

合成開口レーダ（SAR）を用いた海洋波浪観測の一例

東北大学大学院 学生員 ○児島 正一郎
東北大学大学院 フェロー 沢本 正樹

1. はじめに

本研究では、ERS1 に搭載されている合成開口レーダ（周波数：C-band (5.3GHz)、空間分解能：約30m、入射角：23°（シーンセンター））を用いて「うねり」に代表される波長が百km～数百kmの海洋波浪の観測を行う。このために、SARによる海洋波浪の映像化メカニズムについて考察し、SAR画像の画像強度分布から海洋波浪スペクトルを求めるモデル化を行い、海上観測データ（波高計データ）との比較を行うことによりその妥当性についての議論を行う。最後に、SAR画像の画像強度分布より求めた海洋波浪スペクトルを用いて水位分布図を作成する。

2. SARによる海洋波浪の映像化メカニズムと海洋波浪スペクトル

SARによる海洋波浪の映像化は、次に挙げる三つの変調効果による。第一の変調効果は、SARの空間分解能よりも大きな波長を有する海洋波によって引き起こされる入射角の局所的な変動によってもたらされる傾き変調によって引き起こされる。この効果はアンテナルック方向（レンジ方向）に進む波で最大となり、これに直交する方向に進む波で最小となる。第二の変調効果は、マイクロ波に直接相互作用する波長の短い波が波長の長い波の上で周期的に変動することによって引き起こされる流体力学変調によって引き起こされる。この効果についてはまだ十分なメカニズムの解明がなされていないが、波長の短い波は波長の長い波の前面で強く発生することがわかっている。本研究ではこの変調効果については考慮しない。第三の変調効果は、観測対象物がレンジ方向に速度を持っていることによって引き起こされる速度バンチング変調効果。この変調は、海洋波がそれぞれの波が重なり合わさった軌道速度で運動しているために引き起こされる撮影点の集中と拡散によって生じる。本研究では、これらの映像化メカニズムをふまえて画像強度分布から海洋波浪スペクトルを算出する。

SAR画像の画像強度がそれぞれの場所における波高に比例すると仮定することにより、画像強度分布のスペクトル $P(k_x, k_y)$ と海洋波浪の波数スペクトル $S(k_x, k_y)$ は以下のように関係づけることができる。

$$P(k_x, k_y) = |H|^2 |B|^2 |M|^2 S(k_x, k_y) \quad (1)$$

ここで、 H はマイクロ波の入射角、アンテナ利得などのSARのシステムに関するパラメータを結びつけた関数、 B は海面波浪と独立した揺らぎの関数、 M は変調伝達関数をそれぞれ表わしている。本研究では、 H と B に関しては一定値（＝1）とする。変調伝達関数 M は、傾き変調関数 M_t と速度バンチング変調関数 M_v の和で表われるとする。傾き変調関数 M_t と速度バンチング変調関数は、それぞれ以下の式によって表わされる。

$$M_t = \frac{4\cot\theta}{1 + \sin^2\theta} k_y \quad (2) \quad , \quad M_v = \frac{R}{V} \omega k_x \left(\frac{k_y^2}{k^2} \sin^2\theta + \cos^2\theta \right)^{1/2} \quad (3)$$

ここで、 θ はマイクロ波の海面への平均入射角、 ω は海洋波浪の角周波数、 R は衛星と観測対象地点との距離、 V は海面に対する衛星の移動速度をそれぞれ表わしている。

3. 波浪解析

本研究では、いわき沖に設置されている波浪計を中心（37° 17' 49"，141° 27' 47"）とする海域（6.4km×6.4km）を解析対象海域とする。図1に1993年3月9日における解析対象海域のSAR画像を示す。この図において、白色は海面からの後方散乱係数が大きいことを表わし、黒色は小さいことを表わしている。白と黒のストライド模様で表わされたうねりを確認することができる。図2に図1の海域におけるSAR画像の画像強度スペクトルを示す。この図より、スペクトルピークにおける波数 k_p は0.042(rad/m)となる。また、スペクトルピークを結んだ直線をSAR画像における主波向きとすると、直線Iようになる。波が沖から岸に向かっていているとすると、その方向はx軸から109度の方向に向かって進んでいる。次に、式(1)に式(2)，(3)を代入して海洋波浪スペクトルを算定する。算定に際してはスペクトルノイズを低減させる必要がある。これは、画像強度スペクトル中に無視することができないノイズが含まれ、これによって画像強度スペクトルから海洋波浪スペクトルにうまく変換することができないからである。本研

