

## 2. 音波, 電波を利用したリモートセンシング\*

福島 圓\*\*

### 1. 序言

大気のリモートセンシングの観測対象として考えられるのは, 降雨域に代表される広範囲にわたる気象要素のほか, 局所的な大気汚染に関係するエアロゾル, 大気ガス, 気温高度分布, 風向風速高度分布, 気温変動構造定数分布などがある。また, 観測手法を分類するならば, 数波の赤外光受信システムに代表される受動的手法と, 気象レーダに代表される能動的手法とがある。観測に使用される波は, 音波, 電波, 光波及び電波音波共用(ハイブリッドユース)がある。課題の音波, 電波を利用したリモートセンシングでは, 一応, 無降水時の大気境界層を対象とするリモートセンシングの中で, 音波レーダ, ラス・レーダとその周辺に限定する。

### 2. 音波, 電波と大気との相互作用

一般にレーダでは, 使用する波の伝搬媒質による散乱波を受信して散乱体の性質に関する情報, 例えば散乱体の空間分布あるいは速度分布を求める。散乱体となるものは雨滴, エアロゾル, 大気分子など粒子の場合もあるが, 大気屈折率変動のような連続体として扱われる場合もある。観測対象と音波あるいは電磁波との相互作用を利用して遠隔探査するという立場は, 大気のリモートセンシングの基礎である。観測対象が粒子であれば, 波と粒子との問題を考察すればよい。ここでは, 音波レーダ, パルスレーダ, FM-CW レーダ, ライダとなど各種のレーダに関連して大気乱流の遠隔探査に対する音波, 電波, 光波の比較を考察する。

大気状態を現わすそれぞれのパラメータに対する大気屈折率の変化量を第1表に示す。大気屈折率とは, いま考えている状態におけるそれぞれの波の大気伝搬位相速度と標準状態における位相速度との比( $n$ )で定義される。電波に対する大気屈折率,  $N$  (Refractivity) は次式によって与えられる。

$$N = (77.6/T) [P + 4810e/T]$$

ここで,  $N = (n-1) \cdot 10^6$ ,  $T$  は気温 (K),  $P$  は気圧 (mb),  $e$  は水蒸気圧 (mb) である。大気屈折率の変化量と大気各パラメータの変化量との関係において, 音波は電波, 光波に比べて著しい相違がある。これはそれぞれの波の大気伝搬速度の相違に起因している。音波レーダは, 音波が大気の乱流に伴う温度変動に鋭敏に反応するという性質を利用したリモートセンサであるという説明の根拠が示されたわけである。

大気乱流のリモートセンシングでは, 使用する波の波長の半分のスケールをもつ乱れによる後方散乱 ( $\theta = \pi$ ) を利用する場合が多い。音波, 電波の場合 Kolmogorov のスペクトラムを仮定して, 散乱断面積は散乱角 ( $\theta$ ) の関数として次式で与えられる。

$$\sigma_a(\theta) = 0.016k^{1/3} \cos^2\theta (\sin\theta/2)^{-11/3} C_{na}^2$$

$$C_{na}^2 = 1.85 C_v^2/c^2(\cos^2\theta/2) + C_T^2/4T^2 + 0.02 C_p^2/p^2$$

$$\sigma_r(\theta) = 0.016k^{1/3} \sin^2\chi (\sin\theta/2)^{-11/3} C_{nr}^2$$

$$C_{nr}^2 = (1.59 C_T^2 + 20.1 C_p^2) \times 10^{-12}$$

散乱断面積は単位容積, 単位立体角, 単位入射パワー当りの散乱パワーである。 $k$  は使用する音波あるいは電波の波数,  $\chi$  は入射波の電界ベクトルと散乱方向とのなす角(偏波角),  $C_{na}^2$ ,  $C_{nr}^2$  は, それぞれ音波, 電波の大気屈折率変動に対する構造定数である。同様に,  $C_v^2$ ,  $C_T^2$ ,  $C_p^2$  は, それぞれ風速, 温度及び湿度変動に対する構造定数でそれぞれの変動強度を表わす。また,  $c$ ,  $T$ ,  $p$  は音速, 気温及び気圧の平均値である。これより, 大気乱流による音波, 電波の散乱特性を検討することができる。すなわち, 電波は  $\sin^2\chi$  の偏波特性をもつが,

第1表 音波, 電波, 光波に対する大気屈折率の変化

パラメータの変化量	大気屈折率の変化量 (N-unit)		
	音波	電波	光波
気温 (1 K)	1700	1	1
水蒸気圧 (1 mb)	140	4	0.04
風速 (1 m/sec)	0~3000	$2 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-6}$

\* Remote Sensing of the Atmosphere by Using Acoustic and Radio Waves.

