

伊勢湾周辺海域の海上風の推算に関する研究

STUDY ON ESTIMATION OF WIND FIELD OVER ISE-BAY AREA

水谷法美¹・吉田達哉²・番場豊和²

Norimi MIZUTANI, Tatsuya YOSHIDA and Toyokazu BANBA

¹正会員 工博 名古屋大学大学院助教授 工学研究科土木工学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

²学生会員 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (同上)

A three dimensional SOLA scheme model has been developed to estimate sea wind over Ise Bay area. RSM-GPV has been interpolated and then adjusted by MASCON model to provide initial and boundary conditions. The wind field after one hour has been estimated for typical events by this model. As a result, it has been confirmed that the model developed in this study can give three dimensional wind field taking landform into account. Moreover, calculated wind vector has been confirmed to agree well with measured one at Kamishima.

Key Words : Ise-bay, sea wind, GPV, wind waves, MASCON model, SOLA scheme model

1. 緒言

一般に、海域構造物の耐波安定性は、暴浪時の波に基づく設計波に基づいて評価されるが、漂砂に伴う海浜変形のような現象に対しては、暴浪時の波浪の影響も大きいものの、常時の波浪でも外力は小さいものの作用時間が長いため、その影響は大きい。したがって、海浜変形の評価には、波浪の時空間変化を考慮した検討が望ましい。近年、第三世代波浪予測モデルが実用化され、また、浅海域への適用も検討されている¹⁾。しかしながら、現状では、特定の海浜のような局所的な波浪の時空間変化の予測には解決すべき問題も残されている。また、波浪予測モデルでは、その外力である風の場合の予測精度が波浪推算の精度の一支配要因でもある。

海域における波浪は、地震による津波を除けば風により生起する風波であり、したがって海上風と密接に関わっており、特定の海域の波浪の時空間変化を予測するためには、海上風の予測が必要不可欠である。風に関しては、沿岸域も含めていくつかの観測点もあり、また、風の外力である気圧の時空間分布も最近ではGPV(Grid Point Value)などにより提供されており、比較的入手が容易である。

また、全球レベルのような大規模気象モデルから出力される風場を用いて、海上風を予測するためのモデルも検討されており、数値的・統計的モデル、

内挿法によるモデルなどがある。

数値的・統計的モデルには、Prognosticモデル、Diagnosticモデル、統計的モデルなどがある。そして、DiagnosticモデルにはBlackadar²⁾やCardoneら³⁾によっていくつかの経験則が提案されている。また、統計的モデルには、山口ら⁴⁾によって提案されるモデルなどがある。

また、内挿法によるモデルは、内湾や水道部など周辺の地形の影響を受けて複雑な分布をするような海域で、できるだけ多くの観測値を用いて空間的に内挿することで推算する方法である。しかし、観測点の分布が不規則であるため、格子点によって推定精度が異なるという欠点がある。そこで、質量保存則などの物理則を束縛条件にして内挿計算を行うMASCONモデルが考えられている。

一方、三次元の流体場の運動を解く手法として、三次元SOLAモデルが、Hirtら⁵⁾によって開発されている。空気を非圧縮性と仮定すれば、水の場合と同様にこの手法を風場の計算に適用可能である。

そこで本研究では、海上風の推算モデルとして、三次元SOLAモデルを用いることとし、その初期値として、MASCONモデルによって空間的に補間したデータを利用する。また、初期値はRSM-GPVを、MASCONモデルによって空間に対して内挿したものをさらに時間的に補間したデータを利用する。

現在、気象庁では、全球モデル(GSM)に基づく数

値気象データを使い、領域モデル(RSM)による海上風推算を行っており、それをGPVとして配信しているが、ここで用いられているMASCONモデルのみでは、空間内の質量保存則しか満足していない。そこで、本研究では、MASCONモデルに加えてNavier-Stokes方程式を満足するように求めていく3次元SOLAモデルをも用いて推算することで、領域内の力学特性を考慮し、海上風の空間的、時間的予測手法を開発しようとするものである。

2. 数値解析

本研究では、GPVを空間的に補間したものをMASCONモデルにより質量保存則を満たすように空間内挿したものを初期値とし、また、GPVを時間的に補間したものを時間ステップ毎の境界値として、3次元SOLAモデルによって、海上風の推算を行うこととする。

