

ERS 1-SAR 画像の波数スペクトルの比較による線形および準線形理論の適用性に関する研究

泉 宮 尊 司*・居 場 博 之**

1. 緒 言

近年, リモートセンシングによる海洋波浪の観測が盛んに行われており, マイクロ波高度計を用いた波高計測は実用化されている。しかしながら, 波浪情報としては有義波高のみでは不十分であり, より高度な情報を得るには波数スペクトルの情報が不可欠である。この波数スペクトルにより, 有義波高はもとより主波向や方向集中度も算定でき, また波浪推算の検証データにもなり得る。

衛星リモートセンシングのデータの中で, 波数スペクトルを推定できる可能性のあるものとして, 合成開口レーダ (SAR) の海面画像データが挙げられる。SAR に用いられる電波は, C バンドおよび L バンドのマイクロ波が多く, その電波の波長は 5 cm から 30 cm 程度であり, 波浪の波長と比べて極めて短い波長である。したがって, SAR による波浪計測は直接的に有義波程度の波を測定しているのではなく, 表面張力波あるいは極めて短波長の成分波の Bragg 共鳴等を通して, 間接的に波浪を計測していることになる。このことにより SAR の映像メカニズムには, 流体力学変調のように未だ明確に分かっていない変調があるとされている (古濱ら, 1993)。

そこで本研究では, SAR の海面画像データから波浪の波数スペクトルを逆推定する第 1 段階として, SAR 画像の波数スペクトルとこれまでに提案されている線形および準線形理論 (Hasselmann *et al.*, 1991) によって推定された波数スペクトルを比較することにより, SAR 画像の映像メカニズムを検証するとともに, 逆解析を行う際の問題点を探ることを研究の目的とする。

2. SAR 画像の波数スペクトルの推定

2.1 各種変調伝達関数

海表面のように不規則的に運動している物質にマイクロ波が照射されると, その運動や傾きによって SAR 画像にゆがみや分解能の劣化が生じることが知られている (古濱ら, 1993)。Alpers *et al.* (1981) によると, それらは傾き変調効果, 流体力学的変調および速度パンチン

グ変調の 3 つに分類されている。これらの変調効果が近似的に独立でアジマス方向の軌道流速が十分に小さいものとする, SAR 画像の変調伝達関数 $T^s(k)$ は, それぞれの変調伝達関数の和として表される (Hasselmann *et al.*, 1991)。

$$T^s(k) = T^i(k) + T^h(k) + T^{vb}(k) \dots\dots\dots (1)$$

ここに, $T^i(k)$ は傾き変調伝達関数, $T^h(k)$ は流体力学変調関数, $T^{vb}(k)$ は速度パンチング変調伝達関数である。傾き変調伝達関数 $T^i(k)$ は, 波浪の高波数のスペクトルが k^{-4} に比例する場合, 次式で与えられる。

$$T^i(k) = 4ik_l \cot \theta (1 + \sin^2 \theta)^{-1} \dots\dots\dots (2)$$

ここに, θ はレーダの入射角, k_l はレーダの視線方向の入射波数成分を表す。上式は, 垂直偏波 (VV) に対する傾き変調伝達関数である。

流体力学変調関数 $T^h(k)$ については, 未だ不明な点が多いが, 次の関係式が提案されている。

$$T^h(k) = \frac{\omega - i\mu}{\omega^2 + \mu^2} 4.5k\omega \left(\frac{k_y^2}{k^2} + Y_r + iY_i \right) \dots\dots (3)$$

ここに, x 方向はアジマス方向で, k_y はレンジ方向の波数, $\omega = 2\pi f$ は角周波数, μ は減衰係数, Y_r および Y_i は長周期波の存在による風の変化に伴う短波長波の変調を示す係数である。本研究では, Y_r および Y_i については明確な値が分からないので 0 とし, μ の値については 0 s^{-1} および 0.5 s^{-1} として計算することにした。

速度パンチング変調伝達関数 $T^{vb}(k)$ は, 長周期波の軌道流速が小さく, 線形近似が成立する場合には次式で表される (Alpers *et al.*, 1981)。

$$T^{vb}(k) = -\beta k_x \omega \left(\cos \theta - i \sin \theta \frac{k_l}{k} \right) \dots\dots\dots (4)$$

