



Title	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
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, 49, 317-330
Issue Date	1987-03-30
DOI	<a href="https://doi.org/10.14943/gbhu.49.317">https://doi.org/10.14943/gbhu.49.317</a>
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/14178">https://hdl.handle.net/2115/14178</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	49_p317-330.pdf



## 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

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61年11月25日受理)

### **Snowfall Properties in the Sapporo City Area and the Occurrence Frequency of Radar Echoes over the Ishikari Bay, Hokkaido, Japan**

By Yoshio ASUMA and Katsuhiko KIKUCHI

Department of Geophysics, Faculty of Science, Hokkaido University

(Received November 25, 1986)

Horizontal distributions of snowfalls in the Sapporo City area located in the Ishikari Plain, Hokkaido Island, Japan, and that of the occurrence frequency of radar echoes over the Ishikari Bay are statistically analyzed with respect to the invasion direction of radar echoes over the Ishikari Bay during three winter seasons (eight months) from 1983 to 1985. The data obtained by the simple weather radar system of the Sapporo Science Center were used. These statistical analyses averaged individual snowfall characteristics and clarified the climatological characteristics of the snowfall phenomena and their mechanisms in this region.

Although the most frequent invasion direction of the radar echoes over the Ishikari Bay is WNW, the most frequent direction of the echoes when the snowfalls in the Sapporo City area is from NW to NNW. The difference between directions of the echoes is explained by the existence of mountainous regions located westward of the city. When the invasion direction of echoes is westerly, the invasion of echoes is obstructed by the mountainous regions and they fail to pass over the city area.

The frequency distribution of invasion of echoes over the Ishikari Bay showed characteristic patterns. That is to say, the most frequent regions of the echoes over the Ishikari Bay moved clockwise along the coastline of the bay from the offshore of Hamamasu to the offshore of Otaru with the clockwise change of invasion direction from WSW to N. It seems that the most frequent regions correspond to the regions where the cold air masses pass for a long distance over the sea surface supplying warm moisture from the sea surface. Further, the regions correspond to the convergence area formed by the topographical effect of Shakotan Peninsula. The reason why the radar echoes concentrate in these regions has not been clarified, however, it seems to be connected to the topographical convergence of divergence of Shakotan Peninsula and the formation mechanisms of precipitating clouds in these regions.

The importance of this kind of analysis is gradually increasing with the development of the computer technology. The statistical and climatological properties and characteristics of the radar echoes are essential for the understanding of the mechanisms of heavy snowfalls and the very short range prediction of snowfalls in the Ishikari Plain including Sapporo City.

## I. はじめに

北海道石狩地方に局地的に大雪をもたらす雪雲の構造、動態、及び、その降雪状況は、これまでに多くの研究者達によって調べられてきた (Higuchi (1963), Magono et al. (1964, 1966), Magono (1971), 菊地等 (1972, 1973), 李等 (1972, 1973), 七沢 (1975)). それらを簡単にまとめると、降雪雲の構造は、一般的には帯状を示し、その帯が石狩平野のどこにかかるかによって降雪量に大きな差がでること、降雪分布も雪雲の帯状に対応して帯状をしていること、降雪は収束効果、Barrier effect、地面との摩擦の効果等、地形や地面の効果を受けていること、等にまとめられる。最近の研究から、菊地等 (1984) によって、札幌管区気象台での観測データをもとに冬期 10 年間の降雪特性を調べた結果、降雪時の風向は、西から北にかけての風向が多く、これは季節風卓越時の風向と一致していて、特に、北西風の場合が圧倒的に多いことが指摘された。東根 (1985) のレーダー観測、及び、数値実験より、石狩湾上の雪雲が積丹半島や、小さな岬の影響を受けて進行方向が変わることも報告されている。さらに、藤吉等 (1986) による、三次元ドップラー・レーダーを用いた雪雲の内部構造との関連を調べた研究も報告されている。

本論文では、札幌市内域の降雪特性と石狩湾上のレーダー・エコーの頻度特性をその動きに関連させて統計的に扱った。レーダー・エコーの出現頻度や降雪状況を数年間に亙る統計処理を行った研究は国内では、まだ、あまり例がない。このような統計解析は、降雪の気候学的特徴を明らかにし、特に、石狩平野を挟む積丹半島や増毛山地の地形が降雪に与える影響が明らかになり、札幌市内域の降雪機構の理解を深めることに役立つことになる。そして、この領域は、遊馬等 (1984a, b, c) によって短時間降雪予測実験が行われている地域でもある。このような札幌市の市内域といった局地的な降雪特性とレーダー・エコーの統計的特性とを結びつけた研究は、短時間予測の精度を高める上でも重要なことであると考えられる。また、レーダー・エコーだけを用いた運動学的な単純補外による降雪の予測では、レーダーの探知距離や降雪雲の寿命等を考えると限界があり、それ以外の降雪予測方法の可能性を検討することに対しても、降雪特性あるいはエコーの出現頻度といった降雪の統計的理解は、その必要性を帯びてくるものと考えられる。

地形が降雪状況に影響を与える例として、本研究の北海道石狩地方以外にも、国内では、北日本の日本海上の雲の動きや走向が佐渡島や能登半島によって曲げられ、その風下域である北陸地方の降雪分布にも影響を与えていることが、宮沢 (1966), Matsumoto (1967), 八木等 (1983) によって報告されている。

## II. 解析データ

1983年2月3月, 1984年1月2月3月, 1985年1月2月3月の3冬期間, 計8ヶ月間のデータについて統計解析を行った。

この解析に用いたレーダー・データは札幌市東部に位置する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) に設置された簡易気象レーダーによるものである。このデータは 15 分毎に得られ、磁気テープに 1 km × 1 km メッシュ毎の降雪エコー強度が 7 段階のグレー・スケールのレベルで収められている。レーダーの性能及びグレー・スケールと雨の Z-R 関係を使つての降雪強度との対応は Table 1 に示してある。詳細は、遊馬等 (1984b) を参照されたい。本

Table 1. Radar data of the Sapporo Science Center Radar.

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

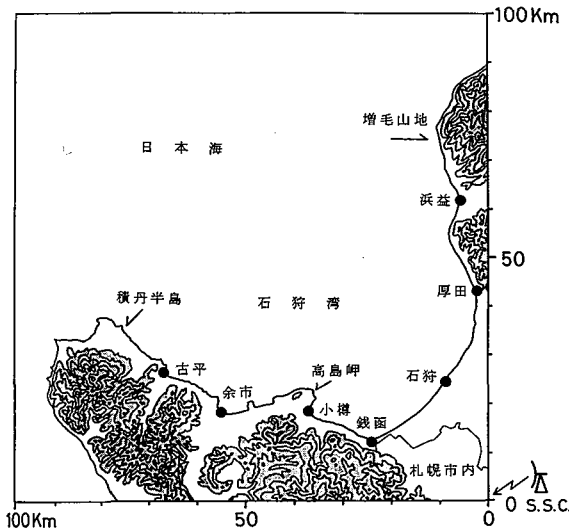


Fig. 1. Radar coverage area of the Sapporo Science Center Radar and its topographical map.

