

流氷とシークラッターの識別

大井 正行^{1,2}, 千貝 健³, 福士 博樹³, 藤吉 康志²

1. (株) ジェイ・ツー
2. 水・物質循環部門雲科学分野
3. 技術部先端技術支援室

1 はじめに

流氷の到来および退去時の季節には、船舶関係者にとって流氷の情報は重要である。これまで我々が行っているレーダー観測において、この季節はシークラッターによって流氷の識別が困難になる場合が多い。この理由は、一般的に移動中の流氷の規模または面積が付近海域に比べて小さい場合、流氷域による海面域の風波の吸収・消波作用が起きないためと考えられている [1]。さらに、シークラッターが顕著に発生した場合には、レーダーの反射強度が飽和状態に近くなり、ドップラー機能を持たないレーダーによって過去に行われた「LOG/CFAR^{*1}」や「シークラッター信号の統計的特性を利用した距離およびアンテナ回転ごとの相関処理」によるシークラッターの抑圧策は有効とはいえなかった。

ドップラーレーダーによる流氷観測において、従来から行われている流氷からの反射強度に代え、パワースペクトル幅による識別を試みた。結果、非常に良い効果が得られたので、その観測例を中心に報告する。

2 ドップラーспекトル幅

ドップラーレーダーの観測から得られる3つの基本要素は、反射強度、平均ドップラー速度、さらにスペクトル幅である (図 1)。我々が運用しているドップラーレーダーの信号処理装置、米国 Sigmet 社製 RVP8 出力のスペクトル幅 W は以下のように与えられている [2]。

$$W = \frac{\sqrt{\text{Variance}}}{\pi}, \quad (1)$$

$$\text{Variance} = 2 \ln \frac{R(0)}{|R(1)|} \quad \text{for large SNR}, \quad (2)$$

$$\text{Variance} = \frac{2}{3} \ln \frac{|R(1)|}{|R(2)|} \quad \text{for small SNR}. \quad (3)$$

ここで $R(\tau)$ は気象エコーからの受信波のサンプリング列から得られる離散的時系列信号の自己相関関数であり、 τ はこの時の時間差 (タイムラグ)、SNR は信号対雑音比である。

(2)、(3) 式は、一般に成り立つ以下の関係を用いている：ある関数 $f(x)$ のフーリエ変換後の関数 $F(k)$ は、もとの関数に含まれる周波数を記述するが、いま、 $f(x)$ を正規分布 (ガウス分

*1 LOG/CFAR: Log-Amp/Constant False Alarm Rate. クラッターの振幅波高分布がレイリー分布に従うと仮定してこれを対数増幅して平均値をとる。次に、対数増幅された本来のクラッターからその平均レベルを減算すると直流成分が除去された CFAR 特性が得られる。一定振幅に揃えられたクラッターは、閾値を決めてクラッターの誤警報確率を一定に抑えて目標の検出を可能とする。

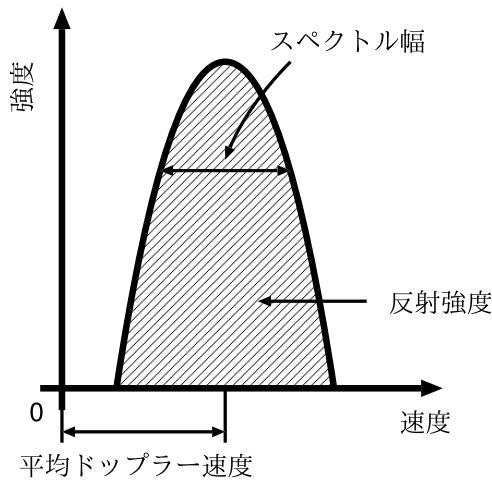


図1 ドップラーレーダー3基本要素

表1 紋別市設置ドップラーレーダー諸元

レーダーアンテナ設置高	300 m
アンテナビーム幅 水平/垂直	1.1 度/ 1.1 度
送信出力	70 kW
送信周波数	9410 MHz
繰り返し周波数/パルス幅	1000 Hz / 0.9 μ sec

