— 論 文 —

相模湾中央部で観測された内部潮汐の鉛直構造と間欠性 *

北出 裕二郎[†] ・ 松山 優治[†] ・ 石丸 隆[†] ・
才野 敏郎[‡] ・ 中村 哲也^{**} ・ 石井 美帆[†]

要 旨

相模湾中央部における内部潮汐の鉛直構造と間欠性を解明するために、科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業 (CREST) において 2002 年冬季から初夏に実施された流速・水温記録を解析した。ADCP で得られた流速記録には、200 m 深付近の主温度躍層を中心として顕著な半日周期、100 m 以浅には一日周期の変動が認められた。4 月 7 日に北向きの強い流れとともに水温が急激に上昇し、成層が大きく変化したため、その前後に分けて解析した。表層混合層の発達した観測前半には、半日周期内部波の振幅は主温度躍層で大きく、位相は下層に向かい遅れる傾向が見られた。しかし、半日周期 (M_2 成分) の変動は、潮流楕円の形状が円に近いことから、単一波によるものではなく、複数点で発生した波あるいは入射波と反射波の合成によるものと考えられた。次に、半日・一日周期帯の運動エネルギー密度の時間変化を追求した。半日周期帯のエネルギーは、観測前半ではほぼ大潮小潮周期で変動し、250 m 深付近で比較的大きかったが、成層が変化した後の 4 月下旬以降では 200 m 以浅で大きくなっていた。一方、一日周期帯のエネルギーは、基本場の流れが強くなった時に 200 m 以浅で大きくなる傾向が認められた。この基本場の流れは、相模湾へのイベント的な黒潮系暖水の進入や黒潮流軸の接近に伴い強められていたことが判明した。さらに、基本場の流れが強かった観測後半には一日周期帯のピークが 28.8 時間周期に現れていたが、これは基本場の流れによって一日周期内部波の周期が変調したものと推察された。

キーワード：内部潮汐，相模湾，黒潮，ADCP，CREST

1. はじめに

内部潮汐は海底地形の急変域で潮汐流により生成されて、海中の鉛直密度差に伴う重力を復元力として伝播する。内部波・内部潮汐に関する研究は、発生・伝播・減衰などの物理的興味だけでなく、海水の鉛直混合へ果たす水産学的な役割や沿岸漁業における防災の面から、古くから盛んに行われてきた。日本沿岸における内部潮汐の発生域としては、海底地形の急変域であるとともに外部潮汐に伴う流れが強く、安定した密

* 2004 年 4 月 14 日 受領；2004 年 6 月 11 日 受理
著作権：日本海洋学会，2004

[†] 東京海洋大学海洋科学部
〒108-8477 東京都港区港南 4-5-7
主著者 e-mail address : ykitade@s.kaiyodai.ac.jp

[‡] 名古屋大学地球水循環研究センター
〒464-8601 名古屋市千種区不老町
(兼) 科学技術振興機構
〒332-0012 埼玉県川口市本町 4-1-8 川口センタービル

^{**} 日油技研工業 (株) 海洋事業推進室
〒171-0022 東京都豊島区南池袋 2-22-1 第 3 高村ビル

度成層が存在する伊豆小笠原海嶺や東シナ海、三陸から常磐沿岸などが挙げられる (Kitade and Matsuyama, 2002; Kuroda and Mitsudera, 1995, Matsuno, 1991)。

伊豆小笠原海嶺の北部で発生した半日周期内部波は大島の東と西の水道を通して相模湾 (Fig. 1) へ入射し (Ohwaki *et al.*, 1994), 湾内では入射波と湾奥沿岸での反射波が干渉して波の振幅が局所的に強められることが明らかになっている (Kitade and Matsuyama, 1997)。一方, この緯度帯で慣性周期よりも長い一日周期の内部潮汐は, 伊豆海嶺北部で発生しても大島に捕捉されることを除けば相模湾へは入射できず, そのほとんどが駿河湾へと伝播する (Ohwaki *et al.*, 1994)。そのために, 相模湾で観測される内部潮汐は半日周期のものがほとんどであるが, 駿河湾では全般に一日周期のものが卓越している (Ohwaki *et al.*, 1991)。

