

岡山県児島湾における潮汐過程と底質移動

大久保賢治¹

Tidal and Sediment Processes in Kojima Bay, Okayama, Japan

Kenji Okubo¹

Abstract: Tidal resonances among dominant components are detected by means of spectral analyses of temperature records obtained in- and outside Kojima Bay, Okayama Prefecture. The resonant modes are diurnal, semi-diurnal, and higher constituents with frequencies of N cycles per day ($N < 6$) and they are considered as longitudinal internal seiches or oscillation of the embayment scale. Near the closed end of the bay, the uni- and bi-nodal modes of lateral internal seiches are found to be dominant and the internal waves with periods of a few days are also noticed in the lower layer. Bed material around seiching nodes is expected to be coarser and the fact is reported in the reference. The finer sediment is moving with nutrients toward the mouth to the inland sea. The longer retention in the sediment is one of the biggest issues in the coastal environment.

Key words: tidal resonance, spectral analysis, internal seiche, sediment transport, stratification

1. はじめに

1999年7月、岡山県日生諸島大多府島東沖において、図1のような潮流の構造を底置式音響ドプラー流速計ADP (Acoustic Doppler Profiler; 1.5MHz; NORTEK社)で測定した。成層の影響があると判断されたので、当時目標であった対数型度分布の観測は、その年の冬を待って開始し、後に図2のようにまとめられた(大久保, 2003, 2012)。しかし、鉛直面内に収まらない図1の分布には別の扱いが必要である。これ

は一見、吹送流のらせん構造を連想させるが、薄い表層の一様な潮流下に流向が時計回りに変化する構造を伴うもののエクマンらせんのように上層(風)と下層(水)の偏向はなく、自転が効いたものかどうかも明らかでない。したがって、例えば、潮流が巻上げた濁質によって濁水の密度流が発生したという説明も可能である。確かに、この場所の海底地形は退潮の向き(東北東)と直角右向き(南南東)に海底が傾斜し、退潮の加速時に再浮上した濁質が、後半は緩やかに沈降しながら斜面を流下するという

¹ 岡山大学大学院環境生命科学研究科 Graduate School of Environmental and Life Science, Okayama University, Okayama 700-8530, Japan.

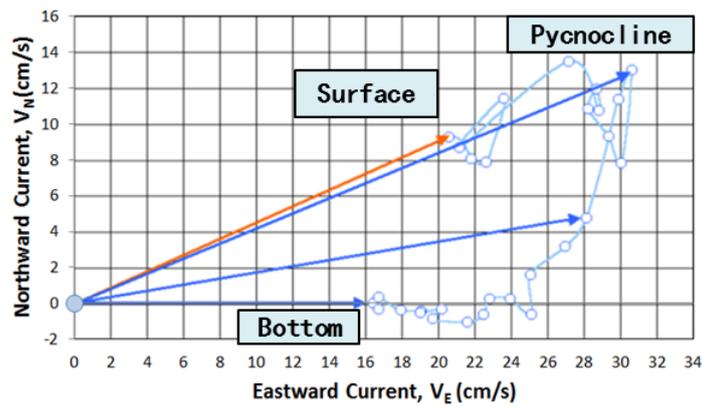
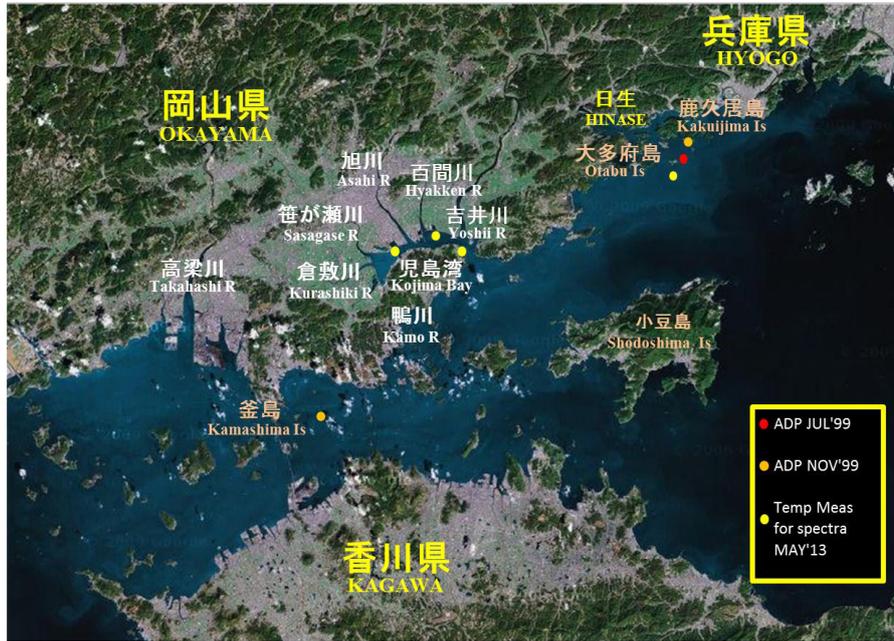


図1 夏季の潮流構造 (1999/7 日生・大多府島沖, 水深 11.8 m) 海底上 0.6 m から 0.4 m 毎の各深度における流速を示す。

Fig. 1 Spiral structure of the tidal current (July 1999, off Otabu Is., Hinase, Okayama, h = 11.8 m). The profile was taken upward with a vertical spacing of 0.4 m from 0.6 m above the sea floor.

解釈は極めて自然である。この仮説に従えば、こうした非平衡濃度分布と下層密度流が退潮毎に繰返されるのか、しかし、同じことが入潮時には起こらないなら、それは重力とコリオリ力の地衡流平衡が達成されているためかという問題に帰着されよう。本研究では、まず濁りの原因となる微細土砂の由来を、特に児島湾からの排出という側面から考える。

水温自体が潮流に効くと当時も考えていなかったが、冬季は密度の均質条件が保たれて対数則が成立すると期待していた。潮流は流れの幅が広く、我が国の中小河川に比べれば境界層の発達が顕著である。しかし、実際に計測を開始すると河口の塩淡密

度差や大量の浮遊砂が存在する場合、図2のように対数+直線則が成立することも確認されている(大久保, 2012)。成層の原因が後者の土砂濃度にある場合、ADPの反射強度を補正して相対濃度(濁度)とすれば、ラウスや板倉・岸の平衡濃度分布式(土木学会水理委員会, 1999)と比較、粒径(沈降速度)を介して、流速分布から得られる海底摩擦速度を精査できる。このように、ある程度の水深が維持される沿岸海域では海浜流による漂砂よりも浮遊砂の形態が卓越する場合がある。

