

特集：大気境界層の最近の観測技術

1. 大気境界層の観測方法
2. 赤外線測定による気温の鉛直分布の観測*
3. 音波レーダによる大気境界層の観測*

大気境界層の観測方法**

林 正 康***

1. まえがき

ここで大気境界層として対象にしているのは、だいたい地上数 m 位から 1 km 位までの層で、この厚さは、地上の影響が直接的に及ぶ範囲と言える。最近この大気境界層への関心が高まってきた（一部の人には異常繁殖とまでに見える程の）理由に、(1) 境界層の上の天気を支配する層、雲が出たり雨を降らしたりする層に地上からエネルギーを伝達する層として、天気予報をより正確に行なうために、境界層の性質をもう少し明らかにする（パラメタライズする）必要性が感じられていることと、(2) 人間を初めとする生活環境としての重要さが、特にここ数年来の環境汚染との関連から認識されたからではないだろうか。このような問題はいずれも実際的な問題で、境界層内の現象を扱う者にとって、エクマンスパイラルを初めとする古典的な理論による説明では物足りず、いろいろな観測が試みられてきた。本稿では、大気境界層を対象とした観測手段の概略を紹介してみたいと思う。ここで観測の対象となる気象要素としては、

(1) 力学的要素としての風向・風速とそれらの変動値、運動量の輸送量、

(2) 熱的要素として温度・湿度とそれらの変動値、両者を組み合わせた顕熱、潜熱の輸送量である。

こうした気象要素が、どのような状態で、いくつ位になるかという事を知ることが、観測の一応の目的といえ

る。そのために種々の観測が試みられてきたが、対象となる領域が人間の生活空間よりわずかに外側にあるため、必要な精度での長期観測は困難となっている。こうした境界層中における気象の測定の問題点については、光田（1972）がすでに述べた通りである。

本格的な大気境界層の観測が始まったのは、接地境界層に比べてずっと最近だといえよう。その初期の総合的な観測の例は、1953年に米国の O'Neill で実施されたものであろう (Lettau・Davidson, 1957)。そこでは、現在用いられているほとんどの観測手段の着想がある。大気境界層を観測する手法を分類してみると、

(1) 接地気層の観測で用いられた測器をそのまま、あるいは改造して上層まで持ち上げる。この場合には、測器を設置する場所—プラットフォームの問題となる。

(2) 従来とは異なった観測方法として、地上に設置した測定器で上層の状態を計る遠隔探査（リモートセンシング）法が用いられる。

(1) の手段で用いられる測器そのものの解析は、文字・水間（1976）に詳しく紹介されている。プラットフォームとしては、

(1) 接地気層における観測で実施したように、塔をさらに上空に高く延ばして測器を設置する。

(2) 気球に測定器をぶら下げて、目的の高さまで持ち上げる。

(3) 飛行機、ヘリコプターに測器を取り付けて飛行しながら測定する。

塔以外の測器のプラットフォームは固定したものでなく、風の息（ガスト）により動揺する。このプラットフォームの動揺の測定値への寄与をいかに評価するかが問

* 公害（1977, Vol. 12 No. 5）より公害編集部の許可を得て転載するものです。

** Recent observational methods of the atmospheric boundary layer.

*** M. Hayashi, 公害資源研究所。

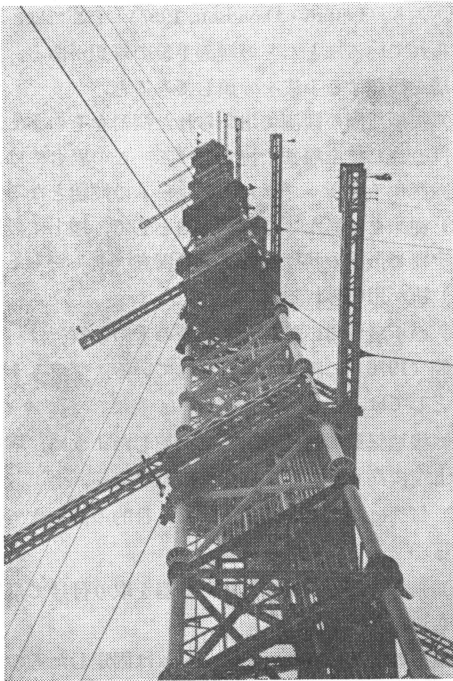
題となる。

2. 塔による観測

塔に設置して乱流観測を行なうのに最も強力な測定器は、超音波風速温度計（光田，1966）であろう。気象観測を目的として、たとえば、筑波の気象研究所の観測塔（高さ213m）やNHK第1放送の川口送信塔（高さ313m）には、超音波風速温度計が数高度に設置されている。塔に測器を設置する際に一番の問題となるのは、塔体の影響である。特に、測定器が塔体の風下側になる場合正しい測定は全く期待できない。筑波の気象観測塔では、この塔体の影響を見るために塔体の1/20の模型を作り、風洞内で風速の変化をあらかじめ予想し、塔体の影響が測定値に出ないように第1図のように3方向に長さ6mのブームを張り出し、その先端に測器を取り付けている。

気候学的大気拡散モデル（Climatorogical Dispersion Model, 略してCDM, 環境庁の推奨する総量規制で用いる手法もこのモデルの一つである）では、大気汚染を推定するためには、少なくとも1年あるいはそれ以上の期間についての気象要素の連続観測が望まれる。乱れの変動値やフラックスを長期間測定する方法としては、

