

琉球大学学術リポジトリ

植生帯を有する複雑な地形上の風速場及び海塩粒子拡散の数値実験の試み

メタデータ	言語: 出版者: 琉球大学工学部 公開日: 2010-02-23 キーワード (Ja): キーワード (En): Navier-Stokes equation, Windbreak forest, Direct numerical simulation, Grid generation 作成者: 仲座, 栄三, 津嘉山, 正光, 山路, 功祐, Nakaza, Eizho, Tsukayama, Seiko, Yamaji, Kohsuke メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/15869

植生帯を有する複雑な地形上の風速場及び海塩粒子拡散の数値実験の試み

仲 座 栄 三* 津嘉山 正 光* 山路 功 祐**

The Simulating of Sea Winds of Coastal Areas with Complex Topography and Windbreak Forests, and the Analysis of Salt Particles Contained in Such Winds

Eizoh NAKAZA* Seikoh TSUKAYAMA*
Kohsuke YAMAJI**

Abstract

The Okinawa Islands are frequently hit by typhoons. There are many more sea salt particles in summer typhoon winds than in the winds that blow during other seasons. Disasters caused by these salty winds occur much more often in the Okinawa prefecture than any other prefecture of Japan.

Civil engineers plan and design artificial windbreaks made as countermeasures against the disasters caused by the salty sea winds. Such windbreaks are usually areas of plant life, such as trees, planted by the coast. The location and size of these areas of plant life depend completely on the judgement of the engineers. If the judgement of these engineers is inaccurate, the windbreaks would simply be a waste of time, effort, and money; therefore, an understanding of the salty sea winds and an analysis of the sea salt particles they contain must be done.

This paper describes and explains a method of simulating the salty sea winds. Using the numerical simulation, the sea winds can be studied and the sea salt particles can be analyzed. Finally, this method can help engineers understand the way the salty sea winds flow over coastal areas that have windbreak forests and complex topography.

Key words : Navier-Stoks equation, Windbreak forest, Direct numerical simulation, Grid generation

1. はじめに

海岸から飛来する海塩粒子濃度の拡散に関する研究は、比較的古くからなされている(例えば、鳥羽・田中ら, 1966, 1967a, b, 幸喜, 1970)。しかしながら、飛塩の発生のメカニズムまでも踏み込み、それを何らかの形でモデル化して構築された海塩粒子濃度の拡散子測式は殆どなく、また実際の地形を対象とした計算モデルはこれまで提案されていない。このようなことから、現在のところ防風林の実務設計は、設計者の経験

を拠り所としたり、陸上における普通の植栽としての扱いで行われる場合が多い。

一方、最近の数値流体力学の発展はめざましく、時間と金さえかければ、ここで問題としている飛塩の拡散問題は実際上殆ど問題なく解析し得る段階に達していると言える(Nishikawa, 1985, Shima, 1988)。しかしながら、厳密な解法を求めれば求めるほど、数値計算量が発散的に増大し、メモリー容量や計算時間の面から実務に適用し得なくなるといった問題が生じる。また、現在ある乱流モデルは、極めて多種多様であり、研究

受理：1994年5月17日

* 工学部環境建設工学科 Dept. of Civil Engg. and architecture, Fac. of Engg.

** 大学院工学研究科建設工学専攻 Graduate Student, Architectural and Civil Engineering

者の数ほど乱流モデルが存在するといっても過言でない。さらには、それらのモデルからシミュレートされる結果の適合性は、計算ケースに依存して変化し、例えばuが合えばvで合わなくなるといったものが多い。いずれにしてもこれまで提案されている乱流モデルの多くは、膨大な計算時間を要する上に、完璧なものとは言えない。本研究は、海陸風や飛塩拡散に対する完結モデル(closer model)を提案するものではない。むしろ、現在あるモデルの中から最も簡単な計算モデルを選択し、それで現実に起きている現象を解析する努力を行う。それを基に、現地や実験では測定し難い現象の理解と予測を行う。さらに、複雑な地形条件下での風の場合や飛塩拡散現象を明らかにすると共に、植生の配置に関する基礎的なデータを得ることを目的とする。

2. 基礎理論及び計算手法

2.1 風速場

数値計算で基礎となる理論は、以下に示す連続の式とNavier-Stokesの方程式である。

$$\operatorname{div} U = 0$$

$$U_i + U \nabla U = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{\partial}{\partial x} \left[K_x \frac{\partial U}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z \frac{\partial U}{\partial z} \right] + F_D$$

ここで $U = (u, v)$ とする。

F_D の項は植生の効果を考慮した項である。植生の影響は流れの場に対しては流体抵抗として作用すると考え次式で与えた。

$$F_D = -C_m S |U| u_i$$

ここで、 C_m は抵抗係数であり、 S は葉面積密度である。葉面積密度とは葉の繁りの程度を表すもので、よく繁っている程この値は大きいということになる。通常の植生帯は5.0程度であると言われており、沖縄県のような亜熱帯地域における植生帯は10.0程度の値を持つものと考えられる。この葉面積密度に関する研究はKondo・Akashi (1967)、神田ら (1992)のものがある。

通常、実際の数値計算では、連続の方程式が直接用いられるのではなく、次に示すPoisson方程式が解かれる。この方程式は運動方程式の発散をとることによって導かれる。

$$\nabla^2 P = \operatorname{div} D_x + \operatorname{div} D_z - 2C_m S U \operatorname{grad} U - \operatorname{div}(U \nabla) U - \frac{\partial L}{\partial t} - \frac{DU}{Dt}$$