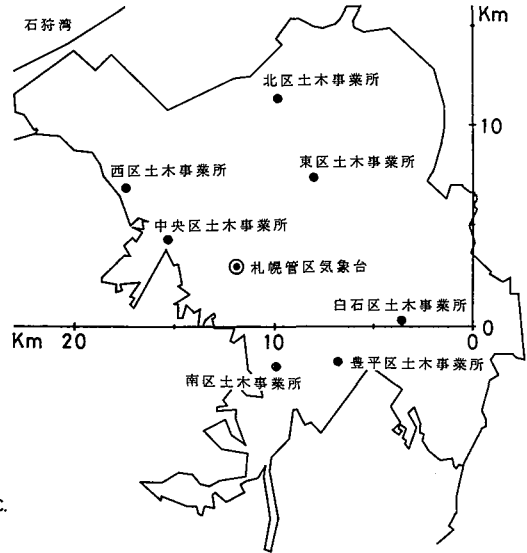


Fig. 2. Locations of the observation stations.

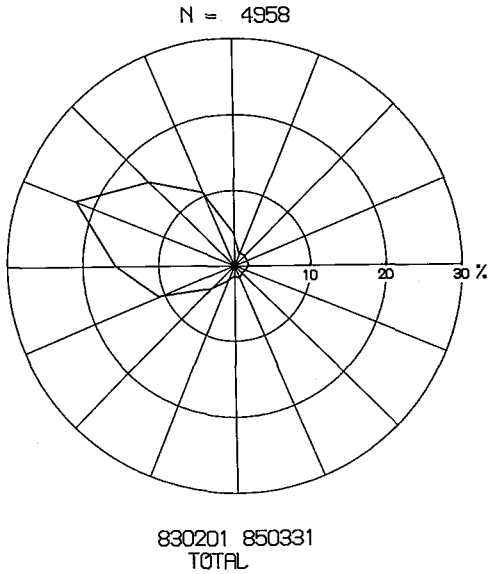
論文では、磁気テープに収録された4つの仰角( $-0.2^\circ$ ,  $0.4^\circ$ ,  $1.0^\circ$ ,  $2.0^\circ$ )のデータのうち、仰角 $-0.2^\circ$ のデータを使用し、収録全画面の1/4、すなわち、季節風卓越時に札幌の風上にあたる北西部の $100\text{ km} \times 100\text{ km}$ のデータだけを用いた。解析に使用したデータの範囲とその地形図をFig. 1に示した。レーダーの位置は図の右下端(S.S.C.)であり、図にはレーダーの位置からの座標と距離を示してある。影を施してある部分は高度200 m以上の地域で山岳地帯を示している。図の南端の山岳地帯は横丹半島であり、東端は増毛山地である。このように、データの収録範囲の大部分は石狩湾上の海上のデータで、一部山岳地帯を含む陸上のデータが含まれている。

解析に用いた降雪量のデータは札幌管区気象台の10分間降水量データと市内7ヶ所にある札幌市土木部土木事業所における積雪板による1日3回(09:00-15:00, 15:00-21:00, 21:00-09:00)の降雪深データを使った。札幌管区気象台、土木事業所の位置をFig. 2に示した。Fig. 2はFig. 1の市内域を拡大した図で、図中の座標はレーダーの設置場所を原点とした座標でレーダー・サイトからの距離を示している。実線は札幌市の市内域を表している。

### III. 札幌管区気象台での10分間降水量データを用いた解析

この章では、エコーの進入方位とレーダー・サイトから西北西に約12 km離れた札幌管区気象台(札幌市中央区北2条西18丁目)での10分間降水量との比較を行った。1983年2月から1985年3月までの3冬期8ヶ月間のレーダー・データのうち石狩湾上のレーダー・エコーの面積が $50\text{ km}^2/10000\text{ km}^2$ ( $100\text{ km} \times 100\text{ km}$ )を超えたレーダー・エコー画面については、遊馬等(1984a)の方法を用いて、レーダー・エコー全体としての移動方向(風向)、すなわち、地上付近の降雪域の進入方位を求めることができる。これは、15分毎に得られた2枚のレーダー画像を少しずつずらせながら相互相関係数を最大にする位置より15分間に移動した距離を求め、それからエコーの進入方位を求める方法である。

まず、札幌管区気象台に降雪をもたらす場合のエコーの進入方位について述べる。本論文で用いたレーダー画像は全部で、16,599画面であるが、このうち、4,958ケースについてエコーの進入方位が計算できた。その16方位毎の頻度の百分率をFig. 3に示した。最大頻度は、西北西からの進入で、全体の22.4%を占め、頻度にして1,112回であった。西南西から北北西までの方位からの進入が、それぞれ10%を超えており、この5つの方位からの進入は全体の74.8%、つまり、約3/4を占めている。また、北北東から南南

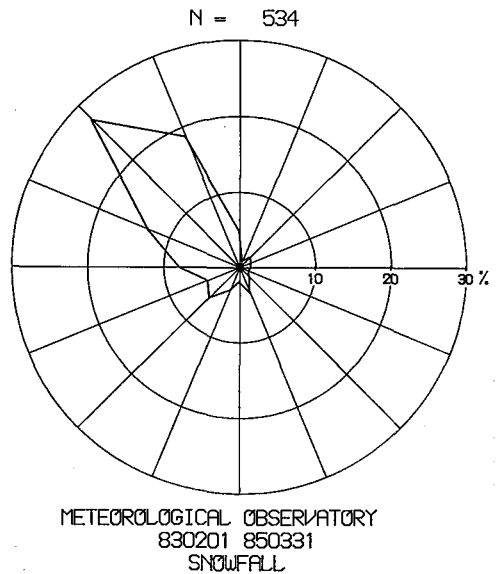


**Fig. 3.** Frequency distribution of the invasion direction of radar echoes over the Ishikari Bay.

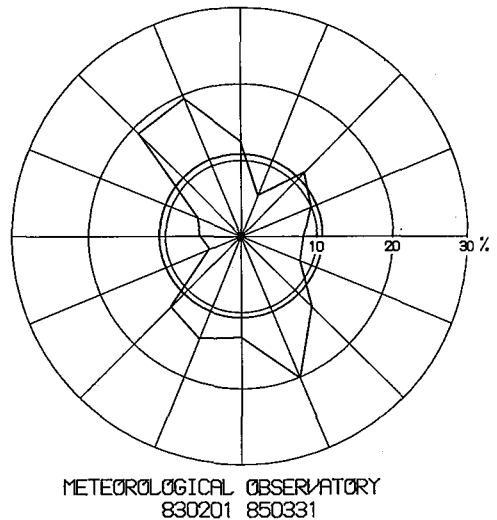
西までの方位からの進入は、それぞれ、2%を割って、これら9方位からの進入は全体の16.3%にすぎない。北と南西からの進入はそれぞれ全体の4.2%、4.5%であった。

エコーの進入方位が計算できた4,958ケースのうち、札幌管区気象台の10分間降水量の値が0.5mm以上を記録した場合は、全部で534ケースあり、その方位別頻度の百分率をFig. 4に示した。最大頻度は、北西からの進入で147ケースあり、全体の27.5%を占めている。10%を超えたのは、西北西から北北西にかけてであり、この3方位で全体の59.2%に達している。Fig. 3とFig. 4のグラフを比べると降雪をもたらした時のエコーの進入方位の最大頻度が北にずれて、北西を示している。また両図の広がりを見ると、Fig. 3で10%を超えたのは5方位であるのに対して、Fig. 4では3方位で、降雪のある場合のエコーの進入方位の分布は、かなり狭く、シャープな分布をしていることがわかる。これは、Fig. 1, Fig. 2で示したように、札幌管区気象台が石狩平野の西側に位置していて、山岳地域に近いことによる影響と考えられる。つまり、西北西、西、西南西の方向からのエコー（降雪域）の進入に対しては山岳地帯はバリアーのように働き降雪域の進入を阻んでいるかのようにみえる。

次に、各進入方位毎に札幌管区気象台で0.5mm/10min.以上の降雪をもたらした場合の頻度をFig. 5に示した。すなわち、Fig. 3とFig. 4の各方位別頻度の比を百分率で示したものである。平均的にみると、エコーの移動が計算できた4,958ケースのうち、534ケースで0.5mm/10min.以上の降雪が観測されたの



**Fig. 4.** Frequency distribution of the invasion direction of radar echoes when the snowfalls were observed at the Sapporo District Meteorological Observatory.



