

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月25日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360231

研究課題名（和文） レーダネットワークによる漂砂系内土砂フラックスの高分解能推定

研究課題名（英文） OBSERVATION OF LONGSHORE SEDIMENT FLUX DISTRIBUTION BY RADAR NETWORK

研究代表者

武若 聡 (TAKEWAKA SATOSHI)

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号： 80202167

研究成果の概要（和文）：長さ約 17 km の鹿島灘南部の沿岸地形とフロントをレーダ 4 機で観測するレーダネットワークを構築し、継続的な観測を実施した。対象域の端部、ヘッドランド設置領域、自然状態に近い領域の地形変化をそれぞれ調べた。各観測地点の汀線変動の相関を求めたところ、対象域の中央部とその他の端部に近い領域の変動が逆位相となる特徴的な空間構造が認められた。ヘッドランド周辺、観測領域端部の地形変動を解析して漂砂フラックスの向きと大きさを推定した。

研究成果の概要（英文）： A radar network, set up from four X-band radars, has been operated to observe the morphological changes of a 17 km long sandy coast and propagation of river plume fronts. Shore line positions at the ends of the area, natural sections and sections with coastal structures were measured continuously. Cross correlation analyses on shoreline position variations revealed that an anti-phase variation between central portion and ends of the area was existent. Sediment fluxes were estimated from the shoreline changes around the coastal structures, which showed a seasonal cyclic change.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
総計	7,100,000	2,130,000	9,230,000

研究分野： 工学

科研費の分科・細目： 土木工学、水工学

キーワード： 海岸工学，Xバンドレーダ，汀線，漂砂フラックス，漂砂系，河口フロント

1. 研究開始当初の背景

日本の各地で海岸侵食が問題となってきた。かなりの時間が経過し、その主因が河川から海域への土砂供給減少、沿岸方向の土砂フラックス連続性の遮断などであることは共通の認識となっている。長らく、侵食対策として局所的な土砂ストックを維持する汀線管理が行われてきたが、対策工が漂砂フラックスを変化させるために侵食域が拡大すること

がしばしば見られる。この反省として、漂砂系内の土砂移動の連続性の保存を目指すフラックス管理が提唱され、フラックスを制御し得る構造物、高精度・高密度のフラックス計測技術など、これを実現するために必要な要素技術の具体的な検討が始まっている。フラックス管理では、フラックスの時空間分布を常に把握し、侵食域が拡大する前に土砂供給、対策工などを予防的に施すことを目指す。そのためには、漂砂系内の土砂フラックスを

高解像度・高精度でモニタリングする必要があり、また、このデータを地形予測モデルに提供し予測精度を高める必要がある。

これまでの海岸侵食対策は地先における対応が主であり、現存する土砂の保存を第一に考える。これは局所的な目標、施設計画を立てやすい、構造物の設計技術に蓄積があるなどの利点がある一方、計画の見直し、侵食が予想以上に進んだ時の対応が困難である。この反省として提示されているのが、土砂フラックスの連続性を保ちつつ汀線位置を維持しようとするフラックス管理である。これが実現すれば、順応的・早期の対応、長期的・広域的な侵食対策を立案することが可能となる。しかしながら、土砂フラックスの高分解能・高精度のモニタリング、フラックス制御を可能とする構造物の設計方法などの技術的課題が多く残されている。本研究は、土砂フラックス管理の実現に必要なコアの要素技術の内、土砂フラックスの高分解能・高精度のモニタリング手法の検討を行う。

2. 研究の目的

漂砂系内の土砂フラックスについて理解することを目的として、以下について検討を行う。フィールドは鹿島灘南部海岸（鹿島港～利根川河口、延長約 17 km）とし、港湾空港技術研究所の観測栈橋 HORS をベースに観測を展開する。

- (1) 漂砂系内の土砂フラックス分布をレーダネットワーク観測により高解像度、高精度で推定する観測体系を確立する検討を行う。
- (2) 海岸への土砂供給過程の理解の一環として、河口フロントの挙動をレーダネットワークにより捉える。

