相模湾上層で観測された内部潮汐の特性*

北出裕二郎 ・ 松山優治[†] 岩田静夫[‡]

Characteristics of Internal Tides Observed in the Upper Layer of Sagami Bay

Yujiro Kitade, Masaji Matsuyama** and Shizuo Iwata^{††}

Abstract

Characteristic features of internal tides in the upper layer of Sagami Bay are investigated by carrying out observations at three stations, with a thermistor-chain at one station and current meters at other two stations during the period from late July to early October 1986. The existence of the internal tides throughout the observation period is confirmed from the temperature records obtained in the seasonal thermocline at all stations. The temperature fluctuation of semidiurnal period is dominant at all stations. Amplitude of the semidiurnal temperature fluctuations is largest at HY (near the western side of the bay head) and smallest at JO (off Jogashima of Miura Peninsula) throughout the observation period. The amplitude of the semidiurnal velocity fluctuations is larger at JO than at OK (over the bank off 18 km south of JO). The temperature fluctuations of semidiurnal period at HY are out of phase to those at OK. Phase difference between the sea level variations and temperature fluctuations of semidiurnal period is locked both at HY and OK, while that is changeable at JO. A numerical experiment with a simple rectangular bay model was carried out to explain the distributions of amplitude and phase of semidiurnal internal tide observed in Sagami Bay. The numerical model shows that the semidiurnal internal tide is reflecting at the bay head and interfering with incident internal tide. The experimental results agree approximately with observed results of the semidiurnal internal tide in Sagami Bay.

1. はじめに

大陸棚の発達した海域において、大陸斜面や陸棚端で発生した内部潮汐は、強い流速シアやフロント、海底地形の影響により伝播の途中、陸棚上で減衰あるいは消滅してしまうことが多い (Sherwin, 1988; Holloway, 1991).

しかし、日本沿岸のように急深で陸棚幅の狭い海域では、陸棚端や海嶺で発生した内部波はあまり減衰せずに海岸線まで到達し、そこで反射するものと推測される。駿河湾奥部の内浦湾 (Matsuyama, 1991) では、このことが観測によって実証され、特に半日周期の内部波は波長が高々 30 ~ 40km であるため、成層状態によっては湾の内部静振との共振により増幅されることが示された。湾長が約 10km あるいはそれ以下の小さい湾と異なり、幅や長さが数十 km に及ぶ比較的大きい湾では潮汐周期の内部波の波長と湾の水平スケールとの関係からコリオリの力が重要な役割を果たすと推測される。

そこで、比較的急深な海岸線を持ち、湾長及び湾幅共に 40km 以上で、しばしば内部潮汐の観測されている相模

* 1993 年 4 月 10 日受領 ; 1993 年 7 月 5 日受理

[†] 東京水産大学; 〒 108 東京都港区港南 4-5-7

[‡] 神奈川県水産試験場; 〒 238-02 神奈川県三浦市三崎町城ケ島

** Tokyo University of Fisheries, 5-7 Konan 4-chome, Minato-ku, Tokyo, 108 Japan

^{††} Kanagawa Prefectural Fisheries Experimental Station, Jogashima, Misaki-machi, Miura-shi, Kanagawa, 238-02 Japan

Fig. 1. The locations of the mooring stations and bottom topography in and around Sagami Bay. Numerals in the figure are in meter. Inset shows the figure location relative to the Japan.

湾 (松山・岩田, 1985; 松山ら, 1988; Ohwaki *et al.*, 1991) を対象海域とし, 内部波の特性を調べることにした. 相模湾での内部潮汐波は, 古くから漁業者の間で二重潮と呼ばれ (宇田, 1985), 時には定置網を流失させるほどの流速を伴う (松山ほか, 1992). しかし, これまでの相模湾における観測では, 内部潮汐波の水平分布特性についての議論は殆ど行われていない. 本論文では, 1986年7月下旬～10月上旬に行われた相模湾内の3地点での水温・流速の同時係留観測記録を解析し, 内部潮汐波の振幅や位相の場所による違いを明らかにすることを試みる.

