

目次

第1章	序論	3
1.1	研究背景・目的	3
1.2	既往の研究と研究方法	6
1.3	Princeton Ocean Modelについて	7
1.3.1	Princeton Ocean Model	7
1.3.2	基礎式	8
1.3.3	シグマ座標	10
1.3.4	シグマ座標系による基礎式	11
1.3.5	各変数の定義位置	21
1.3.6	各変数の定義位置	23
1.3.7	内部モードおよび外部モードの解法	25
1.3.8	計算条件	26
1.3.9	計算条件	28
1.3.10	Coliolis Parameter	28
1.3.11	計算時間および計算時間間隔	28
第2章	外海を基準とした有明海の増幅率の変動特性	29
2.1	はじめに	29
2.2	増幅率について	30
2.3	実測データとシミュレーションを用いた解析	32
2.3.1	解析方法	32
2.3.2	データ解析結果	33
2.3.3	シミュレーション結果	35
2.3.4	考察	42
2.4	有明海内のノリ網が潮汐に与える影響	43
2.4.1	解析方法	45
2.4.2	結果	45
2.4.3	考察	50
2.5	おわりに	51
第3章	簡易モデルを用いた閉鎖性内湾の振動特性の検討	52
3.1	はじめに	52
3.2	簡易モデルについて	53
3.3	解析方法	58
3.4	結果	65
3.5	考察	80
3.6	おわりに	84

第4章	有明海内の表層低塩分水輸送パターンの変化	85
4.1	はじめに	85
4.2	方法	86
4.3	結果	88
4.4	考察	93
4.5	おわりに	94
第5章	結論	95

第1章 序論

1.1 研究背景・目的

九州西部に位置する有明海(図 1.1-1, 図 1.1-2 参照)は, 面積 1545km^2 , 奥行き 87km , 平均水深 20m の閉鎖的内湾である. 海面積に対して筑後川, 嘉瀬川等流入している河川が多いことから栄養塩類に富み, また最大 6m という日本最大の干満差により干潮時には広大な干潟が出現して様々な生物を育む場となっている. 有明海の大きな特徴とも言えるこの干潟は自然浄化機能も有しており, 近年になるまで大規模な赤潮の発生は確認されていなかった.

有明海周辺においては, この干潟を農地等として利用するため古くから干拓事業が行われてきた. 古くは推古天皇の頃(593~629年)に端を発すると言われているこの有明海干拓事業において, 漁業問題との関連が指摘されて久しい. 特に南西部に位置する諫早湾の約3分の1を 7.05m の潮受け堤防によって締め切った諫早湾干拓事業(2007年完工, 1997年に潮受け堤防締切り, 農林水産省)については, 批判の声が相次ぎ司法問題にまで発展した.

なかでもその影響が顕著であると言われているのがタイラギなどの二枚貝と養殖ノリである. 二枚貝に関しては, 漁獲高が最盛期(1975~80年)の約13万トンから急激に減少し, 最近では2万トンを下回る状況が続いている. 養殖ノリに関しては2000年末に長期の赤潮が発生したことにより大幅に色落ちし, 上述の諫早湾干拓事業と深く関係しているとの声が多く社会問題となった. 以上のような状況から, 有明海および諫早湾に関する研究はこれまで数多く行われてきた. 本研究は外海から流入する潮汐に着目し, その振幅・波形が諫早湾潮受け堤防の建設前後でどのように変化したか, またその変化に関わるその他の要因の存在について主に数値解析を用いて把握することとしている. その具体的な方法や研究のプロセスについては別に記述する.

本研究は漁業問題のみならず干拓事業によって有明海に生じた変化・現象全体を把握することを目的としたものである. 有明海を取り巻く一連の問題の早期解決の一助となれば幸いである.

