

大気境界層—混合層を中心として*

中村 晃 三**

1. はじめに

前回の続・気象学入門講座の大気境界層(1)の出版(1979年)以降、大気境界層の研究は非常に進歩しつつある。これは1でも述べられていたが、環境問題から大気境界層が注目を浴びたため、ならびに気候など地球規模の現象に関しても大気境界層の果たす役割の大きさが改めて認識されたためであろう。さらに、航空機やリモートセンシング技術の利用によって大気境界層全域にわたる観測が可能になり、また、一方では、計算機の発達によって、大気境界層中の主要な乱れを直接扱う Large-Eddy-Simulation の数値モデルが可能になったことも、大きく関係していると考えられる。

大気境界層は、一般に地表面が大気より暖かい不安定境界層と、地表面の方が冷たい安定境界層とに分けられる。本「手引き」では、地表面が気温よりも暖かく、活発な対流によってよく混合された混合層と呼ばれる領域の話題を中心に、最近の教科書・論文から、新しくこの分野を勉強する人のために重要と思われるものを紹介する。他の多くの分野でも同じことが言えるが、気象学に関する文献がこの間たいへん多く出版されている。大気境界層に関するものも多く、勉強する側にとってもたいへんつつきやすくなったといえる。その反面、あまりに多くのものが出版されているのでどれから読んでいいかわからない、全部を読んでいるとそれだけで手いっぱいになるという問題が起る。そのような時に、ある分野についてはどんなものが参考になるか？ また、その本はどの程度の知識を前提として書かれているか？ といったような情報があ

ると便利である。この手引きは、そのようなときに参考となることを意図して書かれたものである。

2. 基本的な教科書・読み物

さて、新しい分野の勉強を始めるときに、最初に読むと便利で読みやすいものは、やはり全体を見渡せる「教科書」的なものである。統一がとれた書き方で、いろいろな分野をそれなりの配分でおおっている。数多くの本が出版されている中でも、大気境界層全般に関するもっとも基本的な教科書と言えるものは2であろう。接地層からエクマン層までの全領域にわたり、モーニン・オブコフの相似則からエクマン層中の相似則や混合層での成層状況、さらには地表面を含めた熱収支や粗度の変化まで扱い、しかもいくつかの観測結果を使ってわかりやすくよくまとまった記述になっている。2がわかりやすいといっても、そこは教科書的な記述で取っつきにくい感じがするのに対し、著者の興味に応じて筆の赴くまま親しみの湧く記述で読みやすいのは、(3, 4, 5) などであろう。3は大学学部生のための講義をまとめた気象学一般の教科書ではあるが、境界層や地表面の記述が多く、取り扱っている内容が「本州で一番の低温が観測された村」や「グライダーでの飛行」の話などたいへん具体的で身近な印象を与える。最初の部分を除いてトピックを扱った形になっているので、体系化したものではないが、興味を沸かせ、本格的なものへ進む第一歩としては、大変読みやすいものであり推薦に値する。また、4も境界層の重要性を全球エネルギー収支から説いた話や測器の原理、大気・海洋のガス交換の話など、境界層に興味を持ったものにとってその興味を膨らますような話がたくさん含まれている。5も境界層の基本をコンパクトにまとめたたいへん読み易い小冊子である。

