

利根川感潮域に発生するセイシュについて

ON SEICHES OBSERVED IN THE TONE RIVER ESTUARY

清水健司¹・石川忠晴²

Kenji SHIMIZU and Tadaharu ISHIKAWA

¹ 正会員 工修 東京工業大学大学院 総合理工学研究科

(〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259)

² フェロー 工博 東京工業大学大学院教授 東京工業大学大学院 総合理工学研究科 (同上)

This paper analyzes velocity fluctuation of 30 min to 60 min period observed in the Tone River Estuary. First, the influence of the fluctuation on resuspension of sediment is assessed by analyzing near-bottom turbulence data. The result indicates that the fluctuation may enhance resuspension considerably.

Second, the characteristics of the fluctuation are investigated. Spectrum analysis of cross-sectional average velocity and water level shows that there are several dominant oscillations whose frequencies coincide with the characteristic frequencies of seiches in the estuary. This result indicates that the velocity fluctuation is caused by higher harmonics of seiche. Furthermore, the external force causing the seiches and the response of the estuary against it are examined by comparison of frequency response functions estimated from observation and analysis. It reveals that the seiche is mainly caused by offshore water level fluctuation.

Key Words: Estuary, Seich, resuspension, fine sediment

1. はじめに

河川感潮域の流動は、主として河川流、潮流および密度流によって構成され、それらに伴って微細土砂の移動が生じていると考えられている。しかし、筆者らが利根川感潮域で行った現地観測の結果¹⁾では、周期が30分から1時間程度の流速変動が存在し、これによって底質の巻き上げが発生しているようであった。

そこで本研究では、この30分～1時間程度の周期の流速変動(以下では、潮汐に比べ周期が短いという意味で短周期変動と呼ぶことにする)について、それが底質の巻き上げに及ぼす影響を示した後、短周期変動を引き起こす要因について検討する。

2. 短周期変動が底質の巻き上げに及ぼす影響

まず、2003年4月20日に16.0KP地点の滞筋上(図-1参照)において測定されたデータを用いて、短周期変動が底質の巻き上げに及ぼす影響について検討する。この観測では、ADCPおよびADV(Acoustic Doppler Velocimeter)を河床付近に設置し約1潮汐にわたる河床付近の乱流と流速の鉛直分布を計測した。ADVによる計測は河床上0.15 mにおいて16 Hzで行い、音響強度を用いてSSおよびSSフラックスを推定した。観測および解析法の詳細については清水ら¹⁾を参照して頂きたい。

図-2に主要な観測結果を示す。(a)は水深と堰放流量、(b)はADCPで計測した流速の鉛直分布から求めた断面平均流速(下流向き正)、(c)の実線はADVによって計測された河床付近の2分間平均流速(下流向き正)、(d)と(e)の実線はそれぞれADVの計測から得られたレイノルズ応力(河床に下流向きの力がかかる場合を正)と鉛直方向のSSフラックス(上向き正)である。図中の破線については後述する。

まず、(b)の断面平均流速と(c)の河床上0.15 mの流速を比較すると、後者が塩水楔内の流速であるため、潮汐の時間スケールでは両者のトレンドは一致しない。しかし、周期が30分～1時間周期の短周期変動について比較すると、両者の振幅・位相はよく一致していることが

