

Xバンドレーダーによる降雪の鉛直断面観測

Observation of Snowfall in Vertical Plane with X-band Radar

石川忠晴^{*}、西岡正訓^{**}、吉田武弘^{***}、木村繁夫^{****}

By Tadaharu ISHIKAWA, Masakuni NISHIOKA, Takehiro YOSHIDA and Shigeo KIMURA

We converted a small commercial X-band radar into an instrument for measuring three dimensional distribution of rain drops and/or snow flakes in the air. In this paper, we present the results of a test on its ability of measuring snow flakes distribution. The radar echo clearly shows that crows of snow flakes are advected by wind, which pattern corresponds to the results of observation on the ground in good accuracy. A consideration is made to rectify the nonlinearity of echo attenuation in distance.

Keywords: X-band radar, Snowfall, Field study.

1. はじめに

気象観測にレーダーが使用されるようになって以来、レーダーを用いた気象・水文現象の研究が盛んに行われるようになった。最近、ドップラー・レーダーや二重偏波レーダーなど高度なレーダーの開発によって、この分野の研究がさらに発展すると考えられている。

ところで、気象レーダーというと、鉛直軸のまわりにアンテナの回転する機械が建物などに据えられている姿がイメージされる。実際、現在あるレーダーのほとんどはそのような形をしている。しかしレーダーそのものは、電波ビームを空中に発射してエコーを受信するというだけのものであるから、建物に固定する必要もなければ、鉛直軸の廻りに回転しなければいけないということもない。

そこで筆者らは、”湖などの現地調査で流速計や水質計を使用するのと同じ感覚で、調査をしたい地域に

* 正会員 工博 東京工業大学教授 大学院総合理工学研究科環境物理工学専攻

(〒227 横浜市緑区長津田町4259)

** 学生会員 東北大学大学院工学研究科修士課程

(〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉)

*** 日本無線(株)三鷹製作所特機技術部副参与

(〒181 三鷹市下連雀5-1-1)

**** 日本無線(株)三鷹製作所特機技術部特機四課主事

(〒181 三鷹市下連雀5-1-1)

簡単に運ぶことができ、観測したい方向を三次元的に自由に選べるレーダーができないものか”と考え、次節に述べるように、市販のXバンドレーダーを改造した。レーダー本体の性能は一般の気象レーダーより劣ってはいるが、しかし上に述べた機動性によって、流域調査などに便利な道具となる可能性がある。

本レーダーは、次のような理由で、特に降雪現象の観測にその特徴を発揮すると考えられる。すなわち、雪雲の高度は低いので、降雪観測は降雨観測より地形遮蔽の影響が大きく、対象領域を有効に捉えるにはレーダーを移動するのが有利である。また、雪は風によって移流されてしまうから、上空を水平二次元的にサーチするだけでは地上降雪との対応を付けにくく、異なった高度のデータを取れる装置が有利である。そこで筆者らは、開発したレーダーで降雪の鉛直断面観測を行ってみたので、その結果を報告する。

2. レーダーの諸元

改造に使用したレーダーは日本無線(株)製の漁場監視用レーダー (JMA-786)であり、表-1に示す基本特性を持っている。また、主な改造点は以下のとおりである。

表-1 レーダー諸元

送信周波数	9 7 4 0 H z
尖頭電力	2 5 K w
繰り返し周波数	7 5 0 H z
ビーム幅	4° ± 0. 5°
サンプリング周期	1. 6 7 μ s (2 5 0 m)

- ① パー・アンテナをパラボラ・アンテナに付け替え、空間分解能を向上させる。
- ② 受信部特性を LinearからLogに変更する。
- ③ データ収録部をパソコンとハードディスクとし、これに合わせて信号処理部を改造する。
- ④ レーダ回転軸を鉛直から水平に変更し、全体を水平回転台に載せる。

写真-1にレーダーの外観を示す。レーダーを鉛直に回転させながら架台を水平回転させることにより、12分で全天球をサーチできる。また、写真に示す程度の大きさであるから、このままワゴン車に載せて輸送できる。使用電源は通常の100V交流で、使用電力は信号処理装置等も含めて約1000Wである。

