



Title	簡易気象レーダーによるエコーの移動速度について
Author(s)	遊馬, 芳雄; 菊地, 勝弘; 今, 久
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 44, 23-34
Issue Date	1984-10-05
DOI	10.14943/gbhu.44.23
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/14125
Type	bulletin (article)
File Information	44_p23-34.pdf



[Instructions for use](#)

簡易気象レーダーによるエコーの移動速度について

遊馬 芳雄・菊地 勝弘・今 久*

北海道大学理学部地球物理学教室

(昭和59年6月13日受理)

A Method for Estimating the Advection Velocity of Radar Echoes Using a Simple Weather Radar System

By Yoshio ASUMA, Katsuhiko KIKUCHI and Hisashi KON*

Department of Geophysics, Faculty of Science, Hokkaido University

(Received June 13, 1984)

Using a simple weather radar system, a definite and objective method for estimating the advection velocity of radar echoes is explained. The advection velocity of radar echoes is calculated from the best matching position obtained from the maximum cross-correlation of two sequential echo patterns.

The results obtained are as follows ;

- (1) 10 to 15 minutes as the interval time is adequate for the two sequential echo patterns for the monsoon snowfall over Ishikari Bay, on the west coast of Hokkaido Island, Japan.
- (2) In order to exclude orographically originated and remaining echoes, the calculation with radar echoes restricted over the sea area leads to an accurate advection velocity of the echoes.

I. は じ め に

メソスケールの降水現象の予測や解析に気象レーダーが果たす役割は非常に大きい。最近、出力 50 kw 前後、探知距離 100 km 程度で移動可能な PPI 画像を主とした簡易気象レーダーが開発され、各研究機関や現業機関で使用されるようになった。さらに、これらのデータの処理方法として、従来のように、PPI 画像を 35 ミリ写真やスケッチによるばかりでなく、デジタル化して磁気テープにとり、後処理や加工がしやすいようにデータを収集するようになってきているのが現状である (例えば、立平他, 1980)。

* 現在所属：千葉大学園芸学部園芸学科農業気象学講座

デジタル化されて収録されたデータの解析方法の1つに、レーダーエコーの追跡がある。これは、適当な時間間隔で、連続した2枚のレーダーエコーを処理することで得られる。レーダーエコーを追跡することは、レーダーエコーの補外による短時間予測 (Bellon and Austin, 1978; 立平, 1980; Browning, 1982; Uyeda and Yagi, 1983; 遊馬他, 1984, a, b) といった、きわめて実用的な目的で重要なばかりでなく、Asai et al. (1977) のように、収束・発散場、渦度を求める利用法等からも、重要なことである。

この論文では、単一のレーダーを用いて、降水量の短時間予測実験を行うことを目的に2枚のレーダーエコーの相互相関係数 (Cross-correlation) を用いて、移動速度を求めた結果と、その手法について述べる。ここで用いたデータは、札幌市青少年科学館(北緯43度02分01秒、東経141度28分34秒)で得られたものである。1982年のデータについては、仰角 0.5° のVTRに収められたレーダー画像から読みとったものであり、1983年のデータは、仰角 -0.2° の 1 km^2 ごとにグレースケールの値で、デジタル化されたデータを用いた。ここでは、主として冬期の季節風による降水を対象としたので、両年とも全レーダ視野の北西部の $100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$ の部分のデータだけを用いた。

II. レーダーエコーから降水域の移動速度を求める方法

ある時間間隔で連続した2枚のレーダーエコーを客観的に追跡する研究は、1970年頃から行われ、立平 (1980) にまとめられている。その方法には、主に2つあって、1つは、エコー域の重心を求める方法であり、もう1つは、相互相関 (Cross-correlation) 係数を求める方法である。前者は、得られたレーダーエコーをパターン認識して、対応するエコーの重心から移動速度を求めるもので、この方法は、各々のエコーの移動速度を求めることができる。しかしながら、パターン認識が非常に難しく、対応するエコーを客観的にみつけるのも難しい。一方、後者は、ある特定の領域内の2枚のレーダーエコーを少しずつずらせながら、相互相関係数を求め、その最大の位置を求め、その位置から、移動速度を計算する方法である。この方法は、前者のようにエコーのパターンを識別する必要がないので、客観的に行えるが、各々のエコーの移動速度は求めることはできず、領域全体の移動としての移動速度が算出される。この方法をレーダーに利用したものとして、Zawadzki (1973), Austin and Bellon (1974), Asai et al. (1977) 等があり、気象衛星データを利用したものとしては、Leese and Novak (1971) があげられる。この論文では、後者を採用したので、具体的に紹介する。解析に用いた範囲は Fig. 1 に示してある。

Fig. 1 で示された正方形の左下隅を座標軸の原点とし、 x 方向を東に y 方向を北にとる。 Δt_{obs} の時間間隔で、2枚のレーダー画像 (R_1, R_2) が得られたとする。格子点 (i, j) (i, j は整数) の降水強度を $R_{1i,j}, R_{2i,j}$ とする。この2枚の画像を Fig. 2 のように R_1 を (k, l) だけずらせて重ねた時の相互相関係数 ($\sigma_{k,l}$) (k, l は整数) は、Fig. 2 の斜線をひいた部分のデータだけを用いて、