究ではノイズと信号との閾値 B_0 を決め、ノイズのスペクトル値を 0 とおくフィルタを用いて画像強度スペクトルからノイズを消去して海洋波浪スペクトルを推算する。この際、画像強度スペクトルの全エネルギーは保持されるようにする。ノイズと信号の閾値 B_0 は、海洋波浪スペクトルをフーリエ逆変換して得られる波高分布より有義波高を算定し、波高計のそれと比較することによって算定する。この結果、本研究解析対象海域における B_0 は画像強度スペクトルの最大値の 17.18% であった。この時の海洋波浪スペクトルを図 3 に示す。この図からスペクトルピークにおける波数 k_p を算出すると $0.028(\text{rad/m})$ となる。さらに主波向きを求めると x 軸から 106° の方向(直線 II)に進んでいる。また、スペクトルピークから有義周期を求めると $12.4(\text{s})$ となり、波高計で観測された有義周期 $12.7(\text{s})$ と非常に近い値を示しており、本研究で算定した海洋波浪スペクトルの妥当性が示された。図 4 に、図 3 の海洋波浪スペクトルをフーリエ逆変換して求めた海洋波浪の水位分布を示す。

4. 終わりに

本研究では、SAR 画像の画像強度から海洋波浪のスペクトルを求めるためのフィルタを提案し、このフィルタを用いて求めた海洋波浪スペクトルが有意なものであることが示された。また、海洋波浪スペクトルをフーリエ逆変換することにより海洋波浪の水位変動の空間分布を得ることができた。

謝辞：本研究は、宇宙開発事業団より ERS1-SAR データの提供を受け、(財)沿岸開発技術研究センターよりいわき沖の波浪データの提供を受けた。また、公表にあたり、科学研究費補助金(特別研究員奨励費)の補助を受けた。ここに記して謝意を表します。

参考文献：Werner Alpers, Duncan Ross, Clifford Rufenach: On the Detectability of Ocean Surface Waves by Real and Synthetic Aperture Radar, J. Ge, vol 86, No C7, pp. 6481-6498

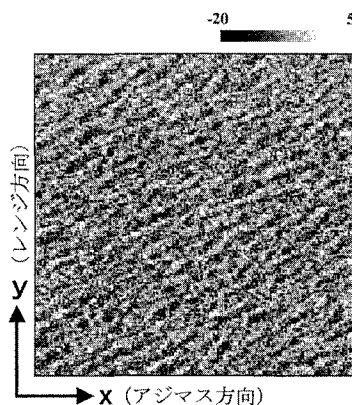


図 1 いわき沖の SAR 画像(1993/3/9)

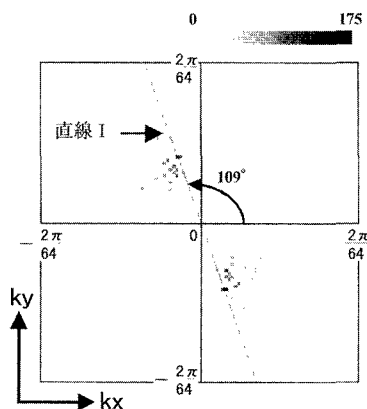


図 2 SAR 画像の画像強度スペクトル

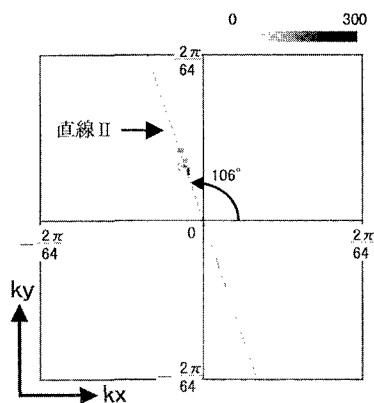


図 3 海洋波浪スペクトル

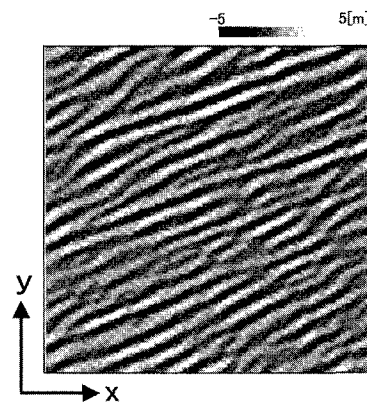


図 4 海洋波浪の水位分布