これら日本の教科書を読んでやや古い印象をいただくのは、最近、海外で出版された大気境界層に関する教科書がごく最近の話題も含めたたいへん斬新なもので

* The Well-Mixed Atmospheric Boundary Layer

** Kozo Nakamura, 東京大学海洋研究所 (現在イギリス Joint Centre for Mesoscale Meteorology に滞在中)。

© 1994 日本気象学会

あるからであろう。「90年代の気象学への手引き」として、ここ数年、海外で出版されたいくつかの教科書を紹介すると、まず、6が挙げられる。これは、一般気象学の基礎的な話は前提とした大学院学生もしくは研究者向きの本である。たいへん量も多いが、大気境界層についてさまざまな分野を総合的に扱ったため、テンソル、FFTなどの数学的 tool の説明も含めて、図も豊富で、イメージが湧きやすい。多くの観測結果もちりばめているし、実験のリストもあり、終わりの方は層雲を含む混合層やその不安定の問題など現在の第一線の問題まで考慮している。従って、著者のもう一方の目的である reference book としてもよくできていると思う。7は、「advanced graduate 向きはあるが、学部生向きがない」ことを嘆いた(?)著者が書いたというだけあって、他の教科書と異なり学部生から初期院生を読者対象としている。最初に観測事実を記述し、そのあとで理論を必要に応じて基本から丁寧に記述しておきたいへん分かりやすい。一方、8は、境界層内の鉛直構造と乱流にポイントが置かれている。学部から大学院の学生の教科書と専門家の reference book の両方に使えるように意図したとしているが、Joint probability distribution や non-local closure などの記述もあって、乱流の部分はやや専門的すぎる感じがする。いろいろな実験や理論を簡潔にまとめた表が多く、式の導出も簡潔で reference book として便利であろう。最後に、9は、大気境界層の概念の気候モデルへの適用を中心に書いたということで、境界層の基礎、パラメタリゼーションの基本原則、詳細な物理と結び付けるための知識などが中心になっている。雲と関連した議論も豊富で、層雲のモデリングのときのクロージャーや、最近話題のエントレインメント不安定の議論も紹介されている。その反面、気象学の基礎の部分の式の導出などはなく、大学院院生や教師向けという感じである。これらの教科書は、各章末に問題がついている。例えば、6のクリプトン星の乱流の話など楽しいものも多い。そのような問題を解いてそれぞれの章のポイントを確認しながら読んでいくのが良いだろう。

シンポジウムやワークショップをまとめたものは、最新の情報が入っていて貴重なものだが、専門に勉強している人向きのものが多く、一般向きの読みやすいものは少ない。境界層全般に関係するものとして、10、モデリングと関係したものとして、11などがあげられる。12は、メソ気象の分野の報文集めた本だが、

境界層に関する論文も多く含まれている。また、13は雲関係の会議のプロシーディングだが、境界層と関係した層雲、積雲などのごく最近の研究が数多く報告されていて非常に興味深い。一般の気象学の教科書でも、14など境界層の取り扱いを含むものも多く、それらは簡潔で読みやすいし、著者が専門として力を込めて書いたところ(例えば、14の対流の組織化のところなど)が自分の興味と合っていれば大変良い。境界層中を含めて、対流に興味があれば15がよいだろう。

観測に興味をもっている方にお勧めするのは、16である。題名の通り、測定・観測の本で、タワーや航空機での測定から、エアロゾルや視程、さらにトレーサーを使った観測やライダー・レーダー・ソーダーなどリモートセンシングを使った観測まで、幅広くその原理、解析方法、特徴などが、それぞれの観測を行う専門家によって書かれている。自分で観測しない場合でも、それぞれの使われ方などを知っておくことは重要なことであろう。

また、境界層は活発な乱流によって特徴づけられているので、その理解には基本的な乱流の勉強が必要である。乱流に関する本として、4と同じ気象学のプロムナードのシリーズの17は乱れの様子、乱流理論での表現、研究法など乱流の話だが、教科書風でなく読みもの的である。乱流をきちんと勉強するにはさまざまな文献があるだろうが、筆者はあまり詳しくないのでこれまでにあげたものの乱流の部分から孫引きをしていただきたい。

3. 乾燥混合層

3.1 安定度

混合層の観測・理論的研究について、いくつかのトピックに従って述べていく。暖かな地表面上では(ごく地表付近の数~数10mを除いて)よく混合され温位が一定の状態が観測される。温位が鉛直方向に一定ということは、ある空気塊を鉛直方向に移動しても浮力を感じないということであるが、だからと言って、空気の運動がないというわけではない。前述の()内に記した「ごく地表付近」が暖かいためにそこから活発に上昇流が上がってきているのである。このような状態を「安定」「不安定」のような言葉で何と表現するか?に答えているのが6である。「温位が一定というような局所的な温度減率ではこのような意味での安定度は決まらない」というのがそのポイントで、あたりまえと言えばあたりまえであるが、これまでの気象の