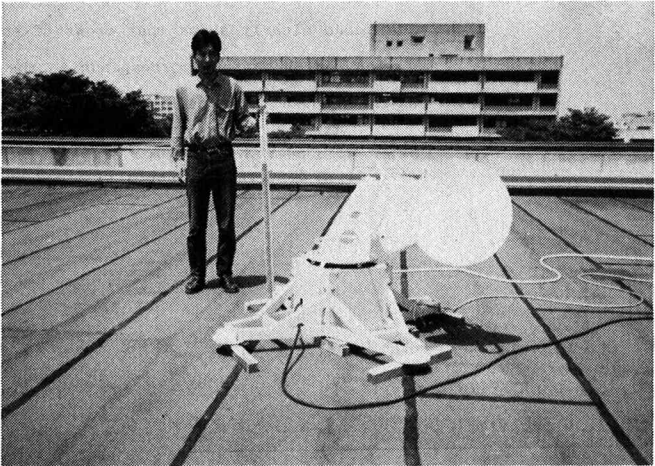


写真-1 レーダーの外観

3. 現地観測の概要

現地観測は、平成4年1月上旬から2月上旬にかけて、岩手県和賀郡沢内村で実施した。沢内村は奥羽山脈の東麓の盆地にあり、最大積雪深が2 mを越える豪雪地帯である。同地域では、降雪時には南西の風の卓越することが多いので、その方向の視野が開けた沢内村立雪国文化研究所にレーダーを設置した。観測地域の平面地形とレーダー位置及び主要観測線を図-1に示す。

今回は初めての観測であり、本レーダーでの雪の見え方や沢内村での降雪特性が不明であったので、レーダーの運転方法を次のように限定した。すなわち、アンテナの回転面を風上方向に向けて水平

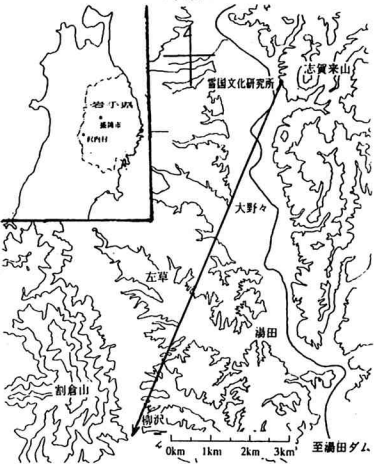


図-1 観測地域及び観測線

回転を止め、その方位の鉛直断面を連続的にサーチする。このようにして降雪が移流されてくる状況を捉え、地上での観測結果と比較する。

地上観測では、レーダーサイトで以下の2項目を記録した。ひとつは積雪量であり、定型の板上に積もった雪を定期的に採取して融解し、その重量を計測した。計測間隔は60分を標準とし、降雪量が大きい場合に30分とした。しかし、後に示すように降雪強度は短時間に大きく変動するので、60分積雪量を単純にレーダーエコー強度と比較するには問題がある。

そこでレーダー観測と独立に、観測員が「目視による降雪強度」の変化を野帳に記録した。器械による測定に比べると安定性に問題があるかもしれないが、しかし人間の眼というのは案外確かなもので、慣れてくると個人差はあまりない。(ただし将来的には器械によって計測できるように工夫したいと考えている。)

4. 観測結果

4. 1 地上降雪量との比較

レーダーエコーの時系列の例を図-2に示す。レーダーエコーの強弱は空中の雪密度と相関を持つものと期待されるが、その相関関係を定量的に表すのは容易でない。というのは、雪の運動は風の動きに敏感であるから、地上で観測される雪と空中の雪を対応させる際に時間的・空間的なズレを考慮しなければならないからである。⁽¹⁾しかしこのズレの評価を厳密に行うのは難しい。ここでは次のように評価してみた。

秋田地方気象台での高層気象観測によれば、観測期間における上空1000mにおける風速は10~15m/sであった。一方レーダーサイトにおける地上風速はまちまちだったが、以下に用いるデータの収集時には数 m/sのオーダーであることが多かった。そこで、後に示すレーダーエコーの時系列も参考にして、やや粗っぽいが、移流速度を6 m/sで代表させる。一方、雪片の落下速度は1 m/s程度であるから⁽²⁾、風速と落下速度の比を6:1と仮定して、風上側6 km地点の上空1 kmにおけるレーダーエコー強度をレーダーサイトの積雪量と比較した。なお、雪片の到着する時間を考慮して、地上観測データを20分ずらして用いる。また、地上観測データが60分平均値であることから、レーダーエコー強度も60分平均値とした。

解析結果を図-3に示す。データは、かなりバラついており、両者の相関は小さい。このバラツキの原因はいくつか考えられる。すなわち、①レーダーエコー強度と雪密度の関係が一価関係ではないかもしれないこと、②雪片の落下経路が一定しないために地上で見る雪片とレーダーで見るそれが別物かもしれないこと、③雪密度と降雪量は一価の関係にないこと(例えば極端な場合、雪片が上昇気流で吹き上げられれば降雪量はマイナスになる)、④レーダーエコーと雪密度の関係が非線形であり、1時間平均で比較するのが適当でないこと、⑤地形と風向などの関係で積雪量データの代表性に問題があるかもしれないこと、などである。

