

場合の計算方法であるが、これについては種々試みられているようであるが、まだ完成したものとなっていない。この点の改良が必要となる。

## 謝 辞

最後に、本研究のデータ使用に際して御協力いただいた機械振興協会、また、装置の保守管理および計算方法などで御助力をいただいた松下技研の山香、中村両氏、計算方法、測定誤差などについて有益な助言をして下さった東北大学理学部の青木氏に感謝する。さらに、気温分布のデータを提供して下さいました公害資源研究所の林、蒲生両研究員に感謝する。

## 文 献

青木忠生, 山本義一, 1973: 気象衛星による放射測定とその利用, 天気, 20, 477-487.

Hosler, C.R. and T.J. Lemmons, 1972: Radiometric measurements of temperature profiles in the planetary boundary layer, J. Appl. Met., 11,

341-348.

中村邦雄他, 1976 a: 地上設置型気温垂直分布測定装置について(Ⅲ), 日本気象学会秋季大会予稿, 352.

中村邦雄他, 1976 b: 地上設置型気温垂直分布測定装置, National Tech. Report, 22, 577-582.

Smith, W.L., 1970: Iterative solution of the radiative transfer equation for the temperature and absorbing gas profile of an atmosphere, Appl. Optics, 9, 1993-1999.

Twomey, S., 1965: The application of numerical filtering to the solution of integral equations encountered in indirect sensing measurements, J. of the Franklin Institute, 279, 95-109.

Wang, J.Y., C.R. Claysmith and M. Griggs, 1975: Measurement of lower atmospheric temperature profiles from ground-based infrared observations, J. Appl. Met., 14, 308-318.

山香英三他, 1975: 地上設置型気温垂直分布測定装置について(Ⅱ), 日本気象学会秋季大会予稿, 84.

山本義一他, 1975: 地上設置型気温垂直分布測定装置について, 日本気象学会春季大会予稿, 149.

## 音波レーダによる大気境界層の観測\*

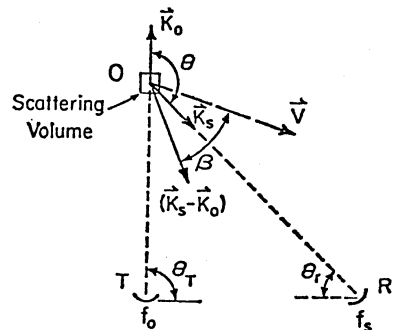
林 正 康\*\* 横 山 長 之\*\*  
小 堀 泰 宏\*\*\* 齊 藤 進\*\*\*

## 1. まえがき

音波を利用した大気境界層の探査方法は, McAllister *et al.* (1968)の最初の成功以来, 多くの試みがなされている。一つは, エコーの強さやパターンと他の気象条件とを関連づける試みであり, 他は, ドップラ効果によるエコーの振動数の変化から, 反射領域の風向風速を測定する試みである。地上から送信した音が上空で反射される際に, 音を反射する領域が運動している場合, 反射音はドップラ効果により振動数が変化する。反射領域の速度と振動数の関係は, 第1図に示すように,

$$V \cos \beta = \frac{C}{2 \sin \frac{\theta}{2}} \cdot \frac{4f}{f_0} \quad (1)$$

で与えられる (Beran, *et al.*, 1973)。ここで,  $C$  は音速,  $V$  は送信音と反射音のつくる平面の風速成分,  $f_0$  は送



第1図 送信音と反射音の関係 (after Beran *et al.*).

\* Measurement of the atmospheric boundary layer by SODAR.

\*\* M. Hayashi and N. Yokoyama, 公害資源研究所.

\*\*\* Y. Kobori and S. Saito, 海上電機株式会社.

この解説は, 公害 (1977, Vol. 12, No. 5) の論文を転載したものです (編集委員会).