ここで $L = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}$ である。

本数値計算ではこれらの基礎方程式を一般座標系に対応できるように座標変換を行ったものを用いている。基礎方程式の差分化は空間微分項には中心差分を用い、時間微分項には前進差分を用いた。非線型慣性項には計算安定を図る目的でKawamura&Kuwahara (1985)らの高精度風上差分を適用した。

2.2 海塩粒子濃度の拡散

海塩粒子濃度の拡散を規定する式としては、以下に示すFickの拡散方程式を用いる。

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} = w_0 \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ (D_m + K_x) \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ (D_m + K_y) \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \right\} - C_{cut}$$

ここで、 \bar{c} は時間平均濃度、 K はそれぞれ乱流拡散係数、 D_m は分子拡散、 w_0 は海塩粒子の降下速度、 C_{cut} は植生の飛来塩分に対するfilter効果を意味する。

飛塩拡散に関しては、碎波帯内に海塩粒子の大きな供給源が集中するものとした(村上ら, 1992, 仲座, 1993)。

飛来塩分に対する植生の影響は一種のフィルターとして作用ものと考えられる。ここで問題となるのが植生によるフィルター効果をどうモデル化するかであるが、本数値計算では次式のようにモデル化を行った。

$$C_{cut} = S \gamma_c C(c) U(x)$$

ここで、 C_{cut} は植生による単位時間単位体積当たりの飛塩除去量、 γ_c は定数、 $C(c)$ 及び $U(x)$ はそれぞれ海塩粒子濃度及び風速の関数である。ここで先ず、 $C(c)$ 及び $U(x)$ の関数形を決定しなければならないが、これらの関数形を決定し得る程の詳細な現地観測等のデータはこれまで得られていない。そこで、本研究では、最も簡単な関数形を用いることとし、一次の関数形とした。

2.3 基礎方程式の一般座標系による表示

本研究では、複雑な地形上の風速場や飛塩拡散を計算対象としているため、地形の境界条件が比較的簡単に与えられるように、座標系に一般座標系を用いた解析手法を用いた。上述の基礎方程式は、座標系のみ

図-1に示すような変換を施すと以下のとおりになる。

(X方向のみ)

$$u_i + u(\xi, \mu_\xi + \eta, u_\eta) + v(\xi, u_\xi + \eta, u_\eta) = -\frac{1}{\rho}(P_\xi \xi_i + P_\eta \eta_i) + (\xi, K_\xi + \eta, K_\eta)(\xi, u_\xi + \eta, u_\eta) + (\xi, K_\xi + \eta, K_\eta)(\xi, u_\xi + \eta, u_\eta) + K \nabla^2 u + F_i$$

ここで $\xi_i = \frac{y_\eta}{J}$, $\xi_\eta = -\frac{x_\eta}{J}$, $\eta_i = -\frac{y_\xi}{J}$, $\eta_\eta = \frac{x_\xi}{J}$

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$$

であり, Jはヤコビアンで, $J = x_\xi y_\eta - x_\eta y_\xi$ である。

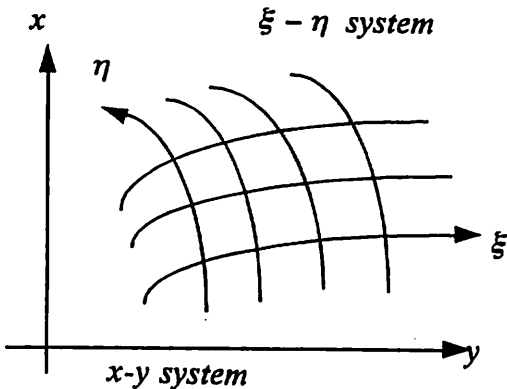


図-1 Coordinate System

ここに示すとおり, 地表面など境界の正確な表現のために一般座標系を採用した反動として, 基礎方程式には爆発的に項数が増えた形となり, デカルト座標系による基本形の場合と比較して膨大な計算時間が必要とされる。

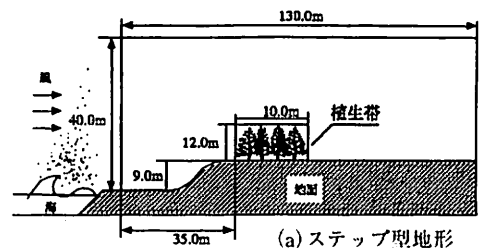
2.4 運動量拡散係数の取り扱い

本研究では, 乱流場の解析が対象となるため, 数値計算上問題となるのはNavier-Stokes中の慣性項の取り扱い方と, 乱れが作り出す応力をどのようにモデル化するかである。乱流場の代表的な数値計算手法(時間平均をとらない)としては, DNSとLESとが挙げられる(Sumagrinaky, 1963, Deadorff, 1970, Moin&Kim, 1982, Kawamura & Kuwahara, 1984)。高Reynolds数流れのDNSは, 一般に慣性項に高次の風上差分を用いて実現されるが, 数値的な粘性項の評価が難しい(しかし, 低Reynolds数流れに関してはこの限りでない,

