

内湾域での波浪推算の精度向上を目的とした 波浪と海上風推算に関する幾つかの検討

SOME EXAMINATIONS ON WIND AND WAVE HINDCASTING FOR THE
PURPOSE OF THEIR ACCURACY IMPROVEMENT

鈴山勝之¹・児玉充由²・橋本典明³・荒木健人⁴・吉松健太郎⁴
Katsuyuki SUZUYAMA, Mitsuyoshi KODAMA, Noriaki HASHIMOTO,
Kento ARAKI and Kentarou YOSHIMATSU

¹工修 (株) エコー 環境水工部 (〒110-0014 東京都台東区北上野2-6-4)

²九州大学大学院工学府海洋システム工学専攻 (〒819-0395 福岡市西区元岡744番地)

³フェロー 工博 九州大学大学院工学府環境都市部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡744番地)

⁴学生会員 工修 九州大学大学院工学府海洋システム工学専攻 (〒819-0395 福岡市西区元岡744番地)

Public works in coastal region require accurate and reliable wave information not only in deep-sea areas but also in coastal areas, especially in bay areas. However, WAM has some drawbacks in applying it to bay areas since some of the parameters in WAM were tuned for deep-water conditions. In this study we examined and discussed the applicability of WAM to bay areas, then discussed some method to improve the applicability of WAM to the areas. On the other hand, accurate wind estimation with high time-spatial resolution is indispensable for accurate estimation of wave conditions around the sea. We, therefore, applied MASCON model by which influence of geographical features can be taken into account in wind estimation, and discussed the applicability of MASCON model.

Key Words : WAM, wave information, wave hindcasting, MASCON model, wind hindcasting

1. はじめに

海岸・港湾の技術分野で求められる波浪情報の多くは内湾域に集中している。近年では計算機の性能向上に伴い、高波浪時のみならず静穏時も含めた常時波浪推算を数年～数十年の長期間にわたり切れ間なく実施し、沿岸域の外力条件として利用することや、内湾での波浪をリアルタイムに予測することなどが一般的になりつつある。このような背景から、内湾域での波浪推算の高精度化ならびに計算の高速化を図ることは実務上重要な課題である。

第三世代波浪推算法 WAM は、他の波浪推算モデルと比較して計算負荷が小さいことが大きな特徴であり、推算精度も高いことから内湾域に適用する利点は大きい。そこで本研究では、WAM を用い、内湾の弱風時においても推算精度を保ちつつ、計算時間を増大させない方法について検討を行う。さらに、内湾域での波浪推算精度の向上に欠かせない海上風推算についても、現在考えられる課題の抽出を行い、マスコンモデルを用いた検討を行うことで、内湾域での波浪及び海上風の推算精度の向上に資することを目的とする。

2. 基本的な WAM の推算特性について

一般的に用いられる WAM は、外洋における波浪推算を目的としてチューニングされているため、デフォルトの設定では、外洋を対象とした高波浪時（強風場）の推算精度は高い。しかしその反面、内湾域を対象とした、特に静穏時（弱風場）の波浪推算には適していない。WAM の実務への適用については、橋本ら^{1),2)}によって幾つかの報告がなされ、その推算精度の検証が行なわれている。しかし、既往研究は複雑な実地形条件下での検討であり、WAM の基本性能をより明確に検討するために、単純な地形条件下で基本的な WAM の推算特性について検討したものは少ない。ここでは、架空の矩形海域に WAM を適用し、主に静穏時を対象として基本的な WAM の推算特性について整理する。

表-1 に計算条件を、図-1 に設定した矩形海域を示す。図中の黒丸は方向スペクトルの抽出位置を表す。方向スペクトルの周波数分割数は、外洋推算で一般的に用いられるデフォルトの設定値 25 と、既往研究²⁾時に用いられた設定値 35 とする。外力条件としては、①西風一様風、②西風 12 時間後から東風に急変、③西風から 7 時間毎に 30°刻みで北風

を經由して東風に変化の3種類の海上風を設定した。海上風の風速は、強風場で10m/s、弱風場で3m/sとして24時間の波浪推算を行なった。ただし、③を使用する場合は図-1よりも南北方向に領域を拡大した正方形の計算領域を用いた。以降では紙面の都合上、②の結果について例示することにする。

