

3. 大気境界層の構造

横 山 長 之*

1. はじめに

接地境界層から始められた大気境界層の構造の解明はここ10数年境界層全体に発展し、測定、解析方法の進歩もあってその構造のフレームはほぼ明らかになったと思われる。境界層構造のモデリングも接地境界層についての Monin-Obukhov (1953) の相似理論を出発点として Yamamoto (1959), Panofsky *et al.* (1960) 等多くの研究による接地境界層モデリングを経て、境界層全体の構造のモデリング (ex. Yamada・Meller, 1975; Gambo, 1978) が行われて来た。この結果、大気境界層の構造は解明し尽くされ、重要な事項は全部分かってしまったようにも誤解されているのではないだろうか?。境界層の構造はそれに関連する事項によって当然異なる。メソスケールやシノプティックスケールでの運動のシミュレーションでは大気境界層は地表面と自由大気の間での熱や運動量の通路として重要で、そのフラックスが正確に記述できれば構造モデルとしてはほぼ満足できると考えられる。一方、大気汚染物質の拡散を取り扱う立場から見れば、拡散に関連した平均風と乱流の層内での空間分布と時間的変化が正確に表現されていなければ構造モデルとしては不十分という事になる。このような立場から見ると大気境界層の乱流構造など、特に対流層の細部の状態などに不明確な点が多く、この解明を今後行うことが必要である。今後、明らかにすべき境界層構造について考えてみたい。

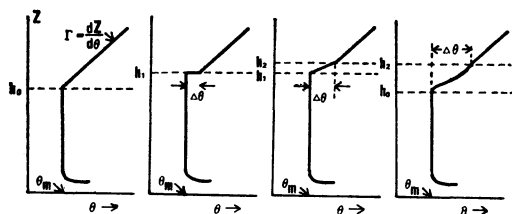
2. 混合層

晴れた日中、平坦地上に形成される混合層の構造に関する観測は多数行われ (ex. Gamo *et al.*, 1979; Yamamoto *et al.*, 1977)、温度と乱流変動量の鉛直分布ならびにその時間変化が明らかにされている。地表から混合層中へ運ばれる熱はほぼ全層にわたって均一に分布

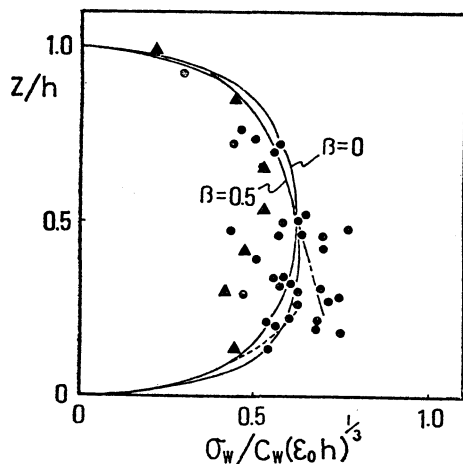
されるため、温位あるいは仮想温位は層の最下部と最上部の一部を除いて高度によらず一定となる。混合層の上端の部分では熱対流セルが上部の安定層へ貫入して上層から混合層中へ熱を取り込んでいる。発達しつつある混合層のモデリングでは温位分布の表し方が重要であるが、この上端の部分 (entrainment region) の温位分布が異なるいくつかのモデルがある。代表例を第1図に示した。温位の鉛直分布形が決まれば混合層厚さは熱量保存則を用いて求めることができる。第1図に示した各モデルにおける温位分布形は実測された分布形を参考にし、経験的に決められたものであり、純理論的に導かれたものではない。もう少しいえば、混合層上端部に形成される entrainment region の理論的なモデリングが必要ではないかと思われる。この混合層上端部分の厚さが全層厚に比例し、その割合が一定になるとする仮定は上部安定層の状態などによっては成り立たないことも考えられる。安定層の成層状態とか局地的な状況の異なる場合にも適用できる、より普遍的な混合層モデルが望ましい。