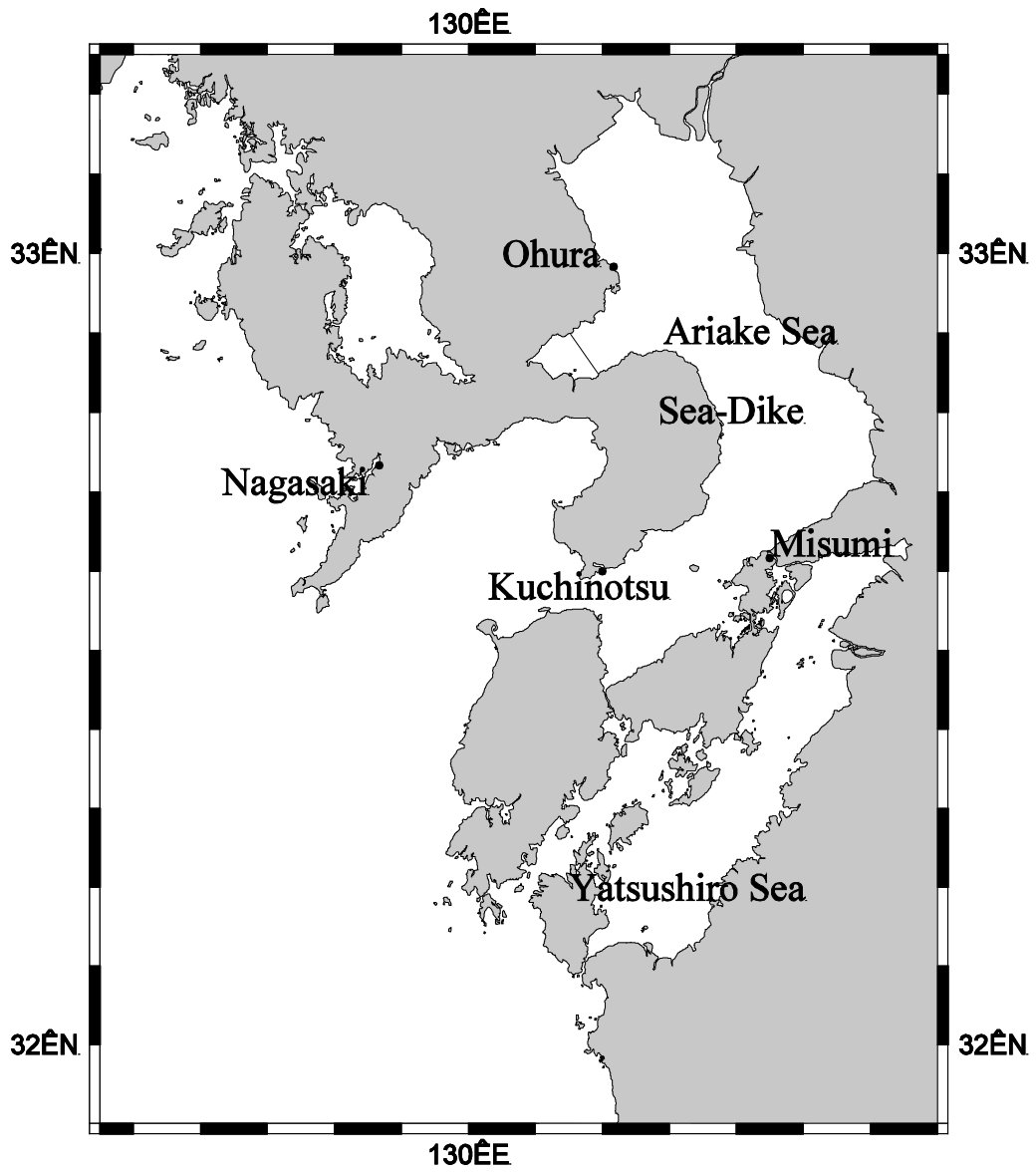


図 1.1-1 数値解析領域と験潮所の位置

振幅 1.0m

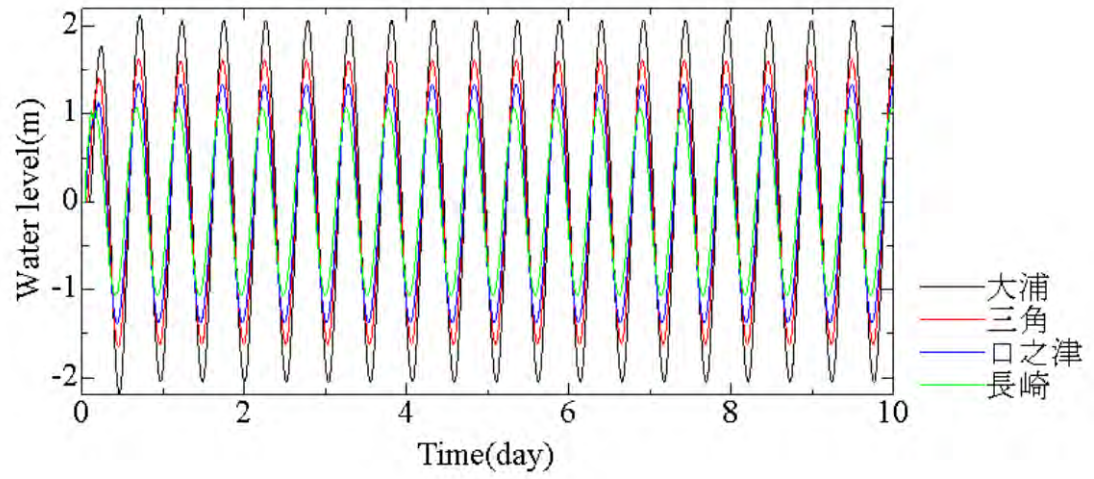


図 1.1-2 外海から潮汐が流入したときの各観測点での水位

1.2 既往の研究と研究方法

前述の通り有明海および諫早湾に関する研究は数多く存在し、その内容も多岐にわたる。宇野木(2003)は近年の潮汐減少の原因として諫早湾干拓事業, 熊本新港建設等の有明海内の地形変化によるもの(内部効果), 外海の潮汐自体の減少によるもの(外部効果), 水深変化によるもの(水深効果)の3つに分類しそれぞれの影響を見積もった。その結果, 内部効果が約 50%, 外部効果が約 40%, 水深効果が約 10%以下となるとの試算を得ている。一方, 塚本・柳(2002)は干拓事業による地形変化の影響は 10~20%であるとし, 安田(2006)は潮汐の増幅率を考える基準を外海にすると湾内の増幅率は潮受け堤防締め切り前後で変化していないことを示すなど, 潮汐の解析結果においても見解の一致は見られていない。

以上のように潮汐に着目した研究は多く存在するが, その多くは M_2 潮の変動に関して検討が行われてきた。有明海は固有周期が大きく M_2 潮との共振現象が最も顕著であるからである。田井・矢野 (2008)は, M_2 潮の解析を行うことにより潮受け堤防の締め切りによる潮汐増幅率への影響は, 起潮力の大きさにより変化することを示した。しかし, そのメカニズムは不明であり, 本研究では最新の実測データを用いた解析と数値シミュレーションを用いることによりその解明を試みた。

以下に本論文の構成をまとめる。

第 2 章では, 半日周期の潮汐増幅率の変動に対して, 外海を基準とした詳細な検討を実測データと数値シミュレーションを用いて行い, 諫早湾潮受け堤防締め切りが潮汐に与えた影響に関する議論を行う。

第 3 章では, **第 2 章**で得られた見解をさらに深く考察し, 潮汐増幅率に対して閉鎖性内湾を持つ特性について, 数値シミュレーションを用いて検討する。

第 4 章では, 福岡・佐賀両県の浅海定線調査データを用いて, 潮受け堤防締め切り以降塩分水の輸送パターンがいかに変化したかを調査し, 議論を行う。

第 5 章では, 各章で得られた結論をまとめ, 本論文の結論を述べる。

1.3 Princeton Ocean Model について

1.3.1 Princeton Ocean Model

本研究では、対象とする海域の潮流の流れを Princeton Ocean Model(以下 POM と略記する)を用いて数値解析を行う。ここでは簡単にではあるが POM についての解説を加える。

POM は平面 2 次元モデルと準 3 次元を組み合わせたものであり、計算は外部モードと内部モードの 2 種類のモードから構成されている。前者は、運動方程式および連続式を鉛直方向に積分しており、平面 2 次元計算となっている。一方、後者は運動方程式および連続式を準 3 次元的に解くようにモデル化されている。なお、計算は外部モードで水位と水深平均流速を求めて時間進行する。ついで、この水位と水深平均流速を定期的に内部モードに反映させて順次的に流速分布を求めている。

1.3.2 基礎式

本研究では、対象とする海域の流況を準3次元モデルにより解析を行う。その基礎式は以下の通りである。

・連続式

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots 1$$

・運動方程式

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} - fV = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial}{\partial x} \tau_{xx} + \frac{\partial}{\partial y} \tau_{yx} + \frac{\partial}{\partial z} \tau_{zx} \right) \text{ (x方向)} \dots\dots\dots 2$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} + fU = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial}{\partial x} \tau_{xy} + \frac{\partial}{\partial y} \tau_{yy} + \frac{\partial}{\partial z} \tau_{zy} \right) \text{ (y方向)} \dots\dots\dots 3$$

$$0 = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \text{ (z方向)} \dots\dots\dots 4$$

ここで、

x, y : 水平方向(東向き, 北向きに正)の座標

z : 鉛直方向(上向きに正)の座標

t : 時刻

$U(x, y, z, t), V(x, y, z, t), W(x, y, z, t)$: x, y, z 方向の流速成分

$p(x, y, z, t)$: 圧力

$\rho(x, y, z, t)$: 密度

$\tau(x, y, z, t)$: せん断応力

f ; コリオリパラメータ

g : 重力加速度(9.807 m/s²)

である。

式④を、水表面 ($z = \eta$) で $p = p_a$ (大気圧) とし、密度を $\rho = \rho_0 + \rho'$ のように標準密度 ρ_0 と、偏差 ρ' に分離して鉛直積分すると、次式のようになる。

$$p(z) = p_a + g \int_z^\eta \rho dz = p_a + \rho_0 g (\eta - z) + g \int_z^\eta \rho' dz \dots\dots\dots 5$$

ここで、

$\eta(x, y, t)$: 平均水深からの水面変化(上向きに正)

である。

また、水平方向と鉛直方向の渦動粘性係数をそれぞれ A_M , K_M とすると、次のようになる。

$$\frac{\tau_{xx}}{\rho_0} = 2A_M \frac{\partial U}{\partial x} \dots\dots\dots 6$$

$$\frac{\tau_{yx}}{\rho_0} = \frac{\tau_{xy}}{\rho_0} = A_M \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \dots\dots\dots 7$$

$$\frac{\tau_{yy}}{\rho_0} = 2A_M \frac{\partial V}{\partial y} \dots\dots\dots 8$$

$$\frac{\tau_{zx}}{\rho_0} = 2K_M \frac{\partial U}{\partial z} \dots\dots\dots 9$$

$$\frac{\tau_{xy}}{\rho_0} = 2K_M \frac{\partial V}{\partial z} \dots\dots\dots 10$$

1.3.3 シグマ座標

では，鉛直方向の座標が水深で標準化されるシグマ座標系を用いている，デカルト座標系からシグマ座標系への変換は，次式に基づいている．

$$x^* = x \quad \dots\dots\dots 11$$

$$y^* = y \quad \dots\dots\dots 12$$

$$\sigma = \frac{z - \eta}{H + \eta} \quad \dots\dots\dots 13$$

$$t^* = t \quad \dots\dots\dots 14$$

ここで， x, y, z は従来のデカルト座標系， $D = H + \eta$ において $H(x, y)$ は水深， $\eta(x, y, t)$ は基準面 $z = 0$ からの水面高さである．したがって σ は $\sigma = 0(z = \eta)$ から $\sigma = -1(z = -H)$ まで変動する．

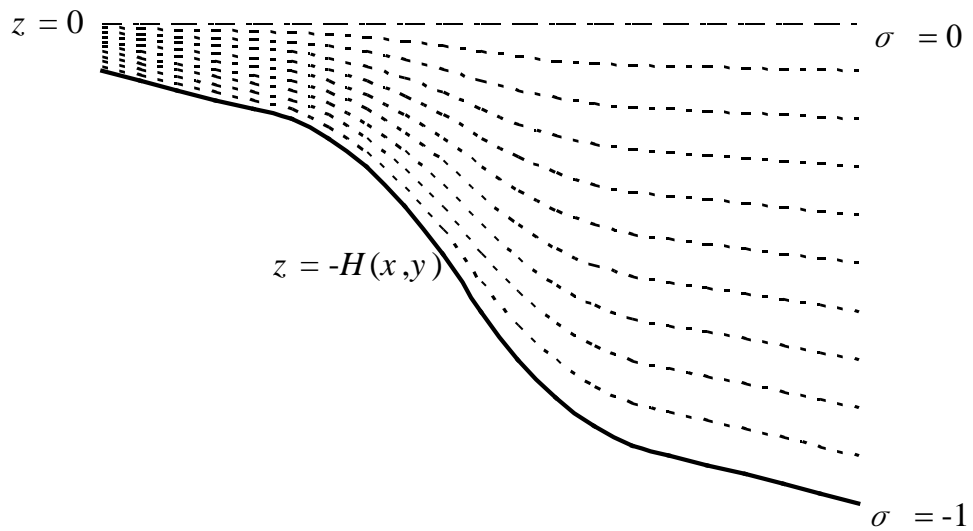


図 1.3-1 シグマ座標系の概念図

1.3.4 シグマ座標系による基礎式

・シグマ座標系による基礎式の誘導

式 11~14 を用いれば

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x^*} - \frac{1}{D} \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial D}{\partial x} \right) \frac{\partial}{\partial \sigma} \dots\dots\dots 15$$

$$\frac{\partial}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y^*} - \frac{1}{D} \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial D}{\partial y} \right) \frac{\partial}{\partial \sigma} \dots\dots\dots 16$$

$$\frac{\partial}{\partial z} = \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} \dots\dots\dots 17$$