ここに, $\beta = R/V$ はプラットホームから観測地点までの距離 R と衛星の速度 V との比である。

2.2 線形および準線形理論による SAR 画像の波数スペクトル

線形理論による SAR 画像の波数スペクトル $\Psi(k)$ は, 式 (1) の SAR 画像の変調伝達関数 $T^s(k)$ と波浪の波数スペクトル $F(k)$ を用いて次式で表される。

$$\Psi(k) = \{|T^s(k)|^2 F(k) + |T^s(-k)|^2 F(-k)\} / 2 \dots\dots\dots (5)$$

* 正会員 工博 新潟大学教授 工学部建設学科
** 新潟大学大学院自然科学研究科

このような線形理論は, Alpers *et al.* (1981) によると波浪がレンジ方向に近い方向に伝搬している場合に成立することが理論的に示されている。しかしながら, 一般の場合には波浪の伝搬方向とレンジ方向とが一致することは希であり, また波形勾配の大きい風波性の波浪では, SAR の画像に非線形的に写像されることが知られている。

Hasselmann *et al.* (1991) は, SAR と RAR の非線形写像関係を用い, 波浪場が Gauss 過程に従うとの仮定により, SAR 画像の波数スペクトルと波浪のスペクトルとの非線形関係式を導いている。その関係式は, 波浪の波数スペクトルに關係する量を 2 次元フーリエ変換したものの積をさらに 2 次元逆フーリエ変換するといった複雑な関係式であるために, Hasselmann *et al.* (1991) は指数関数内の非線形項を Taylor 展開して, 次式のような関係式を得ている。

$$\Psi(\mathbf{k}) = \exp(-k_x^2 \xi^2) \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=2n-2}^{2n} (k_x \beta)^2 \psi_{nm}(\mathbf{k}) \quad \cdots (6)$$

ここに, ξ^2 は散乱要素のアジマス方向の変位の 2 乗平均値であり, 次式で与えられる。

$$\xi^2 = \beta^2 \int |T^v(\mathbf{k})|^2 F(\mathbf{k}) d\mathbf{k} \quad \cdots (7)$$

ここに, $T^v(\mathbf{k})$ は

$$T^v(\mathbf{k}) = -\omega \left(\sin \theta \frac{k_l}{k} + i \cos \theta \right) \quad \cdots (8)$$

である。式 (6) の n は非線形性のオーダーを表すパラメータで, m は速度パンチングのパラメータ β に関するオーダーを表す指標である。 $\psi_{nm}(\mathbf{k})$ は, RAR 画像の自己相関関数と RAR 画像と軌道流速との相互相関関数で表される関数である。ここで, m に関して総和をとった関数を

$$\Psi_n(\mathbf{k}) = \sum_{m=2n-2}^{2n} (k_x \beta)^2 \psi_{nm}(\mathbf{k}) \quad \cdots (9)$$

とすると, 式 (6) は

$$\Psi(\mathbf{k}) = \exp(-k_x^2 \xi^2) \sum_{n=1}^{\infty} \Psi_n(\mathbf{k}) \quad \cdots (10)$$

となる。上式において, 第 1 次の項まで取ったものが準線形近似 (quasi-linear approximation) と呼ばれるもので, 次式で表される。

$$\Psi_q(\mathbf{k}) = \exp(-k_x^2 \xi^2) \Psi_1(\mathbf{k}) \quad \cdots (11)$$

ここに, $\Psi_1(\mathbf{k})$ は線形理論による SAR 画像の波数スペクトルで, 式 (5) により評価することができる。

この準線形近似理論により, アジマス方向の波数のカットオフ特性がおおよそ近似でき, また高次の Ψ_n は波浪のピーク波数周辺には余り影響を及ぼさない (Hasselmann *et al.*, 1991)。このため本研究では, 式 (5) および式 (10) の関係を用いて SAR 画像の波数スペクトルを推定することにした。

