



Title	冬期の北海道における音波レーダーによる大気境界層の観測
Author(s)	谷口, 恭; TANIGUCHI, Takashi; 菊地, 勝弘 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 42, 27-35
Issue Date	1983-10-25
DOI	<a href="https://doi.org/10.14943/gbhu.42.27">https://doi.org/10.14943/gbhu.42.27</a>
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/14102">https://hdl.handle.net/2115/14102</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	42_p27-35.pdf



## 冬期の北海道における音波レーダーによる大気境界層の観測

谷口 恭・菊地 勝弘・播磨屋敏生・真木 雅之  
北海道大学理学部地球物理学教室

平 松 親  
北海道大学大学院環境科学研究科環境構造学専攻  
(昭和58年3月22日受理)

### **Observations of Planetary Boundary Layer by Means of Sonic Radar in the Cold Season, Hokkaido Island, Japan**

By Takashi TANIGUCHI, Katsuhiko KIKUCHI, Toshio HARIMAYA,  
and Masayuki MAKI

Department of Geophysics, Faculty of Science,  
Hokkaido University  
and

Chikashi HIRAMATSU  
Division of Environmental Structure,  
Graduate School of Environmental Science,  
Hokkaido University

( Received March 22, 1983 )

Observations of surface inversions were made in the Moshiri Basin, Horokanai Town in the northern part of Hokkaido Island, Japan in the mid-winter season of 1982. This basin is known as the coldest region in Japan. Vertical profiles of air temperature were measured by a thermistor probe suspended by a tethered balloon 150 m above ground surface. At the same time, atmospheric stratifications were investigated using a sonic radar (SODAR). Echo patterns by the sodar showed a good correspondence with vertical air temperature gradients except that the echoes near the ground surface disappeared when the cooling was severe. This phenomena took place when the surface temperature decreased below  $-30^{\circ}\text{C}$  or thereabouts, irregardless of the vertical air temperature gradient. Thus, the altitude scale of the sodar recorder required correction because of the decrease of the sonic velocity in the cold atmosphere. Echoes caused by falling snow particles were useful to provide information of the fall velocity and the concentration of the particles in the atmosphere. On snowy days, the frequent removal of snow on the reflector of sodar was necessary to obtain the good records.

## I. はじめに

地上から上空に音波を発射し、大気中で散乱されて返って来た音波を解析することによって大気中の成層状態を知る一つの方法に音波レーダー (SONIC RADAR : SODAR) がある。この方法は間接的ではあるが、連続的・即時的な記録を比較的容易に得られるので、非常に有用である。又、比較的簡単に移動が可能であるので機動性にも富んでいる。その特徴については、CRONENWETT et al. (1972) や WYCKOFF et al. (1973), 福島 (1973), FUKUSHIMA et al. (1974), HAYASHI (1980) 等によって報告されているが、それらは主として常温における観測例が多く、低温時に音波レーダーを使用した報告は僅かしかない。われわれは冬期に音波レーダーを用いて接地逆転の形成過程の観測を行なったが、その中で低温で特徴的と思われるいくつかの現象を得たので報告する。

## II. 原 理

使用した音波レーダーは海上電機株式会社製で、その諸元は Table 1 の通りである。

Table 1. The specifications of the sonic radar.

音波周波数：	1600 Hz	パルス長：	50msec. (100msec., 200msec.)
送信電力：	60W (10W)	反復周期：	4sec. (8sec.) 又は 6sec. (12sec.)
レンジ：	300m (600m) 又は500m(1000m)	アンテナ直径：	1.2m
		防音板高さ：	2.4m

等方的な一様な乱流のある大気中に、ある長さの音波のパルスを発射したとすると、その反射波の強度は距離  $R$  に従って減少し、

$$P_r = P_t C \tau A L \frac{\sigma}{2} \frac{1}{R^2} \dots \dots \dots (1)$$

となる。ここで  $P_r$  は反射波の電力、 $P_t$  は送信電力、 $C$  は音速、 $\tau$  はパルス長、 $A$  は受信アンテナの面積、 $L$  は減衰係数である。 $\sigma$  は散乱断面積で、McALLISTER et al. (1969) によれば、

$$\sigma = 0.08 a^2 L_0^{4/3} \left( \frac{d\theta}{dz} \right)^2 \cdot 1/\lambda^{1/3} T^2 \dots \dots \dots (2)$$

