

# 大気境界層の構造に関する研究\*

—学会賞受賞記念講演—

横山 長之\*\*

## 1. はじめに

私たちの研究課で大気境界層の解明に取り掛かったのは、大気汚染質の拡散予測を行なう必要からであった。現在ではこのような拡散予測は、環境アセスメントの一環として各地で行なわれ定着化しつつある。しかし、私たちが大気汚染予測手法の開発研究を始めた昭和40年頃には未だ不明確な事項が多く、手さぐりで汚染予測を行っていたのが実状であった。このような未解明の事項には大気汚染に固有の問題も多くあったが、気象の立場からは、拡散場となる地上数百mまでの低層大気構造が、この研究を始めた頃にはあまりよく分かっていない事が問題であった。特に大気拡散に直接関係する大気乱流の性質は、最下層部の数十mのコンスタント・フラックス層 (CFL) においては調べられていたが、それより上層の約1kmまで及ぶ大気境界層全体 (ABL) についてはよく分かっていなかった。

このような状態を改善するため、ABLにおける乱流変動の測定法を開発することから研究に取り掛かった。これは新しい測器を開発するというより、主として既存の測器を、高い塔、係留気球、飛行機に取り付けて測定を実行すること、測定したデータを解析して必要な乱流統計量を得ることができるようにするのが目的であった。この測定法を用いて ABL 中における乱流変動量の測定を繰り返して行ない、実測データを収集し、乱流変動量の鉛直プロファイル、時間的变化、平均量との関係などについて試行錯誤的に多くの解析を行なった。そしてこれらの解析結果に基づき、ここ2年ぐらい ABL の構造についての1次近似モデルを作り、実測データとの比較を試みて来た。この1次近似モデルは決して精密なものではないが、実測した乱流変動量の鉛直プロファイルと時間的变化を一応定量的に説明でき、また、乱流変動量

相互の関係に見通しをつけることができたと考えている。また、このようなモデリングを行なうことによって、今後必要とされる測定データにはどのようなものがあるかが明らかにもなると思われる。

この研究は乱流変動量の測定に重点が置かれているために、多くの方々の援助と協力によって進められた。特に当研究課の蒲生 稔、山本 晋両氏とは一環して一諸に仕事を行なって来た。今回望外にもいただいた名誉ある賞は、両氏と分けあうべきものと思っている。研究の概要を以下に紹介する。

## 2. 大気境界層構造に関する測定

### 2.1 塔を用いた測定

最も単純な測定プラットフォームは、いうまでもなく塔である。この研究では、埼玉県川口市所在のNHK東京第1放送の送信塔(313m)を利用した。この放送塔の周辺はいくらか住宅が散在するが、ほぼ平坦な場所である。測定は1968年から開始した。当時、光田(1966)が中心となって開発され実用化段階に入りつつあった超音波風速温度計(SAT)を、高度45, 180, 313mに取り付け3次元速度と温度の連続測定から開始した。最初は測定プローブを電氣的に切り換えて1時間毎に各高度の測定を行なったが、間もなく3高度同時連続記録に改めた。しかし、当時は多チャンネルの長時間データレコーダが無く、各高度毎に別々のレコーダに記録していた。この測定開始からの3年間は国立防災センター、気象研究所と協同で行なった特別調査費研究“低層大気拡散の構造に関する研究”によって測定機器の整備を行なった。この協同研究では、坂上治郎、井上栄一、竹内清秀、小沢行雄、森口実、伊藤昭三の諸氏らが中心となり、拡散実験、風と温度の鉛直プロファイルの測定も同時に行なわれた。1972年以降はこの測定は私たちの研究課の特別研究費で継続している。現在ではSATは上記高度のほか20, 90mに増設し、レコーダ、ADコンバーター等

\* An exploration of the atmospheric boundary layer.