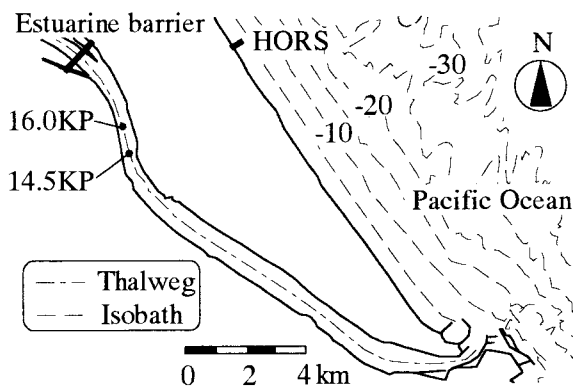


図-1 利根川感潮域周辺の平面図

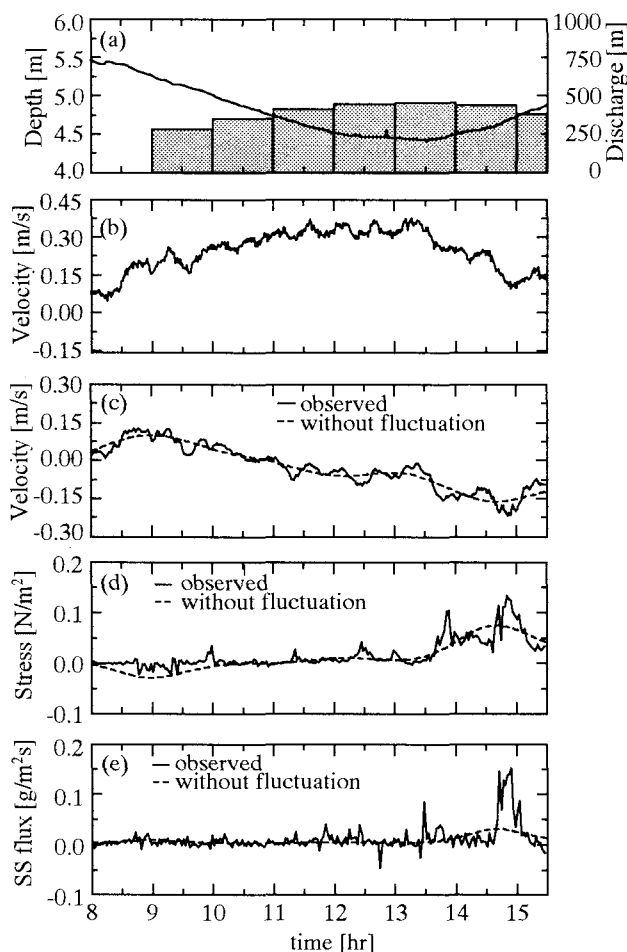


図-2 2003年4月20日, 16.5KP 滞筋上での観測結果。(a)水位と河口堰放流量, (b)断面平均流速, (c)河床上0.15mにおける2分間平均流速, (d)レイノルズ応力, (e)鉛直方向のSSフラックス。実線は計測結果, 破線は周期が2時間以下の変動がないと仮定した場合。

分かる。このことから、短周期変動は断面平均的な流動によるものと考えられる。流速の変動と対応して、(d)のレイノルズ応力や(e)のSSフラックスも大きく変動している。特にSSフラックスは、河床付近で潮汐スケールでの逆流と短周期変動が重なる時間帯(14:30-15:00)で急増している。

そこで、短周期変動が河床せん断応力や底質の巻き上げに及ぼす影響を評価するために、以下のような仮想的な計算を行った。まず、図-2(c)(d)(e)のデータを用いて、i) 平均流速 $\langle u \rangle$ とレイノルズ応力 $\langle u'w' \rangle$, ii) レイノルズ応力 $\langle u'w' \rangle$ とSSフラックス $\langle w'C' \rangle$ の相関を調べておく。ここで、 $\langle \rangle$ は2分間平均を表す。これらの相関を図-3に示す(図-3(b)で点線で囲った2点は傾向が異なるため相関式を求める際、除外した)。その後、図-2(c)の平均流速から2時間以下の周期を持った成分を取り除いた流速の時系列を作成し(図-2(c)の破線)、図-3(a)に示した相関式を用いて、短周期変動がないと仮定した場合のレイノルズ応力(図-2(d)の破線)を求め