- (1) オリジナルデータをアナログ型式でデータレコー



第1図 塔から張り出した気象測器用ブーム
（気象研究所・気象観測鉄塔 筑波）。

ダに記録し、研究室で再生する。テープの早回しにより能率を上げる。最近では14チャンネル、記録時間1,600時間といった多チャンネル超長時間レコーダができています。

(2) 平均値、標準偏差、フラックスをアナログ回路により演算し、それらをチャート紙上に記録し、あとで読み取る（林・花房，1976）。あるいは、作表、紙テープに打ち出す。また、アナログ処理後の各信号をデジタル化し、磁気テープに記録する。

(3) MMOS (Mobil Micrometeorological Observation System の略, Kaimal *et al.*, 1966) で代表されるように、電子計算機と直結してデジタル処理し結果を一定時間毎にレタイプで打ち出したり、鉛直分布をプロットで図化する。

塔を利用した大気境界層の観測では、このようにして得られた観測値をいかに料理するかという段階である。

3. 気球による境界層観測

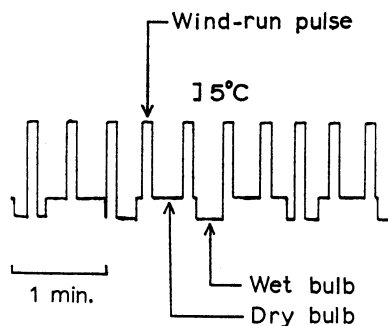
気球に温度計等を搭載して境界層中で測定を行なう方法は、古い歴史を持っている（中島，1967）。気球を使って境界層中で測定を行なう方法は、気球が地上と索で結ばれていて回収が可能な（いつも可能であるとは限らないが）係留気球と、放球後自由に上昇または一定高度を風のまにまに流れる自由気球とに区別される。

3-1 係留気球による観測

係留気球として用いられる気球の大きさは、 5 m^3 程度の小さなものから、 100 m^3 の大きさの範囲で利用されている。構造的には、いわゆる軟式で、ヘリウムガスあるいは水素ガスを封入することにより形状が保たれる。形状としては、小型のものは球形であるが、 20 m^3 以上になるとほとんどが涙滴型である。涙滴型の場合、尾部に水平・鉛直の方向安定用の翼を付け、気球の長軸が常に風向に向かい、また、強風時には揚力が発生し気球が常に係留点の真上にあるようにする。係留索として、今はナイロンロープが一般に用いられている。かつてはピアノ線入りのロープが用いられ、信号をピアノ線を通じて地上に送っていたが、無線による電送方式が進歩したため、また保守の点から（キックを起こすと弱くなる）、今はあまり利用されていない。

係留気球に搭載する測定器は、平均値を測定するものと、変動値を測定できるものとに大別することができる。

平均値用ゾンデの測定項目は、温度（乾球・湿球）、風向、風速が挙げられる。電送が1chの場合、これらの



第2図 平均値ゾンデの信号例。
乾湿球温度、風程パルス
からなる時分割信号。

信号は時分割で送られる。出力信号の例を第2図に示す。乾湿球温度は強制通風式ビード型サーミスタ温度計、風速はカップ型風速計で測定している。信号は400 MHz帯を使用し、A2方式で地上に送られる。乾球温度と湿球温度は、それぞれ40秒と20秒の時分割で記録される。風速計の一定数の回転(たとえば60回転)毎に、パルス状の基準信号を温度信号に優先して、風程*パルスとして割り込ませる。このパルス間隔の逆数として平均風速を計算することができる。この他、一定時間毎に風速に応じた電圧のパルスを温度信号に割り込ませる方式もある。係留気球が風の弱い時に有効であるので、後者の方が使いやすい。

平均値を測定する測定器は、構造が簡単であるため軽量で取り扱いも楽で、1 km位上空まで測定器を持ち上げることができる。時間差をおいて地上から上空までの気温の鉛直分布の連続観測が可能で、しかも、同一測定器を用いるため機差が無いので、接地逆転層の生成消滅過程などの観測に最適だろう。

この方面での測定器は、風向と高度の測定方法を除いてほぼ完成の域にあると言えよう。風向は、涙滴型気球を用いる場合、気球の向きから推定できるが、読み取りとして16方位がせいぜいである。風向の自動的検出方法として、カップ型風速計のカップへの腕の1本を磁化しておき、カップが地磁気を横切って回転する際の磁力線の変化を、風向計(この場合は、測器本体)に固定した磁気ダイオードで検出し、風向を測る方法が開発され、GATEで使用された(Burns, 1975)。気球の高度は、簡