なる関係がある。 $a$  は無次元パラメーター； $L_0$  は乱流の外径、 $\frac{d\theta}{dz}$  は温位の鉛直勾配、 $\lambda$  は音波の波長、 $T$  は気温である。

反射してきたエコーを高度—時間断面に表わしてみると、その時の大気成層状態に従って種々のパターンを示すことが知られている。CLARK et al. (1977) は受信されたエコーのパターンを 11 種に分類している。一方、HAYASHI (1980) は Table 2 に示すように、より実的にこれらを 9 種の型に分類している。

**Table 2.** Classification of echoes (after Hayashi (1980)).

Facsimile record		Meteorological condition
significant	white	— neutral or weakly stable
	vertical (weed)	— thermal plumes
	mixed with vertical and horizontal	— decaying process of surface inversion layer
	horizontal	— surface inversion layer
		surface based
(with isolated)	single	— lifted inversion layer
	multiple	— lifted inversion layers
no significant	black	— rain, snow
	grey	— high wind
	white	— break down

### III. 観 測 結 果

1982年1月下旬から2月上旬にかけての2週間、北海道北部の空知管内幌加内町母子里での盆地冷却の観測に音波レーダーを使用した。ここは日本の寒極として知られている厳寒の地であり、季節的にも最も寒冷な時期を選んだ。一般に盆地状地形では放射冷却が激しく、強い接地逆転が生じることがよく知られているので、この種の観測には好適であった。

母子里盆地は Fig. 1 に示されるように直径 3 km ほどの盆地で、周囲を比高 150~200 m の山地で囲まれている。盆地底中央部の C 点で音波レーダー観測と、地上 150 m までの気温の鉛直分布の係留気球観測を行なった (Fig. 2)。観測点周辺には人家が少なく、音波レーダーの発信音に対する苦情を受けることもなく、音波レーダーの記録にノイズを生じさせる程の交通量も、また騒音源もなかった。

観測期間中に顕著な放射冷却が起こった日は 5 回あった。そのうちの代表的な 3 例について詳しく述べる。

Fig. 3 は 1982 年 2 月 1 日~2 日の例で、最上段が 1 日 15 時から翌 2 日 15 時までの音波レーダーのエコー (00 時過ぎまでは感度が違う) と、約 3 時間毎に地上 150 m までの気温の鉛直プロファイルと、その下の○印は雲量と、その下段は降雪や曇などの気象現象、そして最下段に地上気温の時間変化を示している。観測地の日没は 16 時半頃であり、日没後の地上気温の下降と共に逆転層が急速に発達し (図中濃い黒色)、夜間はその高度、強さが多少変動しながらも安定した層状のエコーを示していた。翌日の日出後の気温上昇 (08 時頃) に伴ってエコーは衰退したが、それでも正午頃まで持続してから消滅した。この記録から、一日のうち、大半の時間は接地逆転が起こっていたことがわかる。この日は放射冷却が強かったため、最低気温は -38.1℃ まで下がったが、日中はかなり気温が上昇し、2 日 13 時 30 分頃には -10℃ 近くまでになった。午後は日射によって地表面が暖められて不安定になり、thermal plume による特徴的な雑草型エコーも生じていることが認められた。温位の鉛直勾配とエコーの出現状態は非常に良く対応していたが、しかし 21 時~09 時の間は、気温が逆転しているにもかかわらず、下層ではエコーが消えていた。こ

