

合成開口レーダによる海洋波浪の 2 次元波数スペクトルの 逆推定に関する研究

泉 宮 尊 司*・居 場 博 之**

1. 緒 言

合成開口レーダ (SAR) による海面画像のデータから波浪の 2 次元波数スペクトルを推定できれば、天候に余り左右されることがなく、広範囲の高度な波浪情報が得られるので大きな進歩となる。これまで Hasselmann ら (1991) のグループの研究により、SAR の海面画像と波浪の波数スペクトルとの理論的な関係はほぼ明かにされているが、センサーの応答特性や、スペックルノイズやその他のノイズが含まれる場合の逆解の存在を詳しく調べた研究は殆ど存在しない。泉宮・居場 (2000) は、準線形理論に基づいた逆解析解の存在と特性を数値シミュレーションにより調べ、方向集中度が高い場合には比較的精度よい逆解が得られることを示している。しかしながら、この研究ではノイズの影響が取り入れられておらず、実測された SAR データに適用できるかは検討されていない。

そこで本研究では、SAR によって実際に観測された海面画像データを用いて、スペックルノイズの特性を逆に利用して、センサの応答関数を推定すると同時に、ノイズ成分の除去法について調べる。また、アジマス方向の非線形カットオフ特性が取り入れられている準線形理論の逆解析法に基づいて、波浪の 2 次元波数スペクトルを推定し、実測された周波数スペクトル、有義波高および有義波周期と比較し、本研究の推定法の精度と適用性について検討する。

2. 2 次元波数スペクトルの逆推定法

2.1 センサーの応答関数の推定

合成開口レーダによって得られた後方散乱強度には、センサーの応答特性の影響や種々のノイズが含まれているため、真の海面の後方散乱強度を得るためには、まずこれらの影響を除去する必要がある。Tilly (1986) は、スペックルノイズの特性をうまく利用して、センサーの応答関数を求める方法を提案し、モンテカルロシミュレーションによりその有効性を確認している。そこで本

研究においても、Tilly (1986) の方法に準じて応答関数を求めることにした。

いま、海面上の点 (x, y) の海面の後方散乱強度を $\sigma(r, \xi; x, y)$, 合成開口レーダによって得られるイメージ画像の強度を $I(x, y)$ とすると、

$$I(x, y) = \iint \sigma(r, \xi; x, y) * H(r, \xi) dr d\xi \cdots \cdots (1)$$

と表される。ここに、 $H(r, \xi)$ は point spread function, r はスラントレンジ, および ξ はアジマス方向の距離である。この $H(r, \xi)$ を 2 重フーリエ変換してその絶対値の二乗が、いわゆるセンサーの応答関数 $\hat{H}(k_x, k_y)$ となる。本研究では、 $H(r, \xi)$ を 2 次元 Gauss 分布で近似できるものとして、

$$H(x, y) = A \exp\{-(ax^2 + by^2)\} \cdots \cdots (2)$$

とおき、この関数を波による特徴的なコントラストの変化がない SAR 画像 (featureless scene) から同定することにした。センサの応答関数 $\hat{H}(k_x, k_y)$ は、上式を 2 重フーリエ変換することによって得られるが、対象とする波数 k_x および k_y の値が小さいので、次式で表される近似式を用いて応答関数とした。

$$\begin{aligned} \hat{H}(k_x, k_y) &= \frac{\pi^2 A^2}{ab} \exp\left\{-\left(\frac{k_x^2}{2a} + \frac{k_y^2}{2b}\right)\right\} \\ &\approx \frac{\pi^2 A^2}{ab} \left\{1 - \frac{k_x^2}{2a} + \frac{k_x^4}{8a^2}\right\} \left\{1 - \frac{k_y^2}{2b} + \frac{k_y^4}{8b^2}\right\} \cdots \cdots (3) \end{aligned}$$

