

大気境界層：モデル研究を中心に*

中西 幹 郎**

1. 筆者から見たここ20年の大気境界層研究

筆者が大気境界層の研究と出会ったのは、大学院生として東大海洋研に通い始めた1983年のことである。この年は、長野県の盆地で夏季夜間にしばしば観測される高濃度オキシダントの発生機構を調べることを目的とした環境科学特別研究「内陸域における大気汚染の動態」が始まった年である。この研究では大学、国や地方自治体の研究機関が共同で、東京湾沿岸から信越線に沿って長野盆地に至る壮大な立体観測を繰り広げた（例えば中西・木村¹⁾）。筆者はまずは、観測を通して大気境界層の研究に触れた。

1985年に就職した民間の気象会社では、観測に加えて新たな手法も経験することになる。当時、スーパーコンピュータはまだあまり普及していなかったが、数値シミュレーション（例えば Kikuchi *et al.*²⁾）が調査手法の1つになる気配はあった。数値シミュレーションの経験がなかった筆者がはじめに行ったのは、2次元モデルによる都市キャニオン内の気流、物質拡散と光化学オキシダントの推算であった。推算されたオキシダント濃度が実測とよく合ったのには正直驚いた。その後モデルは3次元に拡張し、放射性物質の拡散・崩壊、夜間冷気流、ヒートアイランド、ヤマセの下層雲、霧などの予測を経て、1994年にはルーチン運用するまでになった。残念ながら、ほとんどの成果は守秘義務により公表していない。

2000年に今の職に異動する少し前から、乱流モデルに凝りだした。これがこの解説の主題であり、それを期待されていると思うので、後で詳しく述べる。その

ほかでは、都市の豪雨の予測なども試み始めている。

長年民間の気象会社にいた所為もあるが、筆者の体験からすると最近の大気境界層の研究は、局地循環による物質輸送や都市キャニオン内の光化学反応などの大気汚染関連、ヒートアイランドや都市の豪雨などの都市気候関連のように、社会に密着した研究課題が多い。研究手法は観測や実験よりも、数値シミュレーションが多くなってきたように思う。これは、都市周辺の多様な地表面上に形成される3次元的な構造を持った境界層が対象となっているために、観測ではなかなか全体像を捉えにくいからであろう。しかし、数値シミュレーションは依然完全とは言い難いので、観測、とりわけリモートセンシングとの連携が欠かせない。観測手法の説明はほかの解説に譲り、ここでは大気境界層のモデルの現状と課題を中心に述べる。

2. 大気境界層とは

教科書的には、大気境界層とは地表面の摩擦の影響を多分に受ける下層大気のことである。数値予報モデルで利用されるアンサンブル平均の運動方程式：

$$\text{慣性項} = \text{圧力項} + \text{コリオリ項} + \text{渦粘性項} \quad (1)$$

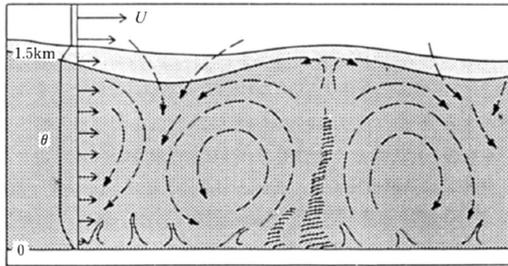
で説明すると、最後の渦粘性項（拡散項ともいう）が重要な働きをする大気層のことである。その厚さは大気安定度などで変化するが、典型的には1 km程度である。大気境界層は我々の生活の場であり、大気汚染物質の輸送、都市の豪雨に寄与する水蒸気の集積などで大きな役割を果たす。また、熱、水蒸気、物質などを地表面付近から自由大気へ輸送し、地球規模の大気現象に影響を与える役割もある。

この大気境界層の性質を特徴づける渦粘性項は何を表しているのだろうか。実はアンサンブル平均をしない瞬間の運動を表す方程式には、分子粘性項は別に

* Atmospheric Boundary Layer : Focusing on Its Modeling.