布、 μ : 平均, σ^2 : 分散, S_0 : 任意の定数)

$$f(x) = \frac{S_0}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

とし、これをフーリエ変換すると

$$F(k) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dx f(x) e^{ikx} \quad (5)$$

$$= \frac{S_0}{2\pi} \exp\left(-\frac{k^2\sigma^2}{2}\right) e^{ik\mu}, \quad (6)$$

$$|F(k)| = \frac{S_0}{2\pi} \exp\left(-\frac{k^2\sigma^2}{2}\right) \quad (7)$$

となる。 $k = 0, 1, 2$ のとき

$$F(0) = \frac{S_0}{2\pi}, \quad |F(1)| = \frac{S_0}{2\pi} \exp\left(-\frac{\sigma^2}{2}\right), \quad |F(2)| = \frac{S_0}{2\pi} \exp\left(-\frac{4\sigma^2}{2}\right) \quad (8)$$

となるが、これらから σ^2 を求めると以下ようになる。

$$\sigma^2 = 2 \ln \frac{F(0)}{|F(1)|} \quad \text{or} \quad \sigma^2 = \frac{2}{3} \ln \frac{|F(1)|}{|F(2)|}. \quad (9)$$

3 ドップラーレーダーのスペクトル幅データによる観測例

レーダーによる流氷の最大探知距離は、レーダーアンテナ高によって決まり、紋別市設置のドップラーレーダー(表1)では56 kmである。流氷からの反射強度(Reflectivity, dBZ)は、雲などの気象エコーに比べて弱い。特に初期の流氷は薄く・平坦な場合が多く、さらに遠距離にある場合、電波伝搬上の性質による距離減衰(距離のマイナス7乗)によって一層微弱となる[3]。

レーダー観測期間中のおよそ3/4は、反射強度で判別が可能である。残る1/4は主にシークラッターなどの発生によって流氷との識別ができない。このような場合、従来までは時間経過による変化を追跡して識別を行っていたが、有効ではなかった。

