

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

八 木 宏* ・Mohd Azhar** ・日向 博文***
灘 岡 和 夫**** ・中山 哲 巖***** ・足立久美子*****

1. はじめに

最近の現地観測に基づく研究によって、内部波や内部潮汐が湾口部を介した内湾―外海間の海水交換や開放性海岸域における動植物プランクトン・魚介類の浮遊幼生などの生物輸送に重要な役割を果たしていることが明らかにされつつある(例えば、藤原ら, 1995; 杜多ら, 1997; 上野ら, 1999; 八木ら, 2000)。今後、沿岸環境に与える内部波の影響をより正確に把握していくためには、その発生領域となる大陸棚縁辺海域まで含めて、内部波(内部潮汐)の発生→伝播→減衰という全体像を明らかにし、湾口部や海岸域に来襲する内部波の基本的な性質(輸送能力や混合能力など)を定量的に評価していくことが必要である。

そこで本研究では、内部波発生のソースとなっている大陸棚縁辺海域の役割と、そこで励起される非線形内部波の挙動に着目し、それが沿岸域へどのような影響を与えるかを理解するために、新たに大陸棚縁辺部まで含めた広域現地観測と内部波形成の数値実験を行うことによって、沖合から沿岸に向かう非線形内部波の特徴と変形過程の解明を試みた。

2. 現地観測概要及び観測結果の基本的な特徴

(1) 現地観測概要

現地観測は、大陸棚が比較的発達している本州東岸海域の鹿島灘において実施した。観測期間は、1999年7月24日から8月28日までの約1ヶ月間である。観測内容は、①対象海域における水温・塩分・流速等の連続計測(茨城県川尻崎〜須田浜の沿岸距離約100 km, 距岸20 kmの海域に全11カ所の係留観測点を設置)、②観測船(水産工学研究所所属『たか丸』)による大陸棚縁辺域定点における24時間連続観測である。今回の研究では、大陸棚縁辺域から沿岸に向かう非線形内部波の挙動に着目

していることから、観測海域内でも岸沖方向に観測点が密に配置された須田浜沖の岸沖断面に設置された観測点 Sta. S1~S5 (図-1 参照) による長期連続計測結果と、観測船による大陸棚縁辺域における集中観測結果に基づき、非線形内部波の基本的な特徴に関する検討を行った。

(2) 大陸棚縁辺域―海岸域間の内部波の特徴

図-2 は、大陸棚縁辺域―海岸域間の内部波の性質の変化を示すために、Sta. S1~S4 の水温のパワースペクトル(水位面下10~15 m の位置, 周期27時間以下を表示)を示したものである。これから、i) いずれの観測点においても内部潮汐に相当する日周及び半日周期の変動成分にピークがあり、対象海域の水温変動が基本的には内部潮汐によって特徴づけられていること、ii) 大陸棚縁辺域において顕著な半日周内部潮汐成分とそれより高周波の内部波成分が海岸域において大きく減衰していることなどがわかる。そこで、このように内部潮汐波成分とともに大陸棚縁辺域において顕著な内部波高周波数成分の実態を把握するために、水温データの時系列を調べた。図-3 は、観測期間中の8/18~19の2日間について、水面下10~15 m の水温時系列を示したものであり、(a) は Sta. S1~S4 の比較を、(b) は (a) の一部 (Sta. S1 の横矢印で示した部分) をさらに拡大して表示したものである。これを見ると、i) 内部潮汐に対応した半日周期の水温変動は、大陸棚縁領域を中心として鋭く切り立った非対称性の強い水温波形を示していること、ii) 周期20~40分程度の短周期内部波が多数発生していることがわかり、この両者が先に示した周波数特性の高周波成分

