

SAR衛星による高頻度観測結果を用いた 鹿島灘南部の汀線変動解析

武若 聡¹・松本顕政²・海老原友基³

¹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

² マルホ発條工業株式会社 (〒621-0015 京都府亀岡市吉川町吉田岩の上12-1)

³ 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)

合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar) 衛星はマイクロ波レーダを搭載した衛星であり、雲天時、夜間にも観測可能である。そのため光学 (可視) 衛星に比べ同一地点のシーンを高頻度に取得できる。年に複数回取得されたシーンより汀線位置を読み取り、漂砂系内の季節的な汀線変動を追跡した。高頻度に観測されたデータの解析結果を示し、その優位性を検討する。具体的には地球観測衛星ALOS (PALSAR) (運用期間: 2006~2011年) とALOS-2 (PALSAR-2) (2014年~現在) が取得した鹿島灘南部 (鹿島港~利根川河口) の32シーンを分析した。2006年から2016年にかけての約10年間の汀線変動の特徴を議論し、年に1回取得される観測結果からは抽出できない汀線変動特性を説明する。

Key Words : SAR, Kashimanada Coast, shoreline variation, EOF, X-band radar

1. はじめに

広域の汀線位置読み取りには航空写真、あるいは、光学衛星が取得する可視画像が使用されることが多いが、航空機運用のコスト、曇天等により頻繁にシーンを取得することが難しい。例えば、太平洋側では、晴天で大気中の水蒸気が少ない冬季に取得されるシーンを汀線位置の読み取りに用いることが多い。年に1回取得されるシーンの読み取りからは、汀線位置変動の長期トレンドを知ることは可能だが、季節的な変動を抽出することは難しいと考えられる。

これに対して、合成開口レーダ (SAR, Synthetic Aperture Radar) 衛星はマイクロ波レーダを搭載した衛星であり、雲天時、夜間にも観測可能である。そのため光学 (可視) 衛星に比べ同一地点のシーンを高頻度に取得可能である。この特長を活かすことを念頭に、海岸工学分野ではSAR衛星データより汀線位置を抽出する検討が行

われ、汀線位置の推定精度、汀線位置を取得可能な海岸の性状、観測条件等について分析が進められている^{1,2)}。

本研究では宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が運用していた、あるいは、運用中のSAR衛星ALOS (PALSAR)³⁾ (運用期間: 2006~2011年) とALOS-2 (PALSAR-2)⁴⁾ (2014年~現在) が取得した鹿島灘南部 (鹿島港~利根川河口) の約16 km, 図-1) の32シーンを分析した。これより、2006年から2016年にかけての約10年間の汀線変動の特徴を議論し、年に1回取得される観測結果からは抽出できない汀線変動特性を説明する。

2. 鹿島灘南部の汀線変動

本研究では鹿島灘南部 (図-1, 鹿島港~波崎漁港, 延長約16 km) の汀線位置変動を検討する。対象海域の南端には波崎漁港があり、この付近の侵食対策として1基の突堤と5基のヘッドランド (1986年 - 2000年) が設