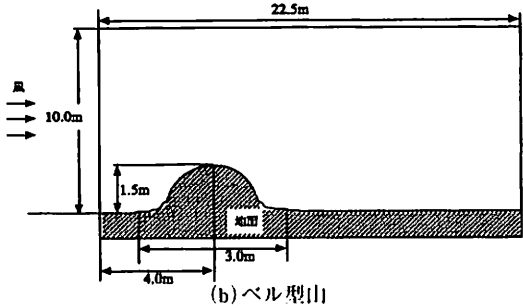
Choi, Moin and Kim, 1993)。本研究では, 植生による乱れのプロダクションのモデル化や気温変化をも考慮する予定であるので, 現在のところLESが本研究でめざす計算手法としては有力である。しかしながら, 計算によって得られる結果を現地観測値や室内実験値と比較すると, かならずしもいずれが勝るとも言えない場合が多い。要は数値計算の対象とするものが何なのか?あるいはどこまで詳細に見たいかによる。ここに示す研究に限れば, 数値解析手法の精度向上が目的でなく, 複雑な地形上の大気の流れや飛来塩分の拡散の理解が当面目指すところであり, また植生の配置の違いによる飛来塩分量の空間的な分布の仕方にも興味がある。また, 実務設計での利用を考えているのでワークステーションによる解析で2日以内に計算が終了し得る程度の計算モデルを採用することとした。そうすると, やはり現実的な選択として, 乱流場を渦動粘性係数を用いることによって, 運動量交換係数を空間的に一定とし, 実質的なReynolds数を下げ, 層流的な解析を行う手法が選択される。ここで示す研究に限ってはこのモデルを用いた解析を示すが, 現在LESを用い, またワークステーション等でも実務に耐え得るようなモデルの開発中であり, その結果については別の機会に紹介する予定である。

3. 計算結果及び考察

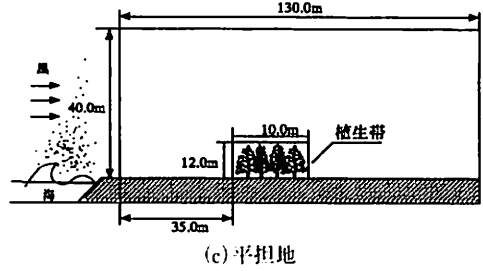
図-2(a), (b), (c)に計算対象とした海岸地形の概念図を示す。図-2(a)は, 汀線背後に幅約30.0mの一樣斜面の前浜部分と砂丘からなる後浜があり, さらにその背後に植生帯が存在する場合を示している。計算では, 植生帯を図-3に示すように, 砂丘の真上や前後に移動させ, それぞれについて数値計算を行った。図-2(a)は, 土手を越える海風の変形を対象とした計算に用いた。なお, これらの計算は, 図-2に示すスケールを想定して行われているが, これは代表長さを変えて見ることで, 高さ数百メートルの丘やベル型の山を越える海風及び飛塩濃度の変形問題として読み換えることも可能である。



(a) ステップ型地形



(b)ベル型山



(c)平坦地

図-2 対象とした海岸地形Model

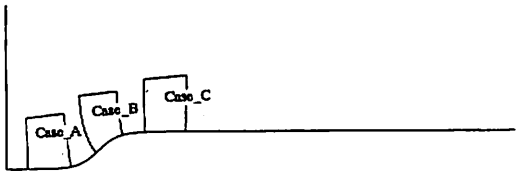


図-3 植生帯の配置例

図-4に、計算格子の形成例を示す。計算格子は、地面条件など境界条件を与えやすくするために直行させてある(Thompson, 1974)。格子数はいずれの場合も85×45である。また、計算領域の高さを代表長さとしたときの乱流Reynolds数は4×10000である。

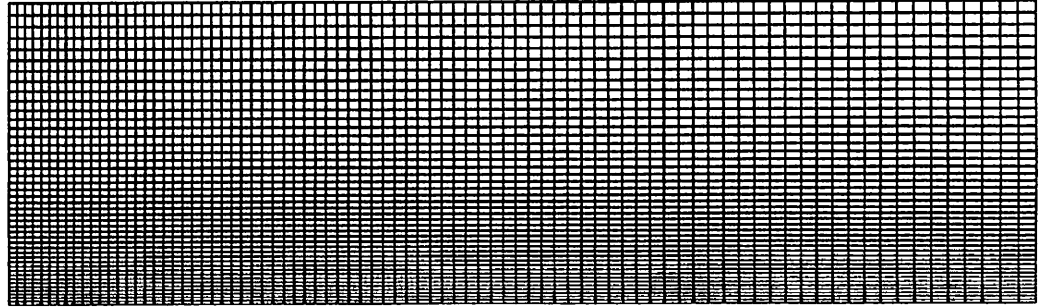


図-4 (a) 格子形成例 (平坦地)

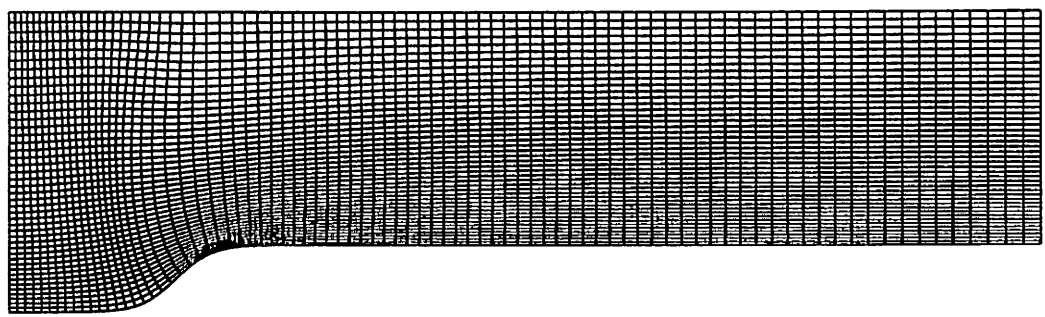


図-4 (b) 格子形成例 (ステップ型地形)