混合層中における乱流変動量の分布はクロージャーモデルや相似理論を使って表すことができる。第2図に示したのは風速の鉛直成分の標準偏差 σ_w の分布である。また、乱流エネルギーの熱散逸率 ε の分布を第3図に示した。 σ_w , ε の鉛直分布は図に示すように相似理論などから導かれる鉛直分布式によく適合する。これは混合層の構造解明の一步として意味があると思われるが、実際的な問題として混合層中の鉛直拡散の状態が σ_w , ε に依存している点がより重要であろう。煙源から放出された煙などの拡散幅は源の近傍では σ_w に正比例する。また、鉛直拡散係数 K_z は $\sigma_w^2 \varepsilon^{-1}$ (Hanna, 1968) に比例する。この拡散係数は煙源の近くでの拡散に適用されると考えられる。混合層中での、より長時間にわたる拡散では無浮力の煙でも層中を上昇することが Deardorff・Willis (1975) によって報告されている。第4図に混

* Osayuki Yokoyama, 通産省公害資源研究所。



第1図 混合層中の温度の鉛直分布モデル (1: entrainment region を無視した0次近似モデル, 2: 0次ジャンプモデル, 3: 1次ジャンプモデル, 4: 実測に合わせたモデル (Deardorff, 1979 を参考にした)).



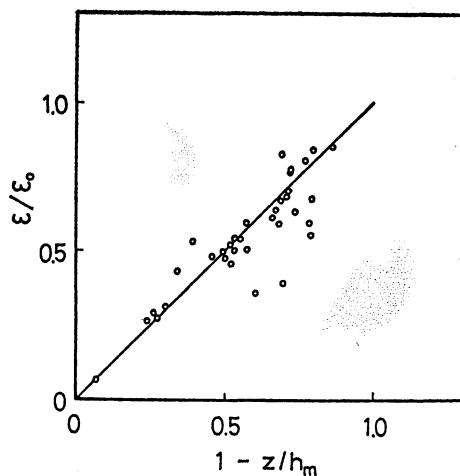
第2図 混合層中における風の鉛直成分の標準偏差 σ_w の鉛直プロファイル.

(h : 混合層厚さ,

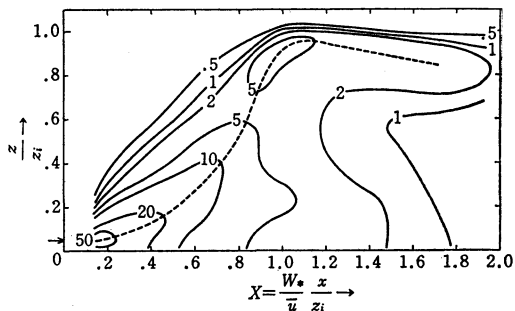
$$z: \text{高度}, \epsilon_0 = \left(\frac{g}{T_0} - \frac{q_0}{C_p \rho} \right),$$

g : 重力加速度, T_0 : 平均温度, q_0 : 地表面での顕熱フラックス, C_p : 空気の定圧比熱, ρ : 密度, $C_w=0.75$, —: Yokoyama *et al.*, (1979) による理論.
 β は乱流スケールに関するパラメータ,
 ●: 飛行機による観測値, ▲: 風洞実験による測定値)

合層中に放出されたトレーサの鉛直濃度分布の水槽実験例を示す. このような混合層中でのトレーサの上昇および拡散は対流セルの構造に関係していると考えられる. 混合層中におけるトレーサなどの分散は通常の拡散と同時に, 熱対流による鉛直輸送と混合を考慮することが必要であろう. しかし, 混合層中の対流運動の微細構造は未だ十分明らかにされていない. 第5図に示したのは Yamamoto・Gamo・Yokoyama (1982) が飛行機

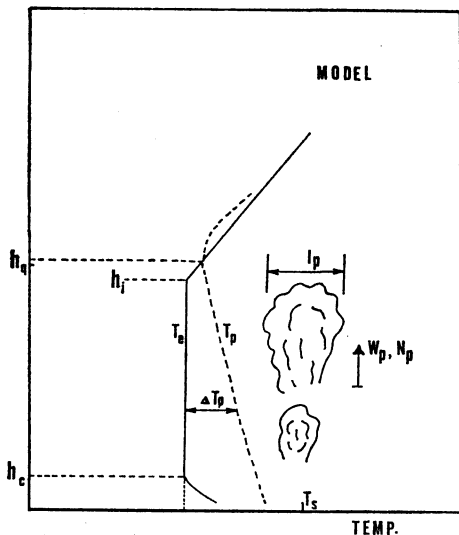


第3図 混合層中における運動エネルギーの熱散逸率 ϵ の高度変化 (ϵ_0 : 地上における ϵ の値, h_m : 混合層厚さ, z : 高度, after Yokoyama *et al.*, 1977).



