

21. 強風域から離れた観測地点の波浪に基づく海面抵抗係数の逆推定に関する研究

田中 雄太

1. 目的

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パラメータである海面抵抗係数 C_D (以下 C_D) は、Janssen の式のほか、本多・光易や Wu の式のような風速に関する単調増加関数が一般的に用いられている。しかしながら、これらの提案式は概ね風速 25m/s 以下の風データに基づいて検討されたものであり、強風条件への適用には疑問が残る。特に風速 30m/s を超える超強風条件では、実際は砕波や飛沫の発生により C_D が減少に転じるものと予想され、従来の提案式では推算波高が過大になることが懸念される。砕波や飛沫を伴う海面を対象とした大気・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、当研究室では波浪推算モデル WAM にデータ同化手法(4次元変分法)を適用した ADWAM を用い、波高の観測値から風速別の C_D を逆推定する手法を開発している。超強風の発生箇所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済みであるが、現地に適用するに当たっては強風の発生域を狙った波浪観測が課題となる。一方、本研究で用いている 4 次元変分法は時空間を逆方向に遡って計算を進めるため、強風域で発達し伝播してきた波浪が観測されていれば、強風速域の C_D が逆推定されることが期待される。しかしながら、過年度の検討では、観測地点で発生する風速域の C_D は精度良く逆推定できるものの、多くの場合、観測地点で発生していない強風速域の C_D は逆推定できていない。そこで本検討では、深海矩形海域において、強風域から波浪が伝播してくる海域に擬似的に無風域を設定し、強風域から離れた無風域内の観測地点で波浪を観測する条件で C_D の逆推定を試みるとともに、強風域の C_D が逆推定できなかった観測地点での推算精度向上の手法について検討を行った。

2. 内容

2.1 第三世代波浪推算モデル WAM

第三世代波浪推算モデル WAM は、エネルギー平衡方程式を基礎とした波浪推算モデルである。エネルギーソース関数は、式 (1) に示す 5 つの項が考慮されている。

$$S = S_{in} + S_{dis} + S_{nl} + S_{bot} + S_{surf} \quad (1)$$

ここで、 S_{in} は風から波へのエネルギー輸送項、 S_{dis} は砕波によるエネルギー消散項、 S_{nl} は成分波間の非線形相互作用によるエネルギー輸送項、 S_{bot} は海底摩擦によるエネルギー消散項、 S_{surf} は地形性砕波によるエネルギー消散項を示す。風から波へのエネルギー輸送過程における重要なパラメータである C_D は、一般的に式 (2) のように風速に依存する関数で与えられる (本多・光易, 1982)。

$$C_D(U_{10}) = \begin{cases} (1.280 - 0.024 \times U_{10}) \times 10^{-3} & (U_{10} < 8m/s) \\ (0.581 + 0.063 \times U_{10}) \times 10^{-3} & (U_{10} \geq 8m/s) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 U_{10} は海上 10m における風速である。式 (2) においては、風速 8m/s 以上では単調増加する関数で与えられている。

2.2 データ同化手法を適用した波浪推算モデル ADWAM

2.2.1 データ同化手法

データ同化は与条件に対して理論式から予測結果を算出する従来の数値モデルとは異なり、数値モデルと観測データを組み合わせることにより、力学的整合性を満たしつつ自動的にモデル内のパラメータなどを逆推定する手法である。本研究で用いる4次元変分法は、最尤推定法を基礎とし、以下の式(3)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。

$$J(x) = \sum_{t=0}^T \frac{1}{2} (H_t(x) - y_t)^T R_t^{-1} (H_t(x) - y_t) \quad (3)$$

ここで、 x は状態変数、 y_t は観測値、 R_t は観測誤差共分散行列、 H_t は状態変数から観測値への変換行列を示す。データ同化では同化期間 ($t = 0 \sim T$) に観測された全てのデータを用い、各時刻における推算値と観測値の誤差を求め、評価関数を計算する。評価関数の最小値を求めるため、この評価関数の勾配を求め、それをもとに繰り返し計算を行うことで状態変数の最適値を逆推定する。本研究では C_D を状態変数、有義波高を観測値とし、上述の方法により、 C_D の最適値を逆推定する。

2.2.2 海面抵抗係数の離散化

本研究では、 C_D を風速に関する離散的な一定値関数として図-1のように定義することにより、強風下で C_D が減少するなどの任意の分布形状を表現可能にした。状態変数を離散的な一定値関数とする場合、風速の分割数が未知パラメータ数となり、パラメータ数を増や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_D が風速に関する連続関数であると仮定し、離散化された C_D が局所的には滑らかであるとする先験条件を背景誤差として評価関数に付加した。

