
5	正会員	工博	(独法)港湾空港技術研究所海洋・水工部
			海洋情報研究領域長心得

くいことから現実的ではない. さらに,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.

この様な状況で,大気・海洋間の運動量輸送過程を定 量的に把握し検討する方法として,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の利用が有望 である.本研究では,数値モデルを介して複雑なシステ ムの内部構造を推定する立場から,これまでのシミュレ ーションによる演繹的な検討に加えて,データ同化技術 を利用した帰納的方法により大気・海洋間の運動量輸送 過程を解析する手法を開発することを目的とする.

## 2. 逆推定の方法

#### (1) 海面抵抗係数の離散化

ここでは先ず,第三世代波浪推算モデルWAMのエネ ルギー輸送項に用いられているJanssenの式を, C<sub>D</sub>をパ ラメータとする式形に変更した.さらに,海面抵抗係数 を風速U<sub>10</sub>に関する離散的一定値関数で定義する(図-1) ことにより,任意の分布形のC<sub>D</sub>を表現可能にし,後で述



図-1 離散的一定値関数で定義した海面抵抗係数

べる方法により,波浪観測データから波浪推算モデル WAMを介してC<sub>D</sub>を逆推定可能な方法を開発した.

### (2) データ同化手法の適用

本研究で用いるデータ同化手法(4次元変分法)は、 最尤推定法を基礎とし、次式で定義される評価関数の最 小値を求めることで対象とする状態変数の最適推定値を 得るものである(Hersbach, 1998).

ここで、xは状態変数、y<sub>t</sub>は観測値、 $\mathbf{R}_t$ は誤差共分散行 列を表す. $H_t$ 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.デー タ同化は同化期間 (t=0~T) に観測された全てのデータ を用いて状態変数の最適推定値を求めている.

評価関数の最小値を得るためには評価関数の勾配 (g= *∂ J/∂ x*)を求める必要がある.

$$g = H_t^T(x) \mathbf{R}_t^{-1} \sum_{t=0}^T (H_t(x) - y_t) \quad \dots \dots \dots (3)$$

H,はH,の接線形演算子であり、H,をH,のアジョイント 演算子と呼ぶ.このことから4次元変分法をアジョイン ト法という.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.

#### (3) 背景誤差項の設定

従来,データ同化手法が適用されてきた気象の分野で は,最適状態変数の近似値(第一推定値)が経験的に予 想可能であるため,先験条件として式(2)の右辺に背 景誤差で重み付けされた第一推定値x<sub>0</sub>と状態変数xの間 の距離を加えるのが一般的である.

$$J(x) = \frac{1}{2} (x - x_o)^T \mathbf{B}_t^{-1} (x - x_o) + \sum_{i=0}^T \frac{1}{2} (H_i(x) - y_i)^T \mathbf{R}_i^{-1} (H_i(x) - y_i)$$
 (4)

ここにB,は背景誤差共分散行列である.これに対し、 本研究では最適状態変数の近似値が不明な場合を含むた め、式(4)の式形で表現される背景誤差項は用いない. 一方で、離散的一定値関数を状態変数とする場合、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.そこでC<sub>D</sub>がU<sub>10</sub>に関する連続関数と仮定し、図-1に 示す離散化されたC<sub>D</sub>の状態変数x<sub>n</sub>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」,又 は $[x_{n+1} - 2x_n + x_{n-1}$ が小さい」)を背景誤差として評価関 数に付加した(例えば式(5)は $[x_n - x_{n-1}$ が小さい」と した場合).さらに,本手法では観測誤差項と背景誤差 項の間に重み係数Wを導入し,Wの相違による状態変数  $x_n$ の特性についても検討を行った.

$$J(x) = W \sum_{n=1}^{N} (x_n - x_{n-1})^T \mathbf{B}_t^{-1} (x_n - x_{n-1}) + \sum_{t=0}^{T} (H_t(x) - y_t)^T \mathbf{R}_t^{-1} (H_t(x) - y_t)$$
 .....(5)