GPVでは、風速の鉛直分布が層高度で与えられているため、そのまま数値計算に使用できない。そこで本研究では、鉛直方向に1次Lagrange補間を行って風速の鉛直分布を補間することとした。この際、鉛直方向に厚さ50mの層を20層まで考慮することとした。水平方向に対しては、GPVは上層が緯度24分×経度30分の格子に対して、地上では緯度12分×経度15分の格子と格子間隔も一樣でない。さらに計算領域に比べて格子間隔がかなり粗いため、本計算領域での格子間隔である緯度30秒×経度45秒に合うようにLagrange補間を行った。さらに、GPVは、3時間毎のデータであるため、本研究での境界値として用いるために、時間に対してもLagrange補間を用いて1秒間隔のデータを作成し、これを境界値とした。しかし、これらの補間値は、連続式を満足している保証はないのでMASCONモデルによって調整を行う。

以下に、MASCONモデルとそれによって調整された初期値と境界値を使用して風場の時間発展を計算する3次元SOLAモデルについて詳述する。

(1) MASCONモデル⁶⁾⁻⁹⁾

基本式は、大気を非圧縮性流体とみなし、質量保存則として連続式を用いる。

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

ここで(x, y, z)は直角直交座標系における水平および鉛直座標でxは北→南、yは西→東を正方向とする。u, v, wはそれぞれ風速のx, y, z成分である。

まず、限られた数の観測値(GPV)を補間することによって風ベクトルの空間分布を作成し、次にこの分布を修正して質量保存則を満足するように調整する。調整値の2乗和をEで表すと次式となる。

$$E(u, v, w, \lambda) = \int_V \left\{ \alpha_1^2 (u - u^0)^2 + \alpha_1^2 (v - v^0)^2 + \alpha_1^2 (w - w^0)^2 + \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} dx dy dz \quad (2)$$

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 は観測値に対する初期値、 λ はLagrangeの未定乗数である。 α_1 と α_2 は $\alpha_i^2 = 0.5 \sigma_i^{-2}$ として扱われるGaussの精度係数である。 σ_i は観測誤差で、調整した場からの観測した場の偏りである。式(2)を最小にするためには、

$$\frac{\partial^2 \lambda}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \lambda}{\partial y^2} + \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right)^2 \frac{\partial^2 \lambda}{\partial z^2} = -2\alpha_1^2 \left(\frac{\partial u^0}{\partial x} + \frac{\partial v^0}{\partial y} + \frac{\partial w^0}{\partial z} \right) \quad (3)$$

で表されるPoisson型偏微分方程式によりLagrangeの未定乗数 λ を解き、その結果から、式(2)を最小にするEuler-Lagrange方程式

$$u = u^0 + \frac{1}{2\alpha_1^2} \frac{\partial \lambda}{\partial x} \quad (4)$$

$$v = v^0 + \frac{1}{2\alpha_1^2} \frac{\partial \lambda}{\partial y} \quad (5)$$

$$w = w^0 + \frac{1}{2\alpha_1^2} \frac{\partial \lambda}{\partial z} \quad (6)$$

により、修正風ベクトルを求める。また、式(4)～(6)は、次の境界条件を満たさねばならない。

$$x \text{ 方向境界: } n_x \lambda \delta(u) = 0 \quad (7)$$

$$y \text{ 方向境界: } n_y \lambda \delta(v) = 0 \quad (8)$$

$$z \text{ 方向境界: } n_z \lambda \delta(w) = 0 \quad (9)$$

ここで、 λ は括弧内の量の第1変分、 n_x, n_y, n_z はそれぞれx, y, z方向の外向き単位法線ベクトルである。これらを λ で指定する際、過去の研究成果を参考に λ の法線方向の勾配を0とした。

解くべき微分方程式(2.3)を差分方程式に直すと、 $\nabla^2 \lambda_{i,j,k} + \sigma_{i,j,k} = 0$

となる。ところが初期推定値を代入しても、その誤差のために右辺は0にはならない。この剰余を小さくするように次の推定値を与え、剰余を次第に減少させ、 $\lambda_{i,j,k}$ を真値に近付けていく。この $\lambda_{i,j,k}$ が定まると各格子点での調整された成分風速が以下のように計算される。

$$u_{i,j,k} = \frac{1}{4} \left(u_{i+1,j,k}^n + 2u_{i,j,k}^n + u_{i-1,j,k}^n \right) + \frac{1}{2\alpha_1^2} \left(\frac{\lambda_{i+1,j,k} - \lambda_{i-1,j,k}}{2\Delta x} \right) \quad (10)$$