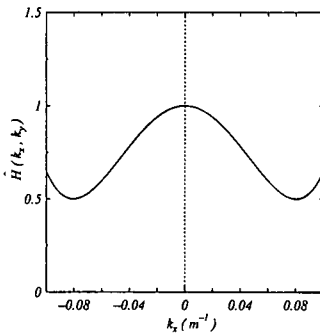
上式のような近似式を用いたのは、波数が大きい所では応答関数の値が小さくなり過ぎて、次式で表される海面の後方散乱強度 $\bar{\sigma}(k_x, k_y)$ を求めると、

$$\bar{\sigma}(k_x, k_y) = \frac{\hat{I}(k_x, k_y)}{\hat{H}(k_x, k_y)} \cdots \cdots (4)$$

値が大きくなり過ぎて誤差の影響が大きくなること、および Tilly (1986) も式 (3) の近似式の形を採用していることに拠っている。

応答関数の算定には、波の影響が小さくスペックルノイズが卓越していると思われる佐渡の加茂湖の水面画像を選定した。この湖は、フェッチが 2 km から 3 km 程度以内で波長の短い風波しか発達しないこと、および湖水は両津湾内から海水が取り込まれており、海水とほぼ同

* 正会員 工博 新潟大学教授 工学部建設学科
** 工修 東亜建設工業(株)



図一 推定されたセンサの応答関数

じ性質をもつからである。

図一は、上述の方法により求められた規格化されたセンサの応答関数を示したものである。波数 k_x の値が 0 から 0.08 付近にかけて応答関数の値は減少し、それより大きい波数ではまた増加する傾向となっている。波数 k の値が $k=0.1 \text{ m}^{-1}$ の波は、深海波では波長が約 60 m であり、周波数では $f=0.16 \text{ Hz}$ であり、ERS1/SAR の空間分解能が 30 m であることを考えると、この波数 $k=0.1 \text{ m}^{-1}$ 程度までが意味をもつ限界の波数であると考えられる。

2.2 スペックルノイズの特性とその除去

合成開口レーダによる海面画像には、スペックルノイズと呼ばれる乗法性のノイズが含まれており、真の海面の後方散乱強度を求めるためには、この影響を除去する必要がある。本研究では、Goldfinger (1982) の考えに基づき、スペックルノイズレベルの推定と除去を行なった。

ここで、地点 (i, j) の真の後方散乱強度を $z_{i,j}$ とすると、同地点のスペックルノイズが含まれたデータ $\tilde{z}_{i,j}$ は次式で表される。

$$\tilde{z}_{i,j} = z_{i,j} \nu_{i,j} \dots \dots \dots (5)$$

ここに、 $\nu_{i,j}$ はスペックルノイズ成分である。上式の離散二重フーリエ変換をとると、

$$\tilde{z}_{k,\ell} = \sum_p \sum_q z_{k-p,\ell-q} \nu_{p,q} \dots \dots \dots (6)$$

となる。スペックルノイズが含まれたデータ $\tilde{z}_{i,j}$ の 2 次元波数スペクトル $\tilde{S}(k, \ell)$ は、スペックルノイズの独立性を考慮すると、

$$\begin{aligned} \tilde{S}(k, \ell) &= \langle \tilde{z}_{k,\ell} \tilde{z}_{k,\ell}^* \rangle \\ &= \sum_p \sum_q \sum_{p'} \sum_{q'} \langle z_{k-p,\ell-q} z_{k-p',\ell-q'}^* \rangle \langle \nu_{p,q} \nu_{p',q'}^* \rangle \\ &= \sum_p \sum_q S(k-p, \ell-q) S_{\nu\nu}(p, q) \dots \dots \dots (7) \end{aligned}$$

で与えられる。ここに、 $\langle \rangle$ は期待値をとることを示し、 $S(k-p, \ell-q)$ はスペックルノイズを取り除いたデータの波数スペクトル、 $S_{\nu\nu}(p, q)$ はスペックルの波数スペクトルである。ここで、スペックル $\nu_{i,j}$ と $\nu_{i',j'}$ との相互相関