** Mikio NAKANISHI, 防衛大学校応用科学群地球海洋学科.

© 2007 日本気象学会



第1図 昼間の大気境界層（対流混合層）の概念図。竹内³⁾より転載。

して、この項は存在しない。第1図に昼間の大気境界層の概念図を示す。この図では大気境界層の厚さは約1.5 kmとしている。円状の破線の矢印は瞬間の流れ（流線）を表している。一方、左側に描かれた右向きの実線の矢印はアンサンブル平均した風（瞬間の流れを十分広い水平面内で平均した風と考えてよい）の鉛直分布を表している。地表面状態が一様な平坦地ではアンサンブル平均風は鉛直流を持たないので、この風が鉛直方向に運動量などを輸送するはずがない。輸送を行うのは瞬間風には存在する鉛直流であり、その輸送の「効果」を表現するのが渦粘性項である。

第1図のように、状態一様の平坦地にも見られる対流は「鉛直」対流と分類される。現実の地表面には都市、森林など多様な状態が分布する。それぞれの地表面が大気に及ぼす摩擦影響の違いは渦粘性項の差、直上の大気境界層の成長の差として現れ、「水平」対流を引き起こすことになる。詳細は「局地循環」の解説で述べられるであろう。

3. 渦粘性項のモデリング

運動方程式における渦粘性項はレイノルズ応力（運動量輸送） $\overline{u'w'}$ の発散で表される。ここで、オーバーバーはアンサンブル平均の量、プライムはアンサンブル平均からのずれの量を表す。平均量の予報式だけを並べた場合レイノルズ応力は未知量であるため、これを既知の平均量で表現しようと、分子粘性の理論と同様の考え方で

$$\overline{u'w'} = -K \left(\frac{\partial \overline{u}}{\partial z} + \frac{\partial \overline{w}}{\partial x} \right) \approx -K \frac{\partial \overline{u}}{\partial z} \quad (2)$$

と近似する方法は前世紀初めからあった。ここで、 K は渦粘性係数（拡散係数ともいう）である。この K は分子粘性係数のような（ほぼ）定数ではなく、

Prandtlの混合距離理論を使って[混合距離の2乗] × [鉛直シア]と与えたり、O'Brien⁴⁾のように適当な関数で経験的に与えたりすることもあった。

1970年代にはレイノルズ応力は、(2)式を仮定せず、運動方程式から導かれる予報式を解いて求めるモデルが広く使われるようになった。その代表がMellor and Yamada⁵⁾ (MY)の乱流クロージャーモデルである。平均量の予報式に $\overline{u'w'}$ など2次の未知量があるように、レイノルズ応力の予報式には $\overline{u'u'w'}$ など3次の未知量が存在する。これを既知量でパラメタライズしてはじめて方程式系を「クローズする（閉じる）」ことができる。もちろん先の(2)式を仮定するものもクロージャーモデルである。このような2次量をパラメタライズするものを1次クロージャーモデル、MYのように3次量をパラメタライズするものを2次クロージャーモデルという。

MYモデルが広く用いられるようになった理由の1つは、乱流の等方性の程度に応じてモデルを簡素化したことである。第1表に示すように、レベル4と呼ばれるものが元々の2次クロージャーモデルであり、レベル1が最も簡素化したモデルである。ただし、レベル1は予報式の数の点でレベル2と変わらないので、実際には使用されていない。また、レベル2.5は後になってYamada⁶⁾が提案したので中途半端な数字が付いている。なお、乱流長さスケールの予報式の有無はレベルとは無関係である。

レベル3以下では予報式が減るだけでなく、レイノルズ応力が(2)式の形に帰着できることも簡素化の大きな成果の1つである。さらに、代数モデルとなるレベル2を使うと、数値計算することなく解析的に、接地層の各種統計量を求めることができる（観測ともよく一致する；Mellor⁷⁾）。これは、同様の簡素化を行っても、工学分野でよく用いられる標準 $k-\epsilon$ モデル

第1表 2次クロージャーモデルのレベルと使用する予報式。○は予報式の使用、×は代数式の使用を意味する。乱流運動エネルギーはレイノルズ応力の対角成分の和の半分である。

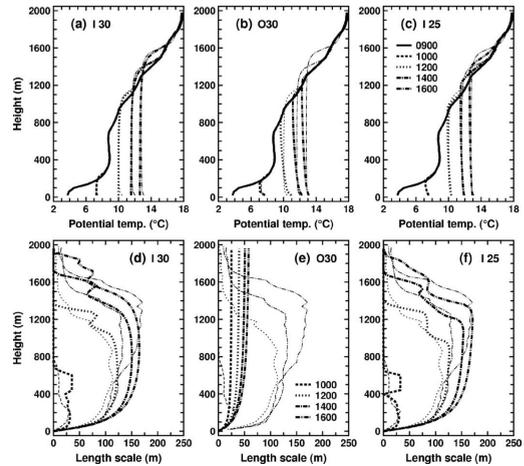
レベル	レイノルズ 応力，熱輸送	乱流運動 エネルギー	温度分散
4	○	○	○
3	×	○	○
2.5	×	○	×
2	×	×	×
1	×	×	×