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t^*} - \frac{1}{D} \left(\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial D}{\partial t} \right) \frac{\partial}{\partial \sigma} \dots\dots\dots 18$$

流速の鉛直方向成分 W は、以下のようにシグマ座標系での鉛直成分 ω に変換される

$$\omega = D \frac{\partial \sigma}{\partial t} = D \left(\frac{\partial \sigma}{\partial t} + U \frac{\partial \sigma}{\partial x} + V \frac{\partial \sigma}{\partial y} + W \frac{\partial \sigma}{\partial z} \right) \dots\dots\dots 19$$

さらに、式 19 に式 15~18 を代入すれば、

$$\begin{aligned} \omega &= D \left\{ \frac{\partial \sigma}{\partial t^*} - \frac{1}{D} \left(\frac{\partial \eta}{\partial t} + \sigma \frac{\partial D}{\partial t} \right) \frac{\partial \sigma}{\partial \sigma} \right\} + DU \left\{ \frac{\partial \sigma}{\partial x^*} - \frac{1}{D} \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} + \sigma \frac{\partial D}{\partial x} \right) \frac{\partial \sigma}{\partial \sigma} \right\} \\ &\quad + DV \left\{ \frac{\partial \sigma}{\partial y^*} - \frac{1}{D} \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} + \sigma \frac{\partial D}{\partial y} \right) \frac{\partial \sigma}{\partial \sigma} \right\} + W \\ &= W - U \left(\sigma \frac{\partial D}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) - V \left(\sigma \frac{\partial D}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) - \sigma \frac{\partial D}{\partial t} - \frac{\partial \eta}{\partial t} \dots\dots\dots 20 \end{aligned}$$

となる。

また,

$$\frac{\partial U}{\partial x} = \frac{\partial U}{\partial x^*} - \frac{1}{D} \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial D}{\partial x} \right) \frac{\partial U}{\partial \sigma} \dots\dots\dots 21$$

$$\frac{\partial V}{\partial y} = \frac{\partial V}{\partial y^*} - \frac{1}{D} \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial D}{\partial y} \right) \frac{\partial V}{\partial \sigma} \dots\dots\dots 22$$

$$\frac{\partial W}{\partial z} = \frac{1}{D} \frac{\partial W}{\partial \sigma} \dots\dots\dots 23$$

連続式 1 について, 式 21~23 を代入すると,

$$\frac{\partial U}{\partial x^*} - \frac{1}{D} \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} + \sigma \frac{\partial D}{\partial x} \right) \frac{\partial U}{\partial \sigma} + \frac{\partial V}{\partial y^*} - \frac{1}{D} \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} + \sigma \frac{\partial D}{\partial y} \right) \frac{\partial V}{\partial \sigma} + \frac{1}{D} \frac{\partial W}{\partial \sigma} = 0 \dots\dots\dots 24$$

が得られる, また. 式 20 より,

$$\begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial \sigma} &= \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} + \frac{\partial U}{\partial \sigma} \left(\sigma \frac{\partial D}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) + U \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\sigma \frac{\partial D}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) + \frac{\partial V}{\partial \sigma} \left(\sigma \frac{\partial D}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \\ &\quad + V \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\sigma \frac{\partial D}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) + \frac{\partial \sigma}{\partial \sigma} \frac{\partial D}{\partial t} + \sigma \frac{\partial^2 D}{\partial t \partial \sigma} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial t \partial \sigma} \\ &= \frac{\partial W}{\partial \sigma} + \frac{\partial U}{\partial \sigma} \left(\sigma \frac{\partial D}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) + \frac{\partial V}{\partial \sigma} \left(\sigma \frac{\partial D}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) + U \frac{\partial D}{\partial x} + V \frac{\partial D}{\partial y} + \frac{\partial D}{\partial t} \dots\dots\dots 25 \end{aligned}$$

が得られる. これを式 24 に代入すれば,

$$\begin{aligned} &\frac{\partial U}{\partial x^*} - \frac{1}{D} \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} + \sigma \frac{\partial D}{\partial x} \right) \frac{\partial U}{\partial \sigma} + \frac{\partial V}{\partial y^*} - \frac{1}{D} \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} + \sigma \frac{\partial D}{\partial y} \right) \frac{\partial V}{\partial \sigma} \\ &+ \frac{1}{D} \left\{ \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} + \frac{\partial U}{\partial \sigma} \left(\sigma \frac{\partial D}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) + \frac{\partial V}{\partial \sigma} \left(\sigma \frac{\partial D}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) + U \frac{\partial D}{\partial x} + V \frac{\partial D}{\partial y} + \frac{\partial D}{\partial t} \right\} = 0 \dots\dots\dots 26 \end{aligned}$$

となり, *を消去するとシグマ座標系における連続式

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial DU}{\partial x} + \frac{\partial DV}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = 0 \dots\dots\dots 27$$

が得られる.

また、 x 方向の運動方程式**2**について、左辺は

$$\frac{\partial U}{\partial t^*} + U \frac{\partial U}{\partial x^*} + V \frac{\partial U}{\partial y^*} + \frac{\omega}{D} \frac{\partial U}{\partial \sigma} - fVA \dots\dots\dots 28$$

と書き直される。

また、右辺の圧力勾配については、 $p_a = 0$ としてゲージ圧を用いると、

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \rho_0 g \frac{\partial \eta}{\partial x} + g \int_z^\eta \frac{\partial \rho'}{\partial x} dz + \rho'_{z=\eta} g \frac{\partial \eta}{\partial x} = \rho_{z=\eta} g \frac{\partial \eta}{\partial x} + g \int_z^\eta \frac{\partial \rho'}{\partial x} dz \dots\dots\dots 29$$

となり

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial x} &= \rho_{\sigma=0} g \frac{\partial \eta}{\partial x^*} + g \int_\sigma^0 \left\{ \frac{\partial \rho'}{\partial x^*} - \frac{1}{D} \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} + \sigma \frac{\partial D}{\partial x} \right) \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma} \right\} D d\sigma \\ &= \rho_{\sigma=0} g \frac{\partial \eta}{\partial x^*} + g \int_\sigma^0 \left(D \frac{\partial \rho'}{\partial x^*} - \sigma \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma} \right) d\sigma \dots\dots\dots 30 \end{aligned}$$

となる。 $\rho_{\sigma=\sigma} \doteq \rho_0$ と近似すると、

$$-\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x^*} - \frac{gD}{\rho_0} \int_\sigma^0 \left(\frac{\partial \rho'}{\partial x^*} - \frac{\sigma}{D} \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma} \right) d\sigma \dots\dots\dots 31$$

渦動粘性係数項については、

$$\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial x} \left(2A_M \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_M \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial U}{\partial z} \right) \\ &= \left[\frac{\partial}{\partial x^*} - \frac{1}{D} \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} + \sigma \frac{\partial D}{\partial x} \right) \frac{\partial}{\partial \sigma} \right] \left[2A_M \left\{ \frac{\partial U}{\partial x^*} - \frac{1}{D} \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} + \sigma \frac{\partial D}{\partial x} \right) \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right\} \right] \\ &+ \left[\frac{\partial}{\partial y^*} - \frac{1}{D} \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} + \sigma \frac{\partial D}{\partial y} \right) \frac{\partial}{\partial \sigma} \right] \left[A_M \left\{ \frac{\partial U}{\partial y^*} - \frac{1}{D} \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} + \sigma \frac{\partial D}{\partial y} \right) \frac{\partial U}{\partial \sigma} + \frac{\partial V}{\partial x^*} - \frac{1}{D} \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} + \sigma \frac{\partial D}{\partial x} \right) \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right\} \right] \\ &+ \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_M}{D} \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right) \dots\dots\dots 32 \end{aligned}$$

となるが、Mellor and Blumberg(1985)に基づく鉛直せん断応力に水平渦動粘性係数の影響が含まれるため適切な底面境界層の計算ができないと指摘されており、それを回避するために次式で近似する。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left(2A_M \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_M \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial U}{\partial z} \right) \\ & = \frac{\partial}{\partial x^*} \left(2A_M \frac{\partial U}{\partial x^*} \right) + \frac{\partial}{\partial y^*} \left\{ A_M \left(\frac{\partial U}{\partial y^*} + \frac{\partial V}{\partial x^*} \right) \right\} + \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_M}{D} \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right) \end{aligned} \dots\dots\dots 33$$

