合成開口レーダによる海岸地形情報の抽出

行川 修平¹・松本 顕政²・武若 聡³

¹独立行政法人水資源機構 朝倉総合事業所 (〒838-0019 福岡県朝倉市上秋月1373-1)

E-mail:ykkw1124@gmail.com

²学生会員 筑波大学 大学院システム情報工学研究科 (〒305-8573 つくば市天王台)

E-mail:s1620922@u.tsukuba.ac.jp

³正会員 筑波大学教授 システム情報系 (〒305-8573 つくば市天王台)

E-mail:takewaka@kz.tsukuba.ac.jp

合成開口レーダ (SAR) は全天候型のリモートセンシング手法で、海岸工学分野においてもその観測データの活用が進んでいる。SARはマイクロ波を地表に向けて射出し、その後方散乱を計測するレーダである。この際に様々な観測パラメータを設定できること、対象物の散乱特性が多様であること等により、SARで取得されるシーンは、直感的に理解が可能な可視光観測のシーンに比べ、判読、解析等が難しいと指摘されることが多い。本研究ではSARが取得したシーンを分析し、汀線位置の検出精度の検証、波浪の伝播に伴う波数と水深分布の推定、観測パラメータによるシーン取得状況の分析等を行い、SARによる海岸地形情報抽出の可能性について議論する。

Key Words : synthetic aperture radar, remote sensing, shoreline, depth inversion, off nadir angle

1. はじめに

合成開口レーダ (SAR) は、人工衛星、航空機に搭載されるレーダであり、雲の影響を受けることなく地表面を観測することが可能なリモートセンシング手法である。海岸工学分野でもその活用について研究が行われており、表面波のスペクトル推定、汀線位置の検出、津波浸水域の推定の研究例がある^{1), 2), 3), 4), 5)}。

SARはマイクロ波を地表に向けて射出し、その後方散乱を計測するレーダである。この際に様々な観測条件を設定できること、対象物の散乱特性が多様であること等により、SARで取得されるシーンは、直感的に理解が可能な可視光観測のシーンに比べ、判読、解析等が難しい

面がある。ここでは、SARが取得したシーンを分析し、汀線位置の検出、波浪の伝播に伴う波数変化と水深推定を行い、SARの海岸地形情報抽出の可能性と注意を要する点について議論する。この際にはSARの観測条件によるシーンの取得特性について説明する。

SARが海域を観測した場合、海洋の内部と表面に生じる様々な現象、例えば、内部波、海流フロント、風域のフロント、表面波、航跡、オイルスリック等がシーン内に捉えられる⁶⁾。SARでは、送信電波の波長と同スケールの海表面の凹凸により生じる反射を観測し、シーンを構成する。この凹凸は、海洋内部と表面に生じる様々な物理過程を反映したものであり、海表面の状況と様々な条件で送信される電波の反射状況には相当に複雑な関係性がある。この関係性をレーダ方程式により定量的に説明する試みがあるが、個別の事象の分析に限られ、汎用的に適用できる枠組みは示されていない。SARシーンの理解は経験的になされることが多く、これがSARシーンの活用を難しくする一つ要因であろう。

2. 解析に使用したシーン

本研究で解析の対象としたSAR、シーンの取得日、観測パラメータ、解析内容等の一覧を表-1に示す。いずれのシーンも鹿島灘を観測したものであり、汀線位置の検出と波浪場の波数変化の推定を行った。観測パラメータ

図-1 SARの観測パラメータ。送受信の偏波の表記の例：HH 水平偏波による送信・受信。HV 水平偏波による送信・垂直偏波による受信

表-1 解析に使用したシーンの一覧

センサ	プラットフォーム	観測日時	地上分解能	送受信偏波	オフナディア角	解析内容
PALSAR	ALOS	2006年8月4日	12.5 m	HH	41.5°	汀線位置の検出
PALSAR	ALOS	2006年9月19日	12.5 m	HH	41.5°	
PALSAR	ALOS	2006年11月4日	6.25 m	HH	41.5°	
PALSAR	ALOS	2006年12月25日	6.25 m	HH	34.3°	
PALSAR	ALOS	2011年3月19日	6.25 m	HH	14.0°	
PALSAR-2	ALOS-2	2014年12月1日	2.5 m	HH	32.1°	波数変化
Pi-SAR-L2	航空機	2015年2月23日	2.5 m	HH, HV, VV, VH	10 – 62°	

(送受信偏波の表記例：HH 水平偏波による送信・受信. HV 水平偏波による送信・垂直偏波による受信)

(オフナディア角, 送受信偏波, 分解能, 照射方向) の説明を図-1に, 解析を行ったシーンの例を図-2に示す.