表-1 矩形海域における計算条件

項目	内容
座標系	球面座標系
計算領域	2.5°×1.25°(約278km×約139km)
格子点間隔	0.025°(約2.78km)
波の伝播計算時間ステップ	120秒
入力風の時間ステップ	1時間
周波数分割数	25(0.04178~0.41145Hz) 35(0.04178~1.06719Hz)
方向分割数	16(22.5°)
水深条件	深海

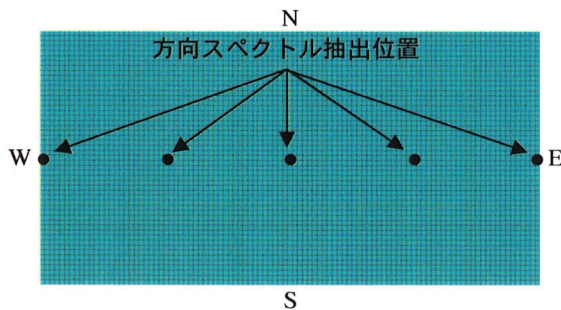


図-1 設定した矩形海域

(1) 高波浪時（強風場）の検討

高波浪時（強風場：風速10m/s）の検討について示す。図-2の上段に、矩形海域中央で抽出した12時間毎の方向スペクトルを示す。横軸が波向、縦軸が周波数を表し、図中には、各方向スペクトルに対応する計算開始及び風向急変時刻からの経過時間と推算波高・周期を示す。左図は計算開始から6時間後、中図は風向急変後6時間後、右図は風向急変後18時間後の方向スペクトルである。左図より、W系波浪の発達に伴い、高周波数域のエネルギーが低周波数域へ移行しつつある。中図より、時間経過と共に発達したW系波浪が風向急変に伴い減衰し、新たにE系波浪の発達が見られる。右図より、E系に移行後発達した高周波数域のエネルギーが、時間経過と共に低周波数域に移行し発達している。また、左図に示す波浪が十分発達した時点の波高、周期は、理論値 $H_{1/3}=1.9\text{m}$, $T_{1/3}=5.8\text{s}$ と近い値となる。ここで理論値とは、Wilson IV型式を用いて求めた値である。これより、高波浪時では風場の変化に対応して適切な波浪推算が行われたことが分かる。

(2) 静穏時（弱風場）の検討

次に、静穏時（弱風場：風速3m/s）の検討について示す。推算結果を図-2の中段に示す。図の表記は上段の図と同じである。左図より、W系波浪

の発達に伴う高周波数域エネルギーの低周波数域への移行が見られる。しかし、中図に示すように、風向急変後もE系波浪の発達は見られず、W系波浪の減衰が継続する。また、左図に示す波浪が十分発達した時点の周期は4s程度となっており、理論値である2.2sを大きく上回り、不合理な波浪推算結果となる。ここで、中図と左図では、約0.4Hz付近よりも高周波数側の表示が切れている。これは、デフォルト設定のWAMの周波数分割数25では、方向スペクトルの高周波数の上限が0.41145Hzとなり、これを越える高周波数側のエネルギー成分が直接計算されないことによるものである。

以上の結果より、デフォルト設定のWAMの推算特性としては、強風時の応答及び推算精度は適切であることが再確認された。しかし、図-2中段の推算結果に見られるように、静穏時の周波数分割数が25のデフォルト設定では、風への適切な応答が見られない。さらに、内湾で発生する短周期の波浪に対しても、周波数領域の高周波側で十分な周波数領域を設定していないため、適切な波浪推算が行なわれない。すなわち、デフォルト設定のままでWAMを高波浪時及び静穏時を通した切れ目のない波浪推算に導入する場合には、特に弱風時には精度的に不十分であると言える。