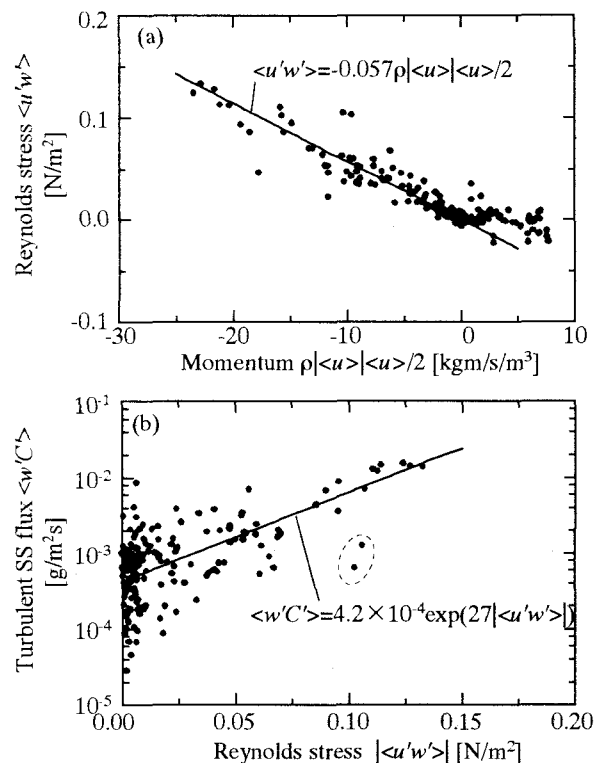


図-3 2003年4月20日, 河床上0.15mにおけるADVによる計測結果。(a)レイノルズ応力と運動量との相関, (b)レイノルズ応力とSSフラックスとの相関。

た(短周期変動は周期が30分~1時間程度のゆっくりとした流速変動であるため、図-3の相関関係は変動により影響を受けないと期待される)。さらに、このレイノルズ応力から、相関式を用いて短周期変動がないと仮定した場合の鉛直方向SSフラックス(図-2(e)の点線)を求めた(この方法では相関式を2回用いることになるが、平均流速とSSフラックスとの相関式を用いてSSフラックスを計算しても結果は同様である)。図-2(e)の実線と破線を比較すると、特に14:30~15:00で見られるように両者のずれは大きく、短周期変動が底質の巻き上げに大きく関与している可能性が示唆された。

3. 短周期変動の周波数特性

短周期変動の特性を詳細に検討するために、2001年8月1日~10日にかけて、14.5KP地点の滞筋上(図-1参照)で得られているADCPの10日間の連続観測データを用いる。図-2(b),(c)から短周期変動は断面平均的な現象であると考えられるので、以下では断面平均流速を用いて解析を行う。

図-4に2001年8月1日~5日(観測期間の前半)の(a)河口堰放流量と銚子におけるアメダスの風速・風向, (b)14.5KPの河道方向断面平均流速, (c)14.5KPの水位, (d)波崎海洋研究施設(HORS, 図-1参照)において測定された水位を示す。(d)の黒線は実測値, 灰色の線は後に述