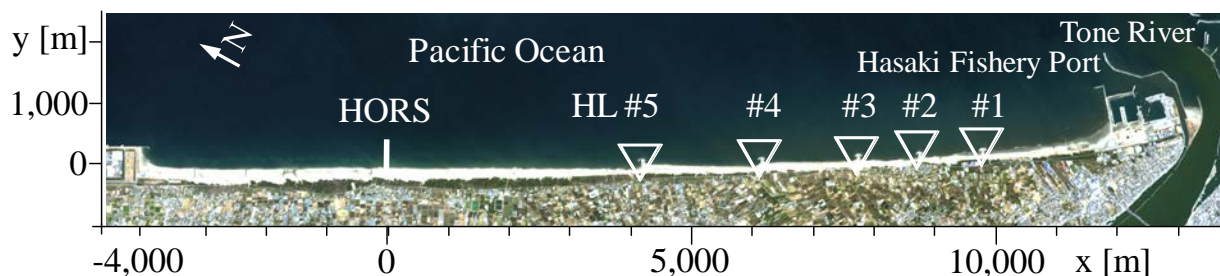


図-1 鹿島灘南部と解析領域。HORS=港湾空港技術研究所観測栈橋。HL=ヘッドランド。

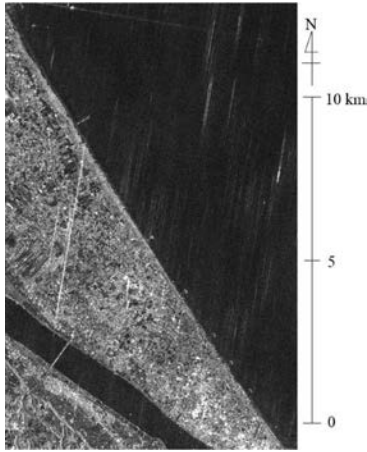


図-2 SARシーンの例：ALOS，2006年11月4日

置されている。

伴野ら⁵⁾は同じ海域について長期間の汀線変動を航空写真より分析している。1961年から2013年の間に取得された15シーンより、対象域全体の汀線位置を読み取った。シーンの取得間隔は約3.5年である。解析結果より、鹿島灘南部の汀線が、主に鹿島港を築港した際の浚渫土砂の浅海域への大量投棄（約5,000万m³）により、過去50年間（1961年 - 2013年）に、平均的に約70m前進したとしている。この際、数年から数十年スケールの汀線変動は沿岸漂砂のみで説明されるものではなく、岸沖漂砂の寄与も十分に考慮する必要があることを指摘している。

対象域の南側にヘッドランドが設置された時期は侵食の進行が懸念されていたが、近年はこれらの周辺に相当量の土砂が堆積し汀線位置の前進が続いていることが、2009年から2015年にかけてのXバンドレーダ観測（データ取得間隔：約3日）より報告されている⁶⁾。また、対象海域の北側には観測栈橋HORSがあり、2005年から2014年にかけてのXバンドレーダ観測（データ取得間隔：約3日）より、観測栈橋周辺の観測期間中の平均的汀線位置は安定していることが報告されている⁷⁾。

武若ら⁸⁾は対象域に配置された4基のXバンドレーダの観測結果より、全域に生じる土砂移動の特性を論じている。ただし、データの記録長がおおよそ12カ月と短かったこと、Xバンドレーダが観測できない領域が複数あること等より、観測された汀線変動と波浪場の関係を示すには至らなかった。

本研究では2006年から2016年の間に取得された対象域全域の32シーン（データ取得間隔：約0.25年）より汀線位置変動を分析し、既報との整合を確認しながら、その特徴を説明する。

3. SAR衛星観測データからの汀線位置読み取り

宇宙航空研究開発機構（JAXA）のSARを搭載し

表-1 解析シーンの取得日，観測条件

Date	Resolution [m]	Off-nadir angle [deg.]
2006/08/04	12.5	41.5
09/19	12.5	41.5
11/04	6.25	41.5
12/25	6.25	34.3
2007/01/27	6.25	41.5
04/24	6.25	34.3
07/25	12.5	34.3
11/07	6.25	41.5
2008/01/25	6.25	34.3
04/26	12.5	34.3
08/14	6.25	34.3
11/09	6.25	41.5
2009/01/27	6.25	34.3
05/17	6.25	34.3
08/17	6.25	34.3
11/17	6.25	34.3
2010/01/30	6.25	34.3
05/02	12.5	34.3
08/02	6.25	34.3
11/20	6.25	34.3
2011/02/02	6.25	34.3
04/07	6.25	34.3
2014/08/31	2.5	38.2
11/21	2.5	29.1
2015/01/01	2.5	29.1
04/26	2.5	38.2
08/08	2.5	38.2
11/19	2.5	29.1
2016/01/03	2.5	38.2
04/10	2.5	38.2
07/09	2.5	38.2
11/03	2.5	29.1