をとると、

$$E[\nu_{i,j} \nu_{i',j'}] = \langle \nu \rangle^2 \left\{ 1 + \frac{1}{n} C(i-i', j-j') \right\} \dots (8)$$

となることから、スペックルの波数スペクトル $S_{\nu\nu}(p, q)$ は、

$$S_{\nu\nu}(p, q) = \langle \nu \rangle^2 \left\{ \delta(p, q) + \frac{1}{n} \psi(p, q) \right\} \dots \dots \dots (9)$$

となり、上式を式 (7) に代入することにより、 $\tilde{S}(k, \ell)$ は、

$$\begin{aligned} \tilde{S}(k, \ell) &= \langle \nu \rangle^2 \left\{ S(k, \ell) + \frac{1}{n} \sum_p \sum_q S(p, q) \right. \\ &\quad \left. \cdot \psi(k-p, \ell-q) \right\} \dots \dots \dots (10) \end{aligned}$$

と表される。ここに、 n は Look 数、 $C(i-i', j-j')$ はスペックルの自己相関係数、 $\psi(k-p, \ell-q)$ はその波数スペクトルである。ここで、スペックルがホワイトノイズであるとすると、式 (10) の $\psi(p, q)$ は $\psi(p, q) = 1/(N_x N_y)$ と一定値となる。ここに、 N_x および N_y は、それぞれ波数 (p, q) 方向の離散波数の数である。式 (10) を離散フーリエ変換し、 $S(k, \ell)$ について解くと、

$$S(k, \ell) = \frac{1}{\langle \nu \rangle^2} \left\{ \tilde{S}(k, \ell) - \frac{1}{n+1} \bar{S} \right\} \dots \dots \dots (11)$$

ここに、 $\bar{S}$ は波数スペクトルの平均値で、

$$\bar{S} = \frac{1}{N_x N_y} \sum_p \sum_q \tilde{S}(p, q) \dots \dots \dots (12)$$

で求められる量である。式 (11) より、スペックルノイズが乗ったデータの波数スペクトルから、平均パワーに比例した量を差引けば、求める波数スペクトルが得られることを示している。

実際に SAR 画像の波数スペクトルを求め、平均パワーを求めてスペックルノイズレベルを除去すると、負の値になる波数領域が存在したため、波数の絶対値が 0.1 m^{-1} 以内の領域においてパワーの最小値を用いた。

2.3 準線形理論による 2 次元波数スペクトルの逆推定

SAR 画像の波数スペクトルから波浪の波数スペクトルの逆推定は、非線形カットオフ特性が取り入れられている準線形近似の逆解析法 (泉宮・居場, 2000) に基づいて行なった。

$$F(k) = \frac{2S(k)}{|T^s(k)|^2} \exp \left\{ \beta^2 k_x^2 \int_{S_1} T^u(k')^2 F(k') dk' \right\} \dots \dots \dots (13)$$

ここに、 $S(k)$ は SAR 画像の波数スペクトル、 $F(k)$ は波浪の波数スペクトル、 $T^s(k)$ は変調伝達関数である。上式の解を得るには、

$$z = 2 \int_{S_1} \Psi(k) \frac{|T^u(k)|^2}{|T^s(k)|^2} \exp \{ \beta^2 k_x^2 \} dk \dots \dots \dots (14)$$

を満たす z を求める必要がある。ここに、 z はレンジ方向の軌道流速成分の二乗平均値で次式で表される。

$$z = \int_{S_1} |T^v(k)|^2 F(k) dk \dots\dots\dots (15)$$

しかしながら、画像の波数スペクトル $S(k)$ の高波数領域 $k > 0.1 \text{ m}^{-1}$ で、FFTによるスペクトル推定値の誤差や他のノイズ成分によりパワーの低下の度合いが緩く、有義な解が得られないことが分かったので、それ以上の波数ではローパスフィルターをかけて対処した。