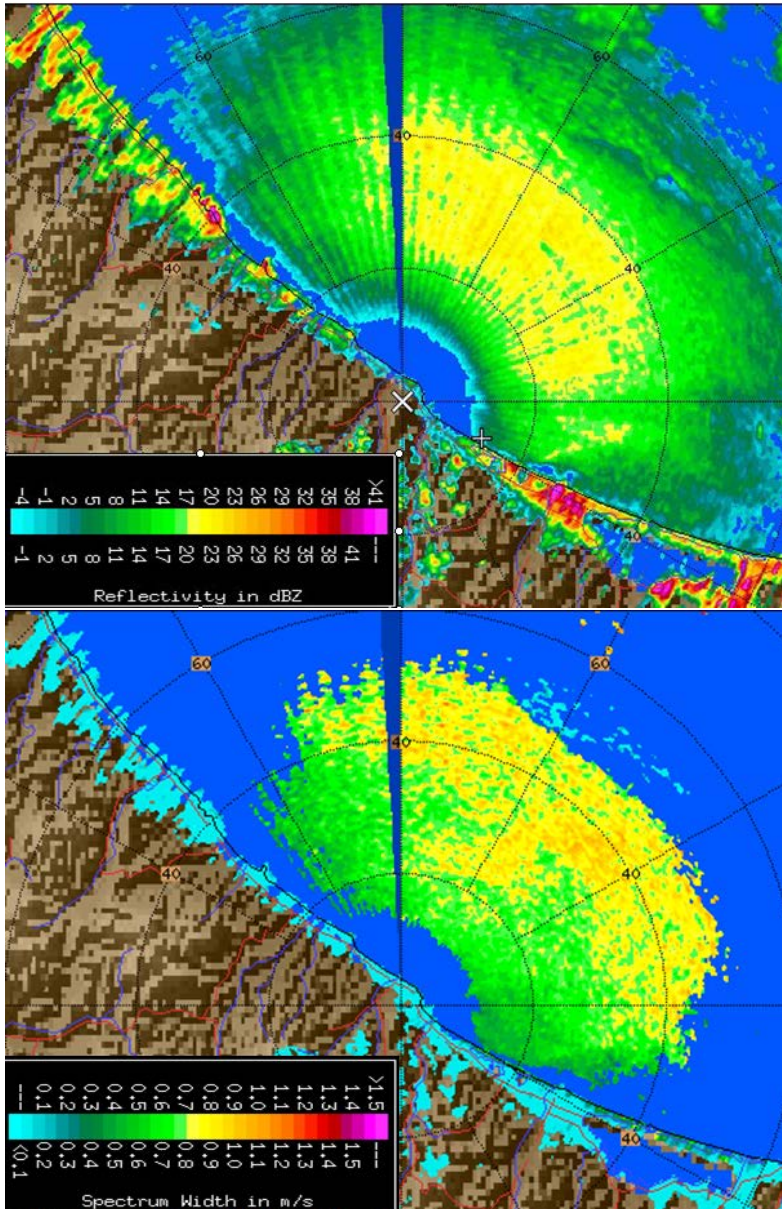


図 2a

16 JAN 2012 05:35
REFLECTIVITY (dBZ)

Antenna Elevation: 1.1
Max Range: 60 km
Range circle apart: 20 km

※シークラッター海域内に見られる傘状の回転ムラ(スポーク)は、過去に近接の落雷によりレーダーアンテナが故障していたため。

図 2b

16 JAN 2012 05:35
SPECTRUM WIDTH (m/s)

Antenna Elevation: 1.1
Max Range: 60 km
Range circle apart: 20 km

SQI Threshold : 0.4 dB

以下では、スペクトル幅 (Spectrum Width) 表示による観測例を示す。観測例は、反射強度で流氷とシークラッターとが識別ができない事例のみを対象とした。

スペクトル幅の最大表示距離は、計算の誤り率を防止するために最適な閾値 (SQI: Signal Quality Index) を設定しているため反射強度よりも少なく、最大 53–55 km までとなっている。なお、以下に上げた図の地形は、全て紋別レーダーサイトを中心として北西から南東方向の斜めに海岸線があり、その上側が海に当たる。

3.1 2012 年初到来時の流氷

図 2a の反射強度による表示では、シークラッター域が 60 km に及んでいる。60 km 以遠にあるエコーは雲である。画面中心の紋別から方位 15–70 度、距離 50 km にシークラッターが途切れている海域が観測されるが、これを流氷とは断定できない。図 2b のスペクトル幅によ