教科書には無かった発想である。この安定度の話については、アメリカ気象学会のプレティンに簡単な解説(18)もある。

3.2 相似則・乱れの様子

混合層の場合には、大気が非常に不安定で対流が活発なため、接地層に関する相似則で使われる摩擦速度は重要でなくなり、モニン・オブコフの長さも極限値に収束する。そこで、混合層の高さそのものが特徴的な高さとなり、浮力フラックスと混合層の高さによって決まる対流速度スケールが特徴的な速度スケールとなる(mixed layer scaling と呼ばれる)。最近の航空機観測の結果も、このスケールリングによって整理されている(19)。

冬季の寒気吹き出し時に境界層にできるロール状対流と関連した観測(20)は、非常にきれいな周期的変動を示している。このような変動に基づいて対流をコヒーレントな構造として考えるモデル化が行われている(21)。このような方法は、適当なしきい値のもとでサンプリングを行って対流のモデルを考える conditional sampling technique の方法(22)と似ている。また、乱流の構造を統計的に調べる方法としては、Joint Probability Distribution の方法も使われている(23)。

3.3 エントレインメント

混合層の頂部ではエントレインメントと呼ばれる上層の空気の取り込みが起これ、それによって混合層高度が高くなっていくと考えられる。混合層下部からの上昇流が頂部の安定層をドーム状に突き上げ、その境界面上にできる乱れによって上層のより軽い(暖かい)空気が下層の空気と混ぜられるようなイメージが描かれている。このためには、重い(冷たい)気塊が上へ、軽い(暖かい)気塊が下へ運ばれなくてはならず、乱流のエネルギーが消費されると考えられているが、まだ議論の余地もあるようである(24)。このようなエネルギー収支の観点はモデリングにとっても大変重要であるが、下層からの熱輸送以外にシアアの効果などもあり、そのためにも多くの観測が行われている(25, 26)。

4. 湿潤な混合層

4.1 水蒸気

ここまでは温位の分布とそのフラックス、それにとりまう乱流運動エネルギーの議論であったが、混合層中で水蒸気がどのように分布しているかというのは、

簡単なようでいてなかなか難しい問題である。一般に混合層中での水蒸気混合比の水平平均値の鉛直分布は温位ほど一様性がよくないことが多い。これは、温位は上下両方から暖かいものが入ってくるのに対し、水蒸気は下からは高混合比の気塊が、上からは低混合比の気塊が入ってくるので、鉛直傾度がつきやすいためであると考えられるが、どのようにスケールリングをすればいいかという基本的な問題すら解決していない。基本的な教科書としては(27)があげられるが、最近の観測(28)でもその複雑な構造が指摘されている。

4.2 雲

雲が生成する時は、水蒸気の凝結、水の蒸発など、問題が大変に複雑化する。領域全体がほぼ一様に雲でおおわれる層雲のような場合と、部分的に雲ができる積雲のような場合に分けて考えられる。層雲の場合は、雲の層も含めて良く混合されていると考えることが多いが、積雲の場合は、良く混合された雲底下層と雲内外で物理量に差がある雲層に分けて考え、それらの間の混合を問題とする。

混合の仕方などを解析するには、保存量を使うのが便利である。相当温位はよく知られているが、liquid water potential temperature (まだ決まった訳語がないと思うのでそのまま使う)も、便利である。Betts (29)が提案した飽和点(気塊が上昇したり下降したりしてちょうど飽和に達したときの温位と気圧(30))も保存量の一つで、層雲を含む混合層の熱力学量がどのようなバランスで決まっているかの解析などにはたいへん便利である(31)。また、積雲の場合にもどのような気塊が混合して雲内の気塊をつくっているかという混合線を使った解析に使われている。このような解析は、Paluchのグラフ(32)などを用いて行われ(33)、雲内外の気塊の混合がどこで起こるかを推測することができる。これらの結果は、雲力学の理解とモデル化に必要な情報で、また、それは凝結水の発達の仕方(粒径分布)にも関係する(34)。