**Fig. 5.** Frequency distribution of the invasion direction of radar echoes over the Ishikari Bay to that of snowfalls at the Sapporo District Meteorological Observatory (Fig. 3/Fig. 4).

で全体の10.8%が札幌管区気象台付近に降雪をもたらしたことになり、その値をやや太い実線の同心円で図中に示した。この図より、北西あるいは北北西からの進入に対してはかなり高い割合で降雪をもたらしているが、西南西、西、西北西からの進入についてはFig.3で示したように発生頻度が多いにもかかわらず、降雪をもたらす割合が小さいことを示している。一方、北東から南西にかけての進入方位に対しても10%前後から20%の値で比較的高い値を示しており、特に、南南東からの進入が20.2%で特に高い割合を示している。Fig.3より、この進入方位を持つエコーの出現頻度は、全体の1.9%で出現率が少ないにもかかわらず降雪をもたらしている割合は高くなっている。この方位と180°反対の北北西の割合も高いことと関連して興味深いのが、この両方向は山岳地帯で両側を挟まれた札幌から苫小牧へ抜ける石狩低地帯の方向とも一致していて風の通り抜ける方向と同じであるのも興味深い。

次に、進入方位別エコー面積と積算降水量の関係について述べる。グレー・スケールのレベル1 (1.8 mm/h) 以上のエコーの総面積をここではエコー面積と定義し、エコー面積と降雪期間中の積算降水量との関係について調べた。札幌管区気象台で観測された一連の10分間降水量のうち、3時間以内の時間間隔で断続的に降雪があった場合、それを1回の降雪とみなし、その前後、3時間を含めた時間内での最大エコー面積と降水量の関係調べた。この定義にしたがって、1983年2月から1985年3月までの3冬期間の8ヶ月間を調べると合計126回の降雪が記録された。さらに、最大のエコー面積を示す時のエコーの進入方位をその降雪の進入方位とした。この定義に従って降雪の進入方位を決めることができたのは、126回のうち、85回であった。すべての降雪について、最大エコー面積と一降雪期間中の積算降水量の関係を示したのがFig.6である。Fig.7(a), (b), (c), (d), (e)はそれぞれ西、西北西、北西、北北西、北からの降雪の進入の場合のグラフである。エコー面積と積算降水量の関係は、もし、エコーのグレー・スケールのレベルが一定であって、札幌管区気象台の上空を一定の移動速度で通過するとすれば一種の比例関係が存在すると思われる。観測されたレーダー・エコーにはレベル2以上のエコーも存在するが、中平(1986)によると、個々のエコーはレベル1以上とレベル2以上が占める面積の割合は、高々40%であることが報告されていて、半数以上のエコーはレベル1であることがわかっている。もし、気象台上空をエコーが一定の確率でランダムに通過すると仮定すれば、統計的処理をした結果に比例関係がみられるはずである。Fig.6よりすべての降雪に対してのグラフは正相関(相関係数0.50)がみられるものばらつきが大きい。特に、図中の破線で示したように最大エコー面積に対する降水量の上限を与える値は存在するようにみえるが、下限を与える値の方がばらつきが大きい。すなわち、エコー面積が大きくなっても降雪量の少ない降雪が数多く存在している。エコーの進入方位別のエコーの最大面積と積算降水量の関係はデータ数が少ないので確かなことはいくいが西からの進入Fig.7(a)、北西からの進入Fig.7(c)の場合に対してエコーの面積が増大するにもかかわらず降水量の少ない降雪が多くみられ、相関係数の値もよくない。西北西からの進入Fig.7(b)の場合は、データ数が6個しかないので高い相関係数を示しているが、やはりエコーの面積が増大しても降雪量の少ない降雪がみられる。それに対して、北北西からの進入Fig.7(d)、北か

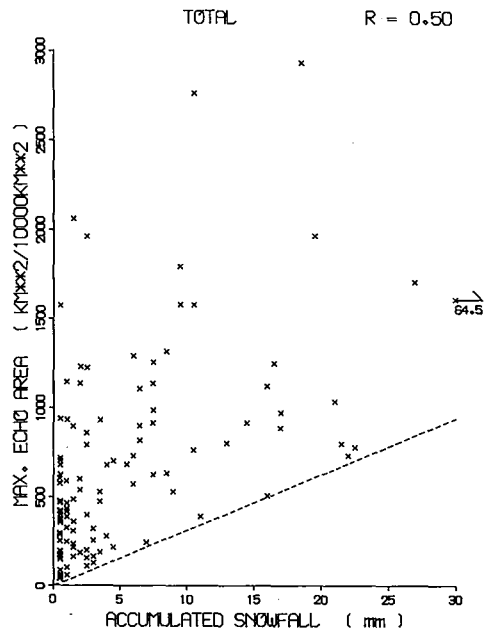


Fig. 6. Relation between maximum echo area and accumulated snowfall.

らの進入 Fig. 7(e)の場合はエコー面積の増大に対して降雪量の増加する傾向が認められる。また、相関係数も双方の場合について0.6を越える値を示している。この様に、エコーの進入方位別の降雪の特徴がいくつか挙げられるが、まだデータ数が十分でないので今後一層のデータの蓄積が必要であると思われる。しかし、これら進入方位別のグラフより、西から北西にかけての進入方位の場合はエコー面積が多くなるにもかかわらず降雪量の少ない降雪、すなわち、気象台上空を通過しない降雪も多いが、北北西や北からの進入に対しては、そのような降雪が減り相関係数も高くなることがわかった。