\*\* Madoka Fukushima, 郵政省 電波研究所.

音波は偏波特性はもたず、縦波であるため、進行方向から直角方向への散乱特性はもたない。音波は風速の乱れと強い相互作用をもつが、この項は後方 ( $\theta=\pi$ ) において零となる。全体として Kolmogorov のスペクトラムの特性から  $(\sin \theta/2)^{-11/3}$  の項が生じ、強い前方散乱特性を示すと同時に、散乱強度は周波数の 1/3 乗に比例して強くなるという弱い周波数依存特性をもつことがわかる。

次に、電波と音波とを共用したラス・レーダの原理概要について述べる。ラス・レーダは音波の大気伝搬速度が気温の平方根に比例して気圧に無関係という性質を利用して、鉛直上方に発射されたパルス音波の伝搬速度を電波のドブラレーダで測定して気温プロファイルを求める。音波によってつくられる空気粗密は空気誘電率の変化に対応する。このためパルス音波によって形成される波面に入射するドブラレーダ電波の一部は反射される。反射電波を強くするために、電波音波の球形波面が一致するよう、電波送信アンテナ、音波アンテナ、電波受信アンテナを接近させて配置し、パルス音波搬送波の波長を加減して使用電波の波長の 1/2 にする。この反射電波は反射面の移動、すなわち音速に相当するドブラ効

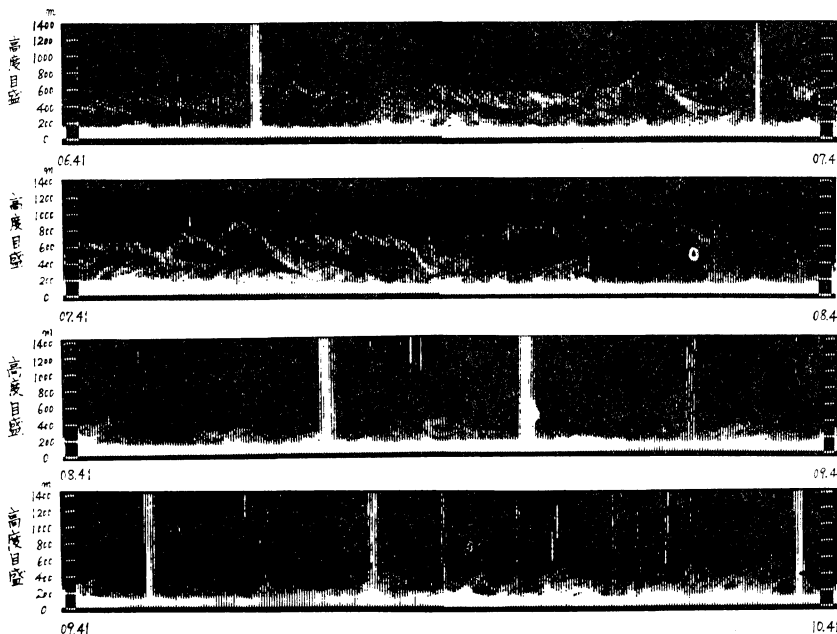
果をうける。つまり、反射電波の周波数は送信電波の周波数よりも常に低い。反射電波のドブラシフト周波数をパルス音波の送信時を起点として時々刻々測定すれば、気温プロファイルが測定できる。数秒ごとにパルス音波を発射することによって連続的に気温プロファイルを監視することができる。

このように、ラス・レーダでは大気という伝搬媒質の音波に対する性質（音速は気温の平方根に比例する）と電波に対する性質（音波による断熱圧縮による気圧変化は大気の誘電率変化に比例する）とが巧妙に組合せられている。ラス・レーダはまた、人工的に形成される音波波面が媒質とともに移動すること、つまり、風の影響をうけることを利用する風向風速高度分布のリモートセンサとして、その開発が期待されている。