\*\* Osayuki Yokoyama, 公害資源研究所公害一部一課。

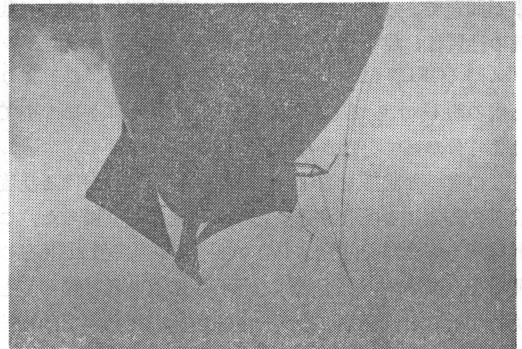
第1表 川口 NHK 放送塔における測定の変遷

年次	実験の主目的	測器 (測定高度)	レコーダーおよび A-D 変換器	付記
1968	第1期 コンスタントフラックス層との相違点についての説明	<ul style="list-style-type: none"> <li>3次元超音波風速温度計 3 高度 (313, 180, 45m)</li> <li>サーミスタ温度計 5 高度 (313, 225, 180, 45, 20m)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>4ch データレコーダー 3台</li> <li>A-D 変換器 (4ch. 紙テープ: TEAC DP 100)</li> </ul>	川口拡散実験
1970				
1972	第2期 混合層の観測, 飛行機観測との比較	<ul style="list-style-type: none"> <li>3次元超音波風速温度計 4 高度 (313, 180, 45, 20m)</li> <li>サーミスタ温度計 8 高度 (313, 225, 180, 135, 90, 45, 20, 10m)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>4ch データレコーダー 4台</li> <li>A-D 変換器 (多チャンネル磁気テープ: TEAC DP 5000)</li> </ul>	川口タワー上空飛行機観測
1976				
1978	第3期 安定大気境界層の形成, 発達過程とその厚さの時間変化	<ul style="list-style-type: none"> <li>3次元超音波風速温度計 5 高度 (313, 180, 90, 45, 20m)</li> <li>サーミスタ温度計 8 高度 (313, 225, 180, 135, 90, 45, 20, 10m)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>14ch データレコーダー 1台 (長時間)</li> <li>A-D 変換器 (多チャンネル磁気テープ: TEAC DP 5000)</li> </ul>	新橋タワー乱流観測

も高性能のものに取り換え解析を続けている。この川口放送塔での測定目的、測器等を年代ごとにまとめたのが第1表である。いずれも測定値はアナログ磁気テープに記録し、研究室でデジタル化し電算機で処理する。これは、後述する係留気球と飛行機をプラットフォームとする測定データの処理も同じ方法を用いている。初期の解析では、測定値は2.5秒間隔で数値化し、1,000個を1単位として解析した。標準的に求めた量は、平均風向風速、風速変動の rms 値 ( $\sigma_u, \sigma_v, \sigma_w$ ), 運動量フラックス ( $u_* \equiv (-\overline{u'w'})^{1/2}$ ), 顕熱フラックス ( $q \equiv C_p \rho w' T'$ ), 鉛直速度のスペクトルである。川口放送塔における測定のさらに詳細は、Yokoyama (1971), 横山ら (1979) を参照されたい (記号は慣用のものである)。

## 2.2 係留気球による測定

塔による測定は、高度がせいぜい300mまでに限られ、また場所も限定される。係留気球は高度約0.5~1kmまでの風、気温などの測定のプラットフォームとして使える。また係留気球は、平均風が大きく変化しなければほぼ一定高度に留まるので、測定はオイラー的測定と見做すことができる。係留気球は、第1図に一部見られるように水滴形尾翼付きのもので容積は35~60m<sup>3</sup>程度である。測定器は、第1図に見られるように気球下部に取り付け、必要な高度に停止して測定を行なう。このため、



第1図 係留気球に取り付けた乱流ゾンデ。

係留気球による測定では同時に多高度で必要とする測定時間に亘る測定ができない。数分程度の時間でもよいと思われる平均風向風速や温度については、高度を次々に変えて測定し、内挿することで同時刻の鉛直プロフィールを得ることが可能であるが、数十分の測定時間の必要な乱流変動量の同時刻の鉛直プロフィールは得られない。乱流変動量については、一高度毎に測定した値を用いて平均場との関係や相互関係を調べることとなる。係留気球に取り付ける測定器は特殊なもので、常用している係留気球ゾンデはいずれも当研究課で開発したもので

ある。このゾンデは、風向風速、温度、湿度の平均値を測定するための平均値ゾンデと風向変動を小型パイプで測定する乱流ゾンデがある。これらの係留ゾンデの構造、測定例、塔における測定との比較などについては既に多くの報告がある。たとえば、Yokoyama (1969), Yokoyama *et al.* (1973), 蒲生ら (1973), 林ら (1974), 横山ら (1979) に詳細が記されているのでそれらを参照されたい。