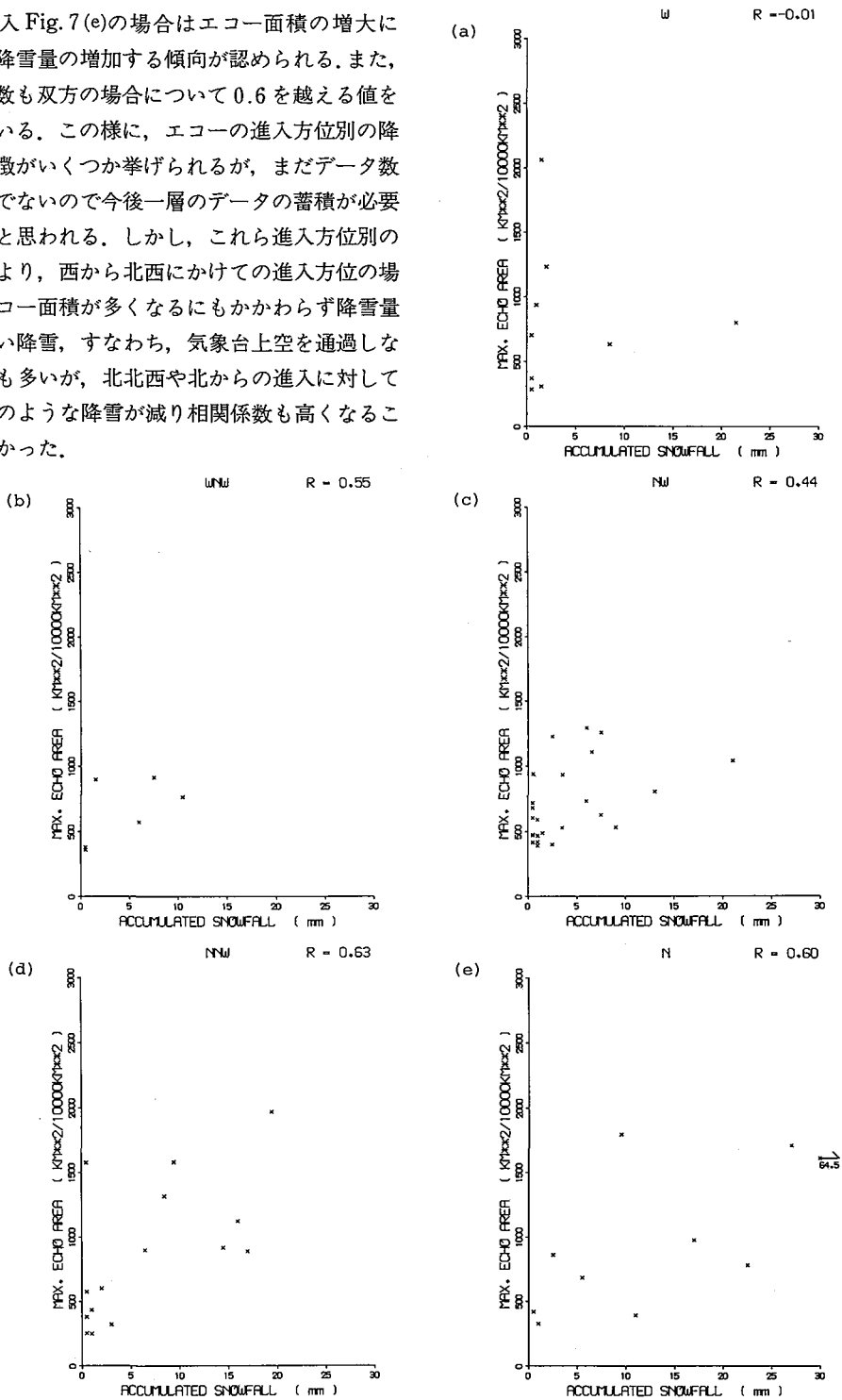


Fig. 7. Relation between maximum echo area and accumulated snowfall at each echo invasion direction. (a) West, (b) West-northwest, (c) Northwest, (d) North-northwest, (e) North.

以上、この章では札幌管区気象台における降水量データをエコーの進入方位に分けて統計解析を行った結果について議論してきた。石狩湾上に発生するレーダ・エコーに対して移動の方向、すなわち、エコーの進入方位を求めると、気象台に降雪をもたらす時のエコーの進入方位は、全進入方位に対して北の方向にずれること、進入方位別の降雪をもたらす割合を調べると、北西、北北西と南南東の方位に対し高い値を示すこと、一降雪あたりの最大エコー面積と積算降水量の割合は西から北西にかけてのエコーの進入方位の降雪に対してはエコー面積が多いにもかかわらず降水量の少ない降雪、すなわち、上空をエコーが通らない場合が多くみられる。これに対し、進入方位が北北西および、北からのエコーに対しては、最大エコー面積と積算降水量は、ほぼ比例し相関係数も高いことがわかった。

#### IV. 札幌市内7ヶ所の土木事業所の降雪データからの解析

前章では札幌管区気象台での10分間降水量という時間的な精度、分解能のよいデータを用いて統計解析を行い、気象台の位置での特徴について論じた。この章では、市内7ヶ所にある各区の土木事業所(Fig. 2の黒丸印)での降雪データを用いて降雪時のエコーの進入方向についての面的広がりについて議論する。

各区の土木事業所では、降雪量を積雪深として前日の21時から当日の9時までの12時間、当日の9時から当日の15時までの6時間、当日の15時から21時までの6時間に分けて測定を行っている。これらのデータを用いて、前章と同様、降雪のあった期間のエコーの進入方位を調べた。ただし、前章のように降雪データの時間分解能がよくないので、大きな誤差を含む統計処理となっている。例えば、前日の21時から当日の9時までの12時間内に降雪が少しでもあれば、その間ずっと降雪があったとして処理した。実際には、1回の降雪の持続時間は1~2時間程度が多いので降雪のない時間帯のほうが長い場合が多数含まれている。

1983年2月から1985年3月まで3冬期間8ヶ月間1cmでも降雪が観測された場合、及び、やや強い降雪、すなわち、5cm/12h以上の降雪強度(測定の時間間隔が12時間の場合は5cm以上、6時間の場合は3cm以上の降雪)の場合のエコーの進入方位別頻度分布を各土木事業所ごとに求め、Fig. 4と同様な頻度分布を百分率で示したのがFig. 8である。図中の各頻度分布図はそれぞれの土木事業所で、降雪が1cmでも観測された時のエコーの進入方向の頻度を実線で、5cm/12h以上の場合の頻度分布を破線で示し、各降雪の回数を括弧内に示した。また、Fig. 5と同様各方位毎にエコーの何パーセントが各土木事業所に降雪をもたらせたか、すなわち、Fig. 3の頻度を分母に取り、Fig. 8の頻度を分子に取ったときの百分率をFig. 9に示した。土木事業所別に実線は1cmでも降雪があった場合、破線は5cm/12h以上の降雪があった場合を示している。各図中のやや太めの実線及び破線の同心円でそれぞれの平均を示した。5cm/12h以上のやや強い降雪の場合(破線)はすべての事業所で、少しでも降雪のあった場合(実線)に対しては、中央区、南区、白石区、豊平区の4つの土木事業所で北西を示している。これは降雪の有無を問わず、すべてのエコーの最多進入方位は西北西である(Fig. 3)ので気象台で降雪があった場合と同様北の方へずれていることを示している。西区、北区、東区の実業所での1cm/12h以上の弱い降雪も含めた降雪では、最多進入方位が全体と同じ北西であって、北の方への片寄りは見られない。これは、これらの地点では山岳地帯の影響を受けにくいからと思われる。各土木事業所でのエコーの進入総数は内陸に入ることによって減少している。この減少傾向は、特に、5cm/12h以上の降雪をもたらしたやや強いエコーに対して大きく、また、市内の東西(東側は北区、東区、白石区、豊平区、西側は、西区、南区、中央区の各土木事業所)で比べると、総数は西側の山側で多く東側で少なくなっている。これは、降雪の機会が海岸に近い方が多く、また、山側で多いことを示している。観測点が入内陸に入るほど降雪の機会が減少することは、中平(1986)が指摘している個々のエコーが最大の面積を持つのは海岸線付近であることや、坪木等(1986)が指摘している上陸後急激にエコーが減少することとも一致している。山側で降雪の機会が多いことは、次章のエコーの出現頻度分布とも関係するが市内のすぐ西側にある山岳地帯が北西、北北西、北から進入する降雪

