

合成開口レーダの偏波比を用いた海洋波浪の空間分布の推定

Estimating spatial distribution of oceanic waves using polarimetric synthetic aperture radar

白戸伸亮¹・多田 毅²・大内和夫³

Nobuaki SHIROTO, Tsuyoshi TADA and Kazuo OUCHI

A new technique for estimating spatial distribution of oceanic waves using polarization ratio data of PALSAR synthetic aperture radar is presented. Polarization ratio of the backscattered power from the ocean surface at vertical to that at horizontal polarization (VV/HH) is closely correlated to the local incidence angle which reflects local water surface slope. At first linear relationship between incidence angle θ and polarization ratio P was derived from the trend of the entire target area. Then the pixels on the polarization ratio image correspond to the steepest slope points were selected with reference to the HH backscattered power image. The mean steepest slope of ocean surface was estimated from the selected pixels and the linear relation between θ and P . Finally, assuming sinusoidal waves, mean wave height was estimated from the steepest slope and mean wave length estimated from the HH image. This method was applied to each divided 3x3km subareas and spatial distribution of wave height was estimated.

1. はじめに

海洋波の特性を空間的に計測することは有用であり、リモートセンシングが適している。合成開口レーダ (SAR: Synthetic Aperture Radar) は航空機や衛星に搭載し、マイクロ波を使用して高分解能の2次元レーダ画像を生成する映像レーダである。マイクロ波を利用するので、天候に影響を受けず、夜間観測も可能である。アジマス方向 (衛星の進行方向) の高分解能はプラットフォームに搭載している小さな開口のアンテナを使ってアジマス方向に仮想の大きな開口を合成することにより達成される。レンジ方向 (パルス波の放射方向) の高分解能はパルス圧縮技術を適用させることにより実現している。現在までに、多くの実験・研究が重ねられ、合成開口技術は完成した技術である。すでに地球科学の様々な分野で SAR の利用が行われているが、実用的な活用はまだ発展段階である。

SAR 画像には海洋の波浪が明確に写っていることも多く、早くから SAR による波浪観測が試みられてきた。しかし、速度バンチング、流体力学的変調及びアジマス方向の非線形カットオフなどの非線形な効果の影響を受け、容易ではない。Hasselmannら (1991) がレーダ波の散乱モデルを用いて海面画像と波浪スペクトルの関係を論理的に導いて以来、これを用いて、拘束条件や人為的なフィルターを加えることにより逆解析により波浪推定を行う研究があり、日本近海の海域では Sunら (2009)

などがある。しかし、逆解析にあたり、その手法は非常に複雑で条件が限定され困難な場合が多い。

また、近年、多偏波を用いた衛星 PALSAR の打ち上げにより、ポラリメトリック解析が盛んに行われている。偏波とは、電波の性質を表す一つの指標であり、電界の振動方向の向きを表している。水平・垂直直線偏波 (H,V), $\pm 45^\circ$ 回転直線偏波、左回り・右回り円偏波 (L,R) が存在し、PALSAR は、H と V の偏波を切り替えて送受信を行えるため、HH, VV, HV, VH (一文字目が送信波、二文字目が受信波を表す) の 4 つの偏波データが観測できる。従来の SAR では単偏波で送受信を行うものがほとんどだったが、最新の衛星 TerraSAR-X, RADARSAT2 など多偏波 SAR を搭載している。多偏波観測の最大のメリットは、偏波特性を利用し、解析することにより、ターゲットの検出・抽出・分類などができることである。その原理は、電界の振動方向が反射面の向きやその傾きと密接に関連することから、複数の偏波の反射強度を組み合わせることでそれらの反射面の特性を抽出することができる。

そこで本研究は、同時観測された VV 偏波と HH 偏波の 2 枚の振幅強度画像から、偏波比 P (Polarization Ratio) を利用して波高の空間分布を推定することを目的とした。

2. 偏波比を用いた海洋観測

偏波比とは、観測対象に対する HH 偏波と VV 偏波の後方散乱断面積値 σ (NRCS: Normalized Radar Cross Section) の比率のことである。海面に対する単一偏波の NRCS は海上風の風速、風向、海面の傾斜、水粒子の速度や加速度等のさまざまな影響を受ける。一方、偏波比 P は、海面へのレーダ波の入射角を強く受け、それ以外の影響が

