

温度場を考慮した LES による飛来塩分拡散過程の 3 次元数値シミュレーション

荒木 宣博* ・ 山田 文彦** ・ 田中 健路***
外村 隆臣**** ・ 滝川 清*****

1. はじめに

沿岸域において、風と波の作用によって発生する飛来塩分は、コンクリート構造物や金属製品、農作物等に対する潮風害（塩害）の直接的な要因である。飛来塩分は、主として沿岸域で風と波の作用によって生成され、移流と乱流拡散によって陸上へ輸送される現象である。有明海沿岸域においても 1991 年 9 月に相次いで上陸した台風 17・19 号並びに 1999 年 9 月の台風 18 号により広域的に塩害が発生し、多数の送電線事故や水稻の収穫量が著しく減少するなどの被害を被っている。この飛来塩分は、粒径が大きい海水滴（粒径 4 mm 以下）と粒径の小さな海塩粒子（粒径 3~18 μm 程度）より構成され、それぞれ発生・拡散機構は地形や気象などの影響を受けて複雑に変化する。このため飛来塩分のメカニズムには依然として不明な点が多く残されており、その解明が急がれている（例えば仲座ら, 1993；松永ら, 1995）。

山田ら（1997）は、熊本県玉名郡横島干拓地における現地観測及び現地に即した断面 2 次元の数値解析及び飛来塩分輸送の計算を行っているが、堤防背後域における観測値の再現性は不十分であり、このような地点では、地形の影響などによる 3 次元動的な流体運動や物質拡散を考慮する必要があることが示唆されている。そこで、滝川ら（1998）は、地形の影響による 3 次元動的な風速場を解明するために、観測値を用いて質量保存則を満たし、3 次元風速場を再現する Mass-Consistent Model（マスコンモデル）を用いた計算を行った。このモデルにより、3 次元風速場の算出が可能となったが、この手法は観測点数に依存するため、解析精度を上げるには観測点が多数必要であり、さらに風速場の非定常性を追跡することは困難であることが判明した。このように、従来の方法では、飛来塩分の移流・拡散の支配要因である風速場の 3 次元非定常性を再現する上で限界が生じていた。

そこで本研究では、風速場の 3 次元非定常性を取り扱

うために Large Eddy Simulation (LES) を用い、より現地に即した解析を行い、観測結果と計算結果の比較を行った。また風速場・拡散場に影響を及ぼすと考えられる海面と陸上での温度差についても、密度（浮力）の時空間変化を考慮した解析を行い、検討を試みた。

2. 基礎方程式

浮力の作用する流れ場を支配する LES の方程式系は、簡単のため大気中に水蒸気が含まれないとして以下のような連続の式(1)と Boussinesq 近似を仮定した運動方程式(2)及び熱力学第 1 法則(3)によって、また飛来塩分の拡散場は Fick の拡散方程式(4)より与えられる。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \beta (\bar{T} - T_0) g_i \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \bar{T}}{\partial x_j} = -\frac{\partial h_j}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \bar{C}}{\partial x_j} = -\frac{\partial d_j}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D_m \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_j} \right) + Q + W_0 \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_3} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$h_j = \overline{u_j T} - \bar{u}_j \bar{T} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$d_j = \overline{u_j C} - \bar{u}_j \bar{C} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 $\bar{u}$, $\bar{T}$, $\bar{C}$ はそれぞれフィルタリングによる格子平均を施した速度と温度と濃度、 τ_{ij} , h_j , d_j は Smagorinsky Model により、それぞれ次のようにモデル化している。

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk} = -2(C_s \Delta)^2 |\bar{S}| \bar{S}_{ij} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$h_j = -\alpha_{scs} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$d_j = -D_{scs} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_j} \quad \dots\dots\dots (10)$$

但し、

* 正会員 工 修 熊本県天草地域振興局土木部
** 正会員 博(工) 熊本大学助手 環境システム工学科
*** 正会員 理 修 熊本大学助手 環境システム工学科
**** 正会員 熊本大学技官 環境システム工学科
***** 正会員 工 博 熊本大学教授 環境システム工学科