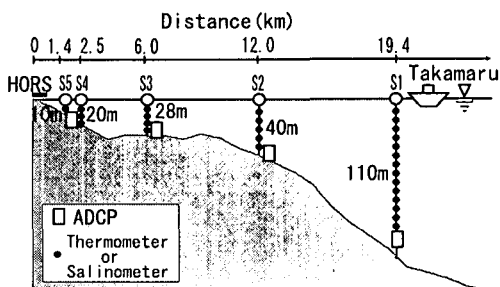


図-1 須田浜沖観測線の断面地形と計測機器の設置状況

* 正 会 員 博(工) 東京工業大学助教授 工学部土木工学科
** 元東京工業大学工学部開発システム工学科
*** 正 会 員 博(工) 運輸省港湾技術研究所海洋環境部
**** フェロー 工 博 東京工業大学教授 大学院情報理工学研究科
***** 正 会 員 工 修 水産庁水産工学研究所水理研究室長
***** 正 会 員 水 修 水産庁水産工学研究所主任研究官

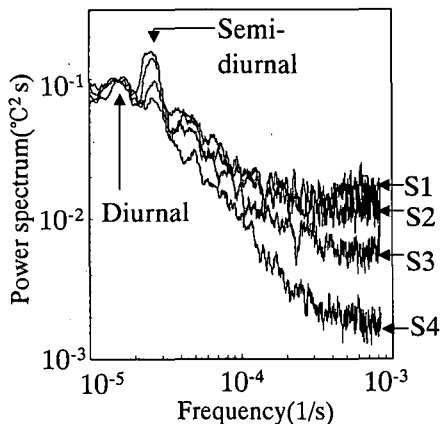
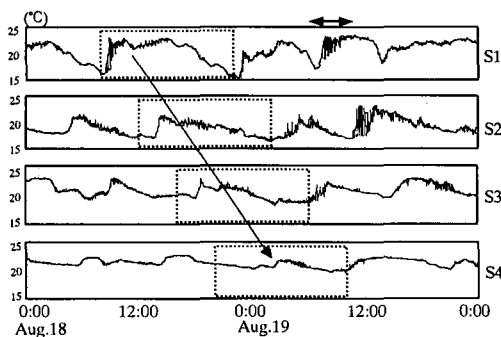
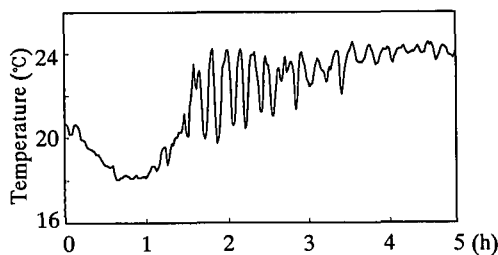


図-2 Sta. S1～S4 の水温変動パワースペクトルの比較
(水面下 10～15 m)



(a) Sta. S1～S4 の水温時系列生データの比較



(b) 上図 (a) 中の横矢印区間の拡大表示

図-3 高周波サンプリングによる水温の時系列
(水面下 10～15 m)

分の実態であるといえる。そこで本研究では、大陸棚縁辺域の内部波を特徴づけているこの 2 種類の非線形内部波（短周期内部波と非対称内部潮汐波）について詳しく検討を行った。

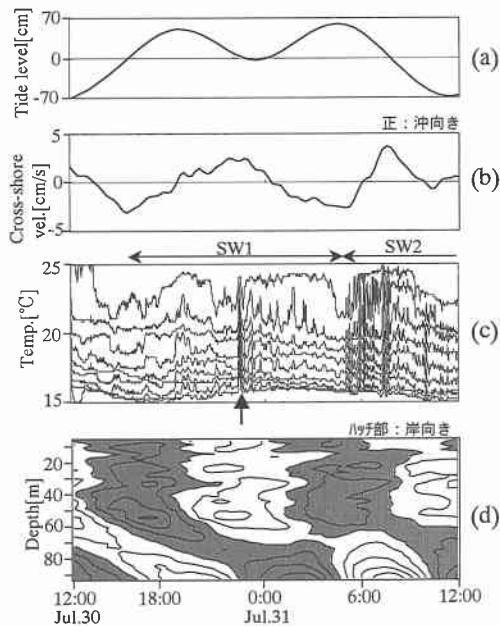
3. 短周期内部波の基本特性

周期 20～40 分程度の短周期内部波の内部構造を把握するためには、時間解像度の高い流速及び水温の計測が

必要である。ここでは観測船たか丸による集中観測結果を中心に検討した結果について示す。なお、集中観測は、1999 年 7 月 30 日 12:00 から 7 月 31 日 12:00 までの 24 時間にわたり、観測船を Sta. S1 の近傍（水深 110 m, 図-1 参照）に係留し、船舶から吊り下げたサーミスターチェーン（水面下 50 m まで）と船舶搭載型 ADCP（水面下 55 m まで）による水温・流速の高周波サンプリング（流速 30 s, 水温 60 s 間隔）及び 1～2 時間間隔の CTD による塩分水温鉛直分布計測を実施した。