2. 観測

係留観測点は Fig. 1 の OK (水深 90m), JO (水深 90m), HY (水深 70m) の 3 点である. OK では 7 月 29 日～10 月 6 日に, JO では 7 月 31 日～10 月 6 日に 30m 深と 60m 深の 2 層に流速計 (MTCM-5) を設置し, 20 分毎に水温・流速を測定した. ロープの伸びによる観測深度の

Fig. 2. Vertical profiles of averaged temperature (dotted line), salinity (dashed line) and sigma-T (solid line). Thick lines show the profiles observed on 6 August 1986, whereas thin lines show the ones on 8 September 1986. The current meter depths and the thermistor chain depth are also shown on the right of the figure.

誤差は最大でも 5m 前後である. 測器の故障で両測点とも 60m 深は全観測期間を通し, また OK の 30m 深は 9 月 25 日以降, 水温記録しか得られなかった. HY では 7 月 30 日～9 月 2 日, 9 月 9 日～10 月 5 日の二度にわたり, 2m 間隔にセンサーのついたサーミスタ・チェーン (TR-7) を定置網のブイから吊り下げ, 深さ 20m～40m に設置し, 10 分毎に水温を測定した.

Fig. 2 に神奈川県水産試験場が 8 月 6 日と 9 月 8 日に相模湾内の 26 測点で観測した水温, 塩分, σ_t の平均鉛直プロファイルを示す. それぞれ太線は 8 月, 細線は 9 月のものである. 両月とも表層に強い密度躍層が見られるが, 8 月に比べ 9 月の方が少し成層が強くなっており, 100m 以深は両月とも緩やかに変化している. 図の右端に, 係留系の深度を示してある. サーミスタ・チェーン (TR-7) 及び上層の流速計 (MTCM-5) は温度躍層内にあったことが分かる.

Fig. 3. Time variations of the 3 hours running averaged temperature observed at HY (lower panel) and predicted sea level at A (upper panel). Attached numerals on vertical axis of lower panel show temperature in $^{\circ}\text{C}$ and slide the mark of each record by one step (2°C) vertically.

3. 観測記録

Fig. 3 は HY で係留観測した水温記録に 3 時間の移動平均を施した水温時間変化および油壺 (Fig.1 の A) の推算潮位を示す。水温記録は、各深さに毎に 2°C ずつずらしてある。半日周期の変動が顕著で、各層の変化のパターンは良く似ている。さらに、内部波の特徴である間欠性 (Wunsch, 1975) が見られ、潮汐周期変動は 8 月 7 日～13 日と 20 日～26 日に増幅されている。上層ほど水温振幅は大きく、最大で 2°C 以上にも達している。水温と潮位を比べると両者に半日周期が認められるが、位相がずれている。

Fig. 4 は OK と JO の水温及び流速の記録に 3 時間の移動平均を施した時系列である。OK (Fig. 4 上) では、南東向きの平均流に潮汐周期変動が重なっているが、潮流の振幅は $10 \sim 20 \text{ cm s}^{-1}$ でそれほど大きくない。水温の

周期変動は HY で増大した 8 月 6 日～12 日に OK でも顕著だが、HY で後半に見られた増幅は OK では見つけ難い。JO (Fig. 4 下) での流速の潮汐周期変動は東西成分に比べて南北成分が顕著である。潮汐周期の水温変化の振幅は HY や OK と比べて小さく、又 60m 深より 30m 深の方が大きい。HY で半日周期変動が増幅されている時期に、JO でも半日周期が明確になっている。

4. 統計的な特性

4.1. 卓越周期

各測点で観測の重なった期間を、前期 (8 月 1 日～8 月 28 日) と後期 (9 月 9 日～10 月 5 日) に分けてそれぞれの期間におけるパワー・スペクトルを計算した。