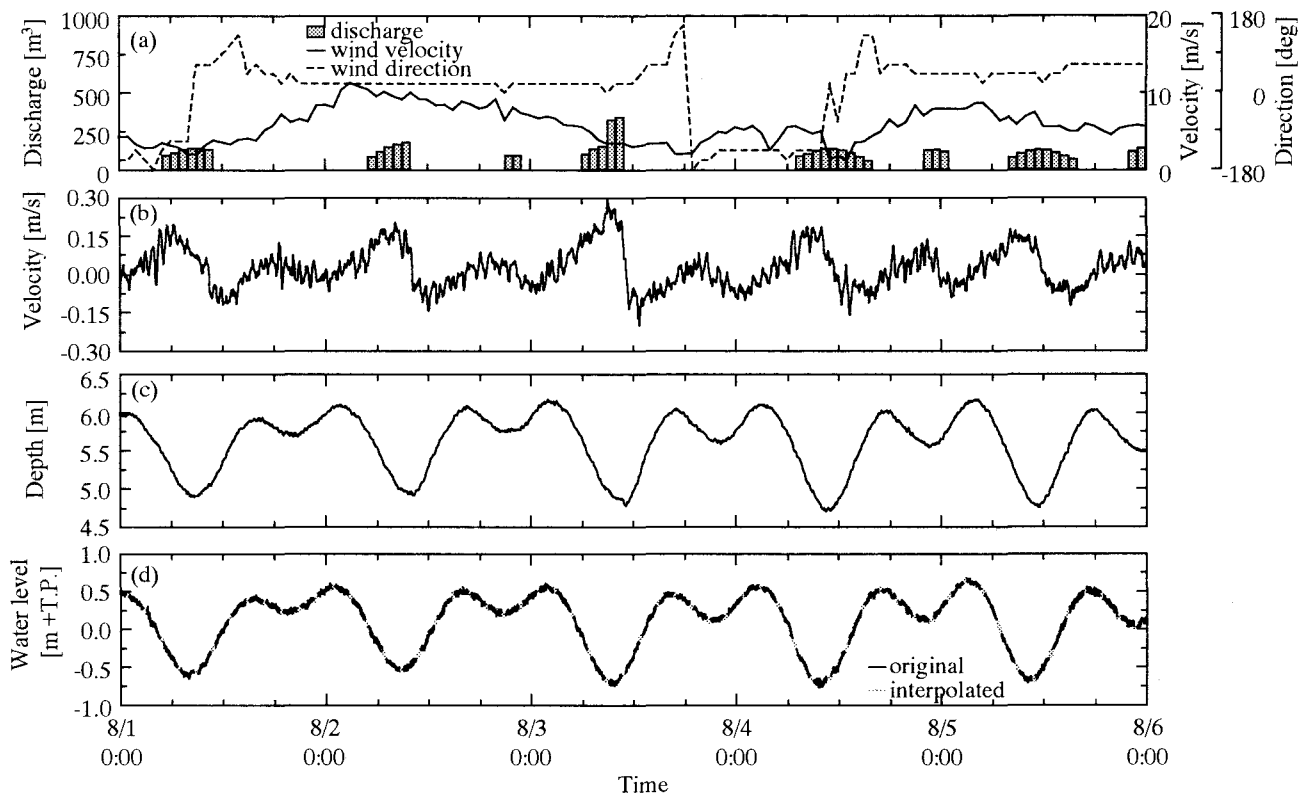


図-4 2001年8月1日～5日の観測結果。(a)河口堰放流量と銚子における風速・風向(北が0度, 時計回りが正), (b)14.5KPの下流向き断面平均流速, (c)14.5KPの水位, (d)波崎海洋研究施設における水位(黒)とARモデルによって補間された水位(灰色)。

べる方法で補間したデータである。14.5KPでの流速・水位の計測にはADCP (Aquadop; Nortek社製)を用い、5分ごとに2分間平均した流速と水位を記録した。断面平均流速は、流速が横断方向に一樣であると仮定し、流速を河道断面内で積分して求めた。波崎海洋研究施設での水位は栈橋に設置された空中発射式超音波波高計を用いて、奇数正時から94分間、サンプリング周波数2 Hzで測定されている。測定地点は汀線から約400 m沖側、水深約5 mの地点である。

図-4(b)から、断面平均流速に顕著な短周期変動がほぼ定常的に存在していることがわかる。これは、図-4には示していない観測の後半においても同様であった。(c)の水位を見ると、振幅は小さいが、同様の変動が見て取れることがわかる。

上述の観測結果を用いて断面平均流速と水位のパワースペクトルを求める。パワースペクトルの推定には最大情報エントロピー法(Burg法)を用いた²⁾。ラグ数は、流速と水位のFPEを同時に小さくするよう選び、 $m = 100$ とした。

パワースペクトルの推定結果を図-5に示す。(a)が断面平均流速、(b)水位のスペクトルである。なお、(c)は波崎における水位のスペクトルであるが、これについては4.(1)で説明する。図-5(a),(b)のスペクトルには矢印で示す幾つかのピークが存在する。流速のピーク周

期は大きい方からそれぞれ1.25, 1.06, 0.78, 0.53 hrである。水位のスペクトルでは0.78 hrのピークがないのが特徴的であるが、この理由については4.(3)で述べる。周期が20分以下になると流速のスペクトルは低いレベルでほぼ平らになっているが、これはノイズの影響であると考えられる。

ところで、利根川感潮域を一次元矩形水路と近似すると、その固有周期 T_n は概ね

$$T_n = \frac{4L}{(2n-1)\sqrt{gh}}, \quad n=1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 L は感潮域の長さ、 g は重力加速度、 h は平均水深、 n はモードの次数である。利根川感潮域の長さは約20 km、平均潮位時の平均水深は3.9 mであるから、1次モードの固有周期は3.59 hrである。高次モードの固有周期は $n=2, 3, 4$ に対し1.20, 0.72, 0.51 hrであり、観測された流速スペクトルのピーク周期1.25, 0.78, 0.53 hrと概ね対応している。ただし、観測された周期1.06 hrに対応する固有周期は見当たらず、この変動は他の変動と別の原因で生じている可能性がある(この点については4.(2)で検討する)。以上のことから、利根川感潮域に見られる短周期変動は主として河道方向に発生するセイシュであると考えられる。そこで、次にセイシュを引き起こす力とそれに対する利根川感潮