信音の振動数、 $\Delta f$ は送信音とエコーの振動数の差、 $\theta$ と $\beta$ は第1図に示されている通りである。鉛直上方の後方散乱のみに着目すれば、(1)式は、

$$\frac{C}{w} = \frac{1}{2} \frac{\Delta f}{f_0} \quad (2)$$

$w$ は風速の鉛直成分である。すなわち、鉛直上方に発射した送信音とそのエコーの振動数を測定することにより、上空の風速の鉛直成分を測定することができる。

ドップラ変化の最初の観測は、Beran *et al.*(1971)により行なわれた。熱的ブルームの観測例ではエコーの強い領域と上昇流とが、また、エコーの弱い領域と下降流とが一致しており、特に、エコーの強い部分は、上昇流と下降流の境界で混合の活発な部分であることが明らかにされた。ドップラ変化の測定方法としては、エコーをスペクトル分解しそのピークを与える振動数から求めた。同様の観測は、Mahoney *et al.*(1973)や、Aubry *et al.*(1974)により実施され、同様の結果を得ている。福島他(1975)は、AMTEXの期間中、宮古島で音波レーダによる境界層観測を行なった。海面温度は夜間に気温より高くなるため、夜間に熱的ブルーム状のエコーが観測され、スペ

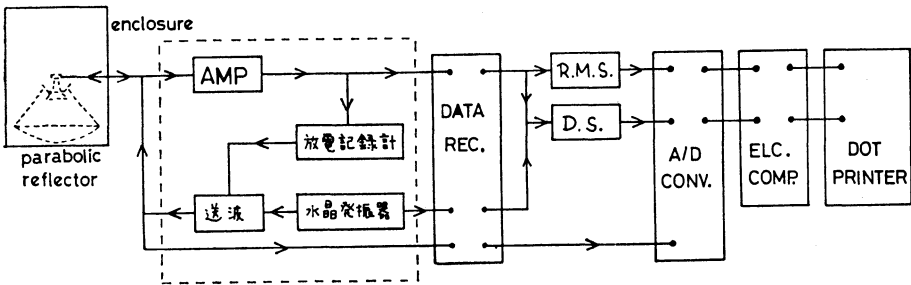
クトル分析計による鉛直風速も上向きであることが確かめられた。しかし、こうした観測結果と対応する他の気象条件の測定が無く、いずれも、確からしい推定に止まっている。また、ドップラ変化を測定する方法として、スペクトル解析をしてその最大値を求める方法は、かなりの計算量を要することと、Beran *et al.*が指摘したように、二つ山のスペクトルが現われる場合があり、平均化に問題が生じる等の難点がある。ここで、われわれのグループは、エコーの波数を直接測定して鉛直風速を求める方法を開発した。方法としては、エコーの一定波数、ここでは40波の時間  $T_d$  を測定する。

$$f_d = \frac{40}{T_d}$$

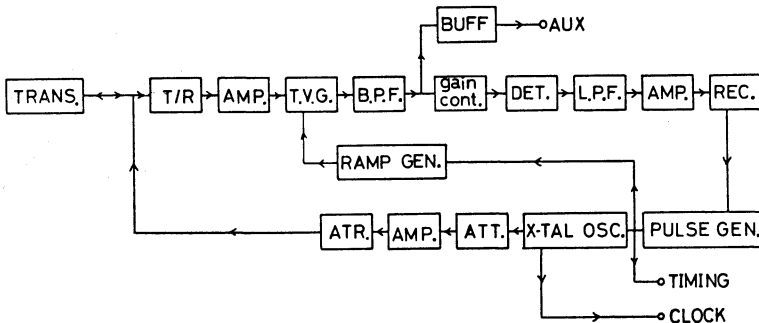
鉛直風速  $w$ は(2)より、

$$\frac{w}{C} = \frac{1}{2} \frac{\Delta T}{T_d}$$

ここで、 $T_d$ は受信音40波分の時間であり、 $\Delta T$ は  $T_d$ と送信音波40分の時間の差である。時計としては、1,600 Hzの送信音を水晶発振の8 MHzから通減して作る過程から取り出した。これにより、送信振動数が気温によ