3. 研究の方法

(1) レーダネットワークの構築

観測栈橋に既設のレーダ 1 機に加え、その北部に 1 機、南部に 2 機のレーダを港湾空港技術研究所と共同で設置し、レーダネットワークを構成した。1 機の観測範囲は約 3 ～ 5 km であり、4 機のレーダで対象域約 17 km の範囲をほぼカバーした。レーダデータ収録 PC はネットワークで結び、データの取得状況をオンラインで監視した。観測は毎時 00 分から 20 分間行い、静穏時には平均画像とその他の統計処理結果を保存し、波浪場画像は棄てる。荒天時には連続観測を行い、全ての画像を保存し、詳細解析に備える体制を整えた。

(2) データの蓄積

各レーダの観測結果を筑波大学のサーバに収めた。研究実施期間に約 2 年 10 ヶ月分のデータを収集し、初期の解析結果は論文発表した（研究成果・雑誌論文：1）、2）。

4. 研究成果

(1) レーダネットワークによる広域の地形変動解析（研究成果・雑誌論文：1）

南北方向に延びるほぼ直線状の鹿島灘南部（鹿島港南部から利根川河口左岸の波崎漁港、延長約 17 km）の汀線位置を 4 基の X バンドレーダを用い観測している（図-1）。論文の中では、観測栈橋 HORS を原点とする沿岸座標 x を設定する。鹿島港から観測栈橋 HORS 付近にかけての区間（ $-4,000 < x < 4,000$ m）は、構造物の設置の無い自然状態に近いと考えられる海浜であり、残りの区間（ $4,000 < x < 11,500$ m）には 5 基のヘッドランド（HL 1, 2, 3, 4, 5）が設けられ漂砂を制御している。出力の小さいレーダ（Radar-0, Radar-2）からのエコー強度が低いために、後の平均画像の説明で示すように、有効なデータが取得されない領域（ $2,800 < x < 5,200$ m）がある。

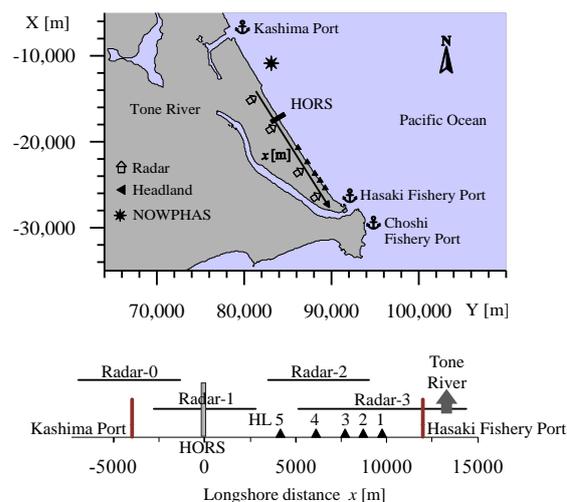


図-1 観測域（上）とレーダ、ヘッドランド（HL）の位置と沿岸座標（下）。

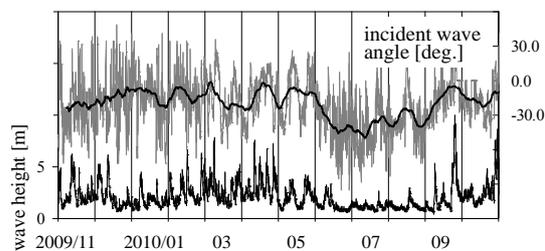


図-2 観測期間中の波高と波向の変化（NOWPHAS, 鹿島港）。波向 0° = 観測栈橋 HORS 周辺の汀線に直角入射，正：北方からの入射。

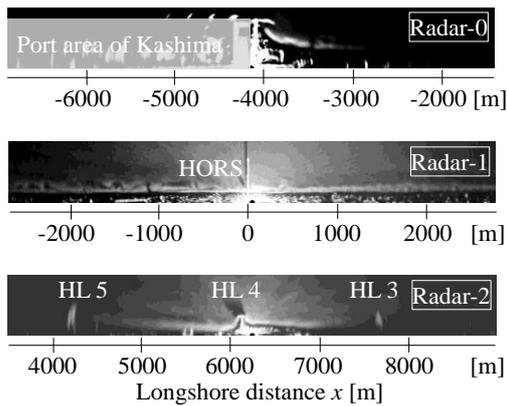


図-3(a) Radar-0, 1, 2 の平均画像. Radar-0 の $x < -4000$ m には鹿島港の岸壁が映っている.