PALSAR, PALSAR-2についてはJAXAが観測基本計画を定め, 様々な観測パラメータの組み合わせにより全球の陸域のシーンを収集している⁷⁾. 2006年の後半には5ヶ月の間に4シーンが取得されており, 雲天時には有効なシーンを取得できない可視光域の観測に比較して高頻度にシーンを収集できることが理解される.

東日本大震災の発生を受け, 宇宙航空研究開発機構(JAXA)は多数の緊急観測を行った. この中で, PALSARは2011年3月19日に, 観測基本計画で設定されている範囲のオフナディア角よりも小さい角でシーンを取得した(図-2(a)).

Pi-SAR-L2は航空機に搭載するSARで, 空間分解能はPALSAR-2と同等であり, 全偏波画像を同時に取得する

(a) 2011/03/19 PALSAR

オフナディア角 = 14.0°, 有義波高 = 0.6 m.

(b) 2014/12/01 PALSAR-2

オフナディア角 = 32.1°, 有義波高 = 1.9 m.

図-2 シーンの例. 神栖市須田浜の港湾空港技術研究所観測栈橋の周辺. (b) には観測栈橋 HORS (全長約 400 m) が映っているが, (a) では確認できない.

のが特徴の一つである⁸⁾.

本研究では SAR の観測結果の内, JAXA より提供された GeoTIFF 形式で格納された振幅情報シーンを対象として解析を行った.

図-3 砂浜のシーン (観測栈橋 HORS 周辺, PALSAR, 2006 年 11 月 4 日)

図-4 水際位置の読み取りに使用した輝度分布の例. (上段) 図-3 の赤矢印で示した範囲の輝度分布. (下段) 輝度の平面分布.

図-5 水際位置の読み取り結果とその精度の検証(1)

SAR 観測時の潮位（銚子漁港，TP.）：-0.15 m. 航空レーザ測量結果：地盤高 TP.+0.5 m の位置. 沿岸位置 0 m=HORS.

3. 汀線位置の検出

2006年に取得された4シーンより鹿島灘南部（鹿島港～波崎漁港，延長約15 km）の汀線位置を読み取り，その精度を測量データと比較して検証した．なお，2006年10月上旬に大型の低気圧が鹿島灘に沿って北進し，既往最大の潮位偏差を伴う高波浪が来襲し大規模な海岸侵食が発生した⁹⁾．

図-3に2006年11月4日に取得されたシーンの一部を示す．観測栈橋，ヘッドランドの存在，陸域と海域の境界の延びる方向等を確認できる．また，地表面，海表面パターンとは明らかに異なる高輝度部が直線的に連続するノイズ，SARのスキャンニングの際に発生したと考えられるムラ等がある．これらは，次に説明する水際位置の読み取りを難しくする要因となる．

水際位置はSARシーンの輝度（=後方散乱強度，振幅）の分布を目視で確認し，変曲位置を見極めて汀線位置を定めた．図-4の上段は水平方向の輝度分布の一例であり，ここには左から順に陸域，海浜，海面がある．この輝度分布と該当地点の周辺のシーン（図-4の下段）を同時に眺めから水際位置を判断した．具体的には，着目点周辺のシーンから海浜と海面の範囲を大まかに把握し，輝度分布から海浜と海面との境界と思われる水際位置を定めた．この作業を沿岸の南北方向に沿って行うが，新たな水際位置を定める際には，直前に読み取った水際位置を参考にすることで，水際位置の決定に要する時間を短縮し，また，決定の確かさを向上させた．

シーンには，先に述べたように，地表面・海表面を代表しているとは考えられない斜状のノイズがある．また，輝度分布より海浜と水際を視認することが難しい領域も

存在する．これらについては，読み取りが不可能の領域として水際位置を定めていない．以上の方法は，オペレータの技量，主観によるところが大きく，現時点では，残念ながら汎用性には欠ける．