2.3 波浪の波数スペクトルの設定

波浪の波数スペクトルの設定には, わが国でよく用いられている Bretschneider・光易型周波数スペクトル $S(f)$ および光易型方向分布関数 $G(\theta, f)$ を用いて算定した。

$$S(f) = 0.257 H_{1/3}^2 T_{1/3}^4 f^{-5} \exp[-1.03(T_{1/3} f)^{-4}] \quad \cdots (12)$$

$$G(\theta, f) = G_0 \cos^{2S} \left(\frac{\theta - \theta_0}{2} \right) \quad \cdots (13)$$

ここに, $H_{1/3}$ は有義波高, $T_{1/3}$ は有義波周期, f は周波数, θ は波角, θ_0 は主波向, S は方向集中度を表すパラメータ, G_0 は式 (13) の積分値を 1 とするための定数である。

波浪が深海波の場合には, 波数スペクトル $F(k_x, k_y)$ と方向スペクトル $S(f, \theta) = S(f) \cdot G(\theta, f)$ との間には,

$$F(k_x, k_y) = \frac{g^2}{2^5 \pi^4 f^3} S(f, \theta) \quad \cdots (14)$$

なる関係があるために, 波数スペクトル $F(k_x, k_y)$ は次式で与えられる。

$$F(k_x, k_y) = \frac{0.257 \cdot 8 \pi^4 H_{1/3}^2}{g^2 T_{1/3}^4 k^4} \exp \left\{ -1.03 \frac{4^2 \pi^4}{g^2 k^2 T_{1/3}^4} \right\} \cdot G_0 \cos^{2S} \left(\frac{\theta - \theta_0}{2} \right) \quad \cdots (15)$$

この関係式より, 波数スペクトルは有義波高 $H_{1/3}$, 有義波周期 $T_{1/3}$, 方向集中度パラメータ S_{\max} , および主波向 θ_0 の 4 つのパラメータが与えられると算定することができる。

本研究では, SAR 画像の映像メカニズムを検証するために, 有義波高および有義波周期については運輸省港湾局 (1992) で観測された値を, 主波向については SAR 画像およびその波数スペクトルを参考にして決定した。また, 方向集中度パラメータ S_{\max} については, 天気図を参考に 3 から 4 種類設定して, 波浪の波数スペクトル $F(k_x, k_y)$ を算定した。

3. SAR 画像の波数スペクトルの比較と考察

図-1 は, 1991 年 9 月 8 日に ERS 1-SAR によって得られた御前崎沖の 6.4 km × 6.4 km 四方の海面画像である。当日, 御前崎の南約 500 km には台風 15 号があり, その影響を受けてややうねり性の波浪が押し寄せている状況にあった (飯坂監修, 1998)。このため, SAR 画像にも波のイメージがかなりはっきりと写っている。御前崎の波浪観測所では, AMI シーン観測時間から推定すると, 有義波高 2.98 m, 有義波周期 11.58 s であった。

式 (15) を用いて波浪の波数スペクトルを推定するには, 有義波高および有義波周期の他に, 卓越波向 θ_0 と方向集中度パラメータ S_{\max} の値が必要である。卓越波向については, 図-1 の SAR 画像およびその波数スペクトルのピーク位置より, アジマス方向を x 軸にとると, $\theta_0 = 225^\circ$

なる値が得られた。この値は、児島ら (1997) が得た値と少し異なるが、これは採用した画像の位置が多少異なること、および本研究で計算した波数スペクトルは、約 26 万個のデータを用いたことに拠っていると考えられる。 S_{max} については、ややうねり性の波浪であることから、 $S_{max}=20, 30, 40, 50$ と設定し、線形および準線形理論によって、SAR 画像の波数スペクトルを算定している。

図-2 および図-3 は、それぞれ線形理論および準線形理論 (減衰係数 $\mu=0$) によって、SAR 画像の波数スペクトルを推定したものである。図-3 の実曲線は、準線形理論によって得られたエネルギー密度の等 dB 線を表し、濃淡は実測の SAR データの波数スペクトルの大きさを表しており、白い部分ほどエネルギーレベルが高いことを示している。線形理論による SAR 画像の波数スペクトルは、アジマス方向の波数 $k_x=0.1$ あたりにも大きなエネルギーが存在しているが、実測の SAR 画像の波数スペクトルではエネルギーは小さく、むしろレンジ方向 (k_y の方向) にエネルギーの高い部分が広がっており、準線形理論によって推定されたスペクトルにかなり類似していることが分かる。