第4図 混合層中での無浮力の煙流の濃度分布 (実線) と中心軸 (点線) の変化 (X は無次元化した風下距離, z は高度, z_i は混合層厚さ) after Deardorff and Willis (1975).

による温度変動の空間分布の測定結果から組み立てた対流セルのモデルで, 対流セルの水平スケール l_p と 1 km^2 当たり存在する対流セルの個数 N_p は第6図に, また対流セルの上昇速度 W_p は第7図に示すように高度分布する. 平均的には 1 km^2 当たり2~3個の対流セルが存在し, その水平の直径は下層で250~300m, 上層で320~370mあり, 上昇速度は0.5~0.6m/s程度であった. もし上昇気流の補償流が全部下降気流で行われるとすれば対流セル外の下降流の平均流速は約0.1m/sとなる. このような上昇, 下降流に偏りのある混合層中へ第4図に示されるような固定点から連続的にトレーサを放出

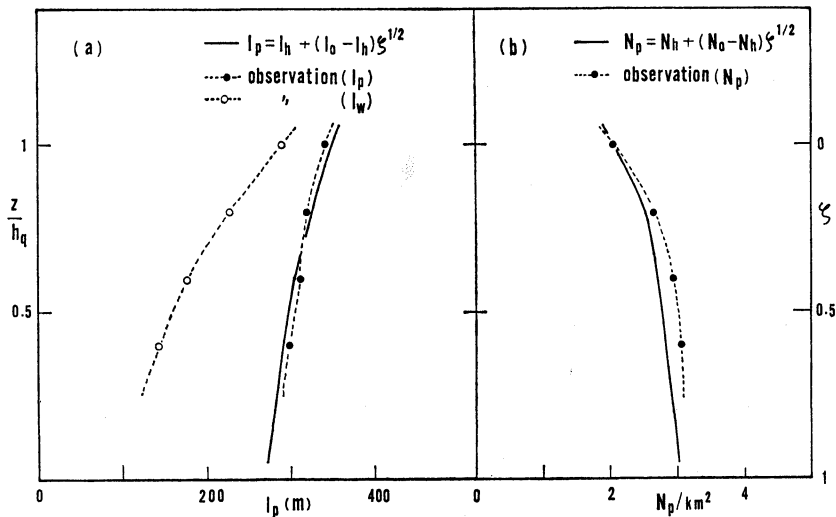


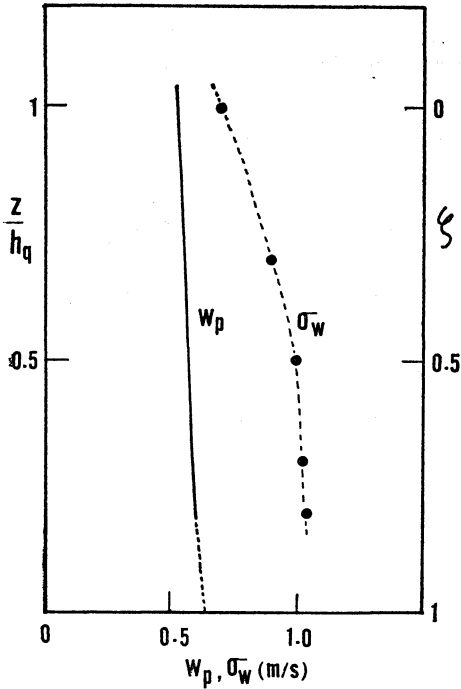
第5図 対流セルのモデル.