(3) 静穏時（弱風場）の検討（周波数領域の拡張）

そこで、問題となる高周波数側の波浪成分を考慮可能にするため、既往研究²⁾と同様に周波数分割数を35（周波数領域：0.04178~1.06719Hz）に拡張した検討を行う。その他の計算条件は前述の(1)、(2)の検討時と同じ条件とした。図-2の下段に、周波数領域を拡張した場合の静穏時（弱風場：風速3m/s）の推算結果を示す。図の表記は上段の図と同じである。図-2の中段図と下段図を比較すると、下段図では、中段図に見られたようなW系波浪の継続的な減衰は発生せず、時間経過と共にW系波浪が発達し、風向急変後は風への適切な応答によるE系波浪の発達が確認できる。また、方向スペクトルの高周波数側の限界はなく、高周波数側の波浪成分が直接考慮できていることが確認できる。さらに、左図に示す波浪が十分発達した時点の波高・周期も、理論値である $H_{1/3}=0.26\text{m}$, $T_{1/3}=2.3\text{s}$ と大きな差はない。これより、周波数領域を高周波数側に拡張することで、風場の変化に対応した適切な波浪推算が実施可能であることが再確認された。

以上では外力条件②の結果についてのみ述べたが、①、③の海上風についても同様な傾向が確認できた。

3. 波浪推算の高速化と推算精度の維持

2. で述べたように、内湾は外洋に比べて波浪現象の時空間スケールが小さいことから、内湾域を対象とした波浪推算では、より高分解能の方向スペク

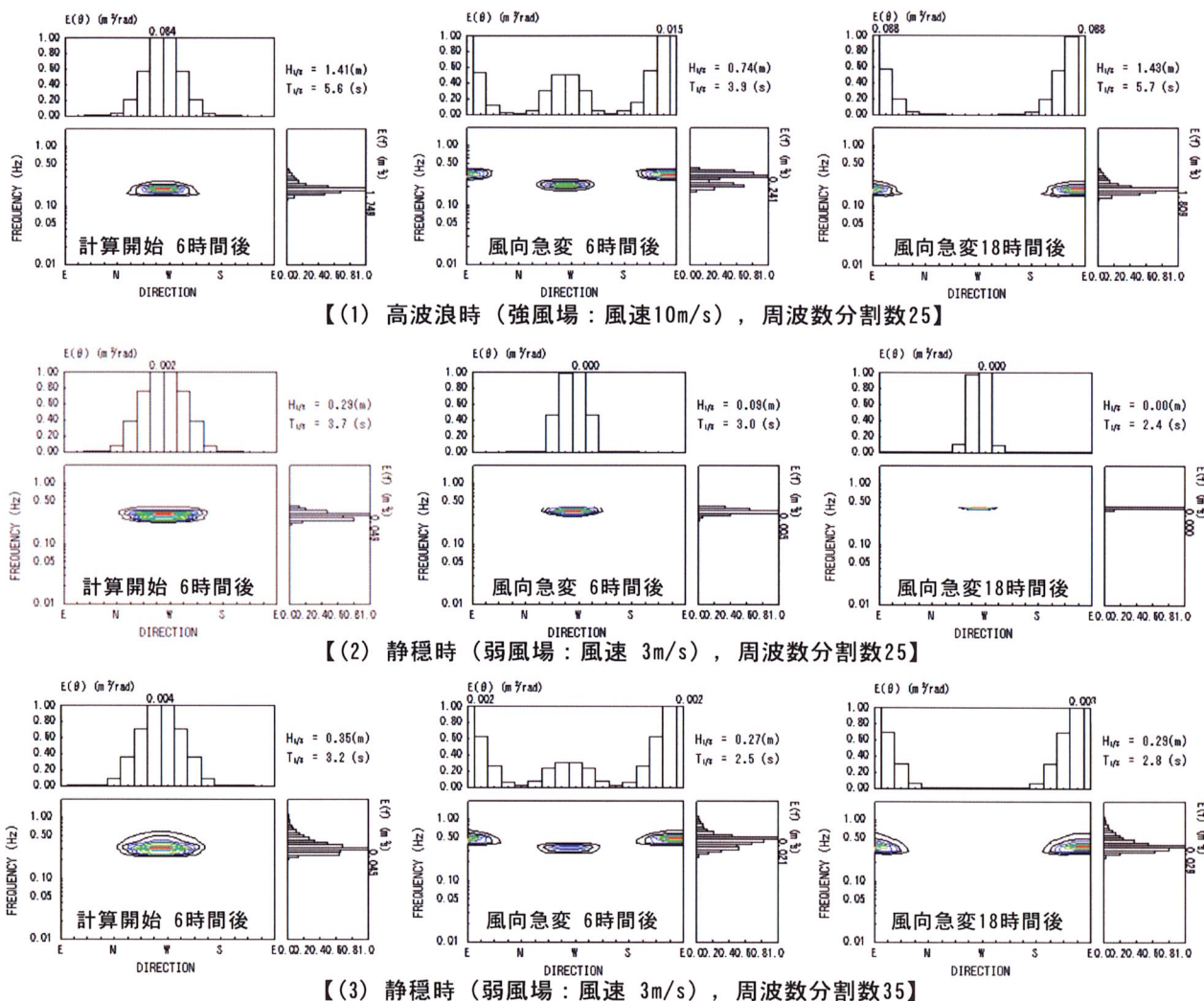


図-2 矩形海域での計算条件の違いによる推算結果の比較

トルを設定することが望ましい。しかし、精度向上のために方向スペクトルの分解能を上げれば計算負荷の増大に繋がる。特に地形近似精度が高く、多くの格子点での波浪推算が必要となる内湾域では周波数分割数や方向分割数の変更の影響も無視できない。

前述したように、周波数分割数を 35 (周波数領域: 0.04178~1.06719Hz) に拡張した WAM は、高波浪時及び静穏時を対象とした切れ間ない波浪推算に精度良く適用可能である。しかし周波数分割数を 25 から 35 に変更することにより約 1.5 倍以上の計算時間を要することになり、高周波数側の小さい波浪成分を直接考慮することが、計算時間の増大という新たな問題を発生させる。そこで推算精度を落とさない範囲でこれらのパラメータを小さく設定できれば経済的である。

