

3 次元風況モデルによる海上風推算手法の提案

Prediction of Sea Surface Wind Distribution with a Three Dimensional Wind Model

荒川 洋¹・神田康嗣²・石原 孟³

Hiroshi ARAKAWA, Yasutsugu KANDA, Takeshi ISHIHARA

In late years 3 dimensional non-linear wind prediction model that a result of high precision is provided are put to practical use. When we predict wave, it is often that we adopt SMB method in a closedown sea area like a bay. It is the fact that sea surface wind of that case converts AMEDAS data of a neighborhood by a simple coefficient by a geographical condition. However, an observation spot of wind in the inland strongly takes influence of the neighboring topography. Therefore, it is thought that it becomes a cause to lose precision of wave prediction to use a uniform coefficient. If a place of wind is correct, as for the wave prediction by SMB method, practical precision is provided. Thus, We suggest a method to predict sea surface wind in 3 dimensional non-linear wind prediction model.

1. はじめに

近年, 数値流体モデルの発達とともに中小規模の風況を精度良く予測するモデルが開発され, 風力発電の際の発電量予測や交通網における安全管理のための強風域の評価などに用いられている。石原ら (2000, 2003a, 2003b) が開発した 3 次元非線形気流予測モデル (MASCOT) も, 比較的に短い計算時間で高い精度の結果が得られるモデルとして実用に供されている。一方, 波浪推算の実務では, 特に内湾などの閉鎖海域においては簡易な手法として SMB 法を採用することが多く, その場合の風況は近隣のアメダスデータなどを立地条件による簡単な係数によって海上風に変換しているのが実情である。また, 瀬戸内海の一部の海域では, 風域に島がある場合やフェッチが短い場合について, 風速の増加係数等が設定され, 慣例的に使用されている。

SMB 法自体は, 風の場合が正確であれば実用的な精度は得られることから, 上記の係数を具体的な根拠をもって設定できれば, 波浪推算の精度が向上すると考える。ここでは, 3 次元気流予測モデルによって 16 方位の風向・風速の計算を行い, その結果を用いて近隣の風向・風速の観測データから任意地点の海上風に換算する方法を提案する。

2. MASCOT の概要

3 次元非線形気流予測モデル MASCOT (Microclimate Analysis System for Complex Terrain) は, 流体力学の基礎方程式である質量保存の式と運動量保存の式

を有限体積法により数値的に解くことによって流れ場の数値解を求めるものである。乱流モデルとしては $k-\varepsilon$ モデルと呼ばれる 2 方程式モデルを用いた。

(1) 基礎方程式

流体運動は以下のような連続の式と運動量保存の式により記述される。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_j}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_j \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) \quad (2)$$

$\bar{u}$ と $\bar{u}'$ は物理空間での速度成分の平均値と変動値を表わし, $\bar{p}$ は圧力, ρ は流体の密度, μ は粘性係数である。また, 添え字 i, j は x 方向, y 方向, z 方向の任意の 2 方向を表わす。レイノルズ応力 $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ は線形渦粘性型モデルにより近似すると, 式 (3) のようになる。

$$\rho \overline{u'_i u'_j} = \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} - \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

μ_t は乱流粘性係数であり, 乱流エネルギー k と乱流エネルギー散逸率 ε により, 式 (4) のように表す。

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

式中の定数は標準 $k-\varepsilon$ モデルの値を用い, $C_\mu = 0.09$ とした。

(2) 乱流モデル

本解析では $k-\varepsilon$ モデルを用いる。乱流エネルギー k および乱流エネルギーの散逸率 ε は式 (5) および式 (6) の輸送方程式を解くことにより求める。

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_j k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon \quad (5)$$

1 正会員 ㈱水域ネットワーク 環境計画部長
2 正会員 ㈱水域ネットワーク 代表取締役
3 正会員 工博 東京大学准教授大学院工学系研究科総合研究機構

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_j \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \overline{\rho u_i' u_j'} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\rho \varepsilon^2}{k} \dots (6)$$

式中の定数は標準 k - ε モデルの値を用い、 $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\varepsilon=1.3$, $C_{\varepsilon 1}=1.44$, $C_{\varepsilon 2}=1.92$ とした。