Fig. 5 に観測前期の OK, JO, HY の水温のパワー・スペクトルを示す。潮汐周期にピークが見られ、いずれの測点も一日周期より半日周期の方がエネルギー・レベルが高い。各測点の 30m 深のエネルギー・レベルを周期別に比較する。半日周期は HY で最大となり、一日周期は JO と OK がほぼ同レベルで、HY はやや低い。1/4 日周期はエネルギー・レベルに多少の違いがあるものの 3 測点すべてでピークが見られる。これに対して 1/3 日周期は OK でだけ認められる。

観測後期の OK, JO, HY の水温パワー・スペクトルを Fig. 6 に示す。半日周期は HY と OK で前期と同様に顕著だが、JO では他の 2 点に比べはるかに低く、前期と比べてもかなり低い。一日周期のエネルギー・レベルは前期に比べ OK で高いが、HY と JO で極度に低い。OK では高調波成分のピークは消えるが、JO, HY では前期と同様に 1/4 日周期にピークがみられる。

4.2. 測点間のコヒーレンスと位相差

各測点間の水温記録のコヒーレンスと位相差を 30m 深の記録により調べた (Table 1)。一日周期、半日周期としては各周期帯でエネルギー・レベルが最も高い 23.54 時間、12.41 時間を選んだ。自由度 10 で計算したため、コヒーレンス・スクエアの 95% の信頼限界は 0.4 である (Haurwitz *et al.*, 1959)。

一日周期は水平スケールが大きいにもかかわらず、コヒーレンスはいずれも 95% の信頼限界を越えない低い値

Fig. 4. Time variations of the east and north components of current velocities (at 30 m depth) and temperature (at 30, 60 m depth) at OK (upper panel) and JO (lower panel). Each curve is filtered by applying 3 hours running mean.

Table 1. Values of coherence squared (upper) and phase difference (lower).

	Diurnal			Semidiurnal		
	OK -JO	OK -HY	JO -HY	OK -JO	OK -HY	JO -HY
August	0.32 355°	0.35 46°	0.04 60°	0.30 76°	0.56 209°	0.37 148°
September	0.19 335°	0.33 124°	0.17 156°	0.48 81°	0.72 187°	0.80 104°

を示す。半日周期は前期の OK と JO の組み合わせを除き両期間ともコヒーレンスが高く、又、全ての組み合わせで前期より後期の方が高い。OK と JO では約 18km しか離れていないにもかかわらず他の組み合わせと比べコヒーレンスが低い。コヒーレンスの高い OK と HY の位相差は前期は 209°, 後期は 187°と、ほぼ逆位相になっている。また、JO と比べ HY の方が前期で 148°, 後期で

Fig. 5. Power spectra of the temperature fluctuations observed at OK, JO and HY in August 1986.

Fig. 6. As in Fig. 5 but for September 1986.

104°位相が遅れている。

4.3. 振幅及び位相の時間変化

半日周期成分はエネルギー・レベルが高く、各測点間のコヒーレンスも高いことが分かったので、以下半日周期変動に注目し、各点の振幅と位相の時間変化を調べる。5日間の記録に12.4時間周期の正弦波を最小自乗法により当てはめ、次に一日ずつずらしながら同様の計算をして振幅及び位相の時間変化を求めた(例えば Kielman and Düing, 1974)。水温は内部波の、潮位は外部潮汐の代

表的物理量と考えることができる。潮位は相模湾内ではほぼ同位相と考えられる。そこで、潮位記録も同様に解析し、外部潮汐と内部潮汐の位相差を表すものとして、潮位と各点の水温との位相差の時間変化を求めた。Fig. 7の上段は各点の水温振幅の時間変化、下段は潮位と各点の水温との位相差の時間変化である。振幅は期間を通してHYで最大で、8月はOKとJOがほぼ等しいが、9月はOKの方がJOより大きい。OKでは大潮時に、HYとJOではそれより数日遅れて極大になる傾向がある。HYでの潮位と水温の位相差は8月と9月とで約60°異なる

