

陸上地形の影響を考慮した内湾海上風の推算モデル

柴 木 秀 之*・後 藤 智 明**

1. はじめに

近年空港島の建設、港湾施設の拡充、海洋性レクリエーション基地の開発などに見られるように内湾海域が高密度に利用されるようになり、内湾海域の円滑な利用と防災対策のための気象・海象予測が重要な課題となってきた。内湾の気象・海象は、周辺を囲む陸上地形から大きな影響を受けているが、陸上地形が複雑であるため、海上風は空間的に大きく変動し、従来の風推算モデルでは十分な予測を行うことが困難であった。本論文では、著者ら(1992)が提示した海上風の陸上地形への依存性を定式化した内湾海上風の経験則を利用する内湾海上風推算モデルを新たに提案する。推算モデルは、経験則から求められる風場を初期条件として与える経験則・マスコンハイブリッドモデルであり、このモデルを伊勢湾に來襲した代表的な気象擾乱に適用する。観測風と推算値とを比較することからモデルの現地適用性を検証するとともに、台風モデルによる風推算結果との精度比較を行う。また、提案した内湾海上風モデルが、波浪推算・高潮推算等においてしばしば用いられるモデル気象擾乱の風場についても応用が可能な手法であることを報告する。

さらに、3次元粘性流体の基本式を解く気流数値計算モデル(3次元SOLAモデル)の適用性ならびに将来性についても言及する。

2. 内湾海上風推算モデル

(1) 3次元マスコンモデル

3次元マスコンモデルは、研究例も多く、陸上地形の影響を受けた風場を再現可能な手法として期待されている(日本気象協会, 1988)。モデルの基本方程式は質量保存則を束縛条件とする変分式で記述される。

今、大気を非圧縮性と見なすと、質量保存則は連続式で表される。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 x, y, z は直交座標系における水平及び鉛直座標、 u, v, w は風の x, y, z 成分である。従来の方法では、観測風の内挿値または傾度風の海上補正風等を初期の風場条件として風ベクトルの空間分布を作成し、この分布を質量保存則を満足するように調節する。初期に与える風場は真値に近いと考えられることから、調節をできる限り小さくとどめることが望ましい。このため、調整値(補正值-初期値)、すなわち真値からの誤差の2乗和を最小とするように補正風場を計算する方法がとられる。調整値の誤差を変分方程式で表すと、

$$E(u, v, w, \lambda) = \int_V \left[\alpha_1^2 (u - u_0)^2 + \alpha_1^2 (v - v_0)^2 + \alpha_2^2 (w - w_0)^2 + \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] dx dy dz \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 u, v, w は質量保存則を満たすように調整された風速成分、 u_0, v_0, w_0 は初期風速成分、 λ はラグランジュの未定乗数、 α_1, α_2 はガウスの精度係数であり、

$$\alpha_i^2 = \frac{1}{2} \sigma_i^{-2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

により決定される。ここで、 σ_i は観測値が含む誤差の重みであり、調整した風速成分からの初期値の偏りを表す。 α_1, α_2 の比は調整した風速の水平成分と鉛直成分の相対的な大きさを定める係数となる。

式(1)の最小解を持つオイラー-ラグランジェ方程式は、

$$\left. \begin{aligned} u &= u_0 + \frac{1}{2\alpha_1^2} \frac{\partial \lambda}{\partial x} \\ v &= v_0 + \frac{1}{2\alpha_1^2} \frac{\partial \lambda}{\partial y} \\ w &= w_0 + \frac{1}{2\alpha_2^2} \frac{\partial \lambda}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

であり、これらの方程式は次の境界条件、

$$x \text{ 方向の境界 } n_x \lambda \delta(u) = 0$$

$$y \text{ 方向の境界 } n_y \lambda \delta(v) = 0$$

$$z \text{ 方向の境界 } n_z \lambda \delta(w) = 0$$

を満足しなければならない。ここに、 $\delta(\quad)$ は括弧内の

* 正員 工修 運輸省港湾技術研究所水工部 海洋エネルギー利用研究室(研修生)

