



Title	石狩湾上の降雪雲のレーダー・エコーからみた特徴 : 高層データとの比較
Author(s)	遊馬, 芳雄; ASUMA, Yoshio; 菊地, 勝弘 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 50, 1-13
Issue Date	1988-02-25
DOI	<a href="https://doi.org/10.14943/gbhu.50.1">https://doi.org/10.14943/gbhu.50.1</a>
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/14187">https://hdl.handle.net/2115/14187</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	50_p1-13.pdf



石狩湾上の降雪雲のレーダー・エコーからみた特徴  
— 高層データとの比較 —

遊馬 芳雄・菊地 勝弘

北海道大学理学部地球物理学教室

(昭和62年7月31日受理)

**Characteristics of Radar Echoes by the Precipitating Snow Clouds  
over the Ishikari Bay, Hokkaido, Japan  
— Comparison with Aerological Data —**

Yoshio ASUMA and Katsuhiko KIKUCHI

Department of Geophysics, Faculty of Science, Hokkaido University

(Received July 31, 1987)

It is useful to examine the statistical characteristics regarding the behavior of radar echoes by the precipitating snow clouds over the Ishikari Bay, Hokkaido, Japan, in comparison to the meteorological conditions in order to comprehend the precipitation mechanisms and to investigate the possibility of the short range prediction of snowfalls in this region. Radar data obtained by the simple weather radar system of the Sapporo Science Center for two winter seasons of five months, that is, February and March in 1983, January to March in 1984 and aerological data at Sapporo, Japan and at Terney, USSR, located in the east coast of Primorsk were compared. Under the typical winter monsoon conditions, Terney and Sapporo are covered by a similar air mass located between Japan Sea. As the conditions are restricted in the winter monsoon in this paper, analysis was also restricted when the averaged prevailing wind direction from the ground surface to 500 mb layer was from west to north.

The amount of radar echo areas which are summed up by the covered area by radar echo in  $100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$  over the Ishikari Bay represented the convective activity of this region. Several meteorological elements were investigated for their correlations to the radar echo areas. Correlations found are as follows; There were negative correlations to the potential temperatures at 700 mb and 500 mb layers at Sapporo and any altitude at Terney. There were positive correlations, on the other hand, to the potential temperature differences at the ground surface and 850 mb layer between at Sapporo and at Terney. Further, a negative correlation to specific humidity at Terney and a positive correlation to its difference between Sapporo and Terney were clarified. Positive correlations at the top height of mixing layer and averaged wind speed within it at Sapporo were recognized. And also averaged sensible heat flux from Japan Sea during snowfall at Sapporo was roughly estimated to be 605 ly/day.

## I. はじめに

北海道の全人口の約1/4を占める札幌を中心とした石狩地方は、冬期間しばしば豪雪にみまわれ、鉄道や道路をはじめとする各交通機関に障害を与え、市民生活にさまざまな影響を与える。このような大雪の予報は气象台から半日程度の間隔で出されるが、近年、電子機器の発達とともに気象レーダーや気象衛星等のリモートセンシング技術が向上し、現在の気象状況をいち早く的確に掴み数時間先をきめ細かく即座に予測する“Nowcasting”と呼ばれる試みも注目されている。札幌を中心とした石狩地方を1～2時間前に予測する試みは遊馬等(1984 a, b)によってなされ、現在、実用化に向けて開発中であるが、予測時間を長くするためには、大雪をもたらす時の背景、すなわち、統計的な性質の理解を深めておく必要があり、これはまた、雪雲のメカニズムを理解するために重要なことである。

石狩地方を含む北海道西岸に降雪をもたらす場合の総観場は、菊地等(1975)、七沢(1975)によると、次の4つの場合に大別される。

- (1) 低気圧前面の流れによる降雪
- (2) 低気圧後面の流れによる降雪
- (3) 季節風卓越時の降雪
- (4) 季節風末期の降雪

このうち、菊地等(1984)によると(3)と(4)の季節風時における降雪が特に多いことが報告されている。したがって、総観場が季節風型をしている時の降雪をもたらす条件、すなわち、大雪になる時の気象条件をきちんとまとめておく必要がある。従来から札幌管区气象台等における一地点の降雪量と総観場の比較はなされてきたが、遊馬・菊地(1987)が指摘したように、气象台一地点での降雪は、風向に対してかなりの片寄りがみられ一地点の降雪量が石狩地方を代表とした降雪量のパラメーターとは言い難く、本来、石狩地方に降雪があっても、たまたま、観測点の上を降雪雲が通過しなければ降雪が記録されないわけであるから、气象台における降雪量が石狩地方全体の広い範囲の代表値とは言い難い。

本論文では、レーダー・エコーの面積を広範囲の降雪状況を示すパラメーター、あるいは、対流活動を示すパラメーターとし、レーダー・エコー、すなわち、降雪が多くなる時、あるいは、対流活動が活発になる時の気象要素との関連について、1983年2月、3月、1984年1月、2月、3月の2冬期間5ヶ月間のデータを基に統計的解析を行った。降雪雲の振舞いについてレーダー・エコーを通して統計的、気候学的に扱うことは、これまですでに、中平(1986)によってレーダー・エコーの面積分布、エコーの寿命、エコーの増大する位置等、エコーについての時間的、空間的特徴について調べられている。また、遊馬・菊地(1987)は、エコーの発生頻度分布と移動方向について調べ、石狩湾上のエコーの特徴、あるいは、降雪の特徴について報告している。本論文では、季節風時のエコーが増大するときの気象条件について調べ、日本海上の雪雲を気象衛星から調べた研究(正田等, 1986)の理解を深めるためにも有用である。

