

レーダー・データを用いたオホーツク海沿岸の流氷の可視化

研究者 石川知保 (海上保安庁)
高木敏幸 (釧路高専)
岡本孝司 (東大工)

1. 緒言

オホーツク海で最初に凍結するのは北緯 55 度線上の西端にあるシヤンタルスキー島周辺及びそこから北東に伸びるシベリヤ大陸の海岸沿いで、次第に東へ拡張し 12 月初旬にはカラフト北端に達し、その後カラフト東岸沿いに南に延び、同時に東の方にも拡張する。北海道沿岸に達するのはほぼ 1 月中旬である。ほぼ 3 月中旬に流氷域は最大となる。オホーツク海は冬季にはほぼ海面の 80% が結氷し、流氷が見られる海としては、最も緯度が低い。その要因として、地形的に浅い海であり表層に低塩分層が存在すること、外海との連絡の少ない閉じた海であることなどが言われている。また、冷源としての海氷は大気や海洋、オホーツク海沿岸で生活する人々にいろいろな影響を与えている。海氷期間中の休漁は水産資源の保護になっており、また海氷はオホーツク海の基礎生産力の豊かさに大きく寄与している。沿岸において流氷は浮き防波堤の役割も果たし、沿岸の波浪を弱め、塩害を防止する効果もある。

一方、流氷による災害も地域に深刻な問題を投げかけている。船舶が流氷塊と衝突し、あるいは流氷群に包囲され起こる航行障害、船体破損・沈没・船体放棄等の海難と、流氷群の沿岸への襲来による海藻・魚介類・漁礁・漁具等の破損・流失等の被害または流氷の港湾への進入や定着氷の拡張による港湾施設の破壊、港口封鎖による船舶出入りの停止等の影響がある。流氷海難の船舶は沿岸海域で操業する漁船が主であり、流氷接近の直前まで、また海明け早々に操業するので、流氷群の中で行動し、流氷に阻まれる。そのため、海難隻数は沿岸流氷量にともない増加している。

氷海における航行上の危険は海氷の圧力が船体に加わる事である。これらの危険を回避するためには、開放水面や氷海水路を選択し、航行しなければならない。

冬季、オホーツク沿岸を航行する船舶には北海道大学低温科学研究所流氷研究施設による紋別・枝幸・網走のレーダー局によって氷況を表す沿岸域の流氷分布図が配布されている。この分布図は毎朝 9 時に気象庁、海上保安庁に船舶の誘導、交通や漁業の安全のために活用されている。これらのレーダー局では、昼夜・降雪・霧等の悪天候の如何にかかわらず流氷を観測できる。しかしながら、この分布図は流氷の規模と位置を示す静的な情報であり、流氷の動きに関する情報は示されていない。また、流氷の動きは、水面上の部分に働く風の力と、水中の部分に働く海流の作用、および地球自転の偏向力等、様々な要因によって支配され、さらに、風、海流の作用を受ける流氷は、その高さや形状も極めて複雑に分布しているため、受ける力も一定でない。そのため、流氷の移動を空間的・時間的に微視的に見るとかなり複雑な挙動を示す。^{1,2)}

船上における目視による観測では、流氷の厚さや強度をそれまで航行してきた海域の海氷の形状や外観とを比較して大まかなに予測ができる。しかしながら、その視程は天候などの自然現象に左右されやすく、1 時間に 1km か 2km 程度しか移動しない流氷の動きを把握する事は非常に困難である。流氷の動きに関する何かしらの情報によって氷海域の船舶が流氷の動きを把握し航行できれば、流氷によって起こる海難も減少すると考えられる。

大井ら³⁾は実時間処理によって流氷野の変形および拡散を定量化するため残差逐次検定法を用いて流氷の移動ベクトルを計測した。レーダー画像の前処理としてノイズを除去し、流氷のエッジを強調するためメディアン・フィルターを用いている。この方法では画像の持つ情報量が減少するため、空間分解能が低下する。そのため、相関領域を大きく取らざる得なく、流氷の微視的な動きを測定する事が難しい。

