

II-21

LES を用いた実地形上の大気乱流シミュレーション

神戸大学自然科学

正会員

中山昭彦

神戸大学大学院

学生員

○利上典史

1. はじめに

近年、大気汚染物質の移流・拡散現象などの大気環境問題や、人工建造物による環境変化に対するアセスメントなど、実地形上での大気乱流の解析には関心が注がれ、今後もその応用の幅は広がっていくものと思われる。しかし、このような実地形上の大気乱流のシミュレーションにおいては、現在でも簡単な乱流モデルを組み込んだレイノルズ平均式に基づいた方法(RANS)が主に用いられている。一方、ラーゼ・エディ・シミュレーション(LES)については、単純境界形状を有する場における解析で成果が出ているが、複雑境界上の流れへの応用例はいまだ数少ない。

そこで本研究では、LES 法を用いた一般複雑地形上での流れの解析のベンチマークとして、隠岐空港およびその周辺地域における気流のシミュレーションを開発された LES 法¹⁾を用いて行った。計算結果は風洞実験結果と比較し、その精度等について検討を行った結果を報告する。なお今回の解析の目的は前述の通りであり、解析精度については今後の課題とするものである。

2. 対象地形

今回の計算の対象とした地域は島根県隠岐郡の隠岐空港およびその周辺地域で、北東から南西にかけて 8.0 km、北西から南東にかけて 2.3km の領域である。領域内は海面および海拔 200m 前後の起伏を含んだ陸地からなる。図-1 はこの領域の 1/1000 スケール風洞実験模型の写真であり、図-2 は数値計算モデルであるが、いずれも今回想定する風の風上側から望んだ構図になっている。なお後者は地表面の地形図より 50m~100m 間隔で数値データ化したものを 3 次元的に表わしたものである。

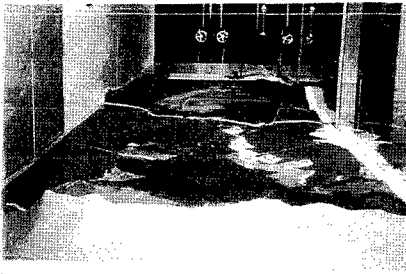


図-1 風洞実験モデル

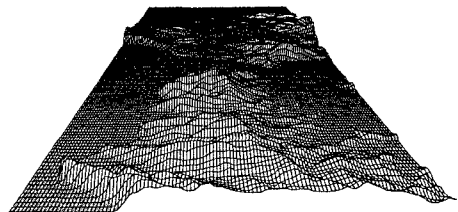


図-2 数値計算モデル

3. 解析手法

先に表わした領域上の大気乱流に LES を適用した。今、3 次元直交座標上で、流下方向に x_1 軸、スパン方向に x_2 軸、鉛直上方に x_3 軸をとり、それぞれに対応する速度成分を u_1 , u_2 , u_3 とすると、3 次元非圧縮の LES 基礎式は次のように表わせる。うち運動方程式は

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\overline{p} + \frac{2}{3} k_s \right) + (\nu + \nu_\tau) \frac{\partial^2 \overline{u_i}}{\partial x_j^2} + \frac{\partial \nu_\tau}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \quad (1)$$

であり、連続の式は

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

である。ここに ν は動粘性係数、 $\overline{p}$ は圧力を密度で除したもの、 k_s は格子以下の乱れエネルギーであり、渦キーワード：LES, 大気乱流, 実地形

連絡先：〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1 神戸大学工学部建設学科・TEL(078)803-1420・FAX(078)803-1050

粘性係数 ν_T は Smagorinsky モデルに倣い次のようにする。

$$\nu_T = (C_s \Delta)^2 \sqrt{2} \left[\left(\frac{1}{2} \right)^2 \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

ここに Δ はフィルタ幅の代表値、 C_s はモデル定数であり今回の計算では 0.13 とした。なおフィルタリング操作によって生じる Leonard 項と Cross 項については、同時に無視することによりモデル化を省略した。