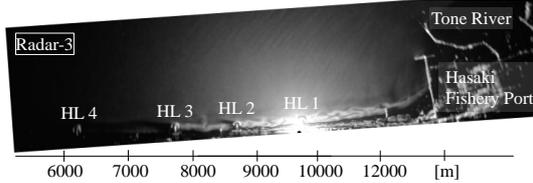


図-3(b) Radar-3 の平均画像

レーダエコーデータは2秒毎にパーソナルコンピュータに記録した. 毎正時からの17分間のレーダエコー画像を平均化した平均画像を収集し, 汀線位置の沿岸方向分布を読み取った(武若, 2010).

本研究では2009年11月から2010年10月に収集された1年間の観測結果について説明をする. 図-2に鹿島港で観測された2時間毎の有義波高と波向の変化を示す(栈橋より北方約5 km, 設置水深24 m, NOWPHAS, 港湾空港技術研究所 海象情報研究チーム). 波向については観測値とその移動平均を示した. 鹿島灘では, 概ね夏季に南方から, 冬季に北方から波浪が入射する時間帯が多くなり, これに対応して波浪エネルギーフラックスの沿岸方向成分は, 夏季に北方, 冬季に南方に向く. 秋季から冬季にかけて, 有義波高が5 mを超える時間帯が頻りに観測されたのに対して, 夏季に観測された波高は小さかった. また, 波向は夏季に南方から入射する時間帯が長くなる. 観測期間中, 2010年5月頃より9月まで, 南方からの入射波が増し, 入射波高が小さかった.

①汀線位置の変化: 平均画像

図-3(a), (b)に観測結果から作成している毎時の平均画像の例を示す. これから, 汀線位置の分布, 観測栈橋 HORS, ヘッドランド, 港湾の防波堤, 河口の形状などを読み取ることができる. Radar-0, Radar-1, Radar-2 の1ピクセルあたりの分解能は5.45 m, Radar-3

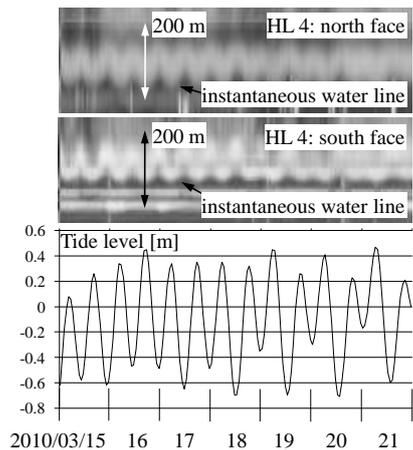


図-4 RADAR-2の平均画像から作成した岸沖ライン画像と潮位変化. (上段) HL4北側 $x = 5,680$ m, (中段) HL4南側 $x = 5,560$ m, (下段) 銚子漁港観測潮位.

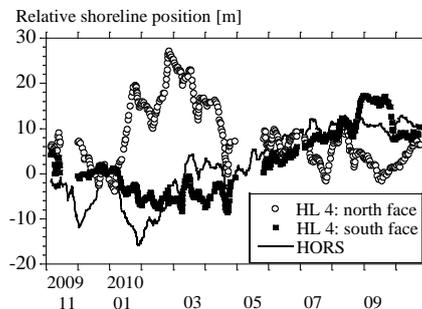


図-5 岸沖ライン画像から読み取った汀線位置の変動. 2009年12月27日を基準位置とする相対変動を表示. HORS周辺 ($x = 490$ m), HL 4の北側・南側 ($x = 5680$ m, 6560 m). 正值: 汀線位置の沖側への変位.