** 正員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部 海洋エネルギー利用研究室長

量の第1変分, n_x, n_y, n_z はそれぞれ x, y, z 方向の外向きを正にとった単位法線ベクトルである。式(4)をそれぞれ x, y, z で微分し, 変分方程式に代入するとポアソン型微分方程式,

$$\frac{\partial^2 \lambda}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \lambda}{\partial y^2} + \left(\frac{a_1}{a_2}\right)^2 \frac{\partial^2 \lambda}{\partial z^2} = -2a_1^2 \left(\frac{\partial u_0}{\partial x} + \frac{\partial v_0}{\partial y} + \frac{\partial w_0}{\partial z} \right) \dots\dots\dots (5)$$

が得られる。この式より λ を求め, これを式(4)に代入すると, 質量保存則を満たすように調整された u, v, w が得られる。なお, 底面・側面境界条件は, $\partial \lambda / \partial n = 0$ である。

(2) 境界層上端の境界条件

境界層上端の自由大気の風は, 傾度風・台風(Myers モデル) ハイブリッド風推算モデルにより計算され, 台風圏内では台風モデルの風, 台風の影響範囲外では気象図の気圧分布から計算される傾度風モデルの風となるように空間的な補間操作を行う。ただし, 本研究で対象とした範囲が内湾に限定され, 台風が湾に接近した強風時を推算期間とすることから, 台風モデルのみにより風推算を行う。

台風モデル(Myers モデル)の気圧分布は,

$$P(r) = P_c + \Delta P \exp\left(-\frac{r_0}{r}\right) \dots\dots\dots (6)$$

で表される。ここで, r は台風中心からの距離, $P(r)$ は r 地点における気圧, P_c は台風中心の気圧, ΔP は台風の中心示度, r_0 は台風半径である。傾度風速は, 式(6)の気圧分布より,

$$U_1(r) = -\frac{rf}{2} + \sqrt{\left(\frac{rf}{2}\right)^2 + \frac{\Delta P}{\rho_a} \frac{r_0}{r} \exp\left(-\frac{r_0}{r}\right)} \dots\dots\dots (7)$$

で求められる。ここで, f はコリオリ係数である。また, 台風の移動に伴って生じる場の風は, 式(7)の傾度風速と台風の進行速度 V に比例するものと仮定し,

$$U_2(r) = \frac{U_1(r)}{U_1(r_0)} V \dots\dots\dots (8)$$

で与えられる。台風モデルによる海面摩擦の影響を受けない自由大気の風は, 式(7)で求められる傾度風速と式(8)で求められる場の風をベクトル合成することにより求められる。

(3) 経験則・マスコンハイブリッド風推算モデル

著者ら(1992)により, 東京湾・大阪湾・伊勢湾の観測海上風と傾度風(推算風)の相関解析が行われた。その結果から, 内湾海上風速(w)は, 傾度風速(w_g)ならびに陸上地形特性を代表する有効吹送距離と陸上地形標高から求められる仮想フェッチ(F')の2つのパラメータを用いた次式で表される簡単な経験則,

$$w = 1.690(1 - 0.426e^{-0.034F'})w_g^{0.735} \dots\dots\dots (9)$$

で近似されることを提示した。また, 内湾海上風の風向偏向角が, 傾度風速に依存することも明らかにした。これら観測データから得られた内湾海上風の特徴を風推算モデルにおいて生かすために, 経験則から求められる風場を最下層の初期条件としたマスコンモデルによる風推算を行う。従来のマスコンモデルは, 観測値等を内挿するか, 傾度風モデルにより推算される風を初期条件として与えている。マスコンモデルの特性として初期条件を真値とみなし, 初期値からの誤差を最小とする風場を質量保存則を満たすように全格子点で求めるため, 調整された解が初期値に強く依存することが問題となる。また, 観測風速として陸上風を用いる場合に, 海上への換算を行うことが必要となる。そのため, 適切な情報を初期値として与えることに注意する必要がある。

この初期条件を, 観測海上風から求めた経験則を生かして設定することが改良モデルの特徴である。また, 風の鉛直分布は種々の設定方法(例えば, 対数分布を仮定したもの等)があるが, 本計算では, 境界層上端において与えた自由大気の風と最下層で与えた経験則に基づく初期風を線形内挿して与えることとする。