1 学生会員 学(工) 防衛大学校理工学研究科地球環境科学専攻
2 正会員 博(工) 防衛大学校准教授建設環境工学科
3 Ph.D 防衛大学校教授情報工学科

少ないことがこれまでの研究によりわかっている．例えばMoucheら（2004）は，偏波比と風速の間には相関がほとんどなく，風向はレンジ方向に対して向かい風のとき偏波比に影響を与えるが，風速が低くレーダ波の入射角が $0\sim 25^\circ$ 程度の低い場合はさらにその影響が少ないことを明らかにしている．一般に，海面における偏波比 P は海面に対するレーダ波の入射角の影響を最も強く受け，入射角が大きい（水平面に近い位置からの入射）ほど，その値も大きくなる．Thompsonら（1998）は，海面における入射角と偏波比の関係を式（1）で経験的に表している．

$$P = \frac{\sigma_{VV}}{\sigma_{HH}} = \frac{(1 + 2 \tan^2 \theta)^2}{(1 + \alpha \tan^2 \theta)^2} \dots\dots\dots (1)$$

ここで， θ は局所入射角であり， α はマイクロ波のバンド幅により異なるパラメータで0から2の値をとる． $\alpha=0$ のときはブラック散乱モデルとなり， $\alpha=2$ のとき，偏波比は入射角に依存しないキルヒホッフモデルとなる．Thompsonは，Cバンド，風速10m/sの条件下において $\alpha=0.6$ で良好な結果を得ている．なお，海面における入射角は海面の局所的な勾配によって変化するが，SARの合成開口時間内に海面が変位している関係から，レンジ方向成分の勾配のみの影響を受け，アジマス方向の勾配の影響は受けない．

したがって，この偏波比 P から海面に対するレーダ波の局所入射角を逆算してレンジ方向の海面勾配を求め，空間積分することによって，レンジ方向に進行する波浪の波高の推定が可能となることが期待される．この原理に基づき航空機SARで波高の推定を行った研究があるが（たとえばHeら，2006），航空機SARに比べ空間解像度が低く信号強度の低い衛星搭載のSARで得られた画像から偏波比を用いて波高を推定した事例はない．衛星での波高推定が可能となれば，より広域での波浪特性の理解が可能となる．

3. 使用データ

(1) 対象領域

本解析で対象としたSARデータは，2006年に日本で打ち上げられた観測衛星だいちに搭載されているPALSAR（Lバンド）で，観測モードはPLR，オフナディア角 21.5° ，観測時間2006年9月5日1時20分前後の伊豆半島東沖を観測した3シーンを使用した．（図-1）空間分解能はグランドレンジで $23 \times 5.5\text{m}$ である．観測時，台風0612号が太平洋沖合約1000kmに位置しており，全国港湾海洋波浪情報網（NOWPHAS）の波高計による記録により，下田で有義波高1.3m，波浮で3.2m，有義波周期