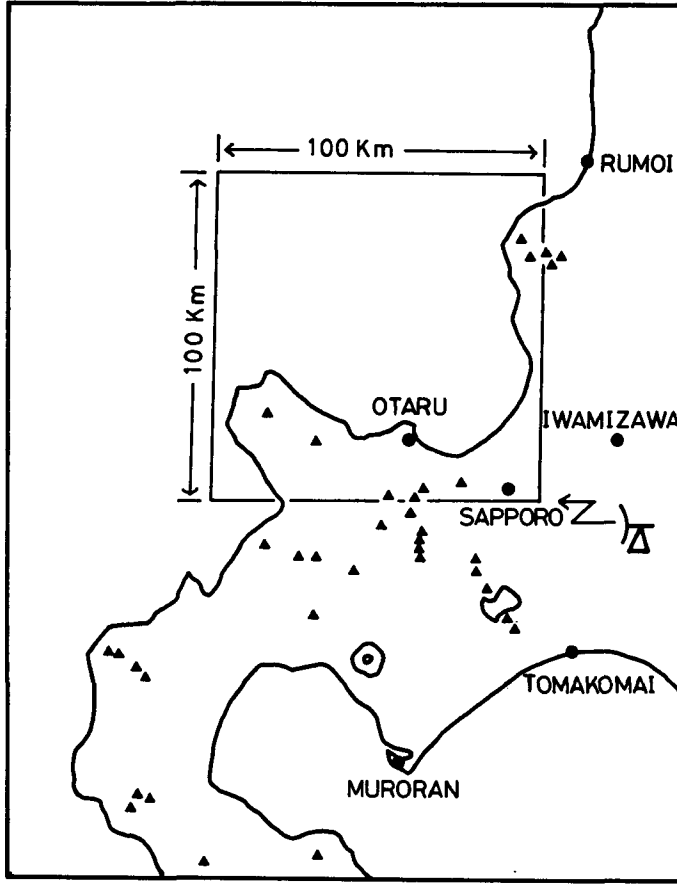


Fig. 1 Data coverage area (center square) and environs.
 ▲: representative mountain.

$$\sigma_{k,l} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N R_{1i,j} R_{2i+k,j+l} - MN\bar{R}_1\bar{R}_2}{\left(\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N R_{1i,j}^2 - MN\bar{R}_1\right)\left(\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N R_{2i+k,j+l}^2 - MN\bar{R}_2\right)} \quad (1)$$

$$\bar{R}_1 = \left(\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N R_{1i,j}\right) / MN$$

$$\bar{R}_2 = \left(\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N R_{2i+k,j+l}\right) / MN$$

で与えられる (Fig. 2は $k > 0, l > 0$ の場合を示す)。ここで求められる相互相関係数は、 $-1 \leq \sigma_{k,l} \leq 1$ である。相互相関係数を各格子点ごとに求め、その最大となる (k, l) の値を (K, L) とする。さらに、格子点内の最大点を、得られた相互相関係数を2次曲線にあてはめることで内挿した。すなわち、Fig. 3のように、 σ_0 を、相互相関係数の最大値、 $\sigma_{-x}, \sigma_{+x}, \sigma_{-y}, \sigma_{+y}$ をそれぞれ x 方向、 y 方向の前、後の相互相関係数であるとし、内挿点を (k', l') とすると、

$$\left. \begin{aligned} k' &= \frac{\sigma_{-x} - \sigma_{+x}}{2(\sigma_{-x} - 2\sigma_0 + \sigma_{+x})} \\ l' &= \frac{\sigma_{-y} - \sigma_{+y}}{2(\sigma_{-y} - 2\sigma_0 + \sigma_{+y})} \end{aligned} \right\} (2)$$

で与えられる。

以上から、2枚のレーダー画像は、 $(K+k', L+l')$ にずらせた時 best matching となる。これより、エコーの移動速度 (V_x, V_y) は、

$$\left. \begin{aligned} V_x &= ((K+k')\Delta x) / \Delta t_{obs} \\ V_y &= ((L+l')\Delta y) / \Delta t_{obs} \end{aligned} \right\} (3)$$

となる。 $\Delta x, \Delta y$ は、それぞれ x 方向、 y 方向の格子点間隔で、ここでは 1 km である。

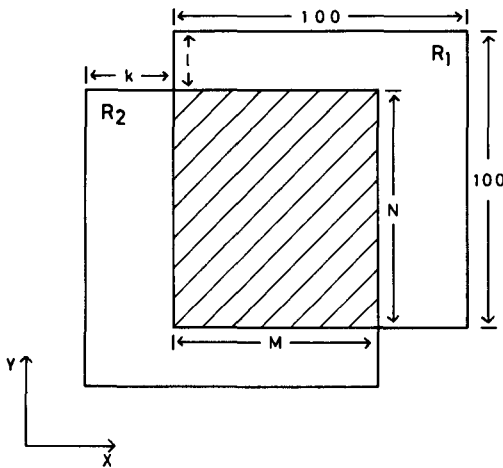


Fig. 2. A sketch for calculation of cross-correlation.