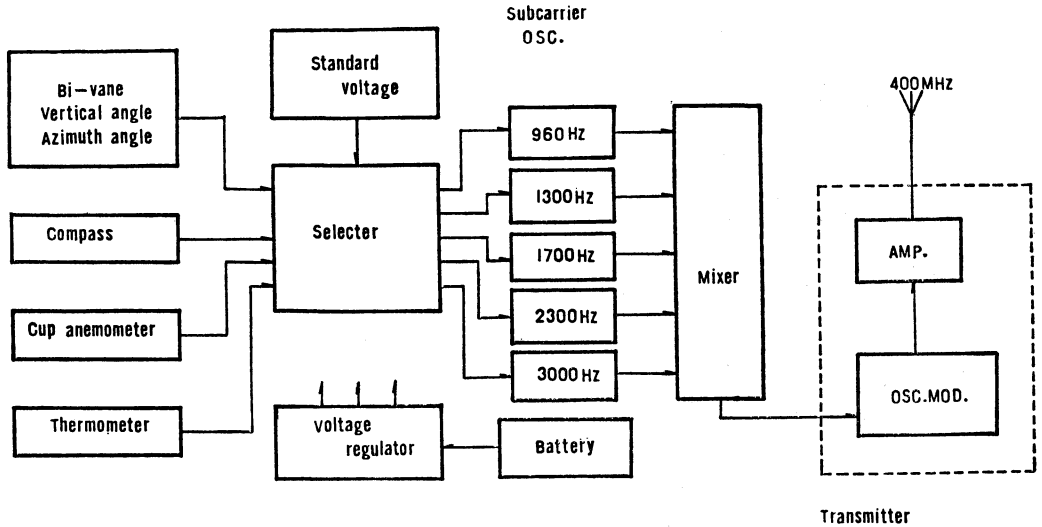
単には、係留索の長さで近似する。風に流される場合に係留点から気球を仰いだ角度で補正する。しかし、気球高度が高くなるに従って、索がたるんだり延びたりして誤差が大きくなる。そのような場合、やはり気圧計などにより高度を検出する方が、気温の鉛直勾配を測定するためには必要であろう。

気球ではないが、凧を利用した観測方法をここで紹介しておく(蒲生他, 1973)。使用した凧は米国Jarbert社製の軟式凧で、裏表2重の布の間に風が入ることにより型が保たれる。大きさは2 m×2 m位であるが、他にもいろいろの大きさがある。使用した測器には、カップ型風速計、自然通風式(凧は風が強くないとあがらない)サミスタ乾湿球温度計、アネロイド式高度計で、各信号は時分割で地上に送信される。この観測方法は、東支那海で東大海洋研の白鳳丸の甲板上で数回試みられたが、測器が重すぎたかあまり上昇せず、遂には測器諸共、海中に落下してしまった。その後、あまり成功した話を聞いていないことから、あまり実用的な方法ではないだろう。

係留気球に搭載して上空の乱れを測定する装置は、横山(1969)によって一応の型式が確立されたと言えよう。第3図に係留気球用に開発された乱流計の構成をブロックダイアグラムで示す。風速はカップ型風速計、風向変動は軽く小さなパイペン、温度は白金抵抗温度計、測器の方向はサーボコンパスで検出する。これらの信号は、IRIG規格のサブキャリア・オンレータでVF変換され、FM多重信号として地上に400 MHz帯で送られる。この400 MHz帯の電波を使ったFM多重送信は、電波法規に無く、実験局として許可される。この不便さと電波障害のため、サブキャリア・オンレータの発振周波数として可聴音域を使い、乱流計に内蔵したテープレコーダに記録し、地上で再生する方法も試みられている(林他, 1974)。

この型式の乱流計を係留気球に搭載して観測した乱れの強さとフラックスの値と、塔に設置した超音波風速計による測定値の比較は、大塚他(1977)により試みられた。同様の試験は、英国空軍の気象研究隊と米国空軍のケンブリッジ研究所のグループのフロリダでの共同観測からも報告されている(Haugen *et al.*, 1975)。日本における比較テストでは低周波側での不一致は、特にフラックスで見られたが、米国におけるテストでは主風向の成分; 平均風速と σ_u に不一致が見られるが、フラックスでは満足すべき一致が見られた。この相違は、部分的理由として、英国では約1,000 m³強の巨大な気球を使

* Wind run: 風が吹いていった距離。平均風速=風程/要した時間。



第3図 乱流測定用ゾンデのブロックダイアグラム (例)

用しているためと思われる。このように大きな気球を操作するためにはいったい何人位の兵隊を動員したのだろうか。

乱流測定用の測器は一般に重く(約10kg)、したがって、用いる気球も大きめ、使用する係留索も太めとなり、だいたい500mの上空までしか日本では観測されていない。最近のエレクトロニクスの発達に伴い、サブキャリア・オシレータも小型軽量になり、また、マルチスキャンニングAD変換器とICメモリの組み合わせによる新しい構成の測器の開発が試みられている。

3.2 自由気球による観測

このジャンルに入る観測法としては、古い歴史を持つ測風気球(パイロットバルーン、あるいは単にパイバル、パイボールと呼ばれている)がある。これは、水素ガスあるいはヘリウムガスを封入した直径30cm程度のゴム風船で、一定速度で上昇するように浮力を調整し、放球後の飛跡をトランシットで追跡し、位置の変化から上層の風向風速を測定する。通常は、他の気象観測のバックアップデータとして裏方的な役割を果たしている。原理が単純であるため案外誤差は少なく、境界層の平均的な風向風速の観測手段として有効のようである。たとえば、WAGARA実験では主要な観測項目となっている(Clarke *et al.* 1971)。夜間観測には豆電球をぶら下げる。電源としては注水電池が使われる。軽くて落ちても事故は無いからである。トランシットの目盛を何秒おきか目読する。この仰角と水平角をポテンシオと連動させて