WAM の方向スペクトルは周波数に関して等比数列 ($f_n = r^{n-1} \times f_0$) で与えられる。そこで本研究では、この公比 r に着目し、その設定範囲を検討することで、内湾の弱風時でも推算精度を保ちつつ計算時間を増大させない方法を検討する。公比 r を大きく設定できれば周波数分割数を増やさずに高周波数側の

成分を考慮できるが、逆に大きく設定し過ぎるとスペクトルの分解能が低下し推算精度も低下すると考えられることから、適切な公比 r の範囲があると推察されるためである。

図-3 は、表-1 及び図-1 に示した計算条件及び矩形海域において公比 r を 1.10~1.20 まで変化させた場合の海域中央部での推算波高、周期の時系列である。ここでは外力条件②の結果について例示する。図では、 $r=1.10$ で周波数分割数 35 の結果を適正值 (以降、適正值と呼ぶ。) として、周波数分割数を WAM のデフォルト値の 25 にしたまま r を変えた推算結果と比較する。 $r=1.10$ 及び 1.11 の結果は、波高が一様に減衰し、風向急変による新たな波浪の発達がない。また周期も不自然な挙動を示している。さらに、 $r=1.13$ の場合も、風向急変に伴う E 系波浪の発達が確認できるものの、適正值と比較してその発生時間は遅れている。これらの結果は、周波数領域の拡張幅の不足により生じていることが示唆される。次に、 $r=1.14, 1.15$ の場合は、周波数分割数は 25 であるが、風向急変に伴う波浪の減衰、その後の E 系波浪の発達時期等、適正值に近い結果を

示しており、ほぼ適切な波浪推算が行われたことが分かる。一方、 $r=1.17$ 以上の場合、風向の急変による波浪の減衰や E 系波浪の発達は確認されるものの、波高、周期はともに発達、減衰を周期的に繰り返す不自然な変動を示している。これは、スペクトルの分解能の低下により、計算が不安定になり推算精度が低下していると考えられる。