(3) 数値解法

数値計算はコロケート格子による有限体積法を用いて行う。離散化した保存式は Patankar (1980) の表示法に従い、次のように表す。

$$a_p \phi_p = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b_p \dots (7)$$

a は保存式の対流と拡散項を表し、 b_p はソース項、 nb (neighbor point) は要素 p に接する各要素を表す。

数値解法は Patankar (1980) により提案された SIMPLE 法に準じる。また数値的な振動を防ぐために、Rhie・Chow (1983) により提案された圧力加重補間法を用い、圧力と速度との結合を強化した。対流項の差分近似については速度に対して QUICK、乱流特性量である k , ε に対して一次風上差分を使用した。線形方程式の解法としては RCM 法を用いた。

(4) 境界条件

境界条件については圧力の場合、すべての境界面において勾配 0 の条件を与える。一方、平均風速と乱流量の境界条件は側面境界においてスリップ条件を与える。解析領域の頂点での平均流速と乱流量の値は流れ方向に変化しないと仮定し、入射側の値をそのまま用いる。

流入境界では平均風速 $\bar{u}$ と乱流エネルギー k については次式により与える。

$$\bar{u}(z) = \begin{cases} \bar{u}_G \left(\frac{z}{z_G} \right)^\alpha, & z < z_G \\ \bar{u}_G, & z \geq z_G \end{cases} \dots (8)$$

$$k(z) = \frac{\sigma_u^2(z)}{1.2} \dots (9)$$

ここで、 $\bar{u}_G$ は傾度風高さにおける平均風速、 z は任意垂直高さ、 z_G は傾度風高さ、 σ_u は主流方向の風速変動の標準偏差を表す。 σ_u は、平均風速 $\bar{u}$ と乱れの強さ I_u の鉛直分布から求め、乱れの強さの鉛直分布は修正べき則モデルを用い、式 (10) により算出する。

$$\begin{aligned} \sigma_u(z) &= \bar{u}(z) I_u(z) \\ &= \bar{u}(z) \times \begin{cases} 0.01 \left(\frac{z}{z_G} \right)^{-0.05-\alpha} \left(1 - 0.7 \frac{z}{z_G} \right)^{0.25}, & z < z_G \\ I_G, & z \geq z_G \end{cases} \dots (10) \end{aligned}$$

ここで、 I_G は傾度風高さにおける乱れ強さ、 α は平均風速のべき指数を表す。また乱流エネルギーの散逸率 ε は乱流エネルギー k の分布から次式により求める。

$$\varepsilon(z) = \frac{C_\mu^{3/4} \cdot k(z)^{3/2}}{l}, l = \min(\kappa z, \kappa z_G) \dots (11)$$

ここで、 κ はカルマン常数である。

壁面境界では接線方向の速度成分に対数則、乱流エネルギーにスリップ条件を与える。乱流の散逸率 ε は乱流エネルギー k と壁面に接するセルの中心から壁面までの距離から算出する。

3. 荻田港沖における海上風況の推定

陸上部における風の観測地点で得られた風況データから、荻田港沖の海上風の推定を行った。始めに MAS-COT を用いて 16 方位の気流解析を行い、実地形・実地表面粗度上の風向別・風速を算定する。その結果を用いて、風の観測地点と海上風推算地点との風向別の風速比および風向の時計回りの角度差（以下「風向偏角」と称する）を求め、観測地点における毎時の風向・風速データにそれを乗ずる（風向偏角については加減する）ことにより、荻田港沖における海面上 10.0 m の風向・風速を算定するものである。

荻田港を対象としたのは、内湾で波浪観測が行われデータが公開されていること、新北九州空港において海上風に近い風が観測されていることにより、風および波の 2 つのパラメータで本手法の検証が行えると考えたためである。しかしながら、荻田港近傍には地方気象台がなく、最も近いのは地域気象観測所（以降「アメダス」と称する）の行橋地点である（図-1）。一般的にアメダスの風速計は地表面高さ 10 m 前後（行橋地点は観測高 6.5 m）に設置されており、周辺構造物などの影響を受け易い。したがって、高高度で観測されている地方気象台に比べて相対的に精度が下がると考えられるが、荻田港との位置関係から行橋地点を採用した。