自動的に読み取る方法が試みられているようであるが、なかなか実用化されない所をみると、手動の簡便さになわなないのだろう。

この気球を一回り大きくして、簡単なセンサ(タングステン抵抗温度計)を搭載し、上空の気温を測定するようにしたのが、低層ゾンデである。温度信号は、404MHz帯の搬送波に乗せた50~200Hzの副搬送波で地上に送られる。出力は20°C/1Vで、オフセットの調整により-20~40°Cの範囲で測定できる。初期の低層ゾンデは上昇高度を上昇速度の風程から出していたが、現在はアネロイド式の気圧計に連動したスイッチング機構により、特定高度で高度マークが出るようになり、温度の鉛直分布がより正確に測定できるようになった(伊藤他, 1974)。この低層ゾンデに湿らした和紙をはり付けたもう一組のタングステン抵抗温度計を増設し、高度マークの所で切り換えて湿球温度を測定することもできる(明星電気H-73型)。このゾンデは、1974年のAMTEX(気団変質観測)で使用され、大陸の乾燥した冷たい気団が黒潮海域を吹送した後の南西諸島の宮古島では、湿潤な暖かな内部境界層が現われることを示した(Otsuka *et al.*, 1975)。また、低層ゾンデの送信周波数として1,680MHz帯を使用し、ダイポールアンテナで気球の位置を自動的に追跡することにより、上空の風向風速も測定できる型も最近使用され、特に、夜間の気温、風向・風速の鉛直分布の観測に偉力を発揮している。こうした低層ゾンデは自然通風式であるため、地上での温度オフセッ

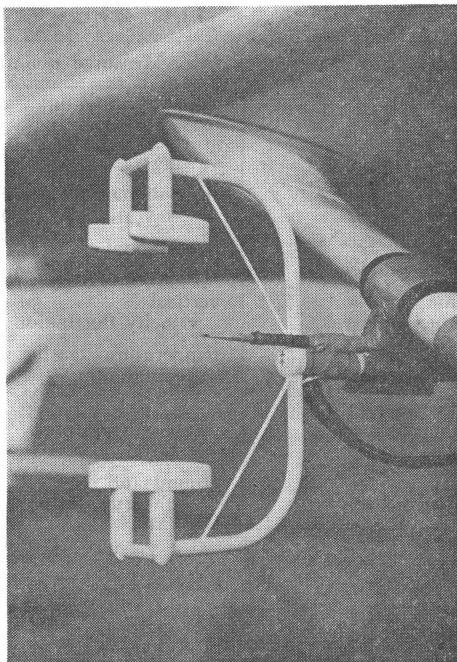
トの設定調整に正確さがやや欠けるため、一つの温度鉛直分布の観測と次の時刻の温度分布との間の温度の差は、あまりあてにならない。しかし、それぞれに測定した温度勾配はかなり信頼して良いと思われる。この低層ゾンデの温度測定感度を上げ、温度変動を上昇しながら測定することも試みられている (Coulman, 1973)。

境界層を縦断して測定するパイロットバルーンや低層ゾンデとやや異なり、気球の浮力を一定高度でバランスさせ、等密度面を風に流される気球も、自由気球の仲間である。この気球は、一定密度を保つため伸縮性のないポリエステル (商品名マイラー) で作られ、特定高度を浮遊することからノンリフトバルーンと呼ばれたり、正四面体の形状からテトルーンと呼ばれたりする。この正四面体は主に製作上の理由からで、球形の場合と性能的にはあまり違いはないと思う。このノンリフトバルーンの飛跡を追跡することにより、上空の気流の性状一流跡線やバルーンに作用する大気の乱れを知る事ができる (Sato, 1975)。この飛跡は、2台以上のトランシットで追跡したり、あるいは、指向性のある 1,680 MHz の電波を発振させダイポールアンテナで自動追尾するトランスポンダ方式により測定される。バルーンが遠方に流されると、バルーンの上下運動を角度から読み取ることは不正確になるので、そのような場合、バルーンに気圧計をぶら下げてその出力を受信すればよい (大田・伊藤, 1970)。気圧計として低層ゾンデ用の他に、最近気圧変化を半導体の歪で検出する方法が試みられている (沼田, 私信)。

この他、パラシュートその他により一定速度で落下させながら、温度の鉛直分布を測定するドロップゾンデもあるが、試験的段階であるので割愛する。

4. 航空機による境界層観測

航空機に気象測器を搭載して上空の気象観測を行なう事は、かなり以前から試みられていた。しかし、境界層の測定を目的として、系統的な観測が行なわれるようになったのは最近の事である。その初期の測定は、航空機の動揺の影響の少ない高周波数側の大気乱流を、熱線風速計で測定したものである (蒲生他, 1971)。用いた熱線風速計は、風洞実験等で良く用いられる DISA 55 D 00 型である。用いた航空機はセスナ 172 で、単発 4 人乗りであった。ここでは、この観測以来、日本各地で精力的に飛行機観測を行なった公害資源研究所が用いた観測システムを中心に紹介する。さて、その後さらに 1 次元の超音波風速温度計を翼の支柱に取り付け、風速の鉛直成分と温度の変動を測定した。飛行機で使用する超音波風速