## II. 解析データ

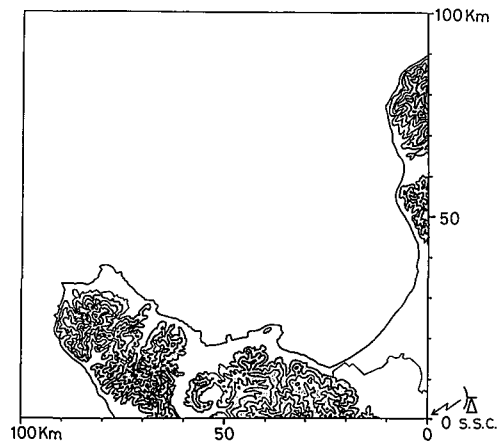
1983年2月, 3月, 1984年1月, 2月, 3月の2冬期間5ヶ月間のデータについての解析を行った。解析に用いたレーダー・データは, 札幌市青少年科学館 (S.S.C.) (北緯43度02分01秒, 東経141度28分34秒)に設置された札幌市気象レーダーである。このレーダーのデータは磁気テープに収められているが, その特性を Table 1 に示した。レーダー・エコーは15分毎に4つの仰角 ( $-0.2^\circ$ ,  $0.4^\circ$ ,  $1.0^\circ$ ,  $2.0^\circ$ )について得られているが, 地表付近の降雪状況を観測している  $-0.2^\circ$  のデータを用いた (遊馬等, 1984 a)。また, 解析に用いたレーダーの収録範囲を Fig. 1 に示した。図の右下端の S.S.C. の位置がレーダー・サイトで, その位置から北へ100 km, 西へ100 km の  $10,000 \text{ km}^2$  のデータを対象とした。この領域は, 大部分が石狩湾上の海上の領域であるが, 積丹半島, 増毛山地, 札幌市内域等, 一部陸上の領域を含んでいる。

気象要素としては, 札幌管区气象台, 及び, 日本海の対岸にあたる風上の沿海州テルネィの 00 Z (09時) と 12 Z (21時) の高層データを用いた。対象を季節風時に限ったので地上から 500 mb 間までの平均風向が西から北にかけての場合についてのみ解析を行った。

レーダー・エコーは, Fig. 1 の領域内のレベル1以上のエコー面積を用い, 高層データと対応させるために, 09時と21時の前後6時間の平均値を用いた。これは, 石狩湾上の降雪状況, あるいは, 対流活動を示すパラメーターと考えられる。

**Table 1.** Quality of the Sapporo Science Center Radar.

RADAR DATA (MT)	
WAVE LENGTH	3.2cm
RANGE	100 km
TIME INTERVAL	15min
ELEVATION ANGLE	$-0.2^\circ, 0.4^\circ, 1.0^\circ, 2.0^\circ$
M. T. I. ON	
1 km MESH	
0-6 GRAY SCALE	
0	< 1.8mm/h
1	< 2.3mm/h
2	< 3.0mm/h
3	< 4.0mm/h
4	< 8.0mm/h
5	< 16.0mm/h
6	> 16.0mm/h



**Fig. 1.** Radar coverage area of the Sapporo Science Center Radar and its topography.

## III. 高層データとの比較

## 1. 温位との比較

札幌 (47412) における温位と平均エコー面積との相関を示したグラフを Fig. 2(a), (b), (c), (d) に示した。(a)は地上, (b)は 850 mb, (c)は 700 mb, (d)は 500 mb における値である。図中の▲印は、1983年2月, 3月のデータで、×印は、1984年1月, 2月, 3月のデータである。各図の右上のRで示してある値は相関係数を示している。経験的に、平均エコー面積が  $500 \text{ km}^2/10,000 \text{ km}^2$  を越え、かつ、エコーが札幌市内上空を通過するとかなりの降雪が観測されるので、その場合だけ