の1ピクセルあたりの分解能は7.23 mである. Radar-0とRadar-2は低出力の小型レーダであり, 送信電波の出力と周方向の観測分解能が低いことにより, 画像の中心部から遠い位置の記録は不鮮明で汀線位置を読み取ることができない.

②汀線位置の変化: 汀線位置

この研究では, 銚子漁港(気象庁観測)で観測された最頻の観測潮位(T.P. 0.1~0.2 m)となる時間に観測された水際位置を汀線とした.

各沿岸位置における汀線位置を読み取るために, 毎時の平均画像から岸沖方向ライン画像(武若, 2010)を沿岸方向におおよそ100 m毎の間隔で作成した(図-4). 図中に示した輝度の明暗部が水際位置であり, 潮汐変動に伴い岸沖方向に変位する. 汀線位置は次の手順で求めた: 先ず, ある沿岸位置で作成した画像から, 潮位により変化する水際の岸沖位置をマニュアル操作で連続的に読み取った. 次に, 潮位が T.P. 0.1 ~ 0.2 m となる時間

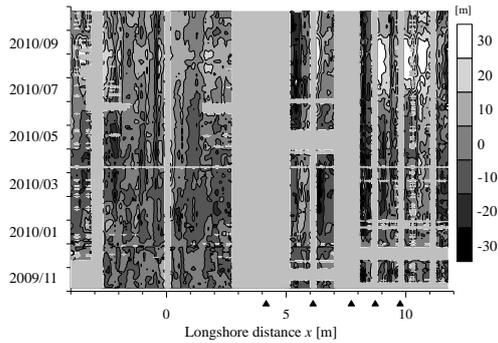


図-6 全域の汀線位置の変動. 2009年12月27日からの相対的な汀線位置を表示. 縦軸: 時間経過. 横軸: 沿岸位置. 正值: 沖側への前進, 負値: 後退. 斜線の示されている位置は, 欠測あるいは平均画像からの読み取りが不可能でデータが取得されていない領域と時間帯. ▲: ヘッドランド.

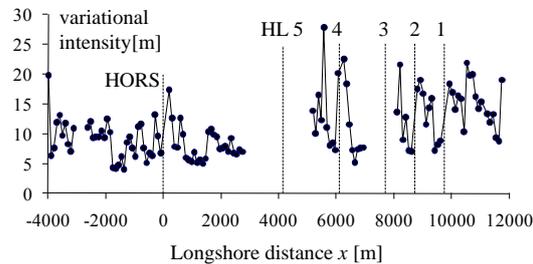


図-7 汀線位置の変動強度の沿岸分布

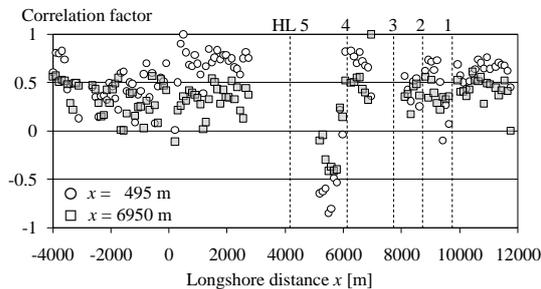


図-8 汀線位置変動の相互相関係数の沿岸分布

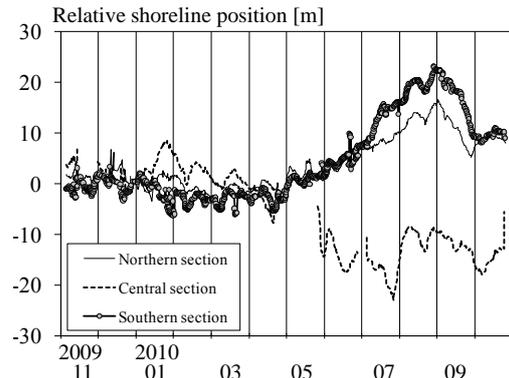


図-9 空間平均した汀線位置の時間変化. 北部 ($-4,000 < x < 2,800$), 中央部 ($5,200 < x < 6,000$), 南部 ($6,000 < x < 12,000$ m).