が、両期間とも安定している。OK での位相差は 8 月 2 日から 13 日には約 10° で、9 月 1 日から 22 日には約 70° で比較的安定している。両期間とも HY と OK は逆位相の関係にある。一方、JO での位相差は 8 月中旬を除き不安定で変化の範囲は 180° に及んでいる。

4.4. 水温と流速の関係

OK 及び HY での水温と潮位の位相差が比較的安定している 8 月上旬 (8 月 1 日～15 日) と 9 月中旬 (9 月 8 日～22 日) の水温と流速の調和定数を Table 2 に示す。位相はそれぞれの期間の最初の時刻を基準とした。流速は一層でしか測定していないため、バロトロピック成分とバロクリニック成分に分解できないが、松山・岩田 (1985) や Ohwaki *et al.* (1991) によれば、JO では外部潮汐流が内部潮汐流に比べて小さく、成層期の潮流は主として内部潮汐によるものと考えられるので、潮流は内部潮汐によると近似して話を進める。Table 2 から、8 月上旬には長軸の方向は OK で 342° 、JO で 12° でほぼ南北方向を示す。水温の振幅は OK の方が大きいのにに対し、流速の振幅は JO の方が大きい。9 月中旬には半日周期の長軸方向は両測点ともわずかに北西方向にずれている。JO では OK に比べ水温振幅が小さいにもかかわらず、流速振幅は大きい。今、水温変動 T と流体粒子の鉛直変位 η との関係は、

$$T = -\frac{\partial T_0}{\partial z} \eta$$

と表せる (例えば, Halpern, 1971)。ただし、 T_0 は時間平均水温、 z は鉛直座標を示す。以上のことから、OK では半日周期内部潮汐の鉛直変位は大きいがそれに伴う水平流速の振幅は小さいこと、逆に JO では半日周期内部潮汐波の鉛直変位は小さいがそれに伴う水平流速の振幅は大きいということになる。

5. 考察

係留観測の結果、各測点で半日周期の内部波が卓越しており、各測点間のコヒーレンスは高かった。観測で得られた半日周期変動の特徴は; (1) 同一深度の水温振幅は HY で最大で、JO で最小であった、(2) HY と OK の水温は 8 月、9 月ともほぼ逆位相の関係にあった、(3) 外部潮汐と内部潮汐の位相差は HY で比較的安定しているのに

対し、JO では成層の変化に敏感に応答していた、(4) OK と HY で位相差が比較的安定している期間には、OK に比べ JO の水温振幅は小さく、逆に水平流速振幅は大きかった、等が示された。

湾内での半日周期内部潮汐波の伝播特性について、内部潮汐波が鉛直モードを形成しているものとし、簡単なモデルにより考察する。

まず、海底が平らで、連続成層した水路における内部慣性重力波を考える。線形方程式系において水路の両側が壁という境界条件を使い、鉛直にモード解を考えると、内部波の分散関係式は

$$K^2 = \frac{\omega^2 - f^2}{gh_n} - \frac{m^2\pi^2}{L^2}$$

となる (例えば LeBlond and Mysak, 1978)。ここで、 K は水路に沿う方向の波数、 m は $f = 0$ 、 $K = 0$ の時の横断方向の静振モードの次数、 ω は入射波の周波数、 L は水路の幅、 h_n は鉛直モードの固有値 (等価水深) である。内部慣性重力波として伝播するものとして、 $K^2 > 0$ の場合を考えると、上の式は

$$\omega^2 > f^2 + \frac{m^2\pi^2 gh_n}{L^2} = \omega_c^2$$

となる。ここで ω_c はカットオフ周波数である。よって、水路内における内部波の振る舞いは入射波の周波数 ω が ω_c より大きいのか小さいかで異なってくる。 ω が ω_c より大きい場合には、内部波は内部慣性重力波として伝播できるが、逆に小さい場合には内部ケルビン波としてしか伝播できない。この関係式は水路の一方が閉じた湾に対しても適用できる。