方向分布関数の S_{max} の値を上述の 4 種類設定し、SAR

画像の波数スペクトルに最も近い値を示すものは、 $S_{max}=30$ であった。図-4 に、その時の波浪の波数スペクトルを示している。この図と図-3 の SAR 画像の波数スペクトルを比較すると、後者ではアジマス方向 (k_x 軸の方向) のエネルギーの減衰が大きく、式 (10) の指数関数の効果が大きいことが分かる。

図-5 から図-7 は、それぞれいわき沖の海面の SAR 画像、線形理論による SAR 画像の波数スペクトル、準線形理論および測定された SAR 画像の波数スペクトルを示している。海面の SAR 画像では、御前崎沖と同様にうねり性の波浪のイメージが現れているが、縞模様のピッチが粗く波長がより長いことが推定できる。観測日は 1993 年 3 月 9 日で、シーン観測時の波浪は、いわき沖の観測データによると、有義波高 $H_{1/3}=5.24$ m, 有義波周期 $T_{1/3}=12.73$ s であった。 S_{max} の値に関しては、 $S_{max}=20, 30, 40, 50$ として計算し、これらの図には SAR 画像の波数スペクトルが最も近いと思われる $S_{max}=40$ の結果を示している。

図-6 の線形理論による SAR 画像の波数スペクトルは、波数軸 k_x に沿うようにエネルギーの高い部分が存在するが、観測された SAR 画像の波数スペクトルは、図-7 に見られるように、アジマス方向のカットオフ効

御前崎沖 1991年9月8日
Sample 5000~5511: Line 2000~2511

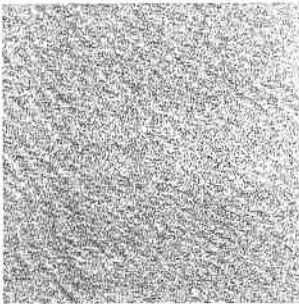


図-1 御前崎沖の ERS 1-SAR 画像

御前崎沖 $\Psi_q(k_x, k_y)$ 1991年9月8日
Sample 5000~5511: Line 2000~2511

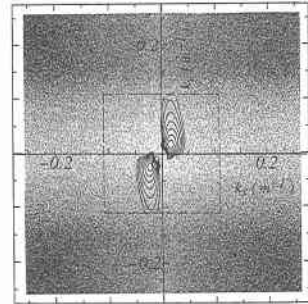


図-3 準線形理論および観測された SAR 画像の波数スペクトル (御前崎沖)

御前崎沖 $\Psi(k_x, k_y)$
 $H_{1/3}=2.98\text{m}, T_{1/3}=11.58\text{s}, S_{max}=30, \theta_0=225^\circ$

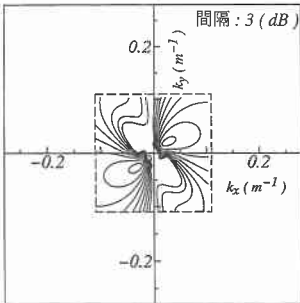


図-2 線形理論による SAR 画像の波数スペクトル (御前崎沖)

御前崎沖 $F(k_x, k_y)$
 $H_{1/3}=2.98\text{m}, T_{1/3}=11.58\text{s}, S_{max}=30, \theta_0=225^\circ$

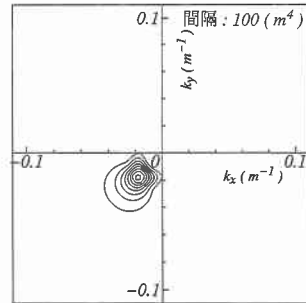


図-4 推定された波浪の波数スペクトル (御前崎沖)

いわき沖 1993年3月9日
Sample 3000~3512 : Line 3000~3512



図-5 いわき沖の ERS 1-SAR 画像

いわき沖 $\Psi(k_x, k_y)$
 $H_{1/3}=5.24\text{m}, T_{1/3}=12.73\text{s}, S_{\text{max}}=40, \theta_0=315^\circ$