(4) 気流数値計算モデル

気流数値計算モデル(3次元 SOLA モデル)は, 3次元の粘性流体の連続式と運動方程式を直接的に解く方法であり, 構造物背後に生じる渦の再現等, 小スケールの風場推算について適用されている例が多い。

この計算は, 初期条件に影響されことなく収束解を求めることが可能である。このモデルの問題点は, 海面及び陸上面の境界条件をどのように設定するかにあるが, 本研究では摩擦なしの条件により計算結果の特性を検討する。

3. 伊勢湾海上風への適用性に関する検討

(1) 計算に用いた伊勢湾の地形

図-1に示す伊勢湾を中心とする周辺の陸上部を含む領域を風推算の対象範囲とする。マスコンモデルの計算格子は, 水平方向を $2.0 \text{ km} \times 2.0 \text{ km}$ 格子で近似し, 鉛直方向は, 海上近傍の推算精度を向上させるために最下層から層厚 20 m を 50 層, 層厚 50 m を 10 層の 60 層に分割した。ここに, 最下層を 20 m とするのは, 最下層の中央値が海面上 10 m の風(海上風の代表高度)に相当するためである。図-1に, 最下層が海域となる計算格子の配置と陸上部の等高線ならびに風の観測地点を示す。

伊勢湾は, 南北方向に海域が広がり, 陸上は海拔 0 m 地帯が北側に広がり標高は低い, 湾の東西方向は 500 m を超える山岳地帯に囲まれている。

(2) 対象気象擾乱及び推算対象期間

風推算を行う気象擾乱は, 伊勢湾に来襲した代表的な

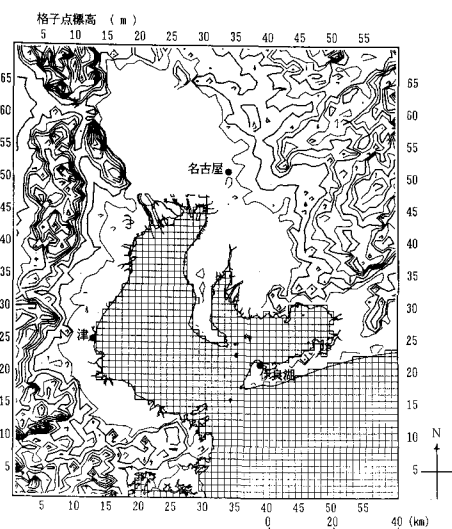
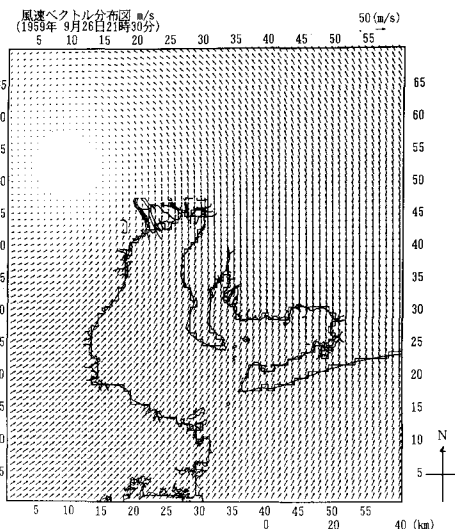


図-1 伊勢湾の最下層計算格子及び陸上部の等高線

図-2 台風モデルにより推算された風速分布
(伊勢湾台風: 1959年 9月 26日 21: 30)

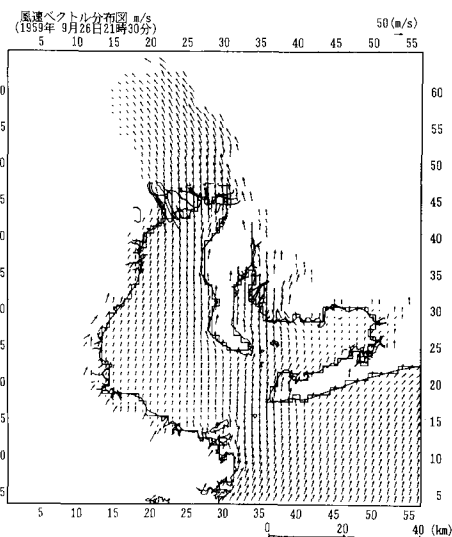
台風である伊勢湾台風 (5915 号) とする。この台風は、伊勢湾の東側を通過したため、湾内全域において 35 m/s を超える風速が記録された。推算対象期間は、1959 年 9 月 26 日 12: 00~27 日 3: 00 とする。