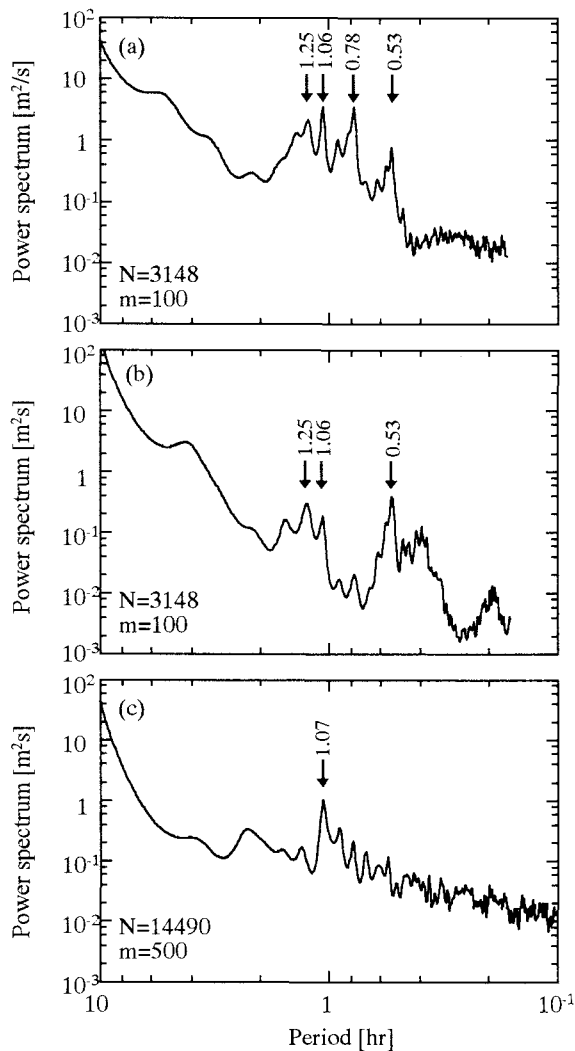


図-5 パワースペクトル。(a)14.5KPにおける断面平均流速, (b)14.5KPにおける水位, (c)波崎海洋研究施設における水位。Nは全データ数, mはスペクトルの推定に用いたラグ数, 矢印に添えた数字はピーク周期で単位は[hr]である。

域の応答特性について検討する。

4. 沖での水位変動に対する周波数応答特性

(1) セイシュを引き起こす力

セイシュを引き起こす力として、堰からの放流や風、沖での水位変動などが考えられる。堰の放流が原因ならば、堰の放流量が変化した後でセイシュが発生すると思われる。しかし、図-4(a)の河口堰放流量と(b)の断面平均流速を見ると、流速の変動と堰放流量との間には関連が見られず、堰の放流がセイシュを引き起こしているとは考えられない。また、観測期間中は河道に概ね直角方向の北北東および南西の風が卓越していること、風速・風向の変化と流速の変動との間に対応関係が見られないことから、風が縦断方向のセイシュを引き起こしたとも考えがたい。

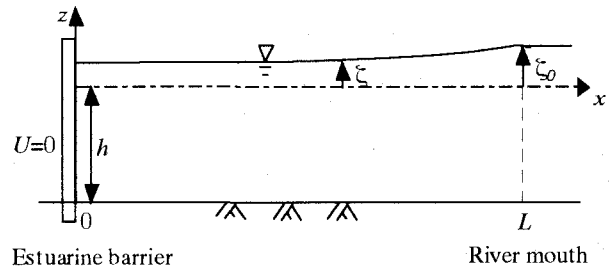


図-6 解析に用いる座標系

そこで、沖での水位変動がセイシュを引き起こす可能性を考えてみる。林ら³⁾は利根川河口に近い鹿島港外において周期が60分から100分の長周期波を観測し、これを陸棚セイシュであると結論している。この周期は2次モードの固有周期(1.20 hr)に近く、陸棚セイシュが利根川感潮域のセイシュを引き起こしている可能性がある。

そこで、図-4(d)に示した水位データから波崎での水位のスペクトルを求める。ところで図-4(d)の実測値(実線)には2時間おきに26分のデータの隙間があるため、このままでは周期30分～1時間のスペクトルを求められない。そこで、データがない部分はARモデルを用いて補間した。ARモデルの係数はそれぞれのバーストで測定されたデータにBurg法を適用して求めた。補間の結果を図-4(d)に灰色で示す。その後、補間されたデータにBurg法を適用してパワースペクトルを求めた²⁾。