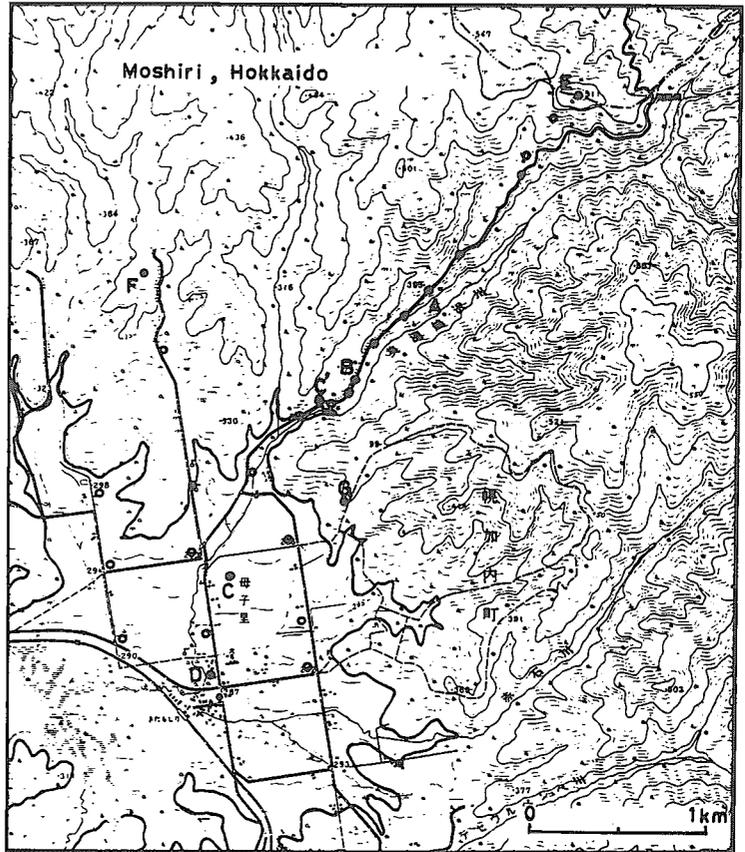
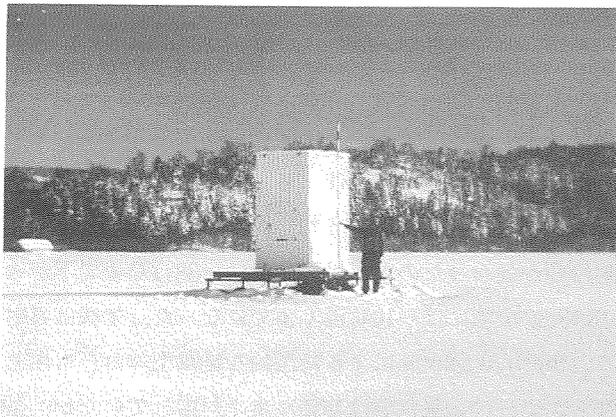
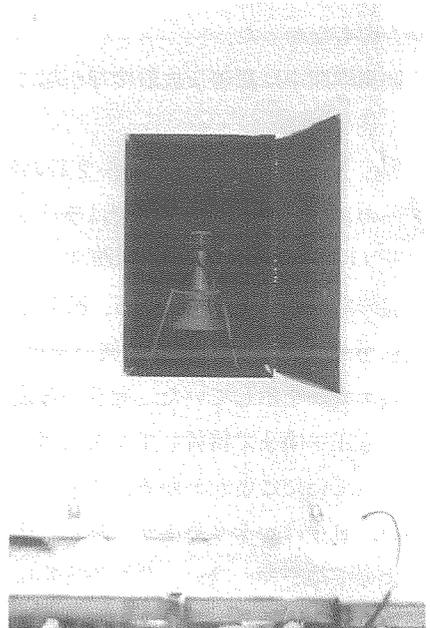


Fig. 1. An arrangement of the observation points in the Moshiri Basin, Hokkaido Island.

Fig. 2. Photographs of the observation site of sonic radar (a) and transmitter/receiver inside the shelter (b).