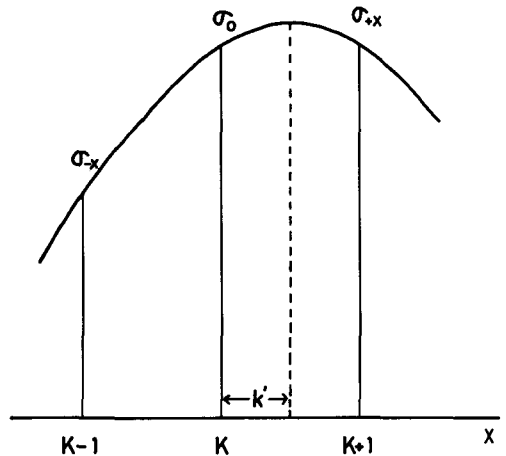


Fig. 3. A sketch for fitting the cross-correlation coefficients to a quadratic function in x -direction.

σ_0 : the maximum cross-correlation coefficient,
 σ_{+x}, σ_{-x} : neighbor cross-correlation coefficients.

III. 時間間隔 (Δt_{obs})

この章では、2枚のレーダー画像の時間間隔 (Δt_{obs}) について述べる。

時間間隔 (Δt_{obs}) を決めるために、1982年2月26日のレーダー写真から、エコーの位置を読みとり、03時50分のエコーとその5、10、15、20、25、30分後のエコーから、それぞれ求めた移動速度 (V_x, V_y) と、相互相関係数の最大値を Fig. 4 に示した。求められた移動速度は、5~25分位までは、ほぼ同じ位の値が得られたが、それ以後はかなり変動している。また、5分後の相互相関係数は、0.76であったのが、30分後には0.26まで低下している。相互相関係数の最大値

の1.0から低下の割合は、その間にエコーがどれだけ変化したかを示している。時間間隔を短くとればとるほど相互相関係数の最大値が大きな値を示すが、(3)式の分母も小さくなり、見積られた移動速度の誤差も大きくなる。また、解析に利用するためのデータの収録量も多くなる。一方、時間間隔が長くなれば長くなるほど、その間にエコーが変化して、相互相関係数が小さくなり、周辺の値に対する最大値のピークも見えにくくなる。したがって、観測の時間間隔は、これらのかねあい決めまり、10~15分が適当であると思われる。以後用いる1983年のデータについては、1 kmごとにデジタル化されたデータを15分ごとに磁気テープに収録されるようになったので時間間隔(Δt_{obs})として15分を用いた。

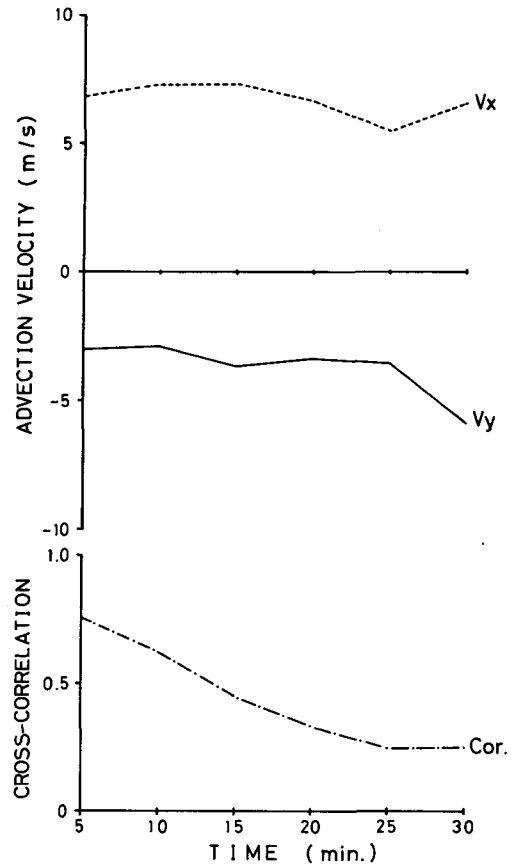


Fig. 4. Time variations of the advection velocities of V_x and V_y (upper) and cross-correlation coefficient (lower).

IV. 具体例と改良

IIの手法にしたがって、仰角 -0.2° 、15分毎のFig.1で示した $100\text{ km} \times 100\text{ km}$ 内のエコーを使って、1983年2月26日00時から06時までのエコーの移動速度を求めた結果をFig.5に示した。この結果から、相互相関係数は、ほぼ0.5程度は得られているものの、04時以降のエコーの移動速度は、南北、東西成分とも、突然0 m/sとなっている。そして、05時05分には反対に突然大きな値を示している。レーダーエコーはその場所の風に流されて移動する筈であるから、このような急激な変化は考えにくく、この急激な移動速度の変化は誤りである可能性が高い。Fig.5と同期間のFig.1で示した $100\text{ km} \times 100\text{ km}$ 、すなわち 10^4 km^2 中に、グレースケールで、レベル1以上(雨のZ-R関係で $R > 1.8\text{ mm/h}$)のエコーが占める面積をプロットしたのが、Fig.6である。エコーの面積は、1時間程度の小さな増減をしながら、01時以降は徐々に減少して、エコーの移動速度が0 m/sになった04時以降は、 $800\text{ km}^2 / (10000\text{ km}^2)$ 以下になっている。海上でのエコーの進行は、東根等(1983)のように進行方向の地形の影響をうけてその方向をまげられるこ