図-4 は、サーミスターチェーンによる各層水温（水面下 50 m まで 5 m 間隔）の計測結果 (c) を (a) 潮位変動、(b) Sta. S1 に係留した ADCP による岸沖流速成分の水深平均値（順圧成分）及び (d) その時空間分布とともに表示したものである。これを見ると、岸沖流速や水温の時空間変動特性などから、集中観測期間中には半日周内部潮汐 2 波（以後 SW1, SW2 と呼ぶ）が観測点を通過している様子がわかり（日潮不等が大きいため変動レベルには差がある）、短周期内部波はその内部潮汐に付随した形で存在している。個々の短周期内部波の並びに着目すると、SW2 についてはあまり明確でないものの、SW1 では図中に上向き矢印で示した短周期内部波を先頭に波高が大きいのほど前に位置する形となっている。これらの特徴は、短周期内部波が半日周内部潮汐の運動に伴って発生した内部波ソリトン波列であること、但し、発生領域が観測位置から比較的近い内部波列が十分に発達しない場合があることを示唆している。

次に、短周期内部波の内部構造を示すために、図-4 中に上向き矢印で示した短周期内部波について、水温の時空間分布と内部波進行方向流速の短周期成分（潮汐成分以上は除去）の鉛直分布を図-5 に示す。これを見ると、短周期内部波は下向き凸の空間構造を示し、周期 30 分程度、波高は 20 m 以上に達していることがわかる。流速は、内部波が下向き凸のピーク時に、水面下 20～30 m の水深帯を中心として内部波進行方向に最大流速を示し、流速レベルは 40 cm/s 程度に達している。また図には、観測結果に基づいて算出した全域的リチャードソン数 ($gH(\Delta\rho/\rho_0)/(\Delta U)^2$, $\Delta\rho$: 躍層上下の密度差 1.04 kg/m³, ρ_0 : 基準密度 1024 kg/m³, H : 密度躍層厚 20 m, ΔU : 流速鉛直分布中の最大流速差、数値はいずれも観測値に基づき算定) も併せて表示しているが、これを見ると、内部波が下向き凸のピーク時にリチャードソン数が 1 程度と最小となっている。これは、成層場が一般に不安定になるとされるリチャードソン数 0.25 までには達していないものの、場に共存する内部潮汐波などと重合することで、局所的に鉛直混合を引き起こすことは十分に考えられる。既存の成層場に対する乱流モデルでは、このような短周期内部波の効果は評価されていないが、今回



図一四 集中観測期間中の (a) 潮位変動, (b) Sta. S1 における水深平均岸沖流速, (c) 各層水温の時系列, (d) Sta. S1 における岸沖流速成分の水深平均値からの偏差の時空間分布 (コンター間隔: 2 cm/s)

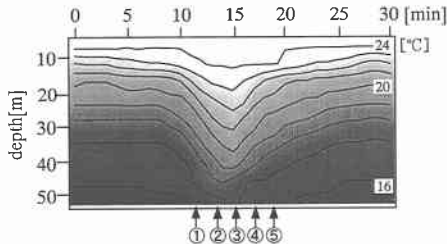
の観測結果が示すように、短周期内部波は特に大陸棚縁辺域を中心とした成層海域でかなり頻繁に発生していると考えられ、今後鉛直乱流過程のモデリングに何らかの形で反映させることが必要である。