第2図 音波レーダのデータ処理系統。



第3図 音波レーダの信号処理のブロックダイアグラム。

り変化した場合でも、相対的にドップラ効果による振動数の変化が測定できるようにした。

## 2. 測定方法

われわれのグループが開発した音波レーダのデータ処理を第2図に示す。点線で囲んだ音波レーダ測定部の出力—反射音、送信タイミング、基準信号—は、ダイレクトモードでデータレコーダに記録される。実験室内で再生された信号は RMS 電圧計によりエコー強度が、ドップラ変化測定器により鉛直風速が得られる。これらのアナログ信号は、HITAC 10/TEAC DP 5000 のアナログ/デジタル変換器により9トラック磁気テープに記録され、電子計算機に接続したドットプリンタにより図化処理される。処理方法としては、出力に応じて濃淡を示すようにした。

音波レーダの主要な部分の詳細を第3図に示す。水発振器で作られた8MHzの振動を通過して1,600Hzの振動を作る。この通過の過程で16KHzの振動を取り出して、後のドップラ変化やスペクトル解析における時計とする。1,600Hzの振動は、一定間隔のパルス(50ms、または200ms、通常は50ms)としてトランスジューサに送られ、音として空中に送信される。写真1は、パラボラとトランスジューサ、エンクロージャの内壁を示す。パラボラ反射鏡は直径1.2mのFRB製である。エンクロージャは高さ2mの5枚の板の組み合わせでできており、内壁は凸凹のあるウレタンフォームで吸音性を高め、さらに、厚さ1mmの鉛板をはさみSN比を良くしてある。写真2は、音波レーダの全景を示す。パルス状の音を送信した後、トランスジューサは受信器として作用する。受信信号を前段増幅した後、TVG (Time Variable Gain) により音が出た後の時間の逆自乗で利得をあげ、信号の距離による減衰を補償する。信号は、1,600±

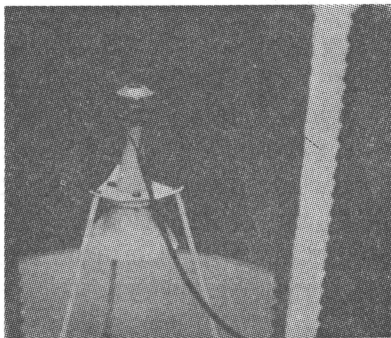


写真1 パラボラ反射鏡、エンクロージャ内壁とトランスジューサ。

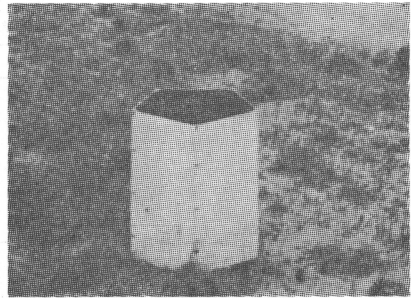


写真2 音波レーダ全景

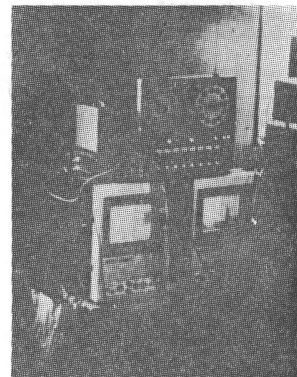
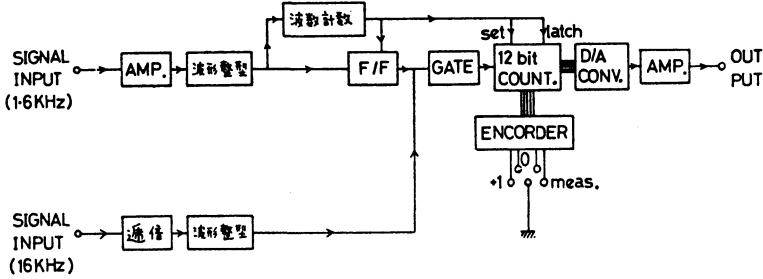