第4図 超音波風速温度計と熱線風速計の飛行機への取り付け (提供蒲生)。

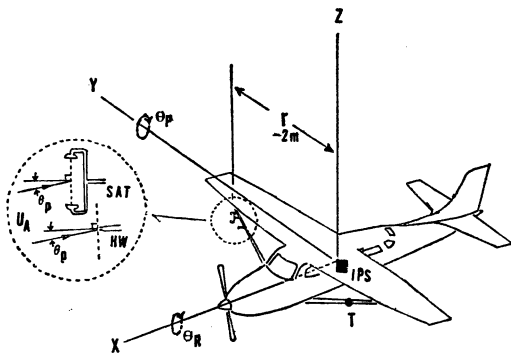
計は第4図に示すように、超音波の送受波部で気流の剥離が生じないように流線型の整流板を取り付ける。翼支柱に取り付けた理由は、他に取り付け場所がないためであるが、プロペラ後流の影響がなく、また、測器が重心に近い利点がある。超音波風速計や熱線風速計で測定した風速変動のスペクトルの慣性小領域から、粘性消散率や拡散係数を計算することができる。粘性消散率と大気境界層の構造との関連については、蒲生他 (1976) に詳しい。

温度は、たとえば、サーミスタ温度計を自然通風筒内に設置したり、熱電対温度計や超音波温度計により測定される。超音波温度計の場合、高速で横切る気流のため音波の伝播経路が曲がり、測定値には補正が必要である。温度の測定については、航空機が乱流観測の前後に境界層を上下に貫通する際に測定した温度の鉛直分布や、海陸2境界や都市・郊外等の不均一領域の上空を横切る際の水平空間の分布の測定例が報告されている程度である。

最近、山本他 (1977) は、第5図に示すような観測システムに、3次元の加速度計とレイト・ジャイロから構成するイナーシャルプラットフォームを搭載し (諸元を第1表に示す)、超音波風速温度計の出力について航空

第1表 飛行機を用いた大気境界層の観測システムの諸元

Measuring device	Measured quantity	Range	Accuracy	Response
Vertical gyro	pitching and rolling angles (θ_P, θ_R)	$\pm 40^\circ$	0.2°	$60^\circ/\text{sec}$
Rate gyro	yawing rate	$\pm 40^\circ/\text{sec}$	$0.1^\circ/\text{sec}$	DC-20 Hz
Accelerometers	three-dimensional accelerations (A_x, A_y, A_z)	$+5g$ ($g=9.8 \text{ m/s}^2$)	$10^{-6}g$	DC-250 Hz
Hot-wire anemometer	longitudinal velocity fluctuation			DC-5 kHz
Sonic anemometer	vertical velocity fluctuation	$\pm 3 \text{ m/s}, \pm 10 \text{ m/s}$	測定値の3%	DC-70 Hz
Sonic thermometer	temperature fluctuation	$\pm 10^\circ \text{C}$	測定値の3%	DC-70 Hz
Thermistor thermometer	mean temperature	$-10^\circ \sim 40^\circ \text{C}$	0.1°C	DC-0.3 Hz
Infrared radiative thermometer	ground and sea surface temperature	$-10^\circ \sim 90^\circ \text{C}$	0.1°C (相対)	DC-10 Hz



第5図 飛行機を用いた大気境界層の観測システム概念図(山本による). 種々の測器の取付位置. HW (熱線風速計), SAT (超音波風速温度計), T (サミスタ温度計). IPS (インercialプラットフォームシステム)

機の動揺の補正を行ない運動量と顕熱のフラックスの測定を行なった. 顕熱輸送については妥当な結果が得られているが, 運動量の輸送については, 風速の測定値の補正が十分でなく, 不確かな結果が得られ, 測定の困難さが示されている.

これらの測定は, いずれもセスナの単発機(206や207)で行なわれた. 米国では小さくてビーチクラフト・クインエアー(双発), ちょっとした観測にはNCARのロッキード・エレクトラ(4発)やC-130(4発)が使えるのに対して, 日本ではせいぜいがセスナ402(双発10人)で, ?の差をまざまざと見せつけられる訳であるが, 観

測結果については, いささかも見劣りしていないと思う. エレクトラを使用した飛行機観測では, データ処理が自動化されていて, 飛行中に, 風向・風速, 乱流強度などがディスプレイ上に現われる. これに対して公害資源研究所の観測システムでは, 観測信号をできるだけ生の状態でデータレコーダに記録し, 後の解析はすべて実験室で行なうという観測システムの違いとなって現われている. 結局, 境界層の観測は, 単に技術の問題ばかりでなくそこで何を測定し, どう解析するかという方向付けの問題にある.

ヘリコプターに温度計を乗せて温度の鉛直分布を測定する試みは多くあり(たとえば, 渡辺他, 1975), 他の観測結果との斉合性も良いと思われる. しかし, ヘリコプターに飛行機の場合と同様の乱流測定器を搭載して測定を試みたが, どういう訳かあまり良い結果は得られていない.

温度計程度の比較的軽量小型な測定器であれば, ラジコン飛行機に搭載して上空1km位までの気温の鉛直分布を測定することができる(Konrad *et al.*, 1975). しかし, そのような高度になると, 模型飛行機が小さいため見失う可能性があり, 人口密度の高い日本では危険が伴うだろう.