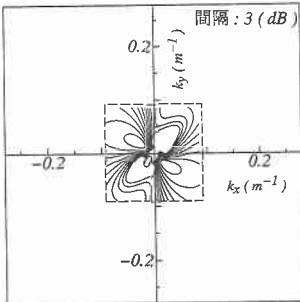


図-6 線形理論による SAR 画像の波数スペクトル(いわき沖)

いわき沖 $\Psi_q(k_x, k_y)$ 1993年3月9日
Sample 3000~3512 : Line 3000~3512

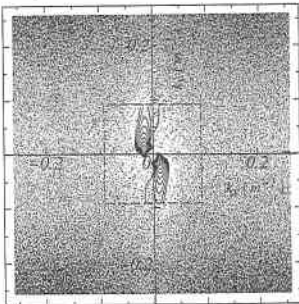


図-7 準線形理論および観測された SAR 画像の波数スペクトル(いわき沖)

果が大きく、児島ら(1998)が用いた線形理論では説明できない結果となっている。これは、いわき沖のデータの方が御前崎沖のデータよりも波浪のエネルギーがかなり大きく、式(10)の指数部のアーギュメントの絶対値がより大きくなるため、カットオフ効果が強く現れた結果であると考えられる。したがって、SAR 画像の波数スペクトルから波浪の波数スペクトルを逆推定するには、少なくとも準線形理論を用いる必要があると考えられる。図-8には、推定された波浪の波数スペクトルを示して

いわき沖 $F(k_x, k_y)$
 $H_{1/3}=5.24\text{m}, T_{1/3}=12.73\text{s}, S_{\text{max}}=40, \theta_0=315^\circ$

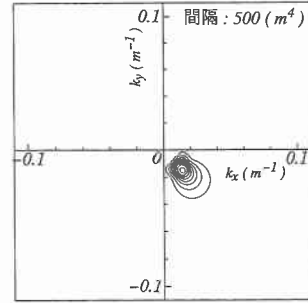


図-8 推定された波浪の波数スペクトル(いわき沖)

新潟沖 1996年1月10日
Sample 4500-5011 : Line 2000-2511

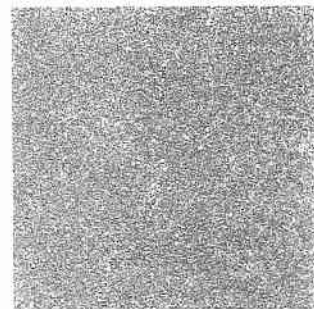


図-9 新潟沖の ERS 1-SAR 画像

いる。エネルギーが大きいため、図-4とは異なり500 m^4 間隔で等値線を描いている。

図-9は、1996年1月10日に観測された新潟沖の海面の SAR 画像である。観測時の有義波高は $H_{1/3}=4.61\text{m}$ 、有義波周期は $T_{1/3}=10.8\text{s}$ である。これまでの SAR 画像とは異なり、有義波高が大きいかにも拘らず波浪の縞模様は殆ど見られない。これは、波形勾配の大きい風波性の波浪であるために、バンチング効果が大きく、SAR 画像面に多面的に写像されたためと考えられる。

新潟沖のデータの場合、風波性の波浪であるので、 S_{max} の値を $S_{\text{max}}=5, 10, 15, 20$ として波数スペクトルを計算した。図-10から図-13は、それぞれ ($S_{\text{max}}=5, \mu=0.0$)、($S_{\text{max}}=5, \mu=0.5$)、($S_{\text{max}}=10, \mu=0.0$) および ($S_{\text{max}}=10, \mu=0.5$) とした場合の SAR 画像の波数スペクトルを示したものである。これらの図より、減衰係数 μ の効果は、波浪の卓越波向側の SAR 画像のピークを高め、逆に 90° 側の波数スペクトルの値をやや小さくする効果があることが認められる。4種類の S_{max} の内、観測データの波数スペクトルに近いと思われるものは、 $S_{\text{max}}=5$ であったが、 μ の最適な値については捜すことができなかったため、図-11には $\mu=0.5$ の結果と観測データとを比較している。