様々な水位で取得される水際位置より，一定の高さ（例えばT.P. 0 m）で定義される汀線を決定するためには，海浜の前浜勾配の情報が必要になる．前浜勾配を単独のシーンから定めることは不可能であり，これには別の情報が必要となる．ここでは，SARシーンより推定した水際位置を汀線位置に変換せずに，その決定精度を議論する．結果的には，本研究の範囲内では，水際位置を汀線位置へ変換せずとも，海浜変動の動向を十分に理解できることが後に示される．

SARシーン（2006年11月4日10:01 JST）より読み取った水際位置の精度を航空レーザ測量結果（2006年11月8日取得）により検証した．図-5に，SARシーンより読み取った水際位置と航空レーザ測量結果から抽出した海浜地盤高さT.P.+0.5 mの岸沖位置の沿岸分布，これらの2000 m毎のRMS誤差，海岸にある排水口，ヘッドランドの存在位置を示す．沿岸方向の座標は，港湾空港技術研究所の観測栈橋HORSを基準としており，観測栈橋に直交する方向に延びる（正方向は南方方向）．また，SARシーンが取得された時間の銚子漁港の潮位はT.P.-0.15 m，NOWPHAS鹿島港で観測された有義波高は1 mであった．

海浜に排水口があり地形が緩勾配となっている一部の領域で読み取り誤差が大きくなっており，全域のRMS誤差の平均は12.9 mであった．排水口のある部分の海浜は周辺に比べて緩傾斜となっており，また，排水口から海浜にかけて陸水が存在することが多い．このような場

合、海浜上に海域と類似の散乱特定を示す場所が存在することになり、その見分けは困難になるであろう。

SAR シーンが取得された際の潮位、航空レーザ測量により抽出した海浜高との差は約 0.7 m である。前浜勾配を 0.05 から 0.1 程とすると、この高さの差は水平方向に最大で 14 m 程の差を生じさせる要因となる。一方で、wave-setup の効果を考えると、水際位置は陸側にシフトし汀線位置に近づき、この 14 m の差は小さくなると期待できる。

以上の水際位置の読み取りを難しくさせる要因、SAR シーンより読み取る水際位置と測量結果に差が生じ得る要因を鑑みると、このケースでは、SAR シーンより水際位置の読み取りを妥当に行え、その誤差は SAR の観測分解能と同程度であると判断した。

2006 年の 8 月から 12 月にかけての 4 時期の観測桟橋 HORS 直近の水際位置を読み取り、HORS で平日に連続的に取得された深浅測量結果と比較した（図-6）。SAR

図-6 水際位置の読み取り結果とその精度の検証(2). 2006 年の観測桟橋周辺の各地盤高さの岸沖位置の変化と SAR より読み取った水際位置の比較. 観測日と観測時の潮位 (T.P.): 8 月 4 日(-0.10 m), 9 月 19 日(-0.39 m), 11 月 4 日(-0.15 m), 12 月 25 日(+0.14 m).

図-7 2006 年 8 月から 12 月にかけての鹿島灘南部の水際位置の変化. 沿岸位置 0 m = HORS.

シーンに含まれるノイズが多かった 9 月は、測量結果との乖離が大きくなるものの、汀線位置 (T.P. 0 m) の変動経過を良好に追跡できると判断できる。図-7 には 4 時期の水際位置の沿岸分布を示す。10 月にあった大型低気圧の通過に伴う水際の後退とその回復過程を追跡でき、SAR により高頻度観測の有効性が理解される。ヘッドランド間に位置する海浜の変動は、ヘッドランドの設置されていない区間 (沿岸位置: -4,000 ~ 4,000 m)、ヘッドランドの北側の直近 (沿岸位置: 4,000 m, 6,000 m) の水際位置の変動に比べて小さく、構造物により漂砂が制御されていることを理解できる。

4. 波浪の伝播に伴う波数分布

表面波、すなわち、波峰の連なりが映っていると考えられるパターン (図-2 参照) を対象にした解析を行った。冒頭でも述べたように、SAR のシーンには様々な海洋内部と表面に生じる物理過程を捉えた結果が映っており、表面波を捉えていると考えられるシーンの取捨はシーン全体の判読によった。この際には、表面波が沖から岸に進行し、この間に屈折が生じていたとみなせることを判読の基準とした。選択したシーンのパターンの波数解析を 2 次元 FFT により行い、卓越波数の空間分布を調べた結果について分析をした。