この結果を図-5(c)に示す。周期が1.07 hrには大きなピークが見られ、前述した陸棚セイシュによるものと推測される。ここで、図-5(a)(b)をもう一度見てみると、流速や水位のスペクトルに陸棚セイシュに対応する顕著なピーク(1.06 hr)が見られる。このことから、河道内の流速・水位変動は沖での水位変動によって引き起こされていると考えられる。

ところで、波崎での水位のスペクトル(図-5(c))には河道内で見られたセイシュに対応するピーク($T_n = 1.25, 0.78, 0.53$ hr)が見られない。そこで、これらのピークは共振によるものではないかと考えられる。この可能性について検討するため、以下では沖での水位変動に対する利根川感潮域の周波数応答を求める。

(2) 観測結果を用いた周波数応答の推定

沖での水位変動に対する河道内の流速と水位の周波数応答 $|H_{U,x}|$, $|H_{\zeta,x}|$ は次式のように定義される。

$$|H_{U,x}|^2 = \frac{P_{U,x}}{P_{\zeta,0}} \left(\frac{c}{g} \right)^2 = \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 \quad (2)$$

$$|H_{\zeta,x}|^2 = \frac{P_{\zeta,x}}{P_{\zeta,0}} = \left(\frac{\zeta}{\zeta_0} \right)^2 \quad (3)$$

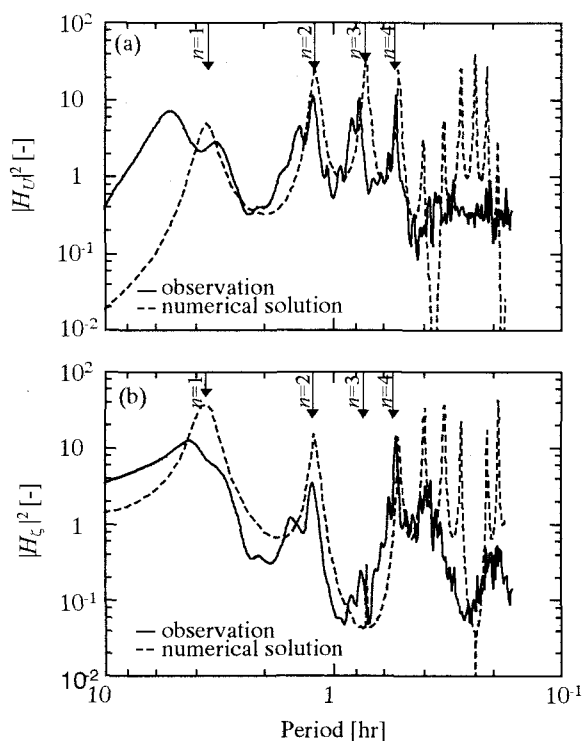


図-7 沖での水位変化に対する14.5KPの(a)断面平均流速、(b)水位の周波数応答。実線：観測結果から推定、破線：河床摩擦を考慮した場合の理論解。

ここで、 P はパワースペクトル、 ξ, U はそれぞれ水位と流速の振幅で、添字 ξ, U は水位と流速に関する量であることを示す。また、 P_0 は沖での水位変動のパワースペクトル、 ξ_0 は沖での水位変動振幅、 U_0 は代表流速で $\xi_0(g/c)$ と定義した。 c は長波の波速である。 x は縦断方向の距離を表し、図-6のように河口堰を0、河口を L とする。

図-5に示したスペクトルから、式(2),(3)を用いて14.5KP地点の流速・水位の周波数応答 $|H_{U,14.5}|^2, |H_{\xi,14.5}|^2$ を推定した。この結果を図-7に実線で示す。(a)は流速、(b)は水位の周波数応答である。破線については後述する。流速・水位の周波数応答を見ると、矢印で示した固有周期($T_n = 3.59, 1.25, 0.78, 0.53$ hr)付近でのみピークが見られ、共振によってセイシュが発生していることを示唆している(図-5(a),(b)のパワースペクトルでは明確でなかった1次モードのピークも現れている)。周波数応答には、図-5で見られた周期1.06 hrのピークは見あらず、この周期の変動はセイシュではなく、沖に存在している変動が河道内に侵入したものと考えられる。