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \dots\dots\dots (11)$$

$$|\bar{S}| = (2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij})^{1/2} \dots\dots\dots (12)$$

$$\alpha_{SGS} = \frac{\nu_{SGS}}{Pr_{SGS}} \dots\dots\dots (13)$$

ここで、 ν_{SGS} は SGS 応力の渦粘性係数、 Pr_{SGS} は SGS 乱流プラントル数である。Smagorinsky 定数 C_s は $C_s = 0.1$ を採用する。またフィルター幅 Δ に Van Drest 型減衰関数を乗じる。

3. 本計算手法の精度検証

LES の乱流場への適用性を検証するために、平行平板間流れ及びチャンネル内立方体障害物周辺流れの再現を行い、室内実験の結果と計算結果を比較し、計算精度の妥当性を確認した。ここでは後者の比較例を示す。Matinuzzi and Tropea (1993) の実験を基に、主流方向 (x , u) $10H$ 、奥行方向 (y , v) $7H$ 、鉛直方向 (z , w) $2H$ の解析領域を設け、立方体の高さ H 、流入部の体積平均速度に基づく Re 数 $40,000$ に対して障害物周辺流れの計算を行った。計算格子サイズは、 $\Delta x = 0.1$ m, $\Delta y = 0.2$ m, $\Delta z = 0.08$ m であり、starggered grid を用いた。計算時間ステップ $\Delta t = 0.001$ 秒とし、10 秒間計算を行った。但し、ここでは熱力学第 1 法則 (3) は考えず、解析領域内において温度一定としている。計算結果として、中心断面 ($y = 3.5H$) での時間平均速度 $\langle \bar{U} \rangle$ の等値線図を図-1 に、比較のための実験値を図-2 に示す。これらより、平均流速を空間的に見ると、物体上面の再付着の表現が多少不十分ではあるものの、障害物上方の高速域や背面の低速域など、定性的な速度分布は実験値を巧く再現出来ている。次に、 $\langle \bar{U} \rangle$ の鉛直分布を、 $x = -3.0$, 0.5 , 2.5 , 4.0 の中心断面において実験値と比較した(図-3)。これより、各断面に於いて計算値は実験値をほぼ再現しており、定量的に見ても十分な精度が得られることが判ったので、本計算手法を実際の現地へ適用する。

4. 本計算手法の横島干拓地への適用

4.1 計算方法

今回、平均風向が海風の場合の 1997 年 9 月 22 日を対象に本 LES モデルを用いて 3 次元数値解析を行う。

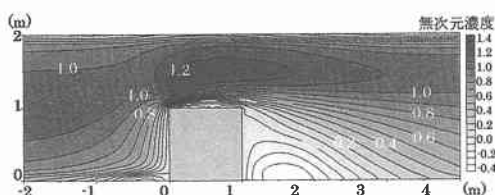


図-1 中心断面での平均速度の等値線図 (計算値)

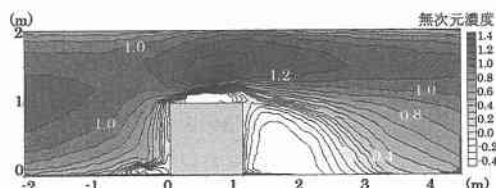


図-2 中心断面での平均速度の等値線図 (実験値)

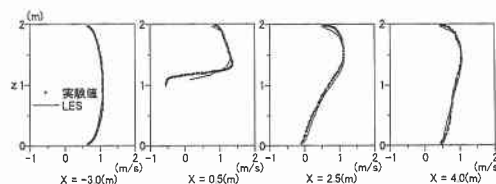


図-3 中心断面における時間平均速度の分布

計算は、飛来塩分の現地観測を行っている堤防周辺を対象に、図-4 のような海側境界 (堤防から海側へ 55 m 地点) から、堤防背後 100 m 迄の 155 m を主流方向 (x , u) に取り、奥行方向 (y , v) には 400 m、鉛直方向 (z , w) には 25 m の解析領域を設けた。尚、堤防形状は現地に合わせて、奥行方向に対して一様に設定した。計算格子サイズは、 $\Delta x = 1$ m, $\Delta y = 20$ m, $\Delta z = 1$ m である。今回の計算では、まず解析領域内を温度一定 (等温場) と仮定した。流入速度は $u(z) = \alpha \cdot z^{1/4}$, $v = 0$, $w = 0$ とし、堤防上での観測時平均風速と等しくなるよう $\alpha = 1.5$ と設定した。また、流入濃度は鉛直・奥行方向ともに一様な濃度を $x = -55$ m の境界で与える。