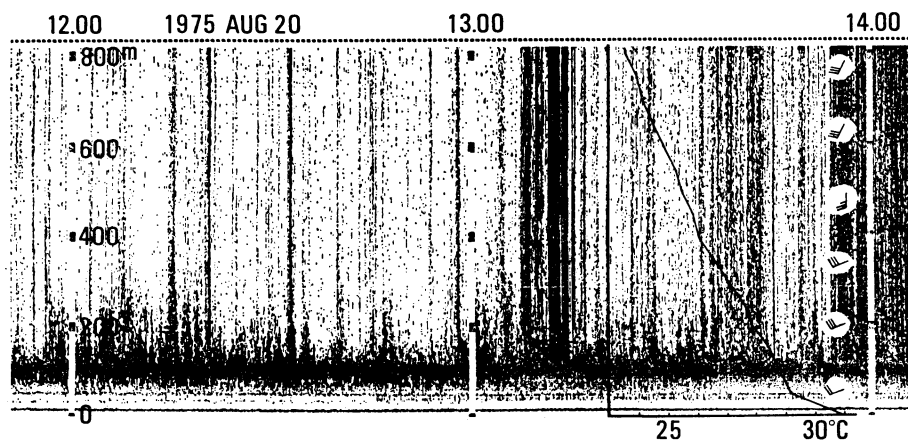
3. 観測成果概要

観測成果のうち、音波レーダ関連のものを中心に、その概観を試みる。

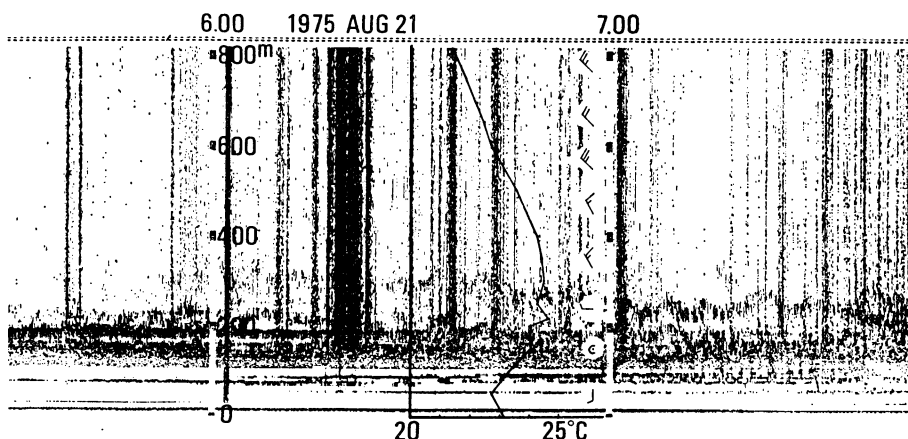
まず、福島等 (1971a, 1971b) によるわが国における最初の固定式音波レーダ観測記録例を第 1 図に掲げる。図は 1971 年 5 月 1 日における連続観測記録で、各段とも



第 1 図 わが国における最初の音波レーダ観測記録例。使用周波数：850 Hz、送信出力：100 W、送信パルス幅：120 m $\cdot$ ec、パルス繰返し周期：12 秒、音波アンテナ：直径 16 m のコンクリートパラボラ。



(a) 日中のサーマルプルームエコー



(b) 早朝の層状エコー

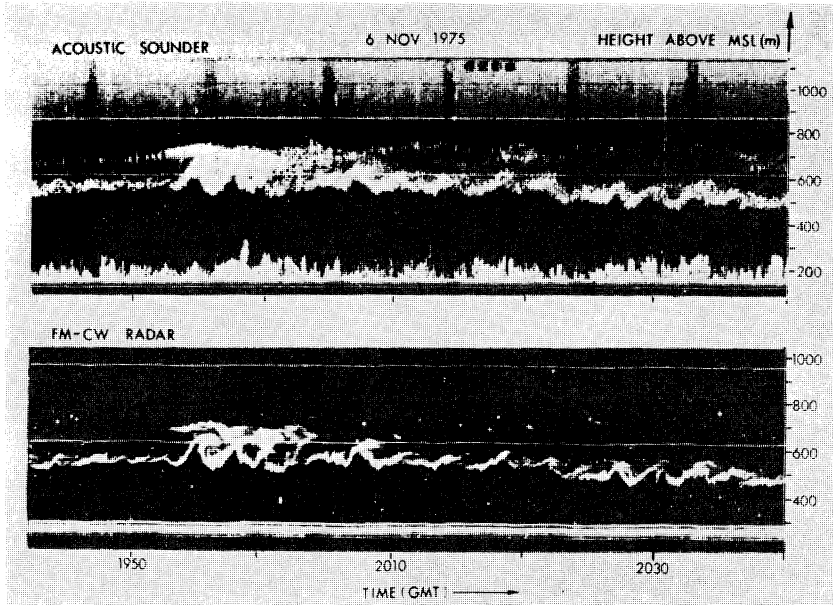
第2図 RRL 移動式音波レーダ及び低層ラジオゾンデによる同時観測記録例（音波レーダ観測記録に重畳させた気温分布高度軸は放球時刻と一致させてある）。