内部潮汐は密度成層場を伝わる波であるため, 成層の変化に敏感に対応して位相速度や伝播方向が大きく変化する。実際に, 相模湾上層の複数点で観測した結果では, 内部潮汐の振幅やその分布は成層場により変化することが示されている (Kitade and Matsuyama, 1997)。相模湾内の成層構造は, 海面の加熱冷却などの季節的な変化に加え, 黒潮の流軸変動に伴う暖水の進入にも大きく依存している (Kawabe and Yoneno, 1987; Kitade *et al.*, 1998)。成層の変化に伴い発達した内部潮汐は, 沿岸漁業に被害をもたらすことがある (松山ら, 1992)。内部潮汐は, シア不安定や碎波を引き起こし鉛直混合へと寄与すると考えられる (Kitade *et al.*, 2003)。したがって, 基本場の流れと内部潮汐の間欠性との関係を明らかにすることは内部潮汐の減衰過程だけでなく, 物質輸送を調べるうえでも重要である。

これまでの相模湾における内部潮汐の研究は, 夏季から秋季にかけて 100 m 以浅に発達する強い密度躍層における波の境界面波的な挙動を対象としたものであり, 季節躍層以深での内部潮汐やその消長など不明な点は少なくない。本研究では, 科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業 (CREST: Core Research for Evolutionary Science and Technology) により実施された観測記録を用いて, 相模湾の表層から中層における内部潮汐の構造および間欠性について研究した。

Fig. 1. Bottom topography in and around Sagami Bay. Numerals on the bottom contour line are in meters. Sta. A, mooring station; Sta. C1 and Sta. C2, CTD cast station; Sta. OK, tidal station.

2. 観測

観測は, 2002 年 2 月 22 日から 2002 年 5 月 17 日に相模湾中央部 (35° 02'N, 139° 21'E) の水深 1,450 m の地点 Sta. A (Fig. 1) において, CREST により実施されたものであり, 約 400 m 深に RDI 社の ADCP (75 kHz) を設置し, その上の約 113 m 深に CTD (FSI 社の Micro CTD) を係留して行われた。ADCP は 15 分毎に 8 m 間隔 60 層で流速を測定するよう設定された。この際には, side lobe effect (金子・伊藤, 1994) により, 設置深度の 1 割程度の海面付近の記録が欠測となる。水温は 400 m 深に設置した ADCP で全観測期間にわたり 15 分毎に測定されている。また, 113 m 深

Fig. 2. (a) Time variations of temperature and depth of the CTD sensor moored at 113 m depth. (b) Time variations of temperature and inclination of the ADCP.

に係留した CTD では 2002 年 2 月 22 日から 2002 年 4 月 20 日の期間で 1.5 分毎の記録が得られた。本観測で用いた ADCP と CTD の水温センサーの精度はそれぞれ $\pm 0.1^\circ\text{C}$, $\pm 0.002^\circ\text{C}$ である。係留系の傾きなどによる流速の観測深度を補正するため、ADCP の係留フレームには深度センサーが取り付けられており、全観測期間にわたり 1.5 分毎に深度の記録が得られた。CTD の水温・深度記録と深度センサーの記録は 15 分毎に再サ

ンプルングして解析に用いた。また、係留した CTD で得た塩分については、キャリブレーションや長期係留観測によるトレンドの補正等を行っていないため、本解析には使用していない。

Fig. 2 に係留系上部に設置した CTD と下部に設置した ADCP で測定した水温と各センサーの深度、および、ADCP の傾き (係留系の傾き) の時間変化を示す。CTD と ADCP は、それぞれ 113 m 深と 400 m 深に

Fig. 3. Vertical profiles of temperature, salinity and σ_t obtained at (a) Sta. C1 on February 7 2002 and (b) Sta. C2 on 29 May 2002.