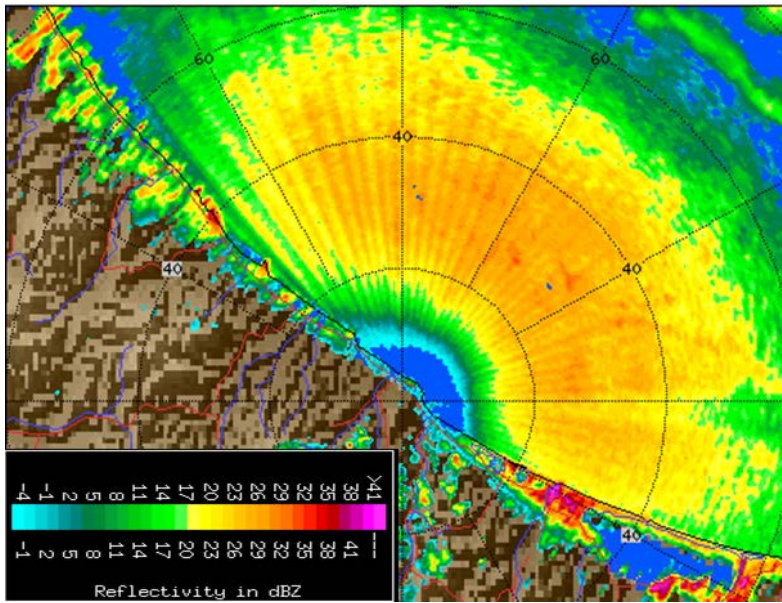


図 3a

21 FEB 2012 19:30
REFLECTIVITY (dBZ)

Antenna Elevation: 1.1
Max Range: 60 km
Range circle apart: 20 km

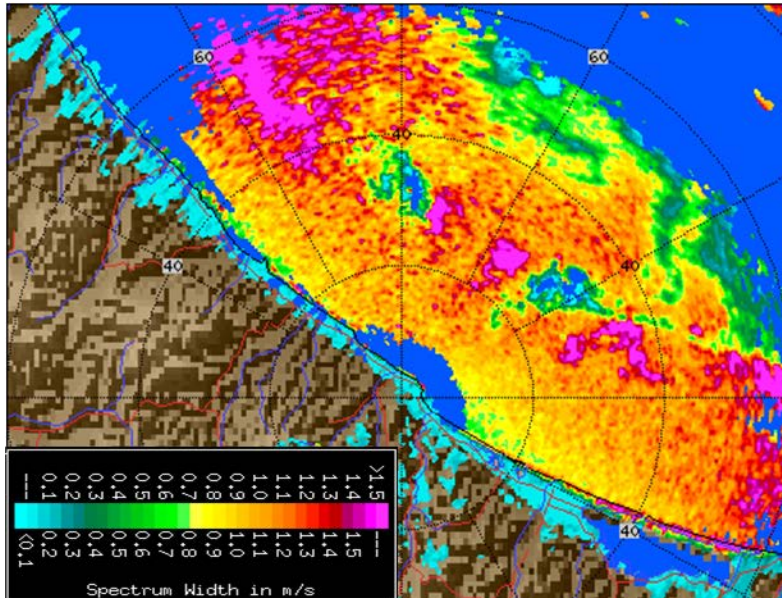


図 3b

21 FEB 2012 19:30
SPECTRUM WIDTH (m/s)

Antenna Elevation: 1.1
Max Range: 60 km
Range circle apart: 20 km
SQI Threshold: 0.4 dB

る表示では、シークラッター域のスペクトル幅は、同図にあるカラーバーから、0.5–1.1 m/s となっており、この海域内には流氷は存在していない。しかし、紋別から方位 20–55 度、距離 47–53 km に流氷が点在していることが判る。流氷のスペクトル幅は、海岸線を示すグラウンドエコーと同様に小さく 0.1–0.2 m/s となっており、シークラッター域とは明らかに異なっていることが判る。また、本画面の 60 km 内には雲エコーが無い。

3.2 従来では識別不可能なシークラッター内に埋もれた流氷の検出例

図 3a の反射強度表示では、シークラッター域が 65 km まで達していることだけが判るが、流氷の存在は全く識別できない。しかし、図 3b によるスペクトル幅表示では、シークラッター域内で海岸に平行して沖合い 30 km に雲エコー (Spectrum Width: 1.5 m/s) が重畳して北西から南東方向へ移動している。流氷の存在は、1. 紋別の北 28–37 km、2. 紋別から方位 55