約1時間、図の中の4桁の数字は観測時分、短い横棒は200 m ごとの高度目盛りである。やや厚い層状エコーが07時から08時にかけて高度800 m から300 m へ、また高度1000 m から300 m へとかなり激しく変化している様相が観測されている。なお、記録の全高度範囲を貫く縦縞は飛行機の近傍通過による外部雑音である。

このような固定式音波レーダ観測の実績の上に、トラック搭載移動式音波レーダが福島等(1975b, 1976a, 1977)によって開発された。長沼における性能評価実験中に取得した音波レーダ及び低層ラジオゾンデ同時観測記録を第2図(a), (b)に示す。第2図(a)は、1975年8月20

日、日中プルームエコー出現時の音波レーダ観測記録上に低層ラジオゾンデ観測による気温高度分布及び符号による風向風速高度分布を重畳させて示したものである。この気温高度分布の縦軸の時刻は放球時刻と一致させてある。同様に、第2図(b)は8月21日、早朝層状エコー出現時の音波レーダ観測記録上に低層ラジオゾンデ観測による気温高度分布及び風向風速高度分布を重畳させて示したものである。この場合、逆転層の上下で風向風速の不連続が観測されている。

Gossard *et al.* (1971) による対流圏探査用 NELC FM-CW レーダ及び音波レーダによる同時観測記録例



第3図 NELC FM-CW レーダ及び音波レーダによる同時観測例 (Gossard *et al.*, 1971).

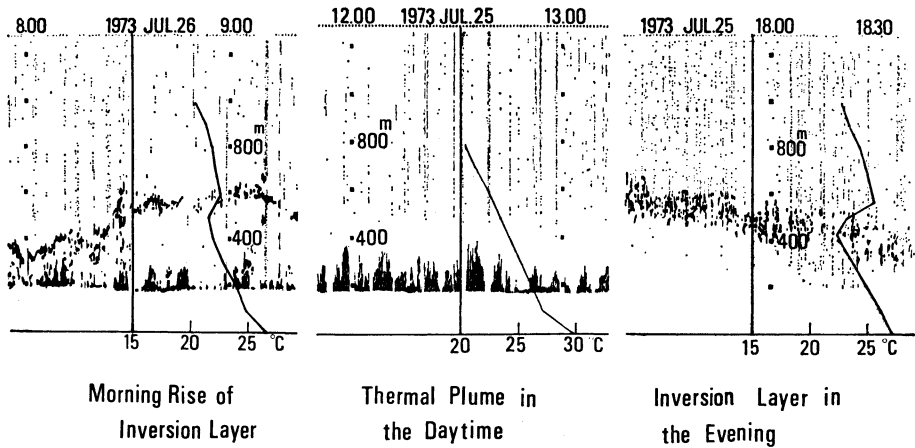
を第3図に示す。FM-CW レーダは、周期的に直線的周波数変調される送信電波を放射して反射目標からの受信電波と送信電波とのビート信号から目標の強弱、位置等の情報を探知するレーダであって、距離分解能及び感度が極めて優れているという特徴をもっている。ここに示されている記録は、晴天時に FM-CW レーダを鉛直上方に向けて観測中、レーダビームを横切って移動して行った波状雲である。ここで波状雲といっても勿論、微小滴の集合ではなくて、大気屈折率変動の強い乱流領域が波動状の空間分布を示したものである。高度 450 m～600 m の範囲に見られる波動状のエコーは礫波の碎ける様相に類似している。これらはシヤに起因する不安定層で安定成層中によく出現するものである。また、音波レーダ観測記録において高度 300 m 位まで強いプルームエコーが見られるが FM-CW レーダ記録では極めて微弱である。気温変動に鋭敏に反応する音波レーダ、波動を鮮明に映し出す FM-CW レーダ、それぞれの特徴を明瞭に示す観測記録例である。

