夏季の鹿島灘浅海域で観測された 水温変動とフロントの伝播に関する研究

Observation of coastal fronts in shallow waters of Kashima coast in summer season

行川修平¹・武若 聡²

Shuhei YUKIKAWA and Satoshi TAKEWAKA

Coastal fronts were observed at the research pier HORS at Kashima coast, Ibaraki, Japan, in summer of 2013. Thermistor chain was installed at the tip of the pier and an X-band radar was operated simultaneously. During the observation, coastal fronts approached frequently from the offshore to the pier, inducing abrupt changes in water temperatures, and long crested features which travelled almost steadily to the shore were captured in the radar images. Prevailing components in the spectra of the water temperature and tide level variations, and relationship between the passages of the radar observed fronts and temperature variations suggest that the fronts are internal tides which were propagating to the area.

1. 研究の目的

海面を眺めると、海面の波立ち、表面の色合いなどに違いがあることにより、いわゆる潮目（フロント）があることに気づく。フロントが発生するには様々なメカニズムがあり、その一つは海面下に発達した密度成層を伝播する内部波によるものである。

本研究では、サーミスタチェーンによる夏季の鹿島灘の浅海域の水温観測とXバンドレーダ観測を同期して実施した結果について報告する。港湾空港技術研究所の観測栈橋先端（水深6 m程度）で計測した水温鉛直分布、Xバンドレーダによる栈橋周辺のフロント移動の追跡を2013年8月に行った。フロントが浅海域を伝播する状況、これに伴う水温変動等について説明し、Xバンドレーダ画像とサーミスタチェーンの水温観測結果に現れた特徴的な記録がフロントが密度成層を伝播する内部波に由来することを検討する。

八木ら（1999）は鹿島灘で観測を行い、夏季の成層期におこる水温変動には日周期、半日周期の内部波による影響が現れることを指摘している。さらに、八木ら（2000）は、鹿島灘の大陸棚縁辺海域に観られる内部波は前傾化した非対称性の強い内部潮汐波であること、内部潮汐波は大陸棚淵にあたる水深急変部分の海域において非対称性の強い波形に発達することを観測により明らかにしている。本研究で行った観測結果にも、これらの研究で指摘されているのと類似の水温変動があった。

2. 観測域と観測概要

図-1に観測を行った海域の水深分布、港湾空港技術研

図-1 (上) 観測対象域(鹿島灘南部, 鹿島港～波崎漁港)
(下) AA'の断面図

図-2 サーミスタチェーンの設置状況

究所の観測栈橋HORSの位置、Xバンドレーダ画像の範囲等を示す。2013年7月29日から8月26日の間、HORSの先端（水深約6 m）にサーミスタチェーンを係留し、2分間隔で水温分布の変動を計測した。塩分濃度計も設置した

1 学生会員 筑波大学大学院システム情報工学研究科
2 正会員 工博 筑波大学システム情報系教授

図-3 鉛直平均水温 θ , その24時間移動平均値 $\bar{\theta}$, レーダで観測された栈橋先端へのフロント到達時刻, 潮位(銚子漁港, 気象庁), 風速・風向(銚子, 気象庁)

図-4 水温の計測結果のRMS値 □鮮明なフロント到達時の最上層と底面の水温差, ◇薄く映るフロント到達時の最上層と底面の水温差

図-5 水温分布の鉛直勾配

が, 機器の不調で有効なデータを取得できなかった. 各水温計の設置位置を図-2に示す.

Xバンドレーダ(画像レーダ)はHORSの後浜上にある観測施設に設置されている. Xバンドレーダはマイクロ波を海面に照射し, 海面の凹凸に応じた反射をとらえる(山川ら, 2008). 観測結果は1024×512ピクセルの画像(5.43 m×5.43 m/ピクセル, 岸沖方向2780 m, 沿岸方向5560 m)として記録される. 時間平均画像は毎時0~17分に1枚, 30分~56分の間は2分毎の画像を13枚収録した. 一時間当たり計14枚の平均画像を取得し, 水深約20 mで浅のフロントの伝播状況を解析する.