同様の無人操縦の測器の運搬手段として, 圧縮空気を利用したロケット(商品名クリケット)がある. 上空数百mまでロケットを打ち上げた後, パラシュートが開き, ゆっくり下降しながら測定をする, ドロップゾンデの変型である. また, ロケットの上昇時に有色煙を出

させ、時々刻々の変化から風速を測定する方法も試みられている (Berlyand, 1972)。

5. リモートセンシングによる境界層観測

これまで述べてきた観測方法は、いずれも境界層中に直接センサを持ち込む方法であるが、地上から間接的に上空の状態を測定するリモートセンシング法が、最近活発に試みられている。

まず、レーダの応用で、上空からの反射波をドップラ解析することにより、上空の風向風速を測定することができる。この方法では、上空に何らかの電波を反射させるものが無くしてはならない。

同じ原理で、上空の風向・風速を反射音から測定する方法は比較的簡単で実用化されつつある。音波は、大気中の密度変化や乱れにより反射散乱される。この性質を利用して、地上から上空に音波を送信しそのエコーから上空の状態を探索する音波レーダ (SODAR; Sound Detection And Ranging の略) と呼ばれる装置である。音波レーダについては、福島(1973)の総合報告がある。明瞭なエコーが得られるのは、接地逆転層が存在する場合と対流活動が盛んな場合で、時間高度ダイアグラムにそれぞれ特徴あるパターンが得られる。もっとも現在の所、エコー強度については時間高度ダイアグラムの上で気象条件とパターンの識別 (紙芝居のと口の悪い連中は言う) 程度の域を出ていないが、エコーの強さを温度や風速の乱れの構造関数の係数や粘性消散率と関連づける研究が始められている。

上空における音の散乱反射領域が音の伝播方向に運動している場合、ドップラ効果により反射音の周波数が変化する。このドップラ変移を、スペクトル解析することにより (Beran *et al.*, 1971; 福島他, 1975; Balsler *et al.*, 1976)、また、一定波数の時間を測ることにより (林他, 1977)、上空の風向風速を測定することができる。Balsler *et al.* の装置は、鉛直方向の送信音を、100m 程離れた地点に傾斜させて設置したパラボラアンテナにより受信し、いくつかの設定高度における風向・風速を数分毎に測定できる程実用化が進んでいる。このデータ処理システムは、音波として 4kHz を使用しているため、測定高度は 150 m 程度以下である。この装置の出力と筑波の気象観測塔に設置した風向風速計の比較では、両者の一致は良いようである (花房, 私信)。

また、音波の伝播速度が温度により変化する性質を利用して、波長の変化を周期発射した電波で計り、上空の気温の鉛直分布を測定する方法 (Radio Acoustic Sund-

ing System, 略して RASS) も試作され始めている (福島他, 1976)。

上空の温度の鉛直分布の遠隔測定として、電波や赤外線を利用する方法が考えられる。地上で測定する波数 ν の電波や赤外線の強さ I は、大気の高高度から放射されて地上に達した波を積分したものである。

$$I(\nu, \theta) = I_e(\nu, \theta) \tau(\nu, \chi_0 \sec \theta)$$

$$- \int_0^{\chi_0} B(\nu, \chi) \frac{\partial}{\partial \chi} \tau(\nu, \chi \sec \theta) d\chi$$

ここで、 $I_e(\nu, \theta)$ は高さ χ_0 より上層から天頂角 θ で入射する波数 ν の波の強さ、 $B(\nu, \chi)$ は高さ χ における温度 $T(\chi)$ に対応する波数 ν のプランク関数、 $\tau(\nu, \chi \sec \theta)$ は透過関数である。種々の ν または θ についての入射波の強度を測定し、上式によりプランク関数を求め気温の鉛直分布を観測することができる。この分野での測定方法、解析方法については、嘉納 (1976) の総合報告がある。上式の解法については、種々提案されており、詳しくはそれぞれの報告を参照して欲しい。Hosler と Lemmons (1972) は方向別測定で、Westwater (1972)、Snider (1972)、Miner *et al.* (1972) は方向別測定と波長別測定の混用で、大気中の酸素ガス分子の出す 5 mm 吸収帯のマイクロ波の強度から温度の鉛直分布を測定した。測定結果をゾンデ観測と比較すると、地上数百 m の層での気温の鉛直分布は良く一致しているが、上空では一致していない。これは、鉛直分布を得るための一連の走査に時間がかかるため、その間に気象状態が変化してしまうためと推測されている。

赤外線領域の波としては、炭酸ガスの 15 μm 帯の吸収波が利用される。波長別の赤外放射強度を測定するために、回折格子型分光計を用いたり (Wang & Claysmith, 1975)、干渉フィルタを用いる方法 (中村他, 1976) が実用化されている。塔に設置した温度計や低層ゾンデによる測定と比較してみると (山本, 1977; 藤田, 1977)、計算方法により異なるが、高度についての分解能は逆転層の高さや厚さ、強さを再現する程は鋭くなく、また、雲がある場合や降雨時には正しい測定ができていない。