設置してあったが、係留系の傾きに伴い両者ともほぼ同じ時に設置深度より深くもぐっていたことが分かる。ADCP の深度変化は最大で 40 m に達していた。これらの係留系の傾きは、後述するように、流れによるものであるため、ADCP で得た各流速の測定深度を補正し、線形内挿により 386 m 深から 49 m 深まで 8 m 毎の値に補間して、以下の解析に使用した。

水温・塩分・密度場の分布として、係留観測の前後の 2002 年 2 月 7 日と 5 月 29 日にそれぞれ Sta. C1 と Sta. C2 で実施された CTD (FSI 社の Integrated CTD) 観測により得た水温、塩分、 σ_t の記録を Fig. 3 に示す。各記録には、11 dbar の移動平均を施してある。2 月には 200 dbar 以浅に水温の比較的一様な混合層が見られ、主躍層は 200 dbar 以深に存在する。上層 50 dbar~150 dbar で塩分の極大があり、その値は約 34.5 であった。5 月には水温躍層が発達して、200 dbar 以浅にも強い密度成層が形成されていた。5 月の上層 150 dbar 以浅の塩分は 2 月に比べ増加しており、50 dbar 付近に塩分約 34.6 の極大値が見られた。相模湾上層におけるこのような高塩化は、黒潮起源の水塊の進入を示すものである (Kawabe and Yoneno, 1987)。

3. 観測記録の特徴

3.1. 流速・水温変動

ADCP で観測された流速の東西・南北成分を、大島の Sta. OK で観測された潮位の時間変化とともに Fig. 4 に示す。全観測層にわたる変動の様子を分かり易く表示するために、40 m 毎の流速記録を示した。4 月中旬から下旬に見られる 89 m 以浅の流速記録の途切れは、ADCP の設置深度までおよぶ強い南向流により係留系が傾いたために、上層まで測流できなかったことを示す。全観測期間を通じて小刻みな周期変動が流速両成分に見られるが、その周期は最上段に示した潮位変化との比較から潮汐周期であることが分かる。全期間を通じて半日周期帯の変動が顕著であるが、観測後半の 169 m 以浅、例えば 4 月 19 日~21 日の 89 m~129 m 深や 5 月 11 日~15 日の 49 m 深などには一日周期帯の変動も認められる。これらの潮汐周期の変動は、強いところで流速が 20 cm s^{-1} に達し、大潮期に大きな傾向や、深度により変動の様子が異なることなどの特徴から、内部潮汐によるものであることが分かる。これらの潮汐周期の変動に加え、全期間を通じて数日周期の変動が見られ、さらに 4 月 5 日~7 日には 80 cm s^{-1} に達する強い北向きの流れがイベント的に存在していたことが分かる。

水温の時間変化 (Fig. 2) にも、潮汐周期の変動と数日周期の変動が見られる。ADCP で得た水温には大きな変化はないが、係留系が大きく傾いた 4 月下旬に 1°C 程度下がっている。それに対し、係留系上部 (Fig. 2(a)) では、4 月上旬と中旬以降にセンサーの深度が深くなっているのにも係わらず、水温が上昇している。このことは流れに伴い 100 m 以上の厚みを持った暖水が波及していたことを示す。

3.2. 流速変動の周期特性

温度場が 4 月上旬を境に変化していたことから、水温場の比較的稳定していた観測前半 2 月 23 日~3 月 24 日と、水温場が上昇傾向にあった観測後半 4 月 15 日~5 月 14 日の流速記録を用いて、パワースペクトルを計算した結果をそれぞれ Fig. 5(a) と (b) に示す。図のス

Fig. 4. The time variations of sea level at Sta. OK, and the eastward and northward components of current observed by the ADCP at Sta. A.

ベクトルエネルギー密度は流速の東西成分と南北成分から求めた値を足し合わせたもので、それぞれ各深度の流速記録から直接フーリエ変換法により得た生スペクトルに9項のスペクトルウィンドウを施して算出した。各図の上部には、主要4分潮に加え、慣性周期(T_f

= 20.87時間) および 1/3日 (1/3D), 1/4日 (1/4D) を示してある。両期間とも半日周期帯のエネルギーレベルは、350 m~150 m 深とかなり広い深度帯で高いが、そのピークは観測期間の前半に比べ後半では浅い深度に見られる。一日周期帯のエネルギーレベルは、200 m

Fig. 5. Vertical distribution of power spectra estimated from the current data from (a) February 23 to March 25 and (b) April 15 to May 14. Energy density, E [$(\text{cm s}^{-1})^2 \text{cph}^{-1}$], of the power spectra is sum of the spectral energy density for the eastward and northward components of the current. Numerals on the contour lines are indicated by $\log E$.