3. 2次元波数スペクトルの推定結果と考察

3.1 2次元波数スペクトル

前節で説明した逆推定法を用いて、実際のSAR画像データから波浪の2次元波数スペクトルの逆推定を行った。用いたデータは、1993年3月9日にERS1-SARによって観測されたいわき沖の海面画像である(図-2)。図-3にはSAR画像の2次元波数スペクトルを示している。観測当日の気象は、2日前に四国沖にあった南岸低気圧がやや発達しながら茨城県沖から三陸はるか沖を通過して、中心気圧が990 hPaになっていた。波の状態は風波の性質がやや強く、いわき沖の波浪観測によると、 $H_{1/3}=5.24 \text{ m}$ 、 $T_{1/3}=12.73 \text{ s}$ であった。

図-2のSARによる海面画像には、波の峰付近の短波長の波によるBragg共鳴により、強い電波の反射(白い部分)が観測されている。この白い部分の連なりから、波浪の峰の部分がおおよそ想像できる。一方、SAR画像の2次元波数スペクトルは、ある方向にエネルギーが集中した分布となっており、1方向波浪系であるようにみえる。また、波数スペクトルは波数の原点に関して対称で、原点付近にやや有意なパワーが存在している。

これをもう少し詳しく見るために、原点とピーク付近を通る断面でのスペクトル分布を示したのが、図-4である。この図を見ると、原点 $k=0$ 付近の値がやや大きくなっている。これは、SAR画像の強度の長周期的トレンドの影響があることに加えて、変調伝達関数の値が波数の小さい所で小さくなり、波浪の波数スペクトルに逆変換する際には倍率が大きくなることに拠っていると考えられる。

図-5は、逆推定された波浪の2次元波数スペクトルを示したものである。SAR画像の波数スペクトルとはやや異なり、ピーク波数より高波数側へエネルギーがやや大きくなっている。特に、ピーク波数ベクトルの方向(右下方向)にエネルギーが伸びているのが特徴的であり、エネルギーのピークは小さいが、2方向波浪系に近くなっていることが分かる。この波数スペクトルが得られたときのアジマス方向の軌道流速成分の二乗平均値 z は、 $z=0.557$ であった。

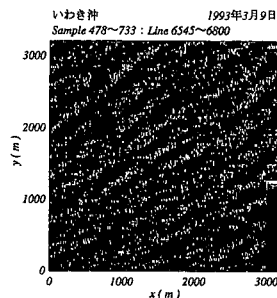


図-2 いわき沖の海面画像

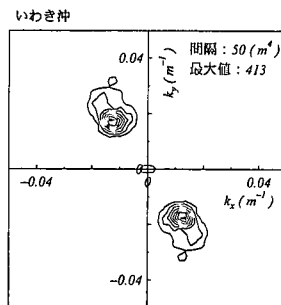


図-3 SAR画像の2次元波数スペクトル(いわき沖)

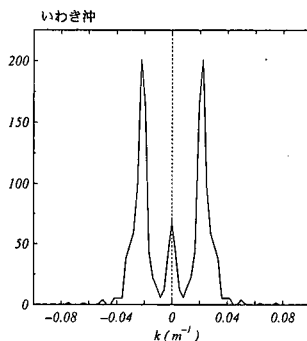


図-4 SAR画像の2次元波数スペクトルの断面

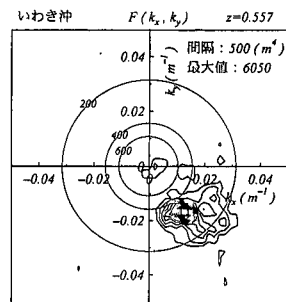


図-5 波浪の2次元波数スペクトル(いわき沖)

