

合成開口レーダーによる 海水移動量測定アルゴリズムの開発

角田 晋也*¹ 竹内 章司*²

これまで、海洋科学技術センターと宇宙開発事業団の共同研究により、人工衛星 JERS-1 (ふよう) の SAR データを用いた海水移動 vector 図算出の研究が画像ピラミッドの面積相関法により行われている。本研究では、(1) 海水野がどのように変形したかを可視化するため歪格子図を作成した。(2) 算出された海水移動データのうち、相関係数の低いものを除去し、相関係数の高いデータより補間した。相関係数の低いデータが多い格子では、欠損値として取り扱った。(3) SAR 画像の中央で地球表面に接する平面に投影することにより、画像の歪みを少なくした。(4) 人工衛星 RADARSAT の SCANSAR データから海水移動 vector 計算を行った。新シベリア諸島付近の海水野のパターンは局所的にはどこでもよく似ているため、画像ピラミッドの方法では局所あるいは部分的に誤った海水移動 vector を計算することがわかったのでこの点を改良した。

キーワード：SAR, 海水移動, RADARSAT

Development of an algorithm to determine sea-ice displacements by Synthotic Aperture Radar

Shinya KAKUTA*³ Shoji TAKEUCHI*⁴

On November 4 and 6 1996, we obtained 75km * 75km JERS-1 SAR images near the New Siberian Islands around 72.5-73N 135-137E (the Laptev Sea), where ice concentration (compactness) was more than 70%. Every week from December 1996, we obtained a 500km * 500km RADARSAT SCANSAR image in the Western half of the East Siberian Sea including the New Siberian Islands. Ice displacement can be calculated from a pair of images of Synthetic Aperture Radar (SAR) with pattern-matching. JAMSTEC and NASDA have developed such software in cooperation to measure the general displacements of ice fields in each SAR images of JERS-1. Large-scale sea-ice studies require more precise data of sea-ice displacement, in particular, those of ice deformation. Thus, in this work, we projected each SAR image on the plane tangent to the earth surface at the center of the SAR image. We also developed software to visualize ice-field deformation. To do this, we eliminated ice-displacement

* 1 海洋観測研究部

* 2 (財)リモートセンシング技術センター

* 3 Ocean Research Department

* 4 Remote-Sensing Technology Center

vectors calculated having a low correlation coefficient. We interpolated an ice-displacement vector field with ice-displacement vectors calculated with a high correlation coefficient. We found that the image-pyramid scheme adopted in our previous works causes unrealistic ice-displacement vectors near the New Siberian Islands due to mismatching sea-ice patterns because there were many locally similar sea-ice patterns. This fact suggests that initial guess of ice-displacement is important. Positioning data from drifting buoys may be useful in initial presumption.

Key Words: SAR, sea-ice displacement, RADARSAT

1 はじめに

これまで、海洋科学技術センターと宇宙開発事業団の共同研究により、JERS-1/SARデータを用いた海水移動ベクトル図算出の研究が行われている。本研究は、この共同研究の結果を踏まえて、新たに歪格子図を作成するための機能を追加する等のソフトウェアの改修を行い、JERS-1/SARデータにより、海水移動ベクトル図および歪格子図作成の機能および性能を確認することを目的とする。

2 合成開口レーダデータ処理アルゴリズムの比較検討

2.1 海水移動抽出アルゴリズム

2.1.1 背景

SARは全天候型の特性を有しており、天候不順が多い極地方を対象とした海水の移動観測に用いるには利点が多い。海水の移動ベクトルは、おおきく回転(rotation)と平行移動(translation)の2つの要素にわけることができる(図2.1.1)。

現在のところ、海水の移動ベクトルの自動算出の主な手法には、画像の面積相関を用いる方法と氷塊の形状に注目した方法の2つが挙げられる。開発初期である80年代はじめには面積相関を用いた方法が開発された(e.g. Fily and Rothrock 1987)。80年代後半には氷塊の形状に注目した手法が注目されるようになった(e.g. McConnell et al. 1991, Banfield 1991, Peddada and McDevitt 1996)。面積相関を用いた手法は氷塊の大規模な平行移動に弱く、比較的密度の大きい海水に有効であるのに対し、形状の特徴抽出を用いた手法は逆に大規模な回転に弱く密度の小さい海水で有効であるとされる(Sun 1996)。Vesecky et al. (1988)は両者を比較し、両者を相補的に使うことを提案している。Kwok et al. (1990)は面積相関法と形状抽出法の長所・短所をそれぞれ活かし、

両者を補完的に用いるシステムを開発した。また、最近ではオプティカルフロー法を用いた手法(Sun 1996)のように新しい概念を用いたアルゴリズムも提案されている。ここではこれらのアルゴリズムの基本となる考え方についてみていく。

2.1.2 面積相関を用いたアルゴリズム

面積相関の計算方法は以下の式で表される(Fily and Rothrock 1987)。

$$R(i, j, k, l) = \sum_{p=-t}^{+t} \sum_{q=-t}^{+t} \frac{(a_{i+p, j+q} - \bar{a})(b_{k+p, l+q} - \bar{b})}{n^2 \sigma_a \sigma_b} \quad (2.1.1)$$

2つの強度画像で注目される点(i, j) (k, l)における明るさの強度をそれぞれa, bとすると、その周囲n×nにおける相関係数はR(i, j, k, l)となる(図2.1.2参照)。 $\bar{a}$, $\bar{b}$ は平均値, σ_a , σ_b は標準偏差を表す。 $t=(n-1)/2$ である。(2.1.1)式をもとに相関係数の最大値を示す点の組み合わせを探索し、結合点とすることにより、海水の移動ベクトルを算出する。

対応点の探索においては、異なったサイズのウィンドウを用いて平均化を行うことにより階層化された画像ピラミッドを作成し(図2.1.3), 平均化ウィンドウサイズの大きい階層から対応点を探索していき、得られた対応点を次の階層における探索の中心とすることが提案されている。対応点の探索には(2.1.1)式で示された面積相関係数の最大値を補完する意味で、ユークリッドノルム

$$E(i, j, k, l) = \sum_{p=-t}^{+t} \sum_{q=-t}^{+t} (a_{i+p, j+q} - b_{k+p, l+q})^2 \quad (2.1.2)$$

の最小値を用いる方法、内挿、外挿を用いる方法も示されている。

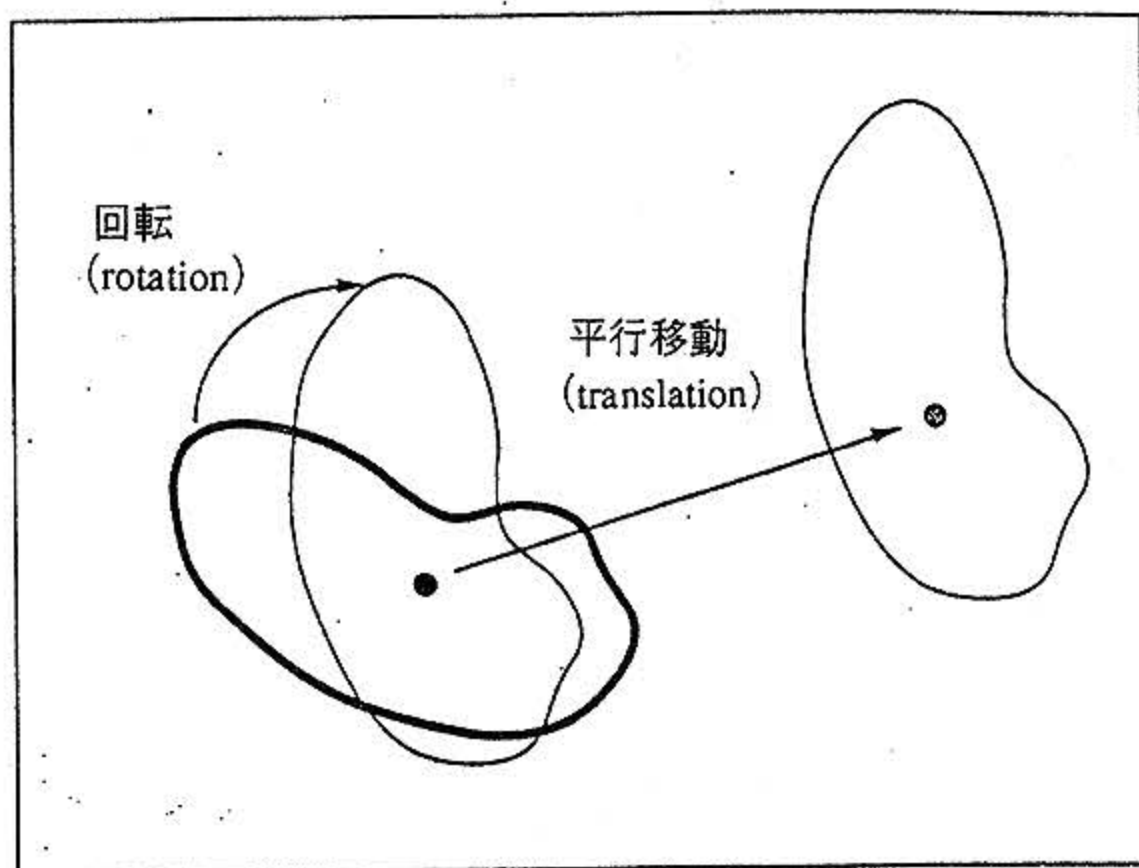


図 2.1.1 海水の回転 (rotation) と平行移動 (translation)
Fig. 2.1.1 Rotation and translation of sea ice.

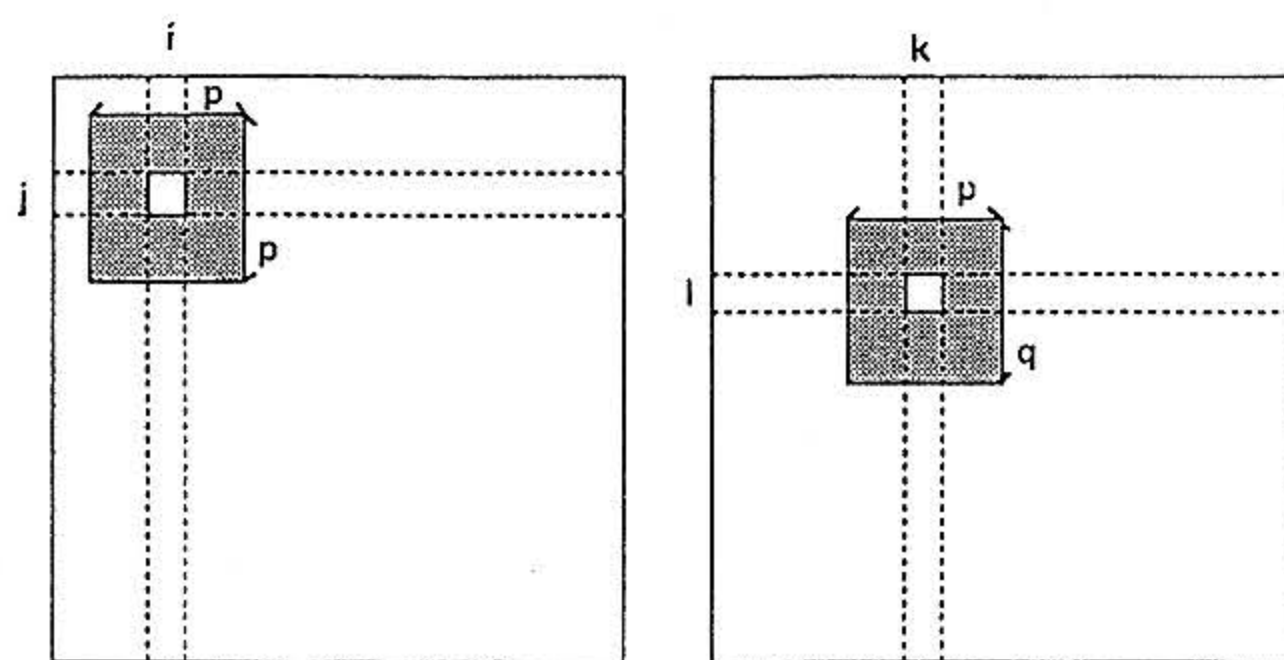


図 2.1.2 面積相関の計算方法
Fig. 2.1.2 Calculation scheme of area correlation.

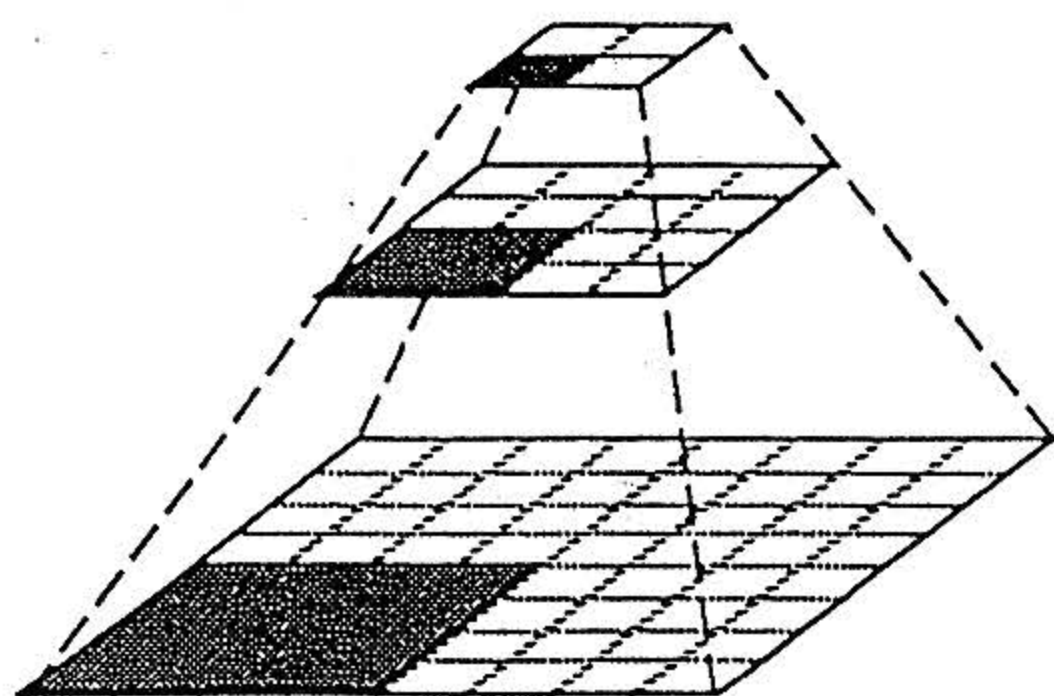


図 2.1.3 画像ピラミッドの例 (Sun 1996)
Fig. 2.1.3 An example of image pyramid.

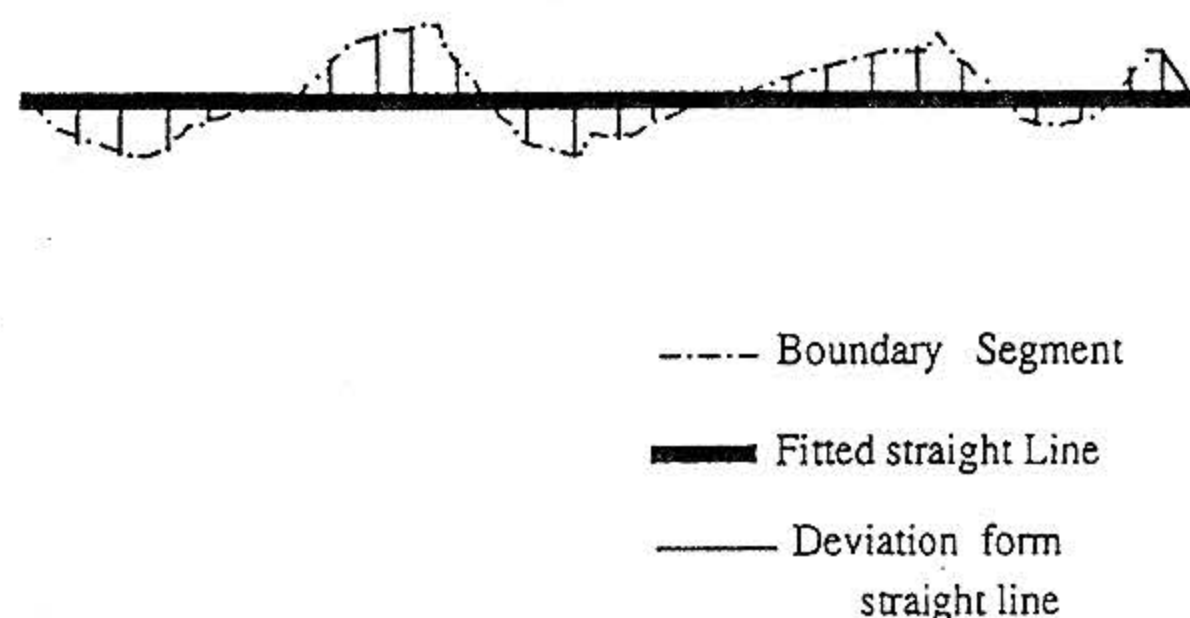


図 2.1.4 BSFT方式による境界線の直線の分散による計測
(Vesecky et al. 1988)
Fig. 2.1.4 Measure by variance of the straight line of a boundary by BSFT Method.