なお、式 28 の慣性項は運動量を保存するために、次式のように式 27 を使って求められる保存形式に変更して使用する。

$$\begin{aligned} & D \left(\frac{\partial U}{\partial t^*} + U \frac{\partial U}{\partial x^*} + V \frac{\partial U}{\partial y^*} + \frac{\omega}{D} \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right) + U \left(\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial DU}{\partial x} + \frac{\partial DV}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} \right) \\ & = \frac{\partial DU}{\partial t^*} + U \frac{\partial DU^2}{\partial x^*} + V \frac{\partial DUV}{\partial y^*} + \frac{\partial U\omega}{\partial \sigma} \end{aligned} \dots\dots\dots 34$$

よって、最終的に得られるシグマ座標系における x 方向の運動方程式は、

$$\begin{aligned} & \frac{\partial UD}{\partial t} + \frac{\partial U^2 D}{\partial x} + \frac{\partial UVD}{\partial y} + \frac{\partial U\omega}{\partial \sigma} - fVD = -gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^0 \left[\frac{\partial \rho'}{\partial x} - \frac{\sigma'}{D} \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma'} \right] d\sigma' \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(2DA_M \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ DA_M \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_M}{D} \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right) \end{aligned} \dots\dots\dots 35$$

となる。シグマ座標系における y 方向の運動方程式およびスカラー量 ($q^2, q^2 l$) の輸送方程式に関しても同様の誘導方法により得られる。

・ 内部モード

POM における準 3 次元モデルの基礎式は，前述のシグマ座標系の基礎式において誘導できる．

連続式

式 27 より，

$$\frac{\partial DU}{\partial x} + \frac{\partial DV}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} + \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \dots\dots\dots 36$$

運動方程式(x 方向)

式 35 より，

$$\begin{aligned} \frac{\partial UD}{\partial t} + \frac{\partial U^2 D}{\partial x} + \frac{\partial UV D}{\partial y} + \frac{\partial U \omega}{\partial \sigma} - fVD + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^0 \left[\frac{\partial \rho'}{\partial x} - \frac{\sigma'}{D} \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma'} \right] d\sigma' \\ = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_M}{D} \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right] + F_x \end{aligned} \dots\dots\dots 37$$

y 方向も同様に，

運動方程式(y 方向)

$$\begin{aligned} \frac{\partial UD}{\partial t} + \frac{\partial UV D}{\partial x} + \frac{\partial V^2 D}{\partial y} + \frac{\partial V \omega}{\partial \sigma} - fUD + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^0 \left[\frac{\partial \rho'}{\partial y} - \frac{\sigma'}{D} \frac{\partial D}{\partial y} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma'} \right] d\sigma' \\ = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_M}{D} \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right] + F_y \end{aligned} \dots\dots\dots 38$$

ここで，外力項 F_x ， F_y は次式で表される．

$$F_x = \frac{\partial}{\partial x} \left[H2A_M \frac{\partial U}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[HA_M \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] \dots\dots\dots 39$$

$$F_y = \frac{\partial}{\partial y} \left[H2A_M \frac{\partial V}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[HA_M \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] \dots\dots\dots 40$$

上式中の A_M は，Smagorinsky の渦動粘性係数である．

$$A_M = C\Delta x\Delta y \frac{1}{2} |\nabla V + (\nabla V)^T| \dots\dots\dots 41$$

$$|\nabla V + (\nabla V)^T|/2 = \left[(\partial u/\partial x)^2 + (\partial v/\partial x + \partial u/\partial y)^2 + (\partial v/\partial y)^2 \right]^{1/2} \dots\dots\dots 42$$

ここで、 C : Smagorinsky の拡散係数のパラメータである。

水温(T)および塩分(S)の基礎方程式は、次のとおりである。

$$\frac{\partial TD}{\partial t} + \frac{\partial TUD}{\partial x} + \frac{\partial TVD}{\partial y} + \frac{\partial T\omega}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_H}{D} \frac{\partial T}{\partial \sigma} \right] + F_T - \frac{\partial R}{\partial z} \dots\dots\dots 43$$

$$\frac{\partial SD}{\partial t} + \frac{\partial SUD}{\partial x} + \frac{\partial SVD}{\partial y} + \frac{\partial S\omega}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_H}{D} \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right] + F_S \dots\dots\dots 44$$

乱流モデルの輸送方程式は、次の2式から構成されている。

(乱流エネルギー輸送方程式)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q^2 D}{\partial t} + \frac{\partial Uq^2 D}{\partial x} + \frac{\partial Vq^2 D}{\partial y} + \frac{\partial \omega q^2 D}{\partial \sigma} \\ & = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_q}{D} \frac{\partial q^2}{\partial \sigma} \right] + \frac{2K_M}{D} \left[\left(\frac{\partial U}{\partial \sigma} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \sigma} \right)^2 \right] + \frac{2g}{\rho_0} K_H \frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial \sigma} - \frac{2Dq^3}{B_1 l} + F_q \end{aligned} \dots\dots\dots 45$$

(乱流スケール輸送方程式)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q^2 l D}{\partial t} + \frac{\partial Uq^2 l D}{\partial x} + \frac{\partial Vq^2 l D}{\partial y} + \frac{\partial \omega q^2 l D}{\partial \sigma} \\ & = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_q}{D} \frac{\partial q^2 l}{\partial \sigma} \right] + E_1 l \left[\frac{K_M}{D} \left[\left(\frac{\partial U}{\partial \sigma} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \sigma} \right)^2 \right] + E_3 \frac{g}{\rho_0} K_H \frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial \sigma} \right] - \frac{Dq^3}{B_1} \tilde{W} + F_l \end{aligned} \dots\dots\dots 46$$

\tilde{W} は次式で表される壁関数である.

$$\tilde{W} = 1 + E_2 \frac{l}{KL} \dots\dots\dots 47$$

ここで,

$$L^{-1} = (\eta - z)^{-1} + (H + z)^{-1} \dots\dots\dots 48$$

$$\frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial \sigma} \equiv \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} - c_s^{-2} \frac{\partial p}{\partial \sigma} \dots\dots\dots 49$$

E_1, E_2, E_3 : それぞれ, 1.8, 1.33, 1.0

C_s : 音速

である. F_q, F_l は水平方向の乱流拡散項であり, 次式で表される.

$$F_q = \frac{\partial}{\partial x} \left(HA_H \frac{\partial q^2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(HA_H \frac{\partial q^2}{\partial y} \right) \dots\dots\dots 50$$

$$F_l = \frac{\partial}{\partial x} \left(HA_H \frac{\partial q^2 l}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(HA_H \frac{\partial q^2 l}{\partial y} \right) \dots\dots\dots 51$$

ここで,

K_H : 乱流運動エネルギー・乱流スケールに対する鉛直拡散係数(m^2/s)

A_H : 乱流運動エネルギー・乱流スケールに対する水平拡散係数(m^2/s)

q : 乱流運動エネルギー(m/s)

l : 乱流スケール(m)

である.

・ 外部モード

外部モードの上線をついた変数は，次式のような積分にて定義される．

$$\bar{U} = \int_{-1}^0 U d\sigma \dots\dots\dots 52$$

$$\bar{V} = \int_{-1}^0 V d\sigma \dots\dots\dots 53$$

連続式

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U} D}{\partial x} + \frac{\partial \bar{V} D}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots 54$$

運動方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{U} D}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}^2 D}{\partial x} + \frac{\partial \bar{U} \bar{V} D}{\partial y} - \tilde{F}_x - f \bar{V} D + g D \frac{\partial \eta}{\partial x} = -\langle wu(0) \rangle + \langle wu(-1) \rangle \\ + G_x + \frac{g D}{\rho_0} \int_{-1}^0 \int_{\sigma}^0 \left[D \frac{\partial \rho'}{\partial x} - \frac{\partial D}{\partial x} \sigma' \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma'} \right] d\sigma' d\sigma \end{aligned} \quad (x \text{ 方向}) \dots\dots\dots 55$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{V} D}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U} \bar{V} D}{\partial x} + \frac{\partial \bar{V}^2 D}{\partial y} - \tilde{F}_y - f \bar{U} D + g D \frac{\partial \eta}{\partial y} = -\langle wv(0) \rangle + \langle wv(-1) \rangle \\ + G_y + \frac{g D}{\rho_0} \int_{-1}^0 \int_{\sigma}^0 \left[D \frac{\partial \rho'}{\partial y} - \frac{\partial D}{\partial y} \sigma' \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma'} \right] d\sigma' d\sigma \end{aligned} \quad (y \text{ 方向}) \dots\dots\dots 56$$

ここで，

$-\langle wu(0) \rangle, -\langle wv(0) \rangle$: 水表面での運動量フラックス (m^2/s^2)

