

LESに基づく MYNN モデルの開発と大気境界層の微細構造の解析

*中西幹郎 (防衛大学校), 新野 宏 (東京大学海洋研究所)

1. はじめに

LES (Large-Eddy Simulation) を用いて得たデータベースに基づいて, アンサンブル平均の乱流クロージャーモデルの1つである Mellor-Yamada (MY) モデルを改良した. MYNN (Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino) モデルと名付けたこの改良モデルは現在, 気象庁の非静力メソスケール予報モデル (JMA-NHM), 海洋研究開発機構などの全球気候モデル (MIROC, NICAM), 米国のコミュニティモデル (WRF) にも導入されている. ここでは, MYNN モデルの概要と1つの計算例を示し, 最近取り組んでいる LES を用いた大気境界層の研究を紹介する.

2. MYNN モデルの概要

例えば液水温度 θ_l の1次元方程式は,

$$\frac{\partial \theta_l}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \langle w \theta_l \rangle \quad (1)$$

と表せる. ここで w は鉛直風速で, 大文字は平均量, 小文字は乱流量, 山括弧はアンサンブル平均を表す. 右辺の乱流温度フラックスのような乱流統計量を, 既知の量でパラメタライズするのが乱流クロージャーモデルで, MY・MYNN モデルは, 2次の乱流統計量を予報式あるいは診断式を立てて解くので, 2次の乱流クロージャーモデルと言う.

乱流温度フラックスの1次元方程式は,

$$\begin{aligned} \frac{\partial \langle w \theta_l \rangle}{\partial t} - D_{w\theta} = & -\langle w^2 \rangle \frac{\partial \theta_l}{\partial z} \\ & + \frac{g}{\Theta_0} \langle \theta_l \theta_v \rangle + \left\langle \frac{p}{\rho_0} \frac{\partial \theta_l}{\partial z} \right\rangle \end{aligned} \quad (2)$$

と書ける. ここで $D_{w\theta}$ は拡散項, g は重力加速度, Θ_0 は基準温度, θ_v は仮温度, p は気圧, ρ_0 は平均密度で, 右辺最終項は圧力・温度勾配の共分散項と言う. レイノルズ応力の方程式にも同様の圧力・歪みの共分散項が現れ, 両者を併せて圧力共分散項と言う.

圧力共分散項はパラメタライズする必要があるが, MY モデルは中立成層の室内実験に基づいたため, 等方化の働きとシアの効果しか考慮しなかった. MYNN モデルでは, Moeng and Wyngaard (1986)などの指摘に

基づき, 浮力の効果も考慮することにした. これにより未知の定数 (クロージャー定数) が増える.

MY・MYNN モデルは, 乱流の等方性の程度に応じて方程式系を簡略化し, 幾つかのレベルに分類する.

Level 3 以下では, 乱流温度フラックスは,

$$\langle w \theta_l \rangle = -LqS_H \frac{\partial \theta_l}{\partial z} \quad (6)$$

のように, 1次の乱流クロージャーモデルと同じように, 勾配拡散近似の形に帰着することができる. ここで, $q^2/2 (= (\langle u^2 \rangle + \langle v^2 \rangle + \langle w^2 \rangle)/2)$ は乱流運動エネルギー, S_H は代数計算で求まる安定度関数であるが, L は乱流長さスケールで未知の量である.

Mellor and Yamada (1974) は中立境界層の計算結果に基づいて, L の診断式を提案した. 一方, Mellor and Yamada (1982) は $q^2 L$ の予報式を提案した. しかし, この予報式は物理的根拠に乏しい. そこで, MYNN モデルでは, 安定度で変化する接地層の長さスケール, 浮力により制限される安定成層の長さスケールをも考慮した診断式を新たに提案した. このときにも, 未知の定数が増える. LES のデータベースは, これらの未知の定数を決定するのに使用した.

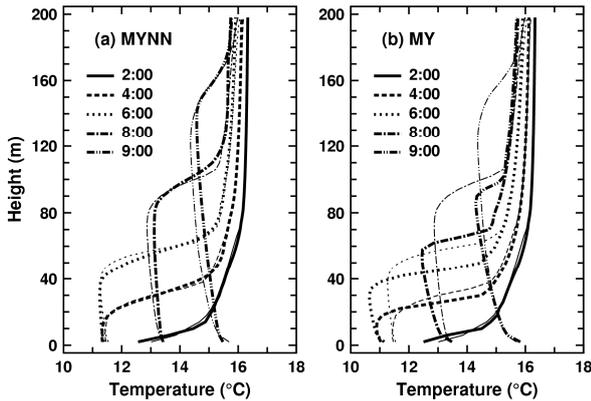
ところで, S_H は Level 3 では $\pm\infty$ の値を取り得る. そこで, $S_H = S_{H2.5} + S_H'$ のように, Level 2.5 で求められる安定度関数 $S_{H2.5}$ とそれからの差 S_H' に分離した. 過去の研究成果により $S_{H2.5}$ は正であることが分かっている. また, S_H' は温度勾配 $\partial \theta_l / \partial z$ を掛けることで有限の値になることが示される. これにより, Level 3 の数値的に安定な計算が可能になった. なお, Level 2.5 は, q^2 を予報式で解くが, スカラー量の分散, 共分散は診断式で解く.