写真3 放電記録(下段)とデータレコーダ(上段)。

50Hzのバンドパスフィルタを通して雑音を除去した後、データレコーダと放電記録計へ分岐する。音の送信の繰り返しのタイミングは放電記録計でコントロールされ、8秒と16秒の2段切り換えである。この繰り返し時間間隔は、それぞれ放電記録計で300mと600mの範囲の記録に相当する。エコー、送信タイミング、標準信号(16KHz)は、インターフェースを介してデータレコーダで磁気テープに記録される。写真3は、放電記録計およびデータレコーダによる記録の収集状況を示す。また、音波レーダの諸元をまとめて第1表に示す。

これらの記録は、実験室内で再生される。将来の常時観測を考慮して、記録時と同速度で再生し、エコー強度とドップラ変化または鉛直風速の時間-高度断面図を作成する。スペクトル解析には、1/16にテープ速度を落として再生した。これは、AD変換器のデジタイズの設定性能による制約である。エコー強度は、第2図に示すようにRMS電圧計により得られる。ここでは、熱線風速計用のDISAの55D35型を用いた。時定数は0.1秒にした。これは層厚17mに相当する。



第4図 ドップラ解析装置のブロックダイアグラム。

第1表 音波レーダの諸元

peak power	high 100w (low 10w)
pulse width	50ms (100ms, 200ms)
pulse repetition	8sec (16sec)
range	0-300m (0-600m)
carrier frequency	1,600 Hz
antenna diameter	1.2m
beam direction	vertical
receiver band width	1,600 ± 50 Hz

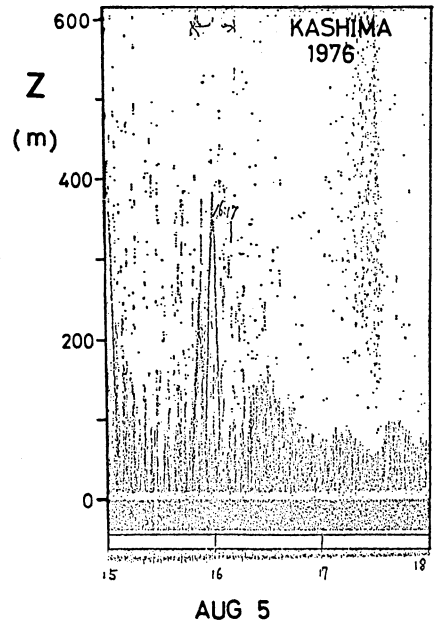
ドップラ変化の解析装置のブロックダイアグラムを第4図に示す。1,600 Hz 周辺の信号は、増幅の後パルス状に波形整形される。この波が40波でゲート回路がOFFになるように調整されている。一方、16 KHz の時計用信号は80倍に通倍し、パルスへ波形整形される。このパルスは、ゲート回路がONの時12ビット構成のカウンタを順次クリアしていく。40波分の信号波が通過した後の残りのビットを数え、経過時間とし、アナログ変換の後鉛直風速として出力する。エコー強度の平均化時間に対応して、鉛直風速の信号には10 HzのLPFをかける。信号40波は層厚4.25 mに相当している。

3. 結果

2章で述べた測定方法により観測したいいくつかの例を紹介する。最初の例は、気球を昇降させ、気球からのエコーのドップラ変化が気球の昇降速度に対応している事を確認する。次は、その応用として熱的ブルームの測定例である。また、スペクトル解析の例を最後に示す。