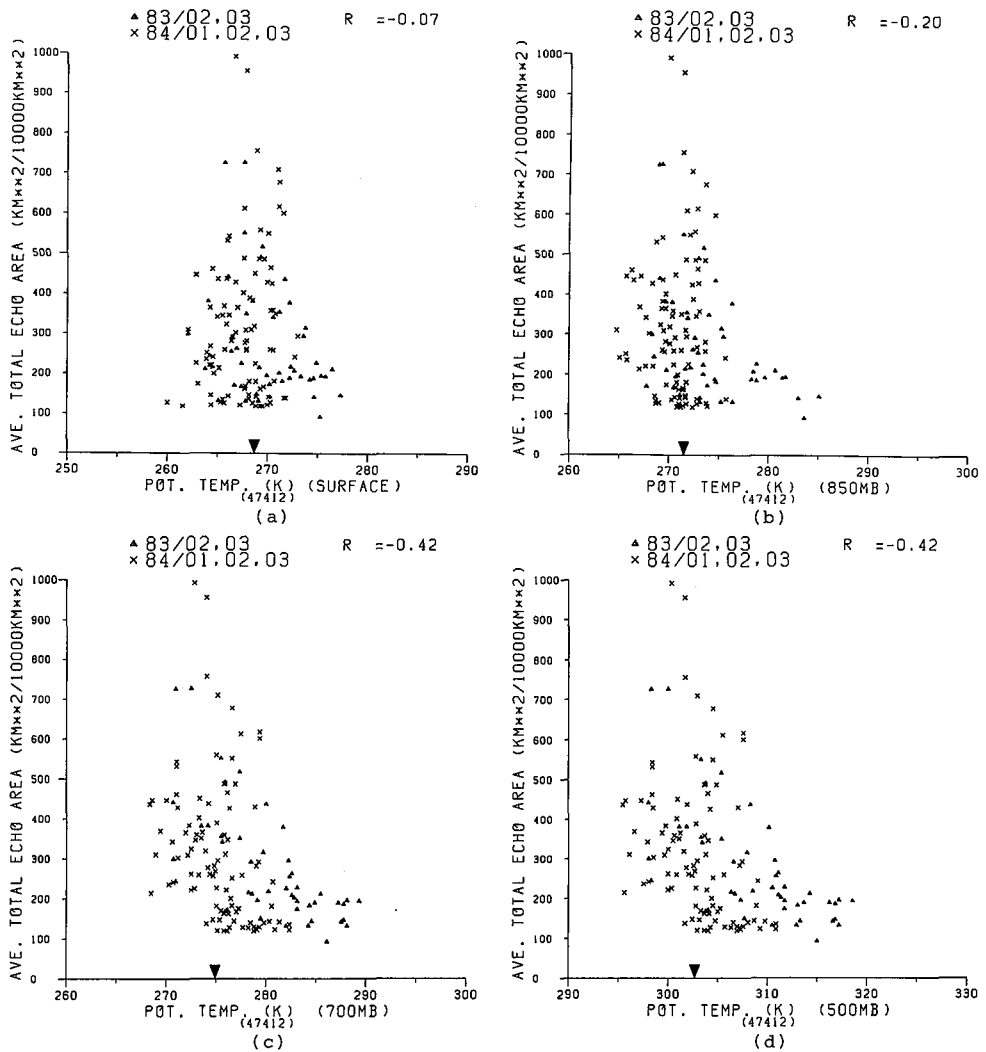


Fig. 2. Relation between averaged total echo area and potential temperature at Sapporo (47412). (a) Surface, (b) 850mb, (c) 700 mb, (d) 500 mb.

の平均値を図中の横軸に▼の印で示した。札幌における温位との相関をみると、地上のデータではだいたい 260~280 K の間にばらついていてほとんど相関がみられない。しかし、700 mb, 500 mb と上層にゆくにつれて負相関がみられる。すなわち、上層が冷たくなるとエコー（降雪）が多くなることを示している。また、各温位のばらつきをみると下層ではばらつきが少なく（17 K 程度）、上層ではばらつきが大きくなっている（25 K 程度）。平均エコー面積が  $500 \text{ km}^2/10,000 \text{ km}^2$  を越えたときの平均値は地上、850 mb, 700 mb, 500 mb で、それぞれ、268.7, 271.5, 274.9, 302.7 K であった。同様に、沿海州テルネィ (31909) における温位との比較を Fig. 3 (a), (b), (c), (d) に示した。それぞれ、(a) は地上、(b) は 850 mb, (c) は 700 mb, (d) は 500 mb における相関である。各高度ともに負相関がみられ、どの高さでもほぼ同じ程度の相関係数になっている。すなわち、

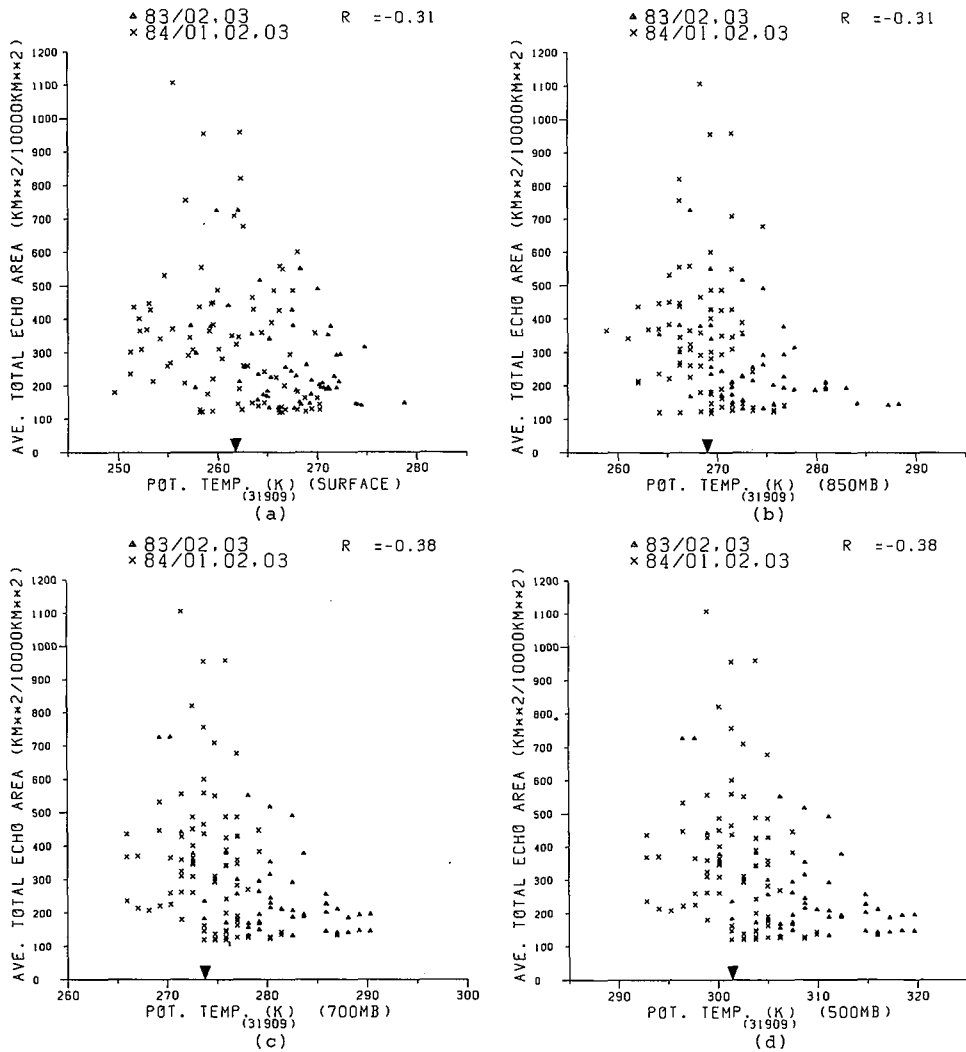


Fig. 3. As in Fig. 2 but for at Terney (31909).

