

— 速報 —

建設途中の締切堤防が湾の潮汐に与える影響*

宇野木 早苗†

要 旨

湾を締め切る堤防が高潮、津波、潮汐などに与える影響として、これまで開口幅が問題にされてきた。しかし、締切堤防の建設に伴う潮汐減少の途中経過を理解するには、単に開口幅だけでなく、締切断面内の水中工事で水深が変化する効果を考慮することが本質的に重要であることを、簡単な理論と断面地形変化を用いて明らかにした。現在、諫早湾干拓事業による潮受堤防の建設の際に生じた有明海の潮汐の減少に関連して、水深変化を全く考慮せずに、単に開口率が20%を下回らなければ締め切りの影響は現れないとの計算結果を根拠にして、有明海に現実に生じた潮汐の減少過程は、堤防締め切りの影響とは考え難いとする主張がなされている。しかし、上記の研究結果によれば、この主張は理解し難いものである。

キーワード：締切堤防、潮汐減少、水深変化、開口幅、有明海

1. はじめに

高潮や津波の防災対策のために、湾の一部を堤防で締め切ることが行なわれている。名古屋港の高潮防波堤や大船渡湾の津波防波堤などはその例である。その際には、船舶の航行を確保するために、また海水交換を考慮して防波堤の一部に開口部が設けられるが、開口幅が高潮、津波、潮汐などに及ぼす効果が、理論的に、また水理・数値の実験によって種々検討されてきた。

一方、児島湾や諫早湾に例を見るような大規模干拓事業に関連して、湾の一部を締め切って潮汐の進入を阻止する潮受堤防が建設されている。このときは、堤内の水を排出するための水門が設置されるものの、堤内は外海から完全に遮断されている。ただし、諫早湾干拓事業の場合には、遮断が行なわれる前の工事期間

中に有明海の潮汐が漸次減少してきたので、潮汐の減少過程と干拓事業との関係、とくに潮受堤防の建設との関係が問題になっている。

ところで、上記の防災対策、干拓事業のいずれの場合にも、潮汐の減少に対しては堤防の開口幅の影響のみが注目されている。しかし、築堤工事では底の基盤から堤防が築き上げられていくので、当然ながら断面地形の変化、したがって水深の変化が生じる。それゆえに、堤防建設が潮汐に及ぼす影響の時間経過を考えるためには、単に水面から見える開口幅だけでなく、水面下に生じる水深の減少にも注目する必要があることは容易に想像できることである。そこで開口幅の変化とともに、断面内の水深変化をも考慮して、築堤工事の進行が潮汐の変化に及ぼす効果について基礎的な検討を行なった。