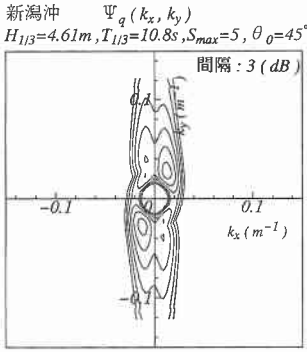


図-10 準線形理論による SAR 画像の波数スペクトル ($S_{max}=5, \mu=0.0$)

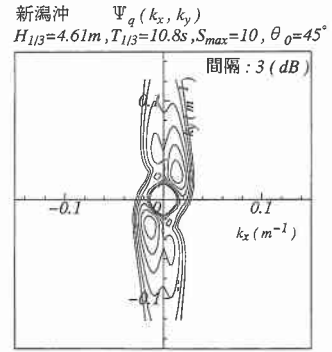


図-12 準線形理論による SAR 画像の波数スペクトル ($S_{max}=10, \mu=0.0$)

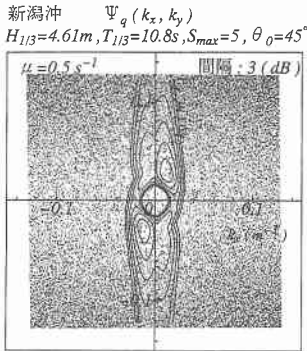


図-11 準線形理論による SAR 画像の波数スペクトル ($S_{max}=5, \mu=0.5$)

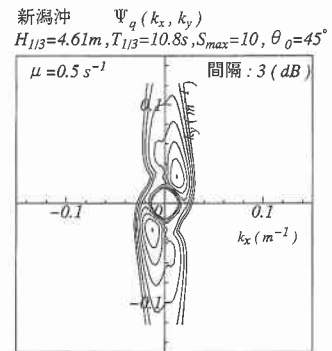


図-13 準線形理論による SAR 画像の波数スペクトル ($S_{max}=10, \mu=0.5$)

4. 結 論

観測された ERS 1-SAR のデータを用いてその波数スペクトルを算定し、線形理論および Hasselmann *et al.* (1991) の準線形理論による波数スペクトルを比較することによって以下の事柄が明らかとなった。

(1) 観測された SAR 画像の波数スペクトルは、アジマス方向のカットオフ効果が大きく、線形理論ではこの効果が無視されているので、一般的には適用はできないと判断された。特に、卓越波向がアジマス方向に近い場合にはその誤差が大きいと考えられる。

(2) Hasselmann らによって提案された準線形理論によると、観測された SAR 画像の波数スペクトルと比較的よく一致し、波浪の波数スペクトルの逆解析には少なくとも準線形理論を用いる必要がある。

(3) 方向集中度の低い風波性の波浪が生じている海面の SAR 画像には、種々の非線形写像作用によって、波高が大きくても海面波浪が明確の認識できない場合があることが認められた。また、流体力学的変調関数に含まれる減衰係数 μ は、波浪の卓越波向側の波数スペクトル値を大きくする効果があることが分かった。

最後に、ERS 1-SAR のデータ (© ESA) は宇宙開発事業団より提供されたものであり、データ検索および提供に際して (財) リモートセンシング技術センターにお世話になったことを付記し、感謝いたします。

参 考 文 献

飯坂譲二監修 (1998): 合成開口レーダ画像ハンドブック, 日本写真測量学会編, 朝倉書店, pp. 208.
 運輸省港湾局監修 (1992, 1994, 1997): 全国港湾海洋波浪観測資料, NOWPHAS, (財) 沿岸開発技術研究センター, pp. 912.
 児島正一郎・沢本正樹 (1998): EERS 1-SAR 画像を用いた海洋波浪観測の一例, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 1256-1260.
 児島正一郎・李 天俊・沢本正樹 (1997): ERS 1-SAR を用いた御前崎周辺海域のうねりの解析, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 1286-1290.
 古濱洋治・岡本謙一・増子治信 (1993): 人工衛星によるマイクロ波リモートセンシング, 電子情報通信学会, p. 275.
 Alpers, W., D. B. Ross, and C. L. Rufenach (1981): On the detectability of ocean surface waves by real and synthetic aperture radar, *J. of Geophys. Res.*, Vol. 86, pp. 6481-6498.
 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. of Geophys. Res.*, Vol. 96, No. C6, pp. 10713-10729.