札幌を含む石狩地方に多くの降雪をもたらす場合は、日本海上に寒気を吹き出す大陸側のテルネイでは、各高度ともに一様に冷えていることを示している。そして、各温位のばらつき具合も各高度ともだいたい 30 K 位でほぼ同じ程度ばらついている。エコー面積が  $500 \text{ km}^2/10,000 \text{ km}^2$  を越えた時の平均値は地上, 850 mb, 700 mb でそれぞれ 261.8, 269.0, 273.8, 301.4 K であった。

さらに、札幌とテルネイの高度別の温位差との相関を Fig. 4 (a), (b), (c), (d) に示した。Fig. 2, Fig. 3 と同様に (a), (b), (c), (d) はそれぞれ地上, 850 mb, 700 mb, 500 mb のグラフである。温位差は札幌の値からテルネイの値を引いているので、正の値は札幌の方が暖かいことを示している。

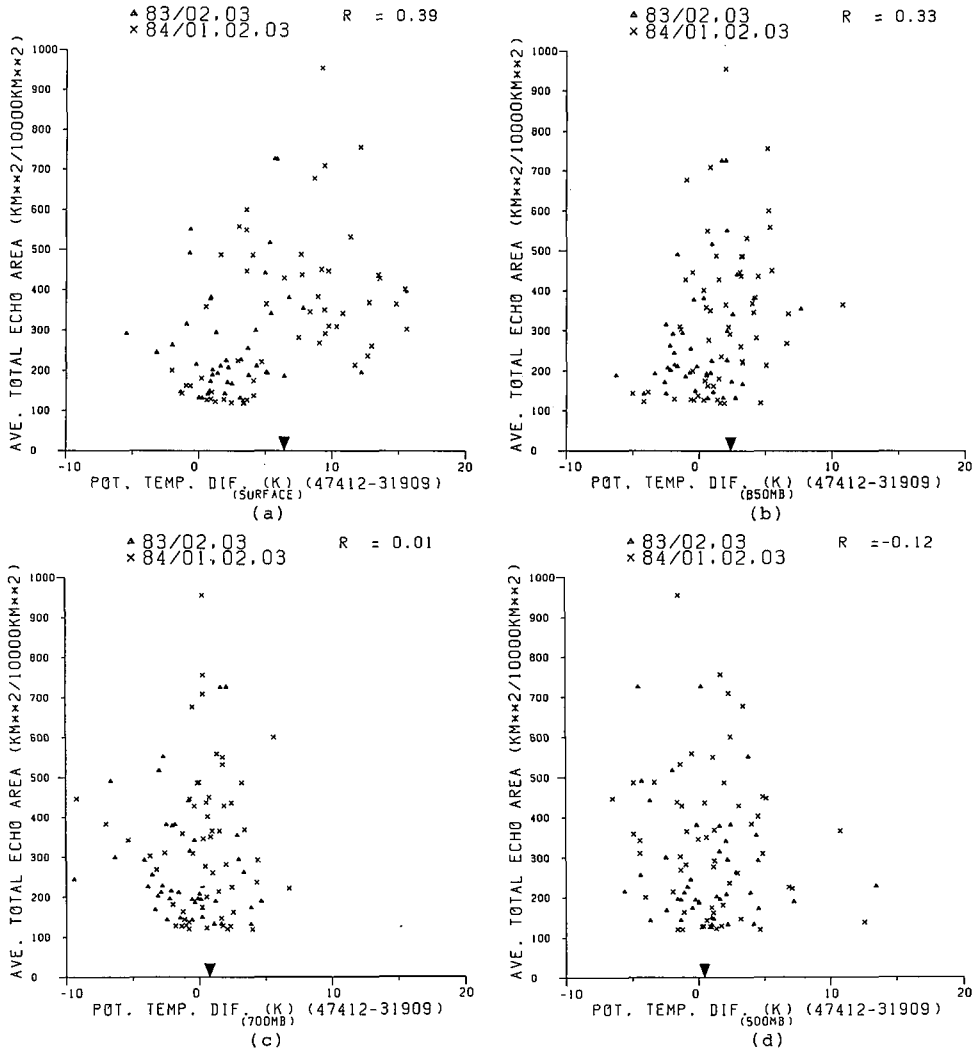


Fig. 4. Relation between averaged total echo area and the potential temperature difference between Sapporo and Terney. (a) Surface, (b) 850mb, (c) 700mb, (d) 500 mb.