帯の水際位置を取り出し, その位置における汀線位置の変化を定めた.

図-5 に観測棧橋付近と HL 4 の北側と南側

の汀線位置の経時変化を示す (図-3(a)参照). ここで, 汀線位置は 2009年12月27日の位置を基準とする相対位置として表示した. HL 4 北側の汀線位置は 1月から3月に沖側に約 30 m 変移している. 一方, HL 4 南側の汀線位置は南方からの入射波が多く観測された 2010年5月頃から9月にかけて沖方向に変移している. このように, HL 4 の北側と南側の汀線位置の変化はほぼ逆位相の関係にあり, 宇多ら (2008) の指摘している季節的な波向変化に伴う土砂移動の存在を連続的に捉えたと考えている. 棧橋付近の汀線位置の変動は, 一般的に HL 周辺に比べて小さい.

観測域全体の汀線位置の変化を調べた結果を図-6 に示す. 欠測あるいは平均画像からの読み取りが不可能でデータが取得されていない領域と時間帯が斜線部 (網目パターン) で示されている. 汀線位置の沖側への前進, 陸側への後退が入り混じっており, 複雑な様相を示している. 2010年3月頃までは, 各 HL の北側における汀線位置の沖側への前進が顕著である. その後, 9月までには各 HL の南側の汀線位置の前進, 北側の後退が見られる. これらの変化は5月頃を境に生じており, 先に説明した海象の変化 (図-2) にほぼ呼応している.

各沿岸位置における汀線位置変動の強度を調べた (図-7). ここで, 変動の強度は 2009年12月27日の汀線位置からの相対変位の RMS 値として定めた. HL が設置されている区間, 調査域の端部 (北端: 鹿島港付近, 南端: 波崎漁港付近) における変動が棧橋周辺の構造物が無い区間と比較して大きい.

ある沿岸位置の1年間の汀線変動と他の位置の汀線変動との相互相関を求め, その空間分布を調べた. 図-8 に棧橋周辺 ($x = 494$ m) と HL 4 南側 ($x = 6,949$ m) の位置で相互相関を求めた結果を例示する. 調査域全体の結果を眺めたところ, 中央部の区間 (おおよそ $5,200 < x < 6,000$ m) の変動が, これの北部 ($2,800 < x$) と南部 ($x > 6,000$ m) にある区間と異なる変動していたことを示唆する結果が得られた.

これに基づき, 各区間の汀線位置変動の空間平均を求めた結果を図-9 に示す. 中央部の区間の汀線位置は 2010年5月以降に後退しているのに対して, 北部と南部の区間の汀線位置は前進している. これは, 中央部の区間から, 北部と南部に向かって土砂が移動したという対象域全体にわたるマクロな土砂移動を反映した結果である可能性がある. ただし, 中央部の区間には観測データの得られていない区間 ($2,800 < x < 5,200$ m) が長く隣接しており, 見解を定めるには地形情報を補足, 追加して検討することが必要である.

③ 波浪場の計算

鹿島港で観測された2時間毎の波浪データ(図-2)を用い、波浪計算モデルSWAN(デルフト工科大学)により観測期間の波浪場の計算を行った。海底地形は、海図、深淺測量結果を基に作成されたもので、HLの効果は計算に含まれない。計算格子の大きさは96mとし、波浪場は2時間毎の定常過程の遷移として求めた。まず、観測された波浪データを用い、逆屈折計算により計算領域の沖側波浪条件を定めた。続いてSWANにより対象域の波浪場全体を計算し、砕波点の波高、波向、周期を求め、これから砕波点における岸沖と沿岸方向の波浪エネルギーフラックスを求めた。砕波点は計算された汀線付近のエネルギー散逸率の極大値を与える点として定めた(Elsayed・Takewaka, 2011)。