(3)理論的に求められる周波数応答との比較

以上の結果から、短周期変動は主として沖での水位変動によって励起されたセイシュであることが定量的に示されたが、図-7の実線で示した周波数応答が定量的に妥当かどうかは別に検討する必要がある。そこで、最後に周波数応答を理論的に求め、観測値と比較する。

表-1 計算条件。 ξ_0 :沖での水位変動振幅、 L :感潮域の長さ、 Δx :計算格子の大きさ、 Δt :時間刻み、 h :平均水深、 R :径深、 n :マンニングの粗度係数、 f_b :河床摩擦係数。

ξ_0	0.02	[m]	h	3.9	[m]
L	20000	[m]	R	3.9	[m]
Δx	100	[m]	n	0.02	[s/m ^{1/3}]
Δt	0.1	[s]	f_b	0.0050	[-]

周波数応答を理論的に求めるためにはセイシュのエネルギーを散逸させる要因を考える必要がある。この主要因として、i)河道から沖に放射される波がエネルギーを持ち去ることによる散逸、ii)河床摩擦による散逸が考えられる⁴⁾。そこで、以下ではそれぞれの要因が支配的であるとした場合の周波数応答を求め、どちらの要因が支配的であるかを検討した上で、観測結果との比較を行う。

波の放射による散逸が支配的な場合の周波数応答は合田⁵⁾によって得られている。その結果によると、沖からの波に対する一次元矩形水路における水位の周波数応答は次式で与えられる。

$$|H_{\xi,x}|^2 = \frac{\cos^2(kx)}{(\cos(kL) - \psi_2 \sin(kL))^2 + (\psi_1 \sin(kL))^2} \quad (4)$$

ここで、 ψ_1, ψ_2 は kB の関数、 B は水路幅の1/2である(詳細については合田⁵⁾を参照して頂きたい)。一方、河床摩擦による散逸が支配的な場合の周波数応答は、以下の摩擦を考慮した一次元浅水方程式を差分法を用いて数値的に解いて求めた。

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = -h \frac{\partial U}{\partial x} \quad (5)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -g \frac{\partial \xi}{\partial x} - \frac{f_b}{2h} |U| U \quad (6)$$

ξ は水位、 U は断面平均流速、 h は平均水深、 g は重力加速度、 f_b は河床の摩擦係数である。 f_b は以下の式から算出した。

$$f_b = \frac{2gn^2}{R^{1/3}} \quad (7)$$

ここで、 R は径深、 n はマンニングの粗度係数である。 n は利根川下流で一般的に用いられている値である0.02を用いた。境界条件として、河口で水位変動振幅 ξ_0 を与え、河口堰の放流はないものとした。 ξ_0 は波崎で観測された水位変動から0.02 mとした。