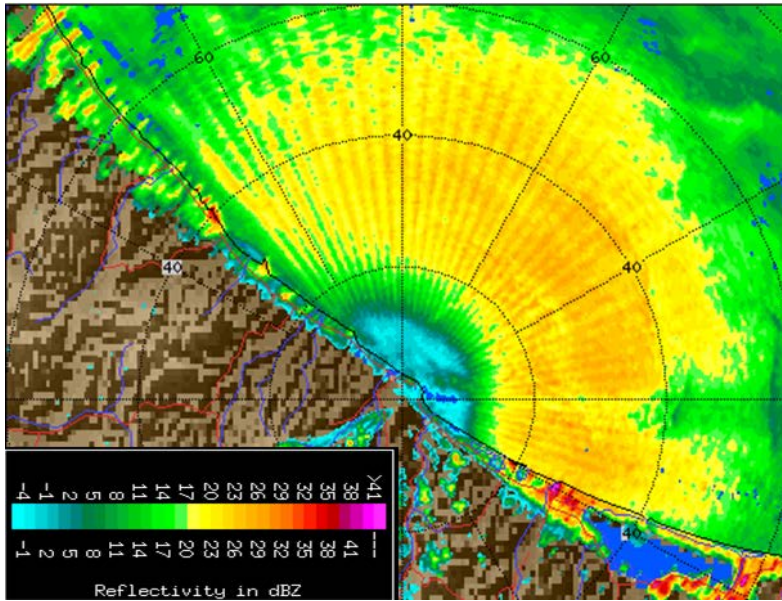


図 4a

4 APR 2012 14:00
REFLECTIVITY (dBZ)

Antenna Elevation: 1.1
Max Range: 60 km
Range circle apart: 20 km

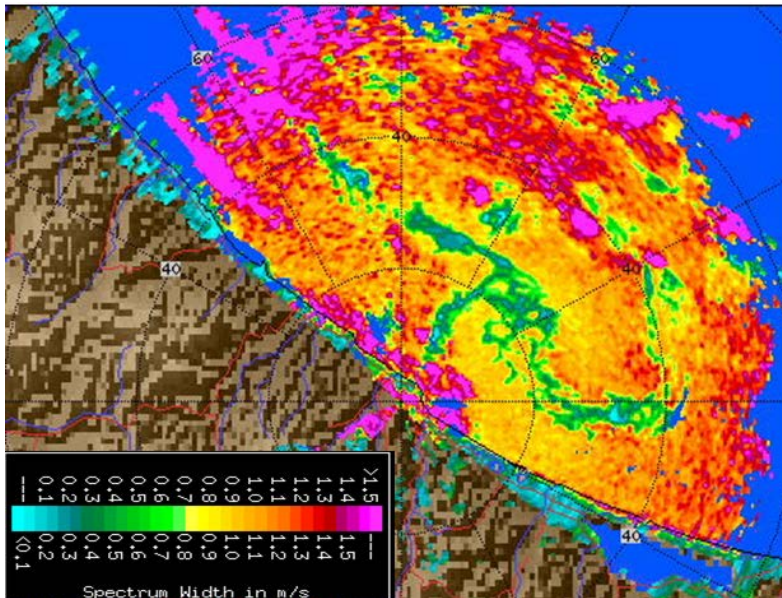


図 4b

4 APR 2012 14:00
SPECTRUM WIDTH (m/s)

Antenna Elevation: 1.1
Max Range: 60 km
Range circle apart: 20 km

SQI Threshold: 0.4 dB

度、距離 20–33 km（ここから東の方向に筋状に 4. まで延びている）、3. 方位 20–40 度、距離 45–56 km、4. 方位 50–85 度、距離 45–56 km（筋状の流氷）、5. 方位 95 度、距離 56 km の各海域に明らかに流氷が検出されている。

3.3 退去期の流氷

図 4a では、シークラッター域が 60 km を越え、これに雲エコーが海域全体に重畳しているように観測されるが、流氷エコーは全く識別できない。図 4b では、流氷が 1. 海岸線に平行して沖合い 25 km に带状に長さ約 75 km、さらに 2. 北東方向に 40 km に带状に長さ 20 km、3. 北方向 50 km、4. 北北東～北東方向 50 km 等々に流氷域が明確に識別できる。本図は、図 4a では識別が全く不可能な例にもかかわらず、スペクトル幅表示によって流氷の識別が良好な例である。