以浅で高く、観測期間前半よりも後半で高くなっているが、後半でのピークは O_1 分潮 (25.82 時間) よりも少し長い 28.8 時間周期に見られる。半日・一日周期のスペクトルピークは共に潮汐に起因する変動と考えられるが、観測期間後半で一日周期帯の変動は長周期側にピークを持ち、かつ浅い深度だけに見られる点が重要な特徴と言える。

4. 半日周期内部波の鉛直構造

相模湾では、これまで夏季に季節躍層を伝播する境界面波的な内部潮汐の特性が示されている。今回の中

Fig. 6. Vertical variations of tidal ellipse for M_2 constituent during from February 23 to March 24 and from April 15 to May 14. Symbol 'o' and arrow indicate initial phase and rotation direction of current vector, respectively.

層で観測された内部潮汐の構造が、これまでの研究とどのように関連しているのかは興味深い。そこで、主要 4 分潮のうち最も卓越している M_2 分潮について、鉛直的な構造を調べてみた。Fig. 6 は観測前半 2 月 23 日～3 月 24 日と後半 4 月 15 日～5 月 14 日の各 30 日分の記録から求めた M_2 分潮の潮流楕円である。楕円上の白丸は位相の始点を、矢印は流速ベクトルの回転方向を示している。観測前半では、249 m と 289 m 深で振幅が大きく、位相は下層に向かってわずかに遅れる傾向を示している。内部波の polarization relation (Gill, 1982) から見ると、深くなるにつれて潮流楕円上における位相が反時計回りに回転することは、位相の下方伝播 (内部波エネルギーの上方伝播) を示している。しかし、観測された潮流楕円の形状は円に近く、観測海域の緯度における M_2 分潮の単一の内部波による潮流楕円の長軸と短軸の長さの比 1.68 : 1.0 とは一致しな

Fig. 7. Time variations of kinetic energy density for (a) semidiurnal and (b) diurnal bands calculated from the band-pass filtered current fluctuations. The uppermost panel in each figure shows time variations of amplitude of sea level fluctuations for the same period band.

い。このことは、観測された M_2 潮流が異なる方向に伝播する波の合成によるものであることを示す。したがって、観測された位相の鉛直変化は、単一の内部波の鉛直伝播を意味するものではないと解釈される。また、観測後半では、369 m ~ 169 m 深で流速振幅の大

きさが概ね同じで、129 m 深で半分程度となっている。楕円の形状は東西にやや長い、位相の鉛直変化はほとんどないこと、躍層付近の 129 m 深で振幅が急に小さくなっていることから、鉛直第 1 モード的な構造を示唆している。これらの解析結果から導かれる重要な

Fig. 8. Stick diagrams of 25 h running averaged current at each layer.

こととして、100 m 以深においても複数点で発生した波あるいは入射波と反射波の干渉などの影響が認められ、鉛直第 1 モード的な構造が卓越することが挙げられる。

5. 内部潮汐の間欠性と基本場の流れとの関係

流速記録 (Fig. 4) を見ると、潮汐周期の変動が間欠的に強められていたことが分かる。そこで、内部潮汐の間欠性を解明するため、流速記録に半日周期帯 (11.3 時間～13.6 時間) と一日周期帯 (21.9 時間～29.2 時間) のバンドパスフィルターを施して得た東西、南北成分の流速 u , v から

$$KE = \frac{1}{2T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \rho(u^2 + v^2) dt$$

により、各深度での運動エネルギー密度を求めた。ただし、海水の密度 ρ は一定 ($\rho = 1,026 \text{ kg m}^{-3}$), $T = 25$ 時間とした。