本稿では、画像の持つ情報量を減少させる事なくファジィ推論によって画像補正を行っている。⁴⁾そして、これらの画像に対して濃度相関法を用い、流氷分布のレーダ画像をもとに流氷の移動ベクトルを計測する。さらに、幾つかの流氷の流速分布パターンを例に氷海航法の有用性を説明する。

2. 流氷観測

オホーツク海沿岸における流氷観測は北海道大学低温科学研究所流氷研究施設による紋別・枝幸・網走 (Fig.1

) の山頂に設置されているの 3 つのレーダー局によって観測されている。これらの各山頂のレーダは流氷研究施設のレーダ室から遠隔制御され、得られた映像情報は大山局を中継してレーダ室へ伝送される。レーダ室では、枝幸・紋別・網走の沖合い約 60 km までの流氷状況が昼夜・天候に関係なく随時観測できる。流氷レーダ映像は、設定された時間間隔ごとにコンピュータに撮影記録される。これらの資料は流氷の移動や変形などの研究に用いられるほか、毎朝作成される流氷分布図は、海上保安部等各関係機関に配布され、船舶の交通や漁業の安全のために利用されている [3]。Fig.2 は 2000 年 3 月 23 日 0 時の枝幸沖のレーダー画像である。白く光った部分が流氷であり、この期間、半径 30 [mi] の円内はほぼ一面が流氷で覆われている事がわかる。画像中の輝度は一様でなく、特に強く光っている部分や、また所々に黒く抜けた部分も点在している。黒い部分は流氷がなく海面が出ているが、表面の凹凸がほとんど無いため、レーダーの電波に反射しない部分を示している。

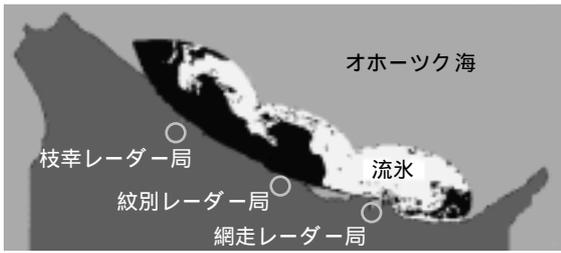


Fig.1 Radar Stations and Sea Ice in coast of the Okhotsk Sea

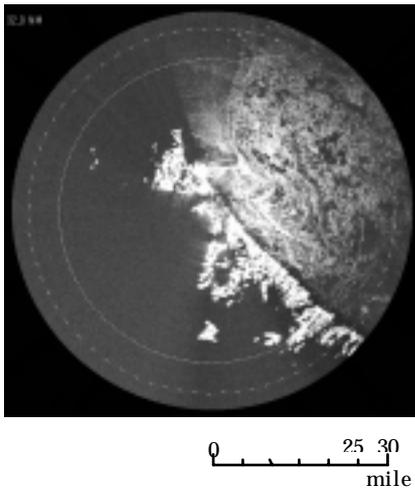


Fig.2 An Example of A Radar Image in the coast of Esashi

3. ファジィ推論による画像補正

Fig.2 に示すようにレーダー画像はレーダーからの距離によって輝度が減少している。これは、レーダーが測定する距離に応じて反射波が減衰するためである。直接これらの画像を用いて相関領域を小さく設定し、濃度相関法を行った場合、同じ輝度値を示す同心円の領域に引き込まれる。そのため、円状に沿った過誤ベクトルが生じ易くなるため、相関領域を大きく取らざるを得ない。距離による反射波の減衰率は理論的に与えられているが、実際はレーダー自体が固有の誤差を含んでいるため、一意的に補正することができない。そこで、本稿では1月から3月までの約1000枚のレーダー・画像の各座標における平均輝度値を求め、これを補正曲線としファジィ推論に用いて濃度変換を行った。Fig.3はFig.2の画像の半径25[mile]に補正領域に対して濃度変換を行った図を示している。図にも示されているように半径25[mile]内の画像の輝度は一様になり原像を損なうことなく補正されている。