2.1.3 形状の特徴抽出を用いたアルゴリズム

氷塊の形状に注目し、その特徴を抽出することを利用したアルゴリズムもいくつか提案されている。これらのアルゴリズムにおいては、平均化によって解像度を下げた画像上で二値化によって多年氷と海水・一年氷を分離することによって境界線を見いだす。画像上でバックスキャッターは多年氷部分では大きく、海水・一年氷では小さくなる。

Vesecky et al. (1988) による Boundary Segment Feature Tracking (BSFT) 方式では境界線をその方向によって分類し、直線をフィットさせて直線からの分散を計測することによってその特徴を計測する。この直線からの分散に基づいて2つの画像間で対応する直線を見いだす (図 2.1.4 参照)。

McConnell et al. (1991) による $\psi-s$ Correlation and Dynamic Time Warping においては、境界線の特徴を $\psi-s$ 関数として抽出する。 $\psi-s$ 関数とは、 ψ によって基準軸に対する曲線の接線の角度、 s によって閉

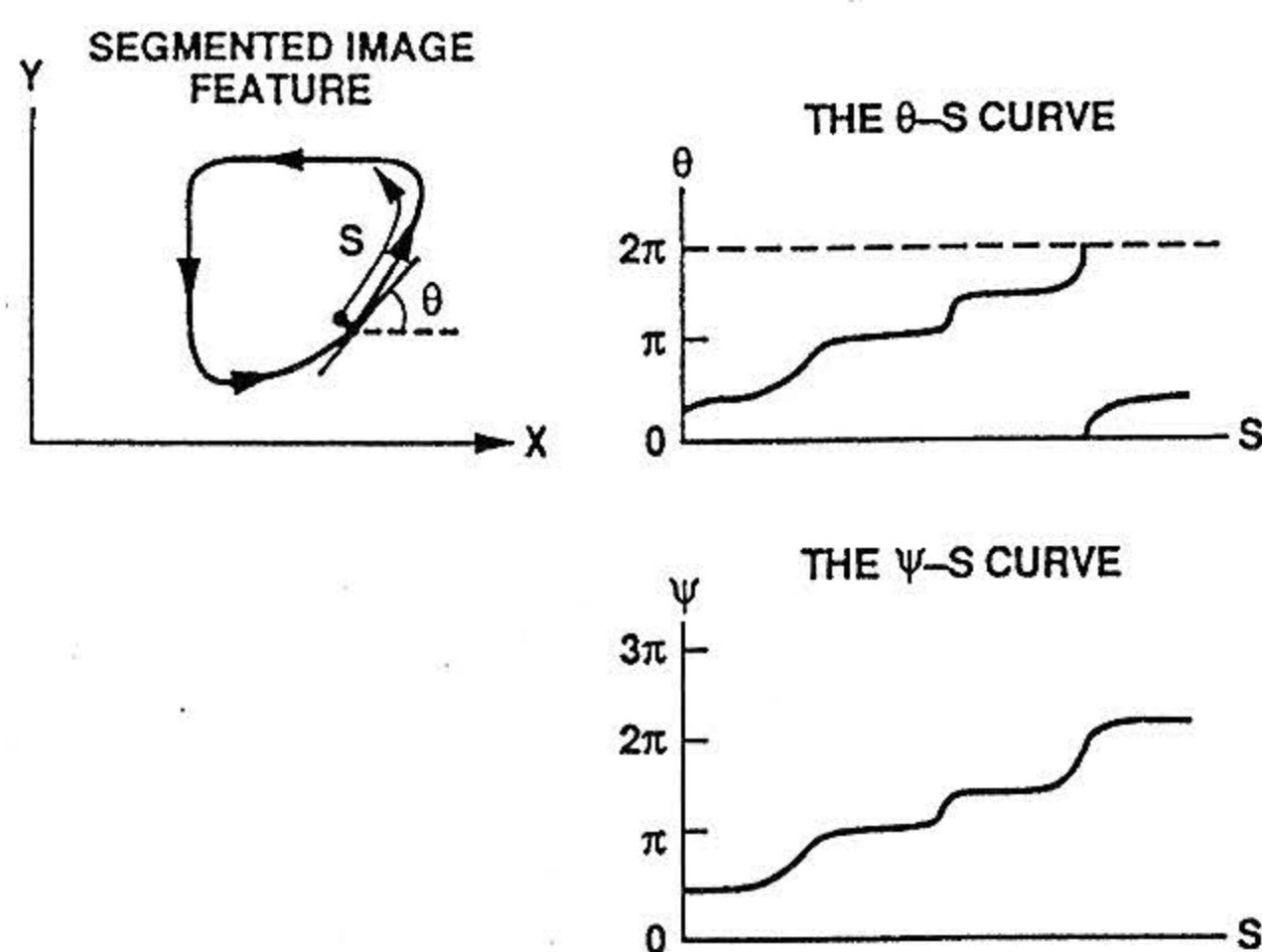


図 2.1.5 $\psi-s$ 関数 (McConnell et al. 1991)
Fig. 2.1.5 $\Psi-s$ function.

路の起点からの弧の長さを示すことによって、曲線の特徴を二次元グラフ化したものである（図2.1.5参照）。画像から抽出された境界線は $\psi-s$ 関数によって表すことができる。2画像間の対応点を抽出するにあたって著者らは $\psi-s$ 関数間の相関係数を利用する方法と、直接2画像の $\psi-s$ カーブを比較する方法の2つを検討している。相関係数は一方の画像における小部分と、もう一方の画像のすべての境界線について計算されている。直接2画像の $\psi-s$ 関数を比較する方法では、二つの $\psi-s$ 関数間から最も性質が似ている線分をさがし、それを出発点として隣接する線分の類似度を $\psi-s$ 関数の差で調べ、差がしきい値以下のものをグループ化する。この操作を繰り返し、両画面でグループ化した線分を対応づける。両方法を比較した結果、相関係数を利用した場合は海水の回転が大きい場合、直接 $\psi-s$ 関数を比較した場合は変形が大きい場合、それぞれ有利であるとされている。

Banfield (1991) の手法を発展させた Peddada and McDevitt (1996) による Least Average Residual Algorithm (LARA) では、画像上で氷塊の境界線についてクラスタリングをおこない、2つの画像の氷塊間で多変量解析をおこなっている。多変量解析における残差が最小となる氷塊の組み合わせを見いだすことによって、2画像間で対応する氷塊を求めている。アルゴリズムは氷塊の集合・分散にも対応している。この方法の利点は2画像間の対応点を1:1でとる必要がないことである。

2.1.4 面積相関および形状抽出を融合させたアルゴリズム

Kwok et al. (1990) は、面積相関法と $\psi-s$ 関数による形状抽出法の両者を融合させたアルゴリズムを開発した。アルゴリズムの流れを図2.1.6に示す。この方式では、ジオコードされた（緯経度が入力された）イメージデータを用い、場所についての情報も同時に入力する。注目する海水が中心部であるならば面積相関法を用い、端縁部であるならば形状抽出法を用いる。この区分は地衡風、ブイデータ等による地域的特徴から得られる移動場に基づく。本方式は Alaska SAR Facility (ASF) の処理方式であり、Jet Propulsion Laboratory (JPL) による Geophysical Processor System (GPS) の一部である。地図投影法としては SSM/I (Special Polar Stereographic Map Projection) が用いられている。データの対象地域は専ら ビュフォート海および北緯85度以上の高緯度地域である。

Li and Weeks (1995) はここで得られた移動ベクトルをもとに海水の変形 (deformation) における集中 (convergence) と分散 (divergence) の大きさを求めることを試みている。

2.1.5 オプティカルフロー法を用いたアルゴリズム

オプティカルフロー法の概念は図2.1.7のように表される。オプティカルフロー法とは一枚の画像によって密な点の移動を求める手法である。もともと動画帯域圧縮の研究から開発された手法であり、物体の移動方向と明るさの勾配が近似式で表されることに由来する。

画像上の点 (x, y) の時刻 t における明るさ（強度）を $I(x, y, t)$ とし、微小時間 dt の間に物体が x, y 方向にそれぞれ dx, dy 移動したとする。このとき物体上の点の明るさが不変と仮定すれば次式が成り立つ。

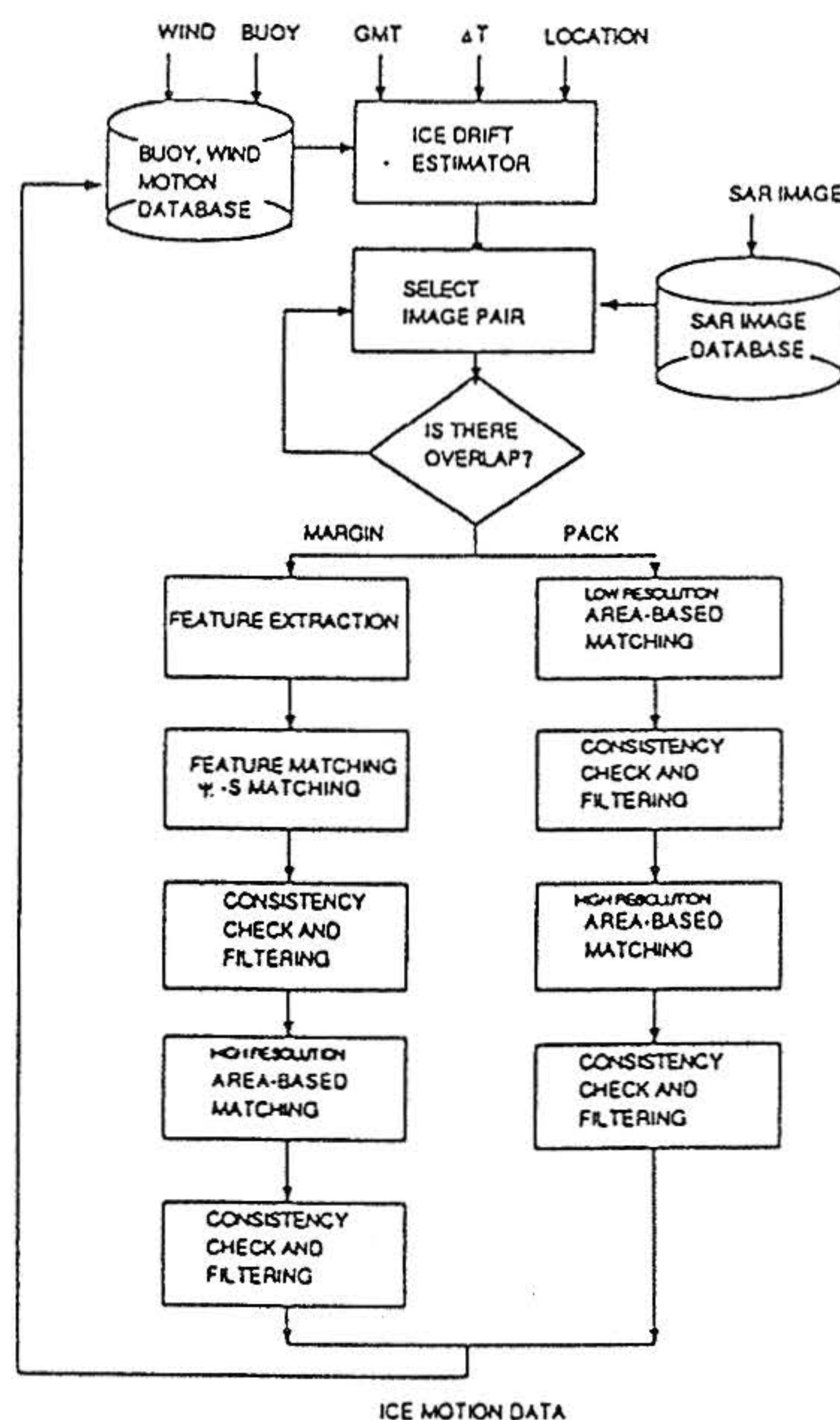


図2.1.6 面積相関と形状抽出を融合させたアルゴリズムの流れ (Kwok et al. 1990)

Fig.2.1.6 Flow chart of an algorithm of coupling area correlation and shape extraction.

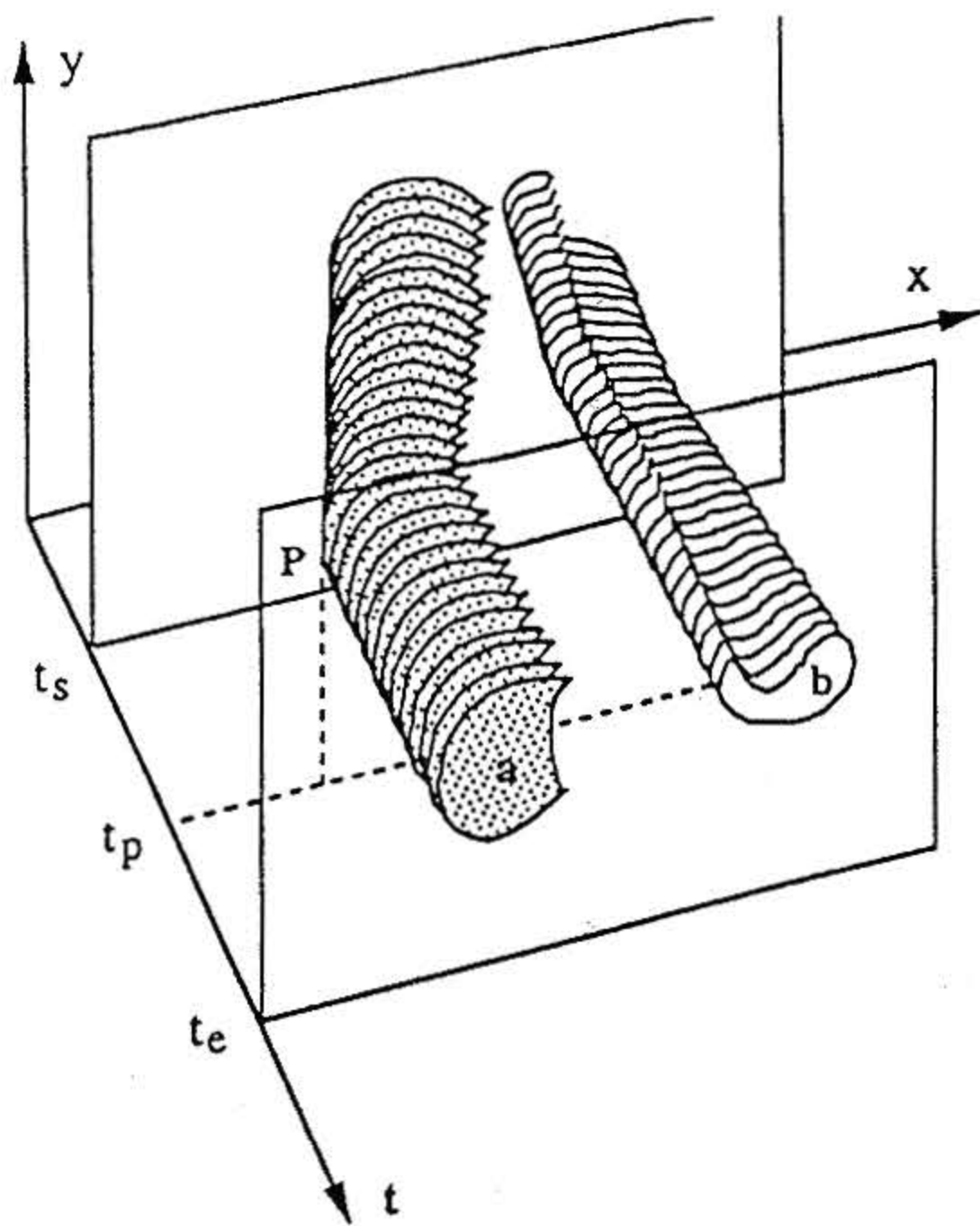


図 2.1.7 オプティカルフロー法の概念図 (Sun 1996)
Fig. 2.1.7 Schematic figure of Optical Flow Method.