Fig. 7(a) と (b) は、それぞれ半日周期帯と一日周期帯の運動エネルギー密度の時間変化を示している。各図の上にした時系列は、潮位記録に同様のバンドパスフィルターを施した値を 2 乗し、25 時間の移動平均を施してから平方根を求めたものであり、各周期帯における内部潮汐の外力である外部潮汐の振幅の時間変化に相当する。外部潮汐の振幅の変化は主に M_2 と S_2 , K_1 と O_1 周期成分の重ね合わせによって生じたもので、大潮小潮の周期と関連したものである。半日周期帯の運動エネルギー密度は、基本的には 209 m 以深で大きく、ほぼ大潮小潮の周期で変動しているが、4 月下旬以降では 209 m 以浅で大きくなっていることが分かる。

一方、一日周期帯の運動エネルギー密度では、全期間を通じて下層において極めて小さく、4 月上旬に大きくなり、それ以降は上層 100 m 以浅で特に大きな値を示している。エネルギー密度の大きい深度は上層だけに限られるが、その大きさは相模湾で卓越する半日周期内部波のそれに匹敵している。この一日周期変動のエネルギー密度が大きい期間は、Fig. 2(a) との比較が

ら、113 m 深の水温が上昇している時と対応する。

Fig. 8 に 25 時間の移動平均を施した流速記録をスティックダイアグラムで示す。Fig. 2 で見られた 4 月 6 日の急激な水温上昇と 4 月中旬以降の緩やかな水温上昇は、それぞれ北向きの流れが急に現れた時と南南東向きの流れが全層に渡り強くなっている期間とに対応していることが分かる。4 月 6 日～8 日と 5 月 7 日以降の 200 m 以浅に見られた強い流れはイベント的なものであるが、4 月中旬以降の南南東向きの流れは、宇田 (1937) の模式図や Iwata and Matsuyama (1989) の示した相模湾表層の循環流の分布に見られる流向とほぼ一致する。従って、4 月中旬～下旬の南南東向きの流れは、相模湾内の循環流が強化されたことを示す。Fig. 7(b) と Fig. 8 の比較から、一日周期変動は、相模湾内の循環流が強化された 4 月中旬～下旬だけでなく、イベント的に北向きの流れが強められた 4 月 6 日～8 日と 5 月 7 日以降にも大きくなっていたことが分かる。

6. 考察とまとめ

相模湾で卓越する半日周期内部波に匹敵する流速振幅を持つ一日周期帯の変動が基本場の流れの強い期間に増幅しており、その周期は長周期側へとシフトしていることが明らかになった。そこで、以降では、まず基本流速場の変動の要因について究明して、次に一日周期帯の変動と基本流速場の関係について考察する。

6.1. 基本流速場の変動の要因

基本場の流れが強められていた時には、水温が上昇していたことから、外洋の黒潮系水が波及した可能性が高い。そこで、海上保安庁水路部が発行している同観測期間における 200 m 深の水温分布を調べる (Fig. 9) と、黒潮の流軸を示す 200 m 深 15 °C の等温線は 2 月 16 日～3 月 15 日では三宅島の南側にあり、水温は伊豆海嶺上でほぼ一様であるが、3 月 16 日～4 月 15 日では三宅島の北に移動しており、等温線が東西に伸びている。さらに、4 月 16 日～5 月 15 日には伊豆海嶺上で S 字型に変形し、15 °C の等温線は神津島の北を通っている。このことから、ADCP で観測された北向きの強い流れは、これらの流軸の遷移過程で生じたものと考え

られる。また、4 月中旬以降で南南東の流れが強化しているのは、Iwata and Matsuyama (1989) が指摘したように、黒潮流軸の接岸により湾内の反時計回りの循環流が強化されたことを示すものと考えられる。

Fig. 9. Distribution of temperature at 200 m depth (from Quick Bulletin of Ocean Conditions offered by Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard).

次に、相模湾沿岸の流れや潮位が風と高い相関関係にあることが示されていること (Kitade and Matsuyama,

Fig. 10. Time variations of the tide-killer filtered sea level fluctuation at Sta. OK and the 24 h running averaged wind at Oshima. The effect of atmospheric pressure was removed from sea level fluctuations.