* 2006年6月16日受領；2006年9月21日受理

著作権：日本海洋学会，2007

† 〒424-0912 静岡市清水区殿沢 2-12-24

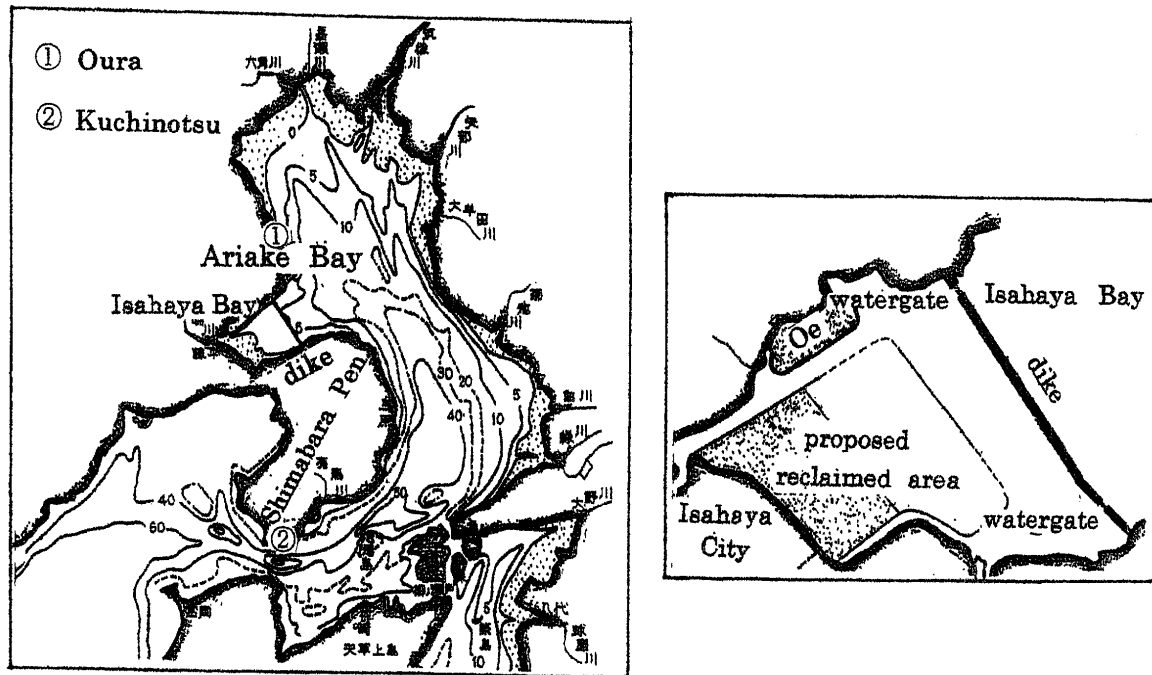


Fig. 1. Map of Ariake Bay (left) and area of the Isahaya reclamation project (right).

2. 諫早潮受堤防が建設された有明海における観測事実

有明海においては、農林水産省によって大規模な諫早湾干拓事業が推進されてきた。この事業は Fig. 1 に示すように、有明海本体から長崎県側に湾入する諫早湾の西部を、長さ 7 km の潮受堤防で締め切って、その内部の 3,500 ha の広大な面積に、干拓農地と淡水の調整池を建設しようとするものである。

有明海の湾奥付近の大浦と湾口の口之津における近年の M_2 分潮振幅の経年変化を、Fig. 2 に示す (宇野木, 2003)。ただし、短周期の変動を消すために 3 年間の移動平均を行なったものが示されている。図には諫早湾干拓事業開始と潮受堤防締め切りの時期も縦の破線で加えてある。両地点とも工事期間中に潮汐は減少傾向にある。いま、大浦と口之津の振幅比すなわち潮汐の増幅率を求めると、Fig. 2 の下段の太い曲線を得た。

図によれば、潮汐振幅の増幅率は、地形変化がない干拓事業開始前と堤防締め切り後の両期間において、それぞれ一定の値を保っていた。そして、その間の工事期間中は一方的に減少を続け、かつ堤防締め切りの際には、移動平均のために実際に比べてなまっていたもの

の、急激に減少していたことが明瞭に認められる。これらのことは、地形変化を伴った干拓事業が有明海の潮汐を減少させたことを、かなりの確度をもって推測させる。

なお有明海の潮汐の減少には、外海における潮汐の減少や平均海面の上昇も影響していた。これに対して、注目している増幅率の変化は、ほとんど有明海内部の地形変化によるものと考えてよい (宇野木, 2003)。そして、湾の共振潮汐の理論に従えば、干拓事業に伴った有明海の面積の減少や、工事に必要な砂の採取に伴う平均水深の増大などが、有明海の固有周期の減少をもたらしたことになる。この結果、共振作用が弱まって、潮汐の増幅率が減少したと判断される。ただし、これは締め切りが終わった後のことで、締切工事の途中経過においては、断面内の地形変化すなわち開口幅や水深の変化の効果を考慮しなければならない。