成層海域の潮流は非成層の場合より下層流速が遅く、底質の再懸濁が進まず、細粒泥も堆積する傾向

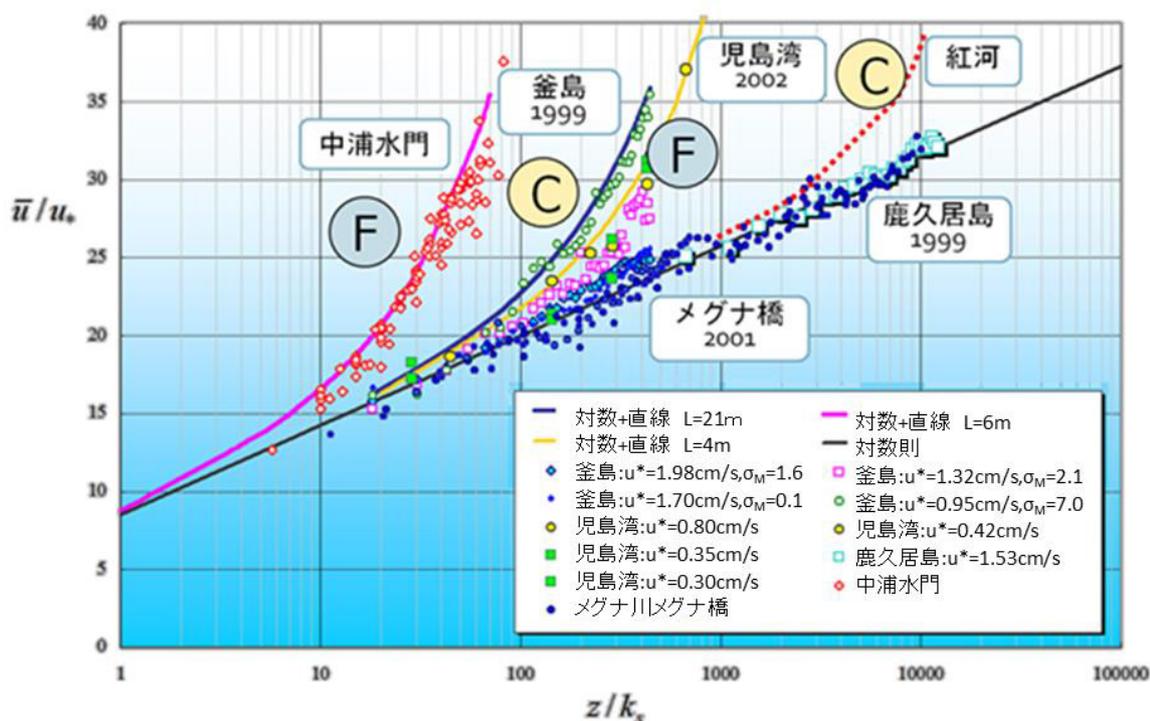


図2 潮流の対数型および対数+直線型の流速鉛直分布 (大久保, 2003, 2012)

Fig. 2 The logarithmic and the log-linear profiles of tidal currents (Okubo, 2003, 2012)

があり、鉛直混合が抑制される結果、溶存酸素濃度・飽和度とも低い状況が持続する。また河口近傍では河床材料の細粒分のみ供給が持続的である。このような近年の内部潮汐場の特徴は瀬戸内海の現状をよく表している。この底質細粒化は濁りの増加、透明度低下、光合成阻害、アマモ場衰退、漁獲減少を通して生態系と深く関連するという認識から、近年は底質改良が大きな課題になっている。カキ殻などを砂泥にすき込む方法も実用的な対策の一つである。平成 20～21 年度に行われた岡山県吉井川河口における底質改良試験では、流速計・濁度計を試験区海底に設置して海底付近の濁度や掃流力を実測し、工事の効果が確認された。同時に試験区と対照区の両方に多層水温計を埋込み、海水温の変動に泥温がどの程度追従するかが調査された。

2. 水温変動のスペクトル

冬の吉井川河口試験区は、図 3 に示すようにカキ殻敷設後は、海底面下 20 cm 程度まで潮汐による海水の水温変動が伝わるようになった。冬季は海底からさらに潜るほど温度が上昇し熱的には不安定にみえるが、密度場全体

は安定であって、塩分は下向きに若干増加していると推察される。さらに周波数スペクトルには各分潮がみられ、熱応答の良好さは海水と底質間の水交換が維持されることを示している。一方、図 4 に示す夏の泥温は深層ほど低下し、水温・塩分とも下向きに密度を増加させる過安定成層であって、海底付近の水および底質内の流動や浸透は抑制され、例えば、試験区の一 30 cm 層は低温となっており、密度分布をさらに安定化させていることがわかる。当時、試験区の隣では、県水産試験場（現・岡山県農林水産総合センター水産研究所）による貝類生態調査が行われていたが、そこで図 5 のような連続水温記録が得られた。これは図 3 や図 4 のように季節限定でない通年記録であり、水深減少に伴って加熱期は上向き、冷却期には下向きの温度スパイクがみえる。何より連続記録という点が貴重で、降水量または吉井川出水に対応した水温低下も認められる。今回は許可を得てこれをスペクトル解析した。

図 3 には、観測した水温記録とともにその周波数スペクトルを示す。ここに、1 日以上の上向き成分を除去するために水温記録は原時系列から正弦波形に近い 1 日移動平均系列を差引いた偏差系列（日変動以下ハイパス成分）に対してスペクトルを計算

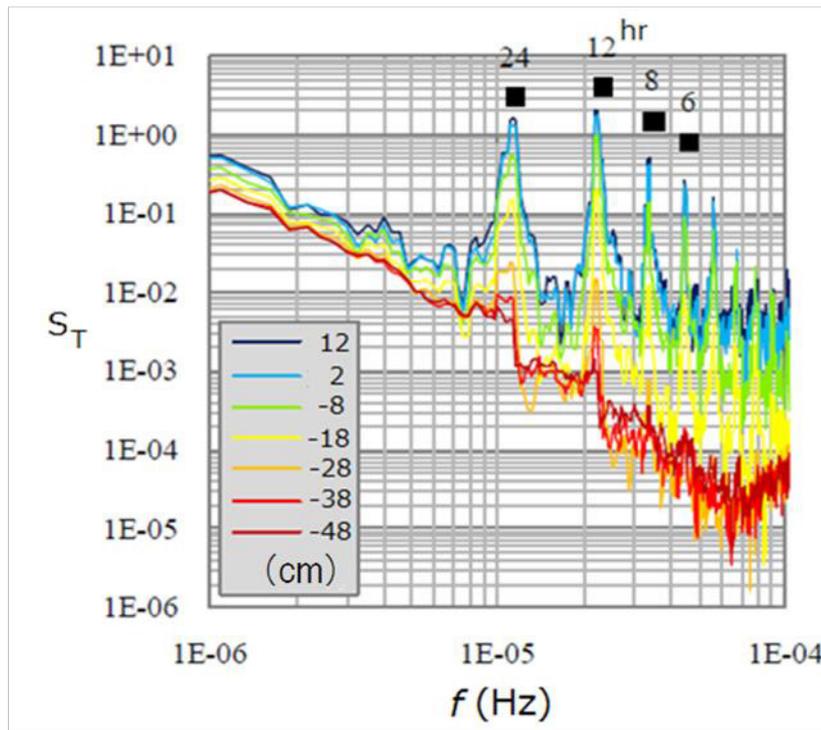
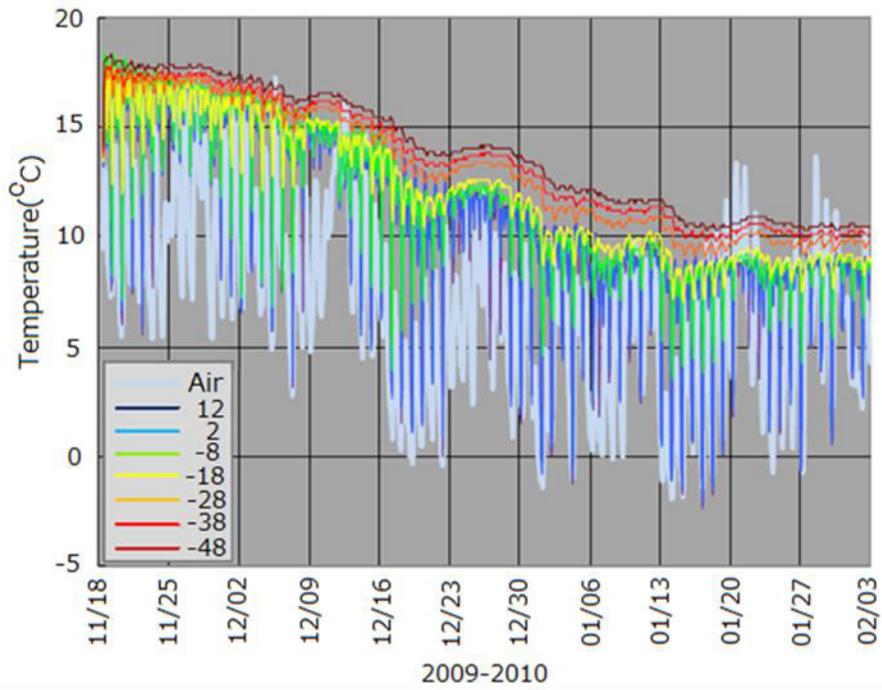


図3 吉井川河口海底付近の温度時系列 ($\Delta t = 10$ 分) とそれらの周波数スペクトル。スペクトル波形は5点移動平均で平滑化した。

Fig. 3 Temperature records ($\Delta t = 10$ min) at around the sandy bed near the mouth of the Yoshii River, and their frequency spectra. The spectra were smoothed by taking the 5-points running average.