係留気球を使った境界層構造に関する測定は、1967年以來関東平野南部（川口、大宮、東京北部）をはじめ、四日市、鹿島等の工業地帯などで数多く行なわれ、その測定結果は、各地域の気象特性の解析に利用されると共に平坦地上や海陸境界面上に形成される境界層構造の解明に用いられている。

係留気球観測を開始した時点では、それ以前から同様な観測をして来た高層気象台の中島正一氏にノウハウを教示していただいた。その後、測定器や解析方法は長足の進歩をしたが、blimp 型の気球や昇降機は当時のものが基本となっている。

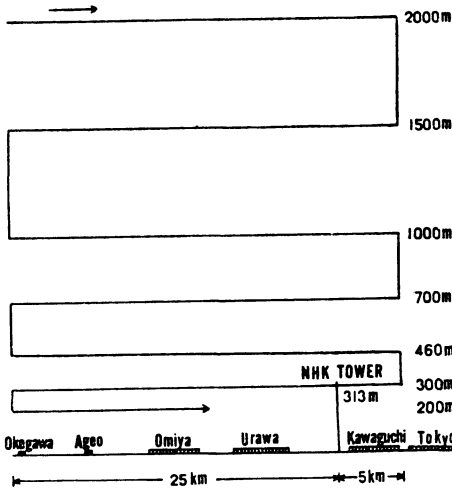
### 2.3 飛行機による測定

塔（固定プラットフォーム）、係留気球（準固定プラットフォーム）と異なり、飛行機は高速移動プラットフォームであるため、乱流などの空間分布が短時間に測定

できること、機動性が優れているため観測場所を任意に選ぶことができるという利点をもっている。また、高塔、係留気球ではその存在する所での地表面の状態、その場所固有の気流などの影響を強く受ける。それに対し、飛行機による観測は対象場所の空間平均を短時間に取ることができ、水平に一樣な境界層の観測には特に適したプラットフォームと思われる。このような大きな利点の反面、飛行機は移動するプラットフォームに観測装置を搭載しているため、得られる測定値は飛行機に対して相対的なものとなる。このため、飛行機の動きも同時に測定して、観測値に補正を施し、地球座標系に移し変えなければならない煩雑さがある。この補正項は、平行移動の3軸と回転の3軸があり極めて高い精度の加速度計、角加速度計および慣性プラットフォームを必要とするため、現在でも未だ完全には補正が困難である。比較的振動数の高い変動から求められる乱流統計量は信頼性のある値が得られるが、そうでない量は種々の吟味が必要である。たとえば、運動エネルギーの熱消散率  $\epsilon$  は補正なしでも良い値が得られ、速度変動の rms 値  $\sigma_u, \sigma_v, \sigma_w$  は簡単な補正で充分測定ができる。一方、顕熱の鉛直フラックス  $q$  の値を得るには相当に煩雑な補正計算が必要となり、運動量の鉛直フラックスの算出は現在未だ検討している段階である。もっとも、運動量フラックス



第2図 セスナ機の測器配置状況（上段：左側より、SAT 温度、鉛直風速、サーミスタ乾湿球、熱線風速計と冷線温度計、下段：インナーシャルプラットフォーム、データレコーダー）。



第3図 飛行機観測における飛行パターンの例。

は上空ではかなり小さな値になることも測定の困難さを増している原因と考えられるが。

当研究課では1971年以来小型飛行機を用いて、平坦地、海岸地帯、都市、海面上の乱流の測定を行なっている。現在まで使用した機種は、セスナ 172, 205, 207, 402 などであるが、最も長期に亘って用いたのは207である。第2図にこのセスナ207型機のキャビン内に設置した測定機器の状況を示した。主要測器は、乱流変動量の測定器として、超音波風速計、熱線風速計、水平ベーン、温湿度測定のためのサーミスタ乾湿球温度計、冷線温度計、地表面温度測定のための赤外放射温度計である。また、飛行機の動揺を補正するため慣性プラットフォーム上に各々3組のレートジャイロ、加速度計を置き、ピッチ、ロール、ヨー角加速度と3軸の加速度を測定している。