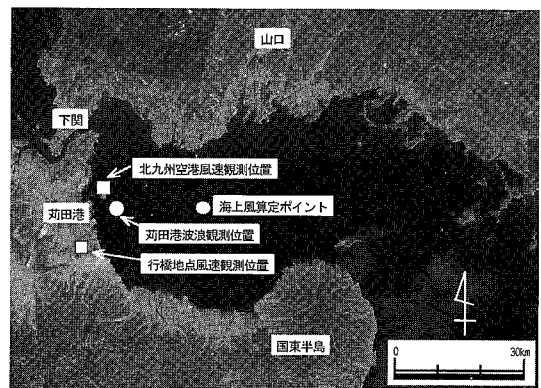


図-1 観測位置図

(1) 解析条件

本解析に用いた解析条件一覧を表-1 に示す。計算領

域としては、それぞれ一辺の長さが 50.0 km 四方の正方形とし行橋地点と荊田港が解析対象領域となる範囲を設定した。それに外接する円を内接させる正方形領域を全体の解析領域とし、その上流側に解析領域と同等の付加領域、さらにそれらの周囲に緩衝領域を設定した(図-2)。計算格子は解析地点近くの計算格子間隔を細かくすることにより計算精度の向上を図るよう、非等間隔の格子を採用した。実地形・実地表面粗度領域では標高データは国土地理院発行の解像度 50 m の数値地図を用い、地表面粗度は国土地理院発行の 1/10 細分区分土地利用データを用いて求めた。

(2) 気流解析結果

16 方位の流入風向について風速比の平面分布の解析を行った計算結果から、E 方向の結果を図-3 に示す。なお、風速比は地表面上・海面上高さ 8.0 m の面内における解析値であり、おおよそ波浪推算に用いる風速の海面上高さ (10.0 m) および行橋地点の風速計設置高さ (6.5 m) に相当する。なお、地表面が完全粗面とな

表-1 MASCOT の解析条件

項 目		設 定 値
解析風向		16 方位 (22.5 度ビッチ)
標高		数値地図 (50 m メッシュ)*1
土地利用 (地表面粗度)		1/10 細分区分土地利用*1 (100 m メッシュ)
対象領域	水平方向 X × Y	50,000 m × 50,000 m
	鉛直方向 Z	2,781 m
最小格子間隔	水平方向 X, Y	100 m
	鉛直方向 Z	5 m
最大格子間隔	水平方向 X, Y	1,000 m
	鉛直方向 Z	
最小格子領域	水平方向 X × Y	10,000 m × 10,000 m
	鉛直方向 Z	
ストレッチング率*2	水平方向 X, Y	1.2 倍
	鉛直方向 Z	1.2 倍
格子数 (X × Y × Z)		346 × 310 × 27 (=2,896,020)
解析中心座標 (世界測地系)		N33°46'41.7" E131°01'21.4"

※ 1 国土地理院発行

※ 2 格子間隔距離の倍率

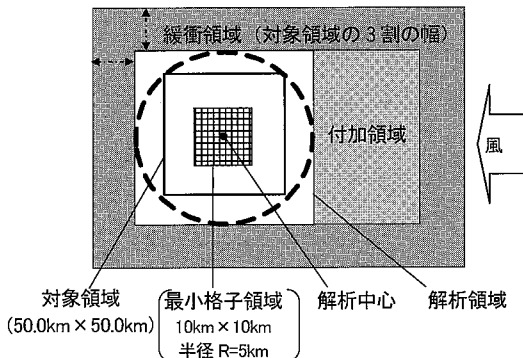


図-2 MASCOT の解析領域 (1 方位に対して)