(l_p : 水平の大きさ, W_p : 上昇速度, N_p : 面積当たりの個数, T_s : 地上気温, T_p : セル内の温度, T_a : セル外の温度, h_i : 温度分布から決めた混合層厚さ, h_q : ヒートフラックスから決めた混合層厚さ, h_c : コンスタントフラックス層の厚さ. after Yamamoto *et al.*, 1982)

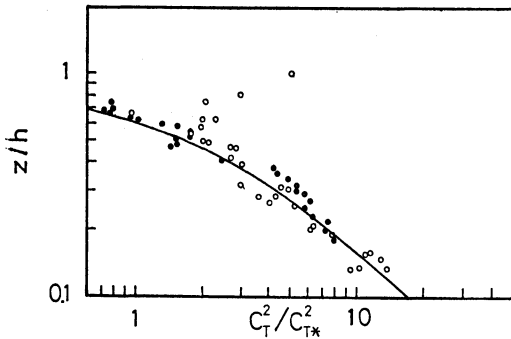
した場合、鉛直断面での濃度の最高となる高度が経過時間、あるいは風下距離と共に上昇する。また実際に形成される混合層では海風などの水平流による上昇気流の補償があり、この場合にはさらにトレーサーの上昇が促進されるであろう。混合層中での拡散を定量的に取り扱うには、従って対流の微細構造を記述できるモデルが必要であり、それは今後に残された問題である。

混合層中での乱流変動についてもう一つ付け加えておきたいのは温度変動の標準偏差 σ_T とそれに関する refractive index parameter C_T である。 σ_w の場合と同様に σ_T もクロージャーモデルや相似理論を使って混合層中での鉛直分布を記述することができる。興味深いのは C_T が σ_T , σ_w および ε によって表され、また C_T^2 はソーダーのエコー強度に比例する点である (ex. Yokoyama *et al.*, 1982). 第8図に示したのは混合層で測定したソーダーエコーの鉛直分布と相似理論から導いた分布曲線の比較例である。分布式は上述の文献を参照されたいが、このエコー強度の分布と理論曲線の適合から層中の顕熱フラックスの分布を推定することができる。リモートセンサーとしてのソーダーを用いることによって高度 1500 m 程度までの混合層を常時観測できることになり、対流の微細構造も含めて有用なデータが得られることを期待したい。

第6図 対流セルモデルにおける水平スケール l_p , 個数密度 N_p の高度分布 ($\zeta = 1 - z/h_q$).



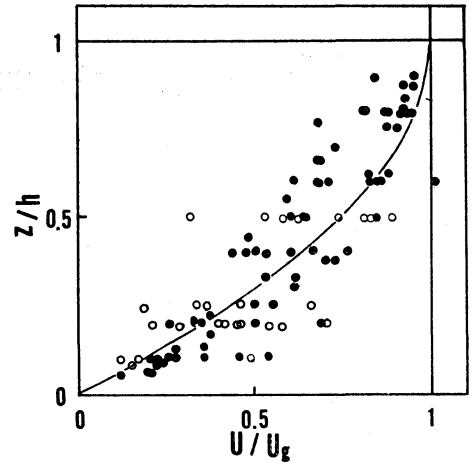
第7図 対流セルモデルの上昇速度 W_p と鉛直乱流の大きさ σ_w の高度分布.



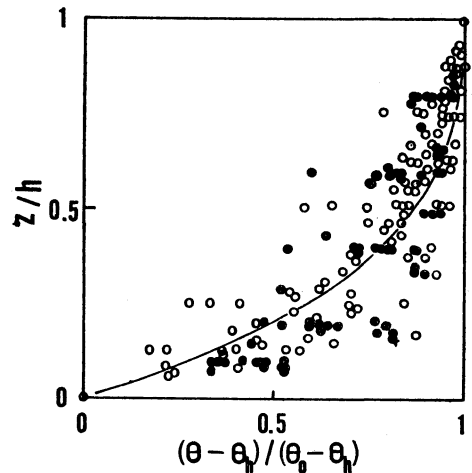
第8図 ソーダーで測定した混合層中の音波エコー強度と理論値の比較.
(C_T^2 : refractive index parameter, C_{T*}^2 : 基準値, after Yokoyama *et al.*, 1982)

混合層の構造で残された問題に平均風の分布がある。これは局地風系と関係付けて解明すべき問題と思われる。また、細かい問題かも知れないが、午後から夕刻にかけての減衰状態にある混合層の構造は実測による解明が十分行われているとはいえない。