4.2 風速場の計算結果

計算時間ステップ $\Delta t = 0.05$ 秒として計算を行った。まず、計算結果として、3 次元風速場を図-5 に示す。次に、中心断面 ($y = 200$ m) での定常状態の風速場を図-6 に示す。また比較のため、Navier-Stokes 方程式に基づく 2 次元の計算結果を図-7 に示す。

図-6, 7 より、LES を用いた風速場の計算結果は、N-S 方程式に基づく 2 次元の計算結果と比較すると、堤防背後域の風の乱れ方に明らかな相異が見られる。LES の方は、堤防背後における風の乱れのスケールが小さいのに対し、N-S 方程式の計算の方は風の乱れ方が大きいことが判る。これは、分子粘性のみしか考慮していない N-S 方程式の計算の方が、SGS 応力中で渦動粘性係数を考慮している LES に較べて、風速場の乱れを過大評価していることにその原因がある。

次に、堤防背後域における風速場の 3 次元性を検証するために、 $v = 0.3u$ となるような奥行方向の速度成分を与え、奥行方向に一樣な堤防に対して、斜め方向から風が流入する場合の堤防背後域における渦のつき方を、図

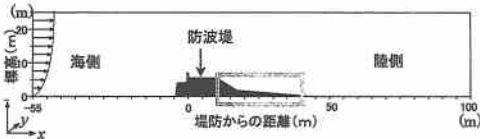


図-4 解析対象

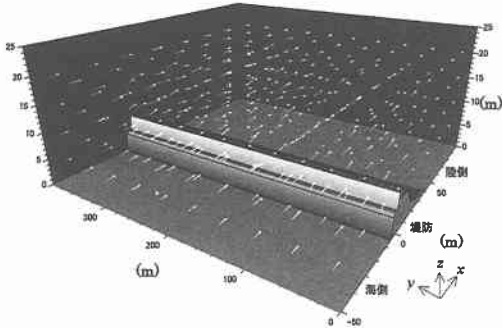


図-5 3次元風速場 (LES)

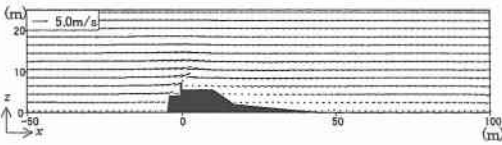


図-6 LESによる風速場

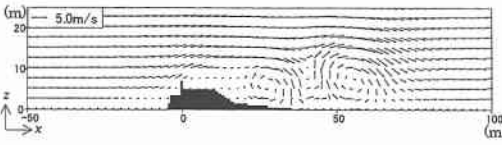


図-7 2次元計算の風速場 (N-S方程式)

—4の枠で囲んだ領域について、風上側($y=20\text{ m}$)、中心断面($y=200\text{ m}$)、風下側($y=380\text{ m}$)で比較する。風上側、中心断面、風下側の風速場を図-8に示す。これらより、奥行方向に対して渦の中心位置が異なり、堤防背後域での風速場の3次元性が云える。つまり、堤防背後域での風速場の3次元性は入射側の風向に大きく依存することが判った。

4.3 拡散場の計算結果

次に、流入濃度の奥行方向成分 v が0の場合の中心断面($y=200\text{ m}$)における定常状態の拡散場を図-9に示す。また、比較のため、N-S方程式の拡散計算の結果を図-10に示す。図-8より、飛来塩分の濃度は、陸地に行くに従い値が低くなることが判る。また、堤防背後域では、より値が低くなっているが、これは堤防による遮蔽効果で風速が小さくなっているために濃度の輸送が抑えられていることが原因と考えられる。図-9, 10を較べる