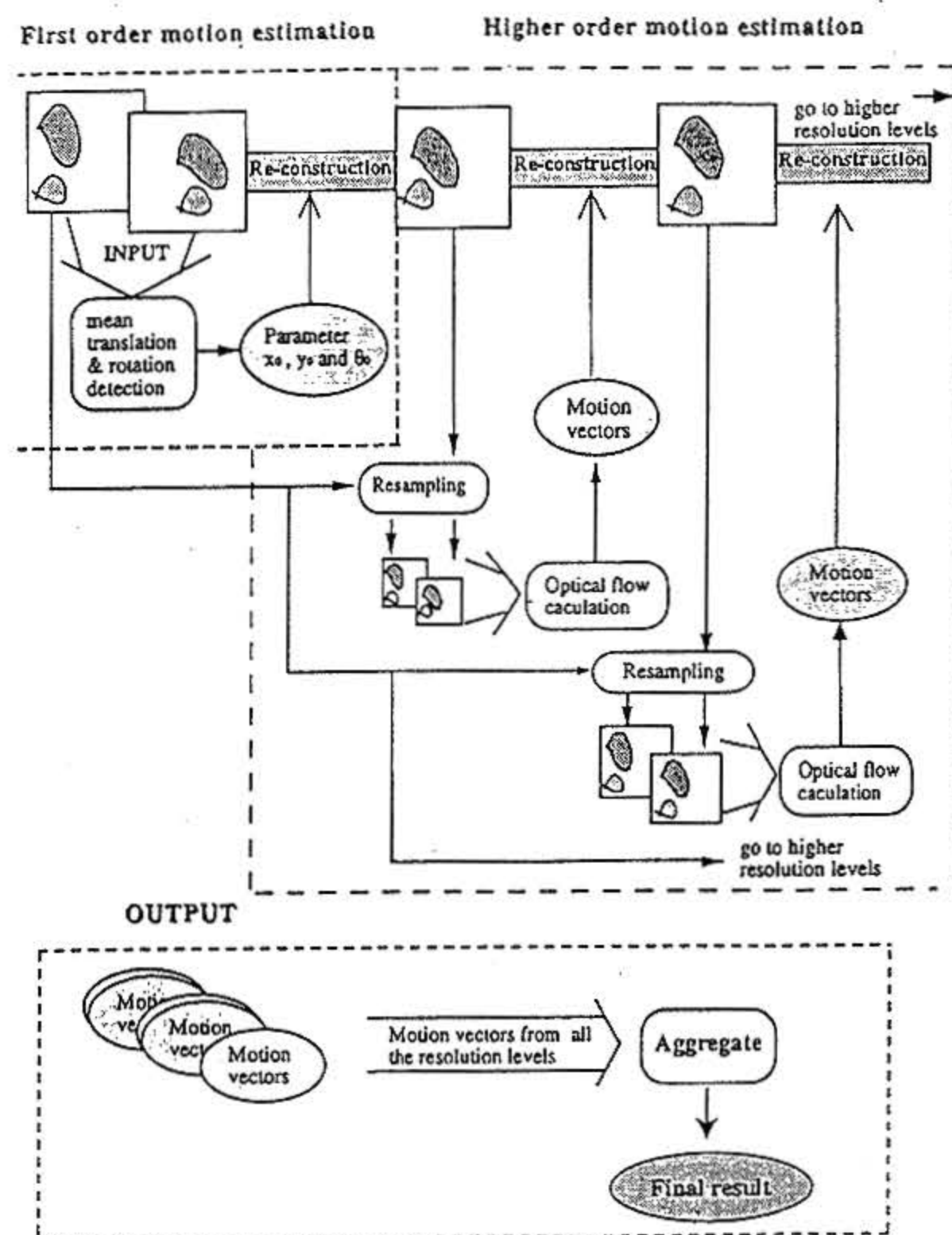


図 2.1.8 オプティカルフロー法のアルゴリズムの流れ
(Sun 1996)
Fig. 2.1.8 Flow chart of the algorithm of Optical Flow Method.

表 2.1.1 海水移動抽出アルゴリズムの比較
Table 2.1.1 Comparison among algorithms sea-ice-motion extraction.

アルゴリズム	面積相関法 (e.g. Fily and Rothrock 1987)	形状抽出法 (Ψ -s 関数法) (McConnell et al. 1991)	面積相関・形状抽出補完法 (Kwok et al. 1990)	オプティカルフロー法 (Sun 1996)
海水端縁部 (氷密度小)	×	○	○	形状抽出法より良い
海水中心部 (氷密度大)	○	×	○	面積相関法と同等
テストサイト*	Beaufort Sea	Beaufort Sea	Beaufort Sea high Arctic region	Arctic Ocean, Baltic Sea
テストデータ*	Seasat	Seasat	ERS-1	ERS-1
計算に要する時間の比較	遅い	速い	—	面積相関法より速い
注	回転に弱い	平行移動に弱い		不連続な移動, 海水の大きさ よりも大きい移動に弱い

*文献による。ただし面積相関・形状抽出融合法はASFホームページによる。
http://www.usf.alaska.edu/dataset_documents/ersl_ice_motion_vectors_dataset.html

$$\frac{dI}{dt} = \frac{\partial I(x, y, t)}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial I(x, y, t)}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial I(x, y, t)}{\partial t} = 0 \quad (2.1.3)$$

整理すると

$$I_x u_1 + I_y u_2 = -I_t \quad (2.1.4)$$

ここで見かけの速度ベクトルは (u_1, u_2) 、空間的な明るさの勾配を I_x, I_y 、時間的な勾配を I_t とする。移動中2つの物体が同じ速度を保っていると仮定することによって

$$I_x u_1 + I_y u_2 = -I_t \quad (2.1.5)$$

$$I_{yx} u_1 + I_{yy} u_2 = -I_{yt} \quad (2.1.6)$$

(2.1.5) (2.1.6) 式より推定速度ベクトル $= (u_1, u_2)$ が求められる。ここで実際のオプティカルフローを $\underline{u}$ とすれば、

$$\|u - v\| = \|H^{-1}(M^T \Delta I - \Delta \frac{dI}{dt})\| \quad (2.1.7)$$

$$H = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} \\ I_{yx} & I_{yy} \end{bmatrix} \quad (2.1.8)$$

$$M = \begin{bmatrix} \frac{\partial v_1}{\partial x} & \frac{\partial v_1}{\partial y} \\ \frac{\partial v_2}{\partial x} & \frac{\partial v_2}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (2.1.9)$$

オプティカルフロー法を用いた移動ベクトル算出方法の大まかな流れは図2.1.8のようになる。階層化された画像ピラミッドで平均化ウィンドウサイズの大きい画像から処理を開始する。画像全体においておおまかな回転、変形のパラメーターをフーリエ変換によって求める。得られたパラメーターによってリサンプリングをおこない、2画像のうち、後で取得された画像についてオプティカルフロー計算を行い、移動ベクトルを算出する。この処理を解像度をあげながら繰り返し、得られた移動ベクトルをあわせて最終的な移動ベクトルとする。

Sun (1996) はオプティカルフロー法は、氷密度が大きいところでは面積相関法と同程度の結果が得られ、かつ計算時間は短く、また氷密度が小さいところでも形状抽出法よりも優れた結果が得られるとしている。ただし移動量が海水の大きさよりも大きい場合、また移動が連続的でない場合、対応することができないのが欠点であるとしている。

2.1.6 各アルゴリズムの比較検討

上で述べた各アルゴリズムの比較検討結果を表2.1.1に示す。

3 JERS-1 合成開口レーダデータ処理

3.1 ソフトウェアの改修の概要

以下に示すソフトウェアの改修を行なった。

(1) 歪格子図の精度を上げるため、算出された海水移動データのうち、相関係数の低いものを除去し、相関係数の高いデータより補間する。相関係数の低いデータが多い格子では、欠損値として取り扱う。

(2) 海水移動ベクトル算出結果を用いて歪格子図を作成し表示するための機能を追加する。

(3) ポーラーステレオ投影に際し、シーンの中央で地球表面に接する平面に投影することにより、画像の歪みを少なくする。

3.2 海水移動ベクトルの算出アルゴリズム

海水移動ベクトルの算出については、従来の共同研究で用いられている IPAC (Image Pyramid Area Correlation) 方式によるアルゴリズムを用いる。

(1) 画像ピラミッドの作成

オリジナルの JERS-1/SAR データは1画素12.5mのスペーシングになっているが、この画像から40×40, 20×20および10×10の平均化操作により、3つのステージの分解能の画像を生成する。生成された画像の分解能は、第1ステージが500m、第2ステージが250m、第3ステージが125mである。

(2) 対応点の探索

同じ段階の2つのSAR画像から面積相関を計算し、相関係数の最大値を探索することにより、両者の画像の対応点を求める。相関係数は、着目画素の周囲の9×9画素の窓領域内で、以下の式により計算する。

$$C_{ijkl} = \sum_{m=-4}^4 \sum_{n=-4}^4 \frac{(X_{i+m, j+n} - \mu_x)(Y_{k+m, l+n} - \mu_y)}{81\sigma_x\sigma_y}$$

ここで、 X_i, j, Y_k, l はそれぞれ画像1の座標 (i, j) と画像2の座標 (k, l) での値であり、 $\mu_x, \mu_y, \sigma_x, \sigma_y$ はそれぞれ画像1と2の窓領域内の平均値、および標準偏差を表す。

対応点の探索は、第1ステージの画像からスタートし、以下第2ステージ、第3ステージの画像へと進む。 n ステージの探索では、 $(n-1)$ ステージの探索結果を対応点の初期値として使用する。

(3) 誤ベクトルの除去

(2)の探索結果から求められる移動ベクトルの中には、

必ずしも実際の移動を反映しない誤りのベクトルが含まれている。このため、以下のような方法により、誤ベクトルの除去を行なう。

a. ピクセル方向、ライン方向のベクトル（移動量）をそれぞれU, Vとし、全画像中でのベクトルの平均値（ μU , μV ）および標準偏差（ σU , σV ）を求める。

b. 画素（i, j）でのベクトルを（ U_{ij} , V_{ij} ）とした場合、

$$U_{ij} < \mu U - 3\sigma U \text{ または } U_{ij} > \mu U + 3\sigma U \\ \text{および}$$

$$V_{ij} < \mu V - 3\sigma V \text{ または } V_{ij} > \mu V + 3\sigma V$$

であるとき、（ U_{ij} , V_{ij} ）を誤ベクトルと見なす。

c. 誤ベクトルと見なされた画素でのベクトルを、その画素の周囲の8画素のベクトルの平均値で置き換える。

d. 相関係数があるいき値より低いベクトルは、誤ベクトルと見なして、上記と同様に周囲の8画素のベクトルの平均値で置き換える。なお、この処理は第1ステージでのみ行なう。

(4) 海水ベクトルの算出

実際の海水の移動ベクトルの算出は、SAR画像から地図座標系への変換を行い、地図座標系でのベクトルを求めることにより行なう。なお、地図座標への投影法として、ポーラステレオ投影法を用いる。

a. SAR画像のピクセル、ライン値を、緯度、経度座標に変換する。変換係数としては、SARのレベル2.1データの設備関連レコードに格納されている変換係数を用いる。

b. aで求めた画素毎の緯度、経度座標を、ポーラステレオ投影法により、地図座標（X, Y）に変換する。その際、投影原点の緯度、経度として、画像の中心付近の緯度、経度を使用することにより、変換後の歪みを少なくする。

c. ベクトルの大きさ（M）および方向（D）を以下の式により計算する。

$$M = \frac{\sqrt{U_{xy}^2 + V_{xy}^2}}{t_{int}}$$

$$D = \tan^{-1}\left(\frac{U_{xy}}{V_{xy}}\right)$$

ここで、 U_x , Y , V_x , Y はそれぞれ地図座標上でのX方向、Y方向のベクトルであり、 t_{int} は、2つのSAR画像の観測時刻の差である。

3.3 歪格子図の作成アルゴリズム

3.2で求められた海水移動ベクトルの算出結果を用いて、海水の発散/収束および変形の状態を表すための歪格子図を作成する。歪格子の算出に際しては、アラスカ大学のLiおよびWeeksの論文（2.1.7に示すLi et al, 1995）を参考にした。

(1) 初期格子図の作成・表示

対応点算出結果ファイルのベクトル始点の画像座標を線で結んで格子図を作成し、表示する。格子図の作成は、海水の歪み以外の歪みが入らないようにするため、投影変換を行わずに、SAR画像座標上で格子図を作成する。

(2) 歪格子図の作成

移動ベクトルデータの終点の画像座標を求め、(1)と同様に各終点を線で結んで格子図を作成し、表示する。

(3) 海水歪みパラメータの計算および表示

移動ベクトルデータから、対象地域全域についての海水歪みパラメータを以下の手順で計算する。計算は、投影変換による歪みが入らないようにするため、画像座標上で行なう。

a. 各格子点について、x方向に隣り合う2つのベクトルのx方向、y方向の変位量の差をそれぞれ dU_x , dV_x とし、指定領域についての dU_x , dV_x の平均値を求める。

b. 同様に、y方向に隣り合う2つのベクトルのx方向、y方向の変位量の差をそれぞれ dU_y , dV_y とし、指定領域についての dU_y , dV_y の平均値を求める。

c. 以下の計算式により、Divergence（EI）およびShear（EII）を求める。

$$E_I = \frac{dU_x}{dx} + \frac{dV_y}{dy}$$

$$E_{II} = \sqrt{\left(\frac{dU_x}{dx} - \frac{dV_y}{dy}\right)^2 + \left(\frac{dU_y}{dy} + \frac{dV_x}{dx}\right)^2}$$

ここでは、それぞれ、 dU_x , dU_y , dV_y , dV_x の領域内の平均値を表し、 dx , dy はx方向、y方向の格子点間隔である。

なお、計算領域の指定については、対象画像全域を $n \times m$ で等分割して指定するか、あるいは特定の領域を個別に指定する。計算結果は、領域ごとに数値出力する。

d. ハで計算された2つのパラメータ、Divergence

(EI), およびShear (EII) に関して, それぞれシェードカラー合成により画像表示する。

3.4 JERS-1/SARデータによる歪み格子図作成結果

本業務で用いたJERS-1/SARデータは以下の通りである。

処理レベル	番号	パス - ロウ	観 測 日
レベル2. 1	1	1 1 1 - 1 7 6	1996年11月 4 日
同 上	2	1 1 1 - 1 7 7	同 上
同 上	3	1 1 3 - 1 7 6	1996年11月 6 日
同 上	4	1 1 3 - 1 7 7	同 上

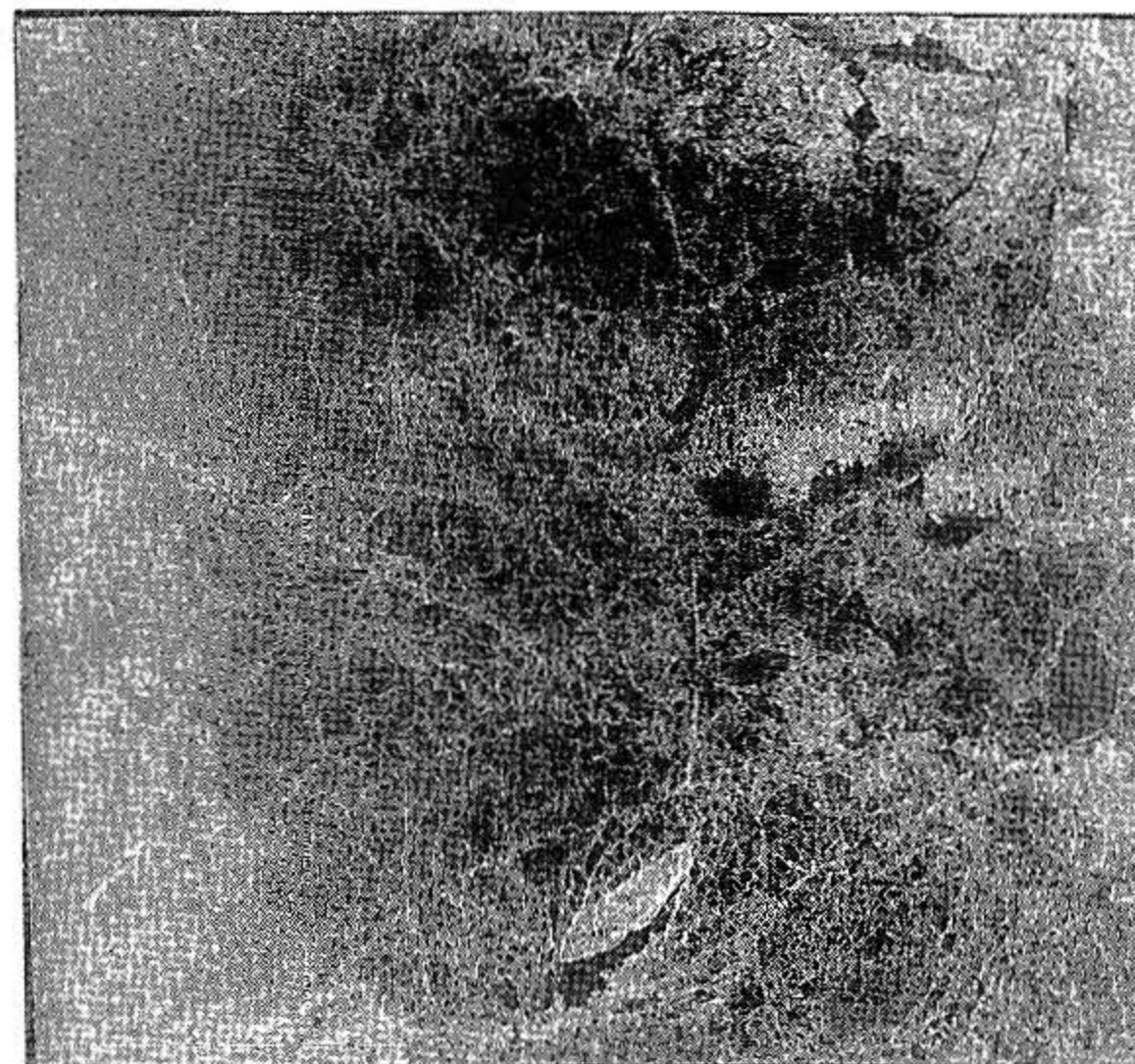
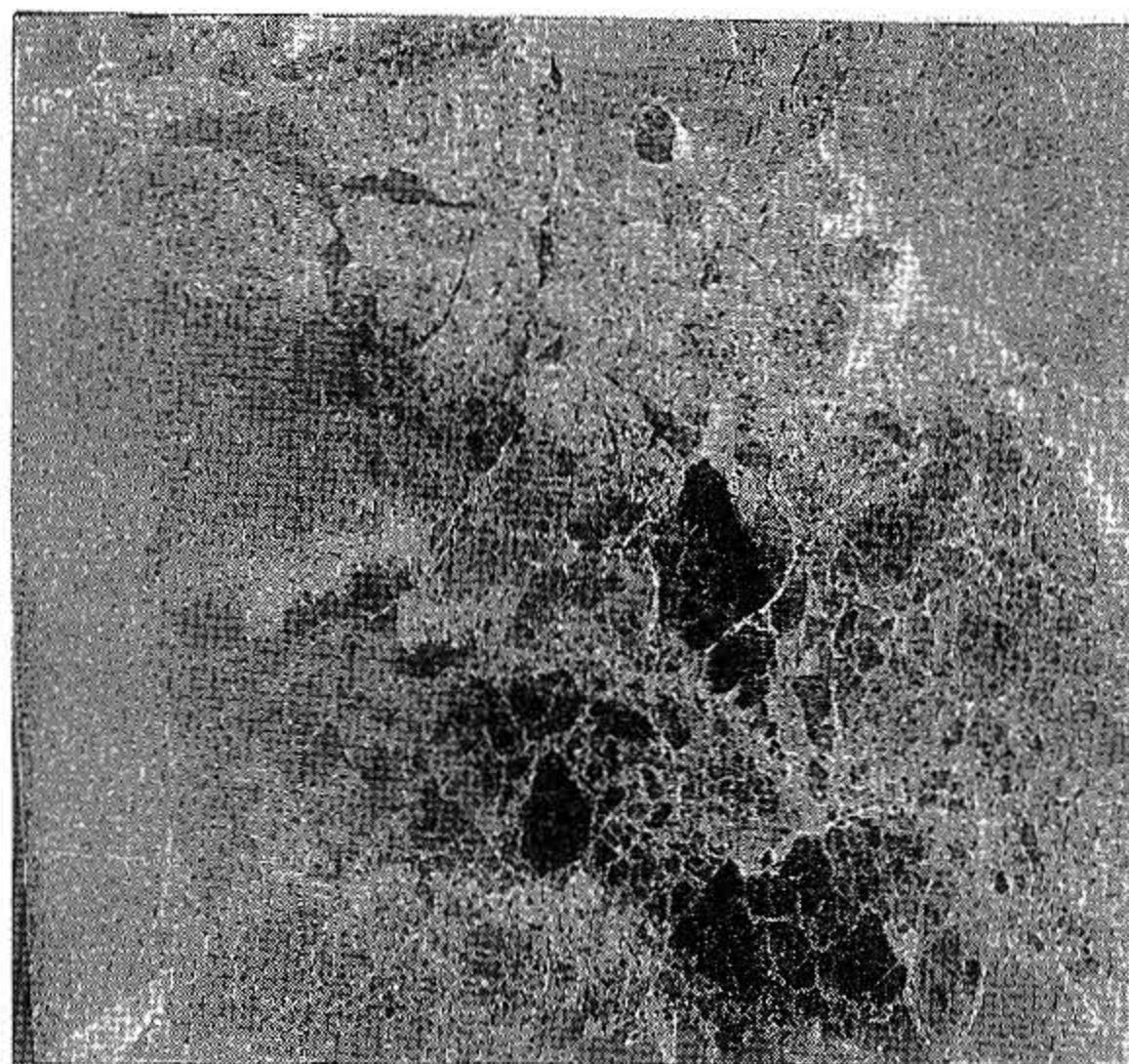