最近、電波を利用した探査方式として、FM-CW (Frequency Modulated Continuous Wave の略) レーダが気象観測に利用され、上空の波動の検出等に有効な観測手段である (Noonkester *et al.*, 1974) が、本題からやや逸脱しているのでここでは省略する。

6. まとめ

ここで、各々の測定法の得失について概観してみよ

う。塔を利用した測定法では、固定したプラットフォームであることから、現用のほとんどの測器をそのまま使用することができる。航空機、気球等に測器を搭載するためには、重量、スペース、形状について特別の考慮を払う必要がある。また、動揺についても何らかの考慮、補正が必要であろう。また、観測項目の時間的変化を観測するためには塔を利用するのが最適で、塔に設置した測器から必要なだけ長期に（故障がなければ）連続して信号を取り出すことができる。他の観測方法では、断片的なデータを継ぎ合わせることによる方法が取られている。高塔を利用する観測法の欠点としては、高さの制約（主として経済的理由）で、必要な高さの塔を建設する費用は非常に大きい。このため、他の目的で建設された建築物、煙突や通信施設を利用して気象測器を設置している。また、一度建設してしまえば簡単に移動できない。塔以外を利用した大気境界層の観測法は、観測場所の移動が比較的容易で、目的に応じた場所でデータを取得することができる。とは言っても、最近では航空法により、空港付近での観測は風向により制約を受ける。航空機を利用する場合、観測規模にも依るが一般に高価になる。しかし、広範囲の地域の立体的なデータを短かい時間に得ることができる。ただし、飛行高度には低限があり、海上で50 m、陸上で300 m以上である。係留気球を用いた観測は人件費が主となる。その乱流測定は、高さで500 m程度、時間で数時間が限度である。自由気球を用いた観測は、他のすべての観測手段に比べて安価であるが、乱流についてのデータを取得できない。これに対して、地上設置型のリモートセンシング法は、本装置やデータ処理装置がやや高価であるが、移動も可能でありしかも人手をかけずに連続的な観測が可能であることから、今後さらに開発され実用化されるであろう。

7. おわりに

地上から上空1 km程度までの大気境界層の観測手段について概説を試みた。一般向け解説ということから、あまり専門的な話は避けた。さらに詳細を知りたい方のために、引用文献を多めにした。観測手段をこうしてざっと見てみると、どれ一つをとっても決め手となる方法はなく、目的に応じて最適と思われる手段を選んでいるのが現状であることを理解していただけたと思う。それだけに、新しいアイデアによる観測手段がこれからも試みられるであろう。一方では、得られたデータに基づいての境界層のモデル化が、横山を中心として進められており、ある程度まで境界層を現象的に説明することに成

功している。単に、「こういう方法で測定したら、こうなりました」という報告も、まだまだ必要な時期でもあるように思う。それ程までに、境界層の観測は、まだ系統だったあるいは精細な現象を把握するデータに不足している段階のように筆者には思われる。こうした情勢の中で、境界層の中で何を測定すべきかという目的を、もっと明確にする必要もあると思う。観測技術は、まさにその目的にかなうように発達し、改良されてきたのだから。また、一つ一つの野外観測を通じて観測技術が発達してきたことも申し添えたい。

AMTEX で代表される特別観測に際しても、観測の好きな人達は、測器の実用化テストみたいなデータを取ることが目的みたいなプログラムを組みがちである。また、それが観測屋の本領と思う傾向にある。それは、ともすれば、理論屋をしてブルーカラーは何をしようとしているのか判らんといった不満になり、また観測屋は、理論屋にデータを横取りされるのではないかと戦々恐々としているといった相互不信が潜在しているように思う。

最近、気象研究所の花房、公害研究所の小川、公害資源研究所の横山が中心となって、かつての乱流研究会が境界層研究会となって再開された。かつて10人程度のメンバーで誰もが気軽に発言していた会合が、幕を開けてみると、何と50人近く集まり、話題提供者は演台に登るといった会合になってしまった。出席するメンバーを見ると、観測を主にしている人達が多く、数値解析や総観気象の人はほとんど見られない。このような小さな研究会でも、理論屋と観測屋とを問わずもっと十分な話し合いが、互の仕事を活発にするような機会が持てたらと密かに望む次第である。

文 献

- Balsler, M., C.A. McNary and D. Anderson, 1976: A remote acoustic sensor for airport approaches, *J. Appl. Met.*, 15, 665-668.
- Beran, D.W., C.G. Little and B.C. Willmarth, 1971: Acoustic Doppler measurements of vertical velocity in the atmosphere, *Nature*, 230, 160-162.
- Berlyand, M.E., 1972: Atmospheric diffusion investigations in the U.S.S.R., WMO-315, TN, No. 121.
- Burns, S.G., 1975: Boundary layer instrumentation system, *Atmospheric Technology*, NCAR, winter 1974-75.