2000; 井桁ら, 2003; 日向ら, 2004) から, 24 時間の移動平均を施した大島測候所での風の記録と大島の北部 Sta. OK での潮位記録に気圧補正およびタイドキラフィルター (花輪・三寺, 1985) を施したものを Fig. 10 に示す。これにより, 相模湾中央部で観測された流れ (Fig. 8) と潮位変動の関係, さらに, それらと風との関係を調べた。3 月上旬や 3 月下旬から 4 月上旬にかけての段階的な潮位上昇, 5 月 6 日以降などの比較的大きな変動に加えて, 数日程度の小さなスケールの変動が見られる。特に, 3 月下旬から 4 月上旬には水位が 15 cm 程度も上昇しており, 大規模な変動が起こっていたことを示す。つまり, 4 月上旬の強い流れは黒潮の接岸に伴う変動であり, その後も高潮位を保っていることから, 相模湾への黒潮接岸時に湾内の循環流が強められたと考ええると, 観測された変動を矛盾無く説明できる。また, 風との関係については, 数日周期の小さな潮位変化と対応する程度で, 4 月上旬の潮位の急上昇との対応はほとんど無い。この数日周期の小さな潮位変化は, 相模湾沿岸から 30 km 以上離れた大島 (Sta. OK) での潮位に現れた沿岸捕捉波による潮位変動であると考えられる (Kitade and Matsuyama, 2000; 井桁ら, 2003)。以上のことから, 海洋の現象に比べ水平スケールの大きい風による沿岸水の応答はエクマン輸送による収束・発散が顕著な岸の近傍での沿岸捕捉波の生成において重要であるが, 4 月上旬に観測され

た様な黒潮系暖水の進入現象に対しては, 風がほとんど寄与していないと考えられる。

黒潮から分岐した暖水が相模湾へと波及する様子は, 3 月中旬と 4 月上旬の NOAA 衛星画像によく捉えられている (Fig. 11)。舌状の暖水が伊豆半島南方約 60 km に位置する銭州海嶺付近から大島西水道を北上し湾内へと波及している様子が伺える。それぞれの期間は, Fig. 10 で見られるように, 大島 (Sta. OK) での潮位が段階的に徐々に上昇している期間と対応する。相模湾で強い北向流が生じる期間は, 黒潮流軸が相模湾に接近しており, なおかつ暖水舌が神津島や新島に沿って北上し, 大島西水道へと波及してきた時と一致する。また, 5 月 7 日以降にも相模湾中央部で北向きの流れが強められているが, 4 月上旬の場合と同様に潮位と水温が上昇していたこと (Fig. 2(b), Fig. 10) から, この北向流の強化も黒潮系暖水の湾内への進入によると考えられる。

6.2. 一日周期変動と基本流速場の関係

周期が相模湾の緯度では慣性周期よりも長いことから, 一日周期の内部波は理論的には陸岸などに捕捉されるモードの波としてしか存在し得ないため, 通常, 伊豆海嶺で発生するものは大島周辺を除いて相模湾へは伝播できない (Ohwaki *et al.*, 1994)。したがって, 基

Fig. 11. AVHRR sea surface temperature one-day composite images. (a) 12~20 March 2002, (b) 2~5 April 2002.

本場の流れが強い4月上旬や中旬以降に一日周期内部波が上層で強化されたという観測事実は非常に興味深い。また、一日周期帯のスペクトルピークが長周期側にシフトして見られた点は、基本場の流れにより周波数変調した可能性が高い。例えば、内部ケルビン波の位相速度は 1 m s^{-1} 程度であるから、波の伝播と逆向きに十数 cm s^{-1} の流れが存在していれば、3時間程度の変調を説明できる。黒潮が接岸していた観測時の状況から考え、岸近くでこの程度の流れが存在していたことは十分に考えられる。これらのことから、周期の長周期側へのシフトは一日周期内部波の発生あるいは伝播過程においてドップラーシフトを受けたことに因ると考えればよい。