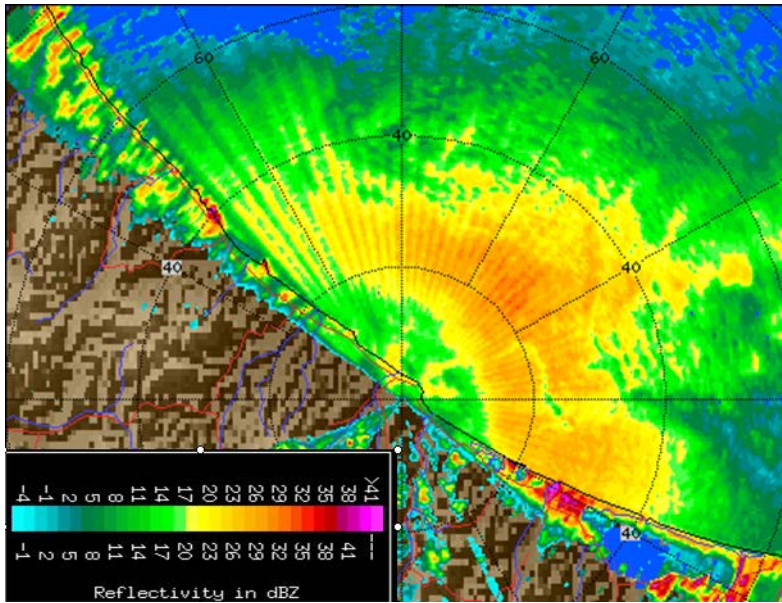


図 5a

24 FEB 2012 06:30
REFLECTIVITY (dBZ)

Antenna Elevation: 1.1
Max Range: 60 km
Range circle apart: 20 km

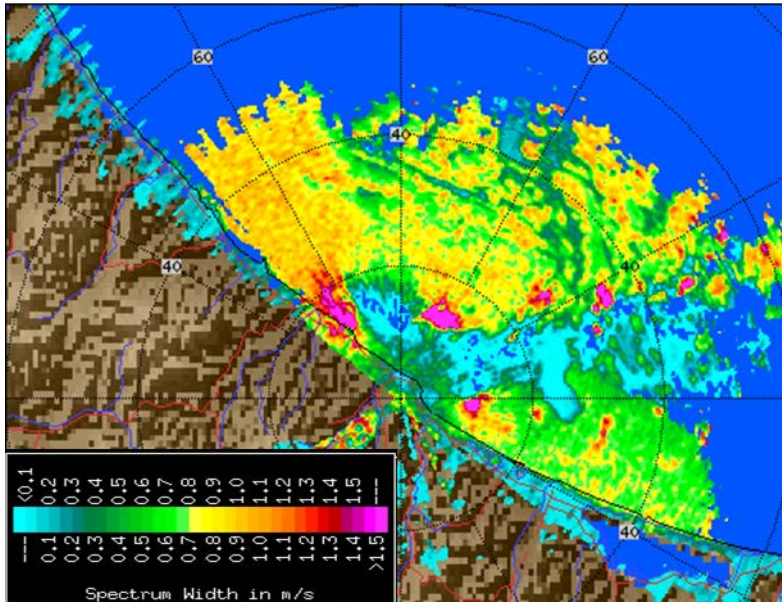


図 5b

24 FEB 2012 06:30
SPECTRUM WIDTH (m/s)

Antenna Elevation: 1.1
Max Range: 60 km
Range circle apart: 20 km
SQI Threshold: 0.4 dB