(a)



(b)

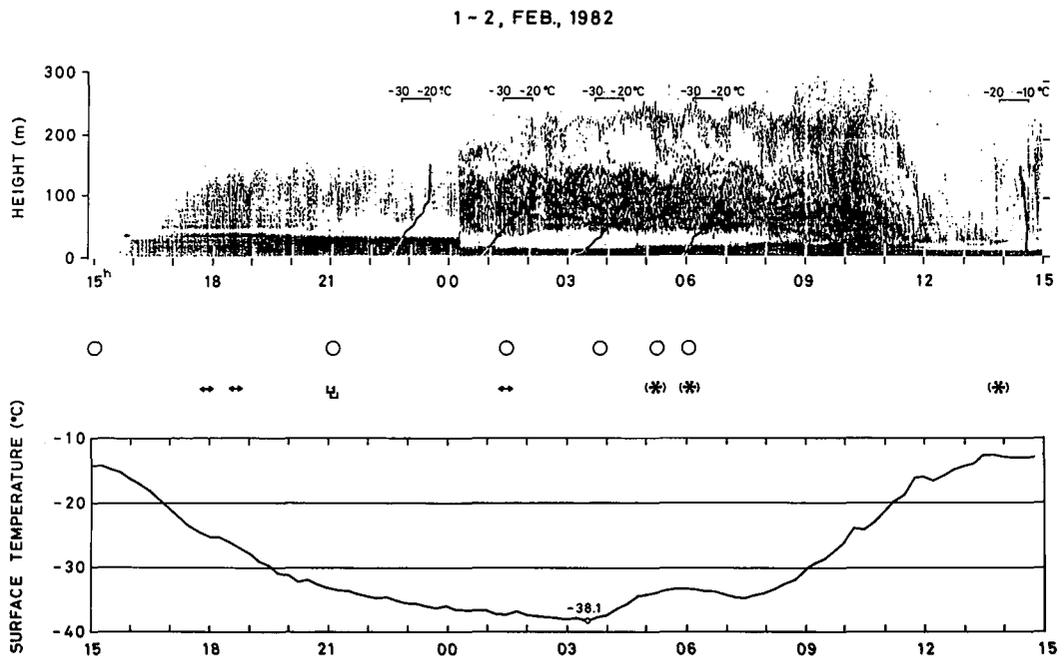


Fig. 3. Air temperature profiles superimposed on the sonic radar echoes (upper), weather conditions (middle), and surface air temperature on Feb. 1~2, 1982.

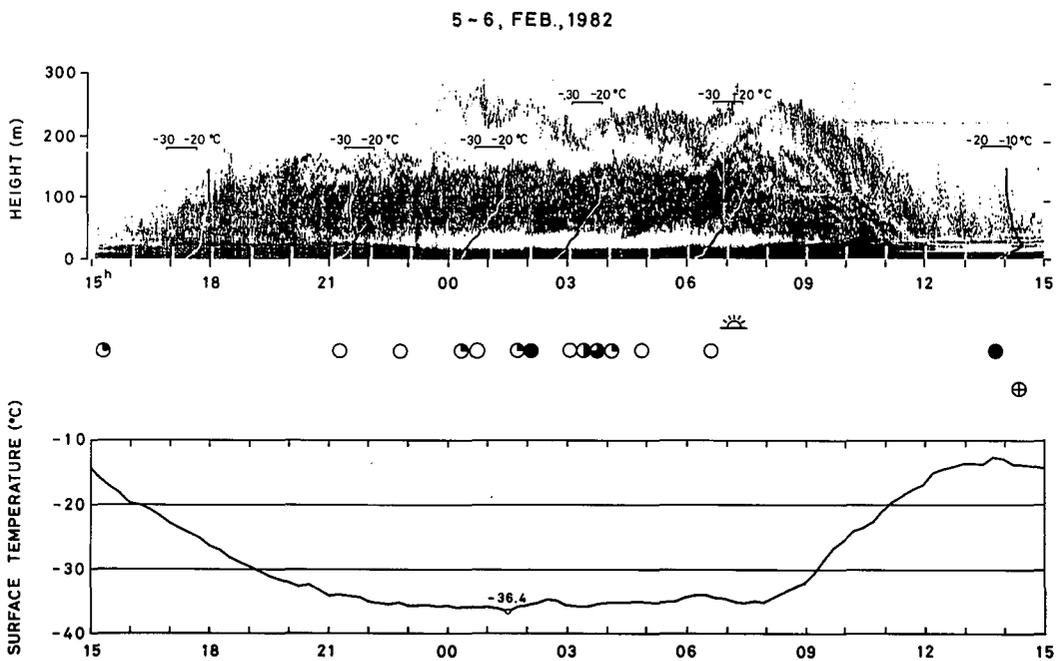


Fig. 4. Air temperature profiles superimposed on the sonic radar echoes (upper), weather conditions (middle), and surface air temperature on Feb. 5~6, 1982.