Fig. 7(b) と Fig. 8 の比較から、一日周期の運動エネルギーは基本場の流れが南向きの期間(湾内の反時計回りの循環が強められたと考えられる4月中旬から下旬)だけでなく、イベント的に存在する北向きの流れの期間にも大きくなっていたことが分かる。相模湾中央部での流向は異なるが、両者とも湾の外から中への流れが存在していた点は同じであると言える。従って、一日周期変動の強化は、相模湾中央部での流れの向きにはあまり関係無く、湾外から湾内へ向かう流れが存在していたときに生じたと考えられるだろう。しかしながら、今回観測された1測点での記録では、これ以上詳細な議論をすることは難しい。従って、本研究では一日周期の変動と基本場の流れとの関係を指摘することにとどめ、一日周期変動が強められた機構については今後の課題としたい。

6.3. まとめ

本研究により明らかとなった相模湾中央部での内部潮汐の特徴として、

- ① 200 m 深まで混合層が発達する冬季においても半日周期内部波が確認され、半日周期内部波は鉛直第1モード的の構造を持ち、伝播方向の異なる波が干渉しあっていると考えられた、
- ② 半日周期内部波の振幅はほぼ大潮小潮の周期で変化するが、水温や流れの場の変化により卓越する深度が変化していた、

③ 観測期間後半の上層には半日周期に匹敵する一日周期帯の変動が見られたが、その周期は O_1 分潮よりも長い28.8時間周期にスペクトルピークを持っていた、

④ 一日周期帯の変動は、基本場の流れが弱い時にはほとんど見られないが、流れが強められた期間に上層で顕著に認められた、

ことなどが挙げられる。さらに、基本場の流れについては黒潮の流軸の変化と対応していることが確認され、黒潮系暖水が波及した時に湾内の流れ場が強化されることが明らかとなった。相模湾であまり観測されない一日周期帯の変動が相模湾への黒潮系水の進入や黒潮の接岸に伴い強化されていた点は非常に興味深い、その詳細な力学過程については今後の課題として残された。

謝 辞

本観測に協力して下さった東京海洋大学海洋科学部研究練習船青鷹丸の栗田 嘉寿船長をはじめ乗組員の皆様、係留系の設計製作に携わった日油技研工業の皆様、心から感謝いたします。本研究の一部は科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業の研究費により実施されました。なお、本研究で用いた潮位記録はJODCより提供を受け、NOAAの衛星画像は三重県科学技術振興センター水産研究部のホームページよりダウンロードしました。

References

- Gill, A. E. (1982): *Atmosphere-Ocean Dynamics*, ACADEMIC PRESS INC., San Diego, 662 pp.
- 花輪 公雄・三寺 史夫 (1985): 海洋資料における日平均値の作成について. 沿岸海洋研究ノート, **23**, 79-87.
- 日向 博文・柳 哲雄・川村 宏 (2004): 相模湾への黒潮系暖水流に与える海上風の影響について. 沿岸海洋研究, **41**, 83-95.
- 井桁 庸介・北出 裕二郎・松山 優治 (2003): 台風8818号の通過に伴い発生した相模湾の急潮に関する数値実験. 海の研究, **12**, 603-617.
- Iwata, S. and M. Matsuyama (1989): Surface circulation in Sagami Bay: the response to variations of the Kuroshio axis. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **45**, 310-320.