地上の温位差(a)は、 $-3\text{ K}$ から $15\text{ K}$ の間にあり、正相関がみられる。平均エコー面積が $500\text{ km}^2/10,000\text{ km}^2$ を越えた時の平均温位差は、 $6.4\text{ K}$ であった。しかしながら、この正相関は、高度が高くなるにつれてみられなくなり、 $700\text{ mb}$ 、 $500\text{ mb}$ では温位差の分布が $0\text{ K}$ 付近に散らばっている。平均エコー面積が $500\text{ km}^2/10,000\text{ km}^2$ を越えた時の平均値は $850\text{ mb}$ 、 $700\text{ mb}$ 、 $500\text{ mb}$ でそれぞれ $2.4$ 、 $0.8$ 、 $0.4\text{ K}$ であった。すなわち、テルネイで代表される大陸から吹き出された一様に冷えた空気が暖かい日本海を渡るにつれて、下層が暖められる。この暖められかたが大きいほど降雪が多く、対流活動の活発さを表していると考えられる。

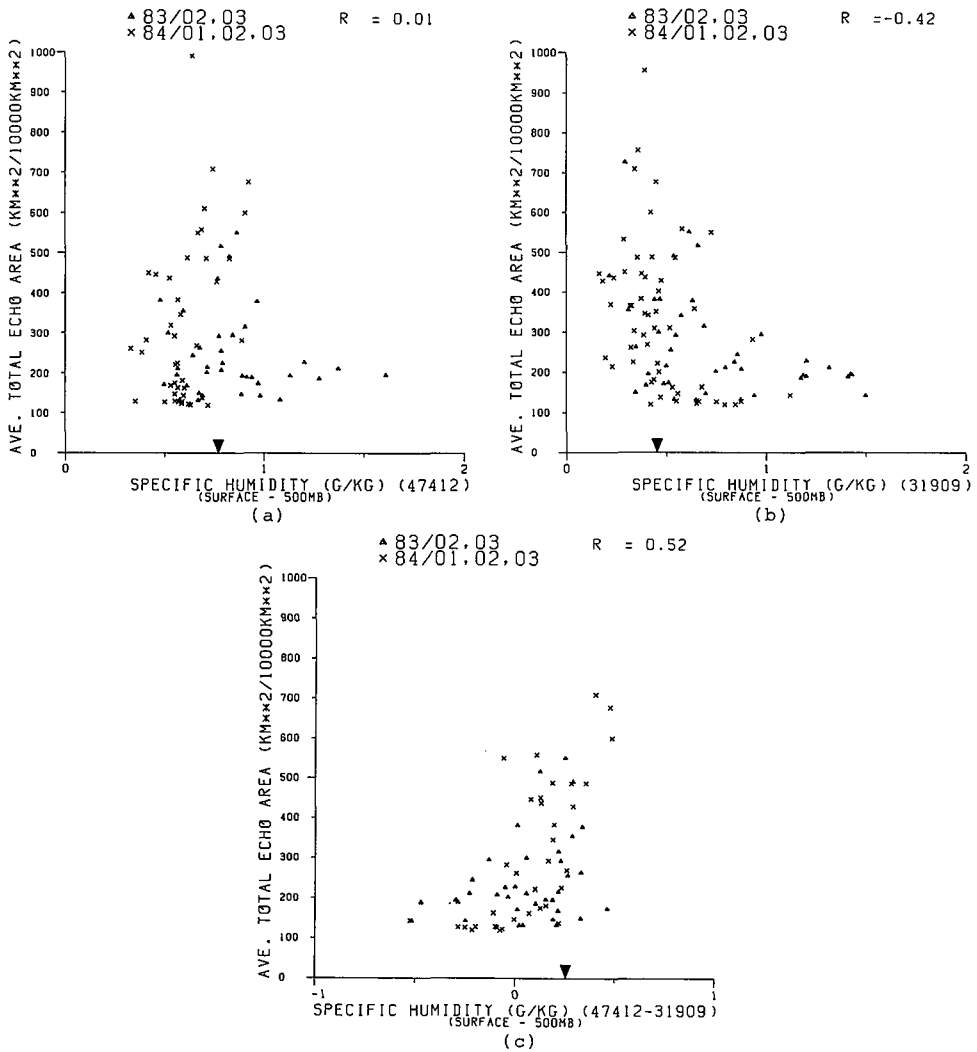


Fig. 5. Relation between averaged total echo area and specific humidity.  
 (a) Sapporo, (b) Terney, (c) Differences between Sapporo and Terney.

## 2. 比湿との比較

Fig. 5(a), (b), (c)に地上から500 mb面までの比湿の平均値との相関を示した。(a), (b), (c)は、それぞれ札幌、テルネィ、札幌とテルネィの差を示している。(a)の札幌の比湿と比べると、エコーの増大と地上から500 mb面までの平均比湿とはあまり相関がないことがわかる。しかし、(b)のテルネィにおける平均比湿とは負相関がみられ、大陸から吹き出す空気が乾燥しているほど札幌でエコーが増大している様子が見られた。また、札幌とテルネィの比湿の差をみると正相関がみられる。比湿の差が正の値を示すということは札幌の方が湿っていることを表し、この比湿差は日本海上で供給された水蒸気量に比例するものと考えられる。すなわち、日本海上で供給される水蒸気量が多いほど多くの降雪をもたらしたことになる。平均エコー面積が $500 \text{ km}^2/10,000 \text{ km}^2$ を越えた時の平均値は、札幌、テルネィ、札幌とテルネィの差がそれぞれ0.77, 0.45, 0.25 g/kgであった。

## 3. 混合層の高さとの比較

III-1, III-2より、札幌上空でエコーが増大する時は、大陸から下層から上層まで一様に冷たい乾燥した空気が流れ出し、日本海上を渡るにつれて下層に海上からの水蒸気と熱の供給を受けたとき増大することが示された。

日本海上で水蒸気と熱の供給を受けた空気は、下層に混合層を作る。この混合層の高さを札幌における高層データから求めてヒストグラムにしたのがFig. 6である。混合層の高さは高くても600 mbまでで、900~700 mbの間が最も頻度が多くなっている。Fig. 6で求めた混合層の高さと平均エコー面積の相関を示したものが、Fig. 7である。混合層の高さと平均エコー面積とは正相関がみられ、相関係数も比較的高い値を示している。平均エコー面積が $500 \text{ km}^2/10,000 \text{ km}^2$ を越え