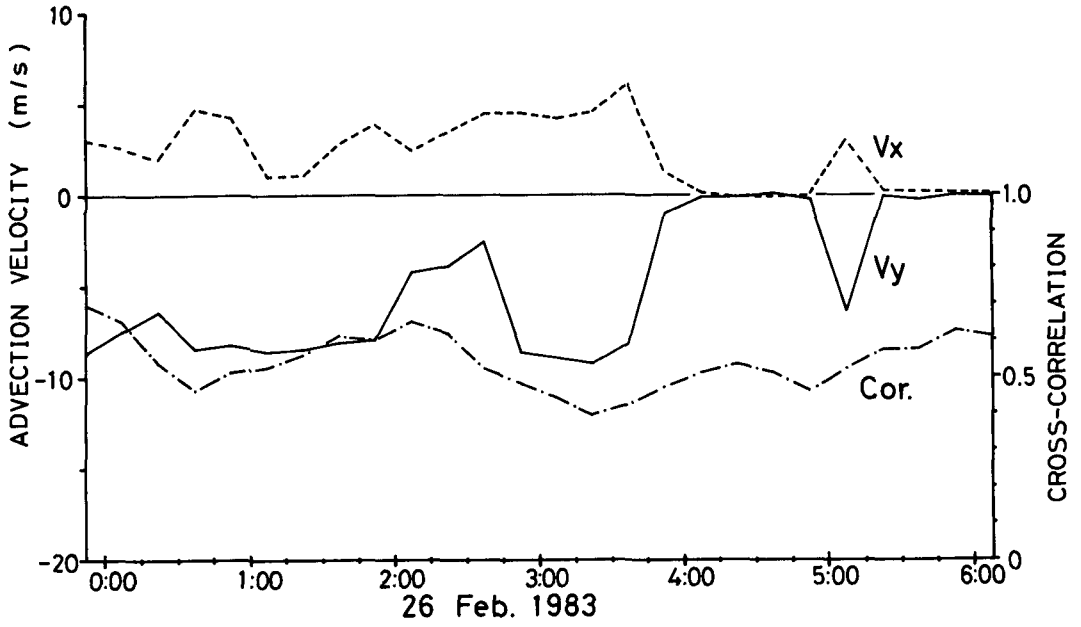


Fig. 5. Time variations of the advection velocities of V_x and V_y and cross-correlation coefficient on Feb. 26, 1983.

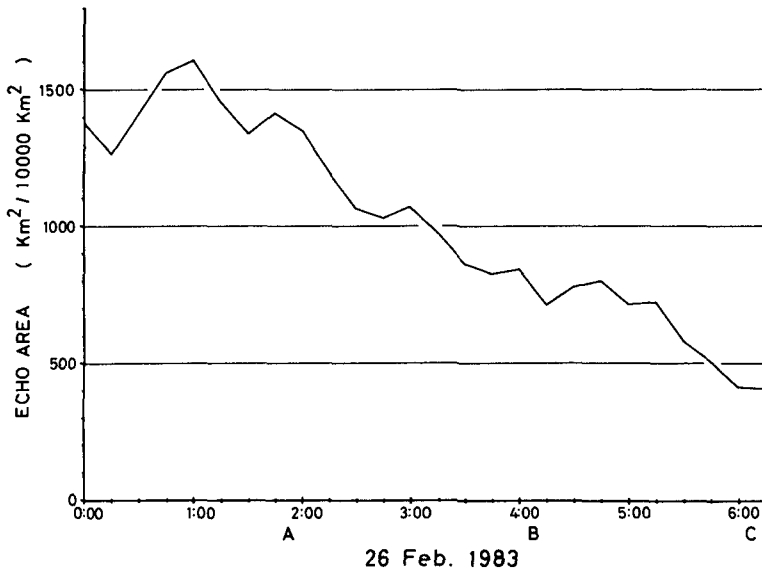


Fig. 6. Time variation of echo coverage area on Feb. 26, 1983. Times marked by A, B, and C are analyzed more detail.