これらの測定値は直接あるいは直流通幅器を通してから多チャンネル磁気テープレコーダーで記録し、研究室で処理して必要な乱流統計量を得る。

この飛行機による境界層の観測は、1971年以来、関東平野南部、東京都、鹿島、水島などの臨海工業地帯で繰り返し行なっている。また、AMTEX 75では奄美大島から北～北西方向の海上での観測も行なった。測定は、飛行方向を風向と平行に取り、等高度、等対気速度(約54m/sec)で行なう。第3図に示したのは川口放送塔を中心に行なった飛行コースの例で、6～7高度の測定に約1時間～1時間30分かかる。

測定機器、測定法、測定結果についてのさらに詳細

は、蒲生ら(1972;1975), Yamamoto *et al.* (1977), 横山ら(1979)を参照されたい。

### 3. 境界層構造に関する測定例

これらの乱流変動量の測定方法を用いて、長期にわたり多くの測定を行なった。そして、乱流変動量の鉛直分布、日変化を調べると共に各量の相互関係を解析した。これらの解析の結果、種々の新しい知見が得られ、また後述する1次近似としての乱流構造モデルができたが、まだ十分に理解できない関係もある。私から見て特に重要と思われる関係についてまとめてみる。

#### 3.1 $\sigma_w, u_*, z/L$ の関係

川口放送塔の313mまでの各高度で求めた上記の量について、次の関係が見出された(Yokoyama, 1971)。

$$|z/L| < 1, \quad \sigma_w = 1.2u_* \quad (1)$$

$$z/L < -1, \quad \sigma_w = 1.3u_*(-z/L)^{1/3} \quad (2)$$

ただし、 $L$ はMonin-Obukhovの安定長さで、ここでは、各高度で相関法によって測定した摩擦速度 $u_*$ 、顕熱フラックス $q$ を用いて求める。すなわち、 $L = -u_*^3/k \frac{g}{T_0} \frac{q}{C_p \rho}$ 、 $z$ は高さ、記号は慣用のものである。

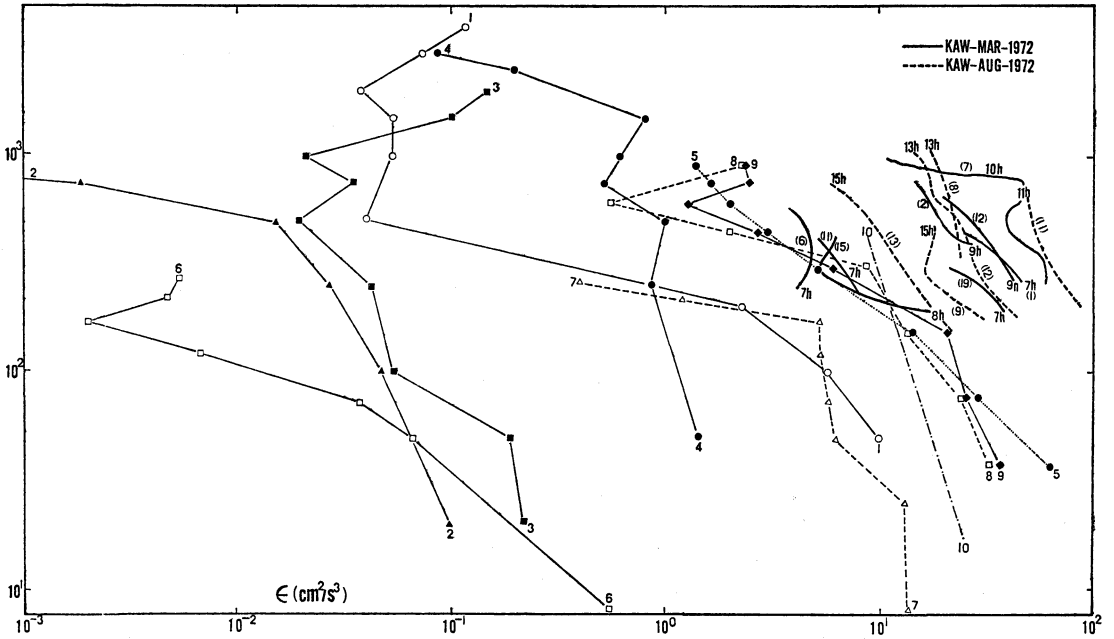
比例係数の値は別にして、(1)(2)式はいずれもCFLで成り立つことが良く知られている。上式が成り立つならば安定度が中立から不安定の場合、 $u_*$ および $q$ (したがって $L$ )の高度分布が与えられれば、従来からCFLで知られている乱流変動量および風速、気温の分布を与える関係はそのまま使えることが示唆される。安定の場合についても上式と同様な関係を求めているが、その式では $\sigma_w/u_*$ は $z/L$ によって大きくは変化しない。