$-\langle wu(-1) \rangle, -\langle wv(-1) \rangle$: 海底面での運動量フラックス (m^2/s^2)

である．

また、 \tilde{F}_x , \tilde{F}_y , G_x および G_y は、以下の式で定義される。

$$\tilde{F}_x = \frac{\partial}{\partial x} \left[H 2 \bar{A}_M \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[H \bar{A}_M \left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{V}}{\partial x} \right) \right] \dots\dots\dots 57$$

$$\tilde{F}_y = \frac{\partial}{\partial y} \left[H 2 \bar{A}_M \frac{\partial \bar{V}}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[H \bar{A}_M \left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{V}}{\partial x} \right) \right] \dots\dots\dots 58$$

$$G_x = \frac{\partial \bar{U}^2 D}{\partial x} + \frac{\partial \bar{U} \bar{V} D}{\partial y} - \tilde{F}_x - \frac{\partial \bar{U}^2 D}{\partial x} - \frac{\partial \bar{U} \bar{V} D}{\partial y} + \bar{F}_x \dots\dots\dots 59$$

$$G_y = \frac{\partial \bar{U} \bar{V} D}{\partial x} + \frac{\partial \bar{V}^2 D}{\partial y} - \tilde{F}_y - \frac{\partial \bar{U} \bar{V} D}{\partial x} - \frac{\partial \bar{V}^2 D}{\partial y} + \bar{F}_y \dots\dots\dots 60$$

1.3.5 各変数の定義位置

x (東向き)方向に I 番目, y (北向き)方向に J 番目の格子について, 各変数を定義する. 外部モードの場合の変数 UA , VA : 水深平均流速および, η は図 1.3-2 に示すように定義されている. 一方, 内部モードの場合において, 変数 U , V , ω , Q , Z の定義位置は, 図 1.3-3 に示すとおりである. なお, 図 1.3-3 の中に示されている Q は K_M , K_H , q^2 , $q^2 l$ の各変数に該当する.

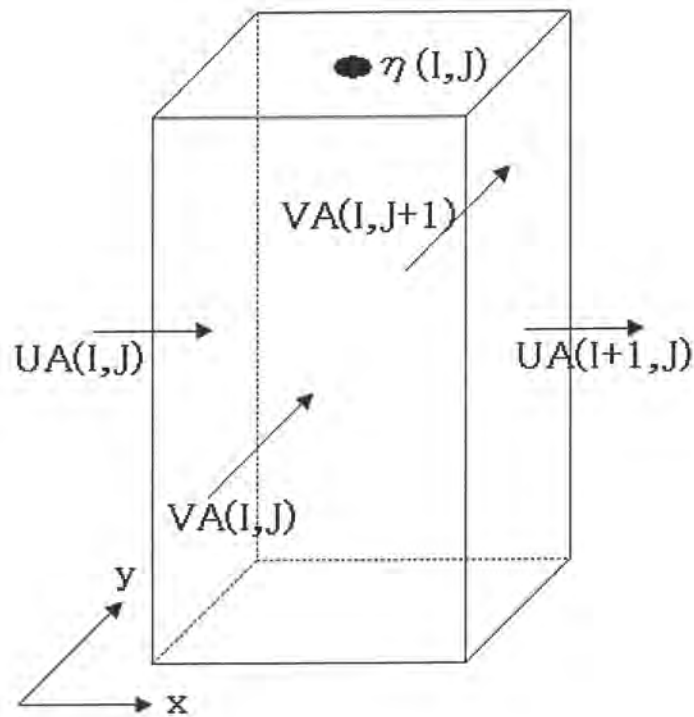


図 1.3-2 外部モードの場合の2次元格子

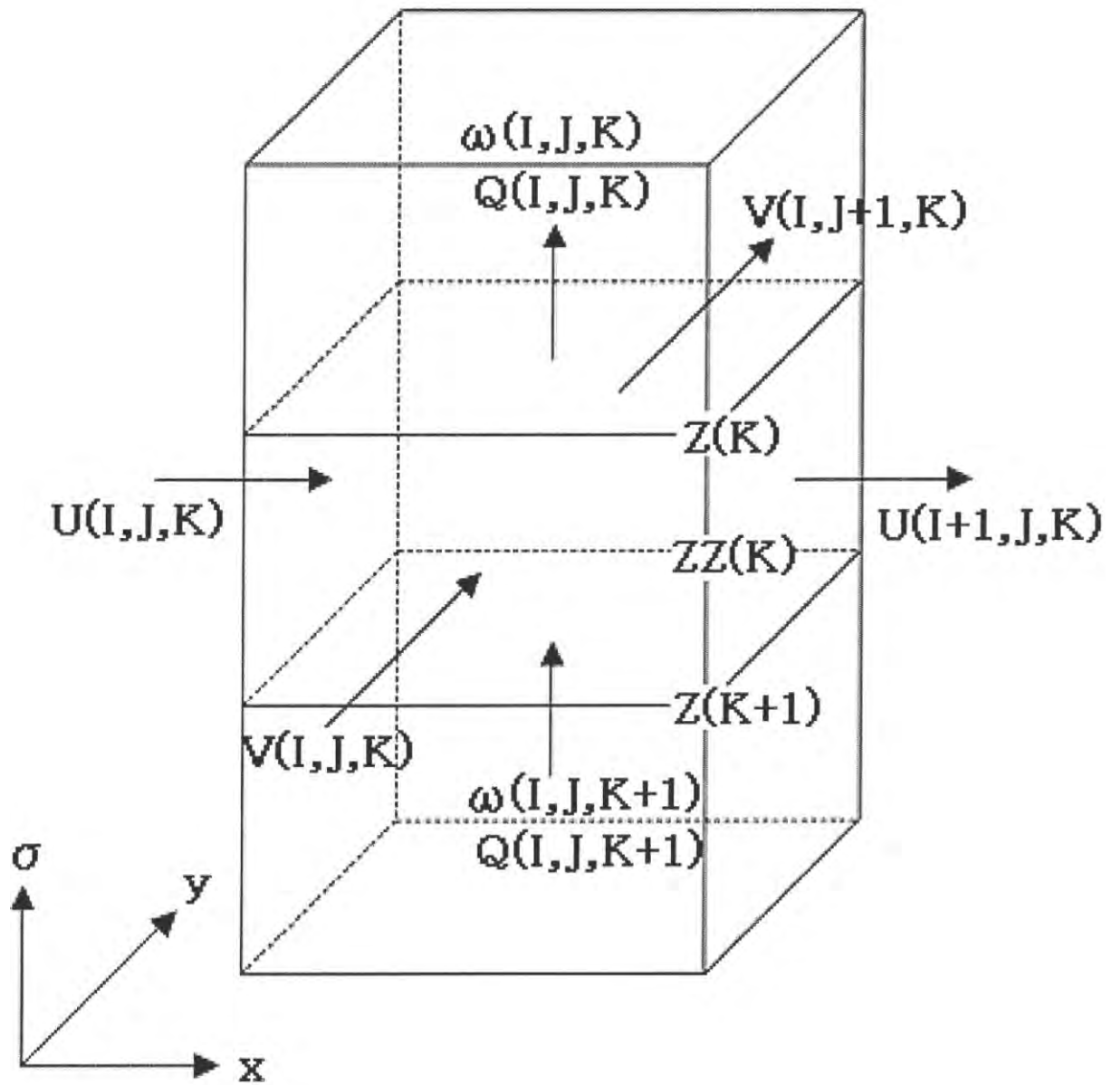


図 1.3-3 内部モードの場合の3次元格子

1.3.6 各変数の定義位置

基礎式の差分化に際しては、水平方向の拡散項および移流項には陽解法を用い、鉛直方向の拡散項については、陰解法を用いた。また、時間方向の差分には、**leap-frog**法が適用されている。

図 1.3-4 に外部モードおよび内部モードでの時間ステップのプロセスを示す。ET は内部モードでの水面変動を、UT、VT は水深平均および時間平均流速を示し、水深平均流速(UA、VA)を外部モードの時間ステップ Δt_e で時間平均したものである。また、B、F は t^{n-1} 、 t^{n+1} 出の値を示す。全ての値が t^{n-1} と t^n で既知である。傾圧力勾配や移流項は底面応力とともに外部モードで計算されている。図 1.3-4 の Feedback の過程を通じて、それらの値は $t^{n-1} < t^n < t^{n+1}$ の間、一定値に保たれる。外部モードでは t^{n+1} までの時間ステップ Δt_e のたびに **leap-frog**法を用いて時間を進めていく。