3. 諫早湾干拓事業に伴う潮汐の減少過程を否認する理由

ところで、公害等調整委員会 (2005) は農水省の干拓事業当局が提出した水理計算結果を根拠にして、堤防締め切り前の潮汐の減少過程は干拓事業によるもので

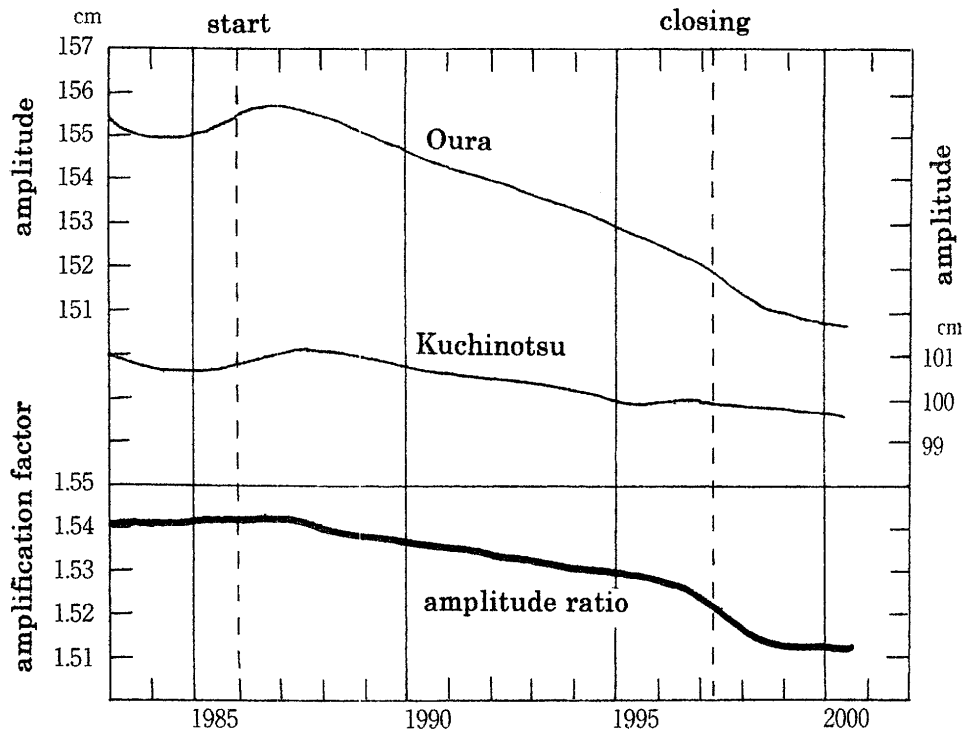


Fig. 2. Temporal change of the amplitude of the M_2 constituent at Oura (upper) and Kuchinotsu (middle). The thick lower curve shows the ratio of the amplitudes, Oura to Kuchinotsu (after Unoki, 2003). The running means over three years are taken for each case.

ないとの裁定を下した。すなわち、「潮受堤防の築堤が進行して、潮受堤防の内外の位相差に与える影響については、開口率が20%を下回るまでほとんど生じず(位相差の増加が大きくなるのは開口率10%を下回る頃からとされる。)、海水交換量に与える影響については、開口率が10%を下回る頃まではほとんど生じない。(中略)、したがって、潮受堤防の開口率が20%を下回った1997年3月末頃(筆者注：堤防締め切りは4月14日)には潮受堤防による影響のごく一部が生じていたとしても、影響のほとんどは同年4月の潮受堤防の締め切り時に生じたものであると認めるべきであって、それ以前の築堤による影響を肯定することは困難である。」つまり、開口率が約20%を下回らなければ締め切りの影響は現れないので、それ以前から潮汐の減少が生じるのは干拓事業の影響ではないと結論したのである。

例えば Fig. 3 は、潮受堤防を開いて開口幅を拡大すれば、堤防がない場合に比べて堤防内部の湾奥の潮汐がどの程度回復するかについて大略の見当をつけるために、筆者(宇野木, 2002)が有明海を念頭に入れたモデル海域(図中の内挿図)を対象に、簡単な理論を用い

て計算した結果である。ここで、開口部の水深 D_0 は工事期間中は一定と考え、開口幅 b は 0 から内部海域の幅 b_2 まで変化するものとする。潮受堤防の全長は 7 km であるが、開口幅が広くなると潮汐の変化はほとんどないので、Fig. 3 においては横軸の開口幅は 1,500 m までの範囲しか示されていない。図によれば潮汐の減少が有意と認められるのは、開口幅が約 1,000 m 以下になってからであるので、上記の公害等調整委員会や干拓事業当局の意見も、一見理があるように思われる。しかし、彼らが根拠とした計算結果は、Fig. 3 と同じく開口幅の変化のみに注目していて、工事期間中の築堤に伴う水深減少の効果を考慮していないので、問題を含むのである。さらに、干拓事業においては、堤防締め切り前に、築堤工事以外の多くの工事が実施されているので、これらの効果も考えねばならない。

なお、裁定委員会と農水省は、干拓事業による潮汐の減少を認めようとしない別の理由も挙げているが、これについては筆者が著書の中で紹介して、その理由は認められないことを述べているので、参考にされたい(宇野木, 2006)。