写真 3. 1 (1) 使用したJERS-1/SAR画像 (その 1)
 (上 : 111-176 (1996/11/4), 下 : 113-176 (1996/11/6))
 Photo 3.1 JERS-1/SAR images used in this study
 (1) Upper: path 111-row 176, 4 November 1996
 ; Lower: path 113-row 176, 6 November 1996.

観測対象海域は, 東シベリア海で, 北緯72度30分~73度, 東経136度~137度の海域である。なお, 移動ベクトルを算出するための画像ペアとして, 画像 1 と 3, および 2 と 4 をそれぞれ用いた。写真 3. 1 には, 使用したJERS-1/SARの画像 (10×10で平均化した画像) を示す。

図 3. 1 には, 111-176と113-176のペアについて, 海氷移動ベクトルを算出した結果の画像を示す。なお, 第 1 ステージにおける誤ベクトル除去に使用する相関係数のいき値としては, 0.3を用いた。

図 3. 2, 3. 3 には, ベクトル算出結果にもとずいて作成された歪み格子図 (始点および終点) をそれぞれ示す。

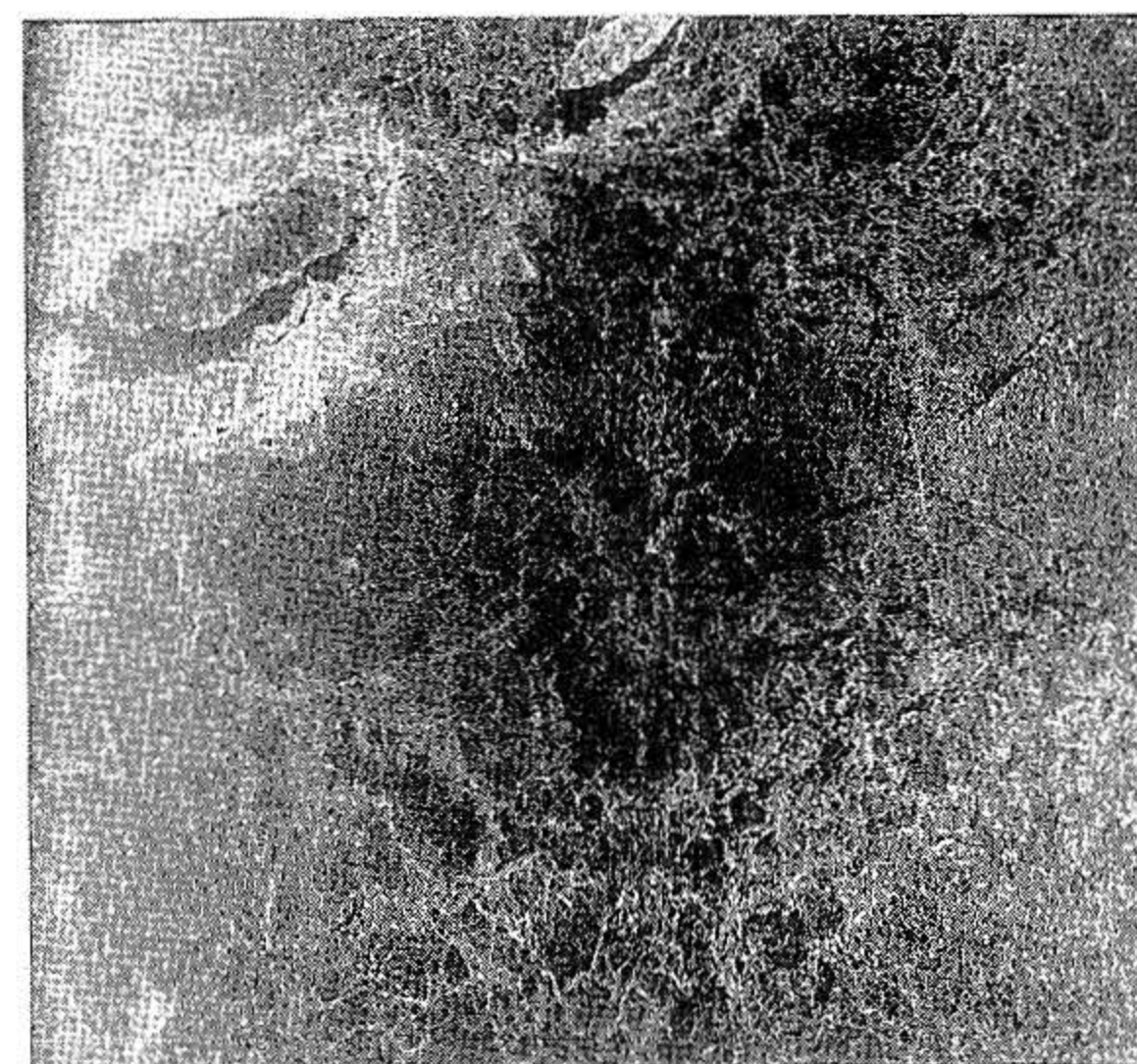
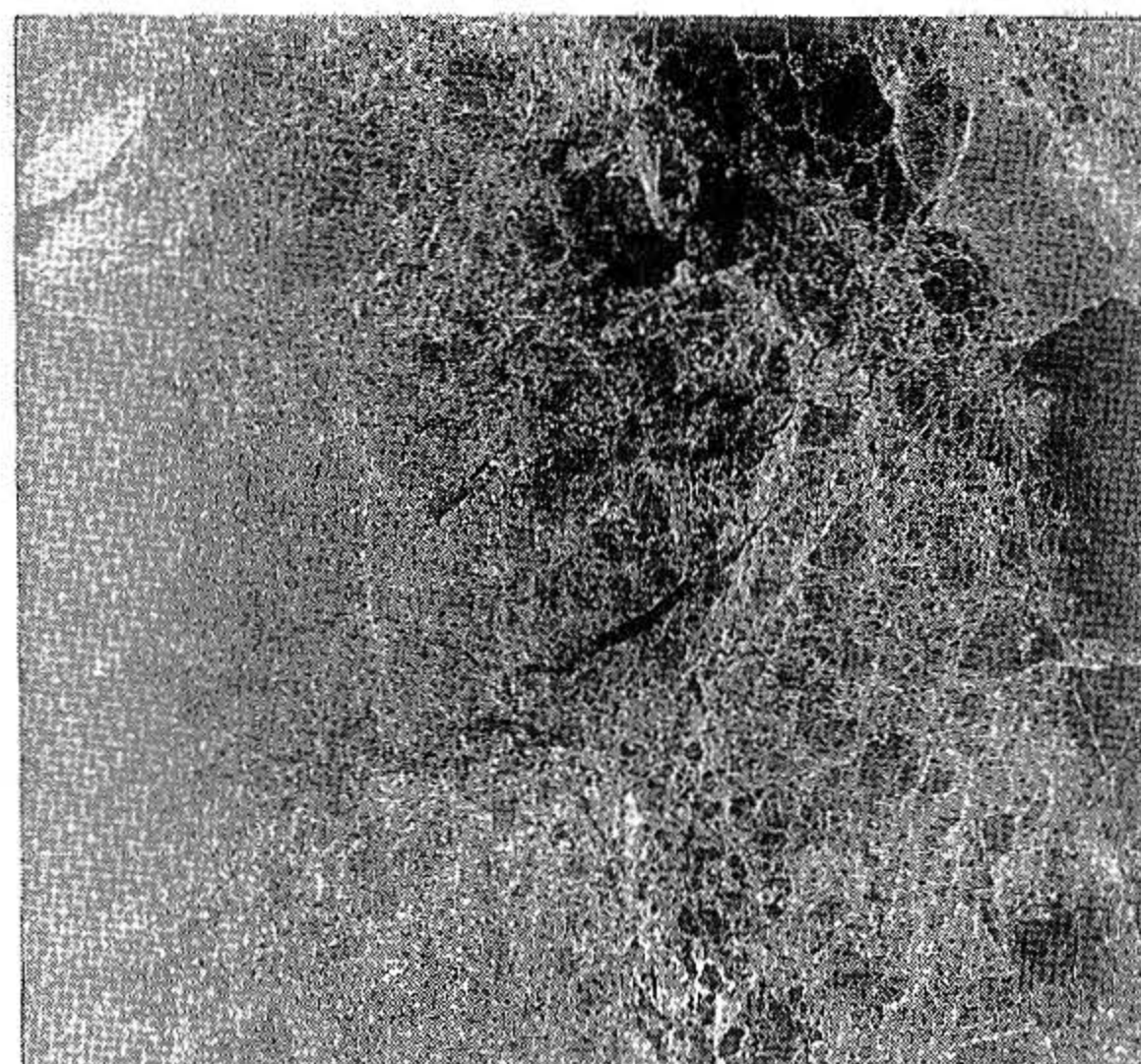


写真 3. 1 (2) 使用したJERS-1/SAR画像 (その 2)
 (上 : 111-177 (1996/11/4), 下 : 113-177 (1996/11/6))
 Photo 3.1 JERS-1/SAR images used in this study
 (2) Upper: path 111-row 177, 4 November 1996
 ; Lower: path 113-row 177, 6 November 1996.

これらの結果を見ると、歪み格子図（終点）では、画像の下部がかなり不自然な変形になっていることがわかる。ベクトル図を見ても、同じ画像の中でベクトルが反対方向に向いていることがわかる。これらの結果は、海氷移動ベクトルの算出が必ずしも正確に行われていないことを示唆するものと考えられる。

ベクトル算出を誤る原因としては、最初のステージ（第1ステージ）における対応点探索方法の問題が1つ考えられる。第1ステージにおける対応点がもし不正確であると、あとのステージで修正することが不可能となるからである。本ベクトル算出アルゴリズムでは、第1ステージにおいて、特に対応点の位置に関する拘束を付けずに全画像にわたって探索するため、本来の位置とは全く異なった位置を見掛け上の対応点と見なしてしまう危険性が十分考えられる。本結果はそのような対応点の探索の誤りが多く出てしまったため、上記のような不自然な結果となったものと予想される。したがって、今後第1ステージでの対応点探索方法を見直す必要がある。

このように、本結果は、決して妥当な結果とは言えないが、ソフトウェアの機能確認のため、上記の歪み格子図から、DivergenceとShearを計算し、画像化した結果を写真3.4、3.5にそれぞれ示す。

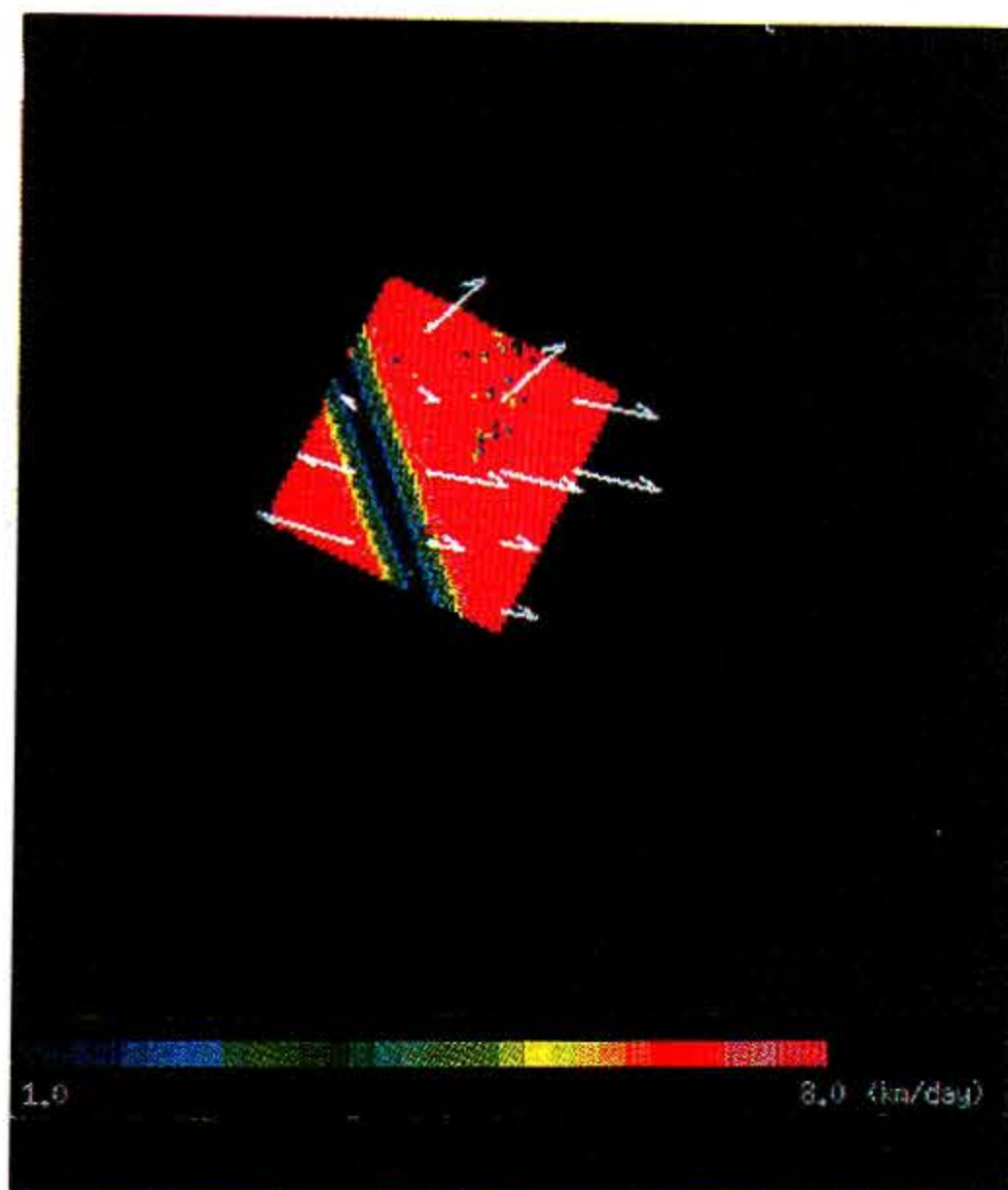


図 3.1 JERS-1/SARデータによるベクトル算出結果画像例 (1996/11/4 111-176と1996/11/6 113-176)

Fig. 3.1 Field of ice displacement vectors estimated from JERS-1/SAR data of path 111-row 176, 4 November 1996 and path 113-row 176, 6 November 1996.