3.4 気象エコー通過の影響を受け、流氷域に部分的な誤り域が発生した例

図 5a では、シークラッター域が約 50 km に及んでいるが、強力ではない。方位 345–90 度、距離 36–50 km の広い海域に筋状のエコーが現れているが、これが流氷かあるいは雲によるものであるかは識別できない。図 5b では、方位 345–60 度、距離 30 km 以遠の広い海域に図 5a と同様な複雑な筋状のシークラッターが発生していないエコーが観測される。これは流氷による消波作用によってシークラッターが発生していない海域と推測できる。また、紋別から東方向に幅が約 10 km 連続したエコーが認められる。これは本来であれば流氷域と考えられるが、実際は紋別からおよそ 20 km 以内の海域は流氷ではなかった。これは気象エコーの影響でスペクトル幅表示に誤りが生じた結果か、あるいはその時の状況が流氷やグランドエコーと同じスペクトル幅であった結果と考える。図 5c にドップラー速度表示を示したが、海

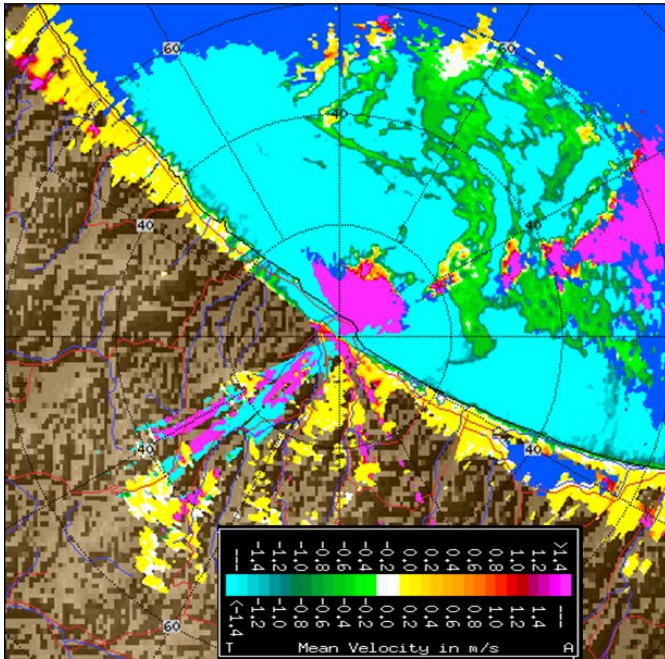


図 5c

24 FEB 2012 06:30

VELOCITY (m/s)