$$v_{i,j,k} = \frac{1}{4} \left(v_{i,j+1,k}^n + 2v_{i,j,k}^n + v_{i,j-1,k}^n \right) + \frac{1}{2\alpha_1^2} \left(\frac{\lambda_{i,j+1,k} - \lambda_{i,j-1,k}}{2\Delta y} \right) \quad (11)$$

$$w_{i,j,k} = \frac{1}{4} (w_{i,j,k+1}^n + 2w_{i,j,k}^n + w_{i,j,k-1}^n) + \frac{1}{2\alpha_1^2} \left(\frac{\lambda_{i,j,k+1} - \lambda_{i,j,k-1}}{2\Delta x} \right) \quad (12)$$

(2) 3次元SOLAモデル

基礎式は、三次元流れに関する連続式（質量保存則）とNavier-Stokes方程式（運動方程式）で表される。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \quad (14)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] \quad (15)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial vw}{\partial y} + \frac{\partial w^2}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] \quad (16)$$

ここで、 ρ は空気の密度、 P は気圧、 ν は粘性係数である。

上記の方程式を三次元SOLAモデルのスキームで解いた。

3. 計算結果と考察

(1) 計算領域と対象データ

ここでは、通常時の気象例として1997年9月7日0時、異常時の気象例として台風接近時である1997年9月17日3時のGPVを使用する。また、計算領域は、伊勢湾周辺海域とし、図-1に等高線を示す南北方向に北緯34度20分～同35度40分、東西方向に東経136度15分～同137度30分の範囲とした。図の軸の数字は格子番号であり、格子間隔は、水平方向は東西および南北方向ともに2kmとした。鉛直方向は、地表面（ $z=0m$ ）から1000mまでを対象に、50m間隔で20層に分割した。なお、対象領域の地形の標高値は、国土地理院発行の数値地図を用いた。なお、伊勢湾奥で0m地帯が広がっているため、図-1の0mの等高線は実際の海岸線とは一致していない。

(2) MASCONモデルの妥当性

通常時と台風接近時のGPVを線形補間して得られた風場を図-2と図-3に示す。陸地と海との境界付近で不連続な風速ベクトルが出現したり、海上においても、隣接する格子にもかかわらず風向きが不連続

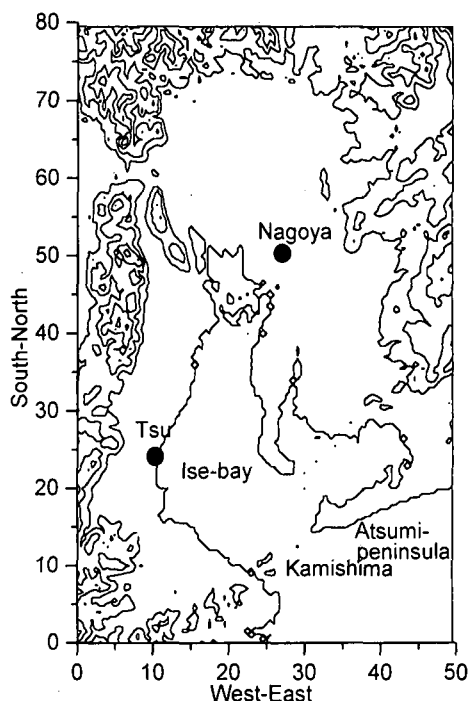


図-1 計算領域

になっている箇所も見られるなど、単純な線形補間のみでは実際の風場と異なると思われる分布となっていることがわかる。これは、風場が単純な線形補間のみで求められており、連続式などの力学的な条件や地形の効果などが一切考慮されていないためである。そこで、連続式を束縛条件としたMASCONモデルによって、補間した風場を調整した結果を図-4と図-5に示す。両図より、MASCONモデルによって調整された風速ベクトルが、陸上地形の影響を受けて偏向している。これは、図-4に示す通常時の渥美半島に沿う東風、伊勢湾の奥に向かって吹く南、南西風などに見ることができる。また、台風接近時の例では、この時刻に台風の中心が計算領域の北西である日本海沖にあったが、図-5より、その中心へと吹き込むような南西風が確認できる。また、この時にも、渥美半島沖などで陸上地形の影響を受けて、風向きが偏向していることが確認できる。