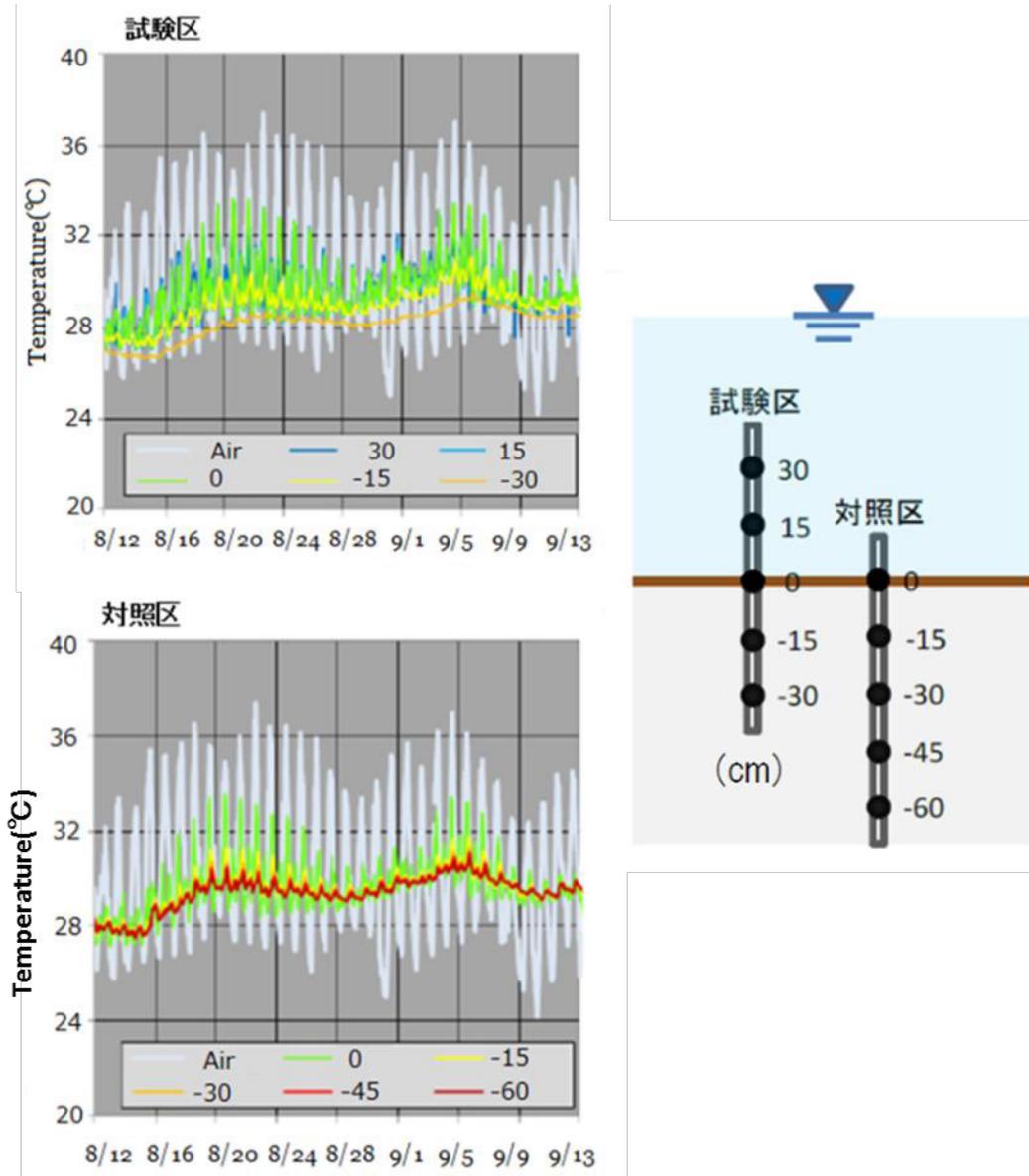


図4 夏季における吉井川河口海底付近の多層温度時系列 ($\Delta t = 10$ 分; 対照区との比較).

Fig. 4 Temperature records ($\Delta t = 10$ min) at around the bed near the mouth of the Yoshii River in summer compared with the reference area.

した。日周潮・半日周潮から高次分潮まで周波数スペクトルに明瞭なピークが現れるのは望外であったが、理由は熱容量の違い、深い海水に比べて浅い陸水が、夏は高温、冬には低温になること、干満差の大きな場所で水深(局所熱容量)が顕著に時間変動することなどが挙げられよう。平均水深が大きくなれば成層は形成され難く、内部潮汐の影響も少ない。ただし、これが季節や気象条件によらないかどうかを調べるうえでも図5は貴重である。

図5のデータは偶数月の中旬から始まる記録前半部分から機械的に選んだ期間について解析し、周波数領域で移動平均をとらずスペクトル分布を平滑化

せずに示した。そのため、図3と異なり周波数毎に複数の分潮が検出されるが、一方、高周波側の変動幅を抑え難い難点はある。そこで2010年4月開始分から2011年2月開始分まで6期分のスペクトルを積上げ周波数特性を平均化した。スペクトル値は期間数6で割って累加し、秋冬季の後半2010年10月開始分から3期分を示した。最後に積上げた最終包絡線が年平均スペクトルに相当する。結果的に夏の成層期も分潮構成は大きく変化しなかった。これには、大潮で干陸化する干潟的な条件の場所であることによるところが大きいと考える。

図5の水温変動スペクトルには日周潮および半日

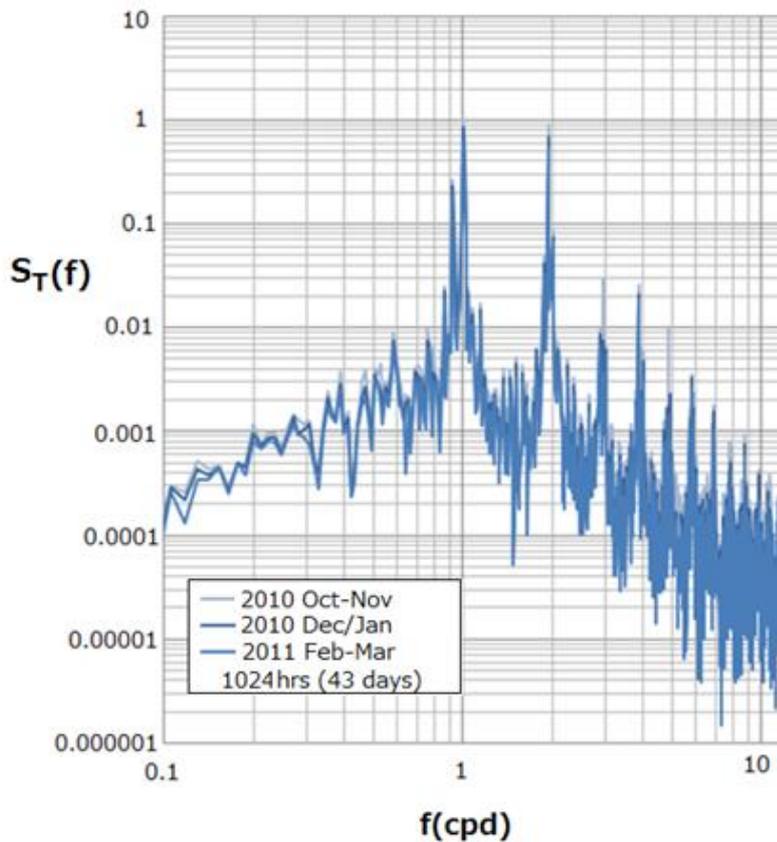
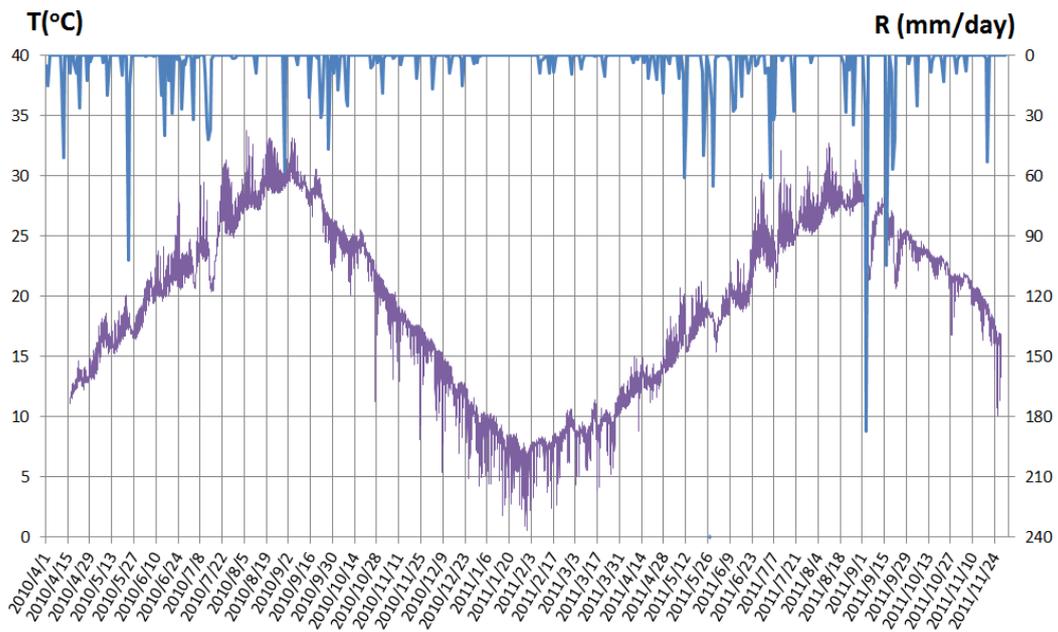