1975年2月 AMTEX 観測期間中、福島等 (1976b, 1978) によって宮古島において音波レーダ観測がなされた。宮古島狩俣における音波レーダ観測記録を概観すると、電波研究所構内における2年間連続の音波レーダ観

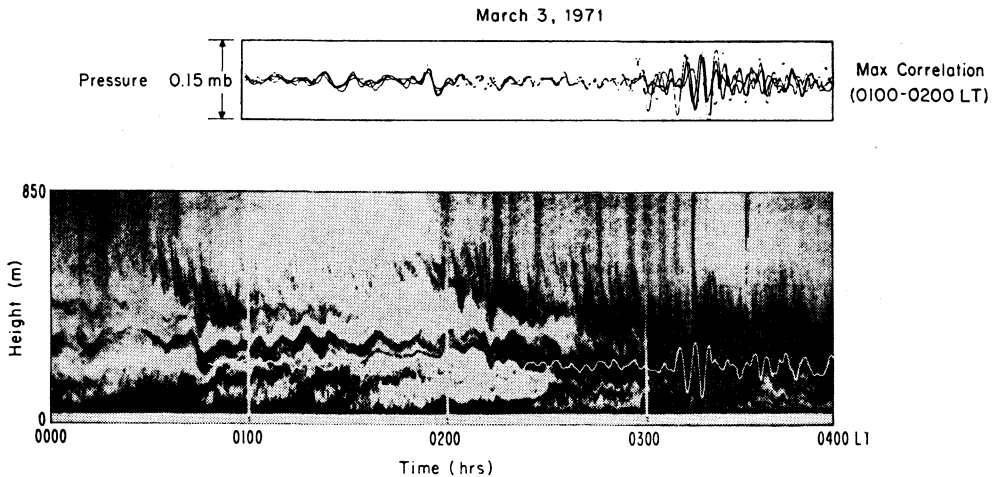
測結果とは大分様相が違う。すなわち、電波研究所構内のような陸上平野部における音波レーダ観測ではプルームエコーは夜間には決して出現しないが、宮古島ではプルームエコーは夜間にも出現する。また、陸上における音波レーダ観測では晴天時であれば、第4図に見られるような、いわゆる早朝の逆転層上昇から日中のサーマルプルーム活動、夜間の層状エコー、という特徴的な日周変化を示す。海洋性大気境界層においては、このような特徴的な日周変化は観測されない。宮古島では接地層の不安定状態によく対応する持続的なプルーム活動が観測されている。

このほか、南極における大気境界層観測研究にも音波レーダが重要な役割りを果している。なお、沈降性逆転層に対応する音波レーダ観測記録例、気温逆転とシヤを伴う接地気層、GBSL (Ground-Based Shear Layer)、に対応する音波レーダ観測記録例なども得られている。

音波レーダはまた、Beran *et al.* (1971) によって開発されたドブラ音波レーダによって風速測定器としての成果も挙げている。ドブラ音波レーダによる風速測定についてはわが国においても Hayashi *et al.* (1978) によって独自の開発が進められている。なお、西宮・赤井 (1979) によってドブラ音波レーダ観測の実用化が検討



第4図 RRL 固定式音波レーダ及び低層ラジオゾンデによる同時観測記録例。



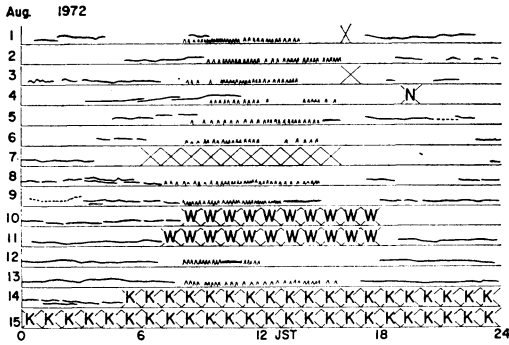
第5図 音波レーダ及び微気圧計による内部重力波の同時観測例 (Hooke *et al.*, 1972).