SAR のシーンに捉えられるパターン (送信電波の反射強度の大小) と海面の水位分布 (波の峰と谷の分布) の間には複雑な伝達関係があることに注意が必要である。例えば、泉谷・居場¹⁾は深海域を観測した SAR のシーンを分析し、その波数解析を通じて伝達関係の定め方、SAR シーンと海面水位分布の波数スペクトルには差異があることを論じている。この伝達関係を一つのシーンから抽出可能な情報のみにより定めることは簡単でなく、ここでは SAR シーンに捉えられたパターンの波数解析を行い、その結果について分析を行う。

シーン中の局所の輝度分布を FFT により解析し、卓越する波数ベクトルを求めた (図-8) . 沖合から岸に向かって波向が変化する状況 (=屈折) が捉えられており、シーンの海域部にあるパターンは表面波の伝播状況を捉えたものと判断した¹⁰⁾. シーンを取得した際の周期を、波浪推算結果¹¹⁾あるいはNOWPHAS観測値 (鹿島港) より仮定し、分散関係式を介して水深分布を推定した (図-9) . 水深が20 mより大きく、また、深海条件となる領域までの水深を、小さいオフナディア角で観測した場合 (2011年の観測結果) , 10 m 程度の誤差内で推定できる.

5. SARIによる波浪場と水際の観測

冒頭に述べたように、SARIは様々なパラメータを設定

図-8 波数ベクトルの分布 (矢印の向き = 波向き, 矢印の長さ = 波数) (鹿島灘南部: 鹿島港 ~ 波崎漁港, 2011/03/19)

して観測を行う. オフナディア角が小さい観測結果 (図-2(a)) は海域の有義波高 (0.6 m, 波浪推算値¹¹⁾) が小さいにも関わらず、波峰の分布が明瞭に捉えられており、陸域は相対的に暗くなる. これに対して、オフナディア角が大きい観測結果 (図-2(b)) は陸域が明るく、有義波高が大きかった (1.9 m, ナウファス鹿島港観測値) にも関わらず海域が暗く映る. 同様のことは図-10(a) に示すPi-SAR-L2の観測結果からも確認できる. 観測機器は高度約 13,000 m の位置にある. 図中の右から左に向かって観測のオフナディア角が大きくなるが、海域からの後方散乱はこれに伴い小さくなる. これらはマイクロ波の散乱特性によるもので、オフナディア角が小さい観測が海域における分析を行う際に有利となると考えられる. なお、汀線位置の特定もオフナディア角が小さいシーンで容易であったことを確認した.

本研究では、SARのシーンをうい汀線位置を良好な精度で抽出し得ることを示したが、水際を捉えたシーンについて注意すべき点に触れておく. 図-10(b) にPi-SAR-L2が捉えたシーンの水際を拡大して表示した. 碎波帯があると推定される領域に、その外側の波紋パターンに接続

図-9 水深分布の推定結果 (鹿島灘南部, 2011/03/19, 2014/12/01) . 実水深は海図, 測量結果等より作成. 図中の赤線は PALSAR-2 の解析の際に深海条件となる位置.

(a) プロダクトAmplitude 値 (偏波HH) の表示

(b) ヒストグラム調整 (平均化) した表示

図-10 Pi-SAR-L2 の観測結果 (2015 年 2 月 23 日, 鹿島灘南部, 利根川河口) . 観測栈橋 HORS の長さ = 400 m.

しない斜状の高輝度部が見られる。これは碎波の発生により大きな後方散乱と表面流速が発生し、SARの飛行方向と同じ方向に高輝度部分が延びる現象（アジマスストリーク）であり⁹⁾、実際の碎波帯内の水位分布を反映したものでないことに注意が必要である。これの発生の有無は、シーンをその都度目視で確認して知ることになる。

6. 結び

SAR のシーン（振幅情報）より海岸地形情報を抽出することについて検討した。(1) 砂浜海岸の水際位置を、平均的には SAR の観測分解能程度の誤差で抽出できることを確認した。ただし、緩勾配の領域では誤差が大きくなり得る。(2) SARのシーンに映る波峰分布を調べ、その卓越成分の沖から岸にかけての変化を調べた。その変化は波浪の屈折に対応していると考えられ、分散関係式を用い沖から碎波帯までの水深分布を推定できることを示した。(3) SAR の観測パラメータの内、オフナディア角を小さく設定した観測を行うと海域からの後方散乱が増し、海域情報の抽出に有利となる可能性が高い。