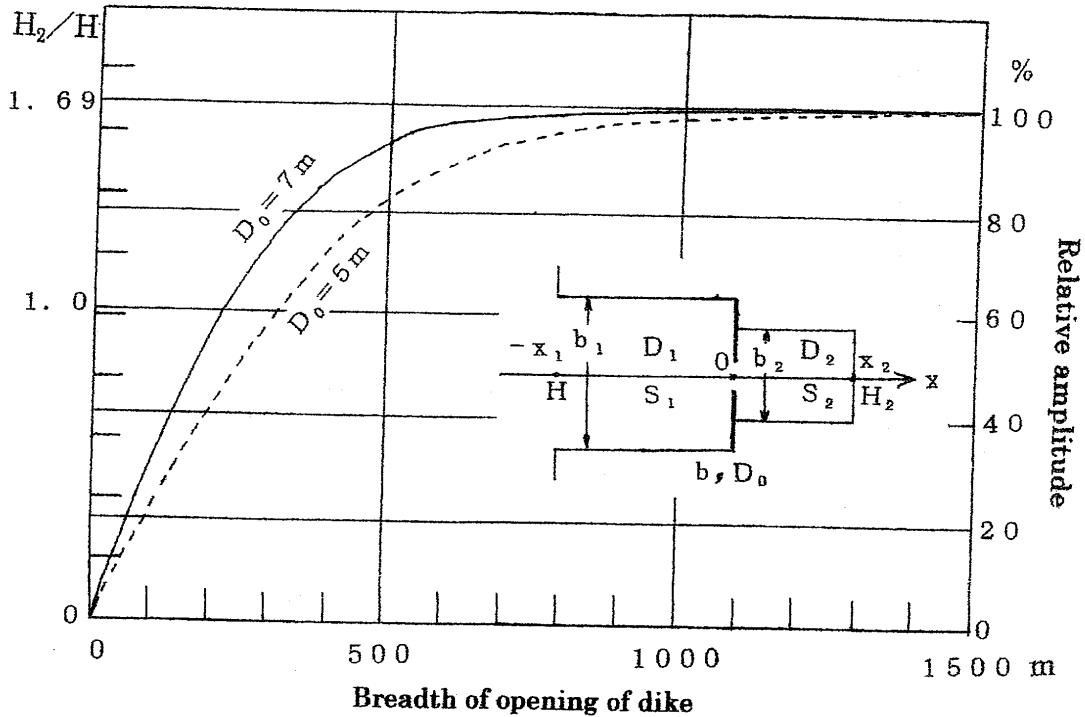


Fig. 3. Effect of the breadth of the dike-opening on the amplitude of the tide at the bay head (after Unoki, 2002). The scale on the left side of the ordinate gives the amplification factor. The model sea and symbols used are shown in the figure.