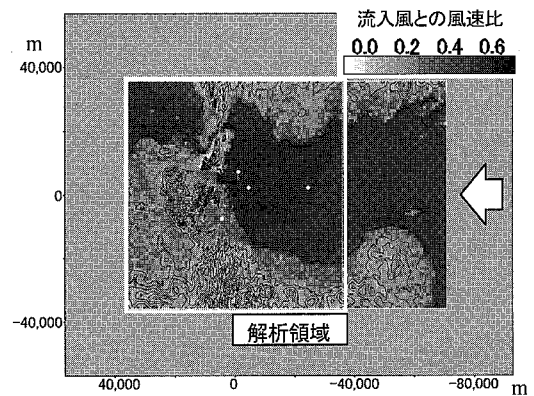


図-3 流入風との風速比分布図 (風向 E, 地表面上高さ 8.0m)

っていない場合、地表面上の流れ場はレイノルズ数に依存する。この場合、風速比は風速に依存してしまうため、風速毎に風速比を求める必要が生じる。しかし、孟・日比 (1995) の示した完全粗面を判定する式 (12) によれば、5 m/s 以上の高風速域であれば海面上であっても完全粗面となるため、ここでは一律 10 m/s の流入風速に対する風速比を求めることとした。

$$Re = u_* z_0 / \nu > 2.3 \dots \dots \dots (12)$$

ここで、 Re は粗度レイノルズ数、 u_* は摩擦速度、 z_0 は粗度長、 ν は空気分子動粘性係数である。

(3) 荊田港沖海域における風況の推定

気流解析により求めた風向別風速比 (K_z) を図-4 に示す。この風速比は気流解析から得られた行橋地点における流入風速との風速比 (K_{obs}) と気流解析から得られた海上風算定地点における海面上高さ 10.0 m の流入風速との風速比 (K_{sea}) との比を表す。全風向が海上風となるため全ての風向が 1.0 以上となっており、特に山と陸が張り出している国東半島方向 (S 方向) の風速比が大きい。

風向別風速比と同様に、風向別風向の偏角を求めたものを図-5 に示す。これによると最大風向偏角は WNW の 8.3 度であるが、1 方位の角度 (22.5 度) に満たない

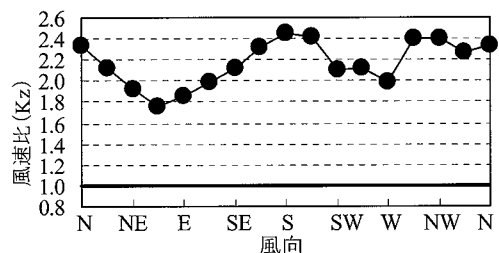


図-4 風向別の風速比分布図

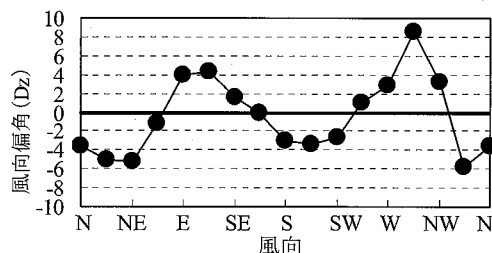


図-5 風向別の風向偏角分布図

ため、波浪推算には大きく影響を及ぼさないものと考えられる。

さらに気流解析により求めた風向別風速比 (K_z) および風向別風向偏角 (D_z) を基に、式 (15) および式 (16) を用い風況観測地点の風速・風向 (U_{Obs} , D_{Obs}) 記録から海上風対象地点における海面上 10.0 m における風速・風向 (U_{Sea}^z , D_{Sea}^z) の毎時データに変換した。

$$K_z = K_{Sea} / K_{Obs} \quad (13)$$

$$D_z = D_{Sea} - D_{Obs} \quad (14)$$

$$U_{Sea}^z = U_{Obs} \times K_z \quad (15)$$

$$D_{Sea}^z = D_{Obs} + D_z \quad (16)$$

4. 海上風および波浪推算結果の検証

海上風の検証を行うため、上記の荻田沖の海上風算出点とは別に、図-1 に示した北九州空港の空港島上における風観測地点 (アメダス空港北町地点: 観測高さ 8.0 m) の風向別風速比 (K_z) および風向別風向偏角 (D_z) を求め、行橋地点における風向風速を変換し、両者を比較した。

一方、海上風算出地点における風向・風速の時系列データから荻田港波浪観測地点における波浪推算を SMB 法で行い (気流解析モデルと称する)、荻田港の波浪データとの比較を行った。この際、一般的な海上風の係数を用い、行橋地点の風向・風速から直接的に波浪推算した結果 (従来モデルと称する) とも比較している。