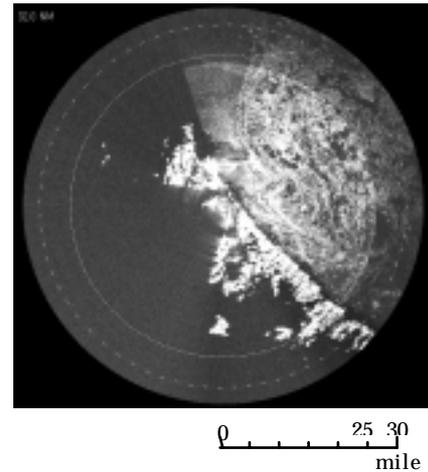


Fig.3 An Example of A Radar Image using Fuzzy Shading Correction

4. 氷海航法

氷海の航行において、海氷が海面をおおう面積が6割を越えると単独の船舶の航行は困難になる。氷海水路、または開放水域の存在がこの航行を可能にするかを決める。海岸の等深線、島の位置、風向、海流の流れ等を考え合わせ、海氷が厚くなっているか、または割れているかということ判断しなければならない。船上において目視による高所からの見張りは重要である。しかし、視界の悪い状態で航行を続けることは、厚い海氷に阻まれ動けなくなる危険を大いに含んでいる。

また、氷海における航行上の危険は海氷の圧力が船体に加わる事である。海氷の圧力は船体を圧砕し、船底を抜くことがあるため、強度の高い砕氷には注意しなければならない。また、速力を出した状態で船体、プロペラ等に硬い海氷が接触した場合、航行上支障をきたす事がある。これらの危険を回避するためには、開放水面や氷海水路を選択し、航行することが重要である。しかしながら、やむえず氷海に進入しなければならない場合、以下の事項を考慮して航行する必要がある。

- a) 海氷の厚さおよび、群氷の集中の程度を考慮する。
- b) 海氷が船体に強い圧力を与える氷海に入ってはならない。海氷の風下は避ける。
- c) 海氷の波動による運動は風下の方が激しい。
- d) 海氷が厚く流れが速いときは、流れの方向が変わるまで待つ。
- e) 海氷の波動の少ない海氷の縁辺の真っ直ぐでない入り込んでいる所に入るとよい。
- f) 流氷域に入る時は出来る限り低速力で進入し、行き足が無くならないように、徐々に翼角を上げる。
- g) 海氷の縁辺に直角の進路で氷海に入る。
- h) 氷海内では航行し続けること。
- i) 海氷に従って航行し、逆らわないようにすること。
- j) 急いで航行してはならない。
- k) 広い開放水面、もしくは氷海水路に停止すること。

1) 氷丘脈、氷片の古い硬い海氷には可能な限り
突き当たらないようにする。

これらの事項に考慮し航行するためには、流氷の位置、厚さ、動きに関する情報が必要である。しかしながら Fig. 2 に示すように流氷分布図は流氷の規模と位置を示す静的な情報であり、流氷の動きに関する情報は示されていない。また、船上においても目視による観測には限界があり、流氷の動きを把握する事は困難である。流氷の動きに関する何かしらの情報によって氷海域の船舶が流氷の動きを予測し航行できれば、流氷によって起こる海難も減少すると考えられる。

5. 流氷の流速分布

本稿では 3 時間間隔で撮影された枝幸沖 25[mile] 内のレーダー画像をファジィ推論によって濃度変換を行い濃度相関法を用いて流氷の流速分布を求めた。Fig. 4 に氷海航行を例に流氷の流速分布の幾つかのパターンを示す。Fig. 4(a) ~ (d) にも示されているようにわずか 25[mile] 以内の海域に幾つもの異なる流れが存在し、流氷の挙動の複雑さが示されている。

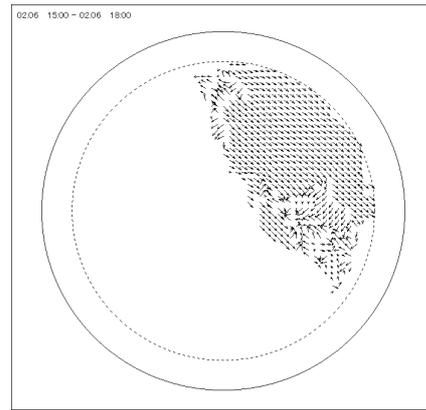
Fig. 4(a) は一定の方向に流れている広い範囲の流速分布が示されている。流氷の流れの方向が風下である場合、その海域では流氷の動きが激しく船体に圧力を与える可能性がある。そのため、前節の氷海航行の(b)、(c)にあるように、これらの海域においては、可能な限り流れの上流の方に向い航行しなければならない。