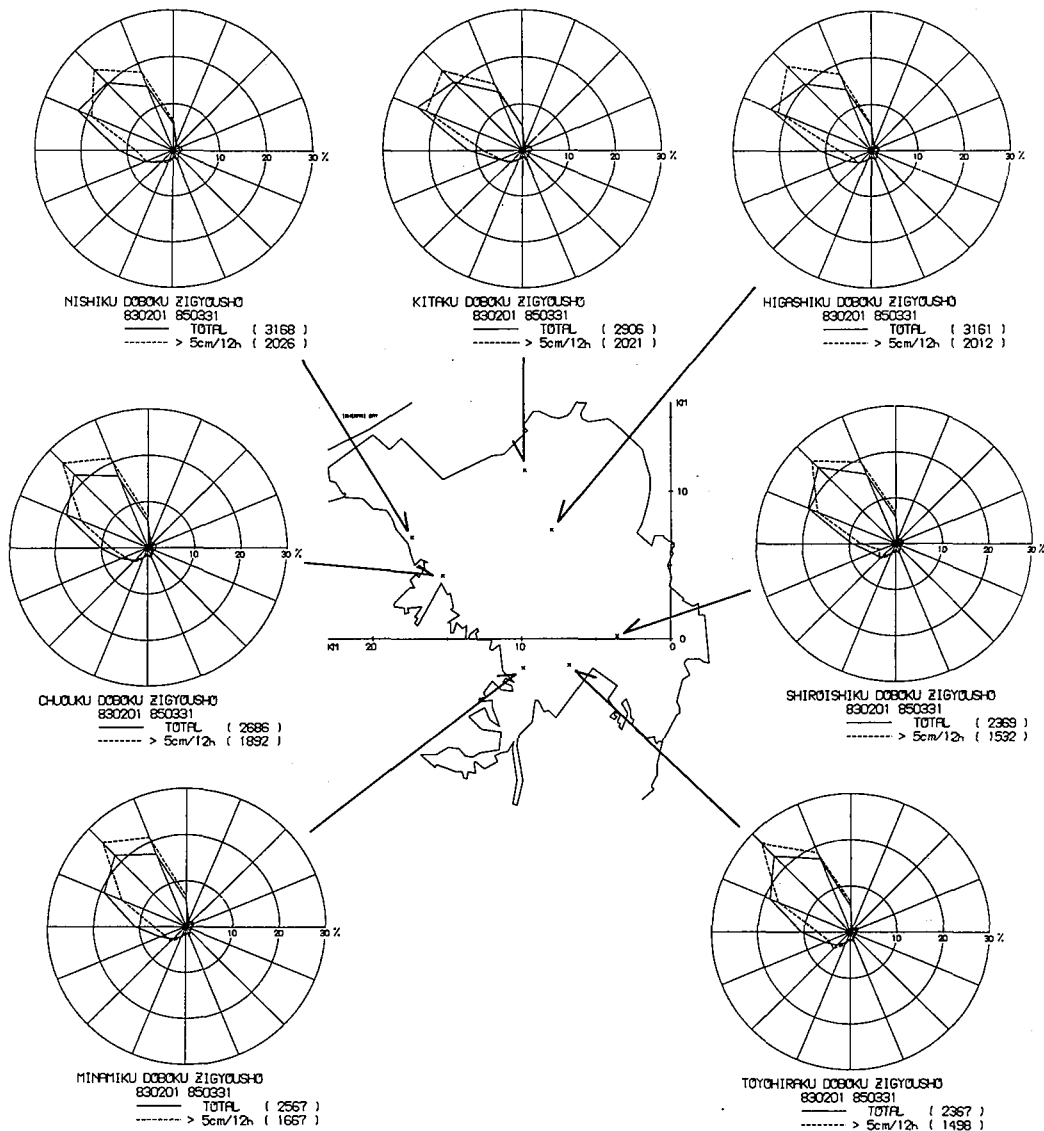


Fig. 8. Frequency distribution of the invasion direction of radar echoes when snowfalls were observed at each observation station.

に対して降雪を寄せ集めるような働きをするものと考えられる。Fig. 9の5 cm/12 h以上のやや強い降雪の場合の分布を比べると、西区、中央区、南区の土木事業所では、北北西の進入方向を持つエコーに対しての頻度が高く狭い分布をしている。一方、北区、白石区、豊平区の土木事業所では北北西ばかりでなくその両隣の北や北西からの進入の場合の頻度も多い。これも、札幌市の西側に位置する山岳地帯の影響による一種の降雪の淘汰であると考えられる。

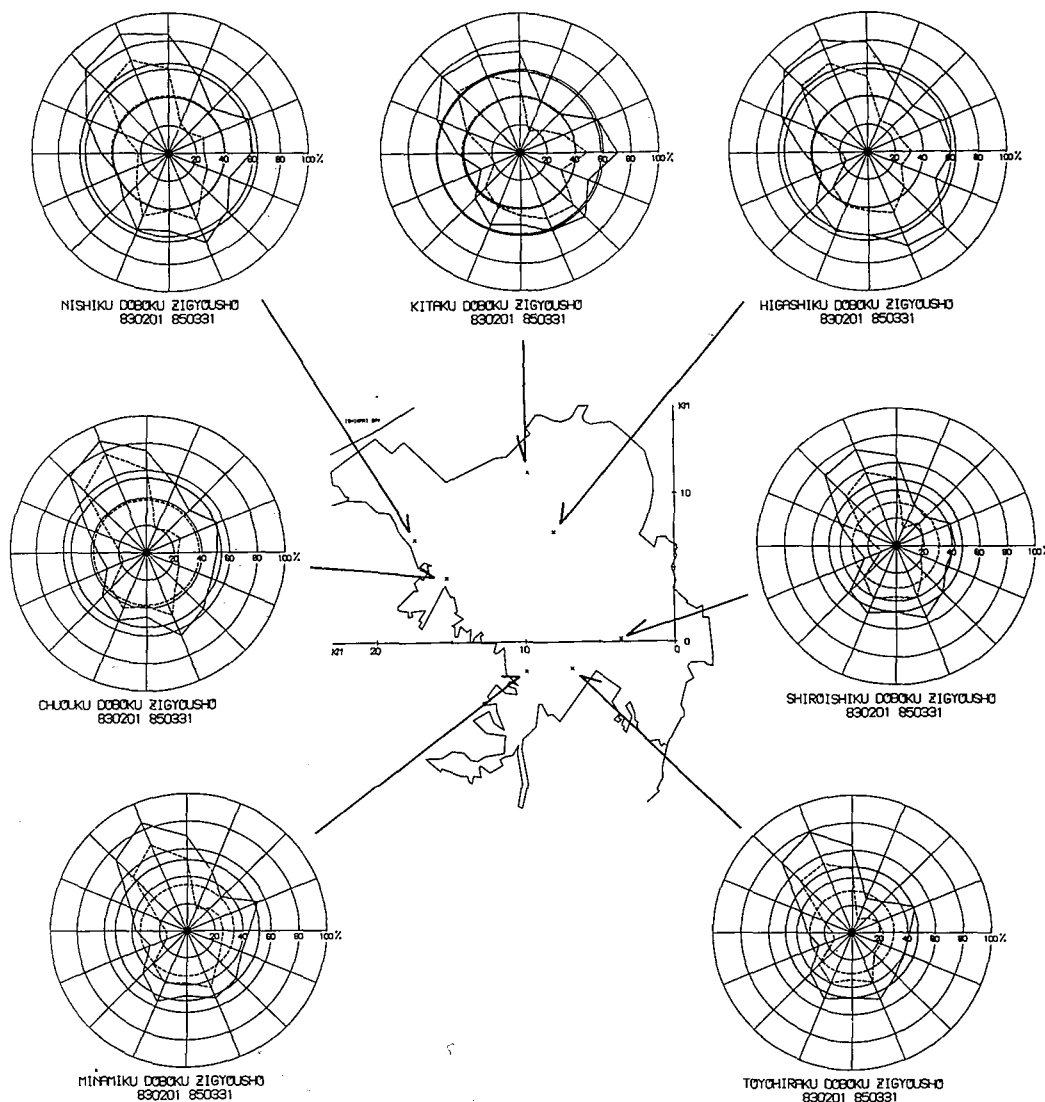


Fig. 9. Frequency distribution of the invasion direction of radar echoes to that of snowfalls at each observation station (Fig. 8/ Fig. 3). Solid lines : all snowfalls, Dotted lines : snowfalls more than 5 cm/12 hrs.