#### 3.2 $\varepsilon$ の鉛直分布と $\sigma_w$ の関係

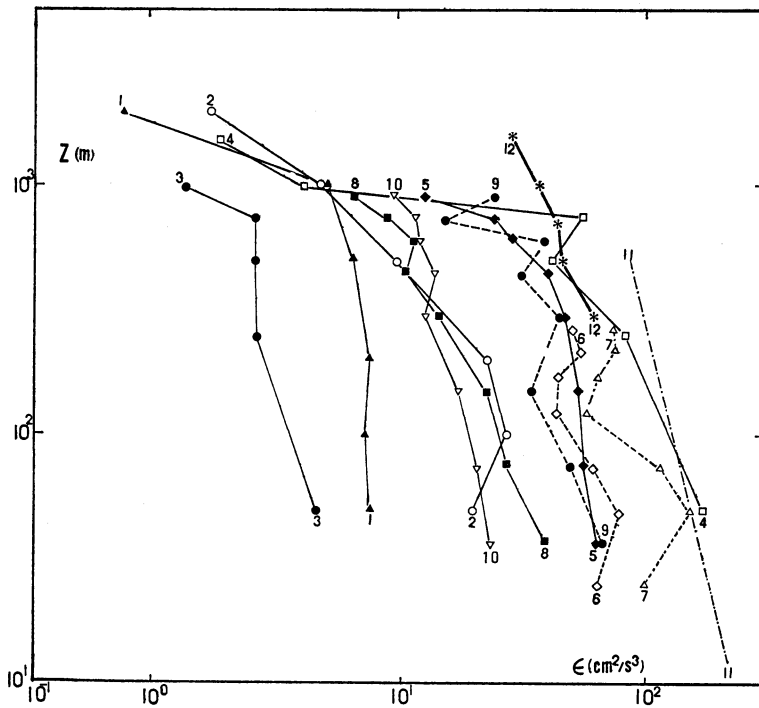
運動エネルギーの熱消散率 $\varepsilon$ の鉛直分布を調べると、第4図、第5図に示す2種類の型に分類できる(Gamo *et al.*, 1976)。第4図に示したのは風の強い時あるいは曇っていて強制対流が卓越していると推定される場合、第5図は弱風で晴れた自由対流卓越時の $\varepsilon$ の鉛直プロフィールである。蒲生ら(1975)は、 $\varepsilon$ が急激に減少する高度から境界層の厚さ $h_\varepsilon$ を決めた。 $\varepsilon$ は、飛行機をプラットフォームにして比較的容易に正確に測定でき、また、解析できる数値の範囲が図に見られるように非常に広い。

次に、 $\varepsilon$ と $\sigma_w$ の間には第6図に示すように次のような関係がある。

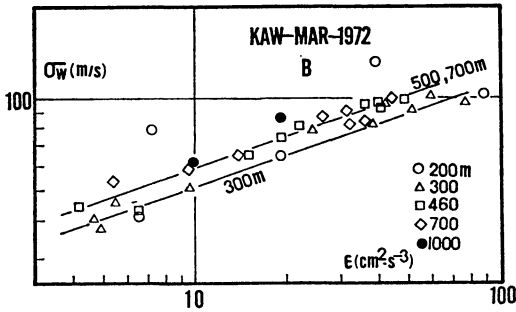
$$\varepsilon \sim \sigma_w^{1/3} \quad (3)$$



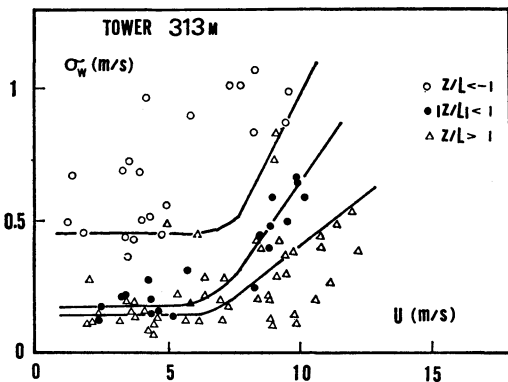
第4図 強制対流時の  $\epsilon$  の鉛直分布の測定例 (Gamo et al., 1976).