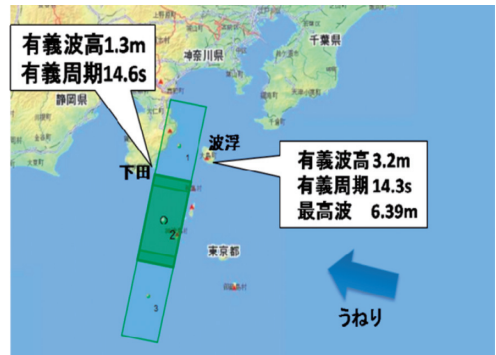


図-1 解析対象海域と波高計による波浪特性

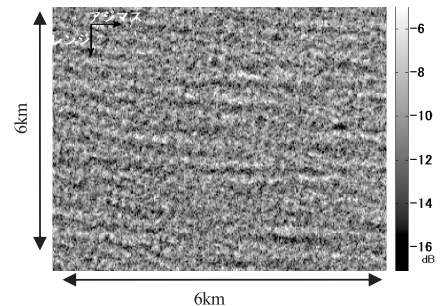


図-2 観測されたうねりのSAR画像（一部）

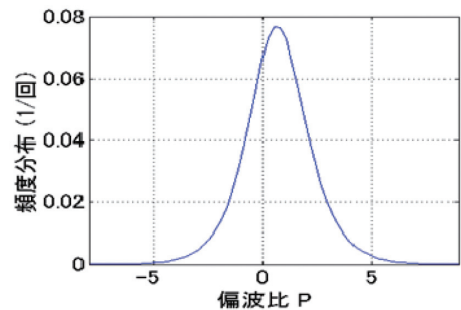


図-3 偏波比 P の頻度分布

は14sの波長の長いうねりが観測されている．SARによって観測された海面画像の一部を図-2に示す．図の明暗は1ピクセルごとにNRSCの大きさをdBで表しており，レンジ方向にうねりが観測されているのが確認できる．なお，このうねりは西湘などで定置網固定具の損傷，海岸ゴミの入網，防波堤手摺の脱落などの大きな影響を及ぼした．また，同SARで観測された沖縄の近海（台風下で波長の短い風波が一部確認できる海面画像）も，解析の比較対象として用いた．

SARデータはVV画像，HH画像いずれも宇宙航空研究開発機構（JAXA）によってプロセッサ処理されたいわゆるLevel 1.1データを使用した．なお，島田ら（2007）により偏波校正は適切に行われており，SARレーダ機器本体の観測による誤差やプロセッサ処理による誤差は十

分少ないと考えてよい。

(2) スペックルノイズ除去

SAR 画像にはスペックルノイズというコヒーレンス系特有のゆらぎが存在しており、ノイズ低減は必要不可欠な処理である。画像全体の P の頻度分布を図-3 に示すが、NRCS と同様に P も統計的に一様に存在していることがわかる。偏波特性を用いた解析には Lee ら (1999) による Lee フィルターが有用であると言われているが、他にもメディアンフィルターや移動平均処理、スペクトル領域における処理などのさまざまなノイズ低減方法が研究されている。しかし、いずれの処理法も一長一短であり、決定的な方法は存在しない。本解析では、偏波比 P の絶対値が変化しないことが重要であり、アジマス方向とレンジ方向で 1 ピクセルあたりの空間解像度を合わせる目的もあわせて、アジマス方向に 6~7 ピクセルの単純平均化処理を行い、スペックルノイズの除去とアジマス方向とレンジ方向の解像度の均一化を行った。

(3) 偏波比と局所入射角の関係

本データは偏波比と入射角との関係について未確認である。そこでまず、式 (1) などの既往の関係式が適用できるか確認した。ある 1 枚の画像上において、衛星からのスラントレンジ距離 (レンジ方向の座標に対応する) によって局所入射角 θ は変化し、その角度は衛星軌道情報とオフナディア角などから求めることができる。そこで、対象解析シーンと沖縄付近の台風時の海洋を観測したシーンの局所入射角 θ を横軸に、偏波比 P を縦軸にプロットしたものを図-4 に示す。この結果からわかるように、海域によって異なる傾向が表れ、Thompson 式 (1) を適用することはできない。また、Elfouhaily (1996) や Vachon ら (2000) も P と θ の経験的な関係式を提案しているが、いずれも適用することはできなかった。そこで、本研究では、解析対象シーンにおいては局所入射角と偏波比が一定の比例関係で近似できるとみなし、対象シーンの P と θ の関係を直線近似して以下の式 (2) を得た。

$$P = 22.142 \times \theta - 8.5439 \quad \dots\dots\dots (2)$$

図-5 の通り、概ね近似できていることを確認した。

4. 解析方法

原理上は、1 ピクセル毎に偏波比を求めた画像を作成し、偏波比画像から水面勾配の空間分布を求め、それを空間積分することで水位分布を求めることができる。しかし、スペックルノイズの存在などの様々な変動が SAR 画像には含まれており、偏波比を直接水面勾配の空間分布に対応させるほどの十分な精度は得られなかった。そこで、比較的誤差の影響が少ないと考えられる最も入射角が小さな場所 (面の法線が衛星の方を向いている場所) の情報、すなわちレンジ方向に進行するうねりのゼロクロス点での水面の傾き情報を統計的に抽出し、うねりを正弦波で近似することによって波高を推定することとした。本解析で行った波高の推定方法を図-6 に示す。