以上のように、MASCONモデルを使って補間した風場を調整することにより、GPVからの初期風場の特性を損なうことなく、陸上地形の影響を再現することができると言える。

(3) 三次元SOLAスキームによる風場の推算

上述の調整された風場を初期条件として、三次元SOLAスキームによって、1時間後の風場の推算を行った。計算は、時間間隔を1秒とし、収束条件を $D_{max}=0.001$ 、動粘性係数を $\nu=20(m^2/s)$ とし、地表面ではno-slip条件、上方の開境界ではfree-slip条件を与えた。

三次元SOLAスキームによって計算された1時間後の風場を図-6から図-9に示す。初期風場では伊勢湾奥において、南、南西風が見られていたが、図-6に示した推算した風場では、伊勢湾奥から吹き出す北

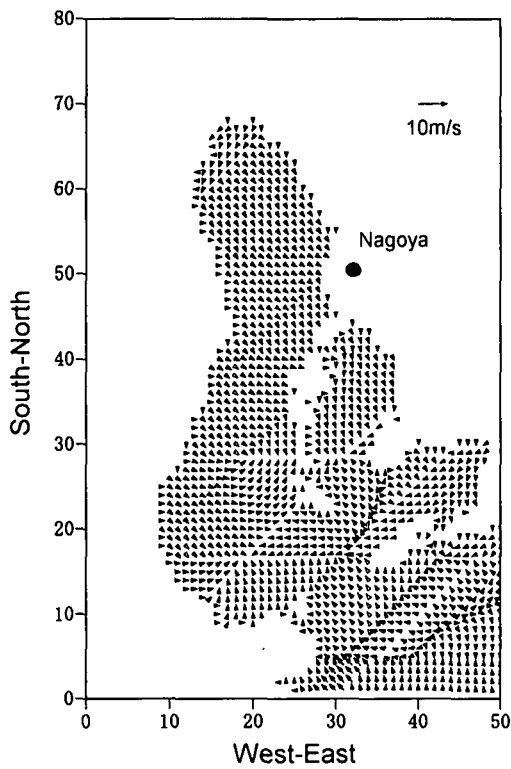


図-2 通常時の補間風速ベクトル
(1997年9月7日0時)

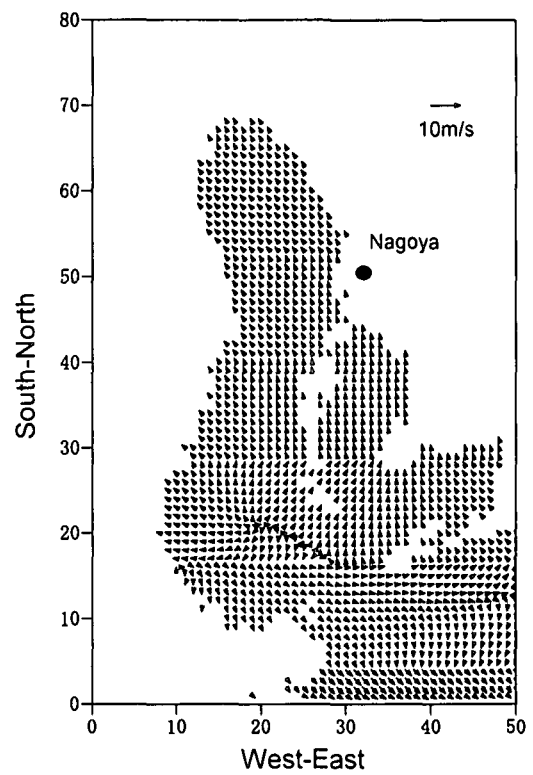


図-4 通常時の調整風速ベクトル
(1997年9月7日0時)

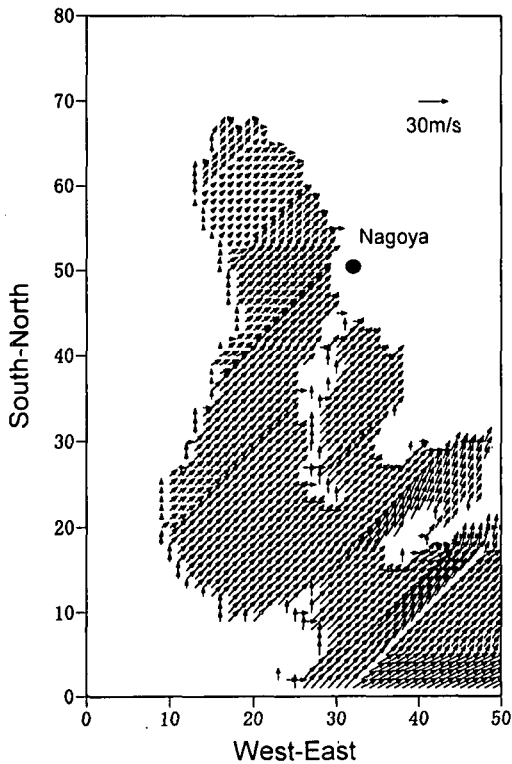


図-3 台風時の補間風速ベクトル
(1997年9月17日3時)