(1) 気球によるドップラ変化の較正

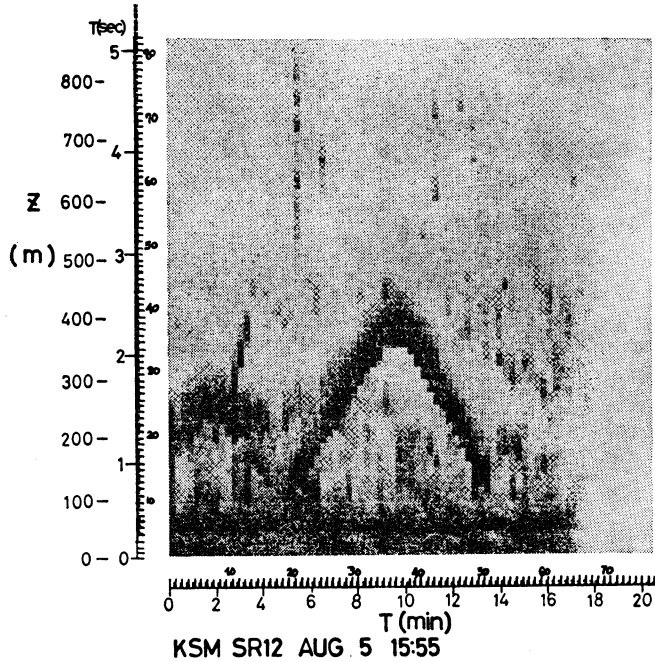
1976年夏に鹿島地区で、海陸風の総合観測を実施した。その際、小型係留気球を音波レーダの近くで昇降させた。音波レーダの放電記録紙を第5図(a)に示す。記録は8月5日の15時55分から16時16分まで行なった。上空



第5図(a) 気球によるエコーの解析。a: 放電記録紙による記録。b, c: ドットプリンタの出力。

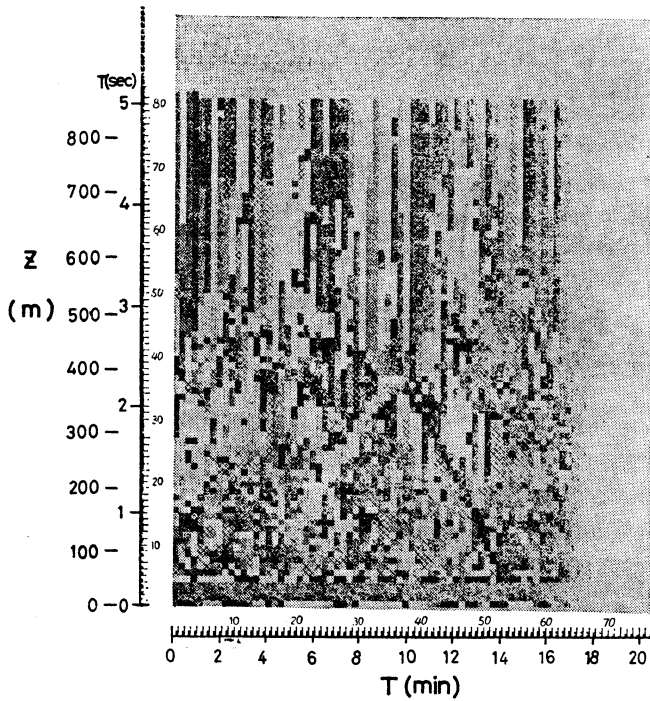
に延びているくさび型の細い黒い線は、気球によるエコーである。データ処理した部分を矢印で示す。第5図(b)に、ドットプリンタによるエコーの強さを、第5図(c)に鉛直風速の高度-時間分布を示す。横の1コマは1送信音に相当しており、この場合は16秒毎に送信している。第5図(b)の濃度の濃い部分は、第5図(a)のエコーの強い部分と一致している。第5図(c)は第5図(b)に対応した鉛直風速を示す。気球の上昇過程で濃度が薄く、下降過程で濃くなっている。気球の上昇下降速度  $w$  (m/s) とドップラ変化解析装置の出力  $V$  (volt) との関係は、