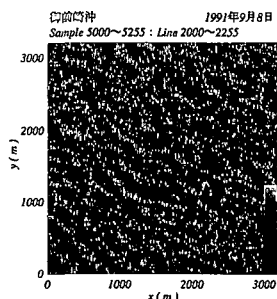


図-6 御前崎沖の海面画像

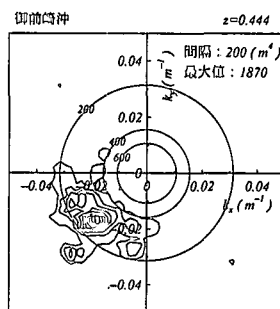


図-8 波浪の2次元波数スペクトル (御前崎沖)

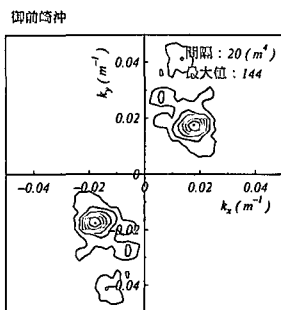


図-7 SAR 画像の2次元波数スペクトル (御前崎沖)

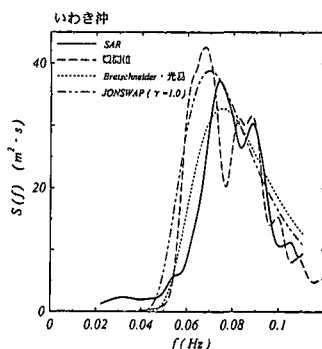


図-9 波浪の周波数スペクトルの比較 (いわき沖)

図-6は、1991年9月8日午前10時27分に観測された御前崎沖のSARによる海面画像である。観測当日の気象は、御前崎の南方約500 kmに中心気圧935 hPaの台風があり、その影響でうねり性の波が駿河湾内にも伝播している状況であった(飯坂, 1998)。波浪観測によると、御前崎港では有義波高 $H_{1/3}=2.98$ m, 有義波周期は $T_{1/3}=11.58$ sであった。

SAR画像の2次元波数スペクトルを図-7に、推定された波浪の波数スペクトルを図-8に示す。いわき沖よりも波のエネルギーが小さいので、波数スペクトルの等値線も 200 m^4 と小さくしているのが、一見方向集中度が低下しているように見えるが、いわき沖とほぼ同程度である。推定された波数スペクトルの主ピークの高周波数側にもう一つのピークが存在していることが読み取れる。これは、周波数にある程度の誤差があるが、波浪の非線形性によるエネルギーの2次ピークにほぼ対応しているものと推測される。

3.2 周波数スペクトルおよび波高の比較

2次元波数スペクトルを波数空間内で同心円上に積分すると、周波数スペクトル $S(f)$ が得られる。図-9は、SAR画像より得られたもの(実線)と観測値(破線)とを比較したものである。また、この図には参考のため、観測された有義波高および有義波周期を用いた Bretschneider・光易型周波数スペクトル(点線)および JONSWAP ($\gamma=1.0$)型スペクトルも同時に示している。まず、観測

値のスペクトルを見ると、2つのエネルギーピークが存在しており、2種類の波浪が存在していることが伺える。SARデータより得られたスペクトルにも2つのエネルギーピークが存在しているが、低周波数側のピークの位置が多少ずれている。高周波数側の波は、観測当時の風に対応した風波で、低周波数側の波は周波数から判断してややうねり的な波浪であることが推測される。SARによって観測されるのは、Bragg共鳴が生じやすい短波長の波を含む風波側の波であるので、SARによる周波数スペクトルは 0.08 Hz から 0.11 Hz の区間では良く一致しているが、低周波数側ではやや小さい値となっている。したがって、うねりと風波が共存する波浪系では、SARによる波浪の波数スペクトルの推定精度が低下するので、変調伝達関数等の改良が必要であると思われる。

図-10は、推定された周波数スペクトルと、同じく観測された有義波高および有義波周期を用いた Bretschneider・光易型周波数スペクトル(点線)および JONSWAP ($\gamma=2.0$)型スペクトルとを比較したものである。御前崎港沖の波浪観測点は、御前崎のすぐ近くに存在し、海底地形の変化も大きいので、やや異なる海域のSARデータと同じものとして比較することはできないが、観測波高を用いた JONSWAP型周波数スペクトル ($\gamma=2.0$) と形状が類似しているのは興味深い。