雲の形成過程は、持ち上げ凝結高度(lifting condensation level)との関係で議論される(35)。層雲で重要なことは、雲頂部の放射過程が大きな加熱・冷却を起こすことである。昼の日射による加熱のための日変化(36)や、2層構造(37)、また赤外放射冷却による対流生成(38)などが指摘されている。

雲量がどのように決まっているかという問題は、たいへん興味深い問題であるが、まださかんに議論されている段階である。1980年に提案された(39, 40)雲頂

部でのエントレインメントに伴う不安定 (Cloud Top Entrainment Instability) は、有望な仮説であるが、観測で支持されているとは言えず(41)、そのギャップを埋めるための数多くの論文が提出されている(42, 43, 44)。この問題は、放射収支を通じて、気候に大きな影響を与える問題であり(45)、今後も、地球規模で考えるような議論(例えば、46)を含めて盛んになるだろう。

5. モデル

混合層を表すモデルは基本的に3つのタイプに分けられる。対流を陽に表すモデル (Large Eddy Simulation, 略して LES モデルと呼ぶ)、対流をサブグリッドスケールのパラメタリゼーションで表しレベルごとの物理量を予測するモデル(レベルモデルと呼ぶ)、混合層全体を1つの層と考えその高度や層全体での平均物理量を予測するモデル(混合層モデルとかバルクモデルとか呼ばれる)である。どの方法でも基本方程式は、「運動方程式、連続の式、状態方程式、熱力学第一法則、水の保存式」などから適当な積分を行ったり、サブグリッドの変動部分をパラメタライズしたりして作る。モデルのための基本的な式の導出や差分化の方法などは47に詳しい。

LES は、余計な物理法則・仮定は必要とせずもっとも簡単な物理法則のみに基づくものであり、大量の計算時間やメモリーを必要とするが、最近、盛んに行われ、その結果の解析による対流の性質の議論も盛んである(例えば、48)。

レベルモデルでは、対流によるフラックスをいかに表すかが大問題である。混合層中ではほとんど一様か僅かに安定の鉛直温位分布であるにも関わらず活発な対流が熱輸送を行っている。従って、一般的によく使われる渦拡散係数を使う方法では、このような熱輸送を表現することは難しい。そこで、サブグリッドスケールの温位変動の標準偏差など2次モーメントなども予測変数とするクロージャーモデルなどが考案されている(49)。これらの方法はどれもあるレベルでのフラックスをその場の局所的な勾配に関係づける点で局所的なクロージャーと呼ばれている。実際には混合層中層で温位が一定であっても下層から暖かい気塊が上がってくることからわかるようにフラックスは局所的に決まるものではない。このような混合層全体をトータルに考える非局所的なクロージャーという方法も考案されている(50)。例えば、混合層中のいろいろなレ

ベルからいろいろなレベルへの輸送を表す係数を考える方法(51, 52)や、様々なスケールでの渦拡散係数を考える方法(53)がこれにあたる。まだいくつかの試験的な結果がでてはいるだけだが、実際の対流の機能に近い表現であるので興味深い方法である。また、混合層での乱れを、上からのものを下へ運ぶ乱れと下からのものを上へ運ぶ乱れに分けて考える方法(54, 55)や、ラグランジュ的に拡散を調べることも行われている(56)。

混合層モデル(バルクモデル)は、熱力学の式などを混合層全体にわたって積分した形で使う。層の厚さも1つの変数なので、何らかのクロージャーを使わないと方程式系が閉じない。よく使われる方法は乱流運動エネルギー収支から混合層頂部での下向き浮力輸送量を評価する方法である。このとき、乱流運動エネルギー収支の分割の方法によって3つの方法があり(57)、数値モデルの結果を使った評価なども行われている(58)。最近は多少の鉛直傾度を許すようなモデル(59)や、プルームなど内部構造や循環を考えるモデルも数多く提案されている(60, 61)。また、いろいろなクロージャー仮定が提案されているが、これらの問題に関しては、62や63が参考になるだろう。