謝辞：本研究の実施にあたり、一般財団法人みなと総合研究財団主席研究員高橋宏直氏よりSARの観測パラメータに関する有益な助言を頂いた。また、宇宙航空研究開発機構よりPALSAR, PALSAR-2, Pi-SAR-L2のシーンの提供を受けた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

1) 泉宮尊司, 居場博之: 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, 海岸工学論文集, Vol. 48, pp.1441-1445, 2001.

- 2) 児島正一郎, 沢本正樹: EERS1-SAR 画像を用いた海岸波浪観測の一例, 海岸工学論文集, Vol. 45, pp.1256-1260, 1998.
- 3) 白戸伸亮, 多田毅, 大内和夫: 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, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 66, pp.1416-1420, 2010.
- 4) 田島芳満, 望月翔平, 舟竹祥太郎, Wickramaarachchi Bandula, Samalakoon Lal, 祖父江真一, 佐藤慎司: 衛星データおよび砂粒子の熱ルミネッセンスの分析に基づくスリランカ西海岸における沿岸漂砂環境の解明, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 67, No.2, pp.L_631-L_635, 2011.
- 5) 郷右近英臣, 越村俊一, 松岡昌志: 合成開口レーダー画像による津波浸水ラインの半自動抽出ツールの開発, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 70, No. 2, pp.L_1486-L_1490, 2014.
- 6) Jackson C. R. and Apel J. R.: Synthetic Aperture Radar Marine User's Manual (オンライン), <http://www.sarusersmanual.com/>, 参照 2016-04-29.
- 7) 宇宙航空研究開発機構地球観測研究センター: ALOS-2/ALOS@EORC ホームページ (オンライン), http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/index_j.htm, 参照 2016-04-29.
- 8) 宇宙航空研究開発機構: Pi-SAR-L2 (オンライン), <http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/Pi-SAR-L2/index.html>, 参照 2016-04-29.
- 9) 武若聡, 笹倉慎也, Elsayed Galal, 柳嶋慎一: 2006 年秋季低気圧による鹿島灘の侵食, 土木学会論文集 B, Vol. 65, No. 4, pp.277-284, 2009.
- 10) 武若聡, G.M. Jahid Hasan: 荒天時の屈折波浪場の解析, 海岸工学論文集, Vol. 53, pp.141-145, 2006.
- 11) 気象業務センター: 沿岸波浪数値予報モデル GPV(CWM), <http://www.jmbc.or.jp/hp/online/f-online3t.html>, 参照 2016-05-06.

(2016.3.16 受付)

SHORELINE POSITIONS AND BOTTOM PROFILES RETRIEVED FROM SYNTHETIC APERTURE RADAR

Shuhei YUKIKAWA, Akimasa MATSUMOTO and Satoshi TAKEWAKA

Synthetic Aperture Radar (SAR) is a powerful tool in retrieving shoreline positions and surface wave patterns in the nearshore, since it can gather scenes in any weather condition. The interpretation of scenes is sometimes not straightforward due to the various parameters set in the active observation of SAR. In this study, several scenes which captured Kashimanada Coast, Japan were analyzed to infer the usability of SAR data to extract shoreline positions and wave number variations in the nearshore, and also the influence of various parameters in the observation is discussed. Shoreline positions along the 15 km long sandy beach were digitized manually from the scene, and compared with aerial laser scanning survey data. The mean accuracy of shoreline position detection was in order of 10 m, which is equivalent to the resolution of SAR observation. Local accuracy decreased at regions where local foreshore slopes were mild, which was probably affected by the water content in the surface layer of sandy beach. Wave number variations from offshore to onshore were analyzed with two dimensional Fast Fourier Transform. Refraction of waves was confirmed: increase of wave number and deflection of wave angle. Off-nadir angle in SAR observation is an important parameter in coastal observation. If this angle is set to an optimized value for land observation, backscatter from water bodies is small. On the other hand, if this angle is set smaller, backscatter from water bodies increases and wave pattern and shoreline position are captured more clearly.