- Clarke, R.H., A.J. Dyer, R.R. Brook, D.G. Reid and A.J. Troup, 1971: The Wangara Experiment: Boundary layer data, CSIRO, Australia.
- Coulman, C.E., 1973: Vertical profiles of small-scale temperature structure in the atmosphere, *B.L.M.*, 4, 169-177.
- 藤田慎一, 西宮 昌, 千秋鋭夫, 中村邦雄, 1977: 大気放射測定による気温鉛直分布の連続測定, 日本気象学会春季大会講演予稿集, 165.
- 福島 圓, 1973: ソーダによる対流圏観測, 気象研究ノート, 116, 135-149.
- 福島 圓, 秋田錦一良, 田中 浩, 増田悦久, 1975: 宮古島におけるソーダ観測 (AMTEX 75), 日本気象学会秋季大会講演予稿集, 119.
- 福島 圓, 田中 浩, 古浜洋治, 1976: 電波音波探査装置, 電波研究所季報, 22, 427.
- 蒲生 稔, 山本 晋, 水野建樹, 林 正康, 横山長之, 1971: 拡散場の構造に関する観測, 公害資源研究所彙報, 1, 21-32.
- 蒲生 稔, 横山長之, 林 正康, 竹田 厚, 伊藤昭三, 光田 寧, 1973: 風に搭載した kitesonde による大気境界層の観測, 天気, 20, 567-570.
- Gamo, M., O. Yokoyama, S. Yamamoto and Y. Mitsuta, 1976: Structure of the atmospheric boundary layer derived from airborne measurements of the energy dissipation rate ϵ , *J. Met. Soc. Japan*, 54, 241-258.
- 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.
- 林 正康, 花房龍男, 1976: パスカル安定度分類の実験的検証, 公害, 11, 14-28.
- 林 正康, 横山長之, 小堀泰宏, 齊藤 進, 1977: 音波レーダによる大気境界層の観測, 公害, 12, 286-293, (天気本号に転載).
- Haugen, D.A., J.C. Kaimal, C.J. Readings and R. Rayment, 1975: A comparison of balloon-borne and tower mounted instrumentation for probing the atmospheric boundary layer, *J. Appl. Met.* 14, 540-545.
- Hosler, C.R., T.J. Lemmons, 1972: Radiometric measurements of temperature profiles in the planetary boundary layer, *J. Appl. Met.*, 11, 341-348.
- 伊藤昭三, 渡辺好弘, 岡野 博, 1974: LTS-72 型低層ゾンデの話, 天気, 21, 127-141.
- Kaimal, J.C., D.A. Hanger and J.T. Newman, 1966: A computer-controlled mobile micro-meteorological observation system, *J. Appl. Met.* 5, 411-420.
- 嘉納宗晴, 1976: 地上からの放射測定に基づく気温の鉛直分布の測定, 気象研究ノート, 130, 147-161.
- Konrad, T.G., M.L. Hill, J.R. Rowland and J.H. Meyer, 1975: A small radio-controlled aircraft as a platform for meteorological sensors, *Atmospheric Technology (NCAR) Winter*, 1974-75.
- Lettau, H.H., B. Davidson, 1957: Exploring the atmosphere's first mile.
- Mitsuta, Y. 1966: Sonic anemometer thermometer for general use, *J. Met. Soc. Japan*, 44, 12-24.
- 光田 寧, 1972: プラネタリー境界層の計測方法, 天気, 19, 644-647.
- 文字信貴, 水間満郎, 1976: 風・温度・湿度及び乱流輸送量の測定, 気象研究ノート, 130, 19-52.
- 中島正一, 1967: 係留気球による低層気象観測について, 測候時報, 34, 1-66.
- 中村邦雄, 他, 1976: 地上設置型気温垂直分布測定装置, *National Technical Rep.*, 22, 577-582.
- Noonkester, V.R., D.R. Jensen, J.H. Richter, W. Viezee and R.T.H. Collis, 1974: Concurrent FM-CW radar and lidar observations of the boundary layer, *J. Appl. Met.*, 13, 249-256.
- 大田正次, 伊藤朋之, 1970: 鉛直気流測定のためのスーパープレッシャー気球および精密気圧ゾンデシステム, 気象研究所報告, 21, 45-72.
- Otsuka, S., N. Shishido, N. Honda, S. Nemoto, S. Koinuma, M. Hayashi and M. Miyake, 1975: Observation of planetary boundary layer by tethered balloons and lower tropospheric radiosonde, *Proceedings of Fourth AMTEX study conference*, 70-73.
- 大塚 伸, 藤田敏夫, 本多庸浩, 魚津 博, 花房龍男, 藤谷徳之助, 1977: 塔と係留気球による大気境界層の比較観測, 日本気象学会講演予稿集, 31, 42.
- Sato, J., 1975: Estimation of turbulent diffusivity over the Tokyo Metropolitan area, constant volume balloon, *Papers in Met. and Geophys.*, 26, 35-46.
- Wang, J.V. and C. R. Claysmith, 1975: Measurement of lower atmosphere temperature profiles from ground-based infrared observations, *J. Appl. Met.*, 14, 308-318.
- 渡辺好弘, 有澤雄三, 吉川敏夫, 1975: ヘリコプターによる大気温度測定の実験(2), 天気, 22, 665-670.
- Yamamoto, S., M. Gamo and O. Yokoyama, 1977: Airborne measurements of turbulent heat flux, *J. Met. Soc. Japan*, 55, 533-545.
- 山本 晋, 1977: 赤外線測定による気温鉛直分布の観測, 公害, 12, 277-285, (天気本号に転載).
- Yokoyama, O., 1969: Measurements of wind fluctuations by a bane mounted on the captive balloon cable, *J. Met. Soc. Japan*, 47, 159-000.