以上の結果から、本検討例では $r=1.13$ 以下の場合と 1.17 以上の場合に推算精度が低下することが分かった。これは、周波数分割数が少なくかつ r が小さい場合 ($r=1.13$ 以下) には高周波数側の波を適切に評価できないためであり、逆に r が大き過ぎる場合 ($r=1.17$ 以上) には、方向スペクトルの分解能が低すぎて、スペクトルの発達・減衰を適切に評価できないためであると推察される。

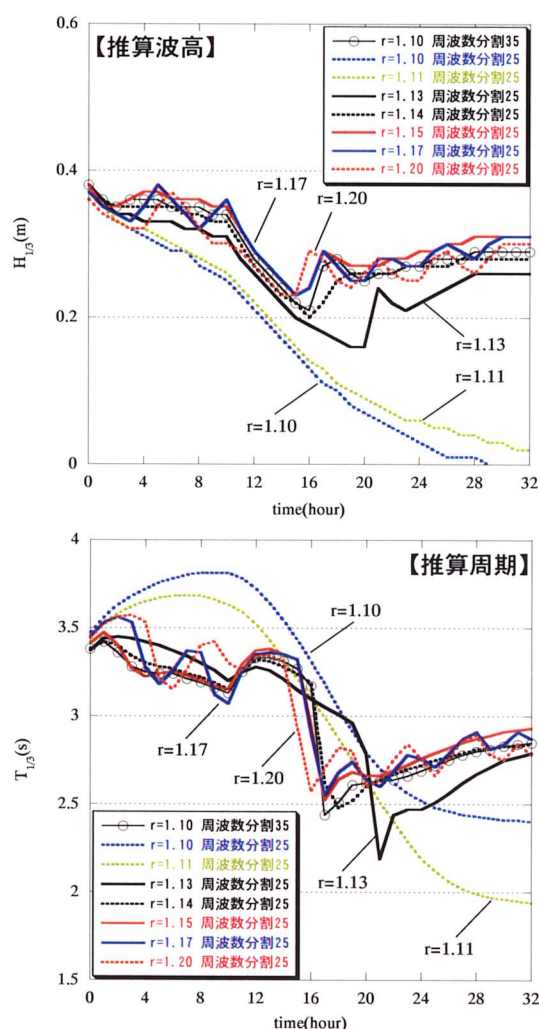


図-3 公比 r を変化させた場合の推算波高、周期の時系列

次に、方向スペクトルの推算精度について比較を行う。図-4 は、上段に $r=1.10$ で周波数分割数 35 (適正值)、下段に $r=1.15$ で周波数分割数 25 の風向急変後 6 時間後の方向スペクトルの比較例である。図-3 で述べたように、 $r=1.15$ の場合は、適正值と

比較して波高、周期や波浪の減衰、発達過程に大きな差は見られなかった。しかし、方向スペクトルの比較では、風向急変前の W 系波浪のエネルギーが若干多く残っていることが分かる。これはスペクトルの分解能の低下による影響であると考えられる。ただし、その差は微量であることから、公比 r を大きく設定し、周波数分割数を増やさずに高周波数側の成分を考慮する方法は、推算精度を保ちつつ計算時間を増大させない方法として有用であることが確認された。