第5図 自由対流時の  $\epsilon$  の鉛直分布の測定例 (Gamo et al., 1976).



第6図 強制対流時の  $\epsilon$  と  $\sigma_w$  の測定例 (Gamo et al., 1976).



第7図 川口放送塔における  $\sigma_w$  と  $U$  の関係.

第6図に見られるように、上式の比例係数は測定高度によって変わるように見える。自由対流の場合にも上式は成り立ち、この場合には、係数はほとんど高度によらず一定のように見える。

3.3 その他の関係

上記の解析結果は境界層構造のモデリングに直接結びついたが、次の結果も参考となった。

温度変動の rms 値  $\sigma_T, \sigma_w$  および鉛直方向の運動量拡散係数  $K_M$  の混合層中での鉛直分布および前述の混合層厚さ  $h_e$  の時間変化 (Gamo et al., 1979) などである。

また、自由対流状態から強制対流状態へ変化する臨界風速に関係すると思われる  $\sigma_w$  と平均風速  $u$  の関係は、第7図のようになる。しかし、この臨界風速については未だ充分明らかではない。これら多くの測定結果のまとめは、横山ら (1979) に詳しく述べられている。

4. 境界層の乱流構造モデル

大気乱流の実測データを土台にして、境界層構造の1

次近似モデルを作った。対象としたのは、平坦地上で水平に様な境界層である。この場合、境界層の構造は乱流変動量などの鉛直分布とその時間的変化で決定される。具体的にいえば、まず境界層の厚さを決め、次に境界層内での諸物理量の鉛直分布を求めた (Yokoyama et al., 1977 a; b; c)。

この構造モデルでは、基本量として CFL の場合と同様に運動量と顕熱の鉛直フラックスを取り、さらに境界層厚さ  $h$  を加える。多くの観測事例を参考にして、この鉛直フラックスを次の実験式で表わす。

$$u_* = u_{*0}(1-z/h)^n \tag{4}$$

$$q = q_0(1-z/h)^m \tag{5}$$

ただし、 $m, n$  は定数、添字0は地表面での値を示す。他の記号は前出のとおり。

CFL 中での乱流変動量を与える Monin-Obukhov の相似理論から導かれる関係式中の  $u_{*0}, q_0$  を上式に置き換えることによって、ABL 全体での乱流量の鉛直分布が求められる (相似仮説)。また、その時間変化は  $h$  の変化として近似的に表現されることになる。

さらに、Yokoyama et al. (1979) は乱れのスケール  $l$  の変化を考慮して乱流変動量の鉛直分布を検討した。そこでは、 $l$  を次式で近似した。

$$l = z \left( 1 + \beta \frac{z}{h} \right)^{-1} \tag{6}$$

ただし、 $\beta$  は実験定数、他の記号は前出のとおり。

乱れのスケールの高度変化を考慮するならば、CFL 中での乱流変動量を与える式中のスケールを表わす  $z$  を上式に置き換えれば良い。しかし、実測との比較では不安定層 (混合層) と中立境界層では  $l$  の変化はないように見える ( $\beta=0$ )。次に、混合層と中立層での2, 3の結果を述べる。

混合層

自由対流状態を考える。多くの観測により、混合層内ではほぼ等温位となることから、顕熱フラックス  $q$  は高さに対し線型に減少する。したがって、(5)式の  $m=1$  になる。また、簡単な熱収支の考察により、 $h$  は次式で表わされる。

$$h = \left( \frac{2Q_0}{\gamma C_p \rho} \right)^{1/2} \tag{8}$$

ただし、 $Q_0$  は地表面から混合層へ注入された積算熱量、 $\gamma$  は初期大気の温位傾度、 $C_p$  は定圧比熱、 $\rho$  は空気密度である。

乱流変動量は、前述の仮定により次のように与えられる。

$$\begin{aligned} \sigma_w &= C_w \left( \frac{gh}{T_0} \frac{q_0}{C_p \rho} \right)^{1/3} \phi_w \\ \sigma_T &= C_T \left( \frac{gh}{T_0} \right)^{-1/3} \left( \frac{q_0}{C_p \rho} \right)^{2/3} \phi_T \\ \varepsilon &= C_\varepsilon \left( \frac{g}{T_0} \frac{q_0}{C_p \rho} \right) \phi_\varepsilon \\ K_M &= C_{KM} \left( \frac{gh^4}{T_0} \frac{q_0}{C_p \rho} \right)^{1/3} \phi_{KM} \end{aligned} \quad (9)$$