ALOS：2006 - 2011, ALOS-2：2014 - present

た地球観測衛星ALOS (PALSAR)（運用期間：2006～2011年）とALOS-2 (PALSAR-2)（2014年～現在）が観測したシーンを解析した。解析するシーンは次の条件を可能な限り満たすことを目標にして選択した：i) おおよそ等しいデータ取得間隔で季節毎に1シーン，ii) SARによる観測条件の一つであるオフナディア角が等しい。以上を踏まえて解析対象として選択したシーンの取得日，分解能等を表-1に示す。結果として，上の条件の目標に沿ったシーン選択は完全には達成できなかった。

筆者らはALOS (PALSAR)の観測シーンをを用い、汀線位置の読み取り精度を同一の海域で検証している⁹⁾。汀線位置は、シーンの輝度（=後方散乱強度）の分布を目視で確認し、その変曲位置を見極めて定めた。この方法は経験的であり、作業者の主観に依存するが、砂浜海岸の水際位置は、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、緩勾配の領域では誤差が大きくなり得ることを報告している。ここでは、以上と同一の手法，すなわち、シー

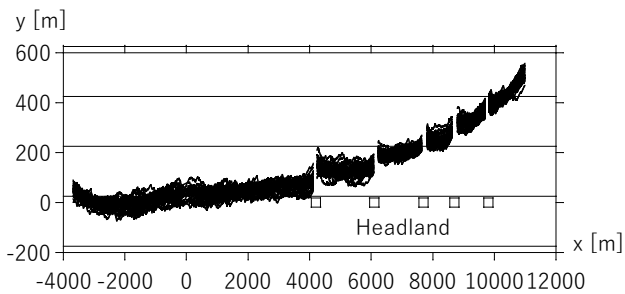


図-3 汀線位置の全読み取り結果 ($n=32$)

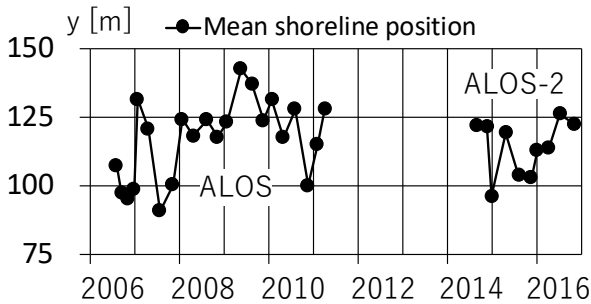
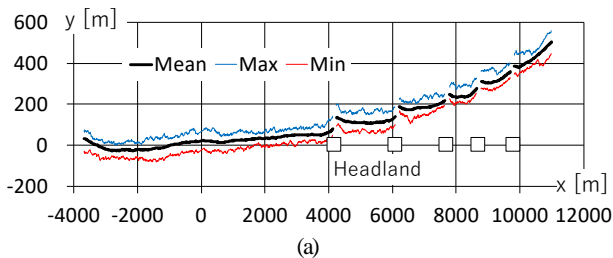
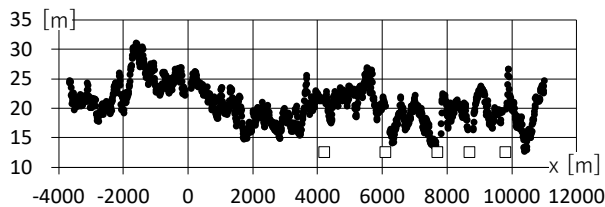


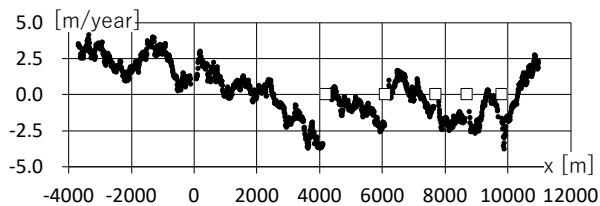
図-4 平均汀線位置の経年変化



(a)



(b)



(c)