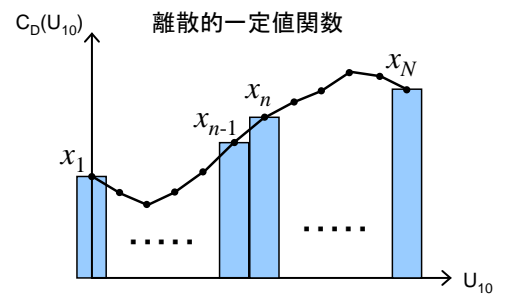


図-1 離散化した海面抵抗係数 C_D

$$J(x) = \sum_{t=0}^T (H_t(x) - y_t)^T R_t^{-1} (H_t(x) - y_t) + W \sum_{n=1}^N (x_n - x_{n-1})^T B_t^{-1} (x_n - x_{n-1}) \quad (4)$$

ここで、右辺第一項は観測誤差項、右辺第二項は、「 $x_n - x_{n-1}$ が小さい」とする先験条件を付加した背景誤差項であり、 B_t 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。

2.3 強風域から離れた観測地点の波浪を用いた検討

2.3.1 データ同化実験の流れ

まず、図-2の実線で示す風速 25m/s 以下は本多・光易の式、25m/s 以上では単調減少に転じる式を C_D の目標値として波浪推算を行い、観測地点で得られた有義波高の時系列をデータ同化実験に用いる仮想の観測値とする。次に、図-2の破線で示す本多・光易の式を C_D の初期値として、ADWAM によるデータ同化実験を実施し、逆推定された C_D を用いた推算波高が仮想の観測値と一致することを確認する。また、 C_D が初期値から目標値付近に修正されることを確認する。

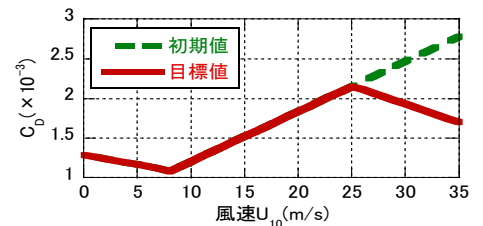


図-2 C_D の初期値および目標値

2.3.2 計算条件及び検討項目

計算条件は、図-3に示す深海矩形海域（格子間隔 0.5 度、10 度×10 度）を、最大風速半径 100km のモデル台風が図中に示す地点 1 から矢印に沿って北上し、地点 3 で消滅する条件とした。モデル台風は勢力を変化させながら北上するものとし、移動する台風の中心における気圧の経時変化は図-4 に示すと

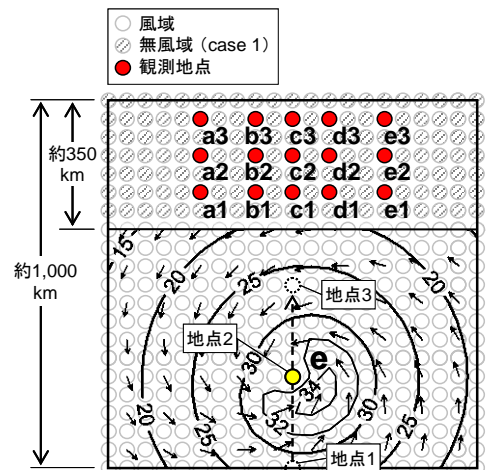


図-3 計算海域

りである。波浪推算に用いた海上風は台風モデルにより算出した1時間毎の風速分布を与えており、図-3のコンターおよびベクトルは、地点2に台風が到達した時の風速・風向分布を示す。コンターから読み取れるように、この台風では最大35m/s近くの風速が発生していた。35m/sを超える風速は発生していないため、データ同化実験においては1~35m/sの C_D を逆推定するものとした。まず、観測地点で発生していない風速域の C_D が逆推定可能であることを確認するため、図-3に示すように海域の北端から約350kmの範囲を擬似的に無風域(=0m/s)とし、無風域内に設定した観測地点に伝播してきた波浪を観測する条件でデータ同化実験を行った(case 1)。次に、

実現象に則した条件とするため、case 1と同様の台風を用い、無風域を設定しない条件でデータ同化実験を行った(case 2)。観測地点は図-3に示す15地点とし、台風と波浪観測地点の位置関係が C_D の逆推定精度に与える影響についても検討を行った。さらに、case 2と同様に無風域を設定しない場合について、風速の同化範囲を狭めた条件でデータ同化実験を実施し、未知パラメータ数を減少させることによる精度の向上について検討した(case 3)。表-1にcase 1~case 3の計算条件を示す。