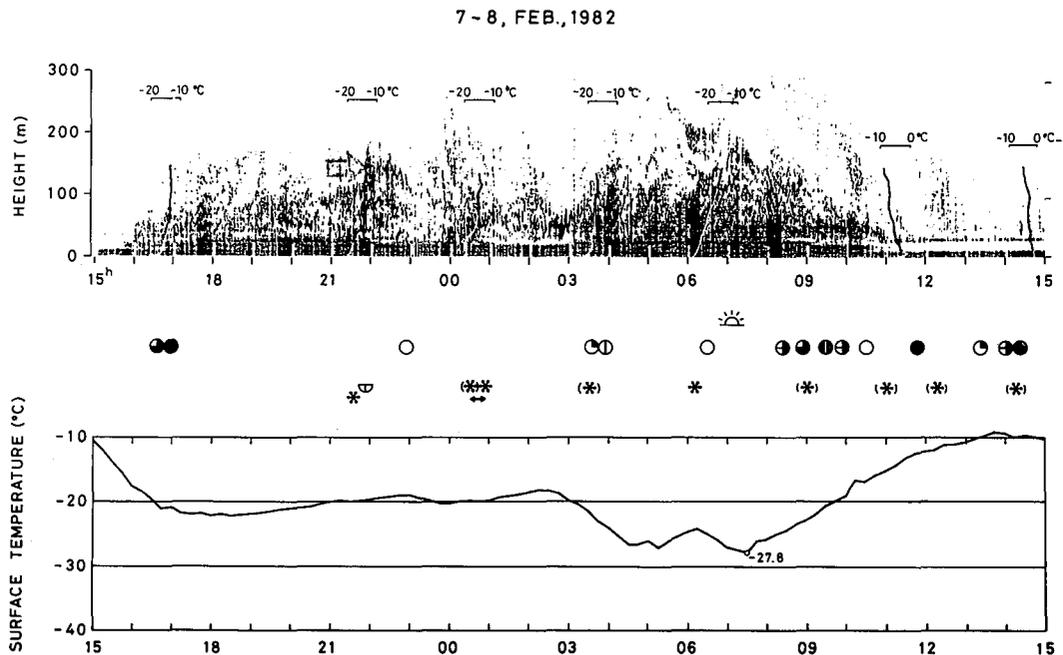


Fig. 5. Air temperature profiles superimposed on the sonic radar echoes (upper), weather conditions (middle), and surface air temperature on Feb. 7~8, 1982.

の空白部は地上気温が約 $-30^{\circ}\text{C}$ に下がると生じ、気温の下降に対応して厚さを増し、翌朝、気温が $-30^{\circ}\text{C}$ 以上になるとなくなっている。また、この空白部の上端の高度の気温を係留気球による気温の鉛直分布から読み取ってみると、やはり $-30^{\circ}\text{C}$ 前後であった。

Fig. 4は1982年2月5日~6日の例で、この日は最低気温は $-36.4^{\circ}\text{C}$ まで下がった。Fig. 3と比較して、地上気温の変化や、逆転層の形成過程、地上気温が約 $-30^{\circ}\text{C}$ 以下に下がると下層のエコーが消える現象などが非常に良く似ている。

Fig. 5は1982年2月7日~8日の観測例である。この日は降雪があってあまり最低気温は低くなかった。降雪があると、エコーが下がって来たり、地上気温が上昇しているのがわかる。また、Figs. 3, 4で述べた下層でエコーが消えることもなかった。他の観測例についても同様に、地上の冷却が強かった日には下層のエコーが消え、その現象が起こる条件は地上気温が約 $-30^{\circ}\text{C}$ 以下に下がる時に対応していた。