### V. 進入方向別にみたエコーの頻度について

第三章、第四章で述べてきたように札幌市内域の各区域毎の降雪時におけるレーダー・エコーの特徴が調べられた。その結果、札幌市の西に位置する手稲山を始めとする山岳地帯が市内域の降雪状況にも影響を与えていることがわかった。そこで、この章では、エコーの進入方位別に1983年2月から1985年3月までの3冬期間8ヶ月のグレー・スケールのレベル1以上のエコーについて1 km × 1 km メッシュ毎の頻度分布図を作った。このような頻度分布図を作ることによってエコーの通り道や地形に対してのエコーの振舞の特徴を調べることができ、札幌市内域の降雪分布の特徴の理由を考えるための手助けにもなる。

Fig. 10 に3冬期間のレーダー画像16,599枚を重ねてその出現頻度分布を示した。図の右下端がレーダー・サイトである。この画面の一辺は100 km であり、点線で海岸線を示している。半径約70 km を越

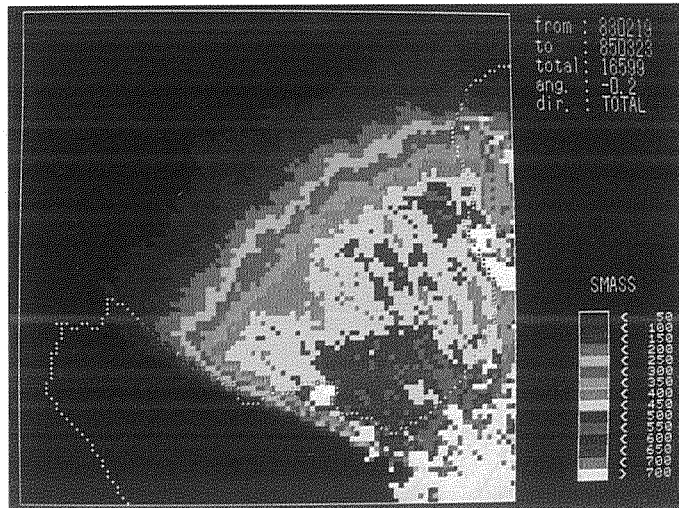


Fig. 10. Occurrence frequency of radar echoes of all invasion directions over the Ishikari Bay.

えると出現頻度が同心円上に減少するのはレーダーの性能によるものである。また、積丹半島上空にエコーがないのは、レーダーの死角になっているためである。更に、レーダー・サイトの近くや山岳に対応する地点に大きな頻度がみられるが、これはグランド・エコーでレーダーは M. T. I. (Moving Target Indicator) 処理がなされているのでグランド・エコーは消去されているはずであるが、完全には除去されずに残っているためのものである。石狩湾上の頻度分布は高島岬、銭函、石狩沖の広い部分に多頻度地帯(450–550)及び浜益沖の小さな多頻度域がみられる。この分布は3冬期間8ヶ月間のレーダーのデータすべての画面に対する分布である。エコーの進入方位別に分けた分布を次に示す。

前述したように15分間隔で取られている2枚のレーダー画像のレベル1以上のエコーが50 km<sup>2</sup>を超えたとき海上のデータだけを使って相互相関係数を求めることでエコー全体の移動方向を求めた。降雪時に多く観測される西南西から北にかけての6つの方位についての頻度分布図を Fig. 11 (a)(b)(c)(d)(e)(f)に示した。(a)はエコーの進入方位が西南西、(b)は西、(c)は西北西、(d)は北西、(e)は北北西、(f)は北の場合である。図中に、それぞれ記号と矢印で進行方位が示してある。(a)から(f)全体を通して言えることは、エコーの出現頻度の多い地帯は進入方向とほぼ平行な帯状をしていて(a)の西南西から(f)の北へ進入方位が変わるにつれて多頻度地帯も石狩湾の湾岸沿いに浜益、厚田、石狩、銭函、小樽へと移動している。次に、進入方位毎の特徴について述べる。(a)進入方位が西南西からの場合、古平から浜益に伸びる進行方向と平行な多頻度地帯がみられる。多頻度地帯の北西側は、レーダーの性能のために頻度分布が同心円上に減少しているので広がりをもっと大きいものと考えられる。石狩湾上を西南西から東北東へ抜ける気流が、あたかも石狩湾上で発達して雲ができてゆくかのように、頻度が古平沖では少なく浜益沖で多くなっている。この分布は、気象衛星の雲写真を解析した Tsuchiya et al. (1967) や、沿海州から日本海へ抜ける気団変質に伴う雲水量の数値実験 (Asai, 1965) とよく類似している。また、余市沖で21–41のコンターが陸地の方向に伸びていて、この先は古平と余市の間に位置する天狗岳 (872 m) の方向に向いている。これもまた、Muramatsu (1979) が指摘したように沿海州のシホタ山脈のピークの働きとよく似ている。そして、エコーの多頻度帯は札幌市内にはかかっていないので、この方向からのエコーは市内にあまり降雪をもたらさない。(b)西からの進入の場合、やはり、進行方向と平行な帯状の分布がみられ厚田と浜益の間にある山岳地帯の沖で頻度が多くなっている。この図からも積丹半島から厚田の方向へ雲雲が進行しているうちにだんだんと成長していくような様子がかがえる。この場合も札幌市内には多頻度帯がかかっていないので