4. 非対称内部潮汐波の基本特性

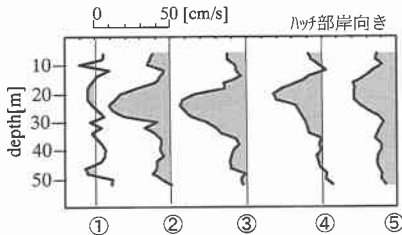
(1) 非対称内部潮汐波の内部構造

内部潮汐波による水温変動パターンの岸沖方向への変化を調べてみると、例えば先述の図一三(a)に示したように、最沖合の Sta. S1 では矩形波的な変動パターンを示していたものが、Sta. S2 では前後の非対称性の強い前傾化した三角波状に大きく変化しており、Sta. S3, S4 と進むにつれてそれが減衰する様子が多くの場合に見られた。そこでここでは、前傾化した非対称の強い内部潮汐波の内部構造を観測結果に基づいて検討した。

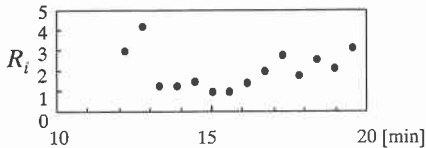
図一六(a) は、図一三中に破線で囲った内部潮汐波の Sta. S2 における水温及び岸沖流速成分の時空間分布を示したものである。但し、岸沖流速については水温時空間分布図中の横矢印で示した内部潮汐 1 波を拡大して表示している。まず、水温の時空間分布を見ると、i) 水深 40 m の Sta. S2 においても内部潮汐波の波高 20 m 以上に達していること、ii) 内部潮汐波はその前面部が衝撃波のように鋭く切り立ち (図中上向き矢印部)、後部は緩やかに変化する空間波形を有していることがわかる。



(a) 水温の時空間分布



(b) 内部波進行方向流速成分の鉛直分布 (上図 (a) の矢印で示した各時刻に対応)



(c) リチャードソン数の経時変化

図一五 短周期内部波の内部構造

一方、流速分布は、基本的には上下層が逆向き流速となる内部波 1 次モードの鉛直構造となっているが、水温分布に見られた切り立った内部波形の前面部 (図中上向き矢印部) では流向も急変していることが特徴である。また、図には内部潮汐波のエネルギー減衰に密接に関係した密度躍層周辺の岸沖流速鉛直勾配の 2 乗量 (du/dz)² の経時を併せて示している。これを見ると、鋭く切り立った内部波前面部直後に鋭いピークが生じており、この部分が内部潮汐波のエネルギー減衰や混合に重要な役割を果たしていること示している。さらに図一六(b) は、Sta. S2 から岸側に 6 km 離れた Sta. S3 (水深 26 m) における内部潮汐波の内部構造を示している。Sta. S2 とくらべ流速変動レベルは減少しているが、衝撃波的な波形前面部の切り立ちやその直後の大きな鉛直流速勾配は維持されており、これは非対称内部潮汐波が沿岸に近づくにつれてエネルギーを減衰させながらも、非対称な波形を維持する性質があることを示している。