ルにはできない技である。

ところが、MYモデルも完全というわけではなかった。特に、対流混合層における温位の傾き、その結果混合層高度の予報に問題があった。観測値を細かく見ると、対流混合層下部での温位の傾きは負、上部でのそれは正である。この分布は、上昇・下降の対流分布に非対称性があり、占有域の狭い強い上昇流が効率よく下層の熱を上層に輸送するために生じると考えられる。これに対し、MYモデルが予報する温位の傾きは対流混合層全体で負の値となる。熱輸送は u を θ に置き換えた (2) 式で表すことができる。対流混合層では上端付近を除いて $\overline{\theta'w'}$ は正であるので、 K (レイノルズ応力の K とは異なる) が正の値をとるならば温位の傾きが負となるのは当然である。にもかかわらず観測がそうならないのは K が負の値を取り得ることを意味している。これを逆勾配拡散と言い、レベル3以上ではこの再現は原理的に可能である。しかし、レベル3のMYモデルを使っても温位の傾きは改善されない。この原因の1つは、例えば Moeng and Wyngaard⁹⁾ に示されるように、MYモデルの乱流長さスケールが小さすぎることにあった。

このような欠点の改善を3次クロージャーモデルに求める研究もある。しかし、Nakanishi⁹⁾ はMYモデルにこだわり、第1図の瞬間の流れを計算する (アンサンブル平均をしない) Large-eddy simulation (LES) モデルを利用して、地表面からの顕熱輸送を様々に変えて計算した大気境界層のデータベースを作成し、これを基にMYモデルの未知定数と乱流長さスケールを見積もりなおした。この際、レイノルズ応力や熱輸送の予報式に現れる圧力共分散項のパラメタライズにおいて、Mellor and Yamada⁵⁾ が無視した浮力効果を加えた。この追加は臨界リチャードソン数を1に近づけ (この値の妥当性は Cheng *et al.*¹⁰⁾ などを参照)、安定成層での性能を向上させ、長さスケールは特に不安定成層での性能を向上させた。

ワンガラ実験の気象条件で計算した温位と長さスケールの鉛直分布を第2図に示す。改良レベル3 (I30) はオリジナル (O30) と比較して、温位の傾き、混合層高度ともにLESに近い結果を示している (第2図 a, b)。I30とO30の差は長さスケールにおいてさらに明瞭である (同 d, e)。改良レベル2.5 (I25) も、混合層高度がやや低いことを除けばI30に見劣りしない (同 c, f)。I25の結果は、計算コストの点で現業の数値予報モデルにとって朗報であろう。



第2図 改良レベル3 (I30)、オリジナルレベル3 (O30) および改良レベル2.5 (I25) で得た温位 (a-c) と乱流長さスケール (d-f) の鉛直分布。凡例の数字は地方時、細線はLESの結果である。