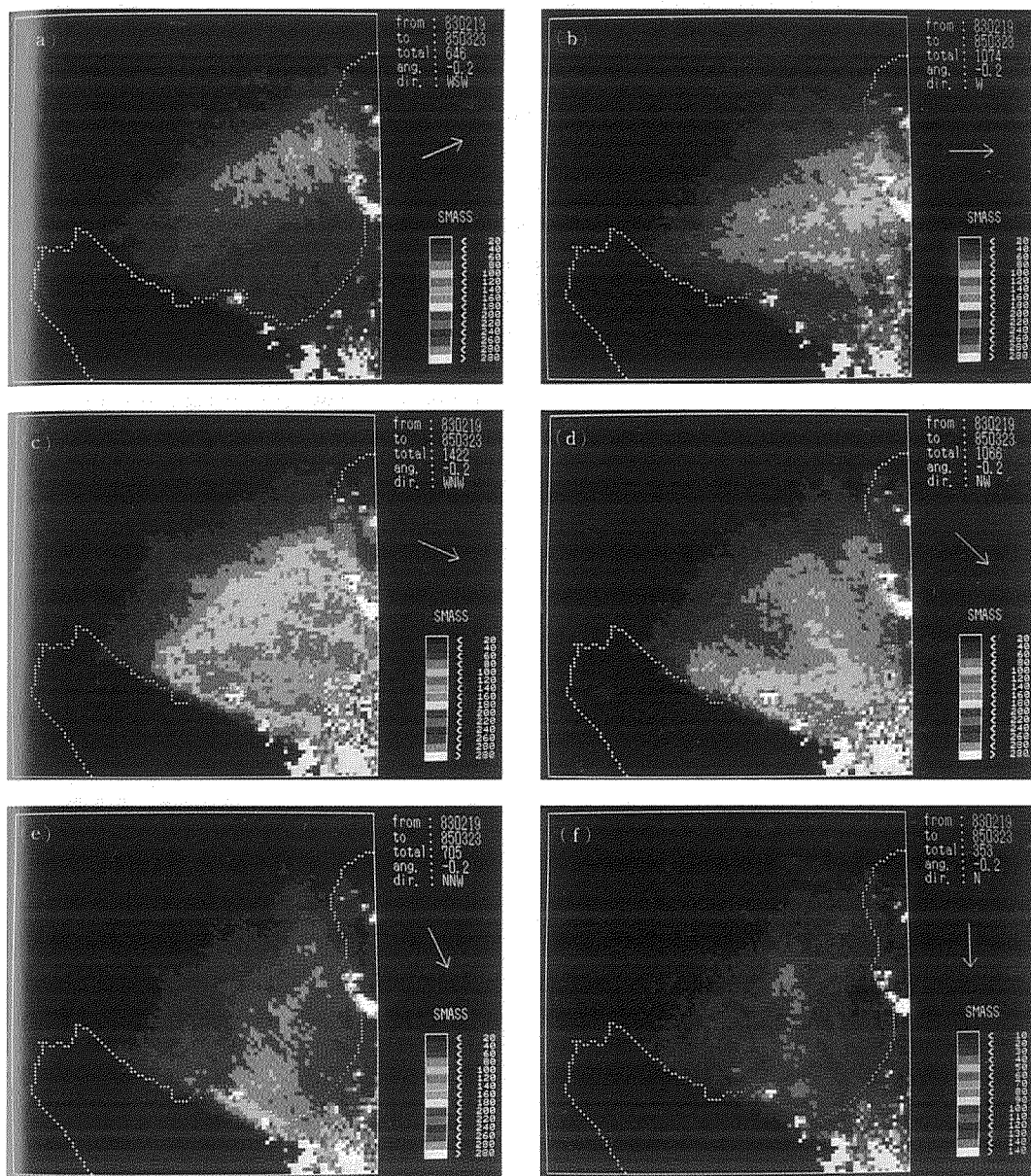


Fig. 11. Occurrence frequency of radar echoes of each invasion direction over the Ishikari Bay. (a) West-southwest, (b) West, (c) West-northwest, (d) Northwest, (e) North-northwest, (f) North.

あまり降雪をもたらさない。(c)西北西からの進入の場合、古平から石狩に向けて東西に伸びる帯状の多頻度地帯の分布がみられる。やはり古平から石狩へ向かうにつれて頻度が多くなっているが、頻度分布の走向は進入方位とは一致せずにはほぼ東西の走向をもっている。そして、進行方向右手に陸地が存在する石狩湾の南部で多頻度(101-180)となっている。これらのことは、東根(1985)による積丹半島の美国や入舸(積丹岬)に設置したレーダー観測や数値計算の結果を支持するものと解釈される。西南西や西の進入方位でみられたように石狩湾上での気団変質的な作用だけを考えるならば石狩湾全体で多頻度になるはず

であるが、進行方向右手の石狩湾南部だけが多頻度地帯となっている。また、この場合、小樽から銭函にかけての山岳地帯のライン上でエコー頻度が多くなりむしろ逆に減っている。山岳地帯は一種のバリエーションのように働いていて、この地帯では下降流(発散域)になって、陸から海にかけて風が吹き出している可能性も考えられる。エコーの多頻度帯は札幌市の東端にかかっているので市内の東端で降雪があるものと考えられる。(d)北西からの進入の場合、やはり、進行方向右手の半島に沿った海岸近くに多頻度帯がみられ、特に、山岳地帯のラインに沿う小樽、銭函にかけてが多く、札幌に近づくにつれて多くなっていて、多頻度地帯は札幌市内全域にかかっている多くの降雪を市内にもたらしている。また、石狩湾の中央にも北西から南東へ延びる多頻度地帯がみられ、この部分はエコーの通り道になっている。(e)北北西からの場合、北西の場合(d)と同様、進行方向右手の海岸に沿った地帯に多く、特に、小樽、銭函へ延びる山岳地帯のラインに沿った多頻度帯がみられ、この多頻度帯は札幌市内、特に、西側の山岳地帯にまで延びている。小樽から銭函にかけての陸上の部分で特に多くなっていることは、山岳地帯の走向とエコーの進入方向を考えて、山岳地帯に直接ぶつかりこの地帯で気流が上昇する成分として働くので雪を降らせやすいものと考えられる。(f)北からの進入の場合、石狩湾中央にエコーの通り道に対応する南北に延びる多頻度帯が存在し小樽から銭函にかけての山岳地帯で21-40の頻度分布帯の面積が広がっているが、頻度の増加はそれほど多くない。多頻度の広がりには市内の西側にはいりこんでいる。

以上のようにエコーの進入方位別に分けたエコーの頻度分布には特徴的な分布が現れ、この分布と第三章で述べた札幌市内の降雪分布と密接な結びつきがあると考えられる。すなわち、西南西、西からの進入の場合は発生頻度が多いにもかかわらず、積丹半島の影響を受け、あるいは、市内に進入するための降雪域の通り道には海上の部分が少ないために札幌市内には降雪をもたらしにくい。西北西からの進入に対しては、市内で降雪があるとすると東部に降雪をもたらし、北西、北北西になるにつれて札幌市の西側でも降雪をもたせ、北になると、札幌市の西側あるいはより西の銭函、小樽の方で降雪が多くなる。したがって、札幌市内域の降雪は石狩湾内で発生するエコーの移動方向は西北西の場合が多いので東部に雪を降らせるものが多いにもかかわらず、西側にある山岳地帯のために、市内の西側では北西、北北西、あるいは、北の方位からの進入に対しての降雪の機会が多くなりシーズンを通しての降雪回数をみると市内の西側で多くなると理解される。

石狩湾上のエコーの頻度分布は、西南西、西の進入方位に対しては、湾上でエコーが発達していくような分布がみられた。西北西、北西、北北西、あるいは、北の進入方位に対しては進行方向右手にあたる石狩湾南部の積丹半島に沿った領域に多頻度帯がみられた。アメリカ五大湖での解析(Holroyd, 1971)と同様、西南西、西からの場合は、暖かい海面から熱と水蒸気の供給を受け海上で発達したものと理解され、西北西、北西、北北西、北からの場合は、海上と陸上の粗度、あるいは、摩擦の違い、すなわち、運動量の抵抗係数の違いによって、進行方向右手の海岸付近で収束がおこっているものと理解される。つまり、上空では地衡風が吹いていても、下層では地面との摩擦があるので風向が左にまげられる。このまがり具合は、摩擦力すなわち粗度に比例し、摩擦力が小さい海上では少ししか左にずれないが、摩擦力の大きい陸上、あるいは、山岳地帯では、より左にまげられる。したがって、下層では進行方向の右手の海岸近くで収束がおこり、逆に、左手では、発散となる。収束域に雲、すなわち、エコーができやすいので冬季節風時の積丹半島沖のような風向の右手にあたる海岸付近で多くなるが、増毛山地沖のように風向の左手に位置する領域ではそれほどエコーの頻度が多くなる。さらに、西北西の場合は小樽沖から銭函沖にかけての海岸線付近では少なく、少し沖合いで多くなるのに対し、北西、北北西では、海岸付近、あるいは、山岳地帯である内陸で多くなっていることは、東根(1985)の数値実験で説明される。東根は、アメリカ五大湖のエリー湖による lake effect snowstorm に対して用いられた Lavoie (1972) の数値実験を石狩湾周辺地域に適応させた。その結果、初期条件として北西の風(315°), 12 m/s, 混合層の高さを 3 km として計算をおこなった結果、石狩湾内の風向は、Fig. 11 (c) に対応する 295° から 300°, すなわち、西北西