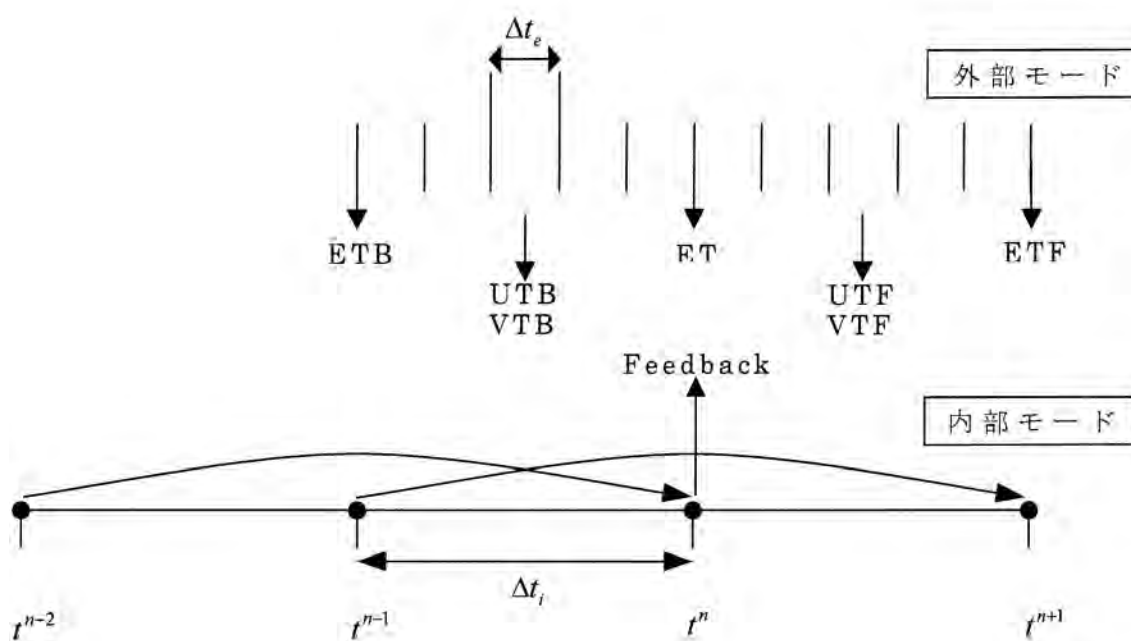


図 1.3-4 外部モードおよび内部モードでの時間ステップのプロセス

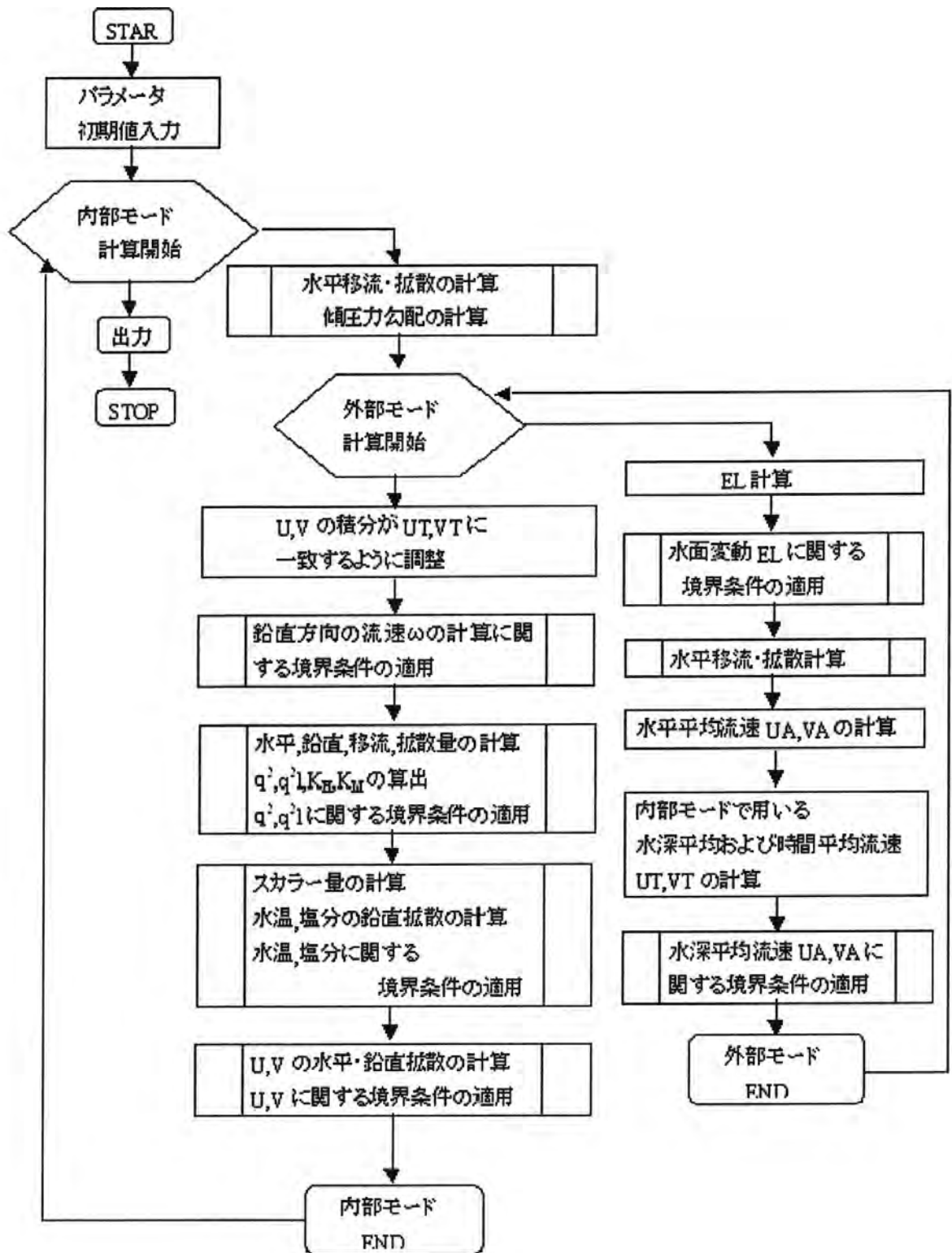


図 1.3-5 POMのフローチャート

1.3.7 内部モードおよび外部モードの解法

3次元変数の計算は、鉛直拡散ステップと移流と水平拡散時間ステップに分かれる。前者は、陰解法であるのに対して後者は陽解法である。ここで、式 37 を考える。

$$\frac{\partial DU}{\partial t} + Adv(U) - Dif(U) = \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(K_M \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right) \dots\dots\dots 67$$

$Adv(U)$ は移流項、 $Dif(U)$ は水平拡散項をそれぞれ表す。その解は、2つのステップで実行される。移流項と水平拡散項は次式のように差分化される。

$$\frac{\tilde{D}\tilde{U} - D^{n-1}U^{n-1}}{2\Delta t} = -Adv(U^n) + Dif(U^{n-1}) \dots\dots\dots 68$$

鉛直拡散項は次のように差分化される。

$$\frac{D^{n+1}U^{n+1} - \tilde{D}\tilde{U}}{2\Delta t} = \frac{1}{D^{n+1}} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(K_M \frac{\partial U^{n+1}}{\partial \sigma} \right) \dots\dots\dots 69$$

$\tilde{D}\tilde{U}$ は、上の2つの式でキャンセルするので、3次元変数になる。

Leap-frog 時間差分スキームでは、奇数回時間ステップの解が偶数解の時間ステップの解から徐々に離れていくので、次式に示すような関係式を用いて各々の時間ステップで平準化(スムージング)を行っている。

$$T_s = T^n + \frac{\alpha}{2}(T^{n+1} - 2T^n + T^{n-1}) \dots\dots\dots 70$$

ここで、 T_s は平準化(スムージング)された解である。一般に、 $\alpha = 0.05$ の値が用いられている。平準化数は、 T_s は T^{n-1} に、 T^{n+1} は T^n に置き換えられる。

1.3.8 計算条件

計算対象領域は、図 1.1-1 に示すような有明海と八代海および東シナ海の一部を大領域としている。

水平面上での格子幅および格子数は、 $\Delta x = 10''(260m)$ および $\Delta y = 10''(309m)$ の 438×468 ケとした。また鉛直方向には、それぞれ 10 分割している。各格子の水深は、財団法人日本水路境界の海底地形デジタルデータを基に作成した。