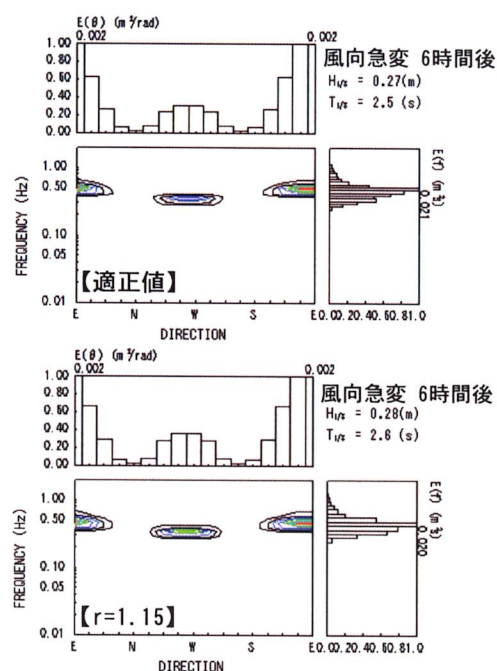


図-4 $r=1.15$ の場合の代表時刻の方向スペクトル

4. 方向スペクトルの分解能が計算精度へ及ぼす影響

WAM には、非線形相互作用の計算に離散相互作用近似 DIA³⁾が導入されている。DIA の導入によって WAM では複雑に変動する風場への応答特性が従来の予報モデルに比べて向上した。DIA の計算精度についてはこれまでも幾つかの検討例がある。しかし、周波数分解能や方向分解能が DIA の計算精度に及ぼす影響は必ずしも明確ではない。ここでは、方向スペクトルの周波数分解能と方向分解能が DIA の計算精度に及ぼす影響について検討する。

図-5 は、Pierson-Moskowitz スペクトルで $S_{max}=10$ の風波の方向スペクトルを対象として DIA による非線形相互作用を計算した結果である。非線形エネルギー輸送は周波数と方向角の関数として表示されるが、図はこれを方向角について積分し、周波数の関数として表示したもので、公比 r を $1.05 \sim 1.20$ の範囲で変化させた結果である。図より、 r を広く変化させても計算結果に顕著な差は見られない。

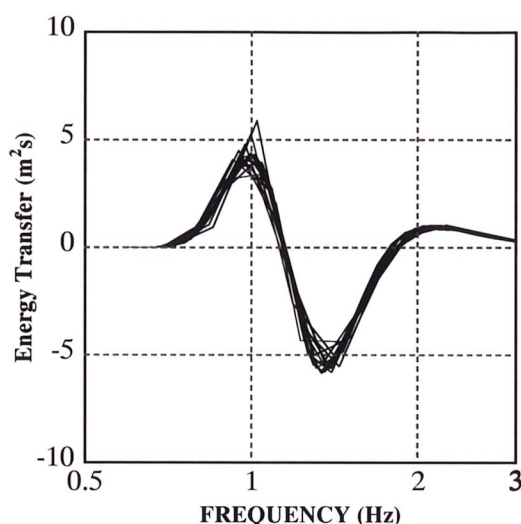


図-5 Pierson-Moskowitz スペクトルを対象とした DIA の計算結果

一方、図-6 は、JONSWAP スペクトルで $S_{\max}=25$ のうねりの方向スペクトルを対象として、図-5 と同様な計算を行った結果である。図より、 $r=1.05 \sim 1.14$ の範囲では計算結果に顕著な差は見られないものの、 $r=1.15$ 以上では計算結果がやや不安定になることが分かる。この様に、多様なスペクトル形状に対して DIA を計算する場合、 r の相違による影響はスペクトル形状に依存することから、公比 r をあまり大きく設定すべきではない。図の例から、DIA では $r=1.15$ が許容できる限界値と判断される。

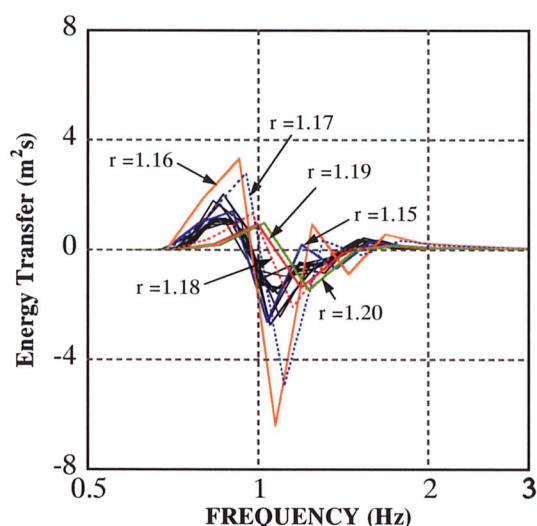


図-6 JONSWAP スペクトルを対象とした DIA の計算結果

なお、本研究では、方向分割数の相違による DIA の不安定化の検討のために、 $r=1.10$ で方向分割数を 12, 16, 24, 36 と変化させて同様の検討を行ったが、この範囲内では計算の不安定化は生じなかった。以上の結果より、精度を保ったまま、より