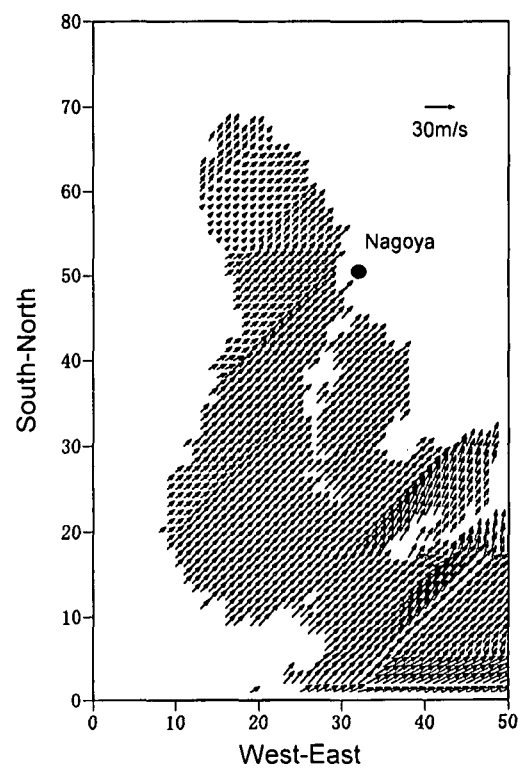


図-5 台風時の調整風速ベクトル
(1997年9月17日3時)

風へと変化していることが見られる。

また、知多半島や紀伊半島東岸では、地形に沿うように風向きが偏向しており、渥美半島沖では、半島に沿うような一様な西風を見ることができる。図-7に示す台風時を見ると、通常時と同様に渥美半

島や知多半島に沿って偏向する風速ベクトルを見ることができる。上空150mでの風場を見ると、地上付近に比べて、場全体にわたって風速が大きくなり、内陸部にまで風速分布が見られる。これは高度が高くなるにしたがってその標高以下の領域が広がるた

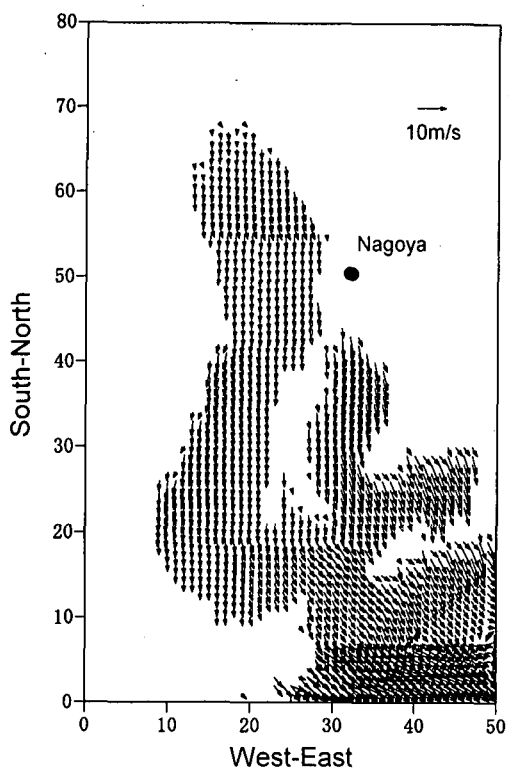


図-6 通常時の推算風速ベクトル
(1997年9月7日1時)