ともあるが、ほぼまっすぐに進行する。しかしながら陸上のエコーはそうとは限らない。Fig. 1で示したように、レーダーで観測された領域は、海上が大部分を占めているが、南側と東側は陸地である。南側の陸地は、起伏の激しい積丹半島であり、そこには、西側から積丹岳(1225m)をはじめとして、余市岳(1488m)、朝里岳(1281m)、手稲山(1024m)等が連なり、また東側にも雄冬山(1198m)、浜益岳(1258m)、暑寒別岳(1296m)等の1000m以上の山が連なる山岳地帯である。このレーダーシステムに記録されたデータは、M. T. I. (Moving Target Indicator)処理がなされているので、山岳から直接はねかえってくる地形性のエコーは除去されているが、山岳周辺では、上昇気流やそれをう回す気流があって、エコーが発生しやすい。全体のエコー面積が減少してくると、山岳周辺部に定常的にみられるエコーの存在が、移動するエコーに比べて無視できなくなり、動いているエコーを追跡できなくなることが予想される。したがって、移動するエコーに対する相互相関係数のピークよりも、定常的にみられるエコーのピークの方が大きくなって、みかけ上、エコーの移動速度を0 m/sとする可能性がある。これを調べるために、Fig. 6のA, B, Cで示した01時47分と02時02分、04時02分と04時17分、06時02分と06時17分の3つの期間のエコーの移動速度について解析した。まず、Fig. 1の100 km×100 km内のエコーすべてから得られる相互相関係数の立体図をFigs. 7, 8, 9(a)に示した。また、山岳等によって、定常的に存在するエコーを取り除くために、陸上でのエコーをすべて排除し、海上のエコーだけから求めた相互相関係数を、Figs. 7, 8, 9(b)に示した。これらの立体図は、高さ方向には、相互相関係数を、 x 方向(横方向)、 y 方向(縦方向)には、それぞれ東方向、北方向にずらした格子点数を示してある。格子点は1 km毎に41点、相互相関係数の等値線は、0.0から0.1ずつ描かれている。したがって、(0, 0)の値は、2枚のエコーを全くずらさずに相互相関係数を求めた値ということになる。

まず、01時47分と02時02分の2枚のエコーより求めたFig. 7の例について考えてみる。すべてのエコーから求めた相互相関係数のパターン(Fig. 7(a))は、北西から南東にかけて尾根がみられる。そして、そのピークは、図中に示した(T)が最大で、次のピークは(O)で示したところに存在している。それに対して、陸上のデータを除き、海上のデータからだけから求めたパターン(Fig. 7(b))をみると、(a)に比べて、起伏が複雑なもの、最大のピーク(T)の近傍には目立ったピークは存在していない。この(b)図に現れたピーク(T)は、(a)図のピーク(T)と同じ座標であり、移動中のエコーを表している真のピークである。一方、(a)図の(O)のピークは、地形的に定常的に存在するものと考えられ、図の中央(0, 0)に位置している。この時は、真のピーク(T)の方が、みかけ上のピーク(O)よりも十分大きく、(a)の場合でも(b)の場合でも移動速度に誤差を生じさせるような差はなかった。

次に、Fig. 8に示した04時02分と04時17分の場合には、(a)図より、Fig. 7(a)と同様に、北西から南東にかけて、相互相関係数の高い尾根が見られ、(O)と(T)の2つのピークが存在している。この場合には、(O)の方が(T)よりも高い値を示している。このために、エコーの移動速度が0 m/sとなっていることがわかる。一方、Fig. 8(b)では、Fig. 7(b)と同様、(T)のピーク

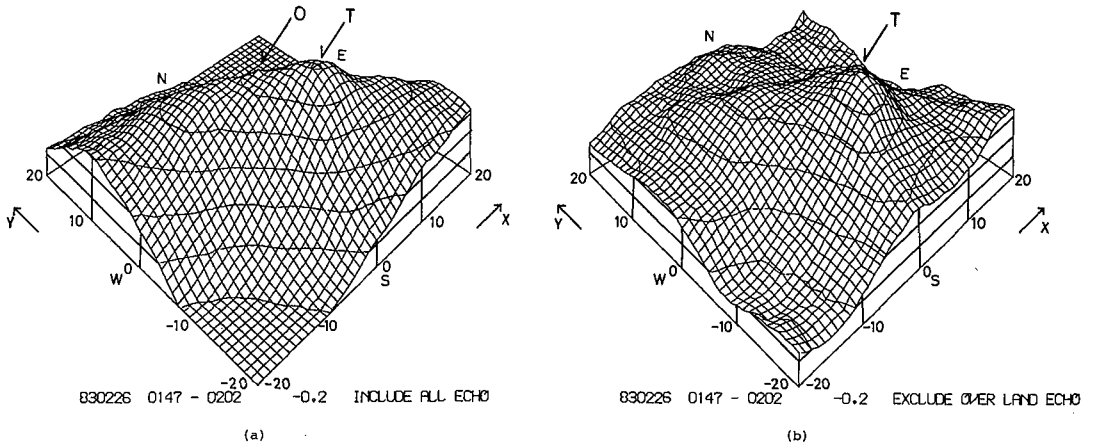


Fig. 7. Three dimensional maps for cross-correlation coefficients obtained from the radar echoes at 01 : 47 and 02 : 02 Feb. 26, 1983. (a) Using all echoes, (b) Using over sea echoes alone.