計算に用いた海底地形は、水深15m以浅は沿岸方向にほぼ様な地形であるのに対して、水深20~30mの等水深線の一部は沖方向に張り出しており、これが計算される波高、波向などの沿岸方向分布に不均一性をもたらす可能性がある。計算で求めた砕波波高、砕波角度の沿岸分布の説明をする：砕波角度は、計算領域全体で負から正値に変化しており、これに波長が数千メートルの局所的な変動が加わっている。砕波角度分布に局所的な変化が見られる領域では、砕波波高が相対的に小さくなっている場合がある。これは、波の収束と発散にもたらされたものと考えられ、その由来は沖の海底地形の不均一性にある。

砕波点位置の年間の岸沖方向エネルギーフラックスC、沿岸方向エネルギーフラックスPを求めた。CとPは波高が大きくなると、スパイク状に増大する。各位置のエネルギーの大小関係は変動しており、海浜に作用する波エネルギーの分布は、海象条件により複雑に変動することが伺われる。

観測された汀線位置は、観測期間中の前半(2009年11月~2010年4月)と後半(2010年5月~2010年10月)で異なる変動を示した。この期間に合わせてCとPの時間平均を求めた。前半の期間は波高の大きい時間帯が多く、計算されたエネルギーフラックスも相対的に大きい。

Cの大小は岸沖方向の土砂移動の程度を代表すると考えられる。Cの分布と図-7に示した汀線位置の変動強度の分布と比較すると、観測栈橋HORS周辺の領域に限定的な相関性が認められた。Cの分布の極値の位置が、おおよそ汀線位置の変動強度が相対的に大きくなる位置と一致した。

Pの沿岸分布の勾配は、沿岸方向の土砂移動の向きと大きさを代表すると考えられる。計算されたPの分布は、両期間とも、マクロ的には対象域の端($x < 1000\text{ m}$, $x > 7000\text{ m}$)に向かって増加し、また、これ以外の領域で

はフラットに分布するものとなっており、これに波長が2,000m程度の変動が重なっている。このPの分布を用い、図-9に示した領域別の汀線位置変動の成因について検討したが、全体を統一的に説明することはできなかった。観測結果を領域別に平均化した際の空間と時間スケールが大きかったことがその一因と考えられ、汀線位置変動をより細かいスケールで分析する必要がある。

(2) 河口フロントの観測(研究成果・雑誌論文:2))

河口フロントは土砂や栄養塩を海域に輸送し、土砂は海浜を形成し、栄養塩はプランクトンを養う。河口フロントの挙動を知ると、河口付近の沿岸環境の理解につながる。本研究では、利根川河口から鹿島港南側までの鹿島灘南部において2010年1月~6月の間に複数のXバンドレーダを用い河口フロントの発生と伝播の状況を観測し、フロントの挙動と、潮位や風向・風速などの自然条件の関係を調べた。

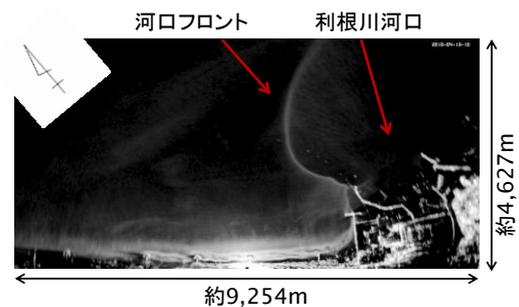


図-10 平均画像(Radar3)：強度2：フロントが明確に確認できる。(2010年4月13日10時)

① フロントの発生状況

レーダから取得される平均画像(図-10)には、高輝度部として海岸線やヘッドランドなどの人工物が映っており、フロントは高輝度部として観測される。この高輝度部がフロントに相当することを海上観測により確認した。レーダ画像で捉えられるフロントの鮮明さには違いがあったため、フロントを鮮明な順に2,1,0の三段階に目視で分類し、フロント強度とした。2010年4月上旬のフロントの発生強度と潮位の関係を調べたところ、潮位が下降しているときに多くのフロントが発生していた。これは、潮位が下降し、河川水が海に流入してフロントを形成したと考えられる。しかし、潮位が下降していてもフロントが発生しない時間帯もあったため、風向・風速とフロント強度の関係を調べた。海岸に直交する風速成分(風速の直交成分、正方向は海から陸へ吹く方向)が5m/s以上と