経済的で効率的な波浪推算を実施するためには、周波数の分割に用いる公比 r の設定が重要ではあるが、現在広く用いられている DIA に適用する限りにおいては、様々な形状の方向スペクトルを精度良く推算するために、公比 r を 1.14 より大きく設定すべきではないことが判明した。また、スペクトル分解能が入力項や逸散項、及び遮蔽物背後域の波浪の推算精度に及ぼす影響についても確認を行った。その結果、スペクトル分解能が入力項や逸散項の推算精度に及ぼす影響は小さく、また、遮蔽物背後域の推算精度には、方向分割数より周波数分割数の影響が大きいことを確認した。

5. 内湾域の海上風推算に関する検討

近年、MM5 等の局地気象モデルにより、内湾域での高精度な海上風推算が実現したものの、初期・境界条件となるデータセットの入手や計算負荷等の問題から実務への適用には必ずしも至っていないのが現状である。そこで、現状では、内湾域の風推算に一般的に用いられるマスコンモデルのさらなる改良が一つの有用な手段であろう。

マスコンモデルを用いる場合、モデルに含まれる係数 α_1 , α_2 の取り扱いに依存して異なる風が推算されることが問題となる。そこで本研究では、今後のマスコンモデルの高精度化に向けて、 α_1 , α_2 の適切な設定について検討することとした。図-7 にマスコンを適用した計算領域、表-2 に計算条件を示す。表中の dz/dx は鉛直方向と水平方向の計算格子間隔の比であり、 α_1 , α_2 に各方向の計算格子の違いを考慮するために導入されるものである。

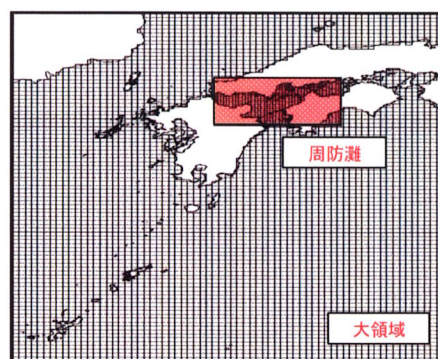


図-7 マスコンモデルを適用する領域

表-2 各ケースの計算条件

ケース No.	α_1, α_2 の比	格子間隔 (大領域, 周防灘領域)
Case1	0.5	$\times dz/dx$ 7 (km)
Case2	0.8	
Case3	0.9	
Case4	1.0	
Case5	1.1	
Case6	1.2	
Case7	2.0	

図-8 には、 α_1 、 α_2 の比（以降、 α_1/α_2 ）を変化させた場合のマスコン適用後の風場の変化を見るため、周防灘領域を対象に代表ケースの風速ベクトルを示す。図より、Case1 はマスコン適用により風場が急変する。これは地形の影響が過大に評価されたため、縮流効果が生じてしまったことが原因として考えられる。Case2～Case6 の結果は何れも地形の影響により風場が修正され、陸地に沿って風が吹くことを確認したが、ここでは代表ケースとして Case4 の結果を示している。なお、Case2～Case6 では α_1/α_2 が大きくなるにつれ、初期風場に対する風場の変化が小さくなり、Case7 ではマスコン適用による風場の変化がほとんど見られなかった。この結果から、 α_1/α_2 が大きくなるにつれ、陸地の影響が考慮されなくなる傾向を確認した。すなわち、 α_1/α_2 が小さいとマスコン適用による風場の変化が顕著になり、 α_1/α_2 が大きくなるにつれ、風場の変化が小さくなる。したがって、 α_1 、 α_2 の値はマスコン適用後の風場に大きな影響を及ぼすことから、適切な設定を行うことが重要である。