図-5 汀線位置変動の統計量. (a) 平均汀線形状と変動幅, (b) RMS 変動強度, (c) 変化トレンド

ン内の輝度分布を目視で判断し、水際位置を定めた。図-2にシーンの一例を示す。

本来であれば、シーン取得時の潮位に応じた補正を施し、汀線位置を定める必要がある。しかしながら、前浜勾配を仮定する必要があること、シーンの

読み取りの不確実さ等を勘案し、水際位置を汀線位置として扱うこととした。

読み取った結果 ($n=32$) に対して補間・外挿を行い10 m 間隔の汀線データセット $y(x,t)$ を作成した。ここに、 x は図-1に示す沿岸位置、 t は時間、 y は汀線位置である。なお y は $-3,680 \text{ m} < x < 10,990 \text{ m}$ の範囲で取得されている。このようにして読み取った全結果を図-3に示す。ヘッドランドのある位置では水際位置は読み取られていない。

4. 汀線位置変化の解析

(1) 汀線位置変動：統計量

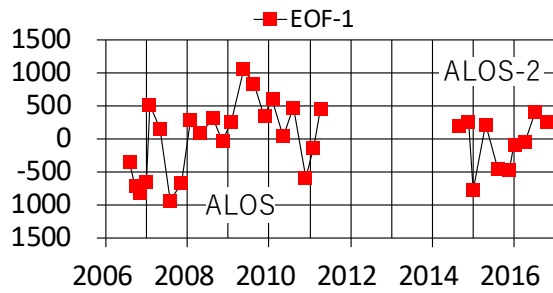
各観測日の平均汀線位置（空間平均値）を求めた結果を図-4に示す。経年的なトレンドは認められず、対象域の海浜は大局的には安定していると考えられる。不明瞭ではあるが、夏季に前進、冬季に後退するという季節的な変動を捉えているようにも見える。

次に、各沿岸位置における汀線の平均位置、変動強度、変化トレンドを求めた（図-5）。平均的な汀線形状はヘッドランドの区間で不連続となっている（図-5(a)）。観測期間中の汀線の変動幅の平均は85 mで、この大きさはXバンドレーダで観測された汀線⁷⁾の変動幅と同等である。汀線変動のRMS強度（図-5(b)）はヘッドランドのある区間で相対的に小さく、漂砂の制御効果が現れていると考えられる。変化トレンドは各沿岸位置の汀線変化に対して線形回帰を行って求めた（図-5(c)）。最近の約10年間では、対象域の両端で汀線位置が前進傾向、中央部で後退傾向にあることを示している。また、 $x=4,000$ から $8,000 \text{ m}$ にあるヘッドランド間では、区間内の北側で正值、南側で負値となる分布になっている。 $x=11,000 \text{ m}$ 付近の汀線位置の前進速度（2.5 m/年）は、同じ領域をXバンドレーダで観測した結果⁹⁾（2009年-2015年、6.9 m/年）よりも小さい。

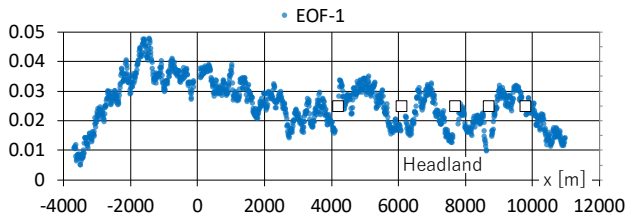
(2) 汀線位置変動：EOF解析

汀線位置の変動を経験的固有関数法⁹⁾（EOF）により解析した。EOFでは、汀線位置の変動を空間分布関数 $C_k(x)$ と時間変動関数 $E_k(t)$ の積で表される複数のモード k ($k=1 \sim n; n=32$) に分ける。その後、卓越するモードが表現すると考えられる地形変動について検討を行う。具体的には、岸沖方向ならびに沿岸方向漂砂によりもたらされていると考えられる汀線変動の抽出を目指す。

汀線位置 $y(x,t)$ より全汀線位置平均値（116 m）を差し引いた上で EOF 解析を行った結果、第1モード（寄与率 43%）と第2モード（18%）が卓越した。なお、続くモードの寄与率は第3モードが5%、第4モードが4%であった。