1984年2月



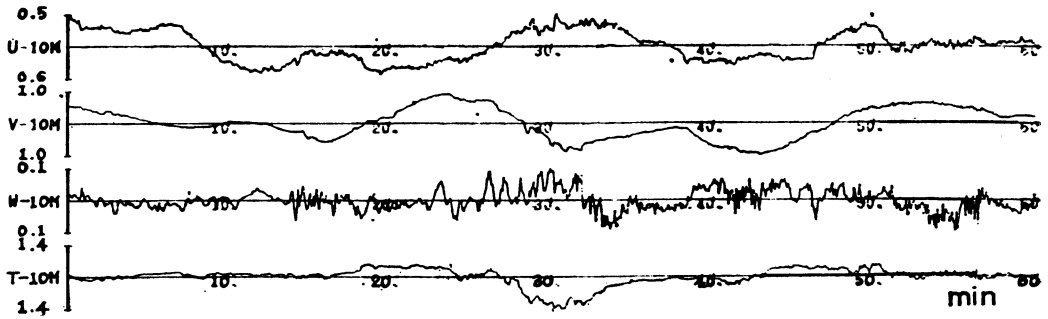
第9図 接地安定層中の風速の鉛直分布.
(●: GRH 79, 2, 20-21, ○: TKB 81, 1, 20-21, h : 安定層厚さ, Z : 高度, U : 風速, U_g : $Z=h$ における風速, 横山ら, 1983)



第10図 接地安定層中の温位の鉛直分布.
(●: GRH 79, 2, 20-21, ○: Yamada, 1979による測定, θ : 温位, 添字は高度を示す, 横山ら, 1983)

3. 安定層

晴れた弱風の夜間、地表面の放射冷却によって形成される接地安定層は大気汚染物質の拡散に関連して重要である。しかし安定層の乱流構造については未だ十分明らかにされていない。特に風が非常に弱い場合や強い安定



第11図 安定層中に現れた波動的変動の記録例。

(東京都練馬区グランドハイッ跡地, 1979年2月21日 00-01 JST, 高度 10 m, U , V , W : 各々平均風と平行, 横風方向, 鉛直方向の風の変動成分, T : 温度変動を示す。横山ら, 1981)

状態では乱流変動も小さくなり, 測定が困難になるのに加えて内部重力波的な波動変動がしばしば発生し, その解明は今後に残されている。

安定層の構造解明のための測定も, 特に地上 20~30m 程度のコンスタントフラックス層 (フラックスがコンスタントと見做せるかどうかは分からないが) については多数の実測例がある (ex. Yamamoto, *et al.*, 1979)。また, 接地層の延長として安定層全体についての風速, 気温, 乱流変動量のモデリングも行われている (ex. Brost・Wyngaard; Yokoyama *et al.*, 1979)。

安定層中における平均風速と温位の鉛直分布は第 9, 10図に示すようになり, 相似理論から導かれる分布にほぼ整合するように見える。風速, 気温の鉛直分布が与えられ, 地表面での下方へ向かう顕熱フラックスおよび摩擦速度が決まれば, 安定層厚さの時間変化は混合層の場合と類似的に熱収支式から求めることができる。しかし, 混合層の場合と異なり安定層の厚さは風速によっても変化するため, 理論式と実測厚さの一致はあまり良いとはいえない。

安定層中の乱流変動量として σ_w , σ_T , ϵ , K_z の鉛直分布が測定され, 相似理論から導かれた半経験式との適合性が示されている。いずれも一応の一致は見られるものの, 混合層の場合のように良い一致ではない (ex. Yokoyama *et al.*, 1979)。

安定層のもう一つ残された問題は波動運動の発生である。強い安定層形成時に現れる波動の記録例を第11図に示す。風の水平成分に15~20分周期の波動が顕著に見られる。この波動は安定層の密度分布によって発生する浅水波的な波動 (外部重力波) であると仮定すると波長が