相模湾の幅 L を 40km とし、9 月の成層状態 (Fig. 2) より水深 100m での鉛直第一モードの内部重力波の伝播速度は $(gh_1)^{1/2} = 0.9 \text{ m s}^{-1}$ と見積もられるから、 $m=1$ のとき上の条件が満たされる。従って、相模湾内では半日周期の内部波は内部慣性重力波として振る舞うことができ、入射波と反射波とが干渉して湾の横断方向に第一モードを形成するものと推測される。

そこで、伊豆海嶺北部で発生し、相模湾に入射する半日周期の内部波 (Ohwaki *et al.*, 1991) の湾内での振る舞いを調べるため、reduced gravity model を用いて数値実験を行った。湾口が伊豆海嶺北部、湾奥左端が相模湾西部の HY に対応する幅 40km、長さ 80km の矩形湾モデルとする。水深及び成層の強さは $(gh_1)^{1/2} = 0.9 \text{ m s}^{-1}$ にな

Fig. 7. Upper panel: Temporal variations of the amplitude of the semidiurnal temperature fluctuations at a depth of 30 m at each station. Lower panel: Temporal variations of the phase difference between the predicted semidiurnal sea level variations at A and the semidiurnal component of temperature fluctuations at each station.

Table 2. Harmonic constants for temperature and velocity fluctuations at semidiurnal period obtained at OK and JO.

Semidiurnal 8/1 - 8/15		Temperature (°C)	Major-axis (cm s ⁻¹)	Minor-axis (cm s ⁻¹)
OK	Amplitude	0.49	3.77	0.66
	Phase	6°	321°	231°
	Orientation	-	342°	72°
JO	Amplitude	0.33	4.93	1.56
	Phase	77°	41°	311°
	Orientation	-	12°	102°
9/8 - 9/22				
OK	Amplitude	0.52	4.13	1.10
	Phase	170°	205°	295°
	Orientation	-	338°	68°
JO	Amplitude	0.29	7.31	1.81
	Phase	269°	267°	357°
	Orientation	-	328°	58°

るように設定し, $f = 8.36 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ とした. 湾口から振幅 0.5m の半日周期 (M_2) の内部波を同位相で与え, 与えた波が湾奥で反射し, 湾口に到達するまで計算を行った.

Fig. 8(a), (b) はそれぞれ計算終了直前の一周期分の

データから得られた等振幅線及び等位相線図と潮流楕円の分布図である. 入射波と反射波が湾内で干渉し, かつ地球自転の効果により, Fig. 8(a) のように湾岸に沿って等位相線や等振幅線は不均等に並ぶ. 湾奥の両端には鉛

Fig. 8. (a) Co-range and co-tidal chart obtained from the numerical experiment. Numerals on the co-range lines (solid lines) are in meter; numerals on the co-tidal lines (dotted lines) are in hour. (b) Distribution of tidal ellipses in the numerical model. Arrow shows the area where the amplitude of the elevation is very small while the amplitude of the velocity fluctuations is very large.

直振幅の大きい海域が、また湾奥から約 11km の所には矢印で示したような鉛直振幅の小さい海域 (節) が形成されている。この様な節の位置は成層の変化に伴い移動するから、成層変化の位相に対する影響は等位相線が密な点で大きく、疎な点では小さい。さらに、Fig. 8(a) と (b) の比較から鉛直振幅の小さい所では流速振幅は大きく、逆に鉛直振幅の大きい所では流速振幅は小さくなる。簡略化したモデルであるため実際の湾奥からの距離と多少のズレがあるが、HY は湾奥西部、JO は矢印で示した位置、OK はその南側の鉛直振幅の大きいところにあると考えることができる。

以上矩形湾モデルから、半日周期内部波の入射波と反射波が干渉することにより; (1) 湾奥西部に鉛直振幅の大きな海域が形成され、(2) HY と OK に対応する海域ではほぼ逆位相で振動しており、(3) JO に対応する海域では等位相線が密で、(4) 湾東側の鉛直変位の小さい海