MYNN モデルの改良の要点は,

- (1) 圧力共分散項のパラメタライゼーションに浮力の効果を考慮
- (2) 乱流長さスケールの診断式に安定度による変化を考慮
- (3) 未知の定数の決定に LES データベースを使用
- (4) Level 2.5 に関する過去の研究成果を利用した数値安定性の良い計算スキームを考案にまとめることができる.

3. MYNN モデルの計算例

MY・MYNN モデルを用いて、オランダの Cabauw で放射霧が発生したときの鉛直 1 次元計算をおこなった。第 1 図に LES の結果の水平平均と重ねて示す。MYNN モデルによる気温の鉛直分布は LES のそれとほとんど一致しており（第 1 図 a），境界層の成長が遅れる MY モデルの弱点（第 1 図 b）が大幅に改善されていることが分かる。この改善は、主に乱流長さスケールの改良によることが分かった（図省略）。



第 1 図 気温の鉛直分布の時間変化。(a) MYNN Level 3 の結果, (b) MY Level 3 の結果. 細線は LES の結果の水平平均, 線種は時刻を表す。

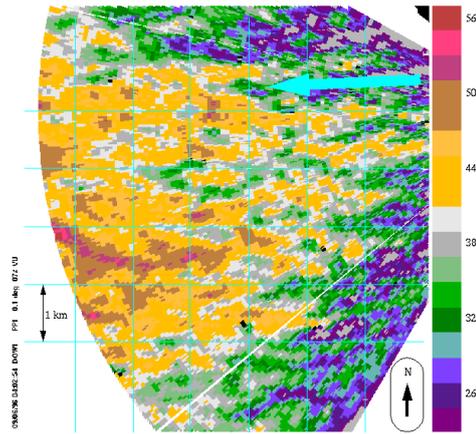
4. LES による大気境界層の研究

塵旋風や大気下層の水平渦構造（ストリーク）の解析も実施しているが、ここでは台風境界層内に現れるストリークに似た筋状の構造を紹介する。

第 2 図は Wurman and Winslow (1998) が車載型のレーダーを用いて観測した台風境界層内の流れである。東風に沿う方向に、強風域が筋状に何列も並んでおり、強風域の間隔の平均は約 600 m であることが分かる。

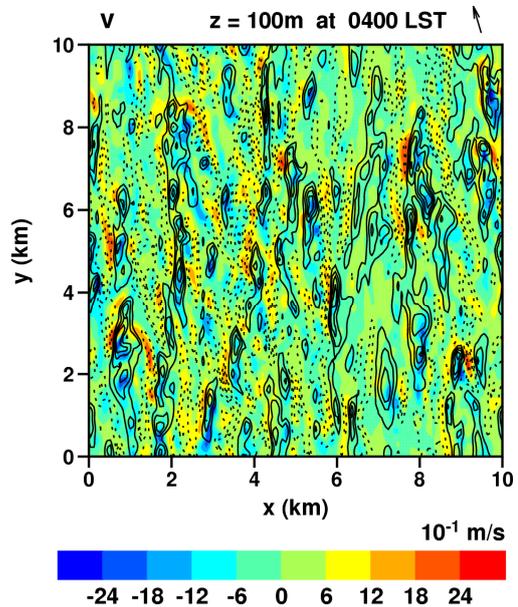
第 3 図に LES による予備計算の結果を示す。方程式系は擬似的な円筒座標系で表し、 30 m s^{-1} の傾度風を与え、顕熱フラックスはゼロで、 $10 \text{ km} \times 10 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ の計算領域、水平 80 m と鉛直 40 m の格子間隔で、4 時間の定常計算をおこなった。第 2 図のレーダーと同様の筋状の構造が現れている。より細かい格子間隔による計算や、感度解析を実施する予定であるが、POD (Proper Orthogonal Decomposition) 解析の結果から、この構造はエクマン境界層内に生じる変曲点による不安定の構造の可能性が高いと考えている。

LES は、大気境界層内で起こる様々な現象を再現・解析するのに適したツールと言える。ただし、例えば



第 2 図 車載型レーダーで観測された台風境界層内の流れ (Wurman and Winslow 1998)。

<http://www.cswr.org/downloads/archives.htm> より



第 3 図 LES による 100 m の高さの水平面内での水平風速の変動 v (等値線) および鉛直風速の変動 w (カラー) の分布. v の等値線間隔は 2 m s^{-1} で、右肩の矢印は表示の高さでの平均風向を表す。

地表面の境界条件に課題は残っている。そのような課題を克服し、LES の解析を通して得た知見を蓄積すれば、不十分であった大気境界層の理解に貢献し、次世代の気象・気候モデルの構築につながると期待できる。

参考文献

- Mellor and Yamada, 1974: JAS, 31, 1791-1806.
- Mellor and Yamada, 1982: Rev. GSP, 20, 851-875.
- Moeng and Wyngaard, 1986: JAS, 43, 2499-2513.
- Wurman and Winslow, 1998: Science, 280, 555-557.