一定 (300~600m 程度, 場所風速によって変化する) の波であることが実測から推定されたとする報告 (ex. 横山他, 1983) もあるが, 未だ波の特性は確定的ではない。このような波動が発生している場合については乱流変動量を求めるのに通常の方法は使えない。平均化時間を波動周期より短く取るか, 波動を消去するような移動平均操作を行うことが必要である。3~5分の平均化時間について求めた乱流変動量の変化の様相は相似理論によって記述される。安定層に現れる波動変動の発生条件に局所的 Richardson 数が関係することが理論的に示されるが, 実測による検証は未だ不十分である。

安定層の構造についてはこのように未解明の事項が多く, 測定, モデリングとも今後の進展に期待したい。

4. おわりに

大気境界層の構造についてこれ迄に明らかになった事, 未解明の問題について思いつくままに述べた。平坦地上に形成される混合層の構造のフレームはおおよそ解明されているが, 対流の微細構造や局地風循環との関連など基本的な構造で未解明な部分も残されている。また, 安定層で, 特に安定度が強い場合の乱流および波動の特性は未だほとんど解明されていないのではないかと思います。乱流と波動についての観測データを集積すると共に乱流-波動の相関を考慮した構造のモデリングを行うことが必要であろう。

また内部境界層, 複雑地形上の境界層の構造についても今後の研究が期待される。

文 献

- Brost, R.A., and J.C. Wyngaard, 1978: A model study of the stably stratified planetary boundary layer, *J. Atmos. Sci.*, **35**, 1427-1440.
- Deardorff, J.W., 1979: Prediction of convective mixed-layer entrainment for realistic capping inversion structure, *J. Atmos. Sci.*, **34**, 424-436.
- , and G.E. Willis, 1975: A parameterization of diffusion into the mixing layer, *J. Appl. Met.*, **14**, 1451-1458.
- Gambo, K., 1978: Notes on the turbulence closure model for atmospheric boundary layer, *J. Met. Soc. Japan*, **56**, 466-480.
- Gamo, M., and O. Yokoyama, 1979: Growth of the depth and diurnal variation of vertical profiles of temperature and turbulence characteristics in the mixing layer, *J. Met. Soc. Japan*, **57**, 733-740.
- Hanna, S.R., 1968: A method of estimating vertical eddy transport in the planetary boundary layer using characteristics of the vertical velocity spectrum, *J. Atmos. Sci.*, **25**, 1026.
- Monin, A.S., and A.M. Obukhov, 1954: Basic laws of the turbulent mixing in the atmosphere near the ground, *Tr. Akad. Nauk. SSSR Geofiz. Inst.*, **24**(151), 163-187.
- Panofsky, H.A., A.K. Blackadar and G.E. McVehil, 1960: The diabatic wind profile. *Q. J. Roy. Met. Soc.*, **86**, 390-395.
- Yamamoto, G., 1959: Theory of turbulent transfer in non-neutral conditions, *J. Met. Soc. Japan*, **46**, 442-445.
- Yamada, T. and G. Meller, 1975: A simulation of the Wangara atmospheric boundary layer data, *J. Atmos. Sci.*, **32**, 2309-2329.
- Yamamoto, S., M. Gamo and O. Yokoyama, 1977: Airborne measurements of turbulent heat flux, *J. Met. Soc. Japan*, **55**, 533-545.
- , O. Yokoyama and M. Gamo, 1979: Observational study on the turbulent structure of the atmospheric boundary layer under stable conditions, *J. Met. Soc. Japan*, **57**, 423-431.
- , M. Gamo and O. Yokoyama, 1982: Observational study on the fine structure of the convective atmospheric boundary layer, *J. Met. Soc. Japan*, **60**, 882-888.
- Yokoyama, O., M. Gamo and S. Yokoyama, 1979: The vertical profile of the turbulence quantities in the atmospheric boundary layers, *J. Met. Soc. Japan*, **57**, 264-272.
- , ———, ———, and M. Hayashi, 1982: Similarity aspects of the vertical velocity and temperature spectra and the refractive index parameter in the atmospheric boundary layer, *J. Met. Soc.*, **60**, 455-560.
- 横山長之, 水野建樹, 山本 晋, 1981: 晴夜安定層中の乱流と波動の測定, *公害*, **16**, 67-75.
- , ———, ———, 林 正康, 1983: 晴夜安定層の乱流構造, *公害*, **18**, 243-250.