(1) 北九州空港における海上風観測結果との比較

図-6 に空港北町地点における洋上の観測風と行橋地点から変換して推算した海上風との比較を示す (風向別の年平均風速)。図中の棒グラフは洋上における観測値であり、折れ線グラフの□が行橋地点の元の観測値、折れ線の●が気流解析モデルでの推算海上風速である。また、折れ線の△は後述するカルザースの変換係数 1.5 によって変換した従来モデルによる推算海上風速である。

洋上の観測風速と陸上の行橋地点の観測風速には、風向によっては 2 倍以上の差があり、これを気流解析モデルで海上風に変換すると、かなり観測値に近づくことがわかる。また、従来モデルにおいても年平均風速ではか

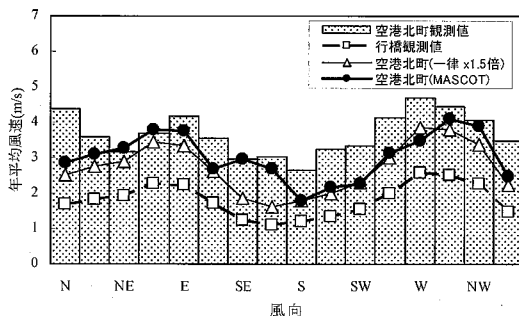


図-6 洋上の観測風と推算海上風との比較 (年平均風速)

なり観測値に近くなるが、一律の係数のため SE や SSE などにみられるように気流解析モデルに比べて改善されない風向がある。

また、S ~ SW で顕著にみられるように、気流モデルによる変換を行っても改善する傾向が認められない風向もある。これは行橋地点における観測結果が周辺の地形条件に大きく影響されている場合や MASCOT で設定した範囲よりもさらに広域の地形条件によって風況が支配されていることなどが原因と推定される。したがって、観測地点の選定に当たっては、このような風向が波浪推算の範囲にないことを確認する必要がある。

ただし、本解析においては、主たる波向が E 方向と推定されるので、波浪推算にはつては特に支障がないものと考え、以下の波浪推算を行った。

(2) 荻田港における波浪推算

荻田港の波浪観測位置において波浪推算用に有効フェッチを求めた。表-2 に海域側で推算波向となる 9 方位のフェッチを示す。

これに対して、行橋地点の風の時系列データについて、図-4 に示した気流モデルにより求めた風速比により海上風に変換した時系列データを求め、波浪推算を行った。

同時に、行橋地点における風の時系列データについて、合田 (1971) が引用したカルザースの地衡風から海上風への変換係数を用いて海上風に変換し (従来モデル)、

表-2 有効フェッチ (km)

風向	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S
距離	17.1	22.6	33.9	48.3	55.4	50.5	35.9	22.0	15.2

表-3 カルザースによる実測風速 V と地衡風速 Vg の関係

場 所	風速比 (V/Vg)
海上	0.60
低い島	0.55
風上側の海岸、付近は低い土地	0.50
風下側の海岸、付近は低い土地か海	0.40
遮蔽物の少ない開いた陸上	0.40
遮蔽物の多い陸地とか都市	0.30

同様の条件で波浪推算を行った。カルザースの変換係数を表-3に示す。

これによると、行橋地点は風下側の海に近い平地であるから、地衡風と観測された地上風との風速比は0.4である。ここで地衡風と海上風の風速比は0.6であるから、行橋地点における観測された地上風と海上風との風速比は $0.6/0.4=1.5$ となる。

行橋地点の風速観測データについて海上風換算係数の1.5倍した従来モデルの波浪推算、および気流解析モデルによる波浪推算結果について、同時期の荻田港波浪観測結果との比較を行った。図-7に比較図を示す。図中にプロットしたのは、観測波高、推算波高ともに日最大波であり、荻田港において波高30 cm以上を有効なデータとして採用した。

図中には回帰直線および回帰式を示したが、この式の x の係数を観測波高との波高比とみなすと、従来モデルでは0.7、気流解析モデルでは0.9となっており、波高比で0.2ポイントの改善がみられた。