(3) 風推算精度の検討

図-2 は、従来の高潮・波浪推算で広く用いられている台風モデルにより推算された 1959 年 9 月 26 日 21: 30 (伊勢湾台風最接近時) の風速分布である。推算条件としては、風の低減率 0.66、風の偏向角 30° と仮定している。伊勢湾内全域において、SW 方向にほぼ様な風が吹く結果となった。これに対し、図-3 は、提案した内湾海上風モデルにより推算された同時刻の風速分布である。風速の出力は、最下層の中央値 (海面上 10 m) を抽出したものであり、海上風の代表高度に相当する。

内湾海上風モデルによる推算結果は、陸上地形を考慮していない台風モデルの推算結果に比べて、伊勢湾、三河湾、衣ヶ浦湾のそれぞれの湾軸に沿った方向に風向が変化している。また、半島等、局所的な陸上地形の起伏の影響を受けて風向が偏向しており、伊勢湾の定性的な風速・風向出現特性と一致する。さらに、湾の南から西側は相対的に風が弱く、海域を吹送するとともに次第に風速が増大しており、内湾海上風の特性が良く表現されている。

次に、伊勢湾を代表する風観測地点として図-1 に黒丸で示した津・名古屋・伊良湖を選び、観測風と推算風との経時変化の比較を行う。図-4 は、津における風速と風向の比較結果を示したものであり、黒丸が観測風、点線がモデル台風による推算風、実線が内湾モデルによる推算風である。伊勢湾台風が最接近した 9 月 26 日 21: 30 以降、観測風は急激に風速が減少するのに対して、台

図-3 内湾海上風モデルにより推算された風速分布
(伊勢湾台風: 1959年 9月 26日 21: 30)

風モデルの推算値は逆に再び強まる傾向が見られる。一方、内湾モデルの推算値は急激に風速が弱まり、観測風と良い一致を示している。図-5 は名古屋における比較結果であるが、最大風速発生時前後の変化を比較すると、台風モデルは強めの推算値となるのに対して、内湾モデルは観測風と同程度の風速が再現されている。また、観測風の風向は 21: 00 以降 S 系であるが、台風モデルの推算風向は S から WSW へと偏向する。これに対し、内湾モデルの推算風向は伊勢湾湾軸方向である S を維持