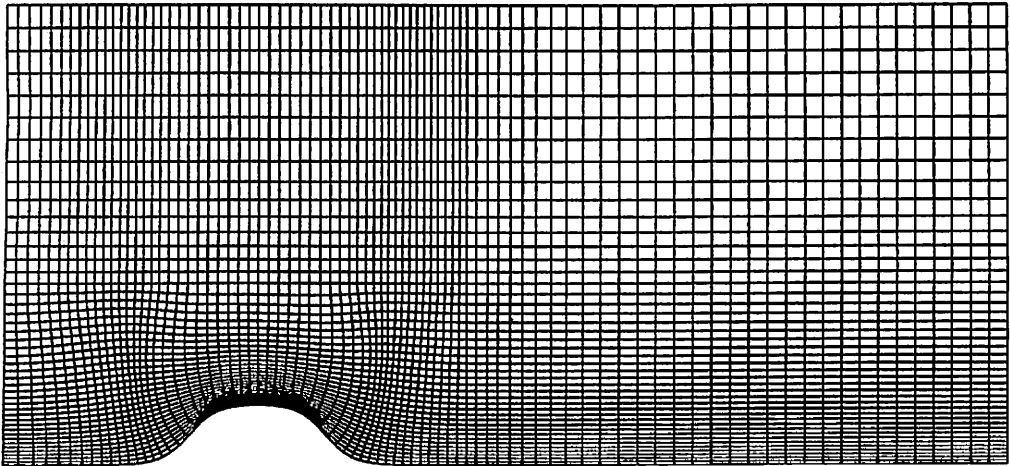


図-4 (c) 格子形成例 (ベル型山)

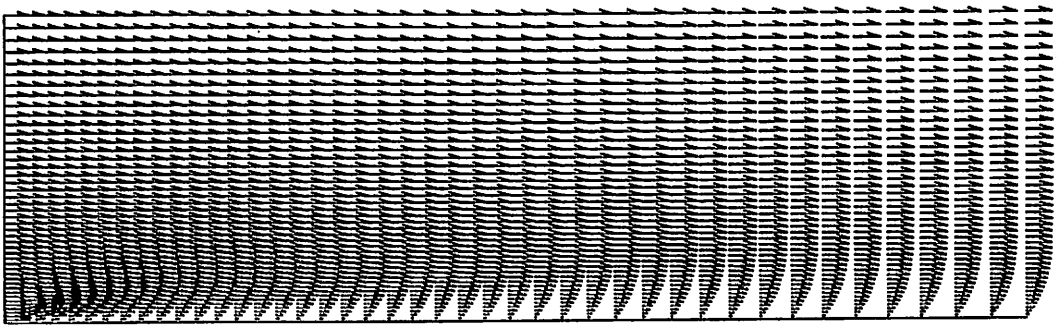


図-5 風速ベクトル (平坦地)

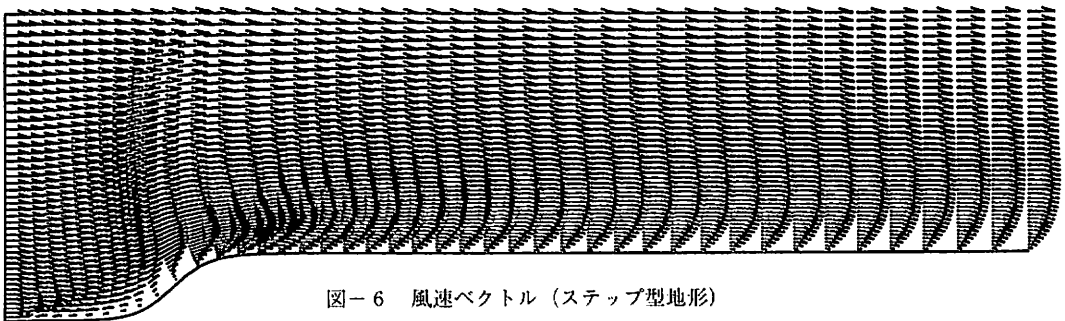


図-6 風速ベクトル (ステップ型地形)

図-5に、水平な地面条件での計算結果を示す。風の上流側では一様流を与えているため、境界の次の計算点から内部境界層が発達し始める。図-6に、ステップ地形を越える海風の変形を示す。ステップ先端付近