#### IV. 考 察

前節の結果から、約 $-30^{\circ}\text{C}$ 以下の気塊からはエコーが返って来ないという結論が得られるが、気温が下がること自体が原因なのか、あるいは気温が下がることによって副次的に生じる現象が原因しているのかは現在のところ不明である。音波に対する空気特性のうち、 $-30^{\circ}\text{C}$ 付近で急激に変化するような特性はなさそうなので、盆地状地形に特有の成層構造が原因であるかも知れない。ただ、空白部分より上方のエコーは通常通り記録していることなどから考えて、測器自体が

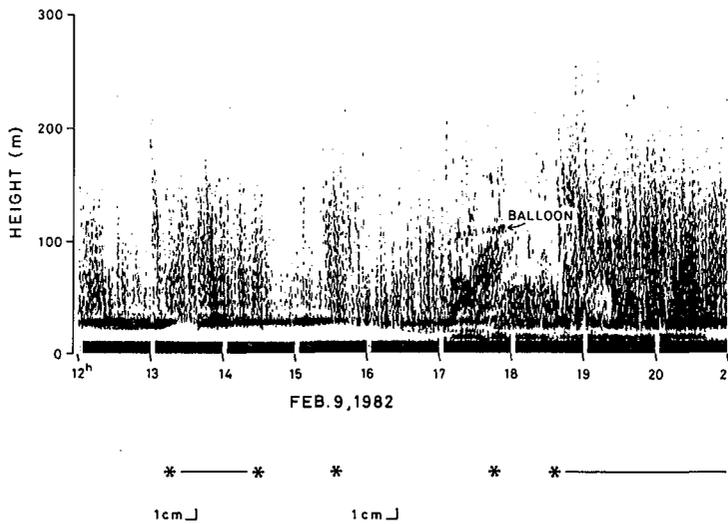


Fig. 6. Sonic radar echoes of the tethered balloon kept at the constant altitude.

低温で劣化しているとは考え難い。

Fig. 6は無風時に一定高度に気球を係留し続けた時の記録であるが、この時の音波レーダーの記録器の高度目盛で読み取った気球の高度と、実際の係留索の索長とは約10%の相違があった。この原因は次のように考えられる。音波レーダー記録器の高度目盛は常温における音速の値を代表にとって目盛っており、今回のように極端に低温の条件下では気温の低下によって音速が減少して、見かけ上実際より高い位置にエコーが出てしまう。試みにこの例で、気柱の平均気温を求め、音速の近似式  $v \text{ (m}\cdot\text{sec}^{-1}) = 331 + 0.6 T \text{ (}^\circ\text{C)}$  から音速を計算して高度目盛を修正し、改めてエコー高度を読み取ると実際の索長に近くなった。従って、低温下で音波レーダーを使用する場合には、高度目盛の修正が必要である。

Fig. 6で、\*印で示した部分では降雪があった。それに対応して特徴的なエコーが記録されていた。HAYASHI (1980) の分類によると、雨や雪のエコーは no significant としているが、われわれはこのエコーにも着目して解析を試みた。降雪のエコーにはかなりはっきりした濃淡の縞があり、記録紙の座標軸に対して右下がりに傾いていた。この傾きから、雪の結晶がある距離を落下するのに要する時間を読み取って落下速度を計算してみると、約  $50 \text{ cm}\cdot\text{sec}^{-1}$  になり、この時降っていた雲粒付樹枝状結晶の落下速度と一致するので、このエコーは確かに降雪の挙動を反映していると考えられる。従って音波レーダー記録を基にして降雪の有無を判断したり、降雪セルの規模や降雪粒子の空間密度を推定することが可能なので、将来は降雪現象を知るためのモニターとして音波レーダーを積極的に利用する方向も考えられる。

Fig. 6で1 cmと示した時刻にアンテナに積もった雪を排除した。この程度の積雪では記録に大きな影響がないが、Fig. 7に示すように、アンテナ面上の積雪が10 cm程度になると、除雪の前後でエコー強度がかなり違い、積雪が受信信号に大きな影響を及ぼしていることがわかる。こ