Fig. 4(b) は渦状になっている流速分布が示されている。渦は中心に向かって圧力が高くなるので、この中心付近には硬い海氷が存在する可能性がある。また、中心付近では、海氷が船体に与える圧力も高い。そのため氷塊の角に過度の圧力を加え氷丘を形成する。このような運動を経た海氷は船舶にとって非常に危険であるので、前節の(1)にあるように船体に接触しないよう、避けて航行しなければならない。

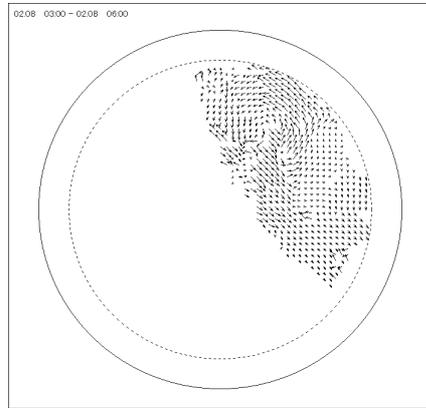
Fig. 4(c) の領域 C-1 には発散を示す流速分布が示されている。この海域では、Fig. 4(b) と(c) の領域 C-1 と逆に、流氷が疎になっていると考えられる。この領域は開放水面もしくは氷海水路になっている可能性もあり、また流氷が存在しても船体に与える圧力は比較的小さいと考えられる。

Fig. 4(c) の領域 C-2 には互いに対面している流速分布が示されている。この海域では流氷の密接度が増加し、その結果として激しい圧力が生じている可能性がある。また、ぶつかり合った流氷同士が重なり合い隆起して、氷丘を作っている事もある。さらに、気温の変化によって、氷結と氷解を繰り返し、より強度の高い海氷に成っている可能性もある。

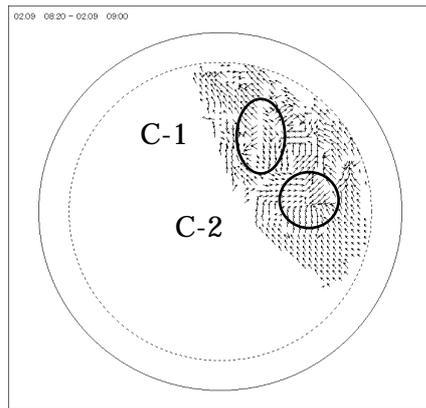
Fig. 4(d) の領域 D-1 と領域 D-2 とを比較すると D-1 の方が流速が速いことが解る。流速の早い海域を航行するのは危険である。流れの速さににともない、氷塊の間で起こる圧力も増加する。そして船体に掛かる圧力も同様である。より流れの緩やかで動きが少なく、船体に与える圧力の少ない海域を選んで航行しなければならない。