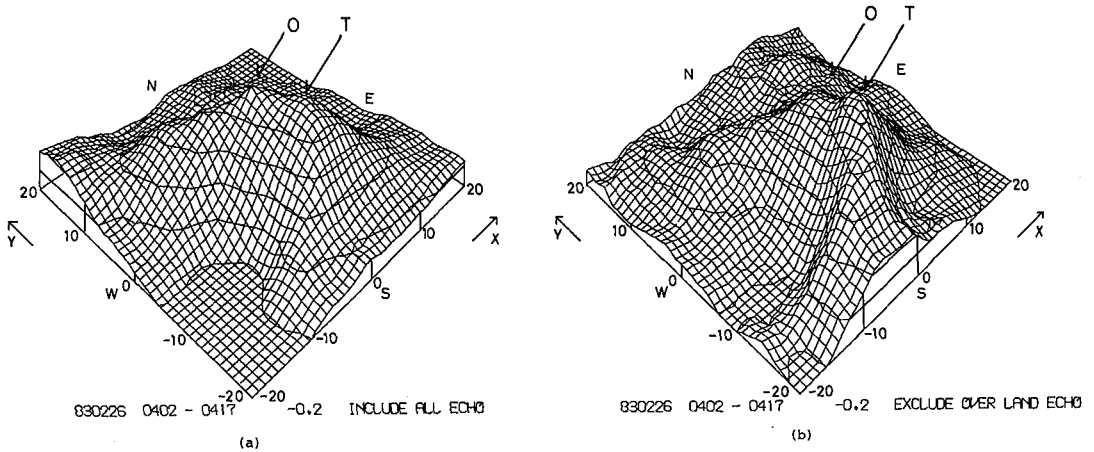


Fig. 8. Same as Fig. 7 except for 04 : 02 and 04 : 17.

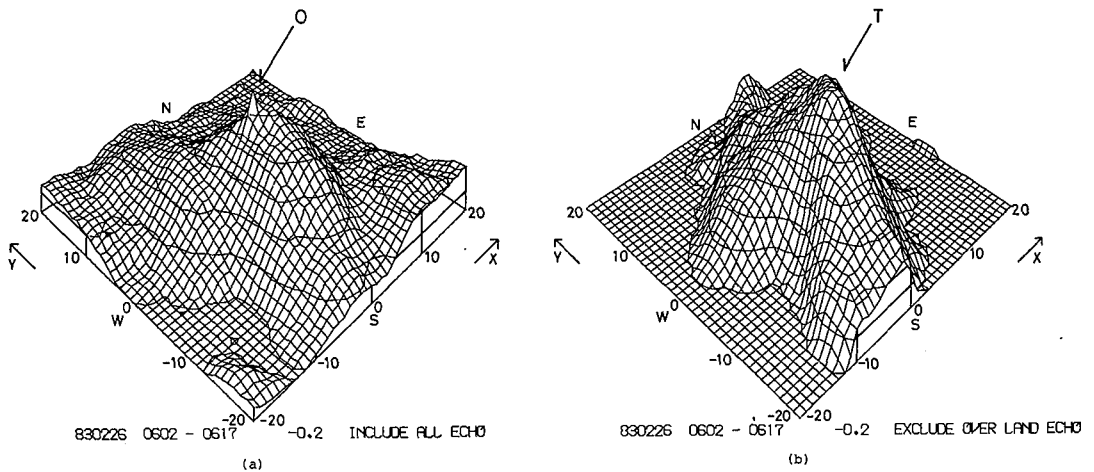


Fig. 9. Same as Fig. 7 except for 06 : 02 and 06 : 17.

がよりはっきりしているが、しかし、(O)に対応するとみられる若干のピークもまた認められた。

最後に、Fig. 9に示した06時02分と06時17分の場合についてみてみよう。(a)から、(O)のピークがみられること、また、北西から南東にかけて相互相関係数の高い値が見られることは、前の2例と同じであるが、エコーの移動に対する真のピーク(T)に対応するものは認められない。それに対して、(b)では(T)に相当するピークが明瞭にみられる。

以上のように、降雪域のエコーの移動速度を相互相関係数の最大の位置から求めるには、陸上のデータを捨てて、海上のデータだけから求めた方がよいことがわかった。Figs. 7, 8, 9(a), (b)のもとになったレーダーエコーを、それぞれ、Figs. 10, 11, 12(a), (b)に示した。

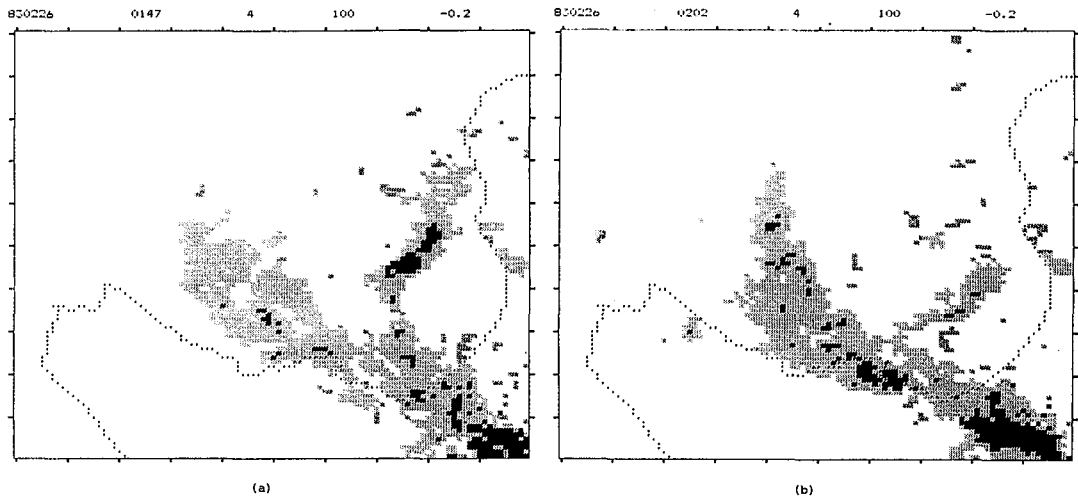


Fig. 10. Radar echo pictures corresponded to Fig. 7. (a) 01 : 47, (b) 02 : 02
Feb. 26, 1983.