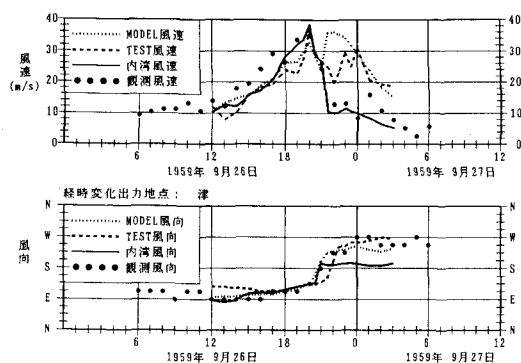


図-4 津の観測風と推算結果の風向・風速比較

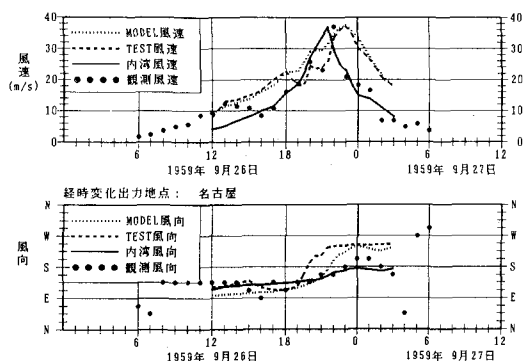


図-5 名古屋の観測風と推算結果の風向・風速比較

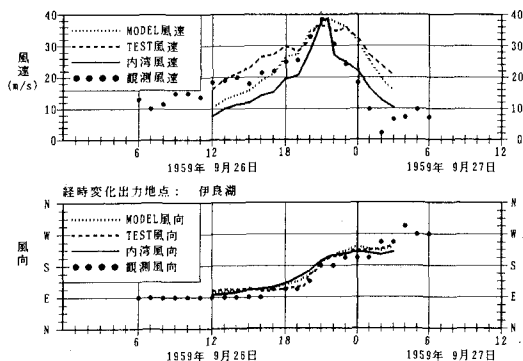


図-6 伊良湖の観測風と推算結果の風向・風速比較

し、観測風向と同様の傾向を示している。図-6 に示す伊良湖も同様に、内湾モデルの推算結果は観測風と良い一致を示している。以上のことから、本研究で提案した内湾モデルの推算風は陸上地形の影響を強く受けて複雑な変化を示す内湾の風向・風速の傾向を良く再現していることがわかる。

(4) 初期風場の推算結果への影響に関する検討

本研究で提案した内湾海上風モデルは、傾度風を上空の境界条件とし、陸上地形効果を組み入れた内湾海上風の経験則を初期条件の設定に利用する改良型マスコンモ

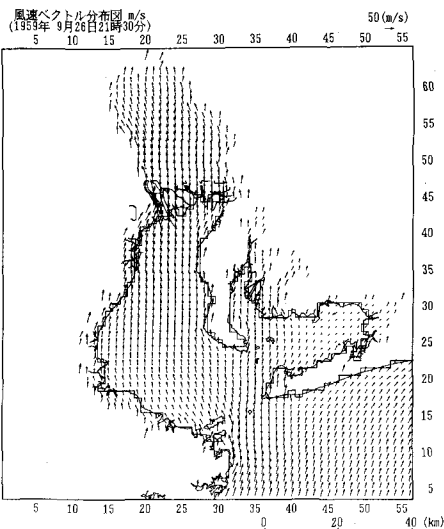


図-7 台風モデルの風を初期値とした場合の推算風の風速分布 (伊勢湾台風: 1959年9月26日21:30)

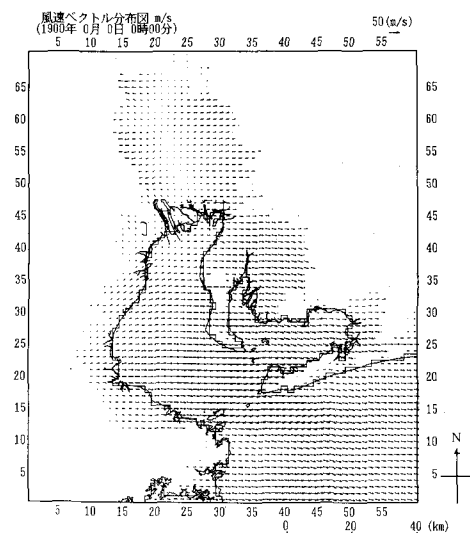


図-8 3次元気流数値計算モデルによる伊勢湾の風場計算結果 (初期風速 30 m/s, 風向 W)

デルである。従来のマスコンモデルは、観測風を除けば、陸上地形の効果を含まない外洋風推算モデルの結果を初期条件として与えている。マスコンモデルが初期条件に強く依存する特性を有する点から考えると、初期条件の設定方法に問題があった。一方、著者らの経験則は陸上地形による大局的な海上風の変動を考慮できるが、局所的な気流の集中・発散等を見積もることが難しかった。このような問題を内湾海上風の経験則とマスコンモデルを組み合わせることにより、解決できるものと考えた。

図-7 は、台風モデルにより推算された海上 10 m 高度

の風を最下層の初期風場として与えるマスコンモデルの推算結果である。湾軸に風向が偏向する傾向は推算されているが、海域の風速はほぼ一様であり、吹送距離に依存する傾向は見られない。図-4から図-6に破線 (TEST 風と表示) で示した代表点の推算風経時変化から見ると、モデル台風の推算結果と傾向が似ている。このように、初期条件の設定如何で、マスコンモデルによる推算結果は違いが生じる。