まず、図-7 に示すように、NRCS の極大地点が水位のゼロクロス点で傾き最大となり、偏波比 P は最少となる。

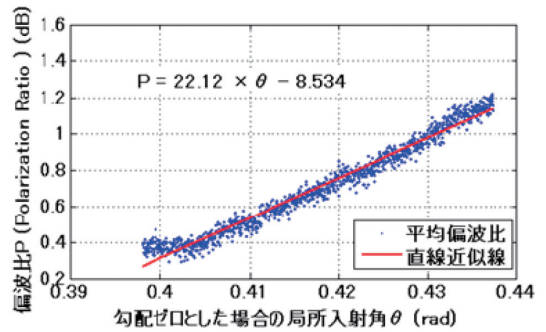


図-5 対象シーンの局所入射角と偏波比の関係

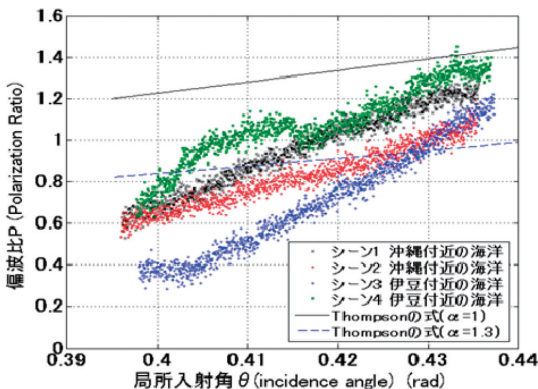


図-4 海面における局所入射角と偏波比の関係

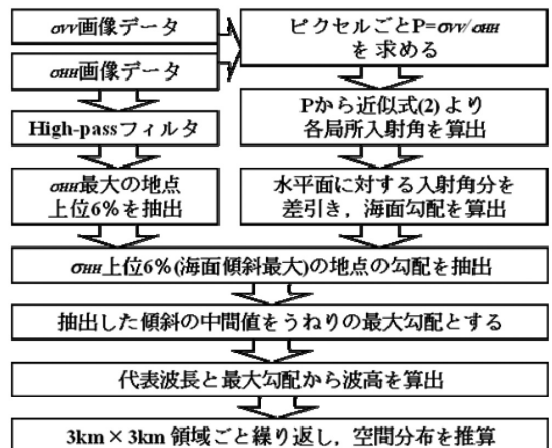


図-6 波高の空間分布推定手順

これは式 (1) から σ_{VV} よりも σ_{HH} のほうがその特性は顕著に表れることが予想される．そこで、海域での水平偏波 σ_{HH} の値を横軸に、同地点の偏波比 P を縦軸にとったものを図-8示す．一見ばらつきが大きいように見られるが、偏波比は図-3の通り統計的に一様に存在しており、中間値で近似して差し支えない．また、NRCEの高い地点の偏波比 P は、ノイズの影響が相対的に減りばらつきが小さくなるので σ_{HH} の大きい地点の海面の傾きを求めることとした．また、対応する画素を抽出する際、代表波長が約400mに対して1ピクセルの幅が約24mであることから、画像全体の中から σ_{HH} の値の大きな方から $24/400=6\%$ の画素を抽出し、最大勾配のゼロクロス点に対応するとして解析を行った．

なお、レンジバッチング（観測地点が高さを持つことにより、画像に変調を起こす現象）の影響は、Ouchi (1988) に従い、変調の程度を確認したが、マイクロ波の波長が長く、波の波長に比して波高がそれほど高くないことからほぼ無視できることを確認した．

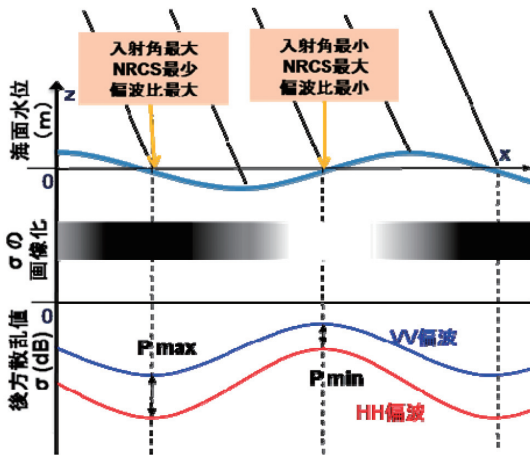


図-7 海面形状と偏波ごとのNRCSおよび偏波比 P の値と位置関係（レーダ波が左上方向から送受信された場合、最大勾配の位置が各 σ 値最大で偏波比 P は最少）