されている。

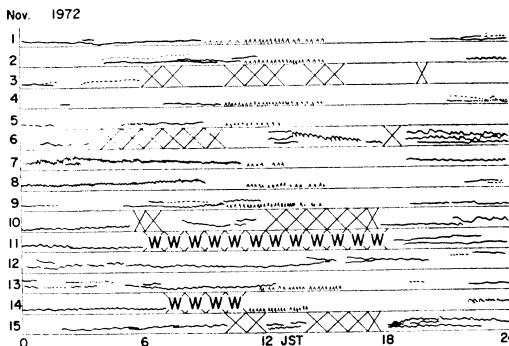
さらに、音波レーダは内部重力波研究に対する定量的データを提供する測器として活用されている。第5図に音波レーダ及び微気圧計による内部重力波の同時観測例を示す。Hooke *et al.* (1972) は、コロラド州 Boulder の Table Mountain の上に設置された音波レーダと微気圧計アレイの観測記録に現われた内部重力波についての対比研究を進めている。内部重力波に対するそれぞれの観測手段は相補的で極めて有力なものと考えられる。すなわち、微気圧計アレイ観測から気圧波の振幅、水平方向位相伝搬速度、方向、波長が得られ、音波レーダ観測からは地上1 km 層の詳細な構造の時間的変化が得ら

れる。

電波研究所では、Fukushima *et al.* (1974, 1975 a) により、1972年4月から1974年3月までの2年間、毎月15日間(1~15日)の音波レーダ連続観測が実施された。高度1 km までの音波レーダ観測記録の縮少スケッチの代表例を第6図(a), (b)に示す。これら24箇月の観測記録から、晴天時大気境界層における気温変動領域の様相を視覚的に概観することができる。すなわち、地上1 km 層の全容を一言で表わすならば、一様に混合された乱れのある大気ではなくて局所的に乱れの強い領域が乱れの弱い大気中に浮遊しているような状態であるということが出来る。なお、2年間の音波レーダ観測記録から得ら



(a) AUG. 1972



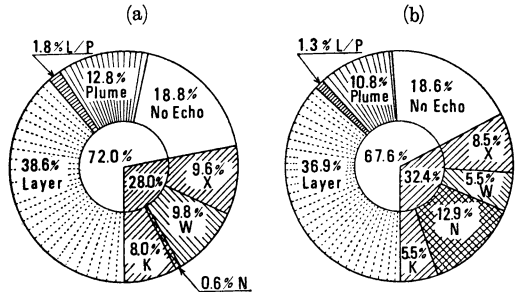
(b) NOV. 1972

第6図 高度1 kmまでのRRL音波レーダ連続観測記録縮小スケッチ。実線は顕著な層状エコー，点線はやや不明瞭な層状エコー，山型印はブリュームエコーを示す。×印，W，N，Kは，それぞれ，雨，強風，騒音，機器故障による欠測を示す。

れたエコーの種類別年間百分率を第7図(a)，(b)に示す。これから，音波レーダは大都市周辺の住宅地域という環境条件において観測可能時間率約70%という予想外の有用性をもつことが確かめられた。

内外における音波レーダ観測研究の結果，一応，音波レーダ観測記録から，晴天時大気境界層における安定度に関する情報取得が可能であることが明らかになった。音波レーダ観測記録に層状エコーが観測された場合は同一高度における顕著な逆転層の出現に対応する。しかも，逆転層より上空でやや安定，下層で中立と推定できる。サーマルブリュームエコーは弱風晴天の場合にのみ出現する。しかも，接地気層より上空約1000 mまでの高度範囲で中立と推定できる。