波浪の観測値とSARデータによって推定された有義

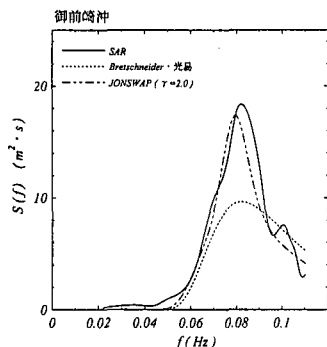


図-10 波浪の周波数スペクトルの比較 (御前崎沖)

表-1 有義波高および有義波周期の比較

		観測値	SARの推定値
いわき沖	波高 $H_{1/3}$ (m)	5.24	4.75
	周期 $T_{1/3}$ (s)	12.73	12.45
御前崎沖	波高 $H_{1/3}$ (m)	2.98	3.28
	周期 $T_{1/3}$ (s)	11.58	11.52

波高および有義波周期を比較したものが、表-1である。有義波高の算定には、全エネルギーと有義波高との関係式 $H_{1/3} = 4.00 \sqrt{E}$ を用い、有義波周期については、周波数スペクトルのピーク周波数 f_p を用いて、 $T_{1/3} = 1/(1.05 f_p)$ を用いて推定したものである。有義波高については、約10%程度、有義波周期では3%程度の誤差で推定できていることが分かる。

4. 結 論

本研究では、衛星合成開口レーダ SAR による海面画像のデータから海洋波浪の2次元波数スペクトルの実用的な逆推定法を提案し、波浪観測結果とも比較を行ない、以下の事柄が明らかとなった。

(1) スペックルノイズを利用してセンサの応答関数を求める方法を、実際に加茂湖の海面画像を用いて適用し、point spread function を求め、その二重フーリエ変換からセンサの応答関数を求めることができた。

(2) SAR 画像にスペックルノイズが含まれるデー

タの2次元波数スペクトルと真の波数スペクトルとの関係式を導き、そのノイズを除去したが、FFTによるスペクトルの推定誤差や推定値の変動により、高波数領域で有意なパワーが残るため、これをローパスフィルタにより取り除くことにより、安定した逆解が得られた。

(3) SAR 画像データより波浪の2次元波数スペクトルを推定し、さらにそれを用いて周波数スペクトルを算定し、観測値と比較したところ、0.08 Hz から 0.11 Hz の範囲内ではよく一致していたが、それより低周波数側ではやや異なる結果となった。

(4) 推定された周波数スペクトルから得られる全エネルギーおよびピーク周波数を用いて、有義波高および有義波周期を推定したところ、有義波高については、約10%程度、有義波周期では3%程度の誤差で推定できることが分かった。

最後に、本研究で用いた ERS1-SAR のデータ (ESA ©) は宇宙開発事業団より研究者用配布として提供されたものであることを付記し感謝します。また、本研究で用いた波浪観測データは、港湾空港技術研究所海象情報研究室の永井紀彦室長のご好意により提供戴いたものであり、宇宙開発事業団地球観測データ解析研究センターの田殿武雄博士には SAR の校正に関してご教示戴いたことを記して感謝します。

参 考 文 献

- 泉宮尊司・居場博之 (2000): 合成開口レーダによる海面画像の準線形理論に基づいた逆解析解の存在とその特性, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 1326-1330.
- 運輸省港湾局監修 (1992, 1994): 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.
- 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, 208 p.
- Goldfinger, A. D. (1982): Estimation of spectra from speckled images, IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., Vol. AES-18, No. 5, pp. 675-681.
- 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.
- Tilly, D. G. (1986): Use of speckle for determining the response characteristics of the Doppler image radars, Opt. Eng., Vol. 25, No. 6, pp. 772-779.