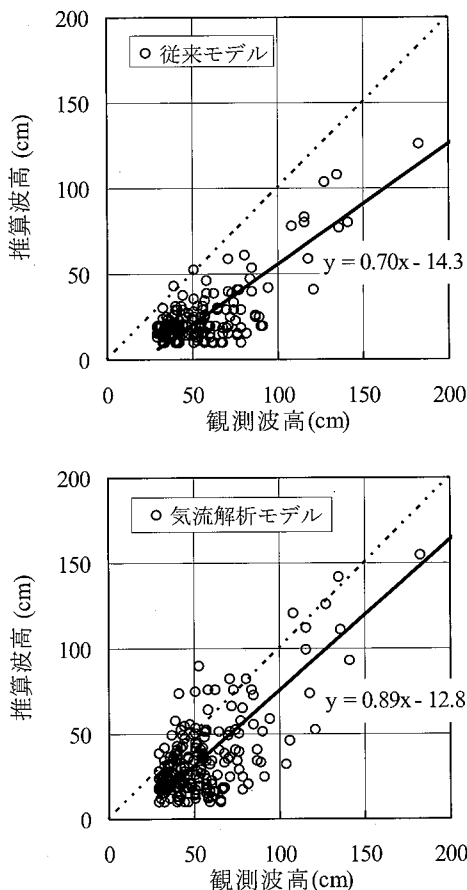


図-7 荻田港の観測波高と波浪推算結果との比較

5. 結 論

3次元非線形気流予測モデルによって、地上の観測点における風向・風速を海上風に変換し、閉鎖海域におけるSMB法による波浪推算の精度向上を図る方法を提案した。以下に、本手法の有効性および課題を列挙する。

- 海上風の予測では、風向別の年最大風速で概ね良好な結果が得られ、波浪推算では従来モデルに比べて観測値との波高比で0.2ポイントの精度向上がみられた。
- 上記の結果から、本手法を用いれば風上側における地形や粗度といった物理的な条件から海上風の風速比が決定できるため、従来の立地条件による一般的な値としての係数設定に比べて、波浪推算の精度向上を図ることが可能となった。
- 瀬戸内海の一部の海域では、風域に島がある場合やフェッチが短い場合について、さらに風速の増加係数が設定されている場合がある。このような場合については、気流モデルによって実態に近い結果を求めることも可能と考える。
- 2地点間の風速比は風速の依存性が小さいとして、一律10 m/sの風速で風況シミュレーションを行ったが、今後の精度向上にあたっては検討が必要と考える。
- アメダス観測所において海上風に対する風向偏角が大きい場合、風向の変換は精度が低下する。特に、波浪推算すべき方向に影響が大きい場合には、致命的に推算精度が落ちることが予想される。これを避けるためには、複数の観測点により風況を見極めることが重要となる。
- 本手法の検証を公開されているデータにより行ったため、検証の期間など不十分と考えられる面もある。今後は風速および波浪観測などにより検証を進める必要がある。

参 考 文 献

- 石原 孟・日比一喜(2000): 急峻な山を越える乱流場の数値予測, 日本風工学論文集, No. 83, pp. 175-188.
- 石原 孟(2003a): 非線形風況予測モデル MASCOT の開発とその実用化, 日本流体力学会誌, 第22巻 第2号, pp. 387-396.
- 石原 孟・山口 敦・藤野陽三(2003b): 複雑地形における局所風況の数値予測と大型風洞実験による検証, 土木学会論文集, No. 731/I-63, pp. 195-221.
- 孟岩・日比一喜(1997): 急な斜面をもつ3次元独立峰周りの流れ場の乱流特性, 日本風工学学会誌, 第73号, pp. 3-14.
- 合田 勲(1971): 風、特に海上風の量的予報について, 海と空, 第46巻, 第3, 4合併号, pp. 113-133.
- Patankar, S. V.(1980): Numerical heat transfer and fluid flow, McGraw-Hill, New York.
- Rhie, C. M.・W. L. Chow (1983): Numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation, AIAA Journal Vol. 21, pp. 1525-1532.