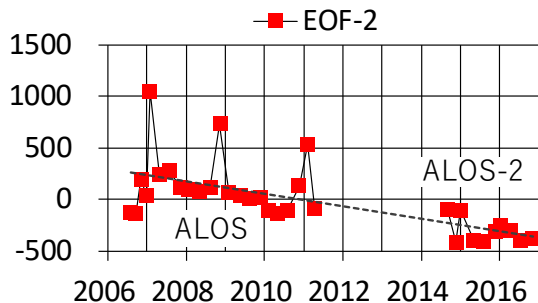


(a)

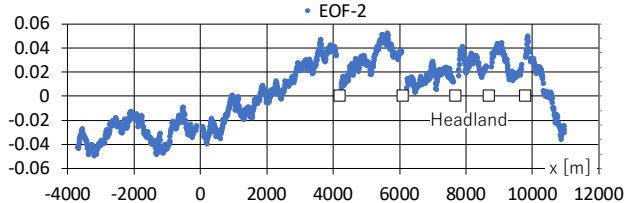


(b)

図-6 EOF解析結果. 第1モード: (a)時間関数, (b)空間関数



(a)



(b)

図-7 EOF解析結果. 第2モード: (a) 時間関数 (破線: 線形トレンド), (b) 空間関数

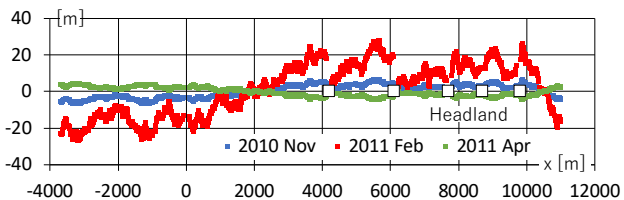
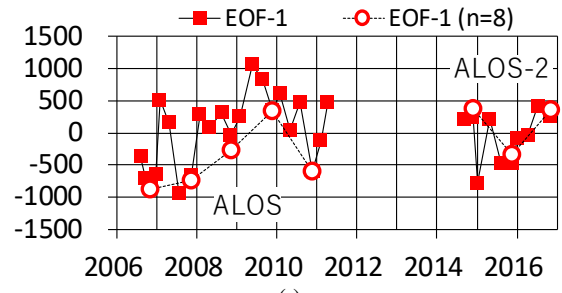
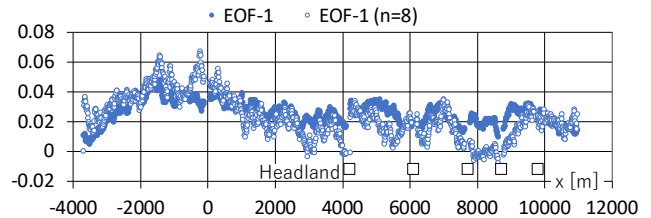


図-8 EOF第2モード: 汀線変化の例
(2010年11月 → 2011年2月 → 2011年4月)

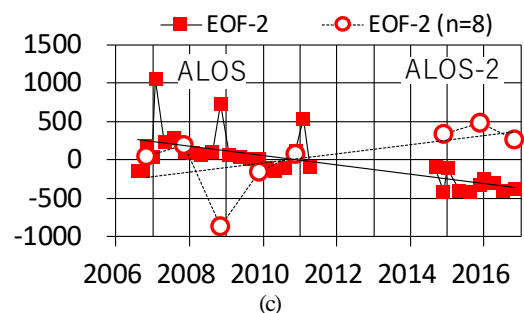
図-6に第1モードの時間関数 $E_1(t)$ と空間関数 $C_1(x)$ を示す。時間関数は平均汀線位置の経年変化 (図-4) との相関が非常に高い (相関係数 = 1.00)。また、空間関数は全て正值で、汀線のRMS変動強度の沿岸分布 (図-5(b)) との相関が高かった (相関係数 = 0.64)。これら



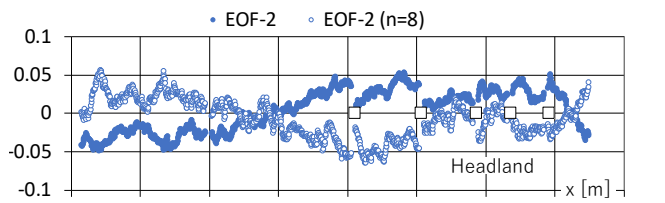
(a)