域では他に比べ流速振幅が大きくなる、という結果が得られた。内部潮汐波がこのように干渉している場合には Fig. 8(b) のように湾奥でも流速の大きい海域が形成される。内部潮汐が急潮となるほど増幅された観測例もあるが (松山ほか, 1992), これも反射の影響が強く現れたためと考えることができる。

6. まとめ

相模湾沿岸の内部波の挙動を明らかにするため、1986 年夏から秋の約 2 ヶ月間、湾内の 3 地点において水温と流向・流速を観測した。観測期間を通して、潮汐周期の水温・流速変動が観測され、振幅は間欠的に強化されていた。一日周期や $1/3$ 日・ $1/4$ 日周期にもスペクトル・ピークが認められたが、潮汐周期変動の中では特に半日周期が卓越していた。水温の半日周期成分は湾口付近の

OK や JO に比べ湾奥西部の HY で高エネルギーを示し、各測点間でコヒーレンスは高く、又、OK と HY ではほぼ逆位相であった。この半日周期の内部波に注目して、潮位と水温の位相差や振幅の時間変化を調べたところ、各測点の水温振幅はほぼ大潮小潮の周期で変化していた。潮位と水温変動との位相差は HY と OK では観測期間を通じ比較的安定しているのに対し、JO では不安定であった。JO は OK に比べ半日周期の水温振幅は小さいにもかかわらず、流速振幅は大きかった。内部波が鉛直モードを形成していると考え、簡単な矩形湾モデルを用いて考察した結果、湾内では入射波と反射波が干渉しており、JO の周辺に振動の節があると考え、観測された半日周期内部波の特性をよく解釈できることがわかった。

謝 辞

観測に協力していただいた神奈川県水産試験場の平元泰輔氏、「うしお」と「しおかぜ」の乗組員の方々に心から感謝します。適切な助言をいただいた北海道大学理学部の日比谷紀之助教授、理化学研究所の長島秀樹博士、統計解析についてアドバイスをいただいた東海大学海洋学部の饒田邦夫博士に心より感謝します。本研究の一部は「東京水産大学創立百周年記念学術奨励基金」から奨励研究費を受けて行われました。本研究の解析には、東京水産大学情報処理センター FACOM M760/6 を使用した。

References

- Halpern, D. (1971): Semidiurnal internal tides in Massachusetts Bay. *J. Geophys. Res.*, **76**, 6573-6584.
- Haurwitz, B., H. Stommel and W. H. Munk (1959): On the thermal unrest in the ocean, p.74-94. In: *The Atmosphere and the Sea in Motion, The Rossby Memorial Volume*, ed. by B.Bolin, The Rockefeller Insutitute Press, New York.
- Holloway, P. (1991): On the dissipation of internal tides, p. 197-225. In: *Tidal Hydrodynamics*, ed. by Bruce B. Parker, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Kielman, J. and W. Düing (1974): Tidal and subinertial fluctuations in the Florida Current. *J. Phys. Oceanogr.*, **4**, 227-236.
- LeBlond, P. H. and L. A. Mysak (1978): *Waves in the Ocean*. Elsevier Oceanography Series., New York, 602pp.
- 松山優治・岩田静夫 (1985): 相模湾城ヶ島沖の陸棚上で観測された半日周期の内部波. 東京水産大学研究報告, **72**, 43-49.
- 松山優治・平元泰輔・岩田静夫 (1988): 1986 年夏季に相模湾奥部で観測された鉛直水温構造の時間変化. 日本水産学会誌, **54**, 1589-1593.
- Matsuyama, M. (1991): Internal tides in Uchiura Bay, p.449-468. In: *Tidal Hydrodynamics*, ed. by Bruce B. Parker, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- 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**, 194-206.
- Sherwin, T. J. (1988): Analysis of an internal tide observed on the Malin Shelf, north of Ireland. *J. Phys. Oceanogr.*, **18**, 1035-1050.
- 宇田道隆 (1985): 海と漁の伝承. 玉川大学出版, 東京, 392pp.
- Wunsch, C. (1975): Internal tides in the ocean. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **13**, 167-182.