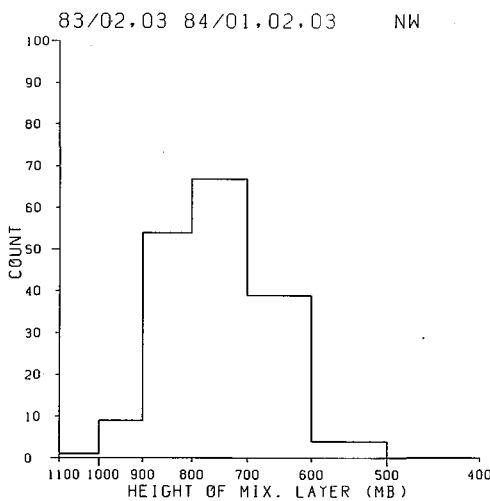


Fig. 6. Histogram of the height of mixing layer.

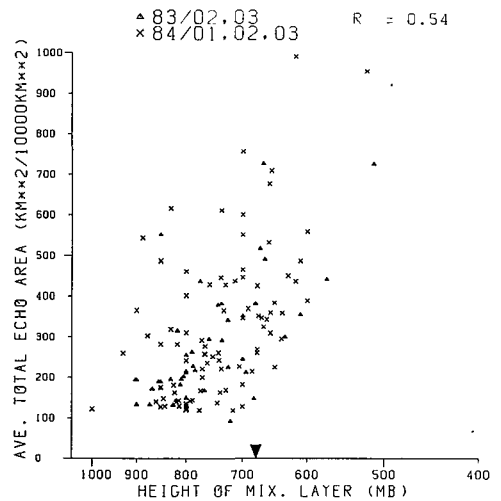


Fig. 7 Relation between averaged total echo area and the height of mixing layer.

た時の混合層の高さの平均値は 678 mb であった。

#### 4. 風速との相関

混合層内の平均風速との相関を Fig. 8 に示した。平均風速と平均エコー面積とは正相関がみられる。平均風速は寒気の吹きだしの強さに比例すると考えられるので、札幌でのエコーが増大するときは風速も強くなっている。また、平均エコー面積が  $500 \text{ km}^2/10,000 \text{ km}^2$  を越えた時の平均風速は  $11.2 \text{ m/s}$  であった。

地上風速を  $0 \text{ m/s}$  と仮定し、 $850 \text{ mb}$  の風を用いた鉛直シアーとの相関を Fig. 9 に示した。図の中には、エコーの画面から主風向と帯状エコーの走向が平行な、いわゆる Longitudinal mode(L)と、直行する Transversal mode(T)と、一つ一つ孤立した細胞状エコーの Cellular clouds(C)と、それ以外のエコー(×)に分けて、図中に記入した。鉛直シアーと平均エコー面積の間にも正相関がみられ、平均エコー面積が  $500 \text{ km}^2/10,000 \text{ km}^2$  を越えた時の平均鉛直シアーは、 $9.96 \times 10^{-3} (\text{m/s})/\text{m}$  であった。また、Longitudinal modeは鉛直シアーが強いときにみられ、Transversal mode, Cellular cloudsは

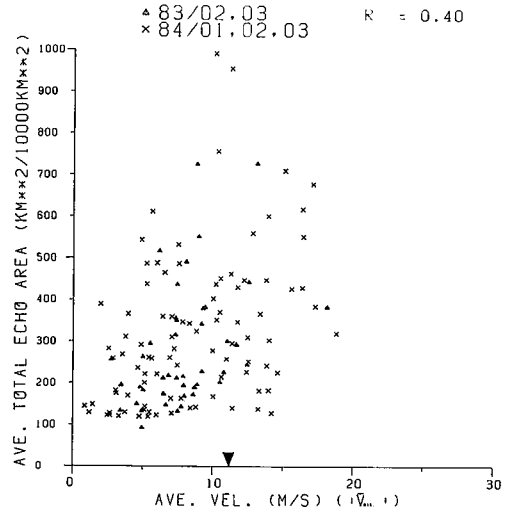


Fig. 8. Relation between averaged total echo area and the average wind speed.

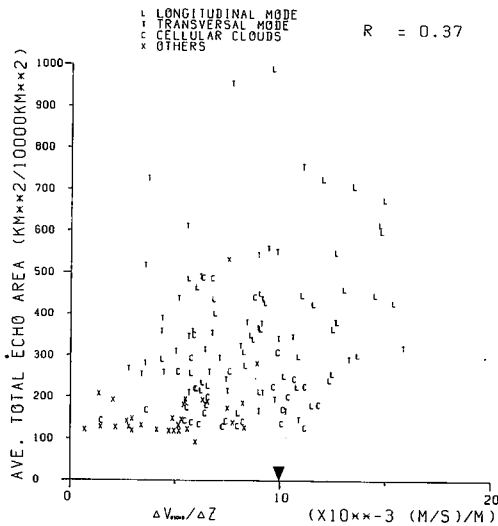


Fig. 9. Relation between averaged total echo area and the wind shear.