$$w = -0.113V + 0.087$$



KSM SR12 AUG 5 15:55

第5図 (b) エコー強度



第5図 (c) 鉛直風速の時間-高度分布

であった。傾き 0.113 は設計値 0.1 と対応し、定数 0.087 はドップラ変換装置の 0 点の出力 0.061V に対応している。

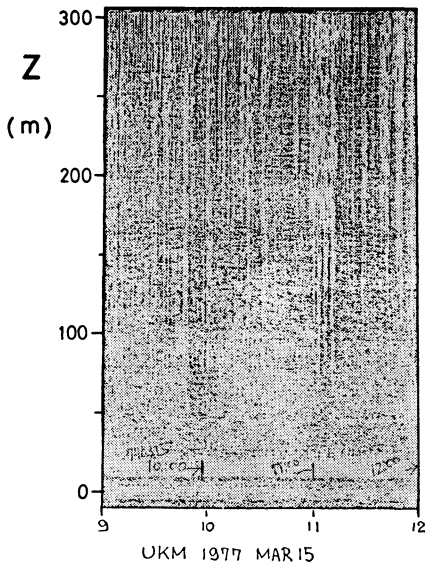
(2) 熱的ブルーム

1977年3月15日、北区浮間の公害資源研究所構内での観測例である。観測は10時から22分間行なった。この日は快晴で風も弱く、第6図(a)に示す放電記録紙では、雑草型のエコーが得られている。第6図(b)と(c)は、ドットプロッタで表わしたエコー強度と鉛直風速の高度時間の強度分布図である。第6図(b)では、30、70、90、130パ

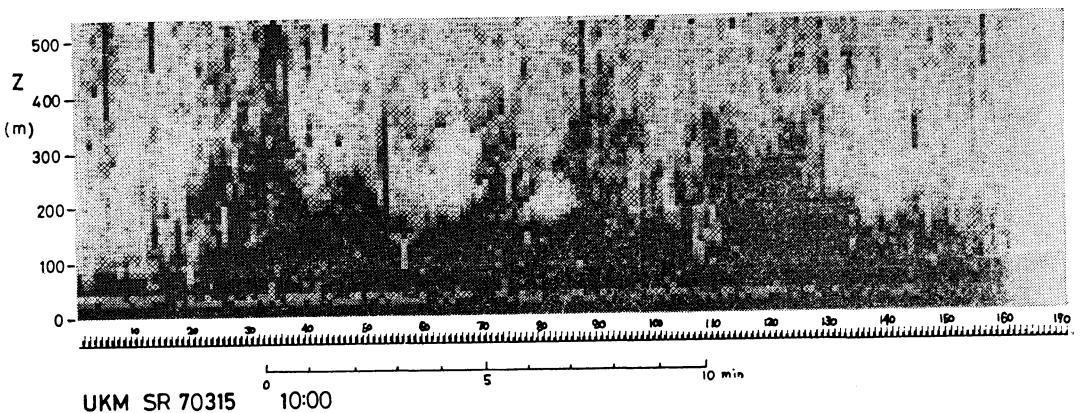
ルスあたりに、熱的ブルームと思われる上に延びた濃いエコーが見られる。放電記録紙ではっきりしない、一つ一つのブルームが明瞭に識別できる。エコー強度と対応する鉛直風速分布を見ると、(b)図で濃い部分が(c)図では濃度が薄く、上昇気流であることを示している。この観測では、ドップラ解析装置の雑音処理が適当でなく、装置の改良による再解析を試みており、定量的な議論は後に残しておく。