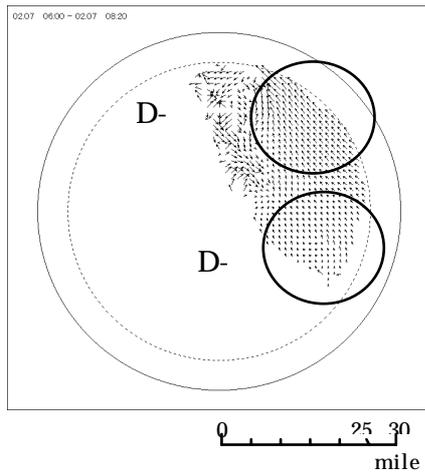
(a) 15:00 ~ 18:00, 2/6, 2000



(b) 03:00 ~ 06:00, 2/8, 2000

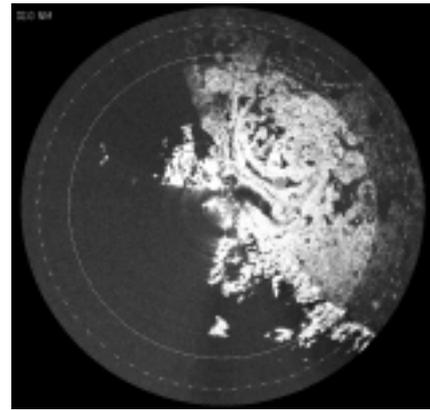


(c) 08:20 ~ 09:00, 2/9, 2000



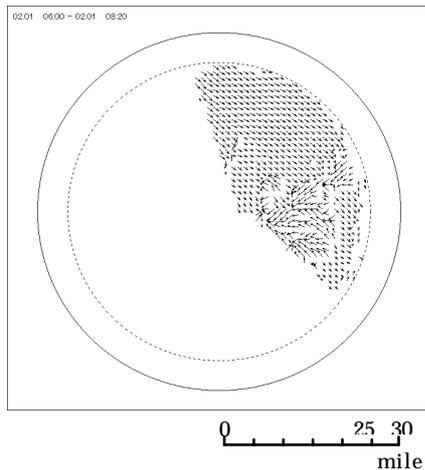
(d) 15:00 ~ 18:00, 2/1, 2000

Fig.4 Examples of Flow Distribution of The Pack Ice

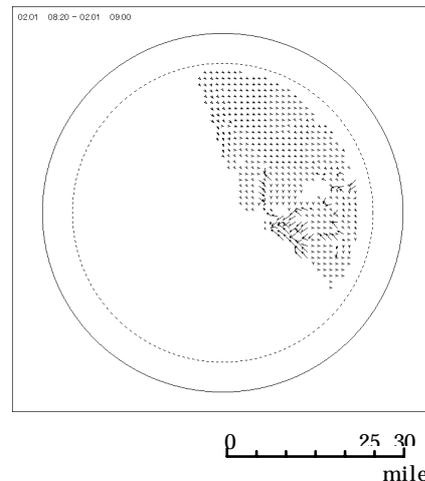


15:00 ~ 18:00, 2/1, 2000

Fig.6 A Second Image of Fig.4(c)



(a) 6:00 ~ 8:20, 2/12, 2000



(b) 8:20 ~ 9:00, 2/17, 2000

Fig.5 A series of Flow Distribution of The Ice Pack

Fig. 5(a), (b) は時間的に連続した流速分布を示し、Fig.5 (a)は2月12日の06:00~08:20、Fig.5 (b)は08:20~09:00に観測された流氷の流速分布である。これらの図からもわかるように、直前の流速分布とその40分後の流速分布との間に大きな流れの変化がない事から、これらの流速分布によって1時間程度の流氷の挙動を予測する事が可能であり、これらの流速分布は安全な氷海航行のための有益な情報として用いることができる。

Fig.6にFig4(c)の第2画像を示す。これらの流速ベクトルが示すように、Fig.5のレーダー画像と流速ベクトル分布を比較すると、ベクトルが向き合っている海域では、レーダー画像の輝度が高く、逆に発散を示す海域では、流氷が疎になっていることが示されている。これらの流速分布から、流氷の厚さがある程度予測する事が可能だと考えられる。

6. 結論

本稿では、レーダー画像の持つ情報量を減少させる事なくファジィ推論によって画像補正を行った。そしてこれらの画像に濃度相関法を用い、流氷分布のレーダー画像をもとに流氷の流速分布による可視化を示した。さらに、氷海における航法を例に、幾つかの流氷の流速分布を取り上げ説明した。

謝辞

本研究で使用したレーダー画像を快く提供して下さい、適切な御助言と資料等を提供して頂いた北海道大学低温科学研究所流氷研究施設の青田昌秋教授、石川正雄技官、高塚徹技官、大坊孝春技官に深く感謝する。

参考文献

- 1) 青田, 石川, 植松: 北海道沿岸の流氷量の変動, 低温科学物理編, 47, 161-175, 1988
- 2) Kimura, N and Wakatsuchi, M: Processes controlling the advance and retreat of sea ice in the Sea of Okhotsk, 11, 137-11, 150, 1999
- 3) 大井, 遠藤: 残差検定法によるレーダ画像間の移動

ベクトルの算出、寒地技術シンポジウム ,676-681 ,
1993

- 4) 黒沢 , 高木 中西 , 後藤: ファジィ推論を用いたシ
ェーディング補正』, 日本ファジィ学会第 9 回ファ
ジィシステムシンポジウム講演論文集 , 713-
716, 1993