#### 3. 逆推定法の妥当性の検証

## (1) 検証方法

双子実験により,解析対象である*C*<sub>D</sub>が任意の初期値から目標値の近くの値に逆推定されることを確認すること で,本逆推定法の妥当性を検証した.図-2に双子実験の フローを示す.本検討では*C*<sub>D</sub>の目標値として,風速 30m/s以下では本多・光易の式(1),風速30m/s以上では 単調減少する一次関数を仮定した(図-4参照).また, データ同化において使用した観測値は*C*<sub>D</sub>に上記の目標値 を与えた場合の領域中央における波浪推算結果(波高)



表-1 予測計算ケース一覧

a) 未知パラメータ数の相違による比較	100(0.5m/s間隔)
(先験条件なし)	50(1m/s間隔)
観測データ数 66	25(2m/s間隔)
b) 観測データ数の相違による比較(先	66(1h間隔)
験条件なし)	33(2h間隔)
未知パラメータ数 100	11(6h間隔)
c) 先験条件及び重み係数の相違による	W=0
比較	W=10 <sup>3</sup>
未知パラメータ数 100	W=104
観測データ数 66	W=10 <sup>5</sup>
d) 初期値一定からの逆推定(重み係数	W=0
の相違による比較)	W=10 <sup>3</sup>
未知パラメータ数 100	W=104
観測データ数 66	

とした(図-5参照).検討ケースは表-1に示すa)未知パ ラメータ数,b)観測データ数,c)先験条件及び重み係 数をそれぞれ変化させた場合と,d)初期値を一定値と して重み係数を変化させた場合(先験条件は $[x_n - x_{n-1})$ が 小さい」のみ)であり,逆推定された $C_D$ の特性を比較す ることで妥当な推定値が得られる条件の把握を試みた.

(2) 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 の暴風時を再現するため,波浪推算に用いた海上風につ いては,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度西を台風の中心が通過する条件で作成した.

一例として対象海域に台風の中心が侵入した直後 (t=24h)の風速分布を図-3(a)に,対象海域の中央にお



typhoon course

図-3 (a) 風速分布の一例 (t=24h)



ける風速の時系列を図-3(b)に示す.図-3(b)から, 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.なお,本検討では*C<sub>D</sub>*の定義域を風 速0~50m/sとした.

### (3) 逆推定値の特性

## a)未知パラメータ数の相違による比較

図-4は背景誤差を設定しない場合について、観測デー タ数を66とした条件で、Cnを離散化した未知パラメー タ数を100 (0.5m/s間隔), 50 (1m/s間隔), 及び25 (2m/s間隔)と変化させた場合に逆推定されたCpの特性 を示したものである.いずれのケースとも初期値が目標 値に近い風速域ではC<sub>D</sub>はほとんど変化していないが,初 期値が目標値から離れている30m/sを超える風速域では *C*<sub>D</sub>が目標値近くに推定されている様子が伺える.また, 未知パラメータ数の違いについてみると、未知パラメー タ数25のケースでは目標値近くの値が精度良く推定され ているのに対し、未知パラメータ数100及び50のケース では初期値と目標値が離れている風速域で推定値が振動 する傾向がみられた.これは、未知パラメータ数に比べ て観測データ数が相対的に少ないため、解析値が不安定 になり、振動しているものと考えられる. なお、今回の 擾乱ケースは図-3(b)に示したとおり、45m/s以上の風 速が発生していないため、この範囲では初期値が目標値 に対して修正されていないことがわかる.

図-5は図-4に示す*C*<sub>D</sub>を用いた場合の波高推算値を示したものである.マーカーで示す同化後はいずれのケース



図-4 先験条件なしの場合に逆推定されたC<sub>D</sub>の特性(未知パ ラメータ数の相違による比較)



とも初期値(同化前)から修正され,観測値にほぼ一致 している.

#### b) 観測データ数の相違による比較

図-6は背景誤差を設定しない場合について,未知パラ メータ数を100とした条件で,観測データ数を66(1h間 隔), 33(2h間隔),及び11(6h間隔)と変化させた場 合に逆推定された*C*<sub>D</sub>の特性を示したものである.観測デ ータ数が少ないほど,推定値が不安定になる傾向にあり, 観測データの時間間隔を密に設定すること,観測データ 数に応じた適切な未知パラメータ数を設定することが重 要といえる.