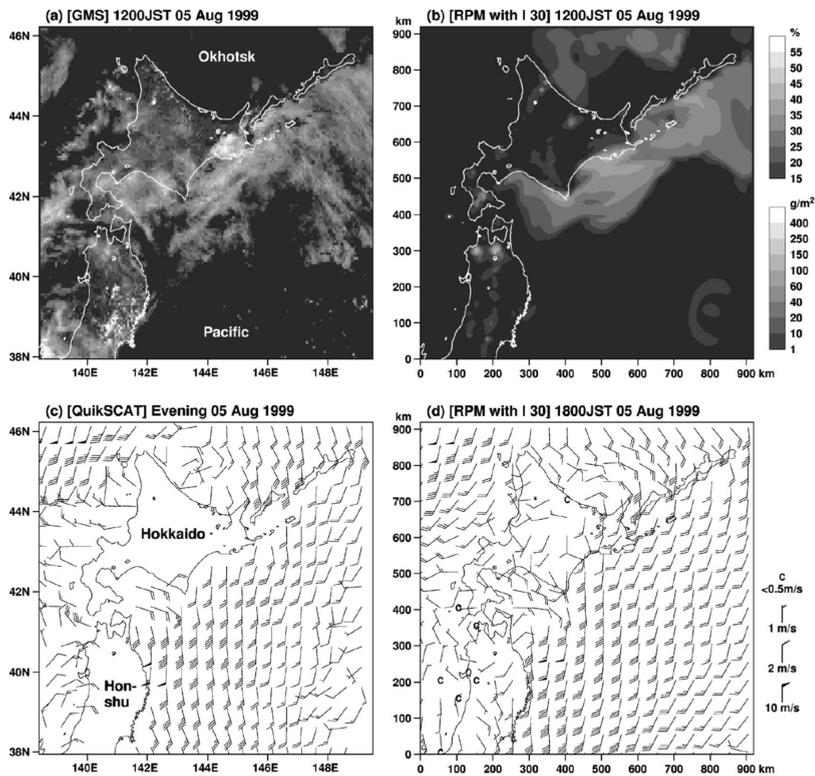
4. 局地予報への応用

気象庁の領域モデルの予報結果を外部条件として、改良レベル3を組み込んだ局地気象モデルで計算した移流霧の結果を第3図に示す。北海道周辺の風の分布 (第3図 d) や北海道沿岸太平洋上の霧の分布 (同 b) は観測 (同 c, a) をよく再現している。ただし、オホーツク海上に偽の霧を予報している。この傾向は他の事例でも見られ、海面水温、放射スキームの両面から改善を検討中である。

5. 今後の課題

ここ20年のモデルを利用した大気境界層研究は、1970年代前半に発表されたLESやMYモデルを利用したものが中心で、前者は境界層の乱流構造の解明などの基礎研究、後者は数値予報などの応用研究に利用されてきた。これらの発表後、多少の修正・改良が加えられているものの基本的な考え方は変わっていない。その改良の中で、筆者の改良MYモデルの性能は満足できる水準にあると信じているが、様々な状況での検証を重ねる必要がある。例えば盛んに水の相変化がある状況や夜間の強安定な場合である。予想外の循環による (ノンローカルな) 輸送が卓越する場もあるかもしれない。

この20年で飛躍的に進歩したのは計算機の性能であろう。これにより、数値予報モデルでも対流が解像で



第3図 1999年8月5日12時の (a) GMS-5可視画像 (アルベド；%) と (b) 局地気象モデルで得た鉛直積算雲水量 (g m^{-2}) の水平分布および18時の (c) QuikSCAT海上風と (d) 局地気象モデルで得た高度10 mの風の水平分布. Nakanishi and Niino¹¹⁾より転載.

きる程度の水平格子間隔が設定できるようになった。これは、LESの領域(縄張り)にMYモデルが近づきつつあることを意味している。ところが、MYモデルのようなアンサンブル平均モデルは複数の対流渦のトータルな輸送効果を表すものであり、個々の渦を解像するLESのモデルとは相容れない(第1図参照)。考えてみると、1つの渦が収まる程度(大気境界層の厚さと同程度)の格子間隔を設定する領域は、どちらのモデルの範疇にも入らない。この両モデルの境界領域の問題は顕在化したばかりで、これからの課題としてWyngaard¹²⁾や近藤¹³⁾が述べている。

ここでは大気境界層を扱うモデルの課題を述べた。大気境界層を介した熱、物質などの自由大気への輸送

を考えると、この課題は地球規模の気候モデルの課題でもある。逆に、自由大気の変動を地表面付近に伝える意味では、都市気候など工学分野のモデルの課題にもなる。そもそも、モデルは定式化ができて未知定数が存在するものであり、それを決めるのが観測や実験である。したがって、モデルの課題を解決するためには、観測との連携を図りながら研究を進めることが今後ますます大切になるであろう。

参考文献

- 1) 中西幹郎, 木村竜治, 1987: 天気, 34, 467-477.
- 2) Kikuchi *et al.*, 1981: J. Meteor. Soc. Japan, 59, 723-738.
- 3) 竹内清秀, 1997: 風の気象学, 東京大学出版会, 31-31.
- 4) O'Brien, J., 1970: J. Atmos. Sci., 27, 1213-1215.
- 5) Mellor, G. L. and T. Yamada, 1974: J. Atmos. Sci., 31, 1791-1806.
- 6) Yamada, T., 1977: Atmos. Environ., 11, 1015-1024.
- 7) Mellor, G. L., 1973: J. Atmos. Sci., 30, 1061-1069.
- 8) Moeng, C.-H. and J. C. Wyngaard, 1989: J. Atmos. Sci., 46, 2311-2330.
- 9) Nakanishi, M., 2001: Bound.-Layer Meteor., 99, 349-378.
- 10) Cheng *et al.*, 2003: J. Atmos. Sci., 60, 3043-3046.
- 11) Nakanishi, M. and H. Niino, 2006: Bound.-Layer Meteor., 119, 397-407.
- 12) Wyngaard, J. C., 2004: J. Atmos. Sci., 61, 1816-1826.
- 13) 近藤裕昭, 2006: 日本風工学会誌, 31, 133-136.