(b)



(c)



(d)

図-9 EOF解析の結果 ($n=8$)

第1モード: (a) 時間関数, (b) 空間関数

第2モード: (c) 時間関数 (破線: 線形トレンド), (d) 空間関数

より、第1モードは全域的に生じる汀線の前進後退を代表していると考えられる。

図-7に第2モードの時間関数 $E_2(t)$ と空間関数 $C_2(x)$ を示す。時間関数は観測期間を通じて減じるトレンドにあるが、これに加えて秋季・冬季にいくつかの大きな変動 (2007, 2008, 2011) があつた。空間関数は、汀線位置の変化トレンドの沿岸分布 (図-5(c)) との相関が高い (相関係数 = -0.92)。解析期間を通じて、海域の両端で汀線位置が前進傾向、中央部で後退傾向にあることが示されている。

時間関数に見られる大きな変動があつと考えられる期間が含まれる秋季から冬季にかけての汀線変化の一つを図-8に示す。ヘッドランドのある区間では、南側に位

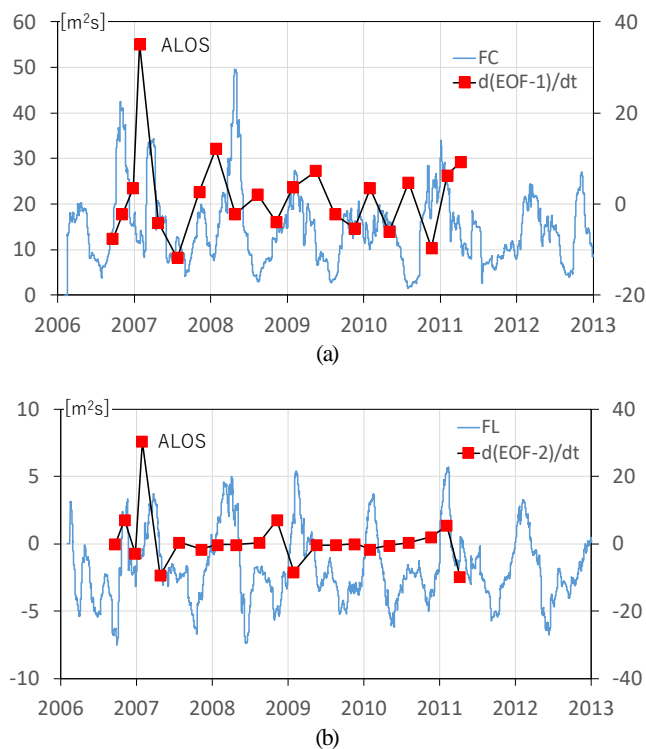


図-10 EOF 解析結果と波浪場の関係性. (a) 第 1 モード時間関数変化率とエネルギーフラックス F_c の 45 日移動平均値, (b) 第 2 モード時間関数変化率とエネルギーフラックス F_L の 45 日移動平均値.

置するヘッドランドに向かって堆積が進み（2010年11月→2011年2月），これが後に解消（2011年2月→4月）したように見える．これは武若ら⁹⁾の観測にも捉えられており，変動の大きさも一致している．以上より，第2モードは対象域内に生じる複数の局所的な汀線の前進後退を代表しており，これは沿岸方向の土砂移動によりもたらされていると考えられる．

(3) 高頻度観測と低頻度観測の比較

汀線位置の変動解析には航空写真，あるいは，衛星の可視画像がしばしば用いられる．この場合，例えば，太平洋側では晴天で大気中の水蒸気が少ない冬季に取得される年に一回取得されるシーンを汀線位置の読み取りに用いることが多い．ここではこれを模擬し，冬季のデータ（毎年末の8シーン， $n=8$ ）のみを用いた EOF 解析を行い，先の全データ（32シーン， $n=32$ ）で行った結果との比較を行う．