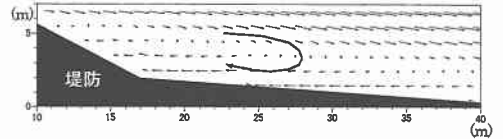
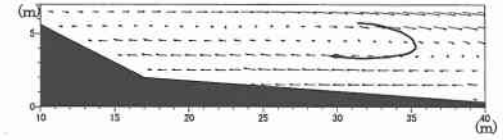
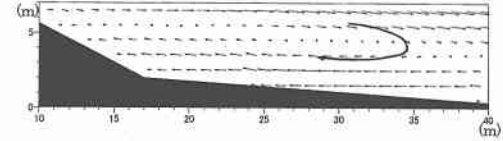
(a) 風上側 ($y=20\text{ m}$ 地点) の風速場 ($v=0.3u$)(b) 中心断面 ($y=200\text{ m}$ 地点) の風速場 ($v=0.3u$)(c) 風下側 ($y=380\text{ m}$ 地点) の風速場 ($v=0.3u$)

図-8 風速場の3次元性の比較

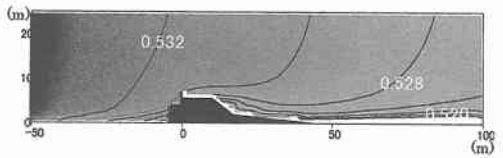


図-9 3次元計算による拡散場 (等温場 LES)

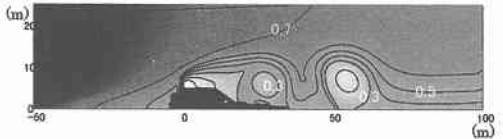


図-10 N-S方程式に基づく2次元の計算による拡散場

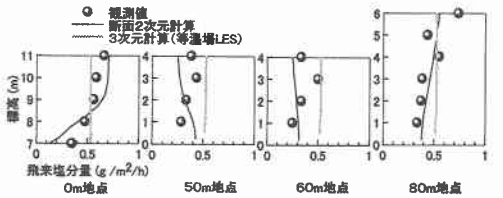


図-11 観測値と計算値との比較

と、明らかに堤防背後域での拡散場が異なっていることが判る。N-S方程式の計算では風速場が乱れていた地点で極端に濃度が低くなっている部分があり、定性的には拡散場を過小評価する傾向にある。

図-11は、現地で得られた飛来塩分の観測値と拡散計算より求めた計算値との定量的な比較結果を示す。図よ

り、堤防背後域における3次元の計算値は、2次元の計算で見られるような標高とともに濃度が低くなる減少は改善されるものの、値自体が大きくなっている。また、全体的に地表面付近に於いて濃度が高くなる傾向にある。そこで、実際の現地は海岸線付近であることから、日中の海上と陸地とでは温度差が生じ、温度の高い陸地においては熱対流が起こることが考えられるため、非等温場で浮力の項を考慮した風速場を再現し、それを用いて飛来塩分の移流・拡散を検討する。

5. 温度場を考慮した LES モデルによる大気環境（飛来塩分）の計算

非等温の流れ場では、温度の変化によって密度が変化し、その結果流体は浮力を受けて浮力流が生じる。現地のような海岸線付近かつ比較的平坦な地形に於いてはその影響は無視することは出来ない。

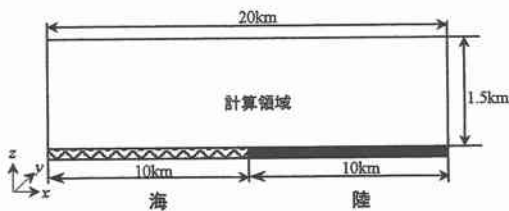
そこでまず、海陸風の再現を行い、観測値などはないもののある程度の値を算出することが出来るかを検討する。その後、現地地形に対して温度差を与え、温度場を考慮した風速場・拡散場を再現し、観測値の再現性を検討する。

5.1 海陸風の再現

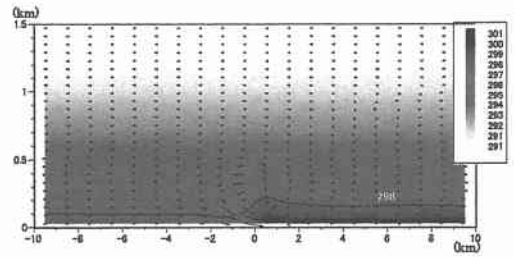
海陸風を再現するための計算方法として、まず計算領域を図一12に示す。主流方向 (x , u) を 20 km として、そのちょうど中央に海岸線があり、海岸線の左側の領域を海、右側を陸として区別する。鉛直方向 (z , w) は、大気境界層上端と仮定する約 1.5 km とし、奥行き方向 (y , v) は 10 km とする。このような計算領域を、 $20 \times 10 \times 25$ のメッシュに分割する。