(5) 3次元気流数値計算モデルによる試算

粘性流体の連続式と運動方程式を直接的に解く、3次元気流数値計算モデルにより、伊勢湾を対象とした試算を行う。図-8は、初期風速を30 m/s、風向をWとする場合の1時間経過後の風速分布である。特に、陸上近傍の風は、マスコンモデルよりも滑らかに計算されており、一部の区域では逆風が計算されている。

この計算法の問題点は、1時間分の計算を行うのに要するCPU時間がEWSで約10時間程度となり、膨大な計算時間を要する点である。また、今回の計算では考慮しなかった地表・海面の抵抗の組み込み方法である。さらに、気温・水温の効果も低風速時には考慮する必要がある。課題の多い手法であるが、風場の直接解法であることから、将来有力な推算手法になるものと考えられる。

4. モデル気象擾乱の推算手法に関する考察

陸上地形の影響を受けた風場の推定手法のうち、実測風内挿法は観測データを用いることから、実際の風場に比較的近いものを再現するには優位な手法と言える。ただし、陸上風を海上に換算する必要があること、ならびに港湾構造物の設計等に用いるモデル気象擾乱の風場に適用できないこと等が問題点として挙げられる。本研究で提案したモデルは、自由大気の傾度風 (気象図から計算するか、台風モデルにより計算する) を上層境界条件とし、内湾海上風の経験則を初期風場の設定に利用していることから、このような問題点にも対応可能なモデルである。

マスコンモデルによる伊勢湾の風計算は、波浪・高潮推算の外力場計算として同時に計算することが可能であるが、EWSで約1.0時間から2.0時間を要する。このため、波浪・高潮推算等に適用する場合の計算効率を良くするために、あらかじめ風向別、風速階級別の風推算を実施し、全計算格子点について上空傾度風の海面への補正係数を設定しておくことがより実用的な方法として考えられる。モデル気象擾乱の計算についても、上空の境界条件である傾度風を入力することにより、海上10 m

高度の風速に瞬時に変換可能である。

5. おわりに

周辺地形の影響を強く受ける内湾海上風の推算を効率良く実施する手法を提案し、現地への適用性について検証した。以下に主要な成果をまとめる。

① 伊勢湾における台風5915号 (伊勢湾台風) 来襲時を対象として内湾海上風推算モデルの適用性を調べた。代表点における観測風と推算風の経時変化を比較した結果、提案した内湾モデルの結果は観測風と良好な一致を示すことが明らかとなった。特に、内湾海上風モデルは、陸上地形を考慮していない台風モデルに比べ、湾軸に沿う方向に風向が変化している様子が再現できる。

② 本研究で提案した内湾海上風推算モデルは、傾度風推算結果を上層境界条件とし、先に著者らが提案した陸上地形効果を組み入れた内湾海上風の経験則による風を初期条件とする改良型マスコンモデルである。マスコンモデルは、初期条件に強く依存することから、陸上地形の効果を含まない外洋風推算モデルの結果を初期条件にすると、適切な風場が得られない等の問題があった。内湾海上風の経験則とマスコンモデルを組み合わせることにより、この問題点が改善された。

③ 将来的に実用化されると考えられる3次元SOLAモデルを用いて現地地形下で風場計算を行った。このモデルは、最下層の抵抗を適切に与えることが困難であること、膨大な計算時間を要すること等から、実用段階に至っていない。しかしながら、局所的な風場が滑らかに計算できること、陸上地形により遮蔽された区域における逆風の再現等、他の手法に比べて定性的に妥当な結果が得られることが確認できた。

④ 提案した内湾海上風推算モデルは、上空の傾度風の推算値を境界条件として用いることから、波浪推算・高潮推算に適用されるモデル気象擾乱を対象とする風推算にも応用が可能である。

謝辞：本研究を行うにあたり、愛媛大学工学部柳哲雄教授から御助言を、運輸省港湾技術研究所海洋エネルギー研究室青野利夫氏から有意義な討論を得た。ここに、記して謝意を表す。

参考文献

- 柴木秀之・後藤智明 (1992): 内湾海上風の地形依存性について, 第39回海岸工学論文集, 第39巻, pp. 141-145.
- 日本気象協会 (1988): 内湾の海上風と波浪の推算に関する研究, pp. 1-90.