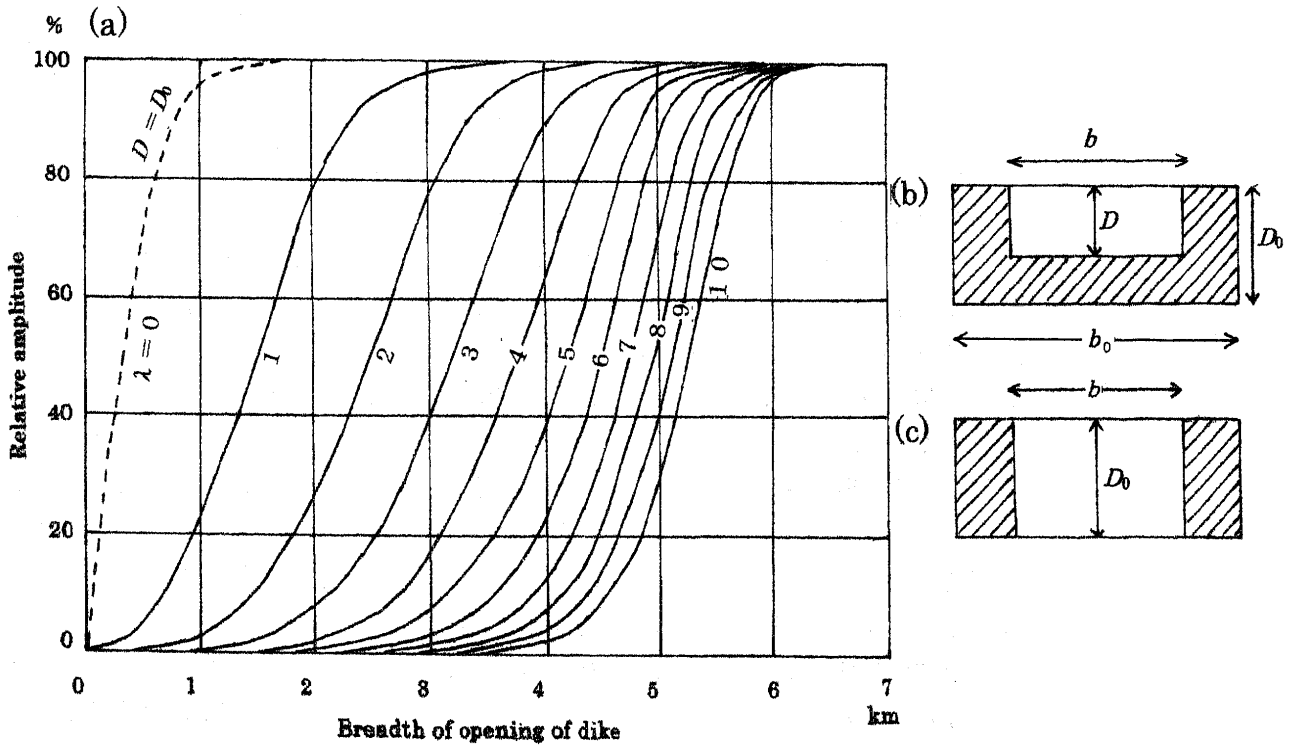


Fig. 4. (a) Variation of the tidal amplitude with the breadth of dike-opening, including the effect of variation of the depth. The ordinate gives the ratio of the amplitude to the original one before construction of the dike. The parameter λ is explained in the text, and the broken curve corresponds to the case when the depth at the opening is kept constant D_0 . Two typical cross-sections of the dike are shown in (b) and (c).

4. 解析の方法と結果

そこで、築堤工事が潮汐に与える影響を理解する上に、水中工事に伴う水深変化の考慮が基本的に重要であることを、単純な条件の場合について調べた。このための基礎理論には前と同じく、梶浦(1963)が開口部を持つ防波堤が湾水振動に与える影響を求めた結果を用いた。モデル湾の形状、座標軸、記号はFig. 3の内挿図に示されている。湾口の振幅を H 、湾奥の振幅を H_2 としたとき、潮汐の増幅率 R は次式で与えられる。

$$R = \frac{H_2}{H} = \frac{\beta \cos \varepsilon_2}{\cos k_1 x_1 \cos k_2 x_2} \quad (1)$$

式中の記号は次のとおりである。

$$\varepsilon_2 = \sin^{-1} \left\{ \frac{\sqrt{1+B^2}-1}{B} \right\}$$

$$k_1 = \frac{\sigma}{\sqrt{g D_1}} \quad k_2 = \frac{\sigma}{\sqrt{g D_2}}$$

$$B = \frac{8\beta^2 H \sigma^2}{3\pi g \cos k_1 x_1} \left\{ \frac{S_2}{K A} \right\}^2 \left\{ \frac{\tan k_2 x_2}{k_2 x_2} \right\}^2$$

$$\beta = 1 / \left\{ 1 - \frac{S_2 k_1 x_1}{S_1 k_2 x_2} \tan k_1 x_1 \tan k_2 x_2 \right\}$$

$$S_1 = b_1 x_1 \quad S_2 = b_2 x_2 \quad A = b D$$

ここで x_i は湾長、 b_i は湾幅、 D_i は水深を表し、添字 i の1は潮受堤防外、添字2は潮受堤防内を意味する。堤防の開口部の断面は矩形と考え、幅と水深を b と D で表している(Fig. 4(b))。また g は重力加速度、 σ は分潮の角速度である。なお開口部の流速は、両側水面の水位差を $\Delta\eta$ としたとき $(2g\Delta\eta)^{1/2}$ に比例するとする非線形条件に基づいて求められるので、増幅率は湾口の振幅 H にも関係している。このときの比例係数は上式の B に含まれる K で与えられて、流量係数とよばれている。

いま M_2 分潮を考え、対象とする湾の規模としては有明海を念頭において、具体的諸元として $x_1 = 91$ km, $x_2 = 5$ km, $b_1 = 18.3$ km, $b_2 = 7$ km, $D_1 = 20$ m,