2.3.3 検討結果

地点c3, 地点a1における観測値を用いて逆推定された C_D を図-5, 図-6に示す。まず無風域を設定したcase 1の結果についてみると、台風経路の延長線上にある地点c3では、この台風で発生する最大風速である35m/s付近までの C_D が初期値から目標値近くに精度良く逆推定されており、観測地点では発生していない風速域の C_D が逆推定可能であることが示されたといえる。一方で、台風経路の延長線上から離れた地点a1では目標値近くの C_D が逆推定できていない。これは、図-3に示す強風の発生域から地点a1に波浪が伝播する際に、風域内で多方向からの風を受けることなどが影響している可能性がある。また、地点a1におけるデータ同化前後の C_D を用いた推算波高は図-7に示すとおりであり、 C_D の目標値は逆推定できていないものの、データ同化後の推算波高は初期波高から修正され、観測波高と概ね一致していることが確認できる。地点a1においては、観測波高を満たす C_D の解が複数存在しており、データ同化により目標値と異なる解が逆推定されたものと想定される。なお、これ以降の検討ではデータ同化前後の推算波高を示していないが、 C_D の逆推定値に関わらず、すべての検討においてデー

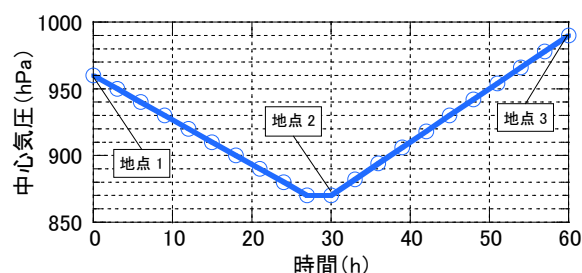


図-4 台風の中心気圧の経時変化

表-1 計算条件

	case 1	case 2	case 3
同化範囲		1~35m/s	21~35m/s
未知パラメータ数		35個(1m/s間隔)	15個(1m/s間隔)
無風域	あり		なし
C_D 初期値	本多・光易		
C_D 目標値	$U_{10} \leq 25\text{m/s}$ は本多・光易の式, $U_{10} \geq 25\text{m/s}$ は単調減少する式		
観測波高	C_D 目標値を用いた推算波高		
繰り返し計算回数	20回		
重みW	10^4		

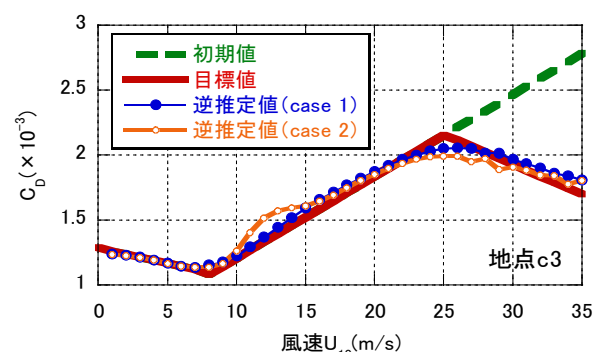


図-5 地点c3において逆推定された C_D

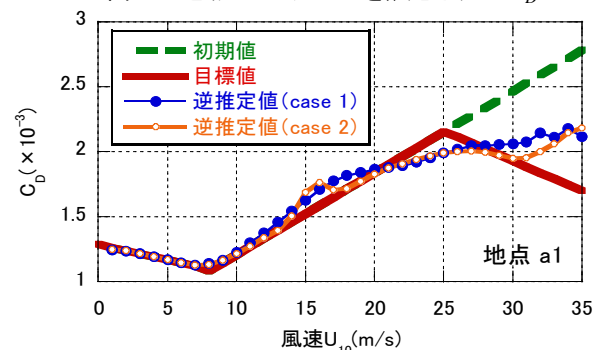


図-6 地点a1において逆推定された C_D

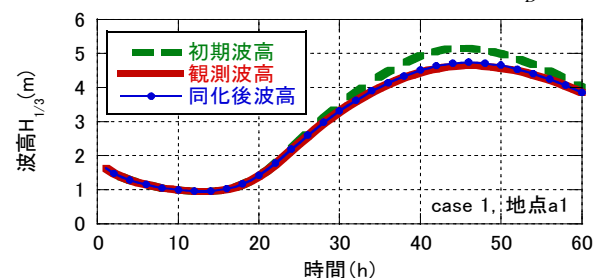


図-7 同化前後の推算波高 (case 1, 地点a1)