- Kawabe, M. and M. Yoneno (1987): Water and flow variations in Sagami Bay under the influence of the Kuroshio Path. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **43**, 283–294.
- 金子 新・伊藤 集通 (1994): ADCP の普及と海洋学の発展. 海の研究, **3**, 359–372.
- Kitade, Y. and M. Matsuyama (1997): Characteristics of internal tide in the upper layer of Sagami Bay. *J. Oceanogr.*, **53**, 143–159.
- Kitade, Y., M. Matsuyama, S. Iwata, and I. Watabe (1998): SDP and LP fluctuations observed along the coast of Sagami Bay. *J. Oceanogr.*, **54**, 297–312.
- Kitade, Y. and M. Matsuyama (2000): Coastal-trapped waves with several-day period caused by wind along the southeast coast of Honshu, Japan. *J. Oceanography*, **56**, 727–744.
- Kitade, Y. and M. Matsuyama (2002): Semidiurnal internal tide observed over Ohmuro-Dashi, the northern part of the Izu Ridge. *Deep-Sea Res. I*, **49**, 1,309–1,320.
- Kitade, Y., M. Matsuyama, and J. Yoshida (2003): Distribution of overturn induced by internal tides and Thorpe Scale in Uchiura Bay. *J. Oceanography*, **59**, 845–850.
- Kuroda, Y. and H. Mitsudera (1995): Observation of internal tides in the East China Sea with an Underwater Sliding Vehicle. *J. Geophys. Res.*, **100**, 10,821–10,816.
- Matsuno, T. (1991): Propagation of semi-diurnal internal tides observed off Fukushima, along the east coast of Japan. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **47**, 138–151.
- 松山 優治・岩田 静夫・前田 明夫・鈴木 亨 (1992): 相模湾の急潮. 沿岸海洋研究ノート, **30**, 4–15.
- Ohwaki, A., M. Matsuyama, and S. Iwata (1991): Evidence for predominance of internal tidal currents in Sagami and Suruga Bays. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **47**, 194–209.
- Ohwaki, A., M. Matsuyama, and H. Nagashima (1994): Difference in the prevailing periods of internal tides between Sagami and Suruga Bays: Numerical experiments. *J. Oceanogr.*, **50**, 449–463.
- 宇田 道隆 (1937): プリ漁期における相模湾の海況及び気象と流況との関係. 水産試験場報告, **8**, 1–50.

Vertical Structure and Intermittency of Internal Tides Observed at the Center of Sagami Bay

Yujiro Kitade[†], Masaji Matsuyama[†], Takashi Ishimaru[†],
Toshiro Saino[‡], Tetsuya Nakamura^{**}, and Miho Ishii[†]

Abstract

Mooring observations using an acoustic Doppler current profiler and a conductivity-temperature-depth meter were carried out at the center of Sagami Bay from February 22 to May 17 in 2002 for the CREST of Japan Science and Technology Agency. Current and temperature data were analyzed to clarify the vertical structure and intermittency of internal tides in the bay. Semidiurnal period fluctuations were dominant in the middle layer throughout the observation period, while diurnal period fluctuations were predominant at depths shallower than 100 m. Basic stratification for the internal tides changed greatly after a sudden temperature increase associated with a strong northward current on April 7. Vertical structures of tidal ellipses for the M_2 constituent were estimated by using the current data before and after the temperature increase. Current amplitude of the semidiurnal internal tide was larger in the thermocline, and its phase delays greater with depth, in the first half of observation period. However, the tidal current ellipses for the M_2 constituent were almost circular over the observed depth range. This may result from the superimposition of the semidiurnal internal waves, which propagate in different directions. In the first half of the observation period, kinetic energy densities for the semidiurnal internal tide fluctuated with the spring-neap tidal cycle, whereas the energy densities for the diurnal internal tide in the last half of the period were amplified as increases of the low-pass filtered current; i.e., the background current in the bay. The background current was strengthened by the approach and intrusion of the Kuroshio water into the bay. Furthermore, the spectral peak of the diurnal period band appeared at 28.8 h during the period of the strong background current. It was speculated that frequency modulation of the spectral peak was to be due to the Doppler shift of the diurnal internal tide by the background current.

Key words: Internal tide, Sagami Bay, Kuroshio, ADCP

(Corresponding author's e-mail address: ykitade@s.kaiyodai.ac.jp)

(Received April 14, 2004; accepted June 11, 2004)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2004)

[†] Faculty of Marine Sciences, Tokyo University of Marine Science and Technology, 5-7, Konan 4, Minato-ku, Tokyo 108-8477, Japan

[‡] Hydrospheric Atmospheric Research Center, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8601, Japan; Japan Science and Technology Agency, Kawaguchi center Bldg., 1-8, Honcho 4, Kawaguchi 332-0012, Japan

^{**} Ocean Business Group, Nichiyu Giken Kogyo CO., LTD. No.3 Takamura Bldg. 22-1, Minami-ikebukuro 2, Toshima-ku, Tokyo 171-0022, Japan