図5 水産研究所による吉井川河口域の通年水温記録 ($\Delta t = 1$ 時間) とその年平均スペクトル. 周波数領域での平滑化なし; 全6期間平均: 夏3期間を表示せず.

Fig. 5 Temperature records ($\Delta t = 1$ hour) at around the sandy bed near the mouth of the Yoshii River, and their frequency spectra averaged annually (Courtesy of Prefectural Research Institute for Fishery). The spectra were not smoothed in the frequency domain and the summer plots are omitted.

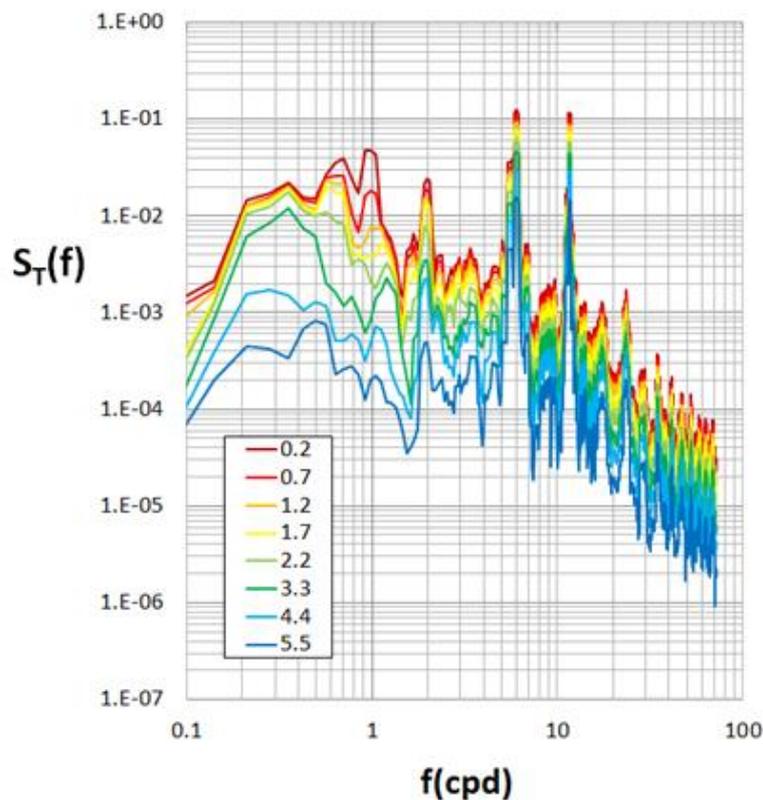
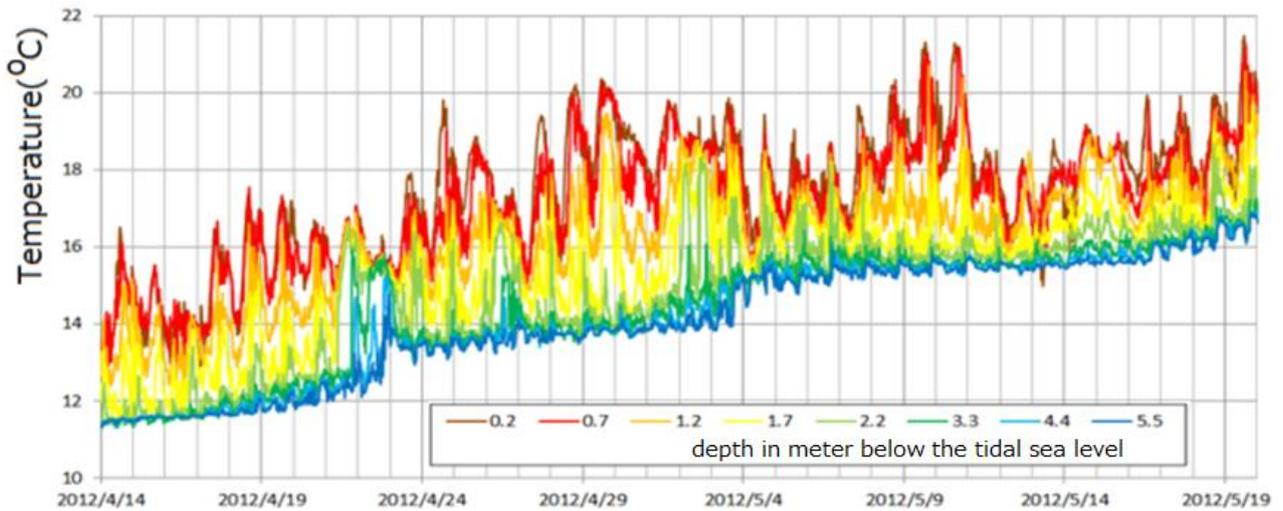


図6 成層期湾奥の8層水温変動 ($\Delta t = 10$ 分) とその累加平均スペクトル.

Fig. 6 Temperature records in 8 layers ($\Delta t = 10$ min) at the closed end of Kojima Bay in early stage of the seasonal stratification, and their frequency spectra as a vertical average by piling up the layers with an equal weight (0.125).

周潮に主要4分潮を含む複数の尖鋭な極大が得られたが、これは平滑化を略したためばかりではない。図5(図3)の記録時間間隔は1時間(10分)、解析記録長1024(170.7)時間と、潮汐周波数帯をより高周波領域として扱い周波数軸上の分割を細かくできたといえる。このように、記録・解析法に配慮

すれば、水温スペクトル解析が簡便な分潮検出法として使える可能性が示された。

吉井川河口の水温記録から半年後の2012年4月には旭川河口と児島湖放流水門に近い児島湾湾奥部で試験運転中の密度流拡散装置の係留地点で、浮体から垂下した水温計列により海面下8層の水温記録