$D_2 = 3$ mとしている。また、湾口振幅 $H = 1.42$ m, 流量係数には $K = 0.7$ を用いる。

この理論に基づけば、築堤工事の各段階における開口幅 b や水深 D の値を与えて、潮汐の変化を知ることができる。いま締切断面内の水深の減少は、開口幅の減少に比例すると考えて、一例として次のように仮定した。

$$\frac{D}{D_0} = \left(\frac{b}{b_0} \right)^\lambda \quad (2)$$

ここで、 b_0 と D_0 は当初の堤防建設断面の幅と平均水深である。具体的には、 $b_0 = b_2 = 7$ km, $D_0 = 4$ mを用いた。(2)式で $\lambda = 0$ は工事中に水深の変化はなく、初期水深 D_0 を保っていることを表す(Fig. 4(c))。 $\lambda = 1$ は、水深の減少の割合は開口幅の減少の割合と同じであることを意味する。そして λ が1より大きくなると、水深は開口幅よりも減少の割合が顕著になる。実際にも水深の変化をもたらす水中部分の工事が、海面上の開口幅をもたらす工事よりも先行していると考えられるので、 $\lambda > 1$ と考えるよいであろう。とくに工事初期では、 λ の値は大きいと考えられる。

この理論を基に、 λ に0~10の範囲で単位刻みの値を与えたときの計算結果をFig. 4(a)に示す。横軸は堤防の開口幅を表し、縦軸はこの開口幅に対する湾奥振幅(H_2)と工事前の湾奥振幅($H_{2,b}$)との比、すなわち潮汐の減少率を表している。なお、図中の破線($\lambda = 0$)は、開口幅のみの変化を考えて、水深は一定 D_0 とした場合であり、Fig. 3の曲線に対応するものである。ただし両図の縦軸において、振幅を無次元化する基準量は異なっている。Fig. 3では D_0 が5 mと7 mの場合が計算されているが、今回は事業当局の資料を参考にして4 mの値を用いている。

この結果によれば当然のことながら、同じ開口幅に対して、水深が変化しない場合(破線)に比べて、水深が変化する場合が潮汐の減少は大きい。例えば、開口率が20%(幅1.4 km)のときに、潮汐振幅は $\lambda = 1$ のときは46%に、 $\lambda = 2$ のときは9%にまで減少している。したがって、潮汐の減少は農水省や公害等調整委員会の主張と相違して、開口率が20%に達する前から始まると考えて差し支えないことを教えている。なお、潮汐振幅が工事前の半分になる時期の開口幅の大きさは、