Antenna Elevation: 1.1

Max Range: 60 km

Range circle apart: 20 km

SQI Threshold: 0.4 dB

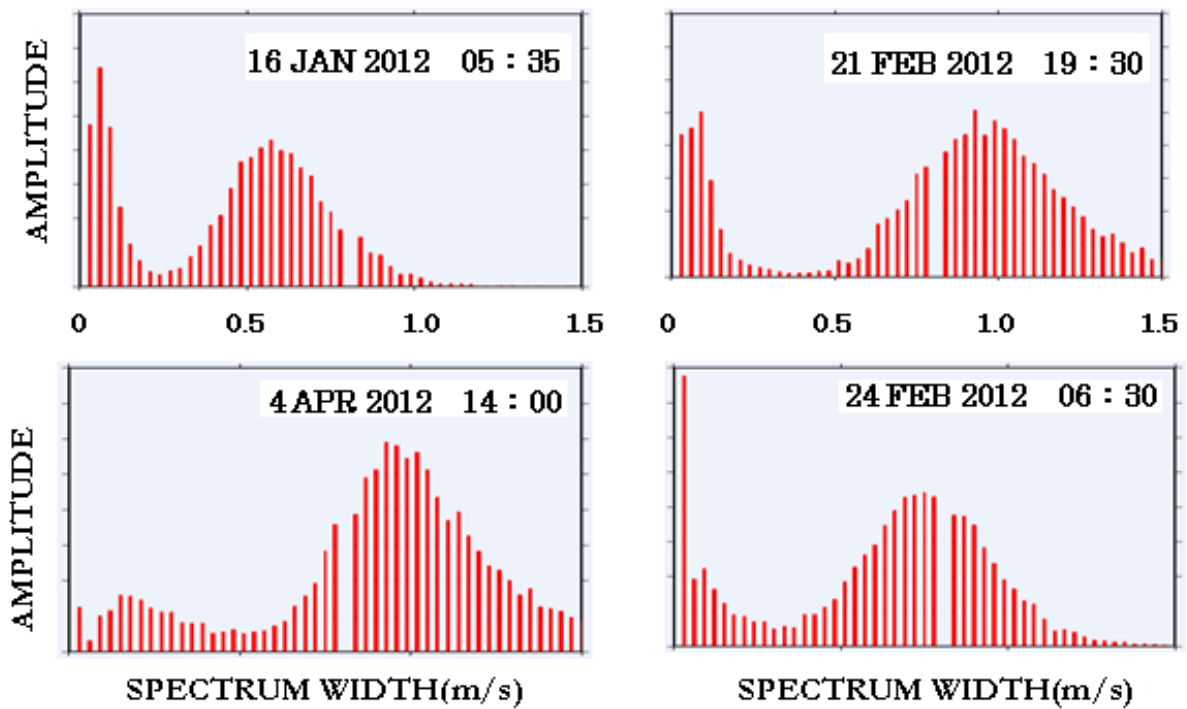


図 6 スペクトル幅によるヒストグラム

側に見える赤の領域が雲エコーであり紋別を中心に陸側の南東方向から海上へ出て東北東へ向きを変え 5 km/h 以上の速さで移動していることが判る。

図 6 は、図 2b から 5b のヒストグラムである。4 例は共に本報告の主旨から海面や雲によるクラッターが顕著な例のみをとり上げたにもかかわらず、4 月 4 日 14 時の 1 例を除いて流水や地形とクラッター域が明確に分れている。

4 おわりに

ドップラーレーダー観測におけるスペクトル幅データの利用は、航空機の *safty flight* の例をみても反射強度やドップラー速度に比べると非常に限られている。この理由は、大気の乱れなどの厳しい気象現象に対する信頼性の問題によるとされている [4]。

我々が行ったドップラーレーダーによるシークラッター海域に埋もれた流氷の検出は、1シーズンの短期間の観測結果からではあるが、強力なシークラッターの発生時においても極めて有効であることが判った。しかし、これに激しい気象エコーが重畳すると、部分的に誤りが発生することを認識した。

本来、レーダーによる気象エコーの反射因子は、任意の距離におけるレーダーアンテナのビーム幅とパルス幅によるサンプリング体積内の多数の降水粒子の集まりとされている。一方、流氷やシークラッターの場合は、レーダーアンテナ高からの俯角にあたる、アンテナビーム幅とパルス幅によるサンプリング面積内の種々の形状（凹凸）の集まりやそれら流氷表面の複素誘電率で決まるものと考えられる。さらに、レーダーアンテナから放射された電波は、物標からの直接波とその前面域で一旦反射してから本来の物標から反射される間接波、いわゆるマルチパス波の合成による複雑な伝播経路を経ると考えられている [3]。本報告では流氷に気象エコーの原理をそのまま利用したが、どのような場合に利用できるかなどのさらなる検証が今後に残された課題である。

参考文献

- [1] Aota, M., 1973: On the Discrimination between Sea Ice and Sea Clutter in Drift Ice Radar Observation. 海と空, **49**, 9–20.
- [2] SIGMET, Inc., 2006: 5.3.5 Spectrum Width Algorithms. *RVP8 User's Manual August 2006*, p.5-35.
- [3] 大井 正行, 田畑 忠司, 1978: 流氷観測レーダーにおける反射電力の距離減衰について. 低温科学物理篇, **37**, 125–129.
- [4] Fang, M., Doviak, R. J., 2001: Spectrum width statistics of various weather phenomena. *National Severe Storms Laboratory Report, Norman, Oklahoma*, 62pp.