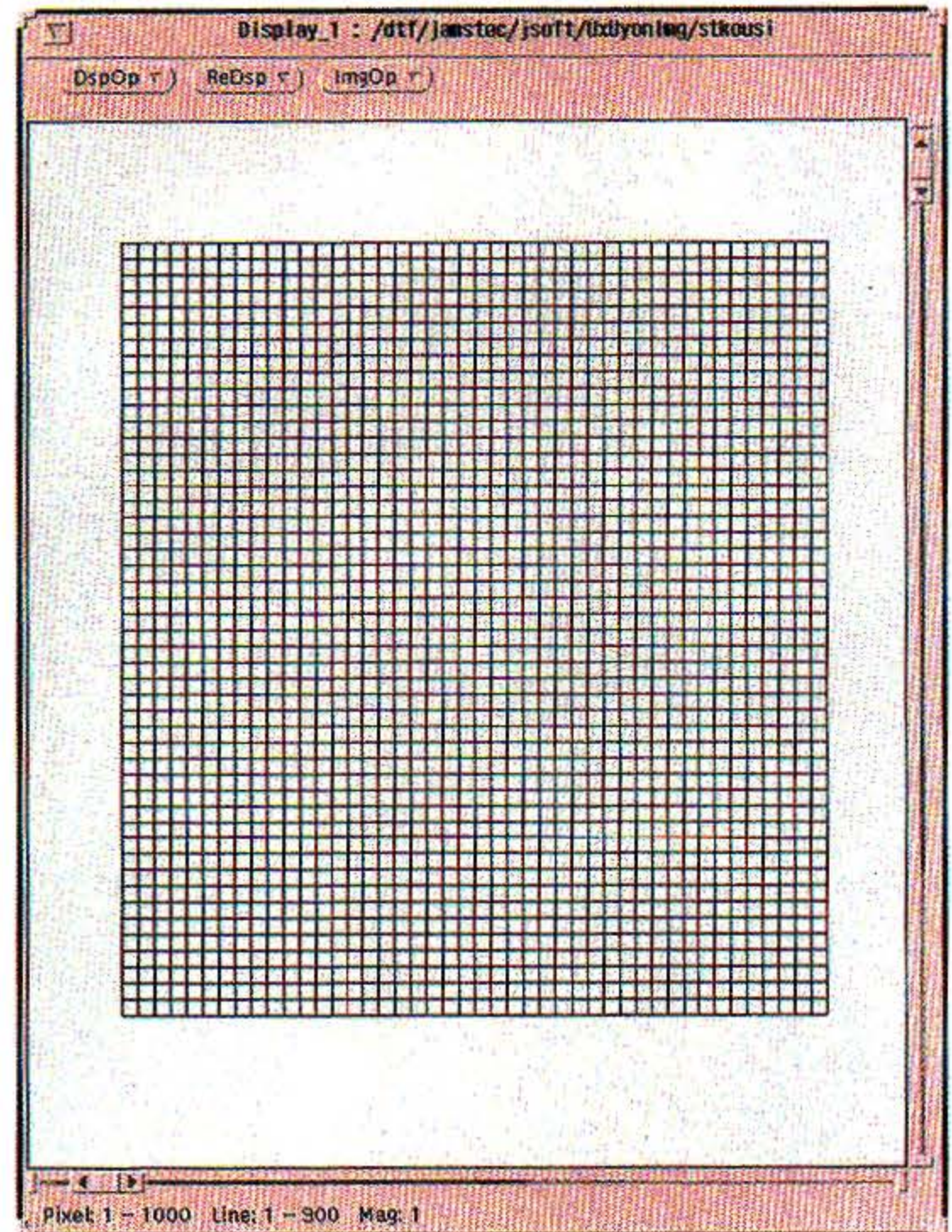


図 3.2 JERS-1/SARデータによる歪み格子図例 (始点画像座標)

Fig. 3.2 Lattice presentation before deformation of a sea-ice field.

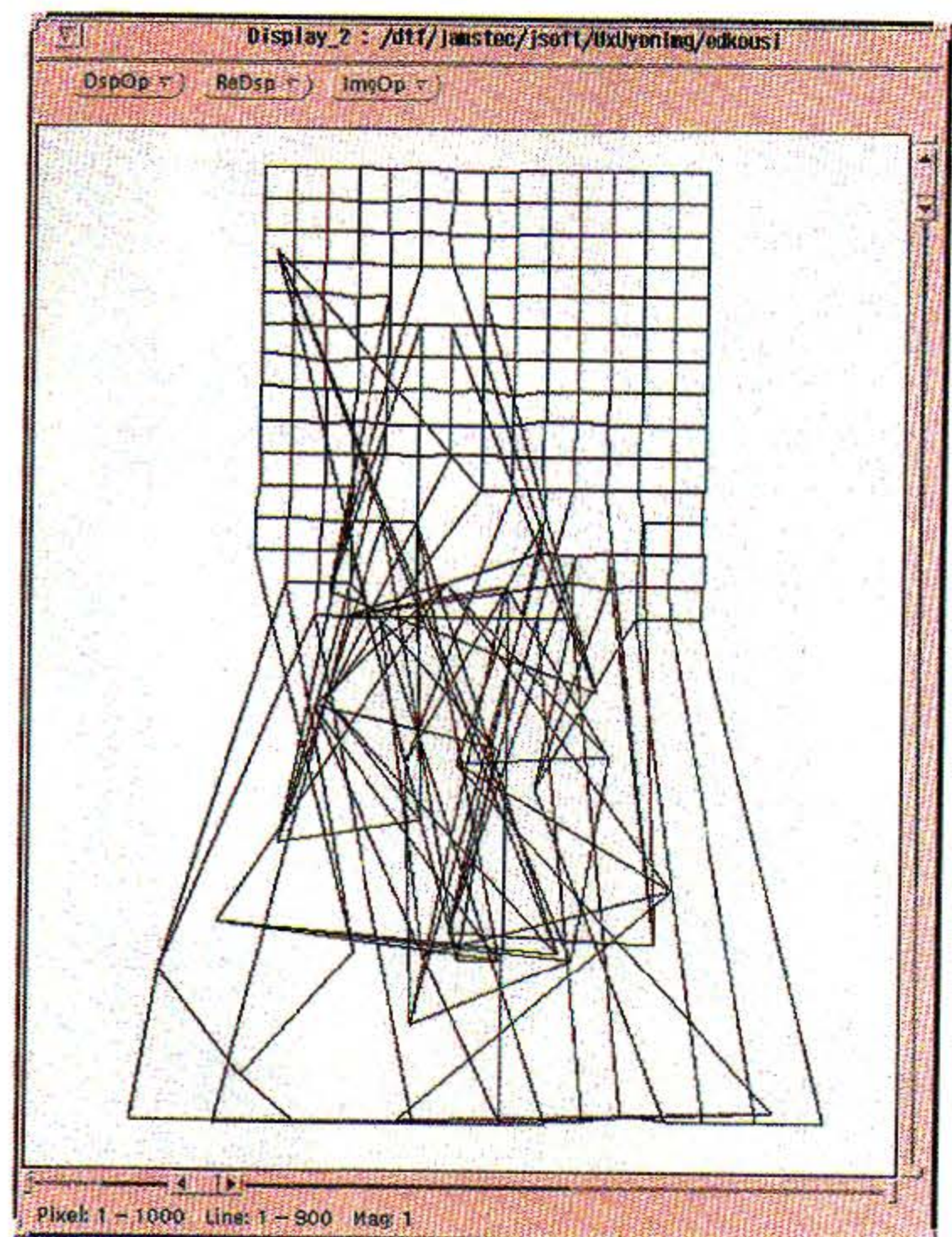


図 3.3 JERS-1/SARデータによる歪み格子図例 (終点画像座標)

Fig. 3.3 Lattice presentation after deformation of a sea-ice field by JERS-1/SAR data.

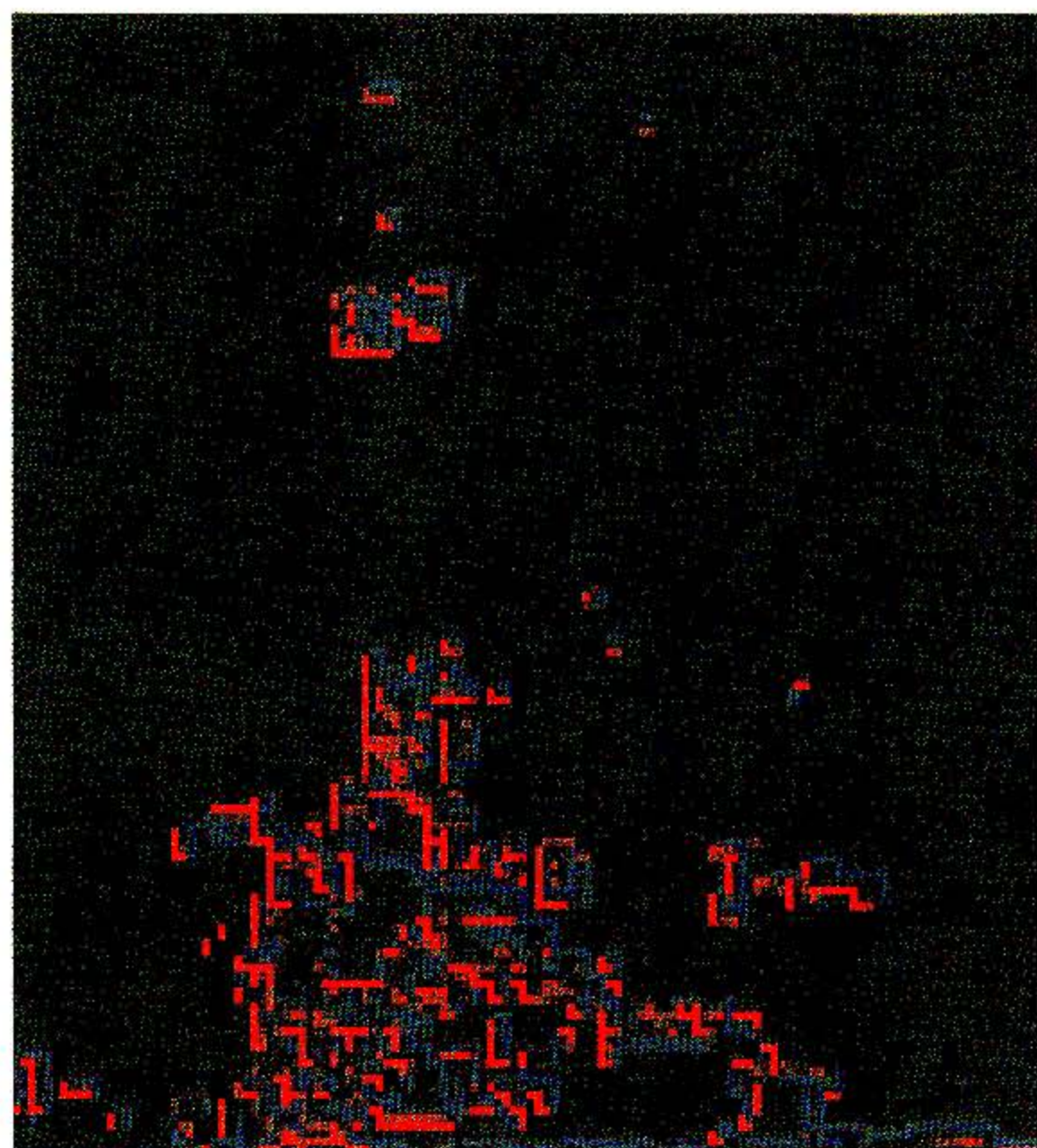


図 3.4 図 3.3の歪み格子図より作成されたDivergence表示画像（赤は発散，青は収束を表す）

Fig. 3.4 Divergence of the sea-ice field shown in Fig. 2. 3. Red shows divergence while blue convergence.

4 RADARSAT合成開口レーダデータ処理

4.1 RADARSAT合成開口レーダ

カナダが打ち上げたRADARSAT衛星は、合成開口レーダ専用の地球観測衛星であり、海氷のモニタリングは、RADARSATのミッションの中で最も重要な位置を占めている。RADARSATの特徴は、種々の観測モードを有し、広域の海域を高頻度で観測出来る点にある。特に、SCAN-SARモードでは、最大500km幅の観測が一度に行なえるので、広域の海氷のモニタリングには最適のデータである。そこで、本研究では、SCAN-SARデータやその他のRADARSATデータによる海氷の移動のモニタリングの可能性を検証するため、SCAN-SARと通常のモード（STANDARDモード）のRADARSATデータにより、移動ベクトルの算出に不可欠な画像間のマッチングの精度や問題点について検討するとともに、RADARSATデータについても試験的に歪み格子図を作成した。

4.2 RADARSATデータの入手

本研究の実験的検討および今後の業務に使用するために、RADARSATのSCAN-SARモードとSTANDARD

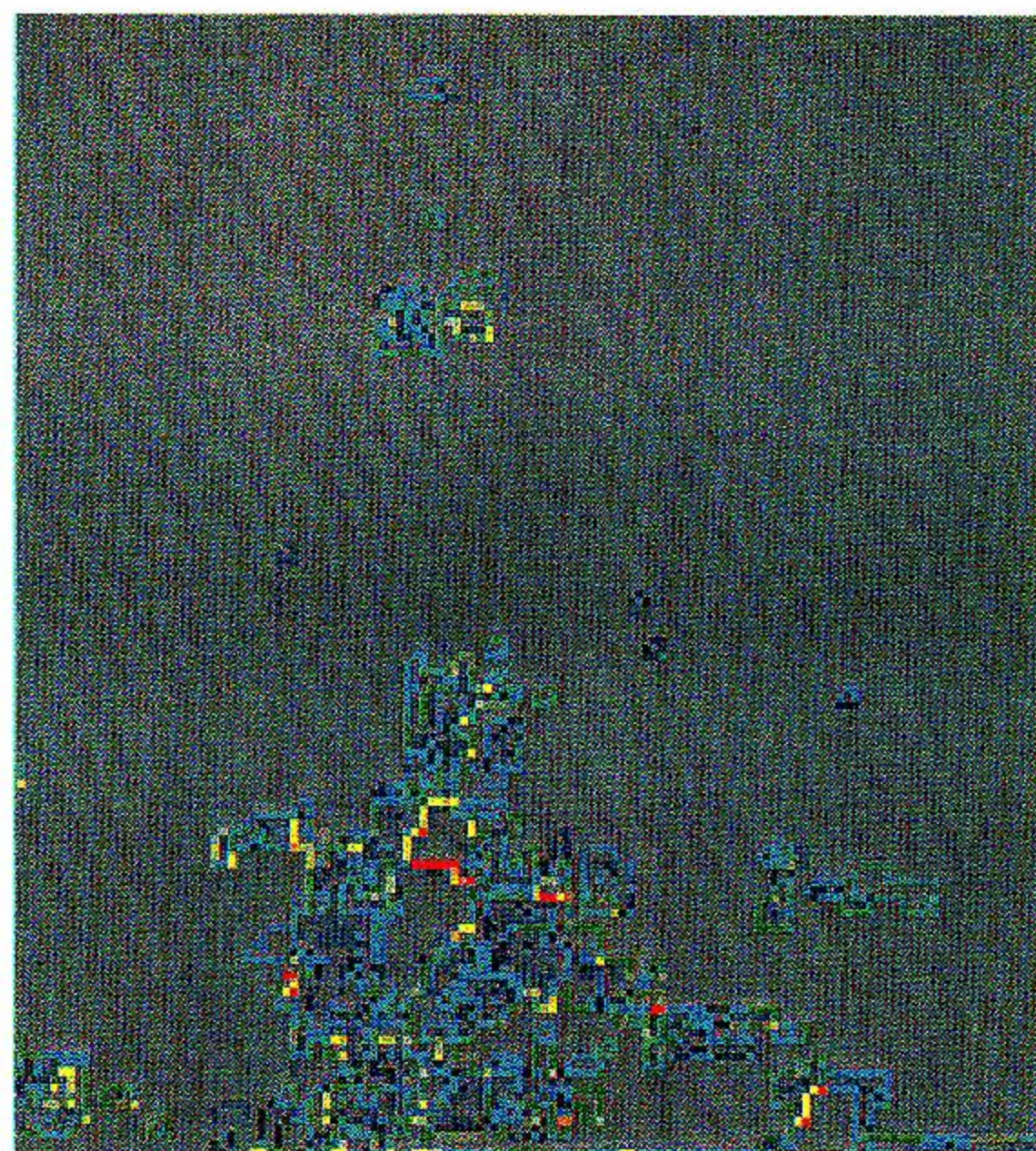


図 3.5 図 3.3の歪み格子図より作成されたShear表示画像（青—緑—黄—赤の順に変形が強まることを示す）

Fig. 3.5 Shear of the sea-ice field shown in Fig. 2. 3. Blue shows little shear while red much.