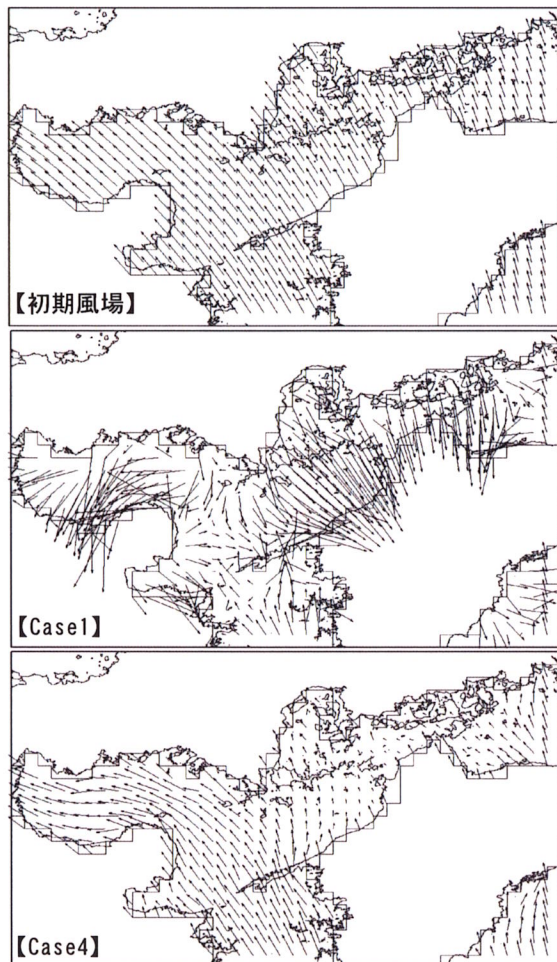


図-8 α_1 、 α_2 の比を変化させた場合のマスコンモデル適用後の風場の変化

また、同じ空間解像度で同じ係数 α_1 、 α_2 を用いても、大きさの異なる領域を対象にマスコンモデル

を適用する場合、領域の大きさによって推算精度が大きく異なることが判明した。図-9 は、図-7 の大領域及び周防灘領域においてマスコンモデルを適用した場合の苅田における風速の時系列の比較である。マスコンの適用領域の違いにより、推算される風速に大きな違いが生じている。この結果から、マスコンモデルの適用に際しては、領域に含まれる陸域と海域の範囲等を考慮した適切な領域設定を行う必要があることが示唆された。

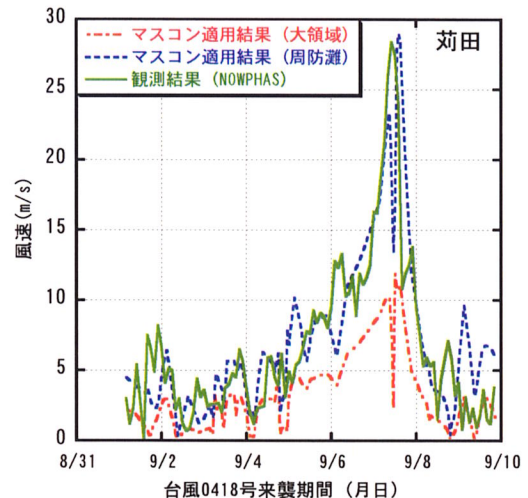


図-9 大きさの異なる領域を対象とした場合のマスコンモデルの推算結果の違い

6. おわりに

弱風時でも波浪推算精度を保ちつつ経済的で効率的な波浪推算を実施するためには、周波数分割数をあまり増大させずに公比 r を変化させることが有効である。ただし、公比 r を過大に設定すると、例えば DIA による非線形相互作用の計算に見られる様に計算が不安定になることから、適切な公比 r の設定が必要であることが分かった。また、マスコンモデルの改良時の課題として、係数 α_1 、 α_2 の取り扱いおよび計算対象領域の設定範囲によっては推算結果に不整合が発生することを再確認した。

参考文献

- 1) 水谷雅裕, 佐々木高雄, 橋本典明, 川口浩二, 柴木秀之, 鈴山勝之: 燧灘海域における WAM 波浪推算の特性について, 海洋開発論文集, Vol.19, pp.153-158, 2003
- 2) 鈴山勝之, 橋本典明, 永井紀彦, 吉田秀樹: 様々な地形条件下における波浪推算の精度向上のための幾つかの検討, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp.171-175, 2005.
- 3) Hasselmann, S. and K. Hasselmann: Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum, part 1: A new method for efficient computations of the exact nonlinear transfer integral, Jour. Phys. Oceanogr., 15, pp.1369-1377, 1985.