図-6 先験条件なしの場合に逆推定されたC<sub>D</sub>の特性(観測デ ータ数の相違による比較)

#### c) 先験条件及び重みの相違による比較

図-7は観測データ数を66,未知パラメータ数を100と した条件で、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,重み係数Wを種々変化させた場 合に逆推定されたCoの特性を示したものである。図-6と 比較してわかるように未知パラメータ数に比べて観測デ ータ数が相対的に少ないケースであっても,評価関数に 先験条件を加えることで推定値が安定化し、重み係数W を増加させることで振動が抑えられている.本検討では W=10<sup>4</sup>では目標値周辺の値を精度良く推定できているこ とが分かる. さらに重み係数Wを大きくしたW=105では 風速30m/s付近の推定値が目標値から離れている.これ は、あまりに大きなWを用いたことで観測誤差の重み付 けが相対的に小さくなったことが影響したものと考えら れ、適切な重み係数Wの設定が重要であるといえる.図-8は同様の条件で先験条件を $(x_{n+1}-2x_n+x_{n-1})$ が小さい)と 設定した場合に逆推定されたC<sub>D</sub>の特性を示したものであ る.図-7と同様にW=10<sup>4</sup>で目標値周辺の値を精度良く推 定できているものの、図-7の場合と比較すると、風速 40m/s以上の範囲がやや不安定であり、W=105では逆に振 動が大きくなる様子がみられた.



図-7 先験条件  $(x_n - x_{n-1} \Rightarrow 0)$  を用いた場合に逆推定された  $C_n$ の特性 (重み係数の相違による比較)



図-8 先験条件  $(x_{n+l} - 2x_n + x_{n-l} \Rightarrow 0)$  を用いた場合に逆推定 された $C_n$ の特性 (重み係数の相違による比較)



図-9 先験条件  $(x_n - x_{n,l} \Rightarrow 0)$  を用いた場合に逆推定された  $C_D$ の特性 (初期値を一定値で与える場合)

#### d) 初期値一定からの逆推定

これまでの検討では、初期値として風速30m/s以下で は目標値と一致する一次関数を仮定してきたが、ここで は関数形を想定することなく、任意の初期値から未知パ ラメータが逆推定可能であることを確認した。目標値は これまでの検討と同じであるが、初期値を1で一定とし た.図-9は観測データ数を66、未知パラメータ数を100 とした条件で、先験条件( $x_n - x_{n,l}$ が小さい)を背景誤差 として評価関数に付加し、重み係数Wを種々変化させた 場合に逆推定された $C_D$ の特性を示したものである。これ までの結果から、初期値を目標値の近くに設定するほど 高精度な推定が期待できるが、図-9からわかるように初 期値を一定値とした場合でも、評価関数に先験条件を加 えることで、目標値を精度良く再現できることがわかる。

## 4. おわりに

本研究では、従来の波浪推算モデルにデータ同化手法 を適用し、波浪観測データから海面抵抗係数*C*<sub>D</sub>を逆推定 可能な方法の開発とその妥当性について検討を行った. その結果、*C*<sub>D</sub>を離散化表現するために必要な未知パラメ ータ数に対して、観測データ数が十分な場合には高精度 な推定が可能であること、また、仮に観測データ数が十 分でないために推定値が不安定になる場合においても、 評価関数に適切な先験条件を加えることで推定値が安定 化し、推定精度が向上することが確認された.

今後,本手法を現地観測データに適用することにより, 風速30m/sを越える暴風時の海面抵抗係数や大気・海洋 間の運動量輸送過程のメカニズムが解明されれば,従来 の波浪推算では過大となるケースがみられた超強風時の 波浪推算の精度向上につながるものと考えられ,沿岸防 災技術の高度化に資することが可能となる.

謝辞:本研究は科学研究費補助金(20360222)の助成を受けたものである.また,逆推定法の適用にあたり,(財) 日本気象協会の松浦邦明氏より有益な情報を頂いた.

#### 参考文献

- 橋本典明・川口浩二・松浦邦明・宇都宮好博(2003): 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.
- 本多忠夫・光易 恒(1980):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.
- Hersbach, H. (1998) : Application of the adjoint of the WAM model to inverse wave modeling, J. Geophys. Res. Vol.103, (C5), pp.10469-10487.
- Powel, M.D., Vickery, P.J and T.A. Reinhold (2003): Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones, Nature, 422, pp.279-283