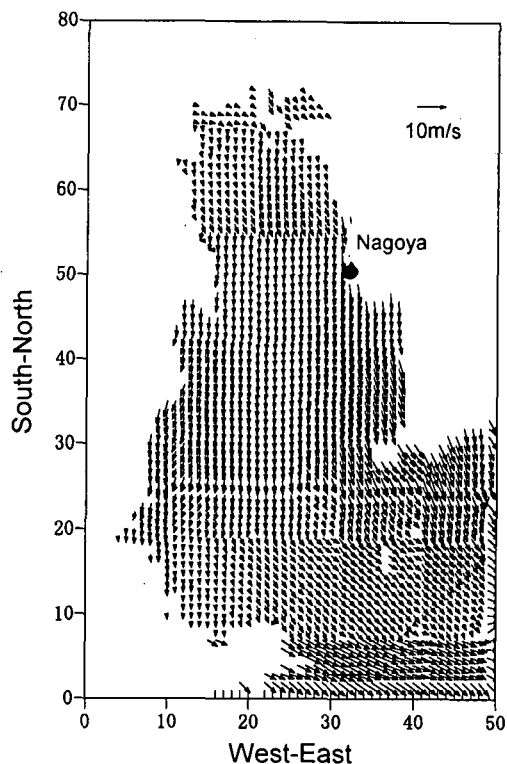


図-8 通常時の推算風速ベクトル
(1997年9月7日1時, $z=150\text{m}$)

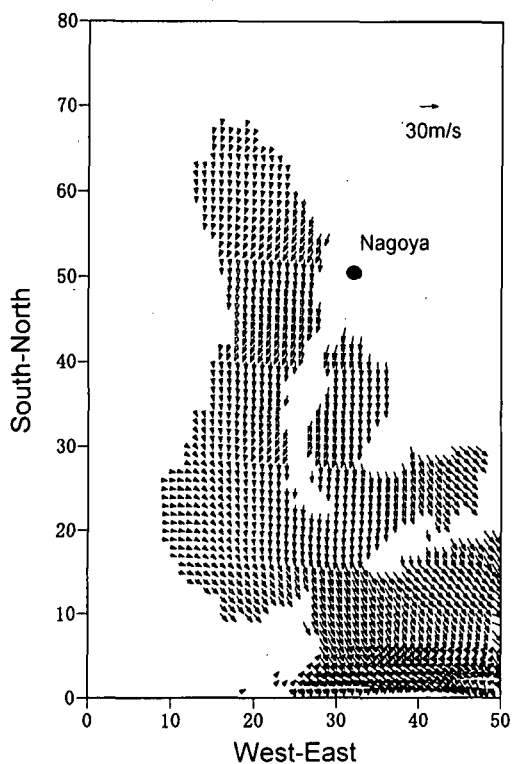


図-7 台風時の推算風速ベクトル
(1997年9月17日4時)

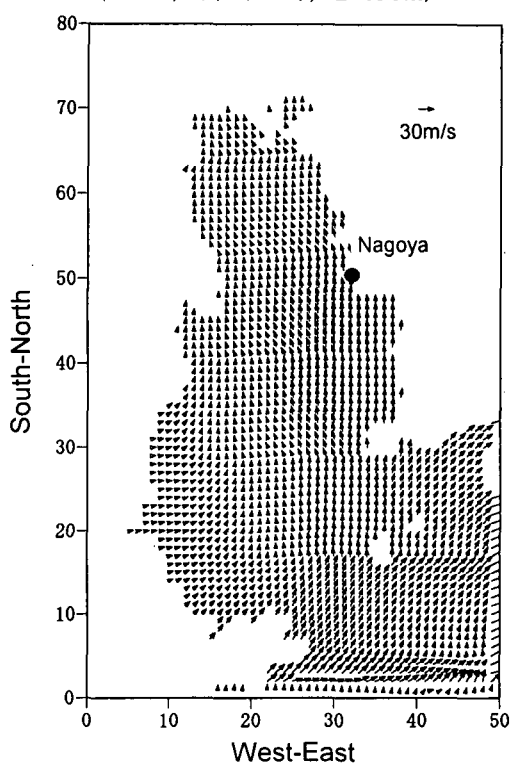


図-9 台風時の推算風速ベクトル
(1997年9月17日4時, $z=150\text{m}$)

めである。ところが、図-8および図-9を見ると、いずれにおいても、図の右側および上方境界において、風速ベクトルの整合性が悪くなる。この点については、今後境界条件の取り扱いなど、検討していく必要がある。

次に、伊勢湾口部に位置する神島における風速の

観測地との比較を行う。本計算で求められた風速の平均値と観測地の比較を表-1に示す。なお、本計算では、鉛直方向の格子間隔を50mとしているが、神島における風速観測点が海拔220mであったため、計算で求められた200m高度の風から、風速の鉛直方向分布の(1/7)乗則を仮定して220m高度の風に変換