$$U = 0 \quad \text{at} \quad x = 0 \quad (8)$$

$$\xi = \xi_0 \sin(\omega t) \quad \text{at} \quad x = L \quad (9)$$

その他の計算条件は表-1にまとめておく。周波数応答を求めるために、 ω を与えて水位・流速の振幅が

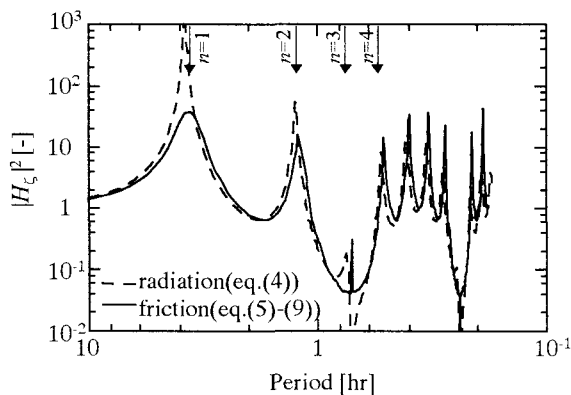


図-8 河道内から沖へ進行する波を考慮した場合(点線)と河床摩擦を考慮した場合(実線・鎖線)の周波数応答の理論値。

一定になるまで計算し、そのときの流速・水位の振幅を用いて式(2),(3)から周波数応答を求めた。

このようにして求めた周波数応答を図-8に示す。同図中で、破線が波の放射のみを考慮した場合、実線が河床摩擦のみを考慮した場合である。周期が長い $n=1, 2$ のピークでは、河床摩擦を考えた場合の方が波の放射を考えた場合より周波数応答がかなり小さく、エネルギーを散逸させる主要因は河床摩擦であると考えられる。周期が短くなり、 $n=3, 4, 5$ のピークになると、両者のピークの高さは概ね同じで、散逸に対する河床摩擦と波の放射の寄与は同程度になると考えられる。さらに周期が短くなると波の放射が支配的となる。ここでは $n \leq 5$ の場合の周波数応答のオーダーを考えているので、利根川感潮域の周波数応答は概ね河床摩擦が支配的とした場合の解で表せると考えられる。

図-7に河床摩擦が支配的とした場合の周波数応答を破線で示す。実線で示した観測値と比較すると、周波数応答の形は概ね一致している。またピークの高さも $n=4$ まで実線と破線で概ね一致しており、観測から求めた周波数応答は定量的にも妥当なものであると考えられる。固有周期を比べると、全体的に観測値の方が計算値より大きい傾向がある。これは、河床摩擦が支配的とした場合では河口付近での波の放射・回折を考慮していないためであると考えている。

図-9には固有周期 T_n における(a)流速、(b)水位の振幅の縦断方向分布を ζ_0, U_0 で規格化して示した。図-9(b)から、14.5KPは水位の3次モード($n=3$)の節にあっていることが分かる。図-7(b)に示した水位の周波数応答で $n=3$ のピークが存在しないのはこのためである。

以上のように、観測結果から推定した周波数応答は理論的に推定される周波数応答と概ね一致しており、定量的にも短周期変動は沖での水位変動によって励起されたセイシュであると考えられる。

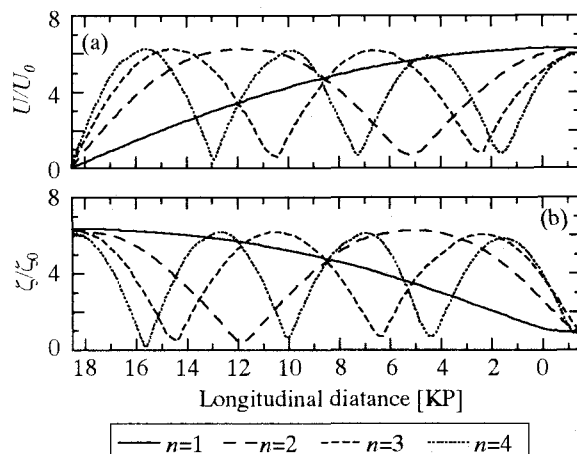


図-9 固有周期の水位変動を与えた場合の無次元振幅の縦断方向分布。

5. おわりに

本研究では、利根川感潮域に発生する周期が30分～1時間程度の短周期変動の特性とその発生要因、およびそれが底質の巻き上げに及ぼす影響について検討した。その結果、以下の結論を得た。

1. 利根川感潮域にみられる短周期変動は河床せん断応力のピーク値を増加させ、底質の巻き上げに大きく影響する。
2. 短周期変動は主に沖での水位変動によって励振されたセイシュである。
3. 周期が1時間以上のセイシュのエネルギーを散逸させる要因としては河床摩擦が支配的である。

謝辞：本研究を行うにあたり、独立行政法人港湾空港技術研究所漂砂研究室より波崎海洋研究施設における定常観測データを提供して頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 清水健司・入江光輝・石川忠晴：利根川感潮域における乱流と底泥の巻き上げに関する現地観測，水工学論文集，第48巻，pp769-774，2004。
- 2) 日野幹雄：スペクトル解析，朝倉書店，1977。
- 3) 林 直樹・高橋秀彰・山本政光：外洋における長周期波の観測，第25回海岸工学講演会論文集，pp14-17，1978。
- 4) Miles, J. & Munk, W: Harbor paradox, J. Waterways and Harbors Division, ASCE, 3, pp.2888-2913, 1962
- 5) 合田良実：長方形および扇形の港の副振動について一フーリエ変換を用いた一解法一，第10回海岸工学講演会講演集，pp53-58，1963。

(2004. 9. 30 受付)