3. 観測結果

(1) 栈橋先端の水温変動

サーミスタチェーンにより観測した平均水温(全水温計の瞬時平均 θ , 24時間移動平均水温 $\bar{\theta}$)と潮位(銚子漁港, 気象庁), 風速, 風向(銚子, 気象庁)を図-3に示す. 水温変動には半日周期の短期的な変動と長期的な変動成分がある. 半日周期変動は, 特に8月7日~17日の期間において顕著にみられる. 短期的な水温変動については, Xバンドレーダの観測結果を交え, 以降で検討する.

長期的な水温変動は8月12日頃より上昇が見られる. 気象庁が発表している海表面水温のデータによると8月初旬から中旬にかけて黒潮が沿岸に接近し, 鹿島灘の海表面水温が27℃近くまで上昇した. この水温上昇は黒潮の接近によりもたらされたと考えられる.

図-4に瞬時の水温計測結果のRMS値と上下層の水温差を示す. RMS値は以下の式で求めた.

$$\theta_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 (\theta_i - \bar{\theta})^2} \dots\dots\dots (1)$$

θ は底から0.5 mから5.5 mまでの6つの水温計の瞬時平均, θ_i ($i=1\sim6$)は各水温計観測値である. 期間により, 成層の発達状況が異なっており, 8月2日~5日, 18日~21日の期間は他の期間と比べて, 上層と下層の水温差が小さい. 図-5に水温分布の鉛直勾配を示す. 図-4, 図-5より8月2日~5日, 18日~21日は成層の発達が弱い期間であった.

(2) Xバンドレーダで観測されたフロント

レーダに捉えられたフロントの伝播について検討する. Xバンドレーダによって確認されたフロント(図-6(a))とその伝播の一例を図-6(b)に示す. 画像中の明るく表示された線状の領域はレーダのエコー強度が周辺よりも大きくなっている. この線状の高輝度領域を本論文

図-6(a) レーダ画像に捉えられたフロント(2013年7月30日14時30分～32分の平均画像)画像下方中央の白い縦線=観測栈橋(長さ400m)。

図-6(b) レーダ画像に捉えられたフロント伝播(2013年7月30日13時42分～16時40分)画像は複数の観測結果を合成。

図-7 フロント到達時の水温変動(2013年7月30日、31日)
(横棒:レーダでフロントの存在を確認した時間, 黒■:栈橋の沖合にフロントの到達が確認された時刻, □:栈橋先端にフロントが到達した時刻)

図-8 フロンがレーダで捉えられた時刻と水温変動(2013年8月5日～8月12日)
(実線:レーダ画像にはっきりと映るフロントが栈橋先端に到達した時刻, 点線:レーダ画像に薄く映るフロントが栈橋先端に到達した時刻)

ではフロントと考える。線状の高輝度領域は外洋側から海岸に向かって伝播している。

図-6(b)の画像は複数の観測結果を合成して表示したものである。フロントは直線的な分布を保ったまま沖から岸に近づき、接岸後に消滅する。後に議論するように、内部波の伝播によって発生したフロントがレーダに捉えられていると考えているが、レーダ観測の範囲では屈折する様子は見られない。

港湾空港技術研究所が栈橋付近にあったフロントの様子を捉えたビデオ映像を確認した(2013年8月9日、11時～12時)。映像には泡やゴミが海表面に集積し、細く長い帯状になって移動している状況が見られた。同時刻にXバンドレーダによって収録された画像にも、帯状の高輝度部が映っており、同じフロントがレーダ画像にも捉えられていることを確認した。また、サーミスタチェーンで観測された水温変動にも後に説明する特徴的な水温変動が現れた。

期間中に観測されたフロントは35回であった(図-3)。ここでは画像から目視で判断出来るものをフロントとした。その内、図-6(a)(b)と同程度の鮮明さで伝播が確認

されたフロントは13回あった。レーダ画像上の映りが薄く、伝播過程を追うことが難しいフロントが22回確認された。フロントは、成層の発達が弱かった時期にも観測されている。成層の発達の状況とレーダに映るフロントの鮮明さに関係性は見いだせなかった。