EOF 解析を行った結果，先と同様，第1モード（寄与率42%）と第2モード（23%）が卓越した（図-9）．

空間関数は，全データを用いて行った解析の場合と類似した結果が得られた（全データ解析結果に対する相関係数：第1モード = 0.69，第2モード = -0.82）．ただし，第1モードは全データによる解析ではすべて正值であったのに対して，ここの結果には負値が含まれており，全域で一様に生じる汀線変化のみを抽出できていないと考

えられる．

第1モードの時間関数の変化から，全データによる解析で説明した全域で一様に生じたと考えられる季節的な変動を読み取ることは難しい．第2モードの時間関数も同様であり，全データの解析で示唆された秋季・冬季にあった大きな変動（2007，2008，2011）は，2008年の変動のみが捉えられているように見える．一方，解析対象期間にわたる，海域の両端で汀線位置が前進傾向，中央部で後退傾向にあるという傾向は捉えられている．

以上より，年間に複数シーンを取得することにより，季節的な変動を踏まえた解析が可能となることが示された．年に1回のシーンによる解析では，長期的なトレンドを追跡することは可能であるが，季節的な変動成分が含まれている変動を対象とする場合，その解釈が難しくなると考えられる．

(4) 汀線位置変動と波浪場の関連性

全データを対象とした EOF 解析で抽出された汀線変動（第1モード，第2モード）と波浪場の関係性を検討した．

波浪場の分析には再解析結果¹⁰⁾を空間分解能約 7 km にダウンスケールした毎時の再解析データ（JRA-55-Wave-DS，計算期間：1958年 - 2013年）を使用した．分析に先立ち，この再解析データ（波高 H ，周期 T ，波向 θ ，波エネルギーフラックス）の統計量，これらのイベント時の変動特性等を波浪観測結果（NOWPHAS 鹿島港¹¹⁾）と比較し，良好に再現されていることを確認している．以降の分析には沖合およそ 9 km の計算点（緯度 $35^{\circ}52'00''$ ，経度 $140^{\circ}52'00''$ ）の結果を用いる．

EOF 解析より，第1モードが岸沖方向の，第2モードが沿岸方向の土砂移動による汀線変動を表す結果であることが示唆されている．そこで，各モードの時間変化率と岸沖方向エネルギーフラックス F_c ，沿岸方向エネルギーフラックス F_L の関係性を調べた．

EOF 解析で得られたモード1 とモード2 の観測日 t_1 から t_2 にかけての時間関数の変化率は，それぞれ $\frac{E_1(t_2)-E_1(t_1)}{t_2-t_1}$ ， $\frac{E_2(t_2)-E_2(t_1)}{t_2-t_1}$ より定めた．

また，波浪エネルギーフラックス F_c と F_L は以下の量で代表させた．

$$F_c(t) \sim H^2 T \cos^2 \theta \quad (1)$$

$$F_L(t) \sim H^2 T \sin \theta \cos \theta \quad (2)$$

ここで， θ は海岸線に対する波向であり， $\theta = 0^{\circ}$ の場合が直角入射， $\theta > 0$ の場合が北方からの入射である．

図-10 に時間関数の変化率と F_c ， F_L の 45 日移動平均値の関係を示す．第1モード時間関数は，波浪エネルギーが小さいときに増加する，すなわち，対象域の汀線が前進する傾向にあるように見える．一方，第2モード時間関数の変化と沿岸方向波浪エネルギーの関係性は明確で

ない。第3モード以降の時間関数を調べたところ、 F_L との関連をうかがわせる変動があったことより、高次のモードを含めた詳細な解析が必要である。

今後は、上記の分析に加え、波浪エネルギーフラックスの対象域内の空間分布、EOF解析で得られた各モードの空間構造を調べ、対象域の汀線変化と岸沖と沿岸漂砂の関連性を理解することが目標となる。

5. 結び

SAR衛星による高頻度観測結果を用いた鹿島灘南部の汀線変動解析を行い、漂砂系内に生じた汀線変動の季節特性（全域的变化、局所的变化）を説明した。高頻度の観測結果を用いることにより、年1回の観測では抽出できない汀線変動特性を説明した。なお、この海域の土砂量は、汀線変化より判断する限りでは、変化が小さいないし増加傾向にあると考えられる。今後は利根川からの土砂供給を加味した研究を行うことが必要である。