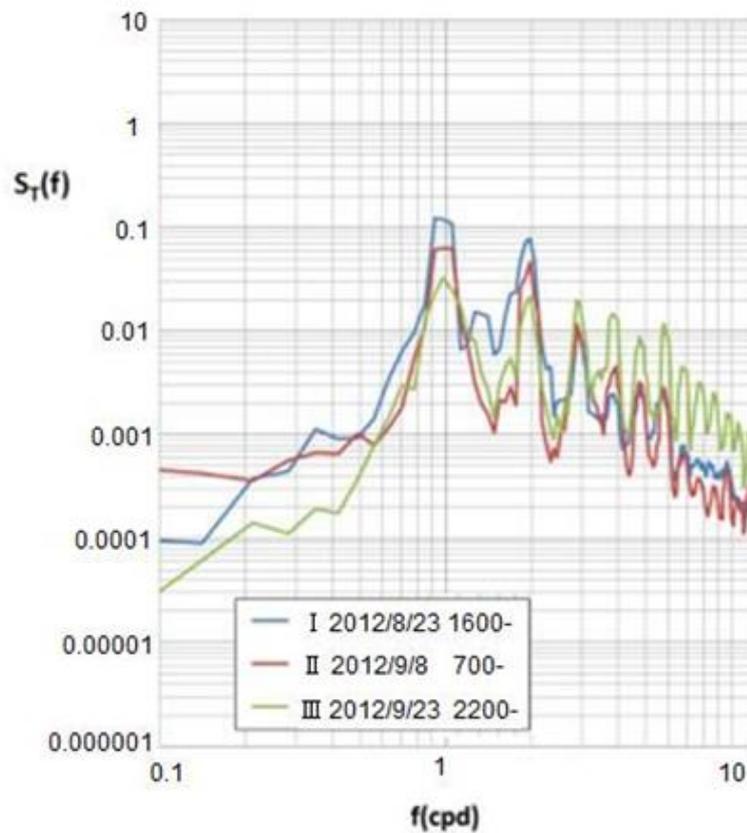
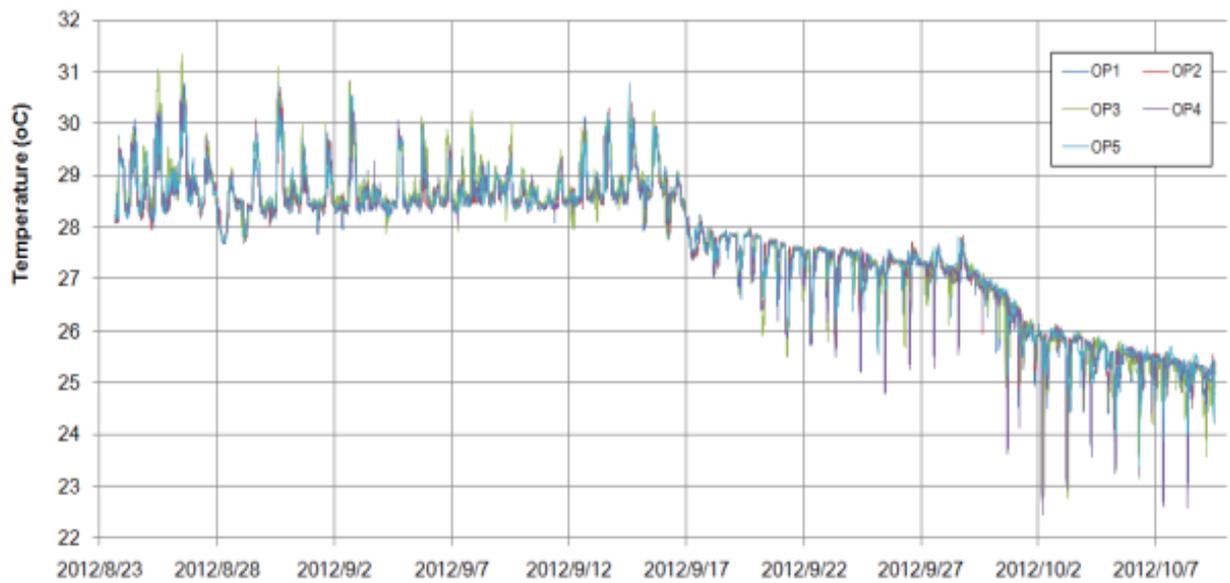


図7 成層期・湾中央部の5地点水温変動 ($\Delta t = 10$ 分) とその平均スペクトル (三期間) .

Fig. 7 Temperature records ($\Delta t = 10$ min) in front of the flood gate of the Hyakken River as the distributary of the Asahi River, and spatially averaged frequency spectra for each term.

岡山県児島湾における潮汐過程と底質移動

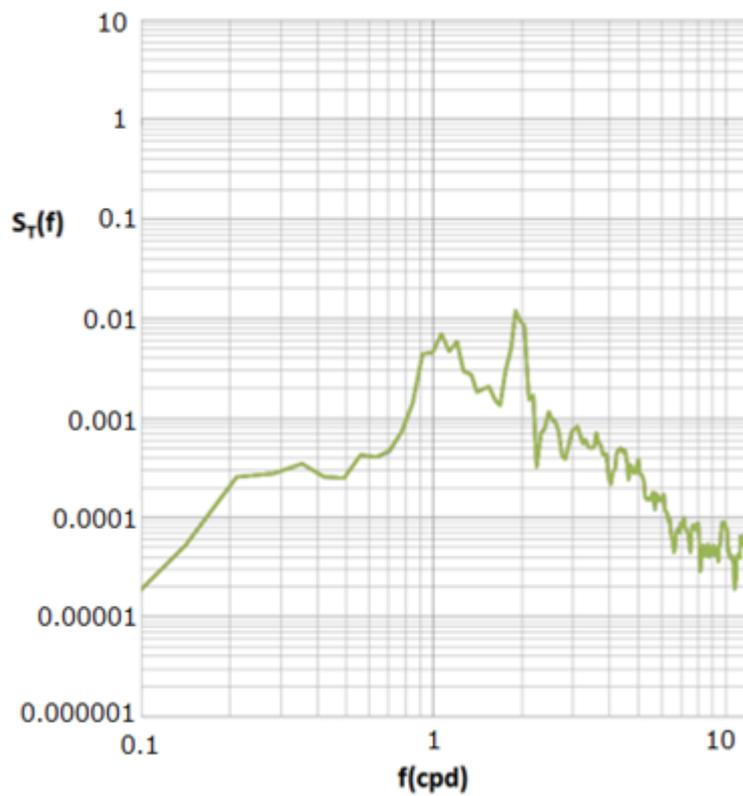
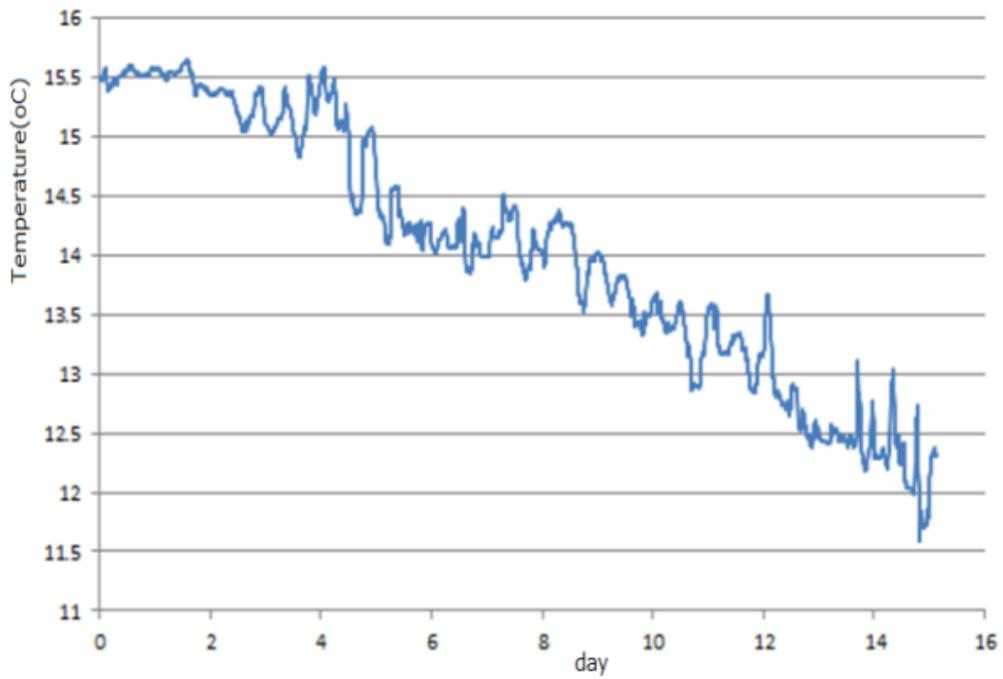


図8 冬季湾外の水温度変動 ($\Delta t = 10$ 分) とそのスペクトル (日生・大多府島南沖).

Fig. 8 Temperature record ($\Delta t = 10$ min) out of Kojima Bay in December 2012, south to Otabu Is., Hinase, and the frequency spectrum.