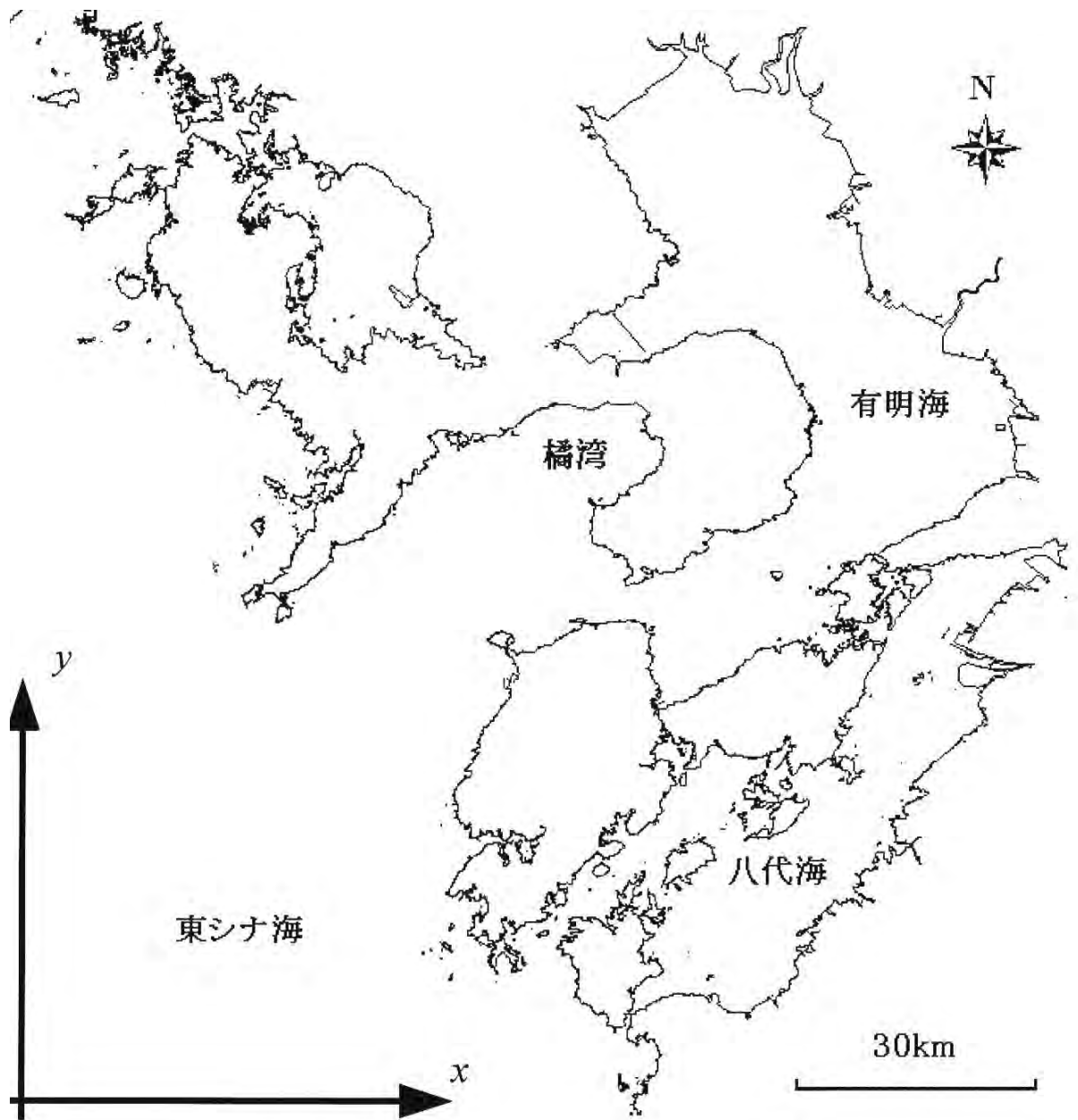


図 1.3-6 計算対象領域

1.3.9 計算条件

本研究で用いた POM には, 干潟に対する特別な考慮はされていない. そのため, 干潟域には一様に水深 5m を与えた.

1.3.10 Coriolis Parameter

$$f(I, J) = 2\omega_e \sin \phi$$

ここに,

ω_e : 地球自転の角速度 ($= 7.29 \times 10^{-5} (\text{rad/s})$)

ϕ : 経度 ($^\circ$)

である.

また, ϕ は

$$\phi(I, J) = \text{南側境界の緯度} + J(\text{南側境界の緯度} - \text{北側の境界の緯度}) / JM$$

で求められる.

ここで,

JM : y 方向の格子分割数

である.

1.3.11 計算時間および計算時間間隔

計算時間は, 大領域において $t = 10.0 \text{ days}$ とした.

計算時間間隔については, 外部モードで $\Delta t_e = 1.0 \text{ sec}$, 内部モードで $\Delta t_i = 5.0 \text{ sec}$ とした.

第2章 外海を基準とした有明海の増幅率の変動特性

2.1 はじめに

諫早湾潮受け堤防の締め切りが行われてから 2012 年現在で 15 年が経過した。その間、2000 年～2001 年にかけての大規模な養殖海苔の色落ち、タイラギに代表される二枚貝の漁獲高の減少等数々の異変が見られ、司法問題に発展するなど社会問題となった。それらの主要因の一つとして潮受け堤防建設による潮汐・潮流の変化が研究されてきた。

有明海における最も支配的な分潮である M_2 潮の調査・解析を行った宇野木(2003)によると、近年の潮汐減少は諫早湾干拓事業や熊本新港建設等の有明海内の地形変化によるもの(内部効果)が 50%、外海の潮汐減少によるもの(外部効果)が 40%、平均海面の上昇による水深増加によるもの(水深効果)が 10%未満と試算した。また、潮受け堤防締め切りにより湾口の口之津を基準とした湾奥の大浦の潮汐の増幅率が減少しているとした。一方、藤原ら(2004)は締め切りの影響は場所により異なり、 M_2 潮の振幅が湾口の口之津では増加、湾奥の大浦では減少しているとの結果を得ている。影響に地域的なギャップが存在することについて宇野木(2005)は、「内部の地形変化の影響が場所に逆のセンスで現れること普通には起こりがたい」と述べた。

このように、潮汐データの解析という分野でもいまだに研究者間で統一された結果を得られていない状況である。そこで本研究では有明海の増幅率の変化を調査した田井ら(2008)の研究をもとに、最新のデータを加え新たに解析を行った結果について述べる。

2.2 増幅率について

まず始めに、本研究における検討の中心をなす増幅率について簡単ではあるが説明を加えたい。

外海に口を開いた湾内に外洋から周期 T_* の波が進入してきて海域の水が強制振動する場を考える。この場合、入射してくる波と反射波が重なって定常振動となる(自由振動の場合と同様)。強制振動の角振動数は、入射波の値 $\sigma_* = 2\pi/T_*$ と同じである。以下、定常振動について。

入射波を添字 i 、反射波を r と表すと、

$$\eta_i = a_i \cos(kx + \sigma t), \quad \eta_r = a_r \cos(kx - \sigma t)$$

また、波振動に伴う流れ u は、 $\frac{u_1}{C} = \frac{\eta_1}{h}$ 、 $\frac{u_2}{C} = -\frac{\eta_2}{h}$ なる関係で表されることから、

$$u_i = -\frac{Ca_i}{h} \cos(kx + \sigma t), \quad u_r = \frac{Ca_r}{h} \cos(kx - \sigma t)$$

岸 $x=0$ において、 $u = u_i + u_r = 0$ となることから $a_i = a_r$ 、すなわち反射波と入射波は全く同じ波形をとることが分かる。入射波と反射波を重ね合わせて

$$\eta(x, t) = \eta_i + \eta_r = 2a_i \cos kx \cos \sigma t$$

$$u(x, t) = u_i + u_r = \frac{2Ca_i}{h} \sin kx \sin \sigma t$$

を得る。上式は定常波を表し、波は進行せずにそれぞれの場所に定まった振幅を持って上下に振動している。 $2a_i = B$ として

$$\eta = B \cos kx \cos \sigma_* t \cdots (1)$$

$$u = \frac{CB}{h} \sin kx \sin \sigma_* t \cdots (2)$$

$$\text{なお, } C = \sqrt{gh}$$

境界条件として、湾口 $x=l$ において、海面が $\eta = a_m \cos \sigma_* t$ で上下している場合を考える。(1)式と比較して $B \cos kl = a_m$ 、 $B = a_m / \cos kl$ である。ゆえに湾内の強制振動は

$$\eta = a_m \frac{\cos kx}{\cos kl} \cos \sigma_* t, \quad u = \frac{Ca_m}{h} \frac{\sin kx}{\cos kl} \sin \sigma_* t$$

となる。ここで、波数 k は周期 T_* によって

$$k = \frac{\sigma_*}{C}, \quad \sigma_* = \frac{2\pi}{T_*} \rightarrow k = \frac{2\pi}{CT_*}$$

また，矩形湾の基本振動周期 $T_1 = \frac{4l}{\sqrt{gh}}$ を用いると $kl = \frac{2\pi l}{CT_*} = \frac{\pi T_1}{2T_*}$