(3) スペクトル解析

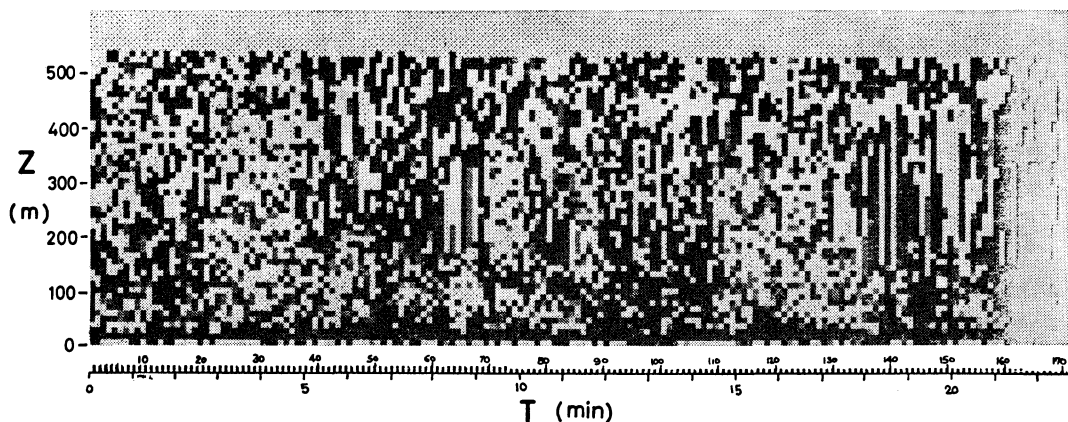
スペクトル解析した例を第7図の左側に示す。エコーは1,600 Hz 周辺の音であるので、ここでは、16 KHz でエコーをデジタル化し、電子計算機でスペクトル解析を行なった。デジタル化する際のタイミングとして、送信音を作る水晶発振 (8 MHz) を通減して得た 16 KHz をデータレコーダに同時記録しておき、外部からサンプリングの同期をかけた。これにより、データレコーダによるワウフラッタを除く、1,200個のデジタル化したデータから、スペクトル解析をした。解析方法は、MEM (Maximum Entropy Method) を用いた。1つのスペクトルは、層厚にして 75 m から得られている。スペクトル計算の周波数の間隔は、MEM の場合任意であり、ここでは 0.8 Hz にとっている。個々のスペクトルの縦軸は、左側の目盛にあるように、最大値を 1 として対数的に取っている。図に示した 8 コのスペクトルは、下の層から上層のスペクトルの鉛直分布を示している。最上段のスペクトルは明瞭なピークを示していない。これは、エコーの SN 比が低く信号音として作用していないためである。スペクトルの横軸は振動数であり、これはまた鉛直風速でもある。ピークの位置は平均鉛直風速を与えている。スペクトルの拡がりは、すなわち、散乱領域の鉛直



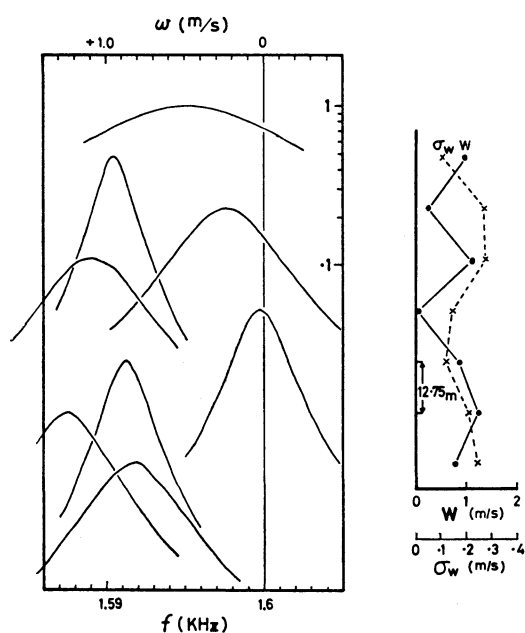
第6図 (a) 熱的ブルームの解析。(a): 放電記録紙における記録。(b)(c): ドットプリンタの出力。



第6図 (b) エコー強度。



第6図 (c) 鉛直風速の時間-高度分布。



第7図 エコーのスペクトル解析 (左側) と鉛直風速の平均値の標準偏差 (右側)。

風速の分布を示している。スペクトル解析から得られた平均鉛直風速  $\bar{w}$  とその標準偏差  $\sigma_w$  の鉛直分布を、第7図の右側に、それぞれ実線と点線で示す。

#### 4. おわりに

音波レーダのエコーのデータ処理方法として、音の強さは通常 RMS の電圧計で得られる。エコーのドップラ変化を一定波数の時間から測定した。この方法は、従来のスペクトル解析からドップラ変化を求める方法に比較