このうち、①については雪片そのものの特性についての基礎的研究が必要で、ここでは特に取り扱わない。②、③については気流に関する検討が必要とされる。④については地上データの短時間変動が得られれば検討できる。⑤については、多地点で積雪量計測を行い比較する必要がある。ここでは、④について、次節で検討する。

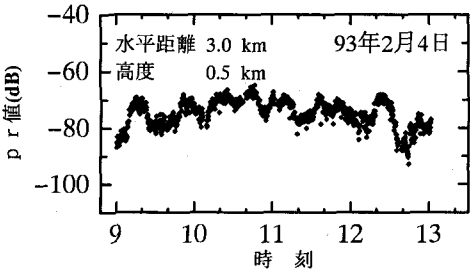


図-2 レーダーエコーの時系列

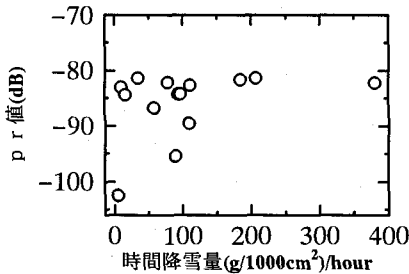


図-3 地上積雪量と空中エコーの関係

4. 2 “降雪の息”とレーダーエコーとの対応

「目視による降雪強度」とレーダーエコー強度とを比較し、瞬間々々のレーダーエコーが降雪をどの程度とらえているかを検討する。

図-4は、前述した1/6勾配の測線上からのレーダーエコー強度の時系列と、レーダーサイトにおける目視データを比較したものである。風上から「降雪の息」が移流されてくる様子が明瞭に見てとれる。

このことからいくつかのことがわかる。まず、この地域では、「降雪の息」は高密度の雪片群が比較的整然と移流されて生じているらしいということ、次に、レーダーは瞬間々々の空中雪密度をかなり正確にとらえているらしいということ、最後に、目視観測の結果はかなり正確らしいということである。

前節における60分積雪量を用いた検討では、レーダーデータから降雪量を推定するのは無理であるかのように思われたが、しかし、瞬間々々のレーダーエコーは「空中の雪密度」の様子をかなりの確に捉えている可能性が高いと考えられるのである。

5. レーダーデータの基準化

図-5に示すように、降雪の塊がほとんど形を変化せずに流されてくることがある。図中ではA、B、C点などが3枚の図面で明瞭に対応している。このような場合には、恐らく、波形上の対応する位置における雪密度には大きな差がないと考えてよからう。そこで、このような降雪について、異なる距離からのレーダーエコーの対応する点を抜きだして比較することにより、距離によるエコー強度の違いを補正し、基準化することができると考えられる。

図-6がその整理結果である。図中上部の水平線 P_t はエコーの最大値（飽和値）を、下部の水平線 P_b は最小値を示している。さて、このグラフを見ると、飽和値 P_t を基準とした「懸垂曲線」は、最小値 P_b に当たらない限り、ほぼ相似形を保っていることがわかる。そこで次式を仮定する。

$$(P_t - P_r(x)) / (P_t - P_r(3)) = \alpha(x) \cdots (1)$$

ここに、 $P_r(x)$ ：距離 X kmからのエコー強度、 $P_r(3)$ ：距離3 kmからのエコー強度、 $\alpha(x)$ ：距離のみの関数である。