ただし、 $g$  は重力加速度、 $T_0$  は平均温度、添字つきの  $C$  は定数、 $\phi$  は  $z/h$  の関数である。

Yokoyama *et al.* (1977a) は、最初  $\phi$  を実測結果から決めた。その後、同著者ら (1979) は  $\phi$  を前述の仮定により次のように決めた。

$$\begin{aligned} \phi_w &= \left( \frac{l}{h} \right)^{1/3} \left( 1 - \frac{z}{h} \right)^{1/3}, \quad \phi_T = \left( \frac{l}{h} \right)^{-1/3} \left( 1 - \frac{z}{h} \right)^{2/3} \\ \phi_\varepsilon &= \left( 1 - \frac{z}{h} \right), \quad \phi_{KM} = \left( \frac{l}{h} \right)^{4/3} \left( 1 - \frac{z}{h} \right)^{1/3} \end{aligned} \quad (10)$$

$\sigma_w$  について測定との比較の例を、第8図に示す。図で破線は実測から決めた関係、実線は上式による分布を示す。他の乱流変動量についても、上式の鉛直プロフィールは実測にはほぼ一致する（たとえば  $\phi_\varepsilon$  は第5図の実測に良く一致する）。

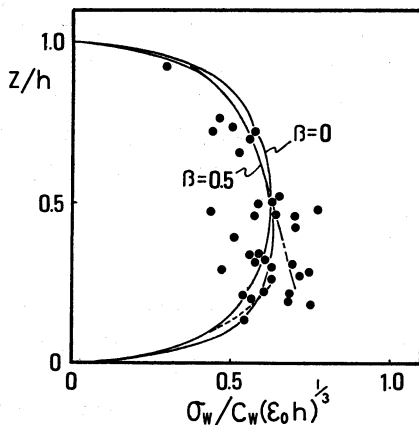
### 中立層

強制対流状態を考える。Yokoyama *et al.* (1977b) は、前述の (1) 式を考慮し、また中立層での  $\sigma_w$  がほぼ高さに対し線型に減少する実測結果に基づき、(4) 式の  $n=1$  とした。層の厚さは、上空風速、吹走時間、地表面粗度によって決定される。単純化された場について層厚さを与える式を、横山ら (1977c) は導いた。しかし、実際の場合で、中立層がずっと上空まで続いていることは無く、層厚さは上空の安定層の高さと安定度によって決まると考えられる。前述の仮定から乱流変動量は次式で表わされる。

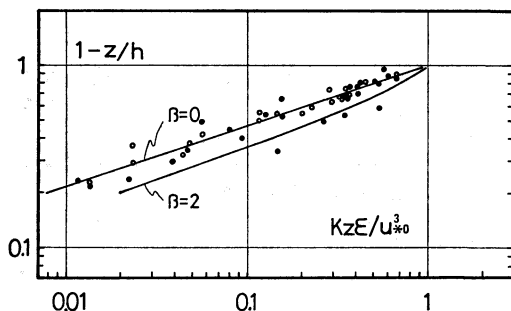
$$\begin{aligned} \sigma_w &= C_w u_{*0} \left( 1 - \frac{z}{h} \right) \\ \varepsilon &= C_\varepsilon \frac{u_{*0}^3}{l} \left( 1 - \frac{z}{h} \right)^3 \\ K_M &= C_{KM} u_{*0} l \left( 1 - \frac{z}{h} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

ただし、添字つきの  $C$  は定数で、この値は混合層の場合とは異なる。

上式と実測値の比較の例を、 $\varepsilon$  について第9図に示す。他の量についても、スケールの式 (6) の  $\beta=0$



第8図  $\sigma_w$  の鉛直プロフィールの実測との比較 ( $\beta=0$  で  $C_w=0.75$ ,  $\beta=0.5$  で  $C_w=0.7$ ,  $\varepsilon_0$  は地表面上での  $\varepsilon$  の値。(Yokoyama *et al.*, 1979).



第9図  $\varepsilon$  の鉛直プロフィールの実測との比較 ( $C_\varepsilon=1.0$ ).