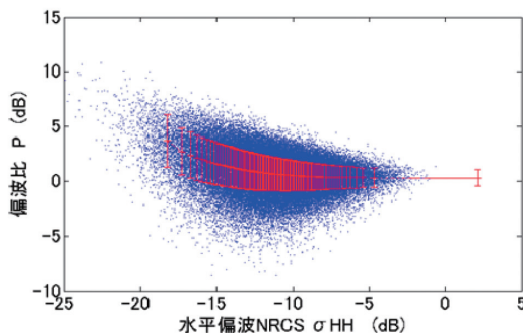


図-8 偏波比 P と σ_{HH} の関係（赤線は平均値と $\pm 1\sigma$ ）

5. 解析結果

水平偏波 σ_{HH} 画像に対し、 $3\text{km} \times 3\text{km}$ で計算領域を切り出し、スペクトル解析を行い代表波長と代表波向を求めた．スペクトルのピーク値を代表周波数として波長を求めた．図-9に算出された波長と波向の頻度分布を示す．400mを中心とした波長の分布が得られている．また、求められた波向により、 ± 20 度の範囲でレンジ方向に進行する領域のみ解析を行った．

推定された波高の頻度分布を図-10に示す．85%以上は0.5～2mの範囲に波高が算出されており、観測場所は異なるが波高計の有義波高と一致する．

次に、得られた波浪を空間的に平均化し、推定された波高の空間分布を図-11に示す．比較のため、図-12に対象海域の水深を示す．黒枠が対象領域を示す．推定された波高分布との間に明確な関連性は確認できなかった．深海領域であったため、波高の分布は水深の影響ではなく、波の干渉などの影響ではないかと推定される．また、本解析では偏波比の絶対値を可能な限り正確に保存するために、偏波比画像には低周波を取り除くハイパスフィルタを適用していない．そのため、緩やかな海面変位が生じていると、その影響は波高の変化として算出されてしまう．すなわち、波高の分布と海面上昇の分布を厳密に区別することができない．今後は、それらの分離方法を検討する予定である．