計算は、上述の基礎式を陽的に離散化し、食い違い格子を基にした HSMAC 法を用いて行う。また時間進行に関しては Adams-Bashforth の 2 次精度の公式、粘性項および乱流応力項には 2 次精度中心差分、移流項には 3 次精度風上差分を用いて離散化した。

また複雑不規則境界形状は矩形近似により表現した。

3. 計算結果および実験値との比較

計算は $120 \times 46 \times 55$ の 3 次元直交座標上でを行い、格子間隔については地形の状況に応じて変化させている。また Reynolds 数、流入風速分布は風洞実験に従い、温度勾配も風洞実験と等しい中立成層の条件としている。なお風下側には放射条件を採用し、地表面での境界条件としては対数則を用いている。

図-3、図-5 に風洞実験結果を示し、計算結果は図-4、図-6 に示す。また図-3、図-4 は、滑走路面を基準に高さ 20 m での平均風速を基準風速との比で表したもので、図-5、図-6 は 50 m の同様のものである。

計算結果の図を見てみると、図-4、図-6 の両方において位置 A の風下側での風速の落ち込みがみられる。これは風洞実験結果の図-3、図-5 にも顕著にみられる傾向であるが、この付近には滑走路面を基準として約 35 m の独立した小峰があり、これにより流れが妨げられ逆流域が発生したためと考えられる。

また平均風速の値の分布をみると、計算結果が風洞実験結果に比べやや大きく出ているものの、結果は良好である。

このことにより今回の計算が流れを定性的には再現できていると言える。

おわりに

今回は複雑な境界形状を有する実地形上の気流を、開発した LES 法を用いて解析した。しかし結果は良好とはいえないものの、複雑地形上の流れを捉えてきているとはまだまだ言えない。今後も一般複雑地形上の乱流諸量の解析精度の向上に向けて、境界形状のより良い近似法の模索などが必要である。

<参考文献> 1) Nakayama, A., Noda, H., "Physical and Numerical Modeling of Turbulent Flow Over Complex Topography", Proc. 11th Symposium on Turbulent Shear Flows, pp. 19-19, 1997.

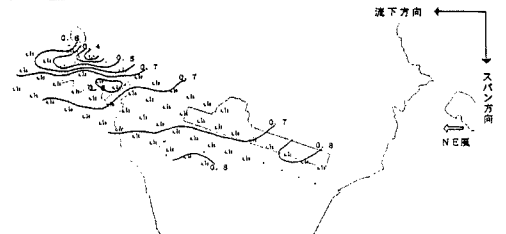


図-3 風洞実験結果（高さ 20 m）

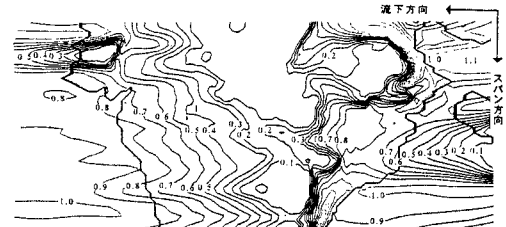


図-4 計算結果（高さ 20 m）

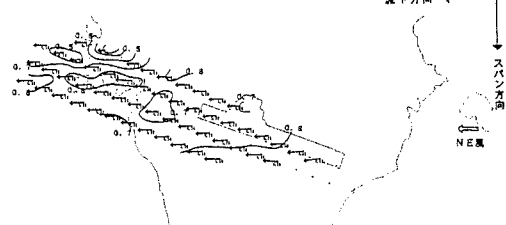


図-5 風洞実験結果（高さ 50 m）

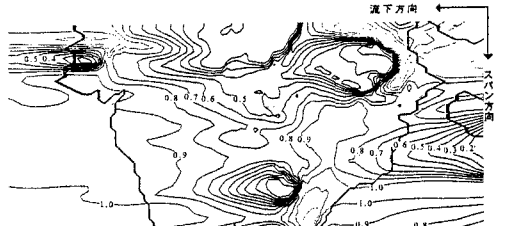


図-6 計算結果（高さ 50 m）