6. おわりに

混合層を中心に最近の教科書・論文から参考になりそうなものをあげた。ますます多くの論文が様々な雑誌に掲載されるようになって、主なものに目を通すだけでも大変な仕事になってきている。また、ここでは紹介しなかったが、安定成層大気汚染に関する議論や海陸境界付近での内部境界層(例えば、64)の話など、今後ますます研究が盛んになると思われる。外国の例と比較すればわかるように、観測の分野を中心に国内の研究はたいへん遅れている感じがするし、しかもその遅れがますます大きくなって行くように感じる。今後、多くの方がこのような分野に関心をもたれ、研究を進められることを望み、そのために本稿が少しでも役立てば幸いである。

参考文献

- 1) 竹内清秀, 1979: 統気象学入門講座, アドヴァンスト・コース, 大気境界層, 天気, 26, 781-789.
- 2) 竹内清秀・近藤純正著, 1981: 大気科学講座1, 地表に近い大気, 東京大学出版会, 226 pp.
- 3) 近藤純正, 1987: 身近な気象の科学, 東京大学出版

- 会, 189 pp.
- 4) 近藤純正, 1982: 気象学のプロムナード, 大気境界層の科学. 東京堂出版, 219 pp.
 - 5) 島貫陸, 1980: 気象の理, 環境科学へのアプローチ. 東洋館出版社, 166 pp.
 - 6) Stull, R. B., 1988: An Introduction to Boundary Layer Meteorology. Kluwer Academic Publishers Group, 667 pp.
 - 7) Arya, S. Pal, 1988: Introduction to Micrometeorology, International Geophysics Series, Volume 42. Academic Press Inc., 307 pp.
 - 8) Sorbjan, Z., 1989: Structure of the Atmospheric Boundary Layer. Prentice-Hall, NY, 317 pp.
 - 9) Garratt, J. R., 1992: The atmospheric Boundary Layer. Cambridge University Press, 316 pp.
 - 10) Nieuwstadt, F. T., and H. van Dop (Ed.), 1982: Atmospheric Turbulence and Air Pollution Modeling. D. Reidel Publ. Co., 358 pp.
 - 11) Taylor, P. A., and J. C. Wyngaard (Organized), 1990: Planetary Boundary Layer Model Evaluation Workshop, Reading, U. K., 14-15 August 1989, World Climate Programme Research-42, WMO/TD-No. 378.
 - 12) Lilly, D. K., and T. Gal-Chen (Ed.), 1983: Mesoscale Meteorology—Theories, Observations and Models. D. Reidel Publ. Co., 781 pp.
 - 13) ICCP, 1992: Proceedings of 11th International Conference on Clouds and Precipitation, 1162 pp.
 - 14) Brown, R. A., 1990: Fluid Mechanics of the Atmosphere. Academic Press, 489 pp.
 - 15) 浅井富雄, 1983: 気象学のプロムナード14, 大気対流の科学. 東京堂出版, 220 pp.
 - 16) Lenschow, D. H. (Ed.), 1986: Probing the Atmospheric Boundary Layer. Amer. Meteor. Soc., 269 pp.
 - 17) 島貫陸, 1982: 気象学のプロムナード6, 乱流と気象. 東京堂出版, 191 pp.
 - 18) Stull, R. B., 1991: Static stability—An update. Bull. Amer. Met. Soc., 72, 1521-1529.
 - 19) Nucciarone, J. J., and G. S. Young, 1991: Aircraft measurement of turbulence spectra in the marine stratocumulus-topped boundary layer. J. Atmos. Sci., 22, 2382-2392.
 - 20) Agee, E. M. and M. L. Hart, 1990: Boundary layer and mesoscale structure over lake Michigan during a wintertime cold air outbreak. J. Atmos. Sci., 47, 2293-2316.