モードの標準処理データをRADARSAT INTERNATIONALから購入した。表 4. 1 に購入したRADARSATデータの一覧表を示す。また、図 4. 1 には購入したデータの観測範囲を示す。

写真 4. 1 には、RADARSATのSCAN-SARモード（WIDE）のデータの画像例を示す。1996年12月15日から1997年1月22日まで約1週間おきに連続して観測された画像である。また、写真 4. 2 には、STANDARDモード（WIDE）の画像例を示す。

4.3 RADARSATデータによるマッチング精度の検討

本研究で使用している海氷移動ベクトルの算出方法においては、第1ステージでの対応点の探索結果が最終結果に非常に重要な影響を持っている。したがって、RADARSATデータを用いる場合、第1ステージの現在の方法がRADARSATデータにもどの程度適用出来るのかを明らかにする必要がある。そこで、JERS-1/SARデータと同様に、RADARSATのオリジナルのデータを40×40で平均化したデータを用いて、対応点探索のためのマッチングのウィンドウサイズおよび探

表 4.1 RADARSATデータの取得リスト
Table 4.1 Acquired RADARSAT data

#	Start Time	Orbit	Beam Mode	Inc. Angle	Cov.sqKm	Cov.%	Lat./Long. Center	Lat./Long. NW Corner	Lat./Long. NE Corner	Lat./Long. SW Corner	Lat./Long. SE Corner
1	12/15/1996 20:43:46.66	16-249D	SWB	32.96	167203	79.3	75°03'N/154°34'E	NW:77°31'N/148°19'E	NE:76°09'N/165°33'E	SW:73°31'N/145°19'E	SE:72°26'N/159°00'E
2	12/22/1996 20:39:35.43	17-6D	SWB	32.96	155549	73.5	75°00'N/155°33'E	NW:77°29'N/149°20'E	NE:76°07'N/166°31'E	SW:73°28'N/146°20'E	SE:72°23'N/159°59'E
3	12/29/1996 20:35:25.47	17-106D	SWB	32.96	143232	67.7	74°53'N/156°28'E	NW:77°22'N/150°17'E	NE:76°00'N/167°21'E	SW:73°21'N/147°19'E	SE:72°16'N/160°53'E
4	01/08/1997 20:43:46.66	17-249D	SWB	32.96	167203	79.3	75°03'N/154°34'E	NW:77°31'N/148°19'E	NE:76°09'N/165°33'E	SW:73°31'N/145°19'E	SE:72°26'N/159°00'E
5	01/15/1997 20:39:35.43	18-6D	SWB	32.96	155549	73.5	75°00'N/155°33'E	NW:77°29'N/149°20'E	NE:76°07'N/166°31'E	SW:73°28'N/146°20'E	SE:72°23'N/159°59'E
6	01/22/1997 20:35:25.47	18-106D	SWB	32.96	143232	67.7	74°53'N/156°28'E	NW:77°22'N/150°17'E	NE:76°00'N/167°21'E	SW:73°21'N/147°19'E	SE:72°16'N/160°53'E
7	02/01/1997 20:43:46.66	18-249D	SWB	32.96	167203	79.3	75°03'N/154°34'E	NW:77°31'N/148°19'E	NE:76°09'N/165°33'E	SW:73°31'N/145°19'E	SE:72°26'N/159°00'E
8	02/03/1997 06:11:39.15	18-269A	WI	24.85	24967	100.0	76°02'N/154°21'E	NW:76°20'N/150°20'E	NE:76°57'N/155°55'E	SW:75°05'N/152°59'E	SE:75°39'N/158°10'E
9	02/06/1997 06:24:10.36	18-312A	WI	24.85	25164	100.0	75°47'N/151°39'E	NW:76°07'N/147°42'E	NE:76°43'N/153°12'E	SW:74°51'N/150°17'E	SE:75°24'N/155°25'E
10	02/08/1997 20:39:35.43	19-6D	SWB	32.96	155549	73.5	75°00'N/155°33'E	NW:77°29'N/149°20'E	NE:76°07'N/166°31'E	SW:73°28'N/146°20'E	SE:72°23'N/159°59'E
11	02/13/1997 06:19:59.91	19-69A	WI	24.85	24961	100.0	75°52'N/152°34'E	NW:76°11'N/148°36'E	NE:76°47'N/154°08'E	SW:74°56'N/151°11'E	SE:75°29'N/156°20'E
12	02/15/1997 20:35:25.47	19-106D	SWB	32.96	143232	67.7	74°53'N/156°28'E	NW:77°22'N/150°17'E	NE:76°00'N/167°21'E	SW:73°21'N/147°19'E	SE:72°16'N/160°53'E
13	02/25/1997 20:43:46.66	19-249D	SWB	32.96	167203	79.3	75°03'N/154°34'E	NW:77°31'N/148°19'E	NE:76°09'N/165°33'E	SW:73°31'N/145°19'E	SE:72°26'N/159°00'E

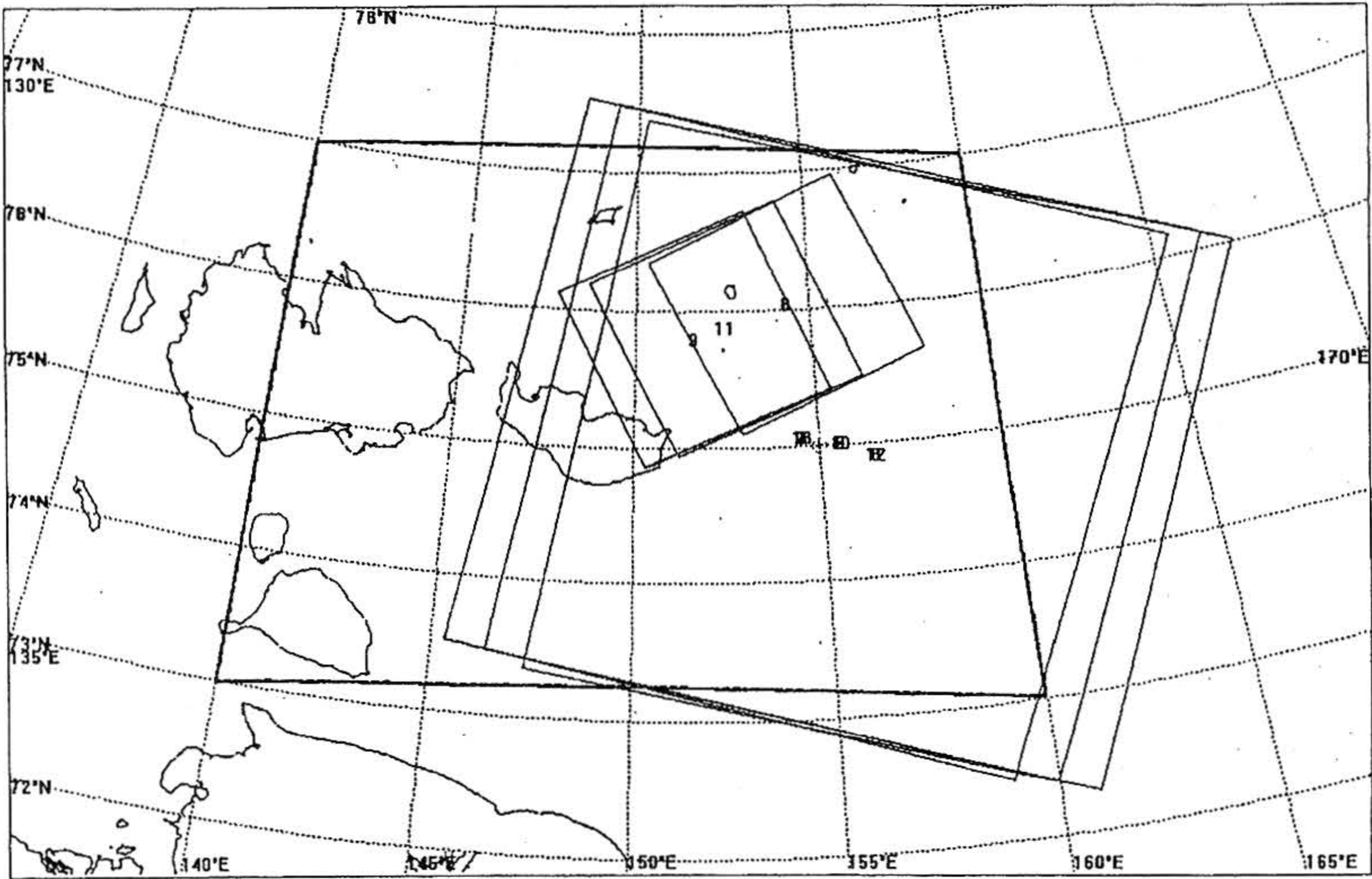


図 4.1 RADARSATデータの観測範囲（細い実線で示す）（広域：SCAN-SAR-WIDE，狭域：STANDARD-WIDE）
Fig. 4.1 The range of acquired RADARSAT data shown by thin solid lines. The larger squares : SCAN-SAR-WIDE ; the smaller squares : standard-WIDE.

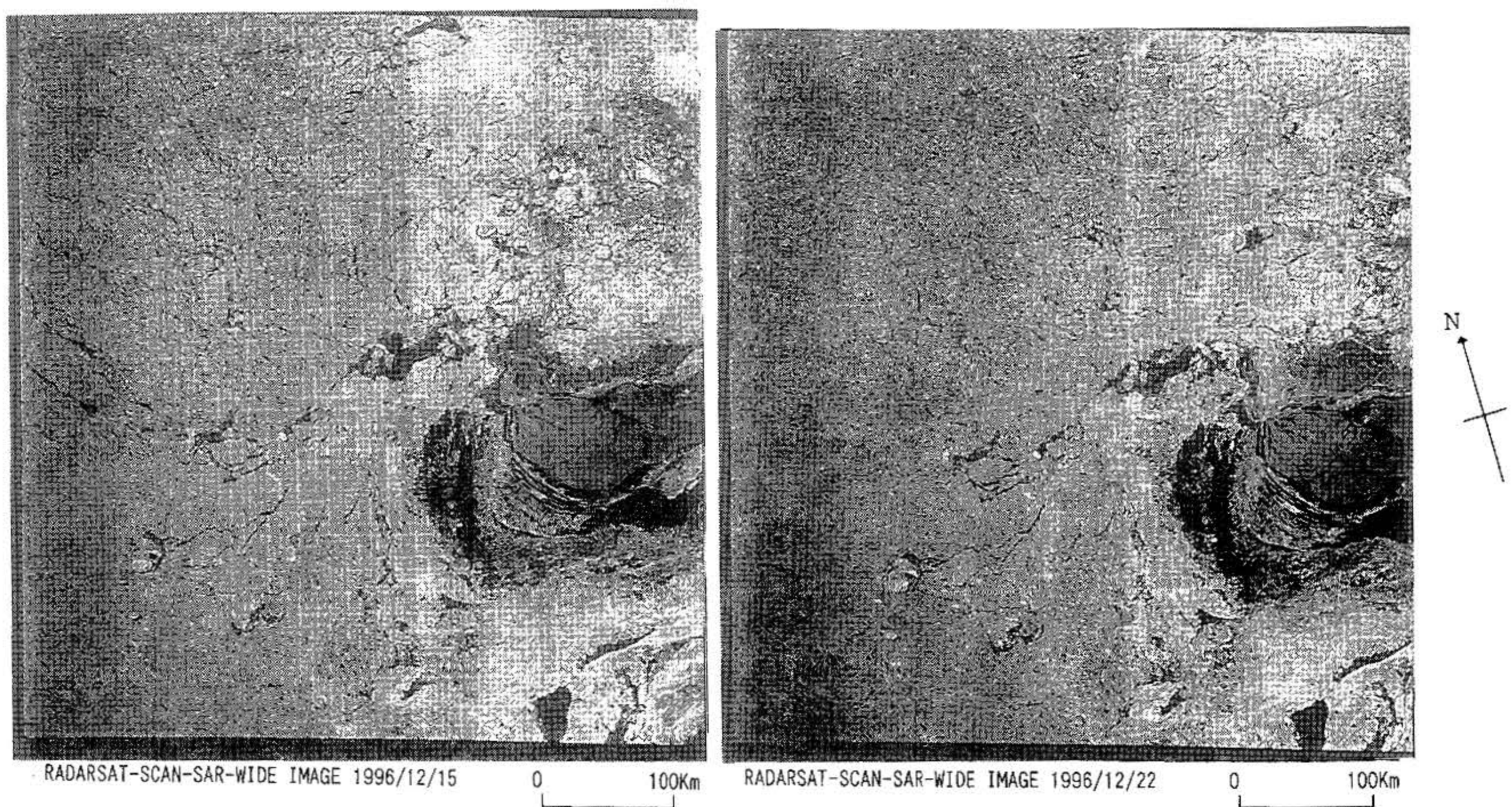


写真 4.1 (1) RADARSAT-SCAN-SAR (WIDE) 画像 (その 1) (左) 1996 年 12 月 15 日, (右) 1996 年 12 月 22 日
(なお, 画像は左右 (東西) が逆になっている。)

Photo 4.1 RADARSAT-SCAN-SAR (wide) images. The east-west direction in the images is reversed.
(1) Left : 15 December 1996 ; right : 22 December 1996.

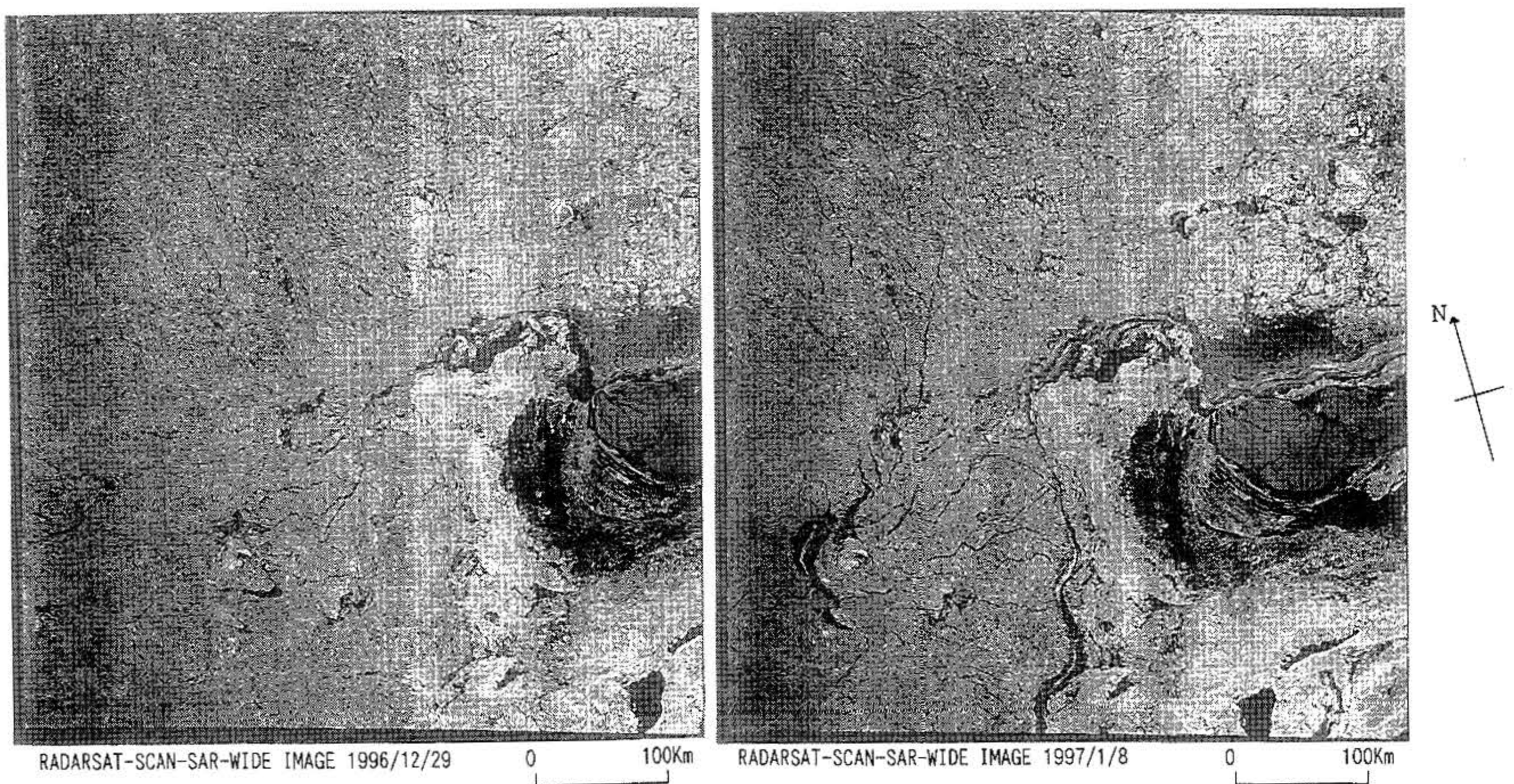


写真 4.1 (2) RADARSAT-SCAN-SAR (WIDE) 画像 (その 2) (左) 1996 年 12 月 29 日, (右) 1997 年 1 月 8 日
(なお, 画像は左右 (東西) が逆になっている。)

Photo 4.1 RADARSAT-SCAN-SAR (wide) images. The east-west direction in the images is reversed.
(2) Left : 29 December 1996 ; right : 8 January 1997.