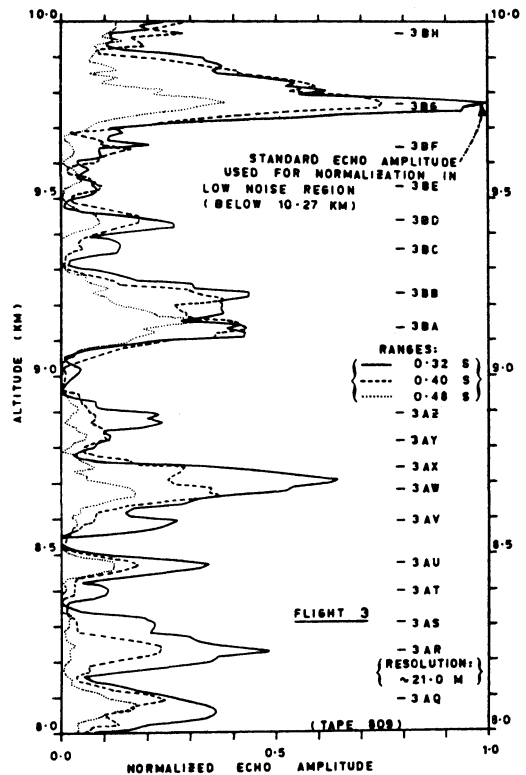
音波レーダは観測点の周囲雑音により，その探査能力



第7図 RRL音波レーダ観測記録 種類別年間百分率。

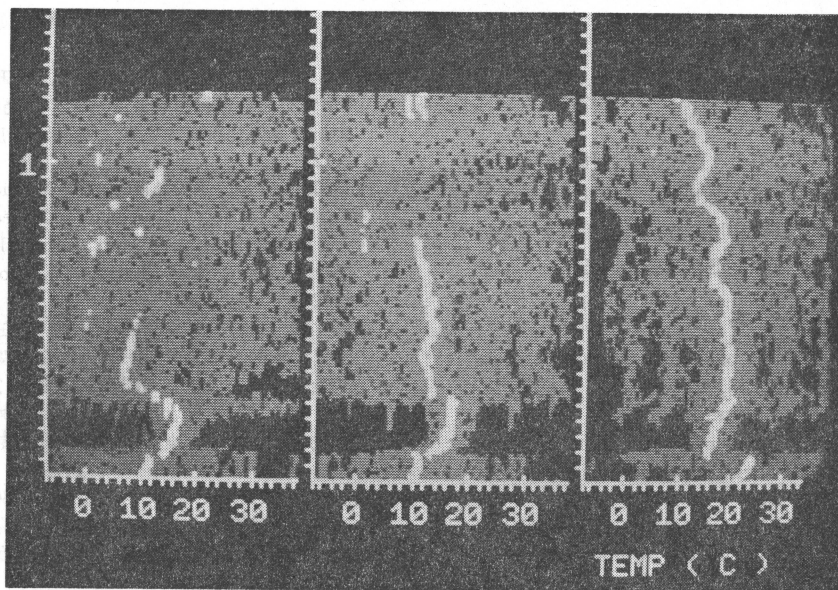
(a) APR. 1972~MAR. 1973

(b) APR. 1973~MAR. 1974



第8図 大気球搭載音波レーダ観測記録例 (Arnold, 1977).

向上に限界があるので，圏界面付近の大気乱流層観測には，完全静寂の上空へ観測点を移す大気球搭載音波レーダ観測も考えられる。このような大気球搭載音波レーダ観測は Arnold (1977) によって試行されている。その観測記録例を第8図に示す。また，地上からの音波レーダ観測によるエコーの最高高度は9 km と言われている



第9図 RRL ラス・レーダによる気温高度分布の測定例。縦軸：高度 (1.2 km まで)，横軸：気温 (°C)

が、最近、電波研究所では coding 方式を採用した音波レーダ観測により時折この程度の高度からのエコーを観測することに成功するようになった。このように、各種の工夫を凝らした観測により音波レーダは圏界面力学研究の一つの有力な手段となるところまできている。

最後に、福島等 (1980) による RRL ラス・レーダ測定例を第9図に掲げる。この測定の諸元は、電波送信出力：80 W，音波送信出力：300 W，波数  $n$ ：200，パルス音波繰返し周期：4 秒，送受信アンテナ間隔：6.6 m で音波アンテナはその中央に配置されている。この測定記録は RRL ラス・レーダの低周波増幅器出力を FFT 周波数分析器 (FFT 4512 KANOMAX) により周波数分析して温度に換算し、気温高度分布図形として表示させた CRT 画面を撮影したものである。4 秒間隔で送信されるパルス音波ごとに 1.2 km まで測定された気温高度分布図形の 3 齣分が表示されている。ラス・レーダは今後の改良と実用化が期待されているものである。

#### 4. 将来展望と結言

Henry Booker・William Gordon (1950) によって電波の散乱伝搬理論が提唱されて以来、伝搬媒質としての大気の観測研究が Radio Scientist をもとり込んで過去四半世紀余りにわたって精力的に進められてきている。

音波，電波と大気との相互作用を利用した新しいリモートセンサもその所産である。音波レーダあるいは FM-CW レーダが1969年4月 Proc. IEEE 誌上で紹介され、その有効性が広く認識されるようになってから10年余、前述のように、この方面の技術の進展、応用の展開はまことに目覚ましいものがある。