(2) 数値実験に基づく内部潮汐波の変形過程の検討

現地観測結果に基づく検討によって、内部潮汐波が大陸棚縁を通して沖合から沿岸に進入する際に、その空間波形を大きく変形させ、衝撃波的な非対称性の強い内部

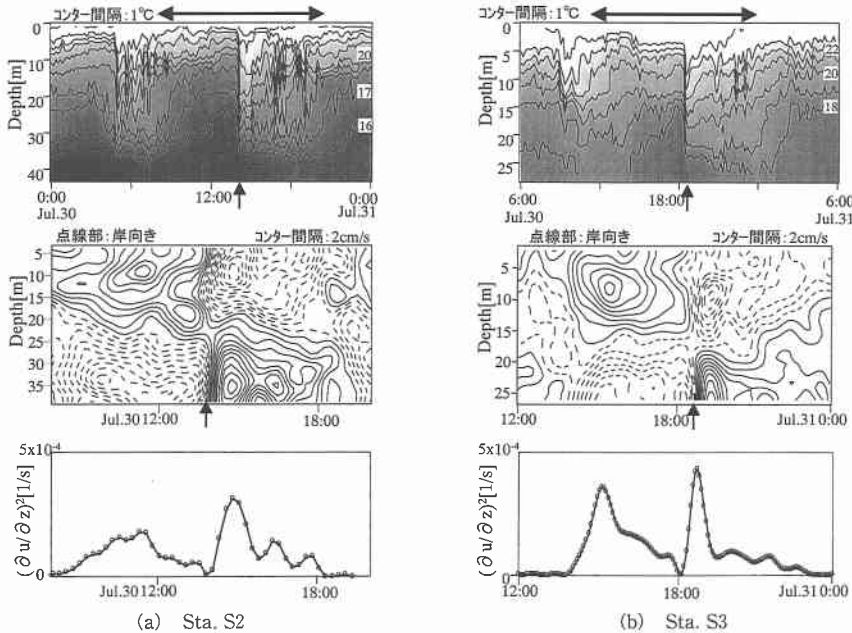


図-6 Sta. S2, S3 における非対称内部潮汐波の内部構造
(上段：水温，中段：上段図中の横矢印区間の岸沖流速時空間分布，下段：岸沖流速成分の鉛直勾配 2 乗量)

潮汐波になることが示されたが，本節ではこのような内部潮汐波の変形が引き起こされるメカニズムを数値実験によって検討した。数値実験に用いた数値モデルは，英国プラウドマン海洋研究所の Xing 博士によって開発された 3 次元流動モデルであり，モデルの基本構成として，①シグマ座標，②水平渦動粘性はスマゴリンスキーモデル，鉛直渦動粘性は Meler & Yamada レベル 2.5 モデル，③時間発展のアルゴリズムにタイムスプリット法を採用している（モデルの詳細は，Xing & Davis, 1997 参照）。

数値実験は，観測海域の Sta. S1-S5 を通る岸沖断面を計算領域とし，断面 2 次元計算の枠組みで内部潮汐の発生とその沿岸への伝播過程を再現することを試みた。計算初期条件は，観測期間中の代表的な密度鉛直分布を関数近似したものを計算領域に一様に与えた。一方，境界条件は，大陸棚縁辺部の Sta. S1 に相当する地点での順圧潮流速が観測結果と同レベルとなるように沖側境界において順圧的な流速変動（周期 12.5 時間）を与えた。なお計算は，約 7 日間（14 潮汐）行い，ほぼ平衡状態に達したと考えられる 14 潮汐目を解析に用いている。

図-7 に， $t=10.2$ h（14 潮汐目の開始時を $t=0$ とする）における岸沖流速成分の空間分布を示す。図には，線形理論に基づく内部波の特性曲線も併せて表示しているが，両者を比較すると，大陸棚斜面上で発生した内部潮汐波が陸棚斜面に沿うように岸向きに伝播し，大陸棚

縁辺域において水表面で反射した後，浅海域に進入して，大陸棚上では上下層で流向が逆転する内部波 1 次モード的な流速場を形成していることがわかる。これは，図-5，6 に示した観測結果による流速構造に一致するものである。