表-1 計算値と観測値との比較 (m/s)

日時	計算値		観測値	
	風速	風向	風速	風向
通常時	5.6	SE	5.7	E
台風時	29.2	NE	27.9	E

した。表-1に示すように、通常時と台風時のいずれの場合も風速はほぼ等しい値となっており、三次元SOLAモデルによる風場の推算は実際の観測値と比較しても良好な結果を示すことが確認される。また、風速ベクトルが示す風向きと観測資料による風向きを比較すると、通常時は、計算値が南東、観測値が東となっており、台風時には、計算値が北東、観測値が東と完全に一致はしていない。しかし、本研究で比較に用いた観測値は1時間の平均風速であるのに対し、計算値が1時間後の瞬間風速であることを考えると、本計算は実際の風場をほぼ妥当に再現していると判断できそうである。

以上のように、三次元SOLAモデルによって内湾域での風場の推算を行うことができるが、推算風速の計算を行うにあたって、その結果は初期値、境界条件に大きく左右されてしまう。本研究では、初期値、境界値として、RSM-GPV補間したものを用いたが、この補間を行う際に、地表面の状態を考慮していないことや境界層理論を考慮していないことなどからの問題点も残されている。また、MASCONモデルは、その初期値に大きく依存し、結果として得られる調整風速が大きく異なることが知られている。そのため、本研究においても、適切な初期値、境界値が与えられているとは言い難い。こうした適切な初期値、境界値を求めることは今後の課題である。しかし、MASCONモデルを用いて初期値、境界値を与えられたSOLAモデルによって得られた推算風場は地形の影響も取り入れることができ、内湾域のような周辺地形の影響を受ける場での風の推算に適していることが確認された。

4. 結論

本研究では、3次元SOLAモデルを用いた伊勢湾周辺海域における海上風推算手法の開発について検討を加えた。その結果、以下のような結論を得た。

- 1) 3次元SOLAモデルによる内湾域での海上風推算手法を開発した。
- 2) SOLAモデルの初期値、境界値としてRSM-GPVを補間し、MASCONモデルによって調整したものをを用いて、MASCONモデルが地形の効果を取り入れられることを確認した。

- 3) 開発した推算手法において、地形の効果が取り入れられていることを確認した。
- 4) 本推算手法において求められた風場が、実際の風場、観測値とよい一致をすることが確認された。ただし、更なる精度を求めるために、今後、境界層理論の導入などで、より適切な初期値、境界値を与える必要がある。

謝辞：本研究を行うに当たり、文部省科学研究費補助金（基盤研究(B)(1)）（代表者 茨城大学 三村信男教授）および文部省科学研究費補助金（基盤研究(B)(1)）（代表者 豊橋技術科学大学 青木伸一助教授）の補助を得たことを付記し、感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 宇都宮好博・大西健二・鈴木靖：第三世代波浪推算モデルの浅海域への適用，海講演文集，第46巻，pp.266-270，1999.
- 2) Blackadar, A.K. : A simplified two-layer model of the baroclinic neutral atmospheric boundary layer, Air Force Cambridge Res. Lab. Report, 65-531, pp.49-65, 1965.
- 3) Cardone, V.J. : Specification of the wind distribution in the marine boundary layer for wave forecasting, New York Univ., School of Eng. and Science, Report GSL-TR69-1, 131p., 1969.
- 4) 山口正隆・渡辺健・畑田佳男：大阪湾における海上風の平面分布特性について，第28回海岸工学講演会論文集，pp.168-172，1981.
- 5) Hirt, C. W, Nichols, B.D. and Romero, N. C. : "SOLA" a numerical SOLution Algorithm for transient fluid flows, La5857, 1975.
- 6) 磯崎一郎・鈴木靖：波浪の推算と予報，pp80-108，1999.
- 7) 岡田弘三・林健次・磯崎一郎：内湾における海上風推算手法の研究，海の研究，Vol.4，N0.2，pp91-99，1995.
- 8) 後藤智明・柴木秀之：海上風の特徴と陸上地形の影響を考慮した海上風推算モデル，港湾技術研究所報告，第33巻，第3号，pp85-90，1993.
- 9) 日本気象協会：内湾の海上風と波浪の推算に関する研究，pp15-27,35-42，1988.