では流れの縮流効果で境界層がかなりの勢いで先走っている。しかしそれは、下流に行くにつれ徐々に拡散し、下流側では消滅している。

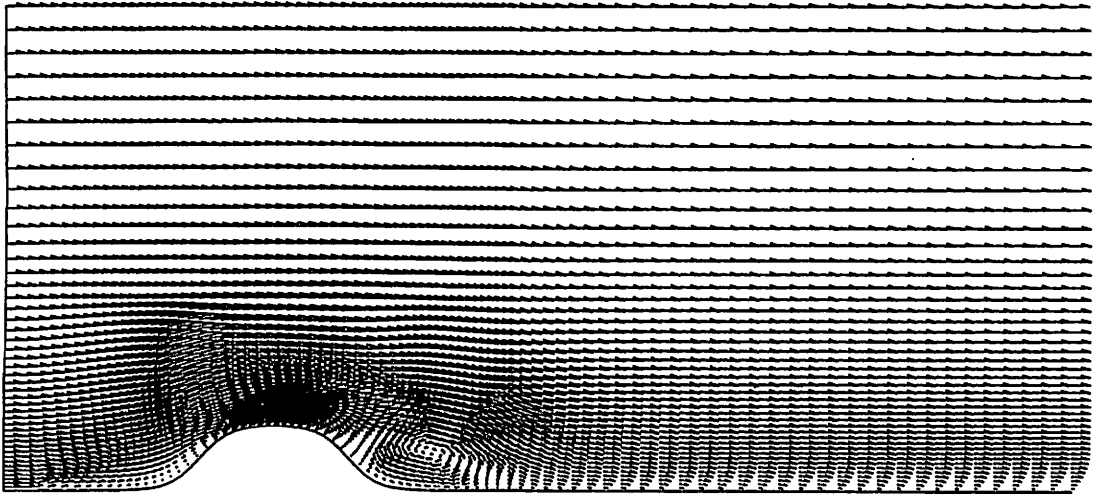


図-7 風速ベクトル (ベル型山,t=5.0s)

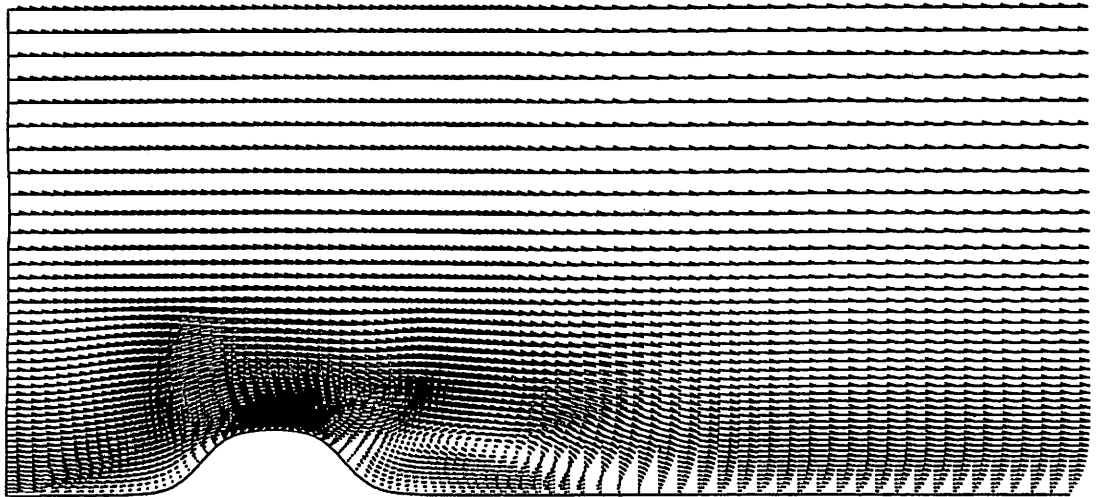


図-8 風速ベクトル (ベル型山,t=15.0s)

図-7, 8に領域内にベル型山を有する場合の海風の変化を示す。それぞれ実時間で5.0, 15.0秒後の様子である。図示のとおり, 山頂付近から組織化した渦の剝離が生じている。さらに時間が経過すると, 山頂からは新たな渦がストローハル数で与えられる周期で掃き出される。この新たに掃き出された渦は, 山の下手側で移流中の渦とマージングし, 一個の渦としての渦度を一時高めた後, 拡散しながら下流に流される。これらの

現象は, 乱れの時間スケールを遥かに越えた平均流の振舞いである。また, これ程の非定常組織渦が造り出す乱流応力については, やはり何らかの形でモデル化し計算へ反映させる必要がある。しかし, 図-6に示すステップ地形を越える場合にはこのような組織渦の剝離は生じず, この場合流れは定常的なものであった。ただし, この結果はReynolds数が10000程度の場合であり, それを越えるReynolds数に対してはその限りでない。

図-9に、汀線付近で飛塩量の鉛直分布を与えた場合の飛塩量の分布を示す。ただし、飛塩量は汀線での最大飛塩量を用いた無次元値で示してある（実際の計算での境界条件や飛塩量の与え方については、仲座ら, 1991, 仲座・津嘉山・山路, 1993, を参照されたい）。

図-10に、ステップ型の地形における飛塩量の拡散の計算結果を示す。後に詳しい議論を行うことにして、図-11にステップ上に植生帯を設けた場合の計算結果を示す。また、図-12に植生帯の配置パターンと計算結果の比較位置を示す。さらに、図-13(a)-(e)に、ステップ上の幾つかの比較位置における飛塩量の鉛直分布を示す。図中には、植生帯がない場合 ($S=0$)、植生密度が $S=5$ 及び $S=10$ の場合について示してある。Line Aにおいては、いずれの場合にも大差は認められない。しかし、Line B以降については、下流に行くにつれて、比較的高度が低い所で違いが見られる。

特に、植生帯から約109 m離れたところ (Line E)では、植生密度が $S=10$ の場合、植生帯を設けない場合に比較して約1/6となっている。図-14に、植生帯を設けた場合の風速分布を示す。Line A及びBについては他のLineと比較して、地面の近くで風速がかなり大きくなっている。飛塩濃度と風速との積で与えられる飛塩の輸送量 (flux)で考えると、植生背後の地表面付近の風速の落ち込みは、植生による飛塩除去効果が高いことを意味する。