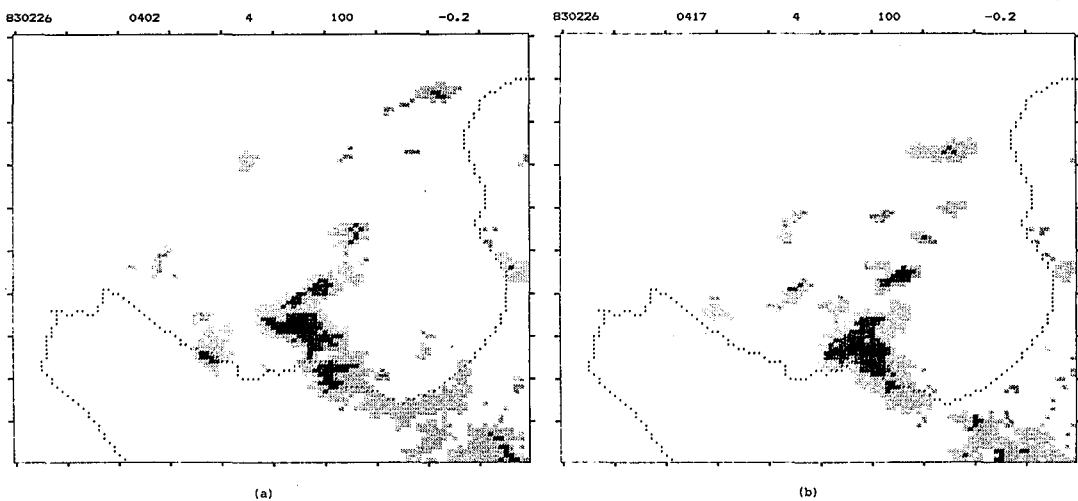


Fig. 11. Radar echo pictures corresponded to Fig. 8. (a) 04 : 02, (b) 04 : 17
Feb. 26, 1983.

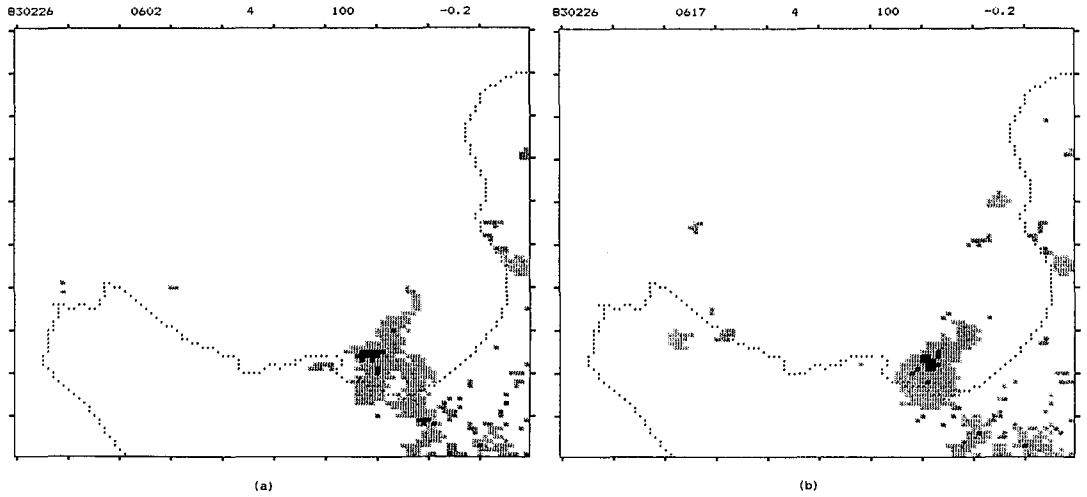


Fig. 12. Radar echo pictures corresponded to Fig. 9. (a) 06 : 02, (b) 06 : 17, Feb. 26, 1983.