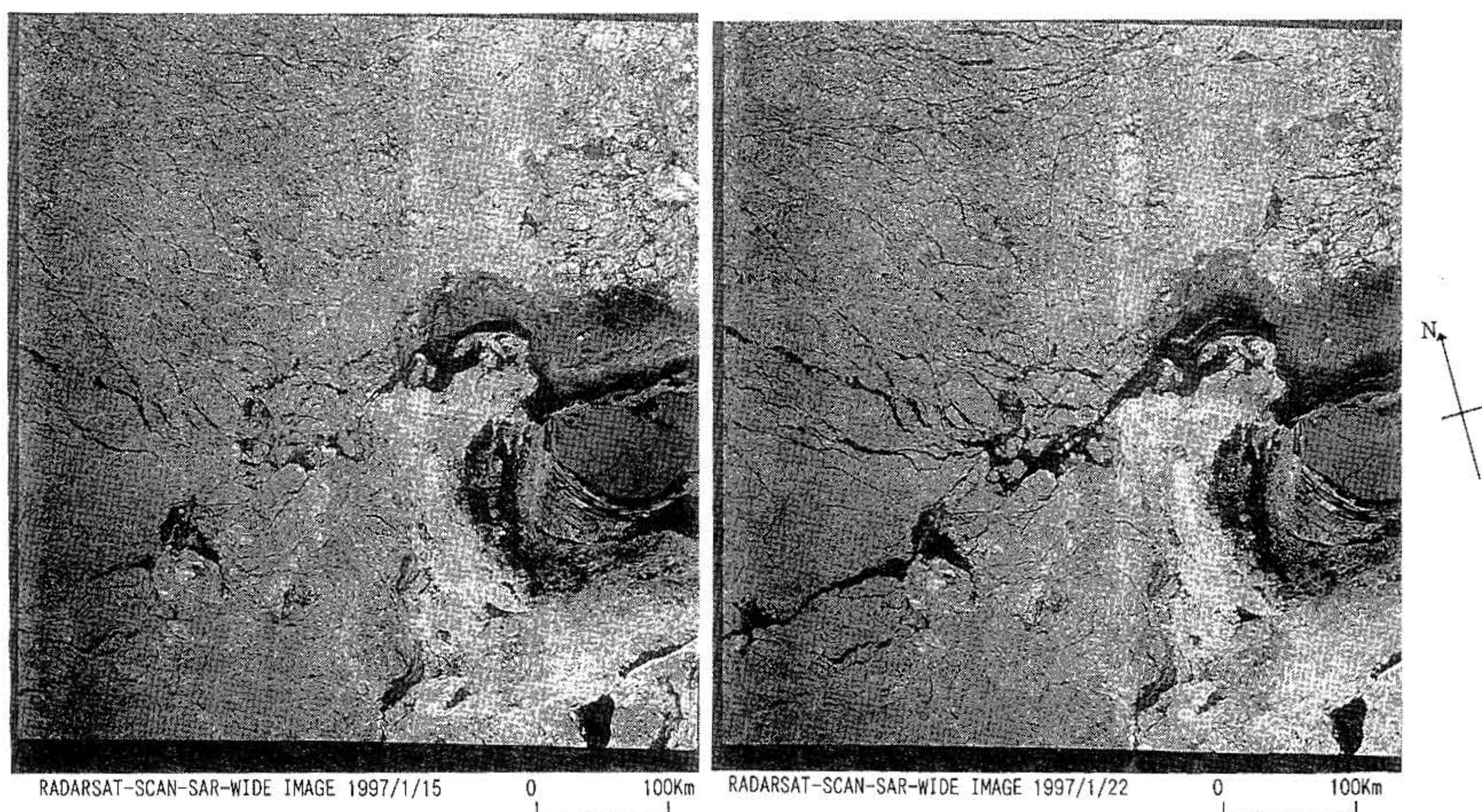


写真 4.1 (3) RADARSAT-SCAN-SAR (WIDE) 画像 (その 3) (左) 1997 年 1 月 15 日, (右) 1997 年 1 月 22 日
(なお, 画像は左右 (東西) が逆になっている。)

Photo 4.1 RADARSAT-SCAN-SAR (wide) images. The east-west direction in the images is reversed.
(3) Left : 15 January 1997 ; right : 22 January 1997.

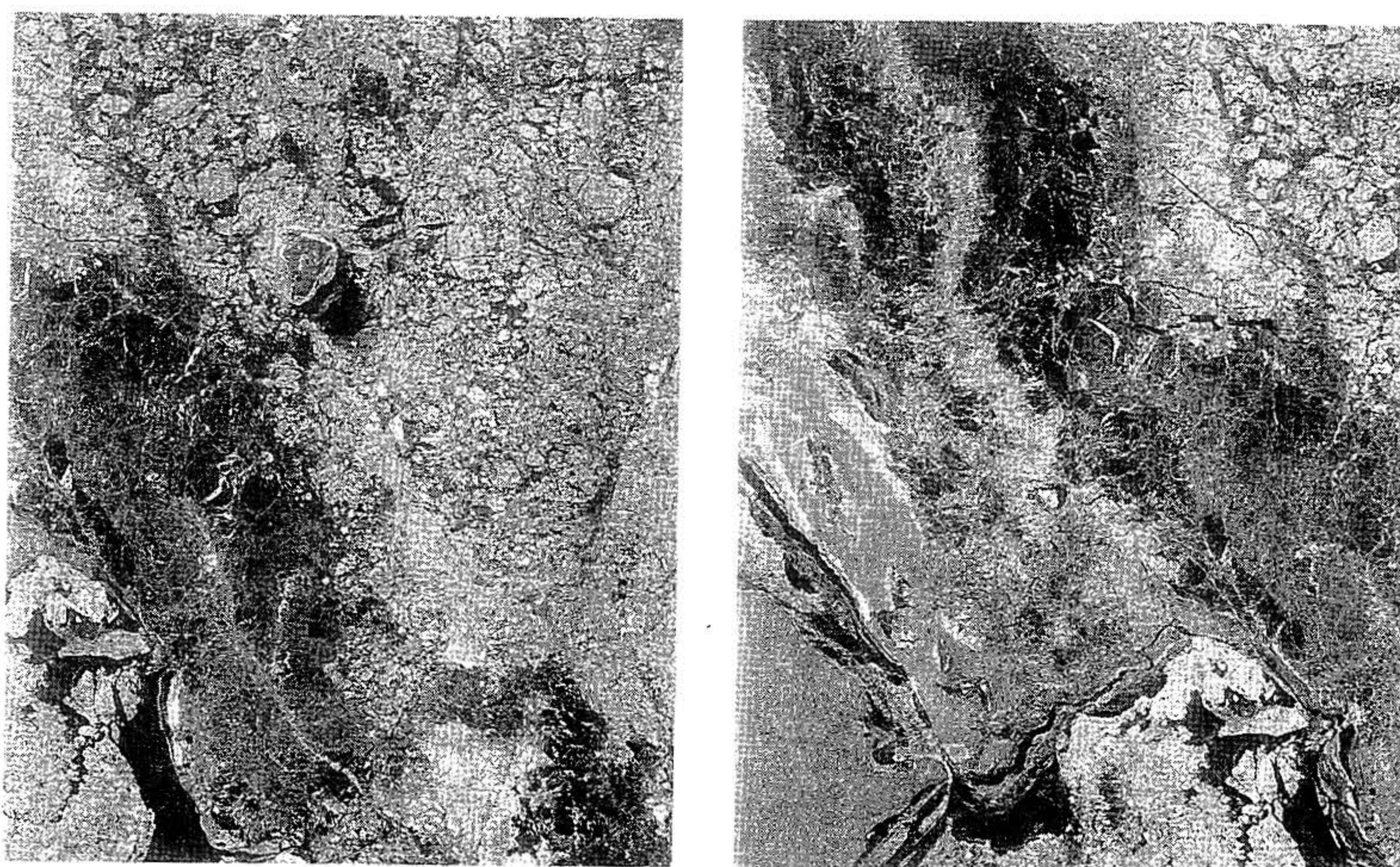


写真 4.2 RADARSAT STANDARDモード (WIDE) の画像 (左) 1997 年 2 月 3 日, (右) 1997 年 2 月 6 日

Photo 4.2 RADARSAT standard mode (wide) images. Left : 3 February 1997 ; right : 6 February 1997;

索範囲（サーチエリア）を変えて、マッチング精度がどの程度変化するか検討した。RADARSATデータとして、SCAN-SAR-WIDEおよびスタンダード（WIDE）をそれぞれ用いた。

表4.2には、SCAN-SAR-WIDEデータの場合の結果を示す。ウィンドウサイズは、現在の第1ステージで使用されている9×9、および15×15、21×21、31×31の4種類、サーチエリアとして、15×15、21×21、31×31、51×51、および101×101の5種類を用いた。なお、対応点の真値は、2つの画像を目視判読して決定した。表4.2の結果では、一般にサーチエリアが大きくなるとマッチングエラーが増加する傾向が見られる。特に、ウィンドウサイズが9×9の場合には、サーチエリアが15×15より広いと、精度の良いマッチングが得られないことがわかる。また、ウィンドウサイズが大きすぎてもやはり精度が低下する傾向が見られる。表4.2の結果では、ウィンドウサイズは、9×9または15×15が適当で、サーチエリアは、ウィンドウサイズが9×9の場合は15×15以内、ウィンドウサイズが15×15では、21×21以内が適当であることがわかる。

一方、スタンダードモードデータを用いた場合の結果を表4.3に示す。この結果でも、表4.2とほぼ同様の結果となった。

さらに、各ケースの相関係数の範囲（最小値と最大値の範囲）とマッチング精度との関係を見てみると、精度の悪い場合の方がむしろ相関係数のレンジが高いレベルにあることがわかる。このことは、少なくともRADARSATデータの場合には、相関係数の値はマッチング精度にはほとんど影響しないことを示唆している。本調査研究において、相関係数を誤ベクトルの判定のためのパラメータとして使用するよう改修したが、RADARSATデータの場合には、この改修はあまり効果がないことが予想される。

以上、RADARSATのSCAN-SAR-WIDEとスタンダード（WIDE）のデータによるマッチング精度の評価を行なった。これらの結果から、ウィンドウサイズとしては現行の9×9または15×15を用いるのが良く、サーチエリアに関してはなるべく小さい範囲を探索するだけで済むような対応点の探索方法を考える必要性を示唆しているものと考えられる。

表 4.2 SCAN-SAR-WIDEデータによるマッチング精度の評価結果
Table 4.2 Matching accuracy with SCAN-SAR-WIDE data

window Size	Search Area Size	Mean Error(p)	Mean Erroe(l)	Mean Error ((p+l)/2)	Point No.	Max-corr (Min.)	Max-corr (Max.)
9	15	2.13	1.88	2.01	8	0.166	0.335
9	21	2.63	4.25	3.44	8	0.196	0.459
9	31	5.00	5.75	5.38	8	0.287	0.552
9	51	9.71	12.00	10.86	7	0.415	0.569
9	101	30.20	6.00	18.10	5	0.554	0.924
15	21	2.25	1.13	1.69	8	0.143	0.337
15	31	7.00	5.00	6.00	7	0.273	0.413
15	51	8.42	9.00	8.71	7	0.273	0.442
15	101	30.80	2.20	16.50	5	0.517	0.898
21	31	3.80	2.71	3.26	7	0.210	0.362
21	51	9.28	8.71	9.00	7	0.263	0.454
31	41	3.27	2.71	2.99	7	0.106	0.358
31	51	4.14	5.43	4.79	7	0.166	0.401

表 4.3 スタンダード（WIDE）データによるマッチング精度の評価結果
Table 4.3 Matching accuracy with RADARSAT standard (wide) data

window Size	Search Area Size	Mean Error(p)	Mean Erroe(l)	Mean Error ((p+l)/2)	Point No.	Max-corr (Min.)	Max-corr (Max.)
9	15	1.67	2.44	2.06	9	0.112	0.384
9	21	4.67	4.56	4.62	9	0.344	0.641
9	31	4.20	8.11	6.16	9	0.387	0.746
9	51	10.22	11.56	10.89	9	0.465	0.787
15	21	2.22	2.56	2.39	9	0.012	0.384
15	31	4.67	5.22	4.95	9	0.127	0.541
15	51	9.33	9.11	9.22	9	0.286	0.663
15	101	21.00	29.20	25.10	5	0.415	0.734
21	31	4.22	3.44	3.83	9	0.098	0.337
21	51	7.44	12.00	9.72	9	0.182	0.550
21	101	17.00	25.40	21.20	5	0.373	0.640
31	41	4.44	4.11	4.28	9	0.012	0.465
31	51	6.89	7.78	7.34	9	0.051	0.343

4.4 RADARSATデータによる歪み格子図の作成結果

4.3に述べたように、RADARSATデータでは、現行のマッチングアルゴリズムでは適用が困難なことが予想されるが、ここでは、スタンダード（WIDE）データにより、試験的に歪み格子図を作成した。

図4.2には、海水移動ベクトル算出結果の画像を示す。この結果もJERS-1/SARデータによる結果と同様に、画像の一部にベクトルの向きが反転しているところが見られる。図4.3、4.4には、歪み格子図（始点および終点）をそれぞれ示す。さらに、図4.5、4.6には、図4.4の歪み格子図から求めたDivergence表示画像とShear表示画像を示す。図4.4でも、画像の左側でかなり不自然な変形が見られる。このように、JERS-1/SARデータと同様に、初期段階の対応点探索のエラーに起因すると見られる不自然な結果となった。したがって、スタンダードデータといえども、やはり、初期段階での対応点探索アルゴリズムを見直すことが必要であろう。

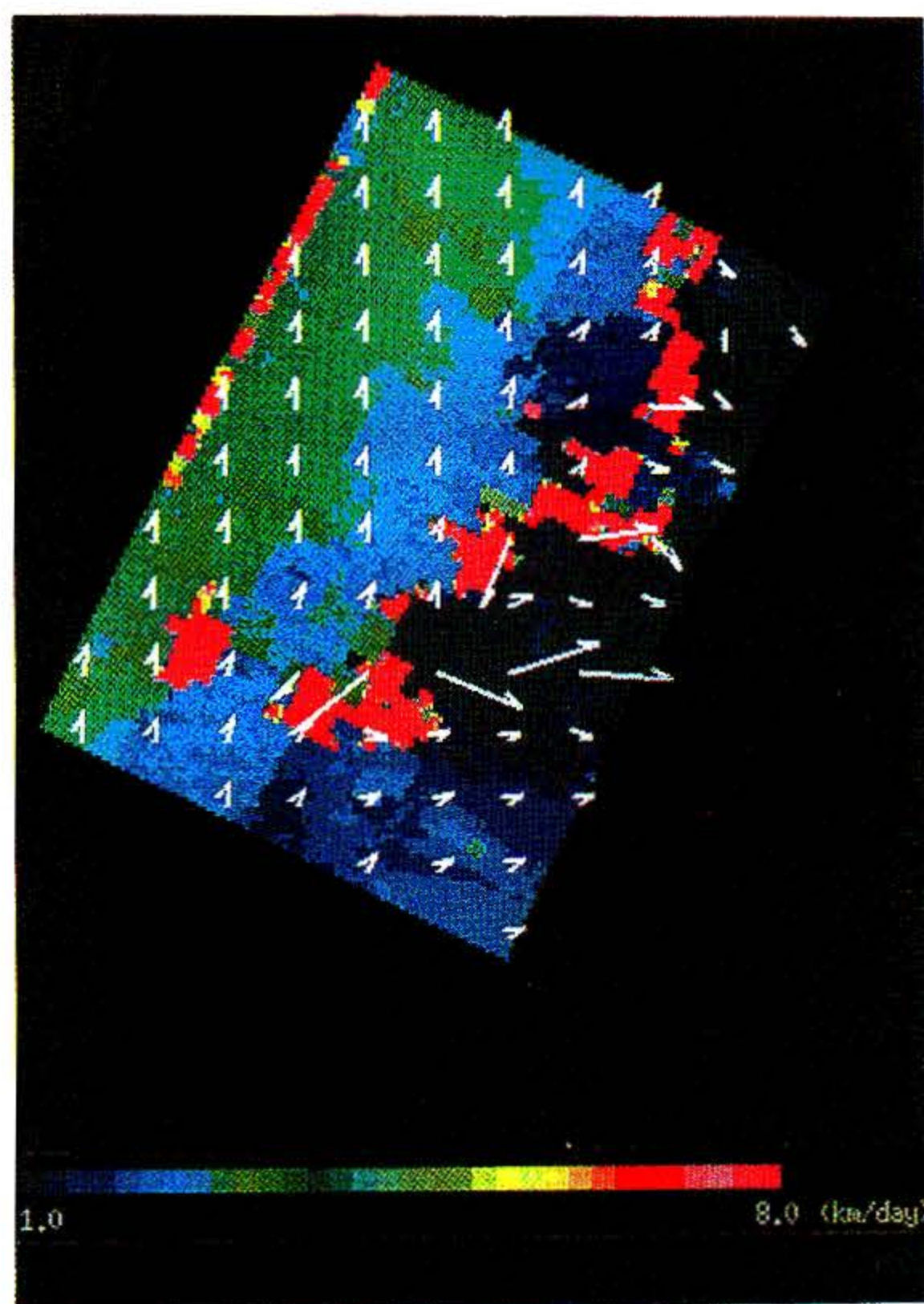


図4.2 RADARSATスタンダードデータによる海水移動ベクトル算出図（1997/2/3と1997/2/6のペアによる）
Fig. 4.2 Field of ice displacement vectors estimated from RADARSAT standard (wide) data of 3 and 6 February 1997.