の風向が得られ、このときの降雪は、小樽沖から銭函沖にかけての海岸付近では降雪が少なく石狩と厚田の中間付近に多くなる傾向がみられた。また、他の初期条件は同じで風向だけを北北西(337.5°)にすると、石狩湾内の風向は、Fig. 11 (d),あるいは、(e)に対応した320°から330°の風向、すなわち、北西から北北西の風向となり、この時の降雪は、逆に、小樽から銭函にかけての山岳地帯で降雪が多くなり、厚田付近の内陸では減る傾向がみられた。定性的ではあるが、両者ともよく一致していて、数値計算で降雪の多い地域にはエコーの頻度が多く、少ない地域には頻度が少ない傾向が確かめられた。東根(1985)の行った数値実験はこの地方の特徴的な雪雲の構造であるバンド状雲は再現しにくいので個々の降雪分布は再現しにくいのが本研究で行ったような年間を通しての統計処理を行った後の降雪状況をよく説明するものと考えられる。

## VI. ま と め

札幌市青少年科学館の気象レーダー・データをエコーの進入方向別に1983年2月から1985年3月までの3冬期間8ヶ月間の札幌市内域の降雪特性及び石狩湾上空のエコーの頻度分布を統計的に調べた。長期間のデータを統計的に調べることは複雑な個々の降雪を平均化し、降雪機構の気候学的特徴を捕らえることができる。札幌市内に降雪をもたらすエコーの進行方位の分布は石狩湾上に発生したすべてのエコーから求めた進行方位とは異なり、観測位置によって変わってくるのがわかった。この原因としては札幌市の西に位置する手稲山を始めとする山岳地帯の存在があげられた。また、進入方位別にまとめたエコーの頻度分布にも特徴的な分布がみられ、進入方位が西南西から北へと時計回りに変わるにつれて多頻度を示す位置も浜益沖から小樽沖へと時計回りに変わる様子がみられた。多頻度帯は気塊が石狩湾上を長く通ることのできることで、進行方向の右側に片寄りやすいこと、及び、積丹半島等の地形的要因による収束の影響を受けることの条件を満たす位置にできやすいことがわかった。この原因として、海面からの熱と水蒸気の供給、海面と、陸地(山岳)の粗度の違いによるものと考えられる。石狩湾上のエコーの発生頻度分布図からみると、石狩平野が北西に積丹半島、北に増毛山地といった間口を北西に向けたような格好をしているが、積丹半島と増毛山地とは季節風卓越時に雪雲の進行方向の右手になるか左手になるかで降雪をもたらす効果が少し違うようで、右手にあたる積丹半島の存在がエコーの頻度分布により大きな影響を与えている。進行方位別のエコーの頻度分布は東根(1985)が行った数値実験の降雪分布と一致する傾向もみられた。札幌市の西方にある山岳地帯が付近の降雪を多くするか減少させるかは山岳地帯の走向と石狩湾内の風向に依存することもわかった。現在この地方の降雪、及び、雪雲に対する研究が数多く展開されていて、藤吉等(1986)による主風向と垂直なトランスバース・モードの雲の存在や、上田等(1986)による降雪による下降流の形成といった雲物理的要因が構造に与える関係が今後明白になるものと期待される。

本研究のような数年間に亘るデータを統計的に気候学的にみる研究は降雪や雪雲のメカニズムを知る上で重要なばかりでなく短時間予測といったやや実用的な側面からも必要なことであり、コンピューターの発達と共にデータ処理能力及び、データの収録能力があがった現在ますます重要な研究方法となるものと考えられる。

謝辞 本研究に用いたレーダー・データは、全て札幌市青少年科学館レーダーのものであり、レーダー・データおよび降雪量データを提供して頂いた札幌市建設局土木部、および、降水量データを提供して頂いた札幌管区气象台に厚く感謝いたします。また、適切な助言を与えてくださった研究室の上田 博助教授、及び、卒業生の東根 聡氏にも感謝の意を表します。

## 文 献

- ASAI, T., 1965. A numerical study of the air-mass transformation over the Japan Sea in winter. *J. Meteor. Soc. Japan*, **43**, 1-15.
- 遊馬芳雄・菊地勝弘・今 久, 1984 a. 簡易気象レーダーによるエコーの移動速度について. 北海道大学地球物理学研究報告, **44**, 23-34.
- 遊馬芳雄・菊地勝弘・今 久, 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 c. 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.
- 東根 聡, 1985. 北海道西岸, 積丹半島付近における冬期季節風時の降雪雲に対する地形の効果に関する研究. 北海道大学大学院環境科学研究科修士論文, 125 pp.
- 藤吉康志・坪木和久・若浜五郎, 1986. 積丹半島に沿ったバンド状エコーの形成機構. 日本気象学会春季大会講演予稿集, **49**, p. 22.
- HIGUCHI, K., 1963. The band structure of snowfalls. *J. Meteor. Soc. Japan*, **41**, 53-70.
- HOLROYD, E. W., 1971. Lake-effect cloud bands as seen from weather satellites. *J. Atmos. Sci.*, **28**, 1165-1170.
- 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.
- 菊地勝弘・孫野長治・播磨屋敏生・梶川正弘・石川照高, 1972. 石狩平野における降雪分布の観測. 北海道大学地球物理学研究報告, **27**, 1-12.
- 菊地勝弘・播磨屋敏生・石川照高・足立俊三, 1973. 石狩平野における降雪分布の観測(II). 北海道大学地球物理学研究報告, **30**, 1-14.
- LAVOIE, R. L., 1972. A mesoscale numerical model of lake-effect storms. *J. Atmos. Sci.*, **29**, 1025-1040.
- MAGONO, C., K. KIKUCHI, S. LEE, T. ENDO and T. KASAI, 1964. An observation of snow crystals and their mother cloud. *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ. Ser. VII (Geophysics)*, **2**, 123-148.
- MAGONO, C., K. KIKUCHI, T. KIMURA, S. TAZAWA and T. KASAI, 1966. A study on the snowfall in the winter monsoon season in Hokkaido with special reference to low land snowfall. *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ. Ser. VII (Geophysics)*, **2**, 287-308.
- MATSUMOTO, S., 1967. Orographic edge effect on the downstream cumulus activity. *J. Meteor. Soc. Japan*, **45**, 500-503.
- 宮沢清治, 1966. 日本海沿岸の降雪に関するシンポジウム. 天気, **13**, 436-440.
- MURAMATSU, T., 1979. The cloud line enhanced by upwind orographic features in winter monsoon situation. *Geophys. Mag.*, **38**, 1-15.
- 七沢 謙, 1975. 道央地方における雪エコーの特徴と降雪予報. 研究時報, **27**, 177-188.
- 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.
- 李 柁雨・菊地勝弘・孫野長治, 1972. 石狩平野の降雪の水平分布(I)(内陸部の降雪と風). 北海道大学地球物理学研究報告, **27**, 13-23.
- 李 柁雨・菊地勝弘・孫野長治, 1972. 石狩平野の降雪の水平分布(II)(海岸部の降雪と風). 北海道大学地球物理学研究報告, **28**, 1-12.
- 坪木和久・藤吉康志・遠藤辰雄・若浜五郎, 1986. 上陸後急激に衰弱する降雪エコーについて. 日本気象学会春季大会講演予稿集, **49**, p. 23.
- 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.
- 上田 博・城岡竜一・菊地勝弘, 1986. しゅう雪に伴う下降流に関する研究(I) - 地上気象解析一, 日本気象学会秋季大会講演予稿集, **50**, p. 83.
- 八木正允・内山良子, 1983. 能登半島と佐渡島を迂回し合流する降雪雲の流れ - 上越地方の大雪に関連して一. 天気, **30**, 291-294.