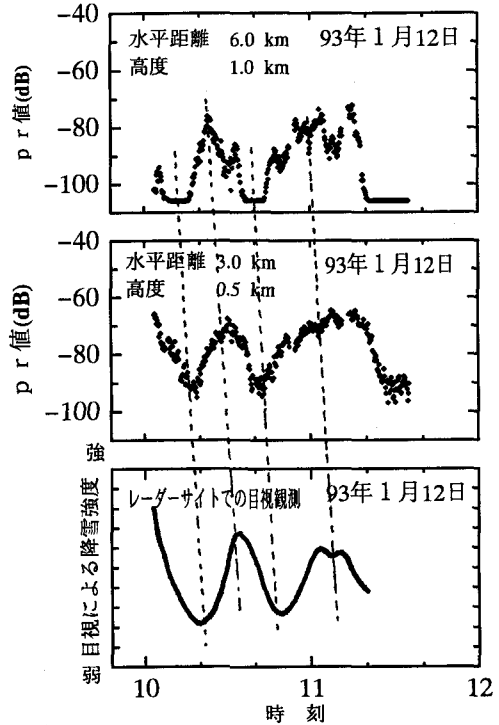


図-4 レーダーエコー時系列と目視観測の対応

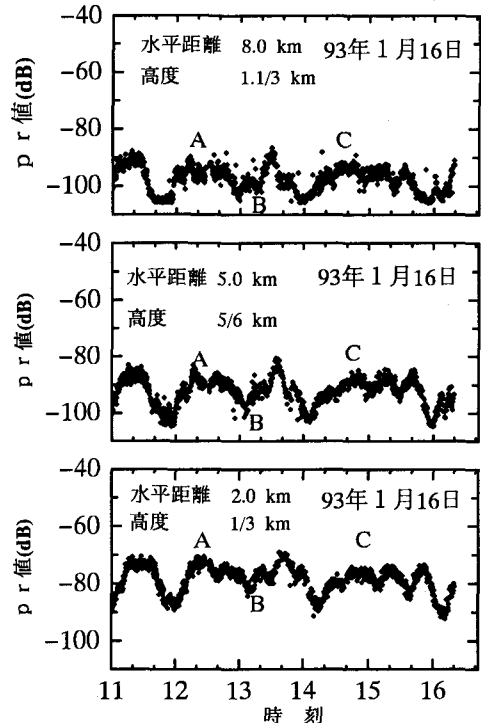


図-5 比較的安定なエコー分布

(1)式の適合度を図-7に示す。遠方で多少のバラつきがあるが、概ね次式で近似できることがわかる。

$$\alpha(x) = 0.67(x - 0.6)^{0.41} \dots\dots\dots(2)$$

上の式は1 kmより近傍でゼロになってしまうが、これは近傍からのレーダーエコーが”飽和”しているためである。(したがって、本レーダーでは1 km未満の距離は観測できない。)

(1)、(2)式を用いれば、任意の距離からのエコー強度を3 km地点からのエコー強度に換算することができるから、今後のキャリブレーションに便利である。ただし今回の観測では「目視」によって空中雪密度を測定しているから、キャリブレーションそのものは今後(来年度降雪期)の課題とする。しかし(2)式によってレーダーエコーから空中雪密度の濃淡の構造を調べることはできる。

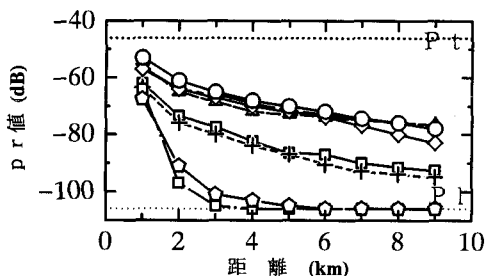


図-6 レーダーエコーの距離分布

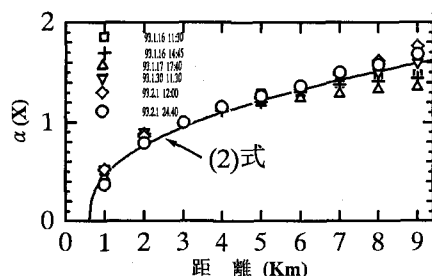


図-7 距離補正係数 $\alpha(x)$

6. 基準化されたデータで見る雪片の移流

図-8は、変動性の強い降雪について、基準化されたエコー強度を用いて移流の様子をプロットしたものである。下にはレーダーサイトにおける目視観測の結果を付けている。全体に移流されながら微妙に波形が変化している様子が見てとれる。例えば、走時曲線A、Bは、谷の部分が次第に狭まり両側の山が合体していく場合である。また、Dでは谷の部分が次第に深くなっていき、Eでは山が次第に盛り上がっていきながら移流されていることがわかる。また、Cの走時曲線は風下から風上に廻っているが、これは、CとC'に挟まれる”弱い降雪域”が空間的に広がっていく様子を表わしている。

図-9は、降雪の塊がレーダーサイトに接近して通り過ぎていく様子を、鉛直断面図として描いたものである。ただし降雪強度が小さくなると遠方からのエコーが最低値(P1)を下回ってしまうので、その部分は描いていない。観測時間帯は、図-8のAの走時曲線の付近にあたる。