なっているときにフロントが発生している。このことより、フロントがレーダに捉えられていない時間帯にもフロントは発生していると考えられるので、注意が必要である。2010年1月～6月のフロント発生強度と、風速の直交成分および潮位の変化速度の関係を調べた。フロントの平均発生強度は、風速の海岸線に直交する成分がおおよそ5 m/sの時間帯と潮位の変化速度が負となる時間帯に大きくなった。以上の関係は、レーダのマイクロ波送信方向と、フロントによって増幅された波の進行方向が一致した時間帯にレーダの反射強度が大きくなることを示す。

②フロントの伝播状況

河口付近に発生したフロントの北方への沿岸方向伝播を追跡した。風速の海岸線に平行な成分（風速の平行成分、正方向はフロントの伝播方向と一致）が16時以降に増加し、これに伴いフロントの伝播速度も増加している。フロントの河口付近での伝播速度と風速の関係を調べた。風速の平行成分が増加するに伴い、フロントの伝播速度も増加している。フロントがレーダ3から1の観測範囲に伝播し、消失するまでに進んだ距離をフロントの到達地点と定義し、フロントの到達地点と風速の平行成分の関係を調べた。先と同様、風速の平行成分が増加するとフロントの到達地点も増す。これらの結果から、フロントが沿岸方向に伝播する際には風がフロントの進行を押し出すようにして助け、フロントの伝播速度を増し、到達地点を遠方に行っていると考えられる。

③結論

利根川河口に発生するフロントの挙動をXバンドレーダにより観測し、潮位や風向・風速との関係を示した。具体的には、潮位が下降し風が海から陸に向かう時間帯にレーダ観測によるフロント平均発生強度が増加すること、フロントの伝播速度、到達地点は風速の海岸線に平行な成分とともに増加し、風がフロントの伝播を促進していると推測できることなどの結果が得られた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計3件）

- 1) 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, No. 2, P I_626-I_630, 2011. (査読有)
http://dx.doi.org/10.2208/kaigan.67.I_626
- 2) 五月女尚樹, 武若聡, 中山哲巖, 足立久美子, 栗山善昭, 柳嶋慎一: Xバンドレー

ダによる利根川の河口フロントの観測, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol. 67, No. 2, P I_361-I_365, 2011. (査読有)
http://dx.doi.org/10.2208/kaigan.67.I_361

- 3) 武若聡, エルサイドガラル, 趙卓維: 汀線に現れる波状パターンの沿岸方向の動態, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol. 66, No. 1, P 431-435, 2010. (査読有)
<http://dx.doi.org/10.2208/kaigan.66.431>

〔学会発表〕（計3件）

- 1) 武若聡: 複数のXバンドレーダによる広域の海岸地形の観測, 土木学会海岸工学講演会, 2011年11月10日, 県民情報交流センター, 岩手県盛岡市.
- 2) 五月女尚樹: Xバンドレーダによる利根川の河口フロントの観測, 土木学会海岸工学講演会, 2011年11月11日, 県民情報交流センター, 岩手県盛岡市.
- 3) 武若聡: 汀線に現れる波状パターンの沿岸方向の動態, 土木学会海岸工学講演会, 2010年11月10日, 京都テルサ, 京都府京都市.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

武若 聡 (TAKEWAKA SATOSHI)
筑波大学・システム情報系・准教授
研究者番号: 80202167

(2) 研究分担者

栗山 善昭 (KURIYAMA YOSHIKI)
独立行政法人 港湾空港技術研究所・特別研究官
研究者番号: 60344313

中山 哲巖 (NAKAYAMA AKIYOSHI)
独立行政法人水産総合研究センター・水産工学研究所・水産土木工学部・部長
研究者番号: 40372065