とした場合、実測との一致は良い (Yokoyama *et al.*, 1977b; 1979). 安定層については乱流変動量の測定値が充分にないため確定的なことは言えないが、(4)、(5) 式の  $n \approx 1$ ,  $m \approx 3$  でいどの値が実測から示唆され、また、(6) 式の  $\beta$  は 20~70 と極めて大きな値となる。しかし、安定境界層の構造については未だ不明確な点が多くこれらの説明は今後に残されている。

### 5. おわりに

大気境界層の乱流構造についての測定結果とそれを土台にした構造モデルについて、私たちの研究の流れを振り返って解説した。このような相似理論の拡張の型でモデル化を行なったのは、方法が単純であることも理由の一つだが、乱流変動量相互の関係を見通せること、また、CFL との接続がついていること、さらには、現在

の測定データから見て十分な近似と考えられることなどのためである。クロジャ-モデルあるいは高次相関モデルを用いるにしても、ここで行なったような取りまとめをして測定データの分類を行なっておくことは、当然必要になると考えられる。また、前述したように、境界層の構造については今後とも精度を上げた測定を続け、より近似度の良いモデルを作ることが必要であろう。特に、安定層については1次近似モデルすら確立していない。

最後になったが、この研究の途上多くの方々の御指導と御援助を受けた。特に、山本義一、坂上治郎、竹内清秀、光田寧の諸先生を始め、文中に引用させていただいた皆様、乱流研究会、境界層研究会の皆様には感謝し、今後いっそうの御援助を御願いたい。また、一緒に仕事をを行なった蒲生稔氏、山本晋氏および当研究課の方々、野外観測を手伝って下さった関係機関の皆様には感謝いたします。

#### 文 献

- 蒲生 稔, 山本 晋, 横山長之, 1972: 飛行機による境界層上部の乱流観測, (その観測システムについて), 公害, 7, 173-185.
- , ———, ———, 1973: 飛行機による境界層上部の乱流観測, 公害, 8, 156-170.
- Gamo, M., and O. Yokoyama, 1975: Observed characteristics of the standard deviation of the vertical wind velocity in upper part of the atmospheric boundary layer, J. Met. Soc. Japan, 53, 412-423.
- , ———, S. Yamamoto and Y. Mitsuta, 1976: Structure of the atmospheric boundary layer derived from airborne measurements of the energy dissipation rate, J. Met. Soc. Japan, 54, 241-258.
- , ———, 1979: Growth of the mixing depth and the diurnal variation of vertical profiles of temperature and turbulence characteristics in the mixing layer, J. Met. Soc. Japan, 57, 159-172.
- 林 正康, 横山長之, 吉門 洋, 根本 陽, 1974: 磁気テープレコーダを内蔵した係留気球用大気乱流測定ゾンデ, 天気, 21, 103-105.
- Mitsuta, Y., 1966: Sonic anemometer-thermometer for general use, J. Met. Soc. Japan, 44, 12-24.
- Yamamoto, S., M. Gamo and O. Yokoyama, 1977: Airborne measurements of turbulent heat flux, J. Met. Soc. Japan, 55, 533-545.
- Yokoyama, O., 1969: Measurements of wind fluctuations by a vane mounted on the captive balloon cable, J. Met. Soc. Japan, 47, 159-166.
- , 1971: An experimental study on the structure of turbulence in the lowest 500m of the atmosphere and diffusion in it, Report of National Res. Inst. for Pollution and Resources, No. 2, pp.118.
- , M. Gamo, and S. Yamamoto, 1973: Aircraft measurements on the structure of planetary boundary layer, Scientific Report of the 2'nd AMTEX Study Conference, 56-68.
- , ———, ———, 1977 a: On the turbulence quantities in the atmospheric mixing layer, J. Met. Soc. Japan, 55, 182-192.
- , ———, ———, 1977 b: On the turbulence quantities in the neutral atmospheric boundary layer, J. Met. Soc. Japan, 55, 312-318.
- 横山長之, 蒲生 稔, 山本 晋, 1977c: 大気境界層の構造についての一考察, 公害, 12, 251-258.
- Yokoyama, O., M. Gamo and S. Yamamoto, 1979: The vertical profiles of the turbulence quantities in the atmospheric boundary layer, J. Met. Soc. Japan, 57, 264-272.
- 横山長之, 他 8 名, 1979: 大気汚染質の拡散に関する研究, 公害資源研究所報告, No.15, pp.408.