Fig. 5 と同期間のエコーの移動速度を、陸上のデータを除き、海上のデータだけから求めたものが、Fig. 13 である。この図から、Fig. 5 でみられた 04 時 00 分以降の速度 0 m/s の移動速度は認められない。また、この期間中、大きな移動速度の変化がなかったことがわかる。さらに、相互相関係数も若干ながらよくなっている。

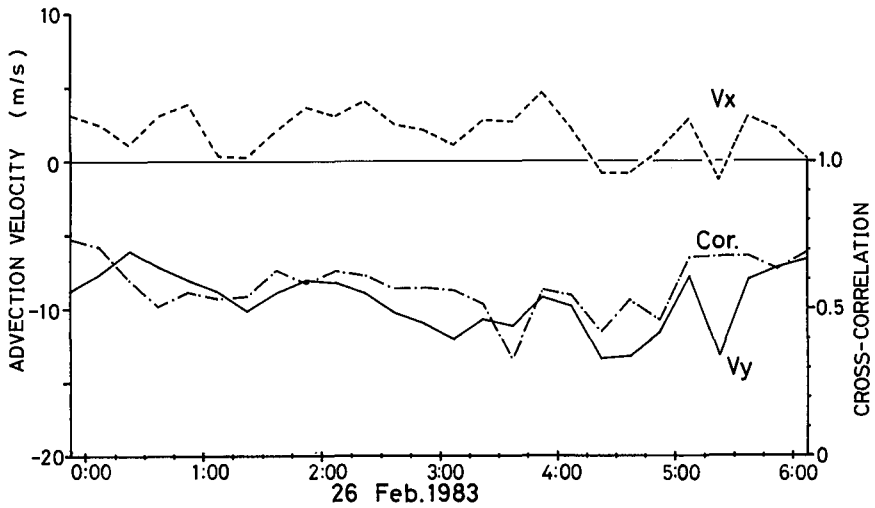


Fig. 13. Same as Fig. 5 except for using over sea echoes alone.

V. ま と め

簡易気象レーダーの時間的に連続した2枚のレーダーエコーから相互相関係数を使って、エコーの移動速度を求める方法について述べた。相互相関係数を使う方法は、各々のエコーの重心を求めて追跡する方法のように、各々のエコーの移動速度を求めることはできず、対象としている領域全体の移動速度しか求まらないが、エコーのパターン認識をする必要がなく、簡単な手順で、客観的に追跡させ、移動速度を求めることができるといった利点がある。

札幌市青少年科学館で収録されたレーダーエコーを使って、具体的に検討した結果、移動速度を求めるためのエコーの時間間隔は、10～15分位が適当であることがわかった。また、収録されたレーダーエコーのデータは青少年科学館を原点とした第2象限で大部分は海上であるが、一部陸上のエコーも含まれており、観測された全エコー数が少なくなると、山岳等によって、その周辺部に定常的に発生するエコーの存在が無視できなくなり、正確なエコーの移動速度が求められなくなる。そこで、海上の領域に限って、相互相関関数を求める方法をとると、移動するエコーを容易に追跡することができ、正しい移動速度を求めることができることがわかった。

将来、これらのエコーをもとに季節風時の降雪量の短期予測等を行う場合には、海上のエコーだけを使うことが示唆された。

謝 辞 この研究に用いたレーダーエコーのデータは、札幌市青少年科学館レーダーによるものである。記して感謝の意を表します。

文 献

- ASAI, T., M. YOSHIZAKI and K. ISHIKAWA, 1977. Some results on an objective analysis for tracking radar echoes of convective clouds. *J. Meteor. Soc. Japan*, **55**, 553–558.
- 遊馬芳雄・菊地勝弘・今久, 1984 a. 簡易気象レーダーによる降雪の短時間予測実験 (その1) —概要と予測の可能性—. 北海道大学地球物理学研究報告, **44**, 35–51.
- 遊馬芳雄・菊地勝弘・今久・谷口恭, 1984 b. 簡易気象レーダーによる降雪の短時間予測実験 (その2) —予測実験—. 北海道大学地球物理学研究報告, **44**, 53–65.
- AUSTIN, G. L. and A. BELLON, 1974. The use of digital weather rader records for short-term precipitation forecasting. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **100**, 658–664.
- 東根 聡・村上正隆・吉弘雅士・菊地勝弘・谷口 恭・佐藤 昇・遊馬芳雄・真木雅之, 1983. 石狩湾上の降雪雲のレーダー観測 (SHAROP—Part 1). 日本気象学会秋季大会講演予稿集, p.229.
- BELLON, A. and G. L. AUSTIN, 1978. The evaluation of two years of real-time operation of a short-term precipitation forecasting procedure (SHARP). *J. Appl. Meteor.*, **17**, 1778–1787.
- BROWNING, K. A. (ed.), 1982. *Nowcasting*. Academic Press, 256 pp.
- LEESE, J. A. and C. S. NOVAK, 1971. An automated technique for obtaining cloud motion from geosynchronous satellite date using cross correlation. *J. Appl. Meteor.*, **10**, 118–132.
- 立平良三, 1980. レーダによる雨量測定と短時間予測. 気象研究ノート, **139**, 79–108.
- 立平良三・志崎大策・武田喬男・岩坂泰信・内藤恵吉, 1980. 気象レーダのデータ処理. 気象研究ノート, **139**, 33–78.

- UYEDA, H. and T. YAGI, 1983. Evaluation of upper winds as a translation vector for the short-term forecast of precipitation echoes. *Report of the National Research Center for Disaster Prevention*, **30**, 1–24.
- ZAWADZKI, I. I., 1973. Statistical properties of precipitation patterns. *J. Appl. Meteor.*, **12**, 459–472.