を収集した。これについても、原系列から1日移動平均系列を差引いた偏差系列についてスペクトルを計算した。図6には、4月下旬ですでに成層場がみられ、下層は高周波変動が少ない状況となる。スペクトル分布も層毎に異なるため単純平均では現象把握が難しい。そこで、吉井川河口と同様、下層スペクトルから順次積上げることで周波数特性の遷移を見た。スペクトルの値は層数8で割ってから積上げ、最後に積上げた0.2 m層の曲線が鉛直平均スペクトルである。表層記録には数日周期の内部潮汐あるいは内部静振が明らかで、鉛直平均スペクトルは日周潮とともに概周期2～3日の変動がみられ、また、半日周潮より高周波側には4時間及び2時間の変動が卓越し、さらに、その高周波側が数十分周期の表面静振や湾振動の範囲に繋がる。

つぎに湾奥と湾口の間位置する旭川放水路、百間川の河口水門では、干潮の前後に潮位差を利用して放流が行われる。水門前に形成された高島干潟が増強された放流により失われまいよう試験的に設置された導流堤施設が存在し、その周辺の5つのモニタリング地点で流速・濁度等の記録が国土交通省岡山河川事務所によって収集されているが、解析目的を説明し、水温観測値のみを提供して頂いた。

図7は2012年8月下旬から10月上旬までの流速計や濁度計の5地点分の水温データをスペクトル解析し平均したものである。昇温期に上向き、降温期は下向きのパルスが出る特徴は基本的に先述の吉井川河口と似た条件であり、また放流が干潮と同期して行われることもあり、分潮系列そのものは明瞭である。特に8月から10月、夏から秋に向かう際に、1cpdより低周波(内部潮汐)側のパワーは落ちるが、一方で高周波(潮汐)側のパワーは増大する。吉井川河口より若干水深が大きいために存在すると考えられる内部波の影響は、秋口に軽減されると考えられる。

潮流が強くても水塊が接し遷移するような場所でないければ、水温変動そのものは弱く、スペクトル値は低下する。最後の例は、かつて図1を得た測点に近い日生諸島大多府島に隣接する南側の海域における冬季15昼夜連続の水温記録(図8)である。冬季の等温線は沿岸方向に走り、1～2℃程度のジャンプを示す水温フロントを形成するが、等温線自体は潮流に沿った方向に走るの、有意な温度差が現れるのは、水温フロント近傍を南北に横切るような場合に限られる。水温記録にある変動も概ね1℃前後であるが、高次分潮の影響もあって、転流時に

水温フロントが揺らぐといった状況で発生するものと考えられる。

解析した水温は海底上0.75mに置かれた流速計の水温チャンネルで、10分間隔の間欠測定(バースト)記録から10分毎の水温値を抽出、1日移動平均系列を差引いた偏差系列からスペクトルを計算した。なお、岡山海域は混合潮型で、宇野地点における気象庁の主要60分潮表の中ではM2潮が卓越するが、ここでも半日周潮が卓越している。

3. 児島湾の潮汐特性

4つのスペクトルを比較しながら考察するため、座標軸を揃え、一枚の図として図9に再掲する。スペクトルピークの最大値は児島湾湾口部の吉井川河口で得られ、日周および半日周潮が同程度であった。スペクトル分布の平滑化は行わず、また成層期と非成層期を平均したのでピーク最大値は冬季としてはやや低めになるが、図5に示すように1[K²d⁻¹]に届く程度である。つぎに湾中央部百間川河口では5点平均スペクトルのピーク最大値は日周潮0.7[K²d⁻¹]、半日周潮は0.5[K²d⁻¹]程度になる。湾奥締切堤では全層平均すると日周潮0.5[K²d⁻¹]、半日周潮0.2[K²d⁻¹]に下がる。一方、4時間及び2時間のピークはともに0.1[K²d⁻¹]程度である。このように日周潮と半日周潮に限れば、湾口から湾奥に向けて水温変動でみた潮汐の強さは逡減していく。また、湾外の冬のスペクトルには1日以上周期成分はなく、半日未満の卓越成分もみられない。

ここで解析したデータは湾奥以外、全て下層の水温変動に限られ、これが長周期の内部変動を捉えきれていない理由と考えられる。ただし、湾口と湾中央部の測点は水深が本来小さく、二層状態の長周期内部潮汐の特徴が現れることは少ない。一方、湾奥は日周潮が半日周潮よりピーク値が高かったが、これは放流や水温成層の擬似周期が前者に近いためではないかと考えられる。図10に示すように、児島湾の幅は吉井川と旭川、各河口上流・西側に相当する2か所が狭くなって百間川河口で3倍近く広がっている。重要なことは、児島湖締切堤と旭川河口西岸で仕切られた水平距離に係わる内部モードが4時間および2時間という両周期をもたらししている可能性である。これを認めれば湾奥で高周波成分が発生しやすく、湾外ではそれがほとんどなく、湾口や中央部で適度に発生することが理解される。

水温変動現象に係る変量のうち、水平長に関して、

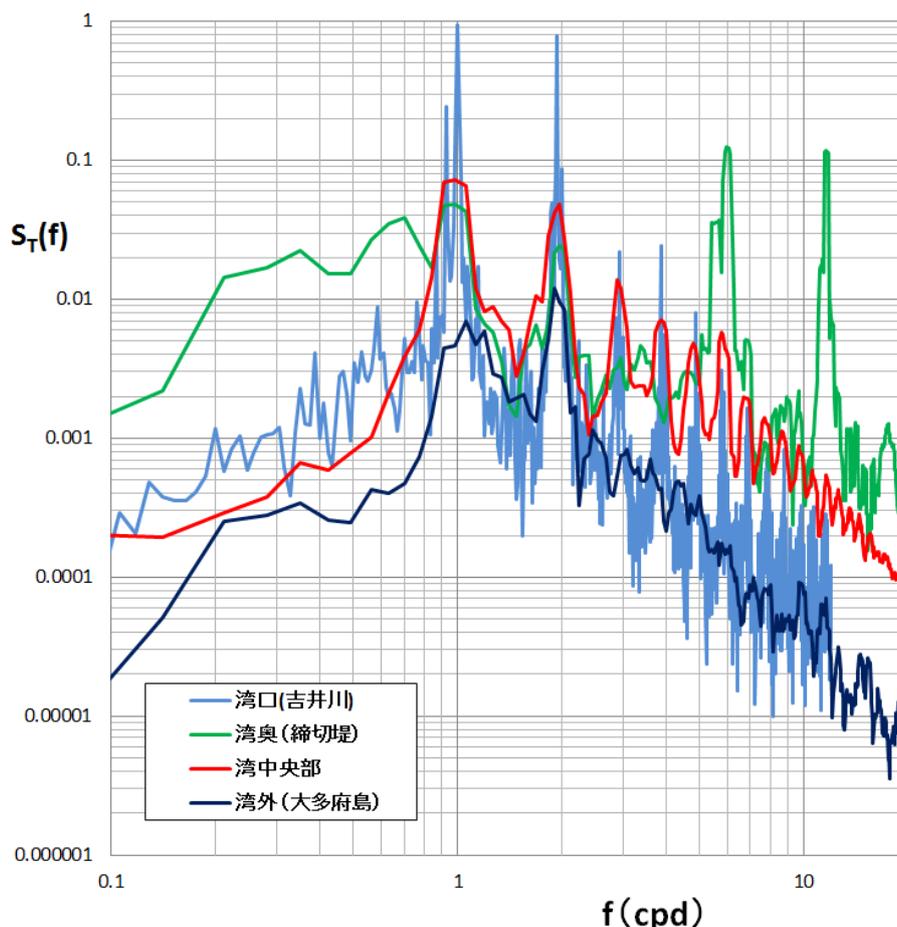


図9 児島湾内外の水温スペクトルの比較.

Fig. 9 Comparison among the spectra in- and outside Kojima Bay.

児島湖締切堤から旭川河口まで $l = 3$ km, 吉井川河口まで $l = 9$ km, さらに湾口までが $l = 12$ km と考える. モードとして単節静振 (l : 半波長) は $l = 10$ km, 湾振動 (l : 1/4 波長) は $l = 12$ km とする.