 - 21) Williams, A. G. and J. M. Hacker, 1992: The composite shape and structure of coherent eddies in the convective boundary layer. Bound. Layer Meteor., 61, 213-245.
 - 22) Greenhut, G. K. and S. J. S. Khalsa, 1987: Convective elements in the marine atmospheric boundary layer. Part I: Conditional sampling statistics. J. Climate Appl. Meteor., 27, 813-822.
 - 23) Mahrt, L. and J. Paumier, 1984: Heat transport in the atmospheric boundary layer. J. Atmos. Sci., 41, 3061-3075.
 - 24) Telford, J. W., 1992: Clouds, noncloudy latent heat convection, entrainment, and horizontal average. J. Atmos. Sci., 49, 1848-1860.
 - 25) Atlas, D., B. Walter, S.-H. Chou and P. J. Sheu, 1986: The structure of the unstable marine boundary layer viewed by lidar and aircraft observations. J. Atmos. Sci., 43, 1301-1318.
 - 26) Duynkerke, P. G. and A. G. M. Driedonks, 1988: Turbulent structure of a shear-driven stratus-topped atmospheric boundary layer: A comparison of model results with observations. J. Atmos. Sci., 45, 2343-2351.
 - 27) Brutsaert, W., 1982: Evaporation into the Atmosphere, D. Reidel Publ. Co., 258 pp.
 - 28) Cooper, D. I., W. E. Eichinger, D. B. Holtkamp, R. R. Karl Jr., C. R. Quick, W. Dugas, and L. Hipps, 1992: Spatial variability of water vapor turbulent transfer within the boundary layer. Bound. Layer Meteor., 61, 389-405.
 - 29) Betts, A. K., 1982: Saturation point analysis of moist convective overturning. J. Atmos. Sci., 39, 1484-1505.
 - 30) 中村晃三, 1989: 新用語解説飽和点, 天気, 36, 340.
 - 31) Boers, R. and A. K. Betts, 1988: Saturation point structure of marine stratocumulus clouds. J. Atmos. Sci., 45, 1156-1175.
 - 32) 高谷美正, 1991: 新用語解説 Paluch Diagram. 天気, 38, 168-169.
 - 33) Betts, A. K., 1985: Mixing line analysis of clouds and cloudy boundary layer. J. Atmos. Sci., 42, 2751-2763.
 - 34) Hicks, E., C. Pontikis and A. Rigaud, 1990: Entrainment and mixing processes as related droplet growth in warm midlatitude and tropical clouds. J. Atmos. Sci., 47, 1589-1618.
 - 35) Wilde, N. P., R. B. Stull, and E. W. Eloranta, 1985: The LCL zone and cumulus onset. J. Climate Appl. Meteor., 24, 640-657.
 - 36) Betts, A. K., 1990: Diurnal variation of California coastal stratocumulus from two days of