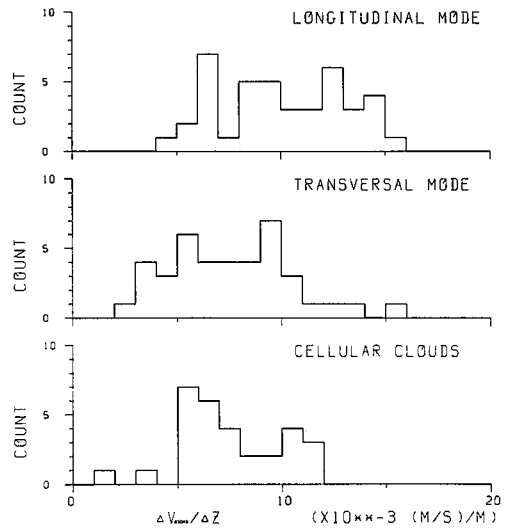


Fig. 10. Histograms of wind shear.

シアアが比較的弱いときにみられた。そのうち、エコー面積が大きいときは Transversal mode, 小さい時は Cellular clouds であることがうかがえる。同じデータではあるが各モード毎の鉛直シアアのヒストグラムを Fig. 10 に示した。Fig. 10 より Longitudinal mode は  $5 \sim 15 \times 10^{-3}(\text{m/s})/\text{m}$ , Transversal mode は、  $3 \sim 10 \times 10^{-3}(\text{m/s})/\text{m}$ , Cellular clouds はエコーの面積が小さくてシアアの小さい時の分布は欠けているが、  $10 \times 10^{-3}(\text{m/s})/\text{m}$  以下で起こっていることが分かる。これらの値は、 Tsuchiya and Fujita (1967) の解析結果と良い一致がみられた。

### VI. ま と め

以上述べてきた解析結果をまとめると Table 2 のようになる。相関係数の絶対値が 0.2 を越えたとき相関があるとし、正相関を + 記号で、負相関を - 記号で記入してある。[+], [-] は相関係数の絶対値が 0.2~0.3, +, - は 0.3~0.4, ++, -- は 0.4 以上である。また、相関がない場合は \* で示してある。この結果は、札幌で西から北の風が観測される時は、結局、冬型の気圧配置が強くなるほどエコーの増大がみられることを示している。すなわち、大陸上空にシベリア高気圧があり、全層にわたって冷たく乾いた空気が大陸から吹き出し、暖かい日本海上で下層に水蒸気と熱の供給を受ける。したがって、大陸側のテレネイでの温位と平均エコー面積とは全層にわたって一様に負相関があり、札幌では、この負相関は 700 mb, あるいは、500 mb の高さにならないとみられない。日本海上を渡ってきた大気の影響を受ける札幌の下層の温位は、海水の表面温度が冬期間あまり変化しないのと同様に、エコーの増減に関わらずほぼ一定の値になっていて、700 mb, 500 mb では、変動幅が 25 K にもなるのに対し、17 K ほどと散らばり方が減っている。そして、下層においてのみ札幌とテルネイの温位差と平均エコー面積との間に正相関がみられる。これは、海上で大気に供給された水蒸気量や熱量は、海面水温と大気との温度差に比例し、より冷たい空気が海面上を通り抜ける時の方が温度差が大きくなるのでよりたくさん水蒸気と熱、つまり、潜熱と顕熱の供給を受ける。もともと、冷たい大気に下から熱が供給され暖められると大

Table 2. List of the investigated correlations.

		SAPPORO [47412]	TERNEY [31909]	SAPPORO - TERNEY [47412] [31909]
$\theta$	SURFACE	*	-	+
	850mb	[-]	-	+
	700mb	--	-	*
	500mb	--	-	*
$\bar{Q}_{\text{SUR.}-500\text{mb}}$		*	--	++
$H_{\text{MIX.}}$		++	/	/
$\bar{V}_{\text{MIX.}}$		++	/	/
$\frac{\partial v}{\partial z_{\text{SUR.}-500\text{mb}}}$		+	/	/

++: 0.4~    +: 0.3~ 0.4    [+]: 0.2~ 0.3  
 --: -0.4~    -: -0.3~-0.4    [-]: -0.2~-0.3  
 \*: NO CORRELATION

気は不安定になり活発な対流を起こしやすくなる。すなわち、降雪を伴うような積雲、積乱雲が発達しやすくなる。また、地上から 500 mb までの平均比湿は札幌のレーダー・エコーと比べているにもかかわらず札幌での値とは相関がみられず、テルネィとの負相関がみられた。そして、日本海上で供給された水蒸気量と比例すると考えられる札幌とテルネィとの差には、正相関がみられた。札幌周辺の降雪状況と比較しているにも関わらず札幌における比湿とあまり相関がみられないということは、一見、不思議な感じがする。しかしこれは、降雪がない比湿が高い時の大気の状態は、全層にわたって、大陸から吹き出された大気中にすでにたくさん水蒸気を含んでいることを示唆している。冬型の気圧配置があまり強くないときは、吹き出される大気もあまり冷えていないので多くの水蒸気を含んでいる。そして、このあまり冷えていない大気は日本海上の温度との差も少ないので、あまり海面から潜熱と顕熱の供給を受けなくて日本までたどり着き、エコーが増大しないのに、比湿の高い状態を示しているものと考えられる。日本海上でたくさんの潜熱と顕熱の供給を受けた場合は、混合層の高さも高くなっているため混合層が高くまで発達した時に多くのエコーがみられる。冬型の気圧配置が強ければ等圧線がこんでいるので、それだけ風速も強くなってエコーが多くなることをものごとがたっている。Table 3 に、平均エコー面積が  $500 \text{ km}^2/10,000 \text{ km}^2$  を越えた時の平均値を示してある。すなわち、石狩地方に季節風による大雪をもたらす時の典型的な値を示している。これらの値も、上で述べた相関関係を具体的に示している。すなわち、札幌とテルネィの温位差は 700 mb, 500 mb の上空の値は、ほとんど同じであるが、下層ほど札幌の方が暖かくなっている。地表から 500 mb までの平均比湿も降雪のある場合だけの平均値をみると確かにテルネィの値よりも札幌の方が大きくなっていて、日本海上で水蒸気の補給を受けていることが示唆される。そして、混合層の平均の高さが約 680 mb、すなわち、この高さはだいたい 2.5~3 km に相当するので、一般に言われている冬の降雪雲の高さが 2~3 km であることと一致している。また、混合層内の空気が日本海上で変質を受けていると考えられ、これは各高度毎の各温位の動きとも一致している。次に、テルネィと札幌の温位差から札幌に降雪をもたらすときの平均的な日本海海面からの顕熱フラックスを試算してみる。まず、冬期

Table 3. Typical values when radar echo increases.