図-15(a)-(c)に、植生帯の設置位置の違いによる飛塩量の鉛直分布の変化を示す。植生帯の設置位置による飛塩量分布の違いは、Line Eでのみ大きな違いを示している。また、その違いも植生帯の高さとほぼ等しい範囲となっている。これらの結果から、植生帯の効果が顕著に生じるのは、植生の高さの約7倍から下流側にあると判断される。

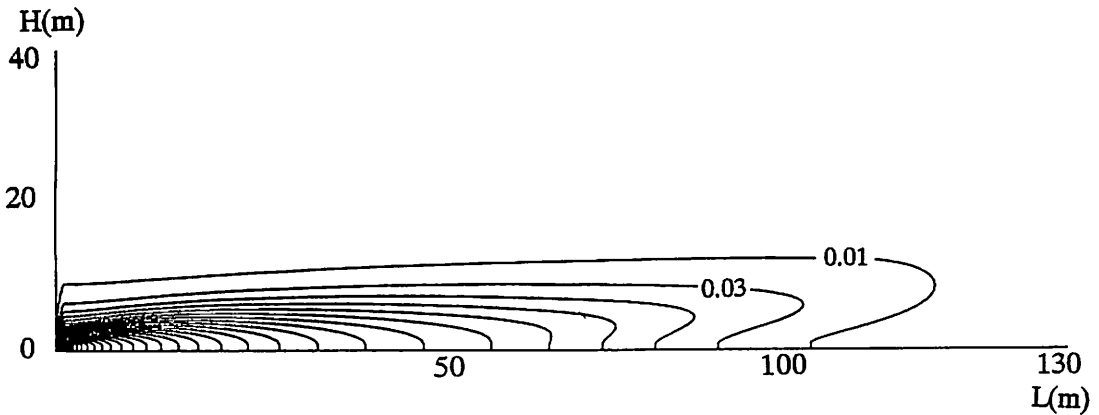


図-9 塩分濃度分布図 (平坦地)

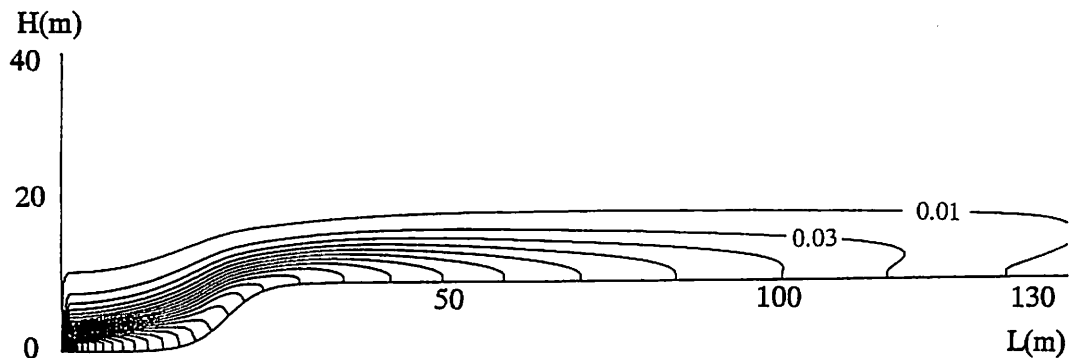


図-10 塩分濃度分布図 (ステップ型地形)

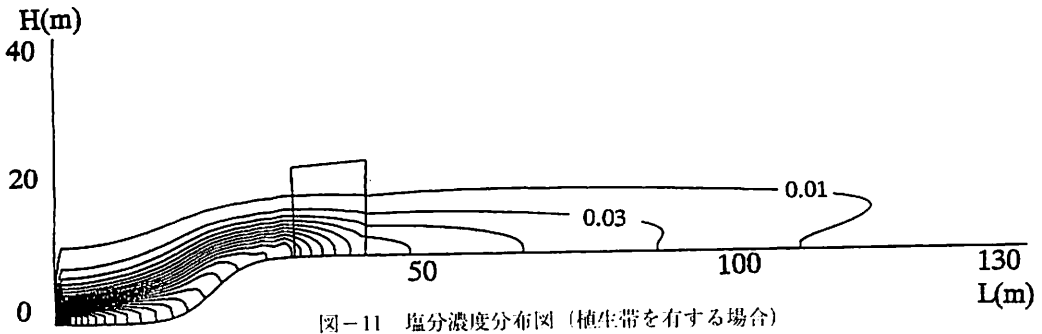


図-11 塩分濃度分布図 (植生帯を有する場合)