- boundary layer sounding. *Tellus*, **42A**, 302-304
- 37) Hignett, P., 1991 : Observations of diurnal variation in a cloud-capped marine boundary layer. *J. Atmos. Sci.*, **48**, 1474-1482.
- 38) Nicholls, S., 1989 : The structure of radiatively driven convection in stratocumulus. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **115**, 487-511.
- 39) Randall, D. A., 1980 : Conditional instability of the first kind upside-down. *J. Atmos. Sci.*, **37**, 125-130.
- 40) Deardorff, J. W., 1980 : Cloud top entrainment instability. *J. Atmos. Sci.*, **37**, 131-147.
- 41) Kuo, H.-C. and W. H. Schubert, 1988 : Stability of cloud-topped boundary layers. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **114**, 887-916.
- 42) Siems, S. T. and C. S. Bretherton, 1992 : A numerical investigation of cloud-top entrainment instability and related experiments. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **118**, 787-818.
- 43) Duynkerke, P. G., 1992 : The stability of cloud top with regard to entrainment : Amendment of the theory of cloud-top entrainment instability. *J. Atmos. Sci.*, **50**, 495-502.
- 44) Rand, H. A. and C. S. Bretherton, 1993 : Relevance of the mesoscale entrainment instability to the marine cloud-topped atmospheric boundary layer. *J. Atmos. Sci.*, **50**, 1152-1158.
- 45) Fouquart, Y., J. C. Buriez, M. Herman and R. S. Kandel, 1990 : The influence of clouds on radiation : A climate-modeling perspective. *Rev. Geophys.*, **28**, 145-166.
- 46) Betts, A. K. and W. Ridgway, 1989 : Climatic equilibrium of the atmospheric convective boundary layer over a tropical ocean. *J. Atmos. Sci.*, **46**, 2621-2641.
- 47) Pielke, R. A., 1984 : *Mesoscale Meteorological Modeling*. Academic Press, 612 pp.
- 48) Moeng, C.-H. and U. Schumann, 1991 : Composite structure of plumes in stratus-topped boundary layers. *J. Atmos. Sci.*, **48**, 2280-2291.
- 49) Mellor, G. L. and T. Yamada, 1982 : Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **20**, 851-875.
- 50) 中村晃三, 1989 : 新用語解説, 非局所的クロージャー, *天気*, **36**, 688.
- 51) Ebert, E. E., U. Schumann and R. B. Stull, 1989 : Nonlocal turbulent mixing in the convective boundary layer evaluated from large-eddy simulation. *J. Atmos. Sci.*, **46**, 2178-2207.
- 52) Zhang, Q. and R. Stull, 1992 : Alternative non-local descriptions of boundary-layer evolution. *J. Atmos. Sci.*, **49**, 2267-2281.
- 53) Berkowicz, R. and L. P. Prahm, 1979 : Generalization of K theory for turbulent diffusion. Part I : Spectral turbulent diffusivity concept. *J. Appl. Meteor.*, **18**, 266-272.
- 54) Wyngaard, J. C., 1987 : A physical mechanism for the asymmetry in top-down and bottom-up diffusion. *J. Atmos. Sci.*, **44**, 1083-1087.
- 55) Weil, J. C., 1990 : A diagnosis of the asymmetry in top-down and bottom-up diffusion using a Lagrangian stochastic model. *J. Atmos. Sci.*, **47**, 501-515.
- 56) Sawford, B. L. and F. M. Guest, 1987 : Lagrangian stochastic analysis of flux-gradient relationships in the convective boundary layer. *J. Atmos. Sci.*, **44**, 1152-1165.
- 57) Randall, D. A., 1984 : Buoyant production and consumption of turbulent kinetic energy in cloud-topped mixed layers. *J. Atmos. Sci.*, **41**, 402-413.
- 58) Moeng, C.-H., 1987 : Large-eddy simulation of a stratus-topped boundary layer. Part II : Implications for mixed-layer modeling. *J. Atmos. Sci.*, **44**, 1605-1614.
- 59) Wang, S. and B. A. Albrecht, 1990 : A mean-gradient model of the dry convective boundary layer. *J. Atmos. Sci.*, **47**, 126-138.
- 60) Wang, S. and B. A. Albrecht, 1986 : A stratocumulus model with an internal circulation. *J. Atmos. Sci.*, **43**, 2374-2391.
- 61) Randall, D. A., Q. Shao and C.-H. Moeng, 1992 : A second-order bulk boundary-layer model. *J. Atmos. Sci.*, **49**, 1903-1923.
- 62) Driedonks, A. G. M. and H. Tennekes, 1984 : Entrainment effects in the well-mixed atmospheric boundary layer. *Bound. Layer Meteor.*, **30**, 75-105.
- 63) Driedonks, A. G. M. and P. G. Duynkerke, 1989 : Current problems in the stratocumulus-topped atmospheric boundary layer. *Bound. Layer Meteor.*, **46**, 275-303.
- 64) Garratt, J. R., 1990 : The internal boundary layer - A review. *Bound. Layer Meteor.*, **50**, 171-203.