また, 図10を参考に, 湾の平均水深 h は5~6 m, 上層厚 h_1 は1~1.5 m とし, さらに, 密度差には塩分差が支配的とし, 鉛直塩分差1~2%を考える.

こうして得られる長波と内部長波の波速は

$$c = \sqrt{gh}, \quad c_i = \sqrt{\frac{\varepsilon gh_1 h_2}{h}}$$

ここに,

$$h = h_1 + h_2, \quad \varepsilon = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_0}$$

であり, h は水深, h_1, h_2 : 上層および下層水深, ε : 相対密度差, ρ_1, ρ_2 : 上, 下層水の密度, ρ_0 : 基準密度, g : 重力加速度である. 以上から, 基本湾振動 (1/4 波長) と単節 (1/2 波長) および二節 (1 波長)

の内部静振の周期はそれぞれ,

$$T = \frac{nl}{c_i}, \quad n = 4, 2, \text{ および } 1$$

となる.

ここで, $h = 6$ m, $h_1, \varepsilon = 0.022$ を用いれば, $l = 3 \sim 11$ km に対して単節 (実線), 二節 (点線) の内部静振周期は T , 水平長さ l の関数として, 図11のように計算される. 湾奥で観測された周期2時間と4時間の成分はそれぞれ単節と二節のローカルな内部静振と考え, 周期12時間から4.8時間までの N 回潮 ($N = 2 \sim 5$) では, $l = 4 \sim 8.5$ km の水平長 (または節間隔) があれば可能である. また日周潮については, 湾口が節になる湾振動とすれば, 波長が湾長の4倍 (単節内部静振の2倍) となり, 2/3 回潮 (1.5日周期) の程度までは説明可能になる. 一方, 湾奥スペクトルにみられる周期2時間以下の高周波変動については表面静振として十分説明される.

最後に, ここでは湾外とみなした瀬戸内海自体が

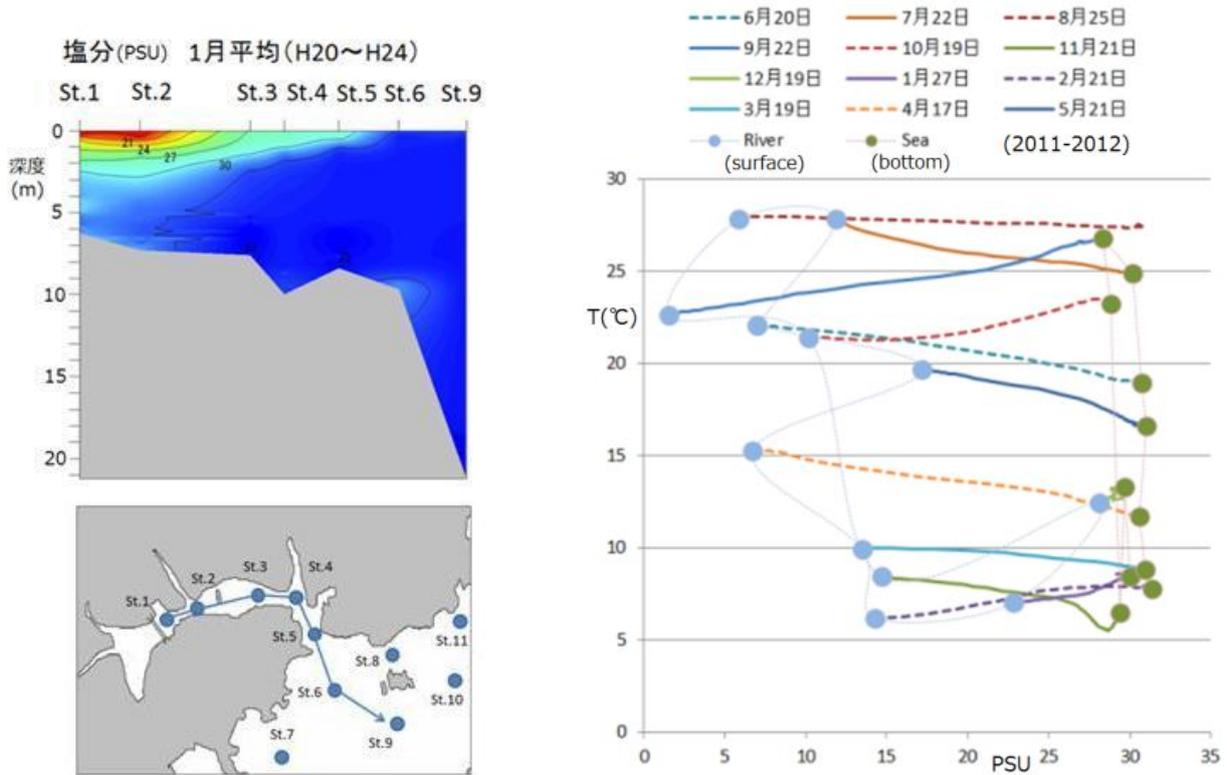


図 10 児島湾平均水深と上層厚および塩分濃度差 (水産研究所による)。

Fig. 10 Longitudinal bathymetry and salinity section, and typical monthly profiles of salinity in Kojima Bay (Courtesy of Prefectural Research Institute for Fishery).

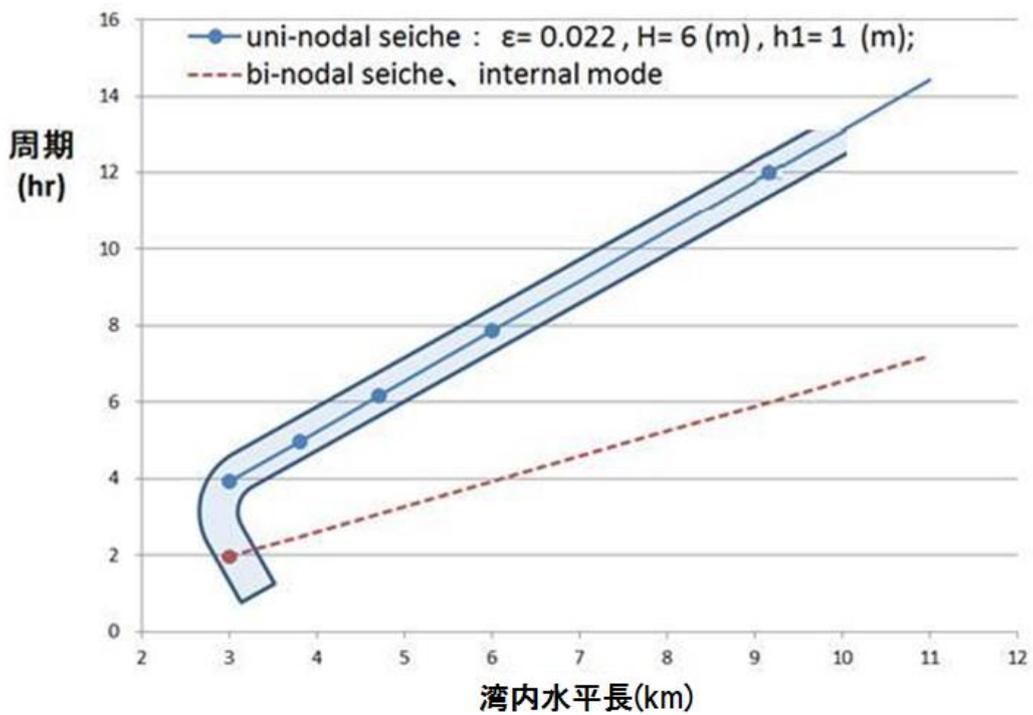


図 11 児島湾の単節および二節の内部静振の周期。

Fig. 11 Estimated Periods of the uni- and bi-nodal internal seiches depending on the partial lengths of Kojima Bay.