計算は午前8時から始めることにする。初期条件として、速度場は無風状態 (風) であり、気温の鉛直分布については、 $T(z) = T_0 - \Gamma z$ のような温度減率 Γ を与える。ここで T_0 は地表面温度で 298.65 (K)、 Γ は 0.006 (K/m) であり、これらは高気圧が支配している快晴の日の状態 (弱安定成層) である。温度に関しては、海面上での気温は一定で、陸上では正弦関数に従って日変化するものとして設定した。

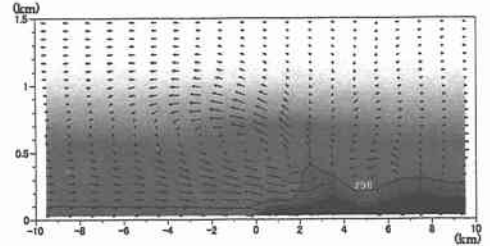
計算時間ステップ $\Delta t = 1.0$ 秒として、計算開始時刻 8 時から 18 時までの 10 時間における計算を行った。奥行



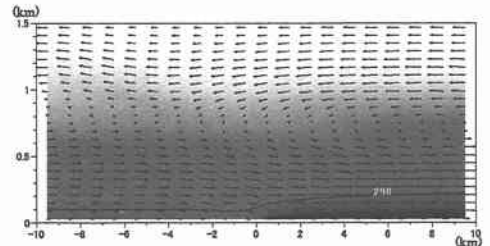
図一12 計算領域



(a) 12 : 00



(b) 15 : 00



(c) 18 : 00

図一13 温度場及び風速場

方向中心断面 ($y = 5$ km) における風速場及び温度場を図一13(a)~(c)に示す。但し、図の縦軸は標高 (km)、横軸は海岸線からの距離 (km) を表す。色が濃いほど温度が高いことを示す。

その結果、12 : 00 頃から海岸線付近に於いて温度差が大きくなり、循環が駆動され始めることが判る。これは、陸地の温度が海面のそれより高くなるため、陸地に於いて上昇流が起こり、海岸線付近で陸側へ吹き込む海風が発生するためである。時間の経過とともにそのスケールは大きくなっており、海風前線が陸地の方へと移動していく様子が判る。15 : 00 になると上下約 500 m 程の幅の海風の層が、一番下の層となっており、またその上には、逆向きの風の層が存在している。これらの現象の定性的・定量的な傾向は、過去の数値実験と比較してもおおよそ近いものが算出されていると云える。水平方向の風速の最大値は約 2.5 m/s であり、鉛直方向の上昇流の最大値は 0.2 m/s であり、現実的な結果と云える。更に、時間の経過とともに海風前線は陸側に押し流され、地表面温度が低くなっていく 18 : 00 頃には消滅しており、実際の

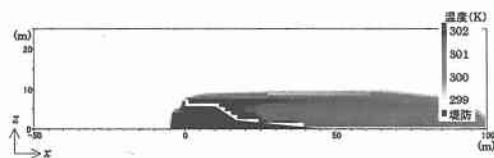


図-14 温度場 (非等温場 LES)

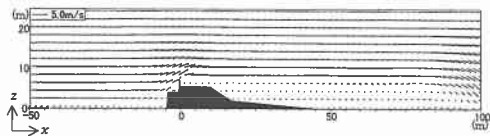


図-15 風速場 (非等温場 LES)

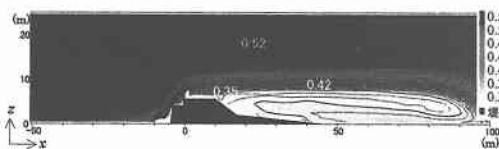


図-16 拡散場 (非等温場 LES)