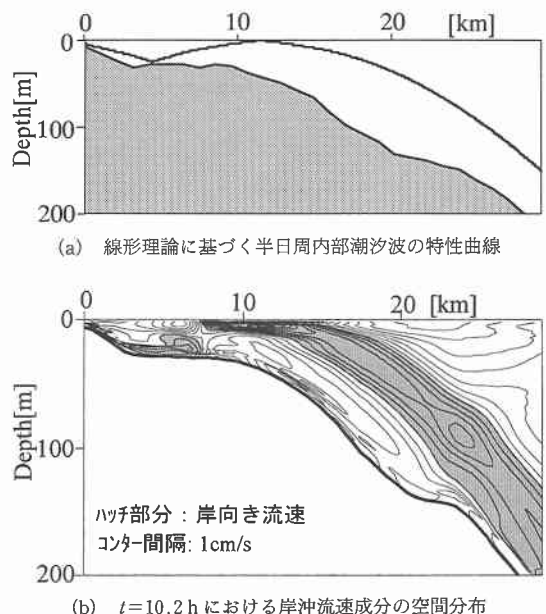


図-7 計算結果 I（流速場）

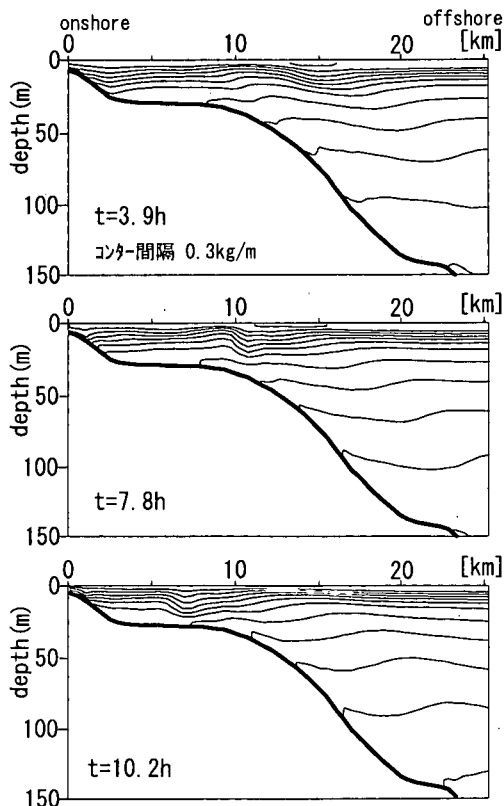


図-8 計算結果II (密度空間分布の経時変化)

次に、密度の空間分布を用いて内部潮汐波の変形過程を示す(図-8)。これを見ると、図-7に示した流速場に対応して、大陸棚斜面上から沿岸に向かう内部波が表層付近の密度躍層に変動を与え、それが岸に向かって伝播する様子が数値実験によって再現されている。ここで特徴的なことは、沖から岸に向かう内部潮汐波が大陸棚縁の水深急変部において波形が大きく変形し、観測結果にも現れたような前傾化した形状に変化することである。これは、非対称内部潮汐波の形成に関して大陸棚縁部の地形変化が重要な役割を果たしており、水深変化に伴う移流効果が波形を変形させるのに重要な役割を果たしていることを示唆している。

5. おわりに

本研究で得られた知見は以下のとおりである。

(1) 大陸棚縁辺海域における内部波は、潮汐成分(内部潮汐)とともに高周波成分が顕著である。これは主に、①前傾化した非対称性の強い内部潮汐波と②周期20-40分程度の短周期内部波によるものである。

(2) 短周期内部波は、内部潮汐波に付随した形で発生したソリトン波列と考えられる。

(3) 内部潮汐波は、大陸棚縁にあたる水深急変部分の海域において、三角波的な非対称性の強い波形に変形する。この前傾化した内部潮汐波は、切り立った内部波前面直後で大きな鉛直シアを持ち、この部分が内部潮汐のエネルギー減衰に重要な役割を果たしている可能性がある。また、数値実験により、内部潮汐波の前傾化が大陸棚縁辺域の急激な水深変化に伴う移流効果によることを示した。

謝辞：本研究の観測を行うにあたって協力して頂いた水産庁水産工学研究所観測船『たか丸』の乗組員の方々に謝意を表します。また、本観測を行うにあたって ADCP (300 kHz) を快くお貸し頂いた長崎大学工学部野口正人教授、中村武弘教授、多田彰秀助教授に謝意を表します。本研究は文部省科学研究費基盤研究(c)『開放性海岸に発達する広域沿岸境界層の空間構造計測現地実験と広域漂砂モデルの構築』(代表者：八木 宏)の補助を受けて行われたものであることをここに付記する。

参考文献

- 上野成三・灘岡和夫・高山百合子・片岡徳男・岡田美穂・関根義彦・高井秀博 (1999): 水質環境の動的変化に着目した英虞湾の現地観測, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 1051-1055.
- 杜多 哲・阿保勝之 (1997): 内部潮汐による五ヶ所湾の海水交換, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 1166-1170.
- 藤原建紀・高橋哲也・阿保勝之・杜多 哲 (1995): 内部潮汐の sill 越えによる英虞湾への湾外低温水の侵入, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 1111-1115.
- 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, pp. 87-98.
- Xing, J. and Davis, A. M. (1997): Influence of wind effect upon internaltides in shelf edge regions, Journal of Physical Oceanography, Vol. 27, pp. 2100-2125.