タ同化後は観測波高と概ね一致する波高が推算されていた。

次に、case 2 についてみると、各地点で概ね case 1 と同程度の C_D が逆推定されており、地点 c3 では、観測地点で発生していない強風域の C_D が初期値から修正され、減少に転じる様子が確認された。地点 a1 では、case 1 と同様 C_D の目標値が逆推定できていない。図-8 は case 2 の地点 c3、地点 a1 で発生する風速の経時変化を示しており、case 2 では各地点で発生する最大風速付近における C_D の逆推定精度が悪くなっていることがわかる。観測地点で発生する風が観測波高に何らかの影響を及ぼし、逆推定精度が低下している可能性が唆された。

case 2 により、実現象に則した条件においても、地点で発生していない強風域の C_D が逆推定可能であることが示された。その一方で、case 1, 2 とともに、同化後の推算波高が観測波高と一致している場合であっても、目標の C_D が逆推定できないケースがみられた。このようなケースについては、逆推定するパラメータ数に対して観測データが不十分であると想定され、 C_D の目標値を精度良く逆推定するためには、有義周期などの新たな観測データを加えることや、逆推定すべき未知パラメータ数を減らすことが必要と考えられる。また、波浪推算に用いられている C_D の算出式は、風速 25m/s 程度までは実験や観測によって得られた値であるため妥当な値であると考えられる。そこで、case 2 と同様に無風域を設定しない条件において、風速 20m/s までの C_D を本多・光易の式で固定し、21~35m/s の風速範囲でデータ同化を行った (case 3)。

case 3 について、地点 c3、地点 a1 の観測波高を用いて逆推定された C_D を図-9、図-10 に示す。ここでは、比較のため case 2 で逆推定された C_D も示した。case 2 においては、観測値である有義波高は同化できているものの、目標の C_D が逆推定できない場合がみられたが、case 3 では、両地点で 35m/s 付近までの C_D が初期値から目標値近くに精度良く逆推定されていることが確認された。

3. 結論

強風の発生域から離れた観測地点の波浪を観測値としてデータ同化実験を行った結果、観測地点では発生していない強風域の C_D が逆推定可能であることが示された。しかしながら、台風経路と波浪観測地点が離れている条件では、同化後の推算波高が観測波高と一致している場合であっても、強風域の C_D が逆推定できないケースがみられた。このようなケースについても、強風速範囲の C_D のみをパラメータとし、逆推定すべき未知パラメータ数を減少させることで、観測地点で発生する風速域を超えて強風域の C_D が精度良く逆推定できることが示された。今後は、本手法を現地海域に適用し、強風域の C_D を明らかにする予定である。

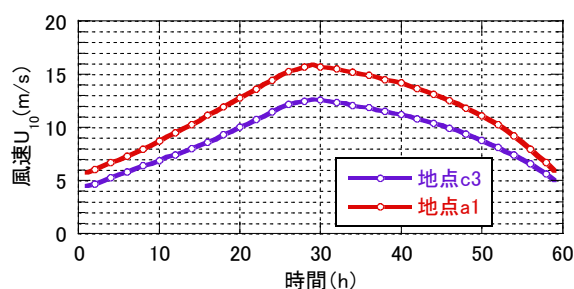


図-8 各地点で発生する風速の経時変化

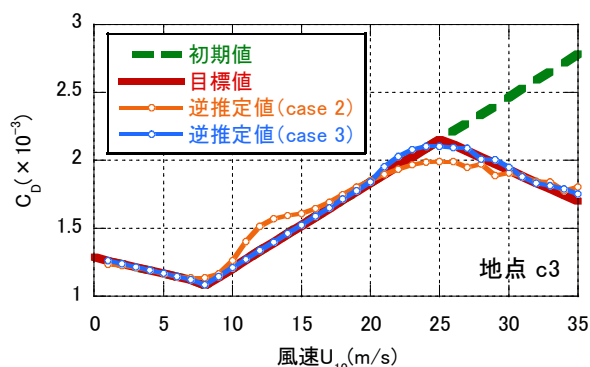


図-9 地点 c3 において逆推定された C_D (case 3)

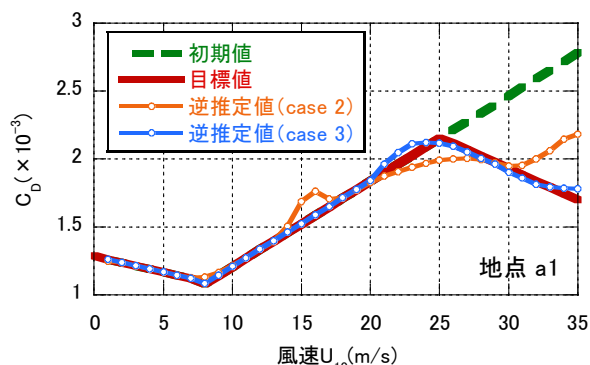


図-10 地点 a1 において逆推定された C_D (case 3)