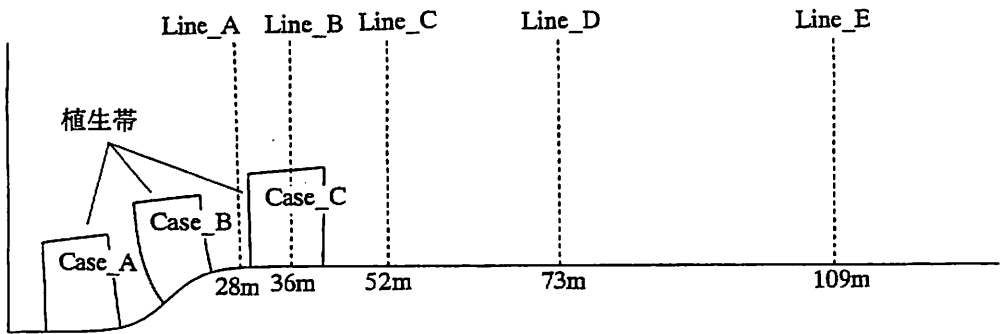
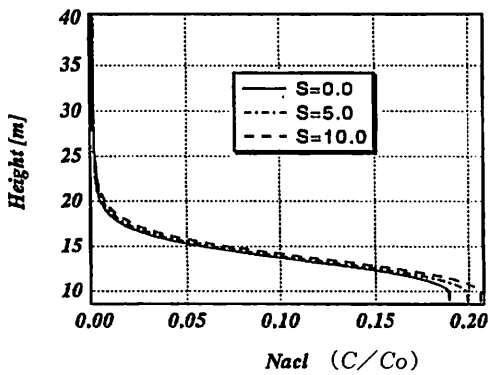
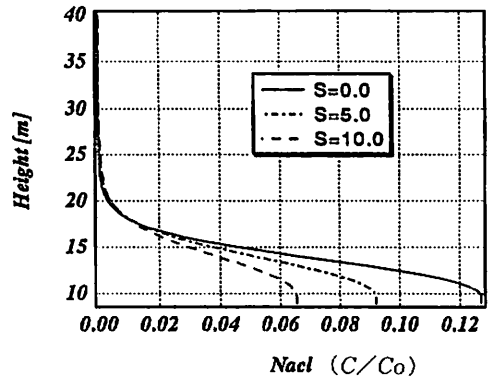


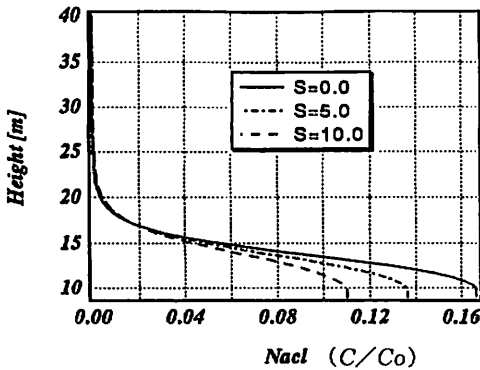
図-12 計算値の比較位置



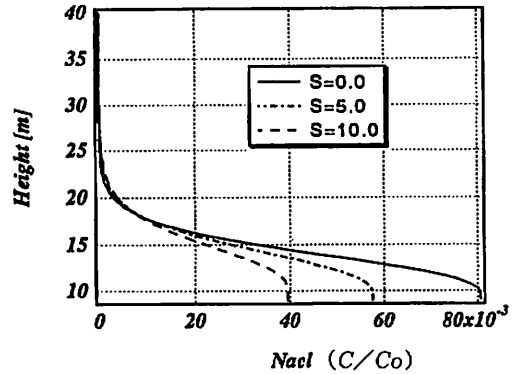
(a) Line_A



(c) Line_C

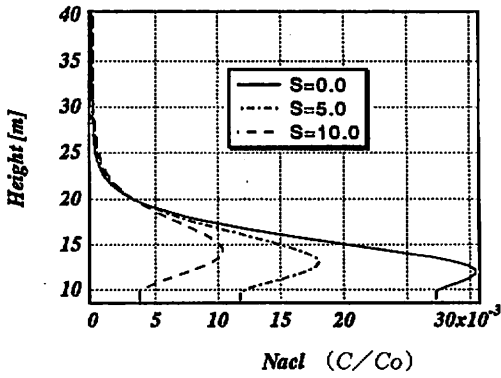


(b) Line_B

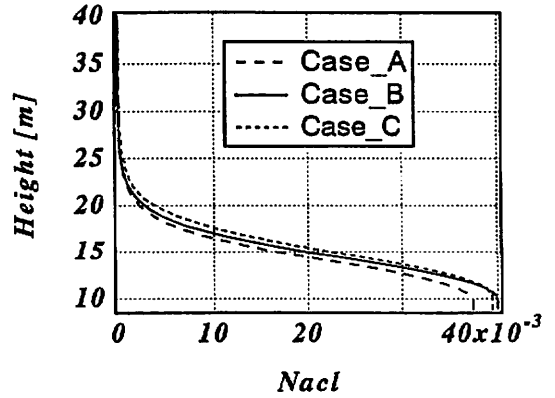


(d) Line_D

図-13 塩分濃度の鉛直分布 (次ページへつづく)



(e) Line_E



(b) Line_D

図-13 塩分濃度の鉛直分布

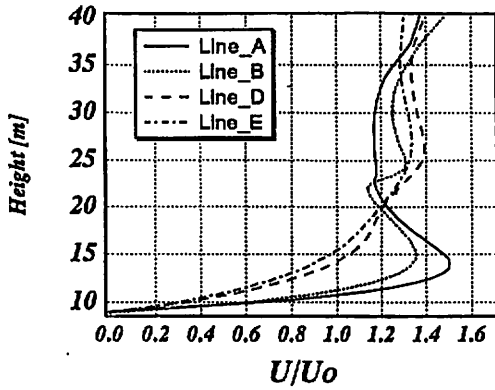
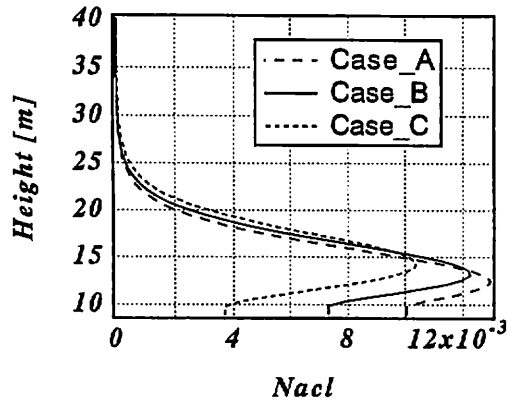
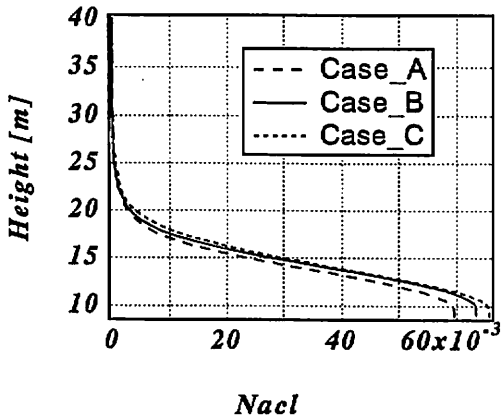