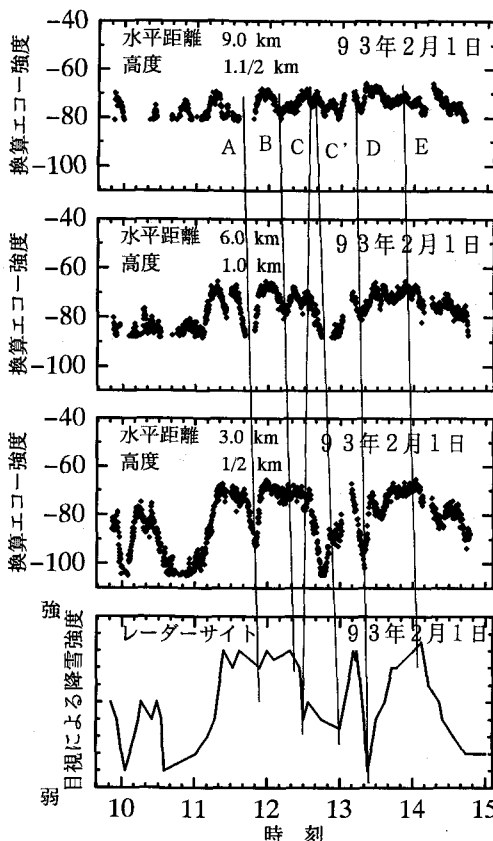


図-8 降雪波形の移流と変化

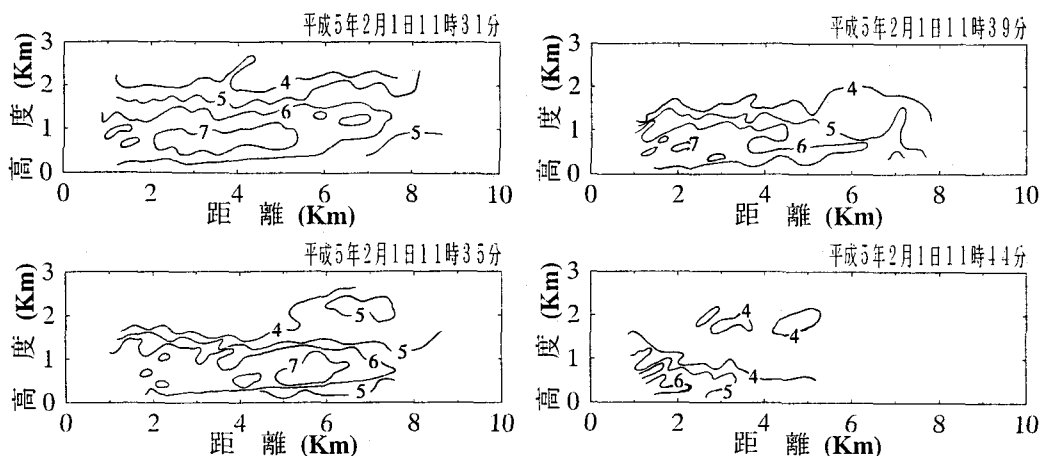


図-9 補正されたレーダーエコーの鉛直断面分布図

7. おわりに

以上述べてきたように、Xバンドレーダーは空中の雪密度の濃淡をかなりよく捉えているようであり、現地観測測定器として有効であると考えられる。ただし監視範囲が10km程度と狭いので、同様の装置を今後造っていく際には、尖頭出力がもう少し大きなレーダーを用いるか、パラボラ・アンテナを大型にすることが望ましいであろう。

今回の観測では、空中雪密度の観測を「目視」で行ったために、定量的なキャリブレーションを行うまでには到らなかったが、肉眼の代わりにカメラ等を用いる工夫をすればよいわけで、次の降雪期には実施したいと考えている。

本研究を行うにあたり、沢内村役場、雪国文化研究所、岩手大学工学部建設環境工学科水工学研究室の皆さんに多大の助力を頂いた。特に岩手大学の堺茂樹助教授は、降雪現象に詳しくない筆者らに基礎的知識を提供して下さいました。また小沢康彦さん（現運輸省）と伊勢正さん（東北大学大学院）には現地観測とデータ解析に協力していただいた。記して謝意を表する。

なお、本研究は文部省科学研究費試験研究B（代表：石川忠晴）の補助を受けている。

参考文献：

- (1) 小野節夫、菅原透、笹本誠、堺茂樹、平山健一：風の影響を考慮した降雪分布予測、水工学論文集、第34巻、pp.103-108、1990.
- (2) Matsuo, T. and Y. Sasho: Melting of Snowflakes below Freezing Level in the Atmosphere, J. of Meteorological Society of Japan, Vol. 59, No. 1, pp. 10-25, 1981.