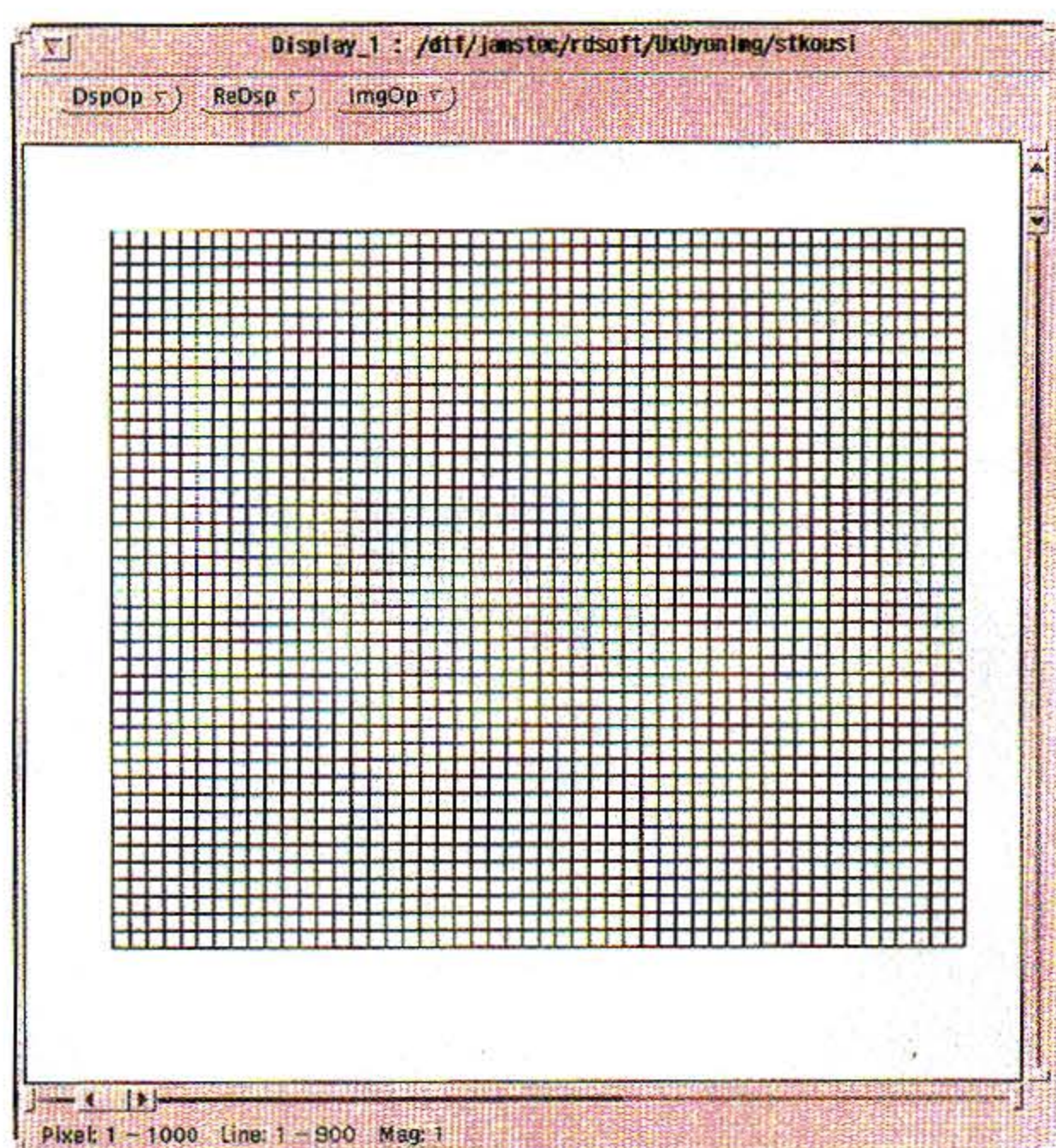


図4.3 RADARSATスタンダードデータによる歪み格子図（始点画像座標）

Fig. 4.3 Lattice presentation before deformation of a sea-ice field.

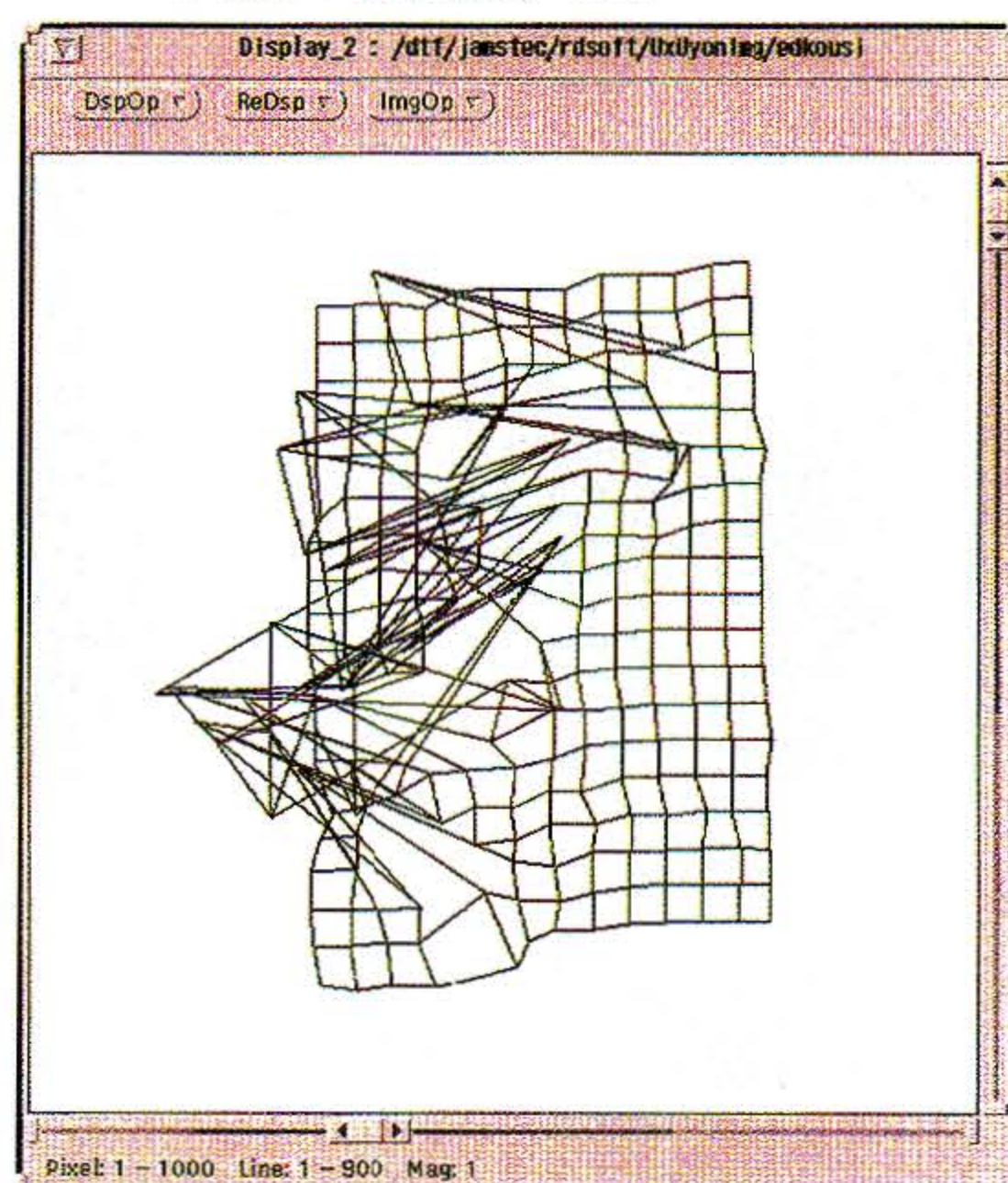


図4.4 RADARSATスタンダードデータによる歪み格子図（終点画像座標）

Fig. 4.4 Lattice presentation after deformation of a sea-ice field by RADARSAT standard (wide) data of 3 and 6 February 1997.

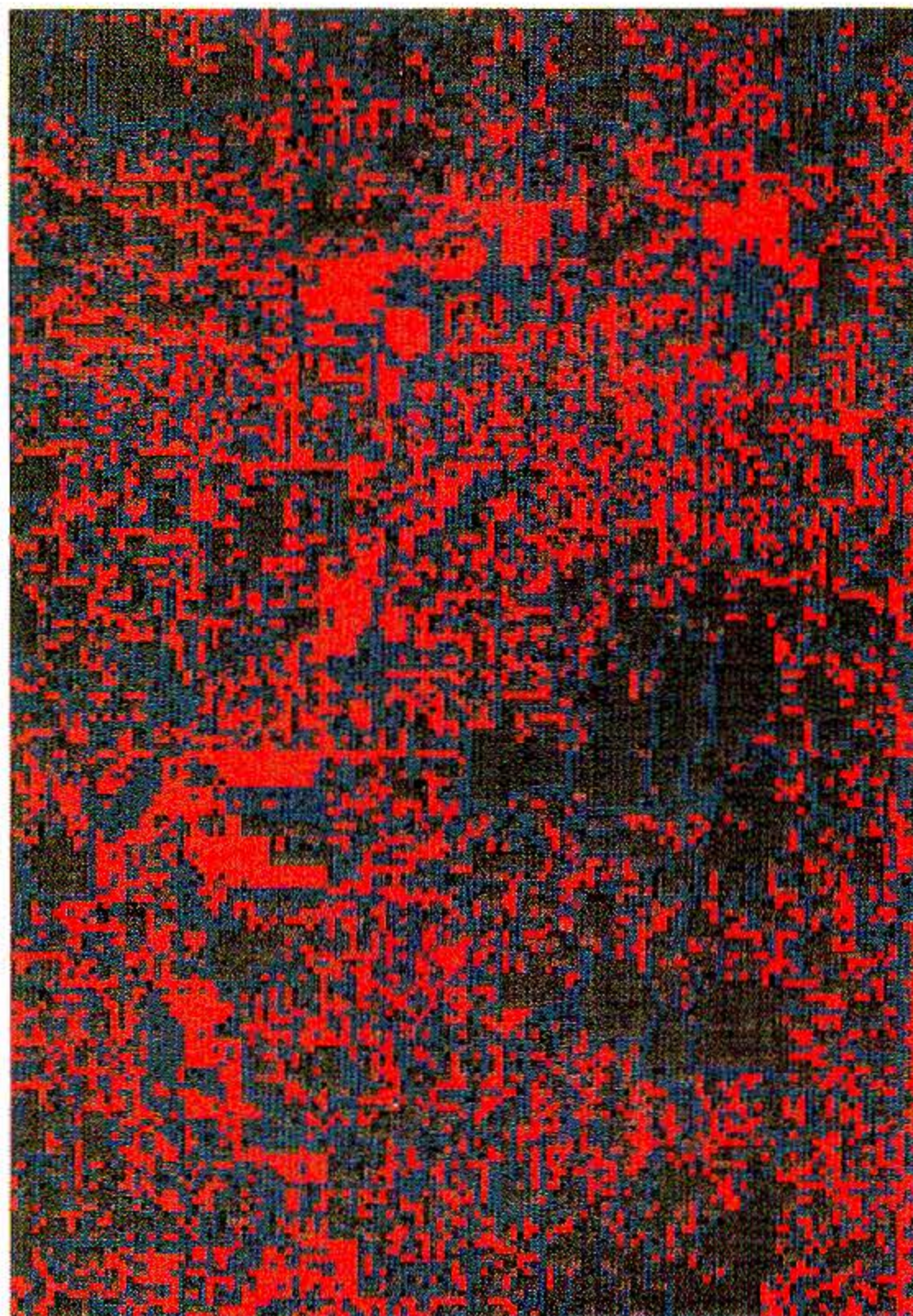


図 4.5 RADARSATスタンダードデータによるDivergence表示画像（赤は発散，青は収束を示す）

Fig. 4.5 Divergence of the sea-ice field shown in Fig. 3.4. Red shows divergence while blue convergence.

参考文献

- 1) Fily M. and Rothrock D. A.: Sea Ice Tracking by Nested Correlations., IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 25, no. 1, 570-580. (1987)
- 2) Vesecky J. F., Samadani R., Smith M. P., Daida J. M. and Bracewell R. N.: Observation of Sea-Ice Dynamics Using Synthetic Aperture Radar Images : Automated Analysis., IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 26, no. 1, 38-48. (1988)
- 3) Kwok R., Curlander J. C., McConnell R. and Pang S. S. : An Ice-Motion Tracking System at the Alaska SAR Facility., IEEE J. Oceanic Eng., vol. 15, no. 1, 44-54. (1990)
- 4) Banfield J.:Automated Tracking of Ice Floes: A Stochastic Approach., IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 29, no. 6, 905-911. (1991)
- 5) McConnell R., Kwok R., Curlander J. C., Kober W. and Pang S. S. : $\phi - s$ Correlation and

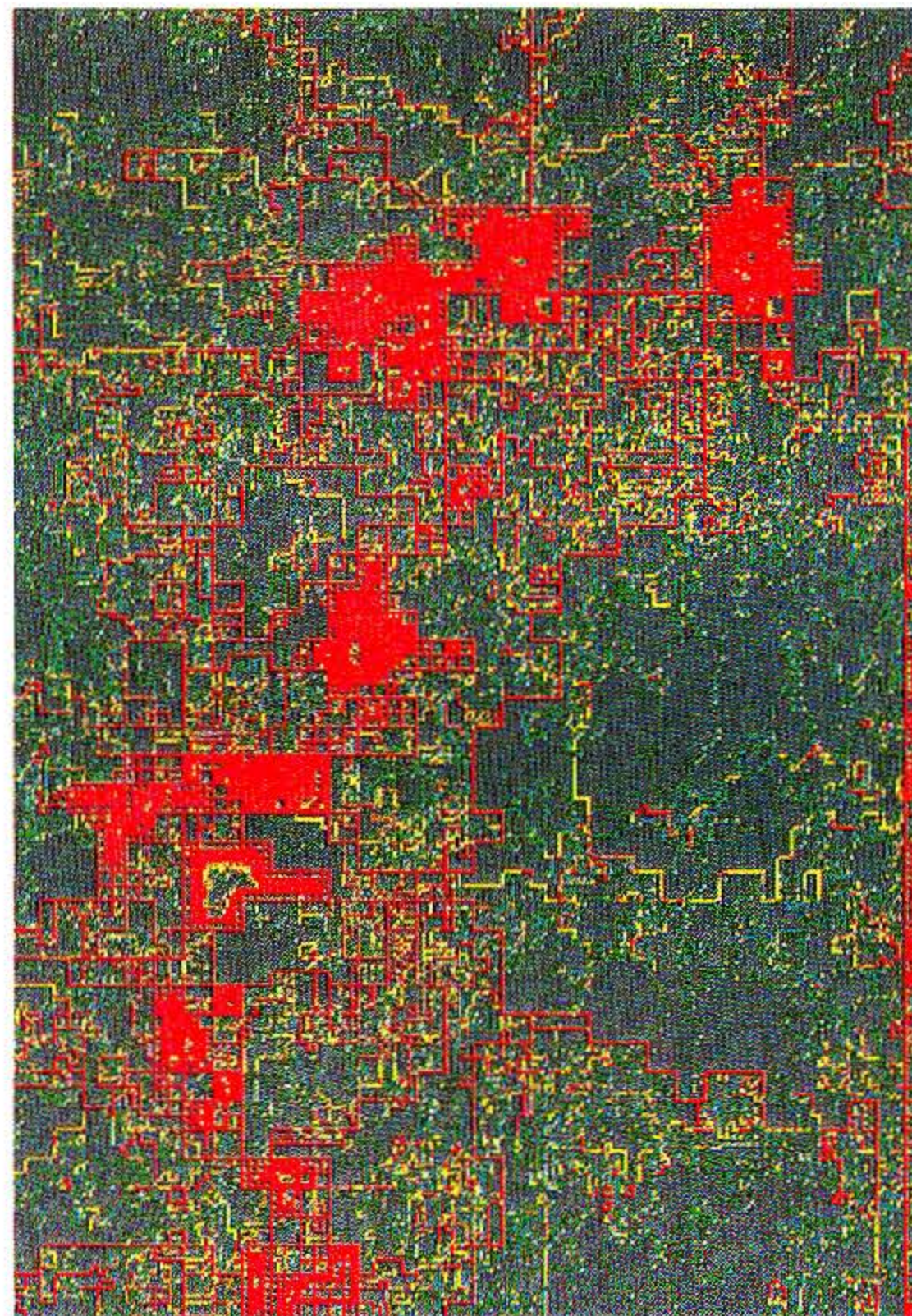


図 4.6 RADARSATスタンダードデータによるShear表示画像（青—緑—黄—赤の順に変形が強まることを示す）

Fig. 4.6 Shear of the sea-ice field shown in Fig. 3.4. Blue shows little shear while red much.

- Dynamic Time Warping : Two Methods for Tracking Ice floes in SAR Images. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 29, no. 6, 1004-1012. (1991)
- 6) Li S., Cheng Z. and Weeks W. F.:A Grid-based Algorithm for The Extraction Of Intermediate-Scale Sea-Ice Deformation Descriptors From SAR Ice Motion Products., Int. J. Remote Sensing, vol. 16, no. 17, 3267-3286. (1995)
- 7) Sun Y.: Automatic Ice Motion Retrieval From ERS-1 SAR Images Using the Optical Flow Method., Int. J. Remote Sensing, vol. 17, no. 11, 2059-2087. (1996)
- 8) Peddada S. D. and McDevitt R.: Least Average Residual Algorithm (LARA) for Tracking the Motion of Arctic Sea Ice. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 34, no. 4, 915-926. (1996)

(原稿受理 : 1998年 3 月31日)