図-14 風速分布 (植生帯を有する場合)



(c) Line_E

図-15 植生帯の配置の違いによる塩分濃度の変化



(a) Line_C

4. おわりに

従来、埋め立て地や塩害の激しい地域での植栽は、技術者の経験や景観の観点から決定されている。任意地形上の海風や海塩粒子濃度の拡散の予測が定量的に行えれば、塩害などへの有効な対策が行えるようになる。本研究では、そうした実務設計への手がかりとして、実務に耐えるような風速場・海塩粒子拡散に対する計算コードの開発を行った。また、それを幾つかの海岸モデルに適用して、複雑な地形上における海風の変化及び飛塩の拡散特性を具体的に検討すると共に、海岸部に植生帯を設けた場合の風速場及び拡散の変化を検討した。計算はワークステーション (EWS4800-350) を用いて行った。計算に要したCPU-timeは、1

ケースにつき約45時間であった。乱流モデルをなんら用いない計算モデルに対してもこの程度の計算時間を要する。これは、一つには一般座標系を用いた計算手法に原因があるが、これも複雑な地形条件を想定しての現象理解の犠牲の一つといえる。先に述べたとおり、現在LESによるより現実的なモデルの開発中であり、それをもとにした現象解明については別の機会に紹介したい。

謝 辞

本研究で用いたN-S方程式の数値計算コードは、1987年当時、東京工業大学工学部日野研究室で日野・神田・岸が開発した基本コードをベースに発展させたものである。ここに記して深甚なる感謝の意を表したい。

参考文献

鳥羽良明 (1966) : 海塩粒子—大気と海洋との相互作用の一要素として—, 海と空, 41, 3.4併合, p.71~118.

鳥羽良明・田中正昭 (1967a) : 塩害に関する基礎研究 (第1報) 海塩粒子の生成と陸上への輸送モデル, 京大防災研究所年報第10号B.

鳥羽良明・田中正昭 (1967b) : 塩害に関する基礎研究 (第3報) 海塩粒子の三次元分布の解析, 京大防災研究所年報第10号B.

仲座栄三・津嘉山正光・照屋雅彦 (1991) : 大気環境アメニティの一要素としての飛塩量特性, 第38回海岸工学講演会論文集, p.896~900.

仲座栄三・津嘉山正光・照屋雅彦 (1990) : 沿岸微気候の一要素としての飛塩量特性, 環境システム研究 Vol.18, p.88~93.

村上和男・加藤一正・清水勝義・福田真人・宮崎啓示 (1992) : 砕波帯内における海塩粒子の発生に関する現地調査, 第39回海岸工学講演会論文集, p.1046~1050.

幸喜善福 (1970) : 海岸付近の空中塩素量に関する研究, 琉球大学農学部学術報告第17号.

神田学 (1993) : 土壌および水面の相互作用を考慮した水文気象に関する研究, 東京工業大学学位論文.

Nishikawa, S. (1985) : Three dimensional boundary-layer-separation on a paraboloid. Trans. Jpn. Soc. Aeron. Sp. Sci., 28, pp.27-43.

Shima, E. (1988) : Numerical analysis of multiple element high lift devices by Navier-Stokes equation using implicit TVD finite volume method. AIAA paper 88-2574-cp.

Thompson, J.F. (1974) : Automatic numerical grid generation of body-fitted curvilinear coordinate system for field containing any number of arbitrary two-dimensional bodies. J. Comp. Phys., 24, pp.274-302.

Kawamura, T. and Kuwahara, K. (1985) : Direct simulation of a turbulent inner flow by finite-difference method, AIAA, pp.1-10.

Smagorinsky, J. (1963) : Mon. Weather Rev., 91, pp.99-164.

Kawamura T. and Kuwahara K. (1984) : Computation of high Reynolds number flow around a circular cylinder with surface roughness, AIAA, 84-0340.

Deadorff J. W. (1970) : A numerical study of three-dimensional turbulent channel flow at large Reynolds numbers., J. Fluid Mech., Vol.41, pp.453-480.

Moin P. and Kim J. (1982) : Numerical investigation of turbulent channel flow. J. Fluid Mech., Vol.118, pp.341-377.

Choi H., Moin P. and Kim J. (1993) : Direct numerical simulation of turbulent flow over riblets, J. Fluid Mech., Vol.255, pp.503-539.

Kondho, J and A., Akashi (1967) : Numerical study on the two dimensional flow in horizontally homogeneous canopy layers, Boundary-Layer Meteor., Vol. 10, pp. 255-272