6. おわりに

本論文では、観測衛星だいちに搭載されたPALSAR

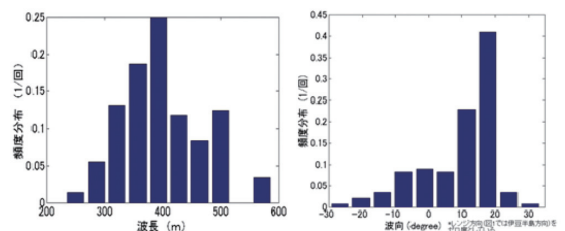


図-9 推定された波長（左）・波向（右）の頻度分布

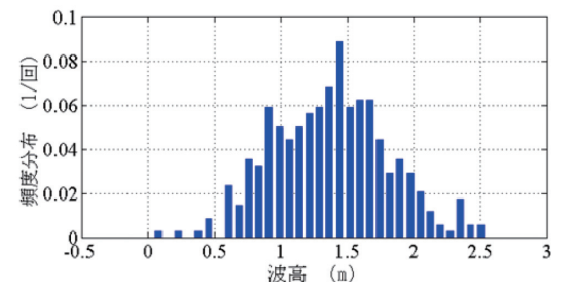


図-10 推定された波高の頻度分布

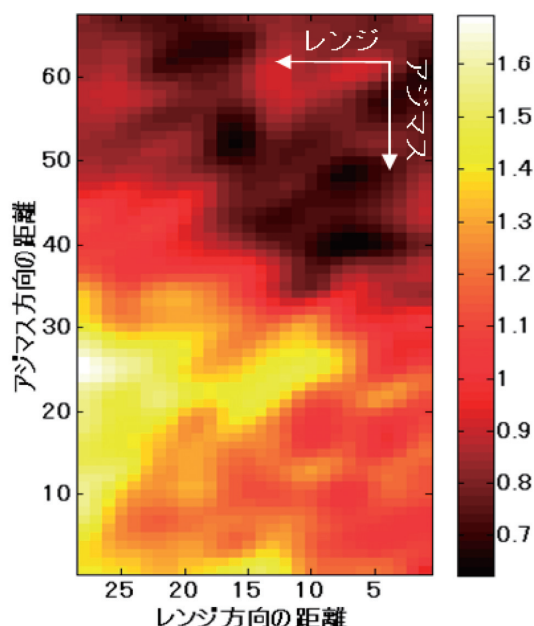


図-11 推定される波高の空間分布

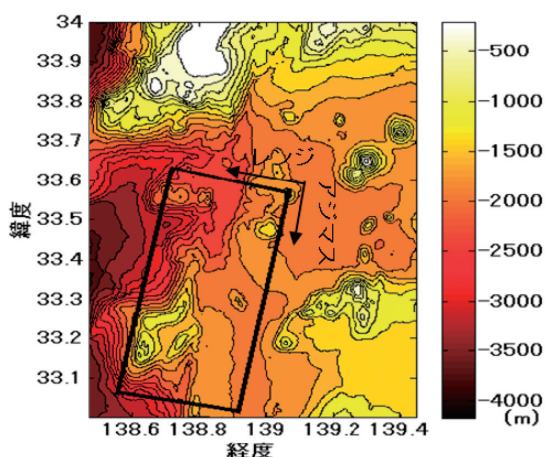


図-12 対象領域の水深分布

を反映していることがわかった。

- (2) 比較的ノイズの影響の少ないと考えられる最大勾配地点の偏波比を、水平偏波の後方散乱断面積を用いて抽出し、波形を正弦波近似することによってうねりの波高推定を行った。周辺の波高計と比較しても良好な結果が得られた。
- (3) 他の海域においても同様の解析で波高推定を試みて波高は良好な結果が得られてはいるが、まだ精度の検証が不十分であり、平均海面の変動との分離と合わせて、今後の課題としたい。

参考文献

- 島田政信, 渡辺 学, 森山敏文, 田殿武雄, 南澤 舞, 樋口理子 (2007): PALSAR のラジオメトリック校正及び幾何学校正, J. remote sensing society of Japan, vol. 27, No.4 pp.308-328
- 国土交通省港湾局全国港湾海洋波浪情報網 (ナウファス): 波浪データ 2007 年 (オンライン), <http://www.pari.go.jp/bsh/ky-skb/ks-joy/kaisy/dat/sub300.htm>
- Elfouhaily, T. M. (1996): A consistent wind and wave model and its application to microwave remote sensing of the ocean surface, University Paris. 232 p.
- Hasselmann, K. and S. Hasselmann (1991): On the nonlinear mapping of an ocean wave spectrum into a synthetic aperture radar image spectrum and its inversion, J. Geophysical. Res., vol. 96, No. c6 10, 713-10, 729.
- He, Y., H. Shen and W. Perrie (2006): Remote Sensing of Ocean Waves by Polarimetric SAR, J. Atmospheric and Oceanic Technology, Vol.23, No.12, pp.1768-1773.
- Lee, J.S., M. R. Grunes, D. L. Schuler, E. and G.. De Grandi (1999): Polarimetric SAR speckle filtering and its implication for classification, IEEE Trans. Geosciences and remote sensing., vol.37, No.5, pp.2363-2373
- Mouche, A., D. Hauser., V. Kudryavtsev and J-F. Daloze (2004): Multi-polarization ocean radar cross section from ENVISAT ASTR observations, airborne polarimetric radar measurements and empirical or semi-empirical models., Proc. of the 2004 Envisat & ERSsymposium, CD-rom., #373.1
- Ouchi, K. (1988): Synthetic aperture radar imagery of range traveling ocean waves, IEEE Trans. Geosciences and remote sensing., Vol.26, No.1, pp.30-37,
- Sun, J and H. Kawamura (2009): Retrieval of surface wave parameter from SAR images and their validation in the coastal seas around Japan., Journal of oceanography, vol.65 pp.567-577
- Thompson, D., T. Elfouhaily and B. Chapron (1998): Polarization ratio for microwave backscattering from the ocean surface at low to moderate incidence angles, IEEE international geosciences and remote sensing symposium proceedings III, pp.1671-1673
- Vachon, P. W. and F. W. Dobson (2000): Wind retrieval from RADARSAT SAR image selection of a suitable C-band HH polarization wind retrieval model, can. J. remote sensing, vol. 26, No.4, pp.306-313

(Lバンド) のSAR画像から得られた偏波比画像を用いることによって、レンジ方向に一樣なうねりの波高を推定する手法を提案し、波浪特性の空間分布の推定を試みた。以下に本研究の主要な結論をまとめる。

- (1) 海洋におけるPALSARの偏波比画像は、ノイズの影響を極めて強く受けているが、統計的には海面の状態