広く大気境界層研究に活用されている音波レーダは、何といても比較的簡単な装置で大気状態についての視覚的表示データが得られるところに最大の特徴がある。なお、音波レーダエコーの受信強度から大気の乱れの定量的評価についても既にいくつかの試みがなされているが、その精度向上を目的として、最近、電波研究所で標準反射体 (コーナーレフレクタ) 使用による音波レーダ性能較正法に関する研究がなされた。

対流圏観測に関して音波という sonde を手中に収めてから約10年になるが、この sonde は高度約 10 km まで到達している。大気乱流によって散乱された音波を受信するレーダ方式の音波探査に加えて、電音共用の探査技術は、低高度において、一部開発実験中であるが、新しいリモートセンサとして唯今模索中である。この分野は気象学の知識なしには進められぬ夢多い学際的領域であり、学会諸兄からの有形無形の御支援を切望する次第である。

## 質疑応答

井上: 音波探査によって CAT (晴天乱流) の予測は可能か.

福島: 現段階では, このような施設を造れば可能であるというようには答えられないが, 音波は 10 km まで到達しているので電音共用の技術が応用できるかどうか十分検討に値することだと考えている.

## 文献

- Arnold, L.N., 1977: A balloonborne acoustic sounder, *J. App. Met.*, 16, 971-982.
- Beran, D.W., C.G. Little and B.C. Willmarth, 1971: Acoustic Doppler measurements of vertical velocities in the atmosphere, *Nature*, 230, No. 5280, 160-162.
- Booker, H.G. and W.E. Gordon, 1950: A theory of radio scattering in the atmosphere, *Proc. I.R.E.*, 38, 401-412.
- 福島 圓, 秋田錦一郎, 糟谷 績, 1971a: 対流圏音波探査装置による観測, 日本気象学会1971年度春季大会講演予稿集, 220, 72.
- 福島 圓, 秋田錦一郎, 糟谷 績, 1971b: 対流圏下部の音波探査装置による実験, 電波研究所季報, 17, No. 22, 401-406.
- Fukushima, M., K. Akita and H. Tanaka, 1974: Sodar probing of small-scale ordered motions appeared in the atmospheric planetary boundary layer, *J. Met. Soc. Japan*, 52, 428-439.
- Fukushima, M., K. Akita and H. Tanaka, 1975a: Sodar probing of small-scale temperature structure in the clear troposphere, *J. Radio Res. Labs.*, 22, No. 108, 23-43.
- 福島 圓, 秋田錦一郎, 田中 浩, 増田悦久, 1975b: 大気汚染監視用音波レーダの開発に関する研究, 環境保全研究成果集 (昭和49年度), 2, 79, 1-9.
- 福島 圓, 秋田錦一郎, 田中 浩, 増田悦久, 1976b: 大気汚染監視用音波レーダの開発に関する研究, 環境保全研究成果集 (昭和50年度), 2, 82, 1-12.
- Fukushima, M., K. Akita, Y. Masuda and H. Tanaka, 1976b: Features of sodar echoes observed at Miyakojima Island during the AMTEX '75, *J. Radio Res. Labs.*, 23, No. 111, 235-246.
- 福島 圓, 秋田錦一郎, 田中 浩, 増田悦久, 1977: 大気汚染監視用音波レーダの開発に関する研究, 環境保全研究成果集 (昭和51年度), 2, 88, 1-9.
- 福島 圓, 1978: 宮古島におけるソーダ観測, 気象庁技術報告, 93, 東シナ海における気団変質の研究——AMTEX 報告——, 147-151.
- 福島 圓, 秋田錦一郎, 増田悦久, 1980: ラス・レーダ (電波音波共用探査装置) の開発に関する研究, 環境保全研究成果集 (昭和54年度), 2, 102, 1-11.
- Gossard, E.E., D.R. Jensen and J.H. Richter, 1971: An analytical study of tropospheric structure as seen by high-resolution radar, *J. Atmos. Sci.*, 28, No. 5, 794-807.
- Hayashi, M., O. Yokoyama and Y. Kobori, 1978: Acoustic doppler measurements of vertical velocity in the atmosphere *J. Met. Soc. Japan*, Ser. II, 56, 516-522.
- Hooke, W.H., J.M. Young and D.W. Beran, 1972: Atmospheric waves observed in the planetary boundary layer using an acoustic sounder and a microbarograph array, *Boundary-Layer Met.*, 2, 371-380.
- 西宮 昌, 赤井幸夫, 1979: 音波探査による下層大気の風の観測, 日本気象学会1979年度秋季大会講演予稿集, 130, 30.