(3) 水温変化とフロントの通過

フロントが栈橋付近に到達した時間帯の水温の変動の一例を図-7に示す。フロントの影響と考えられる水温変動はフロントがレーダ画像に映る2、3時間前から始まる。水温が下層から順に下降し始め、フロントが観測栈橋に到達した時点で水柱の大半がその時間帯の最低温となる。フロントが栈橋先端を通過後には、水温は上層から順に上昇し、特に海底から1.5 m地点の水温は2℃程上昇している。

フロントが観測されている時間帯に顕著に表れる水温変動が継続するのは6時間ほどである。水温変動は、緩やかに下降し、急激に上昇するという非対称な変化となっている。このような水温変動はレーダでフロントの発生を捉えた時に常に見られる。図-8に2013年8月5日～12日の水温変動とレーダで捉えたフロント到達を示す。

図-9 フロントの到達によりもたらされる水温変動の継続した時間間隔

この間に、鮮明に映るフロント、薄く映るフロントが確認され、いずれの場合も類似した非対称的な水温変動が起きている。

図-9に水温変動が生じた時間間隔を示す。時間間隔は、底面から0.5 mの地点に係留した水温計の観測値が下降し、その後の立ち上がりを記録した時の間隔とした。これにはレーダにフロントが映っておらず、特徴的な水温変動のみが観測された場合も含まれる。水温変動が生じた時間間隔の多くは8時間～16時間であった。水温は上昇、下降の変動を繰り返し、これがおおよそ半日周期で生じることが多い。先に説明したように、水温変動は非対称な変化である。

図-10に水温の変動成分 θ' ($=\theta-\bar{\theta}$) のスペクトルを、図-11に潮位のスペクトルを示す。スペクトルは高速フーリエ変換によって求めた。気象庁の潮位データが8月24～26日の間、欠測となっていたため、7月11日～8月23日の毎時潮位記録(1024データ)を使用した。いずれの結果にも12時間弱、24時間弱の周期を持つ変動が突出している。

フロントが到達した際の非対称的な水温低下と上昇、水温変動が現れる周期が半日周期、日周期であることは、八木ら(1999, 2000)が述べている内部波による水温変動の特徴と一致しており、ここで観られた水温変動は内部波が浅海域に到達して生じたものと考えられる。また、成層の発達が弱い期間でも、同様の水温変動のパターンがみられ、フロントが到達していると判断される。

レーダにフロントが映っていない時間帯の水温変動について説明する。例えば、7月31日0時～6時にかけてはレーダにフロントは映っていない。しかし、その前後のレーダがフロント伝播の存在を捉えた時の水温変動と類似のパターンの水温変動があった。同様の事は期間中に15回あり、レーダに捉えられていないフロント到達もあったと考えられる。これらの時間帯にフロントが映らなかった原因は不明である。Xバンドレーダの画像がなんらかの理由により不鮮明であった。五月女ら(2011)の議論に習い、フロントが映らなかった原因として、風速、風向の依存性を調べたが、関係性を見出すことは出

図-10 水温変動成分 θ' のスペクトル(解析期間7月30日～8月26日)

図-11 潮位のスペクトル(解析期間7月11日～8月23日)

来なかった。

これまで説明したことを踏まえ、フロントの流動構造について考える。夏季の日射や気温により成層が形成されるため、その水温の異なる層間を内部波が伝わることで水温変動が起こる。図-12のようにフロント伝播に伴う流動が発生し、内部波の山と谷の海面にフロントが形成されると考えられる(柳, 1990)。この内部波の伝播に伴い収束帯が形成され、収束帯付近で海表面にある風波の振幅、波形勾配の増大によりレーダへの反射が増え、帯状の高輝度部としてレーダ画像に映ったと考えられる。

(4) フロントの伝播特性

フロントの伝播速度について考える。画像の岸沖方向に座標系を設け、各時刻にフロントがかかる岸沖位置を調べた。また、各時刻のフロントが延びる方向の法線方向角度と沿岸のなす角度 α を求めた(図-6(b)参照)。 α が 90° の時にフロントは海岸線と平行に、 α が 0° の時にフロントは海岸線と直交する方向に延びる。図-13に7月30日に観測されたフロントの岸沖方向の位置、 α の変化を示す。フロントは一定の速度で岸に近づいており、また、その延びる方向はほぼ一定である。