謝辞：この研究は、文部科学省「気候変動適応技術社会実装プログラム（SI-CAT: Social Implementation Program on Climate Change Adaptation Technology）」と日本学術振興会科学研究費補助金の支援の下に行われた。宇宙航空研究開発機構よりPALSAR、PALSAR-2のシーンの提供を、京都大学防災研究所森信人准教授より波浪データの提供を受けた。以上、ここに記して謝意を申し上げます。

参考文献

- 1) 行川修平, 松本顕政, 武若聡: 合成開口レーダによる海岸地形情報の抽出, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 72, pp. I_735-I_740, 2016.
- 2) 赤松空之, 田島芳満, 下園武範, 佐藤慎司: 海岸線モニタリングにおける合成開口レーダの適用性の分析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 73, pp. I_1621-I_1626, 2017.
- 3) 宇宙航空研究開発機構: ALOS/PALSAR, <http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/about/palsar.htm>, 参照 2018-05-09.
- 4) 宇宙航空研究開発機構: ALOS-2/PALSAR-2, <http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS-2/en/about/palsar2.htm>, 参照 2018-05-09.
- 5) 伴野雅之, 栗山善昭, 武若聡: 波崎海岸において過去 50 年間に生じた二つの大規模汀線前進, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 72, pp. I_661-I_666, 2016.
- 6) 武若聡, 文天悦: 鹿島灘南端部の汀線変動の特徴, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 73, pp. I_679-I_684, 2017.
- 7) 武若聡, Elasyed M. Galal: 波崎海岸で観測された 10 年間の汀線分布の変動特性土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 70, pp. I_673-I_668, 2015.
- 8) 武若聡, 川上雄太, 趙卓維, 柳嶋慎一, 栗山善昭: 複数の X バンドレーダによる広域の海岸地形の観測, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 67, pp. I_626-I_630, 2011.
- 9) 例えば Emery W. J. and R. E. Thomson: Data analysis methods in physical oceanography, Elsevier, 638p., 2004.
- 10) 森信人, 志村智也, 釜堀弘隆, Arun Chawla, 安田誠宏, 間瀬肇: JRA-55 にもとづく長期波浪推算と波候特性の解析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 71, pp. I_103-I_108, 2015.
- 11) リアルタイムナウファス: 国土交通省港湾局全国港湾海洋波浪情報, <http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/index.html>, 参照 2018-05-19.

(2018.3.15 受付)

STUDY ON SHORELINE VARIABILITIES OF SOUTHERN KASHIMANADA COAST ANALYZED FROM FREQUENTLY OBSERVED SAR DATA

Satoshi TAKEWAKA, Akimasa MATSUMOTO and Yuuki EBIHARA

Variation of shoreline positions of 16 km-long sandy Kashima Coast, a littoral cell, with Kashima Port at the north end and Hasaki Fishery Port at the southern end, has been observed from SAR (Synthetic Aperture Radar) satellite. Since SAR is able to observe data in day and night times, and cloudy weather conditions, it can frequently collect scenes than optical satellites. In this study, 32 scenes from year 2006 to 2016 observed by ALOS / PALSAR (operated by JAXA, 2006 - 2011), and ALOS-2 / PALSAR-2 (JAXA, 2014 to present) is analyzed to trace long-term and seasonal variations. First, bulk statistics of shoreline position variations are discussed. The variation of overall mean shows some seasonal fluctuation, however, it has no trend meaning the coast is almost stable during the period. Then, EOF (Empirical Orthogonal Function) analysis is applied to separate the variation into several major modes. First mode looks to represent variation of simultaneous and seasonal movements of the shoreline position due to cross-shore sediment, and the second mode due to long-shore sediment. EOF analysis is also done with partial data set, one scene per year, to compare the result with full data set analysis. As a result, we got similar modes for spatial functions of EOF modes, however, temporal functions were quite different. This is showing the frequent acquisition of data is essential to understand the details of shoreline variabilities in a littoral cell, especially the seasonal.