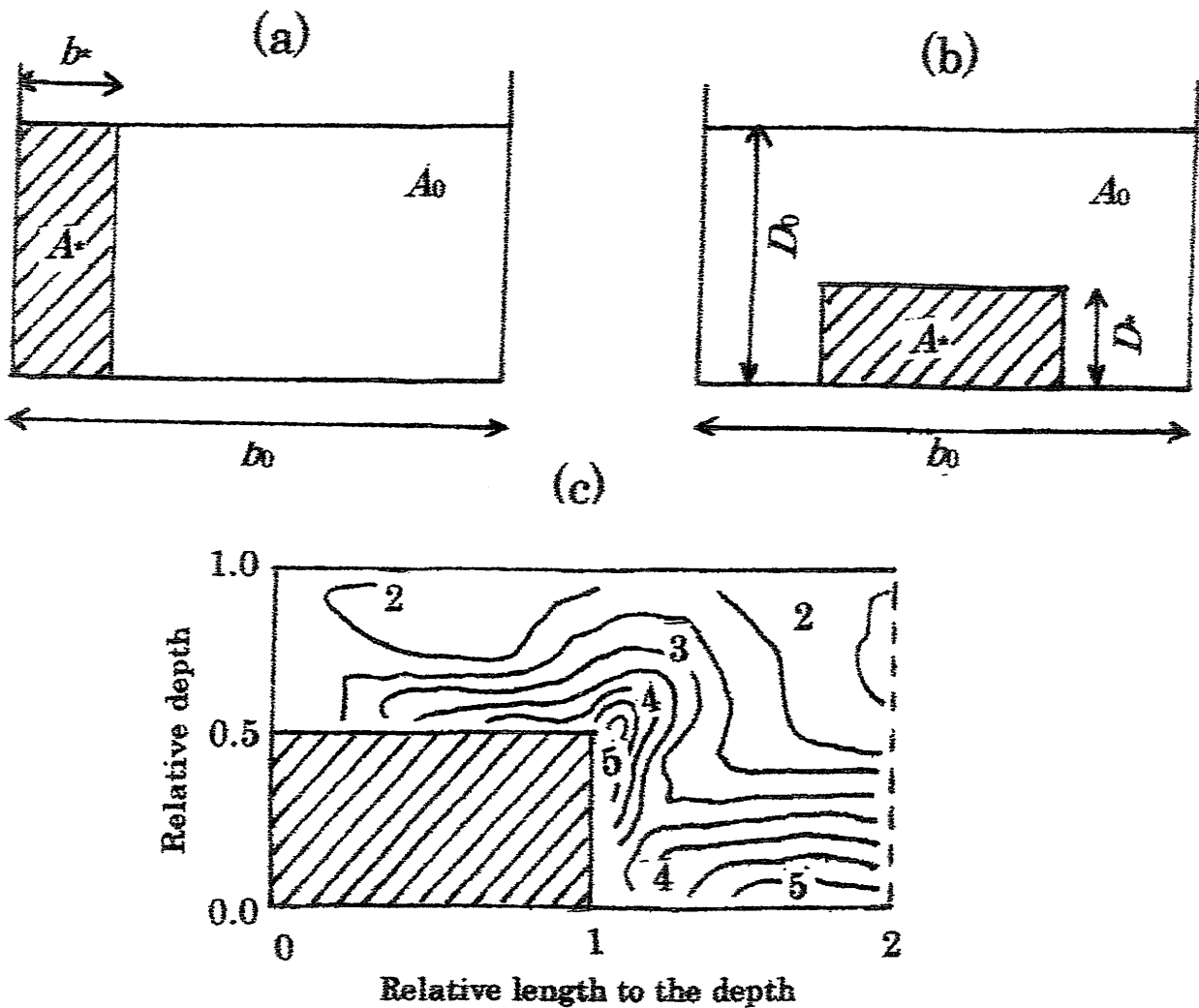


Fig. 5. (a) and (b) are two examples of the cross-section of the dike. (c) shows an example of the distribution of turbulence energy (κ/U_*^2), normalized by friction velocity U_* , based on hydraulic experiments corresponding to the case of (b) (Tominaga *et al.*, 1988)

水深が一定の $\lambda = 0$ の場合は現在の水門幅にほぼ等しい約 250 m に過ぎないが、 λ が 1, 2, 4 のときにはそれぞれ 1.5 km, 2.5 km, 3.8 km の値になり、開口幅が 1.4 km に達する前に潮汐は半減することになる。

5. 考察

5.1. 水中構造物の影響

これまでは築堤に伴う断面地形変化として (2) 式を仮定したが、実際にはいろいろな地形変化が存在するであろう。そこで一つの可能性として、Fig. 5(b) の潜

堤形式の場合を考え、Fig. 5(a) の場合と機能を比較した。事業前の水路断面積を A_0 、水路幅を b_0 とし、両者において締切面積 A_* は同じとしている。(b) の場合に底面基盤から潜堤上面までの高さを D_* と記す。しかるとき、(a) と (b) の両ケースの増幅率は、断面の地形変化に対してそれぞれおよそ次の関数関係を持つであろう。

$$R_1 = F_1 \left(\frac{A_*}{A_0} \right) \quad (3)$$

$$R_2 = F_2 \left(\frac{A_*}{A_0}, \frac{D_*}{D_0} \right) \quad (4)$$

両ケースにおいて締切断面積の変化率 A_*/A_0 の効果には特に大きな相違はないであろう。しかし後者においては、 A_*/A_0 の他に、 D_*/D_0 の効果が加わる。

一例として (b) のケースに対応して、一様流の水路の底に潜堤を設置したときの水路横断面内における乱れのエネルギー (κ/U_*^2 , 摩擦速度 U_* で無次元化) の分布を、水理実験で求めた結果を Fig. 5 の (c) に示す (Tominaga *et al.*, 1988)。これは潜堤の高さが水深の半分の場合で、左右対称を考慮して右半分の水路断面が描かれている。潜堤の存在によって流れが著しく乱されて、大きな乱流エネルギーが発生している。このような効果を受けて、水面の開口幅は当初と同じで変化がないにも関わらず、Fig. 5(b) の場合は (a) に比べて潮汐の減少は顕著であると考えられる。

5.2. 諫早湾干拓事業との関係

これまでの議論は非常に単純な理論と仮定に基づいており、また堤防内部における潮汐の減少に対するものであった。しかし、大浦と口之津は潮受堤防の外側に位置しているので、以上の検討結果を実際に観測された Fig. 2 と直接結びつけることはできない。そうであっても、有明海の場合において、潮受堤防の建設途中における水深の減少を伴う断面形状の変化が、堤防の内部のみならず、外部へも影響を与えることは容易に考えられることである。したがって、公害等調整委員会や干拓事業当局のように「堤防建設途中の水深の減少を全く考慮せずに、単に開口率が 20% に達するまでは影響が現れないとの計算結果を根拠にして、締め切り前に生じた潮汐の減少を示す Fig. 2 の観測事実を、干拓事業の影響とは考えられないと否定すること」は、承認し難いことである。