フロントが延びる方向に直交する方向がフロントの伝播方向として伝播速さ C_R を求めた。 C_R は $0.09 \text{ m/s} \sim 0.3 \text{ m/s}$ であり、 α は $58^\circ \sim 90^\circ$ であった。

フロント伝播速度と内部波の波速(理論値)を比較した。レーダで捉えたフロントの伝播速さ C_R と内部波の波速を比較した結果を図-14に示す。内部波の波速は全層近似 C_T 、二層近似 C_2 の理論式で求めた。

図-12 フロントの伝播に伴う流動と収束帯の発生。柳(1990)を参考に作成。

図-13 フロントの岸沖方向の移動速さと方向(2013年7月30日)

$$C_T = \sqrt{\varepsilon g H} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$C_2 = \sqrt{\varepsilon g h_1 h_2 / (h_1 + h_2)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここでは ε は無次元海水密度勾配、 g は重力加速度、 H は全水深、 h_1 は上層の厚さ、 h_2 は下層の厚さである。 ε は水温の観測結果から推定した海水密度の鉛直勾配とした。 h_1 、 h_2 は水温分布が急変する高さから定めた。海水密度の鉛直分布は各位置で観測された水温から、海水の状態方程式(UNESCO式)により求めた。この際、塩分は観測初期に塩分濃度計で観測された、30%とした。

観測値 C_R (0.1~0.3 m/s) は理論値 C_T 、 C_2 と同じオーダーにあるが、全般的に大きくなっている。一つの原因として、海域にあった流れに内部波が乗り、 C_R が理論値よりも大きくなっていた可能性がある。

これまでに述べたように、フロント到達に伴い水温の変動が継続する時間はおおよそ6時間である。また、フロント伝播速度は最大で0.3 m/sである。よって内部波の波長は6,000 m程度(～0.3 m/s×6 h×3,600 s/h)と推定される。

図-1に示したレーダ観測範囲の海岸線から沖合にかけての海底地形断面図によると、栈橋の沖合12,000 m～15,000 mの水深は約50 mであり、ここで海底地形の勾配が急変している。一般に海底地形急変部で潮流が強い鉛直流を生み、密度境界面を振動させることにより、潮汐

図-14 フロントの伝播速さ。観測値と理論式(●二層近似、□全層近似)の比較

周期をもった内部波が発生するとされている(例えば、柳, 1990)。この海底地形勾配の急変位置は、内部波の発生源の候補である。

4. 結論

成層が発達する夏季の鹿島灘浅海域で浅海域に到達するフロントに関する観測を行い、水温変動の特徴、伝播の状況等を調べ、以下について見解を得た。

- Xバンドレーダによる観測結果より、フロントがサーミスタチェーン到達時に水温変動がみられる。このフロントの発生は内部波によるものだと考えられる。
- 伝播速度は0.1 m/s～0.3 m/sである。フロントは一定の速度で移動し、屈折は見られなかった。
- フロントの浅海域における流動構造を推定した。

謝辞：観測に際し港湾空港技術研究所の柳嶋慎一氏に多大なる支援を頂いた。水産工学研究所の八木宏氏には観測データの分析について助言を頂いた。ここに記して謝意を申し上げます。本研究の一部は科学研究費(24310026)の補助を受けて行われた。

参 考 文 献

- 五月女尚樹・武若 聡・中山 哲・足立久美子・栗山善昭・柳嶋慎一(2011): Xバンドレーダによる利根川の河口フロントの観測, 海岸工学論文集, Vol.67, pp.361-365.
- 八木 宏・日向博文・足立久美子・日向野純也・灘岡和夫(2000): 鹿島灘海岸域における日スケールの水温変動と物質輸送特性, 土木学会論文集, No.642/II-50, pp.87-98.
- 八木 宏・Mohd Azhar・日向博文・灘岡和夫・中山哲哉・足立久美子(1999): 大陸棚縁辺海域における非線形内部波の基本特性について, 海岸工学論集, Vol.46, pp.396-400.
- 柳 哲雄(1990): 潮目の科学, 恒星社厚生閣, 169p.
- 山川泰司・武若 聡・桜井 崇・柳嶋慎一(2008): 離岸流観測へのXバンドレーダ利用に関する検討, 海岸工学論文集, Vol.55, pp.91-95.