して、電気回路的に簡単であり、常時観測システム的な処理が可能であろう。欠点としては、電気的雑音の影響を受けやすいので、フィルタと波形整形に注意しなければならないだろう。SN 比が悪い場合は、もちろん、スペクトル解析でもこの処理方法でも意味のない結果を与える。エコーのうち数波だけが出力が小さい場合は、波数計数方式では、誤まった値(1波数え違えると4 m/sの誤差が生じる)を与えるが、スペクトル解析では、比較的安定した出力が得られる。

鉛直後方散乱による鉛直方向の風速のみでなく、2組あるいは3組の送受信装置の組み合わせにより、風速の水平成分を測定することも可能である。風速の水平成分の測定は、Mahoney *et al.* (1973) や Balsler *et al.* (1976 a, b) により試みられている。Mahoney *et al.* は、地上へのエコーの到達位置の風による移動を4組の64個のスピーカの集合から判定し、上層の風速を測定した。Balsler *et al.* は、エコーをスペクトル解析し、そのピークの位置から風速を測定した。このシステムをロサンゼルス空港の滑走路の入口に設置し、進入方向とその直交方向の風速を数高度で1分毎に測定するなどの実用化がなされつつある。われわれのグループでも、鉛直方向の送信音を数百m離れた地点に傾斜させて設置したパラボラアンテナの受波を、鉛直方向の場合と同様に、特定波数の時間を測定することにより、上層風速を推定することを試みており、稿を改めて紹介する。

#### 謝辞

この音波レーダおよびデータ処理システムの開発には、京都大学防災研究所の光田寧教授の指導に負う所が非常に大きい。ここで心からの謝意を表する。

また、同防災研究所君の伊藤芳樹、気象研究所の花房龍男氏とからは、いろいろ実りある意見をいただいた。MEMによるスペクトル解析は、当研究所公害1部2課の中田喜三郎氏の好意によるものである。ドットプリンタによる濃淡図のプログラムは当研究所の大場重美電計室長の作成によるものである。以上の方々の好意をここに記して謝意を表わす。

### 文 献

- Aubry, M., R. Chezlemas and A. Spizzichino, 1974: Preliminary results of the atmospheric acoustic sounding program at CNET, Bound. Layer Met., 7, 513-519.
- Balsler, M., C.A. McNary, A.E. Nagy, R. Loveland and D. Dickson, 1976a: Remote wind Sensing by acoustic radar, J. Appl. Met., 15, 50-58.
- Balsler, M., C.A. McNary and D. Anderson, 1976b: A remote acoustic wind sensor for air port

- 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.
- Beran, D.W., W.H. Hooke and S.F. Clifford, 1973: Acoustic echo-sounding techniques and their application to gravitywave, turbulence and stability studies, Bound. Layer Met., 4, 133-153.
- 福島 圓, 秋田錦一郎, 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, 119.
- Mahoney, A.R., L.G. McAllister and J.R. Pollard, 1973: The remote sensing of wind velocity in the lower troposphere using an acoustic sounder, Bound. Layer Met., 4, 155-167.
- McAllister, L.G., J.R. Pollard, A.R. Mahoney and P. J.R. Shaw, 1969: Acoustic Sounder—A new approach to the study of atmospheric structure, Proc. IEEE, 57, 579-587.

### 気象学会および関連学会行事予定

行 事 名	開 催 年 月 日	主 催 団 体 等	場 所
山の気象シンポジウム	昭和53年 6月17日		気象庁
第15回理工学における同位元素研究発表会	昭和53年 6月27日～29日		国立教育会館
第12回夏季大学「新しい気象学」教室	昭和53年 7月25日～28日	日本気象学会	気象庁
WMOシンポジウム「成層圏成分の変化に関する地球物理量的状態とその影響」	昭和53年 9月26日～30日	WMO	トロント (ヨーク大学)
月例会「高層気象」	昭和53年 9月28日	日本気象学会	気象庁
第15回自然災害科学総合シンポジウム	昭和53年10月20日～21日		九州大学記念講堂
第25回風に関するシンポジウム	昭和53年11月28日		東京大学宇宙航空研究所本館講堂
構造物の耐風性に関する第5回シンポジウム	昭和53年12月上旬	日本気象学会	気象庁