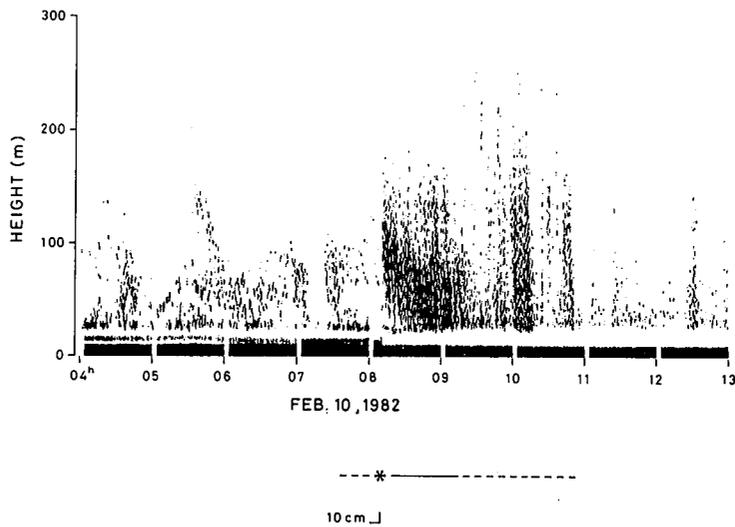


Fig. 7. Effect of removal of snow from the reflector of the sonic radar.

のように、多雪地域で音波レーダーを使用する場合には除雪対策も必要であることがわかった。

## V. ま と め

寒冷地での厳冬期における下層大気音波レーダーと係留気球の同時観測から、以下のような結果を得た。

- 1) 盆地における接地逆転の形成過程の観測から、大気の成層状態と音波レーダーのエコーとは良く対応していたが、地上気温が $-30^{\circ}\text{C}$ 以下に下がった時には気温が逆転しているにもかかわらず、下層のエコーが消える現象が起こった。
- 2) 低温で音波レーダーを使用する場合には、音速の減少による高度の誤差を修正する必要がある。
- 3) 降雪のエコーを解析することにより、降雪現象の種々の情報が得られる。
- 4) 多雪地域ではアンテナの除雪が必要である。

謝辞 この研究観測を行なうに当たり、御協力下さった北海道大学農学部附属雨竜地方演習林長五十嵐恒夫博士、同演習林母子里作業所松本吉夫技官および所員の方々に感謝の意を表します。また、観測の支援や測器の保守に協力してくれた当教室気象学講座の学生諸氏に感謝致します。また、低温における音波レーダーの特異な現象について御助言を下された通商産業省工業技術院公害資源研究所の林正康氏に厚くお礼申し上げます。

この研究は、文部省科学研究費補助金自然災害特別研究の内の計画研究「作物被害の要因としての接地層内の異常冷却の発生機構と量的予知に関する研究」(研究代表者、東北大学近藤純正教授)(研究課題番号 57020006) の予備観測として行なわれたものである。

## 文 献

- CLARK, G. H., E. CHARASH and E. O. BENDUN, 1977 : Pattern recognition studies in acoustic sounding. *J. Appl. Meteor.*, **16**, 1365–1368.
- CRONENWETT, W. T., G. B. WALKER and R. L. INMAN, 1972 : Acoustic sounding of meteorological phenomena in the planetary boundary layer. *J. Appl. Meteor.*, **11**, 1351–1358.
- 福島 圓, 1973 : ソーダによる対流圏観測. 気象研究ノート, **116**, 483–497.
- FUKUSHIMA, M., K. AKITA and H. TANAKA, 1974 : Sodar probing of small-scale ordered motions appeared in the atmospheric planetary boundary layer. *J. Meteor. Soc. Japan*, **52**, 428–439.
- HAYASHI, M., 1980 : Acoustic sounding on the lower atmospheric inversion layer. *J. Meteor. Soc. Japan*, **58**, 194–201.
- MCALLISTER, L. G., J. R. POLLARD, A. R. MAHONEY and P. J. R. SHAW, 1969 : Acoustic sounding — a new approach to the study of atmospheric structure. *Proc. IEEE*, **57**, 579–587.
- WYCKOFF, R. J., D. W. BERAN and F. F. HALL JR., 1973 : A comparison of the low-level radiosonde and the acoustic echo sounder for monitoring atmospheric stability. *J. Appl. Meteor.*, **12**, 1196–1204.