		SAPPORO [47412]	TERNEY [31909]	SAPPORO - TERNEY [47412] [31909]
$\theta$	SURFACE	268.7K	261.8K	6.4K
	850mb	271.5K	269.0K	2.4K
	700mb	274.9K	273.8K	0.8K
	500mb	302.7K	301.4K	0.4K
$\bar{Q}_{\text{SUR}-500\text{mb}}$		0.77g/kg	0.45g/kg	0.25g/kg
$H_{\text{MIX.}}$		678mb		
$\bar{V}_{\text{MIX.}}$		11.2m/s		
$\frac{\partial v}{\partial z}_{\text{SUR}-500\text{mb}}$		$9.96 \times 10^{-3}$ (m/s)/m		

季節風卓越時に札幌に到達する気流はテルネイ上空を通過すると仮定する。テルネイ—札幌間での単位断面積当りの気柱の顕熱差は、札幌、テルネイの温位をそれぞれ  $\theta_s$ 、 $\theta_T$  とすると、

$$\Delta H = C_P \rho \int (\theta_s - \theta_T) dz = -\frac{C_P}{g} \int (\theta_s - \theta_T) dp$$

で与えられる。 $C_P$ は大気の大気等圧比熱、 $\rho$ は大気の密度、 $g$ は重力加速度である。高度 500 mb より上空の温位差( $\theta_s - \theta_T$ )は小さいものとして無視し、エコー面積が 500 km<sup>2</sup>/10,000 km<sup>2</sup> を越えたときの平均値である Table 3 の値を用いて計算すると、 $\Delta H \approx 250$  cal/cm<sup>2</sup> となる。水の凝結や蒸発の相変化にともなう熱の流入を無視し、この顕熱差( $\Delta H$ )がすべて日本海海面から顕熱フラックスとして供給されたと仮定する。札幌—テルネイ間の距離は約 400 km でこれを平均風速 11.2 m/s で割ると 9.9 時間かかって気団が日本海上を渡ることになる。したがって、日本海海面から得る顕熱フラックスは約 605 ly/day となる。この値は Manabe(1958)の熱収支解析から得られた 1955 年 1 月、2 月の平均顕熱供給量 555 ly/day よりやや大きい値を示しているが、ほぼ一致した値となっている。

この研究では、従来から定性的に述べられていた事柄を、石狩湾上にあるエコーの面積をパラメーターにし石狩地方の降雪状況と気象要素の関係を統計的に整理したものである。具体的な日本海上での雲の発達の様子はレーダーで観測できる範囲よりもスケールがもっと大きいものなので気象衛星からの観測の方が適していると考えられる。そのような解析は、現在、正田等(1986)によって進められていて、非常に興味深い結果が得られている。今後更に、石狩地方に出現する冬期の雪雲を多方面から見つめて、降雪のメカニズムの理解をより深めてゆく必要がある。

**謝辞** 本研究に当たって気象レーダーのデータを提供していただいた札幌市建設局土木部、及び、高層データの提供をしていただいた気象庁予報部数値予報課の方々に感謝の意を表します。

## 文 献

- 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一. 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) — 予測実験一. 北海道大学地球物理学研究報告, 44, 53–65.
- 遊馬芳雄・菊地勝弘, 1987. レーダー・エコーの進入方向別にみた札幌市内域の降雪特性とエコーの出現頻度特性について. 北海道大学地球物理学研究報告, 49, 317–330.
- 正田尚志・菊地勝弘・遊馬芳雄・元木敏博, 1986. GMS から見た日本海北部の冬季の雲の特徴. 日本気象学会秋季大会講演予稿集, 50, 217.
- 菊地勝弘・石川照高・七沢 謙・由田建勝, 1975. 豪雪(台風集中豪雨雪の防災計画モデルに関する研究). 文部省科学研究費自然災害特別研究成果, A-50-8, 77–111.
- 菊地勝弘・今 久・谷口 恭・遊馬芳雄, 1984. 札幌市における最近 10 冬期間の降水の特徴. 北海道大学地球物理学研究報告, 44, 1–21.
- 七沢 謙, 1975. 道央地方における雪のエコーの特徴と降雪予報. 研究時報, 27, 177–188.

- Manabe, S., 1958. On the estimation of energy exchange between the Japan Sea and the atmosphere during winter based upon the energy budget of both the atmosphere and the sea. *J. Meteor. Soc. Japan*, **36**, 123–134.
- 中平 治, 1986. 石狩湾上の降雪雲のレーダー・エコーの統計的性質に関する研究. 北海道大学大学院環境科学研究科修士論文, 95 pp.
- Tsuchiya, K. and T. Fujita, 1967. A satellite meteorological study of evaporation and cloud formation over the winter Pacific under the influence of the winter monsoon. *J. Meteor. Soc. Japan*, **45**, 232–250.