ここで事業当局の資料に基づいて堤防建設の進捗状況を見ると、大規模な軟弱地盤改良工事 (巨大な作業船を用いて直径 6 m のパイプを地中 25 m まで打ち込んで 5 万本の圧縮砂柱と置き換えるもの) が 1989 年から、築堤工事が 1990 年から、敷砂が 1991 年から始まっている。築堤以外では、地質調査が 1987 年から、観測槽の設置と施工基地造成が 1989 年から、面積が約 120 ha の小江干拓 (Fig. 1 参照) の造成工事が 1990 年から、さらに約 200 万 m^3 の採砂と航路整備が 1991 年から行な

われている。これらの諸事業によって、多かれ少なかれ潮汐の減少が堤防締め切り前に生じたとしてもおかしくないであろう。そして多くの工事の中で、潮汐の減少に最も効果的であるものは潮受堤防の建設と思われる。なお有明海には干拓事業以外にも、面積が小江干拓と同規模の佐賀空港や、諫早湾干拓事業以前から始まって現在も継続している熊本新港などの建設もあるが、その規模は諫早湾干拓事業に比べれば非常に小さい。

ところで、上記の干拓事業に伴うもろもろの工事について詳細な情報の把握が困難であるために、堤防建設の影響の時間的経過を定量的に追うことは難しく、今後の課題として残されている。もし堤防締め切り前の潮汐の減少が、干拓事業の影響でないと主張するのであれば、事業の進捗状況について詳細な情報を持ち、かつ資金力・人力・組織力においてきわめて強大な能力を持つ干拓事業当局が、干拓事業に替わる別の要因を提示していただくことを望むものである。

6. むすび

本論文では、建設途中の締切堤防が潮汐に及ぼす影響として、水中部分の工事が本質的に重要な役割を果たしていることを示した。ただし諫早湾干拓事業による潮受堤防の内部および外部における実際の潮汐の減少過程をよりの確に理解するためには、干拓事業に伴う多様な工事に関する詳細なデータに基づく議論が必要であり、今後の課題として残されている。しかし、そのようなデータを得て再検討したとしても、水中部分の工事の寄与を全く考慮することなく、単に水面から見た開口率が 20% に達しなければ潮汐の減少は生じないとの計算結果を根拠にして、有明海で観測された潮汐の減少過程は諫早湾干拓事業の影響とは認め難いとする公害等調整委員会や干拓事業当局の主張は的を射ていないという本文の検討結果が、変更になることはないと思われる。

References

- 梶浦 欣二郎 (1963) : 湾水振動におよぼす防波堤の効果. 震研彙報 **41**, 403-418.
- 公害等調整委員会 (2005) : 公調委平成 15 年<ケ>第 2・3 有明海における干拓事業漁業被害原因裁定申請事件・裁定書. 349 pp.
- Tominaga, A., K. Ezaki, and I. Nezu(1988): Turbulent structure in compound channel flows with rectangular and trapezoidal main channel. Refined Flow Modelling and Turbulence Measurements. *Proc. Third Inter. Symp. ,Inter. Assoc. Hydraulic Res.*, 511-518.
- 宇野木 早苗 (2002) : 有明海における潮汐と流れの変化—諫早湾干拓事業の影響を中心に—. 海と空, **78**, 19-30.
- 宇野木 早苗 (2003) : 有明海の潮汐減少の原因に関する観測データの再解析結果. 海の研究, **12**, 307-313.
- 宇野木 早苗 (2006) : 有明海の自然と再生. 築地書館, 264 pp.

Effect of a Sea Dike Closing a Bay on Tidal Decrease

Sanae Unoki †

Abstract

During the construction of a sea dike that closes a bay, the tide decreased gradually. Both the diminution of depth at the dike and the breadth of its opening affected the tidal decrease. At present, there is an insistence that, before the Isahaya sea dike was practically closed up the construction of the dike did not cause the decrease of the tide which is actually observed, because only the diminution-effect of the opening-breadth of the dike was taken into consideration. However, this conclusion will not be recognized because the important effect of diminution of the depth was not considered.

Key Words : dike, tidal decrease, depth, opening-breadth, Ariake Bay

(Received 16 June 2006; accepted 21 September 2006)
(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2007)

† 2-12-24 Tonosawa, Shimizu-ku, Shizuoka 424-0912, Japan