現象をよく再現しているものと思われる。

これらの図より、妥当な計算結果が得られたとして、非等温場での LES を横島干拓地に適用する。

5.2 非等温場 LES モデルの現地への適用例

計算は、観測時同様の高気圧が支配している快晴の日を次のように簡単に仮定した。地表面の状況に応じて温度の変化を与えるため、海面温度、コンクリート構造物である防波堤温度、後背地の地表面温度をそれぞれ 298.65 K (25.65°C), 303.65 K (30.65°C), 301.65 K (28.65°C) で一定と仮定して、地表面の境界条件を設定した。他の境界では、波動伝播型境界条件を適用し温度を設定した。また、気温の初期条件として、 $T(z)=298.65-\Gamma z$ となる一定の温度減率 $\Gamma=0.006$ (K/m) を与えて計算を進めた。流入濃度は海側境界 ($x=-55$ m) で、鉛直・奥行方向に一樣であるものと設定した。他の計算条件は等温場での LES と同様である。

計算結果として、図-14 に定常状態における中心断面での温度場、図-15 に風速場、図-16 に拡散場を示す。図-14 より、堤防背後域の温度が高くなっていることが判る。特に、地表面よりも 2.0 K だけ温度を高く設定した防波堤表面では、より高温になっていることが判る。そのため、風速場には、等温場の LES とは多少異なり、堤防背後域に於いて低速域が広がっており、わずかな上昇流が見られる。その影響により、堤防背後の拡散場は、上昇流とともに濃度が上空に上がり濃度が低くなっているものと思われる。

次に、観測値との定量的な比較を図-17 に示す。その

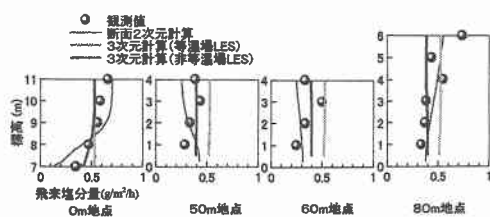


図-17 観測値と計算値との比較

結果、3次元計算 (非等温場 LES) に見られるように、温度場を考慮することで、特に、堤防背後域の再現性が等温場の LES よりも向上していることが判る。これは気温の高い陸域の地表面付近において浮力が起こり、上昇流によって濃度が上空に移流・拡散されたためと考えられる。これより、2次元の計算よりも、非等温場での LES を用いることで観測値を巧く再現できることが判った。

6. おわりに

LES を用いた風速場・拡散場の計算を行い、現地観測結果と比較し、計算の妥当性を検討した。それにより得られた結果を以下に示す。

- 1) 計算精度検証において、平行平板間流れ及び障害物周辺流れの再現を行ったところ、定性的・定量的に見ても十分な精度が得られた。
- 2) 堤防背後域における風速場の 3 次元性を検証したところ、入射風の風向を変化させると、奥行方向に対して渦の中心位置が異なり、堤防背後域に風速場の 3 次元性が出現する。このため、堤防背後の風速場の 3 次元性とは、入射風の風向に大きく依存することが判った。
- 3) LES を用いた風速場・拡散場の計算を行い、温度場を考慮した LES を用いることで、陸域において浮力流が生じ、その結果濃度が上空に移流・拡散されるため N-S 方程式に基づく 2 次元の計算や等温場 LES よりも観測値を再現出来ることが判った。

参考文献

- 滝川 清, 山田文彦, 外村隆臣, 荒木宣博 (1998): 飛来塩分の数値モデルと防風ネットを用いたその抑制効果に関する研究, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 1181-1185.
- 仲座栄三, 津嘉山正光, 山路功路 (1993): 飛塩 (海塩粒子) の数値流体的解析, 海岸工学論文集, 第 40 巻 (2), pp. 1036-1040.
- 松永信博, 植田 操, 鶴崎健一 (1995): 波に作用する風応力としおき量の関係, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 1031-1036.
- 山田文彦, 滝川 清, 外村隆臣 (1997): 有明海沿岸域における飛来塩分の拡散機構とその数値モデルに関する研究, 海岸工学論文集, 第 44 巻 (2), pp. 1216-1220.
- Matinuzzi, R. and C. Tropea (1993): The flow around surface-mounted, prismatic obstacle placed in a Fully Developed Channel Flow, Journal of Fluids Engineering, Vol. 115