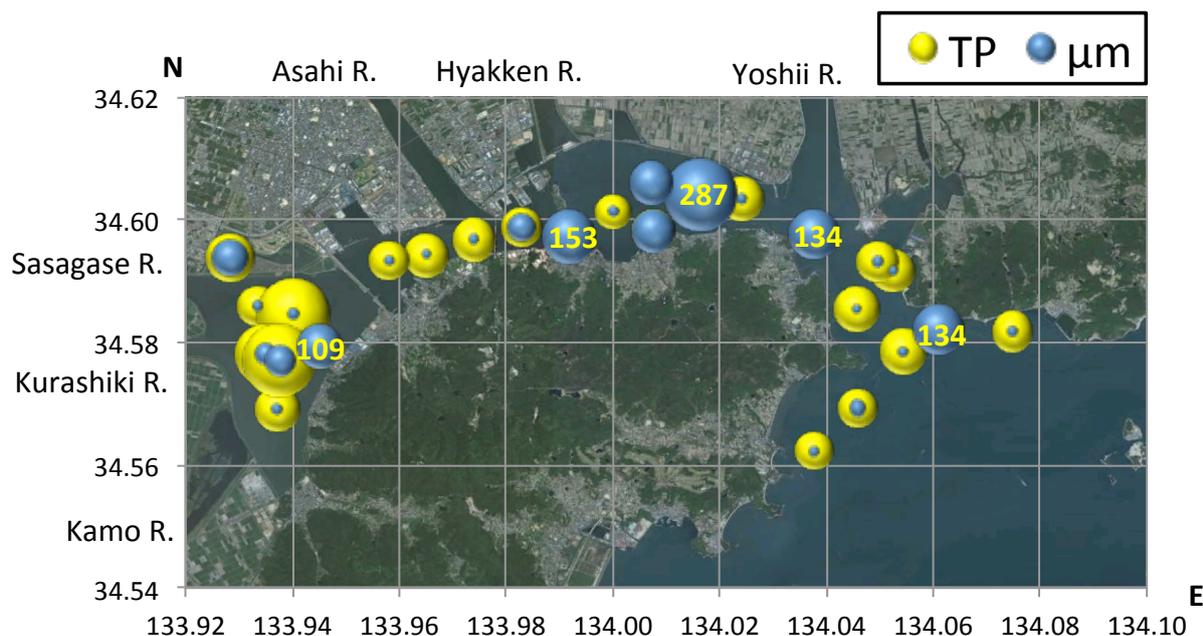


図 12 児島湖・児島湾の全リン濃度 TP と粒径 (μm) 天野ら (2012) による。

Fig. 12 Total Phosphorous TP and particle size of the bed materials in Lake Kojima and Kojima Bay after Amano et al. (2012).

太平洋からみれば，“湾内”であって，その潮汐振動成分が，さらに児島湾固有の静振や湾振動と共振的に挙動することが再認識された。

4. 湾内の流れと土砂移動

児島湾の内部静振や内部湾振動の主に周期について考察してきたが，これらの節位置は流速変動が相対的に強く，底質が粗くなることは予想される。天野ら (2012) は，児島湾および児島湖内 27 地点の底質と 4 地点のコア試料を検討した。沿岸部と流心部の粒度の違いは主に波浪によるとされているが，Cs 同位体の分析結果から，泥質化は 1950 年以降の地形改変により潮流が弱まったことで顕在化したと結論している。その機構について，ここでは，湾の内部静振過程と関連づけて考察する。

図 11 は天野らの結果を模式的に示しており，濃色マーカーが粒径 ($\mu\text{m} : \phi$ 値より計算)，淡色マーカーは全リン濃度 (TP) を表している。児島湖は高い TP 値と $63 \mu\text{m}$ 以下の細粒泥分の割合が特徴的である。児島湖には笹ヶ瀬川，倉敷川および鴨川が流入し，それらの流出土砂が一時堆積する。湾奥・湾中央部南岸及び湾口 (湾外) 堆積物は数 μm と細粒であるが，旭川と百間川の河口東側や吉井川河口

は $100 \mu\text{m}$ 以上の細砂の堆積が認められる。内部静振の節位置として考えられるのは底質粒径が粗くなる旭川河口東，百間川河口東，および吉井川河口位置である。組合せとして必然的に単節静振は百間川河口東，二節静振は旭川と吉井川河口が，それぞれ節にあたり，これを確認するためには，隣接する節と節，節と壁の伝播時間が相等しく，その和が当該内部モードの半周期分に等しいことをいえばよいが，これについては，すでにスペクトルの周期解析で行っている。

さて，図 12 の TP の動きをみると児島湖内に滞留された分はあるが，その放流分は旭川・百間川・吉井川からの流出分を合わせ湾口に向け移動しているようであり，湾奥拡散装置の効果もそのように期待される。ただし，天野ら (2012) の湾口コア (KJC7) が示しているように，1980 年以降は，細粒分 ($\phi = 8$) が約 20 cm も蓄積し，その中に残留したままとなって利用されていない可能性がある。今後は，湾奥からの土砂や栄養塩の湾外流出量を定量化していく必要がある。

5. 結 論

瀬戸内海における海砂採取が禁止され、余水とともに拡散したシルト分が除去されて、透明度が回復しつつある一方、ノリの色落ちに代表される貧栄養化が問題になっている。透明度低下により消失したアマモ場のバイオマスに見合う大量のストックがない現状では、冬季にダムの一時的放流が水産側から要請されるほどに問題は深刻化している。密度流拡散装置を用いて湾奥の栄養塩を、それが枯渇した藻場・漁場に供給することも、この必要性によるものである。

本研究では児島湾からの栄養塩あるいは微細土砂フラックスを検討するため潮汐系と共振する内部静振と湾振動の周波数特性に注目した。10分、または1時間間隔で得られた水温変動記録の周波数スペクトルを求めて計算周期と比較した。潮汐が湾に侵入するときには湾地形に応じていくつかのモードについてスペクトル値が増大する。児島湾は干潮に合わせて放流が行われること、気温・日射量といった気象変化が日周的であることもあり、日周潮および半日周潮が湾外に比べ弱まることはなく、高周波成分についてもこれは同様である。記録および解析法に配慮すれば、水温スペクトル解析が簡便な分潮検出法として使える可能性がある。

児島湾においては、これらの長周期成分は長軸方向内部静振であり、日周潮（24時間）が内部湾振動、半日周潮：2回潮（12時間）は単節、4回潮（6時間）は二節の内部静振とした。簡単のため、三節以上の内部静振や分潮成分は、異なる湾内水平長に対応する単節内部静振とみなした。一方、湾奥でみられる6回潮（4時間）と12回潮（2時間）相当の周期は湾奥での水平長に基づく横方向の内部静振と考えられる。ただし、ここで試算した振動周期は、いずれも全季節を通して一定の内部波速値に対する結果であって、高精度で絞り込まれたものではない。湾内の一部底質が粗粒であることについて、天野ら（2012）は波の影響を挙げているが、内部静振節位置で流速振幅は最大になることから、単節および二節の長軸内部静振の節位置との対応を、これらの場所を実態調査することは今後の課題であろう。

湾奥の密度流拡散装置により旭川河口部まで栄養塩や細泥分を輸送すれば、後は自然の排出プロセスで湾外に運ばれることは確かであろう。その輸送速度こそが問題であるが、年間一定量は湾口に蓄積していることも指摘されている。こうした泥質化は、

児島湾内にとどまらず、湾外にも波及しているはずであるが、湾外では十分長期の追跡結果がなく、一つには、冒頭で述べたように流速・濃度分布から輸送経路ならびに排出過程を解明する必要がある。

謝 辞

本研究を行うにあたり貴重な情報・資料を提供して頂いた岡山県水産課の鳥井正也氏・水戸鼓氏、岡山県水産研究所の岩本俊樹氏・近藤正美氏・石黒貴裕氏、国土交通省岡山河川事務所の堀博幸氏に謝意を表します。

引 用 文 献

- 大久保賢治（2003）湖沼・沿岸の土工水理学，土木学会水工学海岸工学委員会，夏期講習会テキスト，B：1-26.
- 大久保賢治（2012）備讃瀬戸・備後灘・燧灘の概要，瀬戸内海，63：4-6.
- 土木学会水理委員会編（1999）：水理公式集，平成11年版
- 天野敦子・金廣哲・小野寺真一・佐藤高晴・清水裕太・齋藤光代（2012）岡山県児島湾における堆積物を用いた過去100年間の海底環境変遷と人造湖形成の影響評価，陸水学雑誌，73：217-234.