以上のことから，湾口に対する湾内振動の増幅率 $R(x)$ は，

$$R(x) = \frac{\eta_{\max}}{a_m} = R_0 \cos kx, \quad R_0 = \frac{1}{\cos kl} = \frac{1}{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{T_1}{T_*}\right)}$$

ここで， R_0 は湾奥水位の増幅率である．強制波の周期 T_* が海域の固有振動の周期 T_1 に近づくと，増幅率は次第に大きくなる．両者が一致すると，共振のため増幅率は無限大になる（ただし実際には摩擦の影響や湾外へ逃げる波のため無限大にはなりえない）．

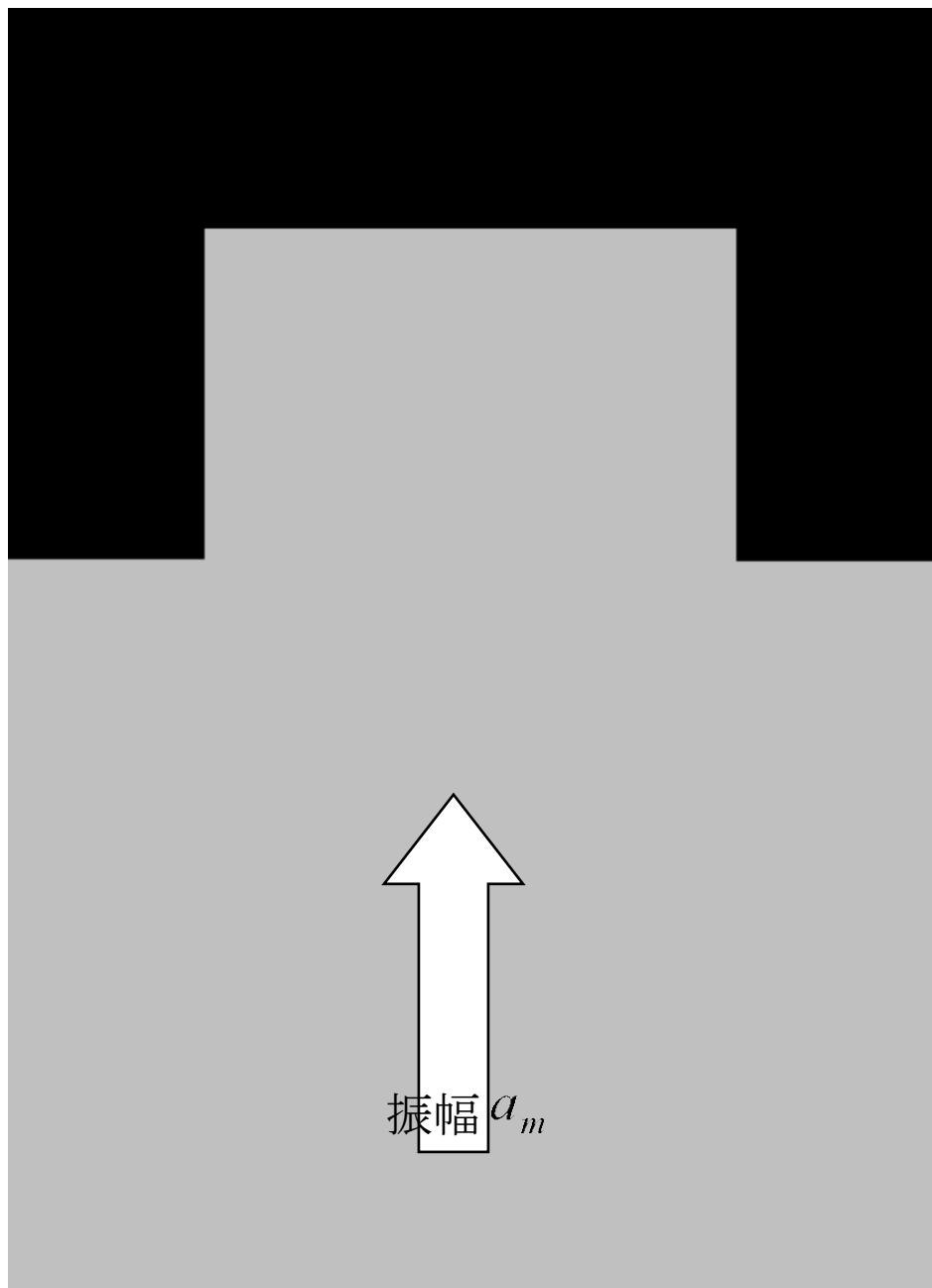


図 2.2-1 外海に口を開いた内湾（黒の部分が陸地）

2.3 実測データとシミュレーションを用いた解析

2.3.1 解析方法

本研究の解析には日本海洋データセンターおよび気象庁から公開されている毎時潮高データを用いた。有明海内の大浦(湾奥)、三角(湾央)、口之津(湾口)の3つの験潮所に外海の長崎験潮所を加えた4つの地点を対象としている。1969年から2007年までの期間について、30日ずつ解析期間をずらしながら369日分のデータを用いて調和解析により38分潮に分解した田井の研究(2008)の後を継ぐ形で2011年11月までの解析を行った。田井・矢野(2008)は、潮受け堤防の締め切りが外海を基準とした有明海内の M_2 潮増幅率に与えた影響は、起潮力の大きさにより変化し、起潮力が大きいときは湾奥で影響が小さいが湾口で影響が大きく、逆に起潮力が小さいときは湾奥で影響が大きく、湾口では影響が小さいとの結果を得た。さらに、湾口では締め切りによって増幅率が増加、湾奥では逆に増幅率が減少の傾向、湾央ではそれらの中間的な性質を持つ、という影響に地域的なギャップがある、との結果も得ている。最新のデータを用いた解析においても同様の結果が得られるかを確認する。

今回の解析では、潮汐減少の現象と諫早湾干拓事業との関連を見るために89~96年、98~06年、06~11年までに絞って検討を行っている。なお、干拓事業が行われた年である97年のデータは工事自体の影響等が存在することを考慮して除外している。また、解析には外海に存在する長崎の潮汐を基準とした。既往の研究で有明海の基準点として多く取り扱われている湾口の口之津ではなく長崎とした理由として、締め切りの影響は場所によって異なり、 M_2 潮の振幅は口之津では増加、湾奥の大浦では減少しているという藤原ら(2004)の研究結果が挙げられる。すなわち、仮に大浦での潮汐振幅が減少していなくても口之津で振幅が増加していれば湾口に対する大浦の増幅率は減少することになる。よって、口之津の潮汐は湾内の変化の影響を受けている可能性が大きく起潮力の代表としてはふさわしくないと考えられ、締め切りによる有明海の潮汐振幅および増幅率の変化を定量的に調べるためには湾内の変化を受けない外海との比較を行うことが必要であると考えられる。

さらに、並行してPOM(1.3参照)を用いた3次元潮流シミュレーションにより増幅率の変化を算出し、実測データと比較する。開境界に与える振幅を変化させ、実測データと同様に長崎の振幅を基準とした増幅率と、開境界の振幅を基準とした増幅率を示した。諫早湾干拓事業後に有明海に見られる潮汐の減少について潮受け堤防の締め切りの影響を評価するため、締め切り前と締め切り後の2パターンの計算を行い、比較した。

2.3.2 データ解析結果

図 2.3-1 に潮汐データから得られたグラフを示す。有明海湾奥に位置する大浦の実測データを見てみると、諫早湾干拓事業の前後となる 89~96 年と、98~06 年の間において、大幅な増幅率の減少が起きている。この傾向は後述する数値シミュレーションの結果とも一致しており、諫早湾干拓事業における潮受け堤防の締め切りの影響が大きいと考えることができる。さらに、外海の振幅が小さいときは増幅率の減少が大きく（すなわち締め切りの影響が大きい）、外海の振幅が大きいときは締め切りの影響が大であることなど、 M_2 潮の振幅の大小によってその影響に違いがあることが確認された。その他の観測点についても結果を述べる。有明海湾口に位置する口之津においては諫早湾干拓事業の前後で増幅率が増加し、また外海の振幅が小さいときに比べて大きいときに締め切りの影響が大きく現れているなど、上述の大浦の示した挙動と逆の変化を示している。外海から入射する M_2 潮の振幅に対してケンドールの順位相関検定を行った田井(2010)によると、全ケースで有意に負となった。すなわち、 M_2 潮の振幅が増加傾向にある場合には増幅率は減少する傾向にあるはずで、口之津では異なる挙動を示したことになる。湾内に存在する三角については、これら 2 つの中間的な結果となった。以上のように、各観測点においてそれぞれ異なる結果となった。

また、締め切りの前後において全域で回帰直線の傾きが緩やか（すなわち、増幅率が一定の値を示す傾向）になっている。これは、堤防締め切りによって有明海内の非線形効果が抑制されたものであると考えられる。

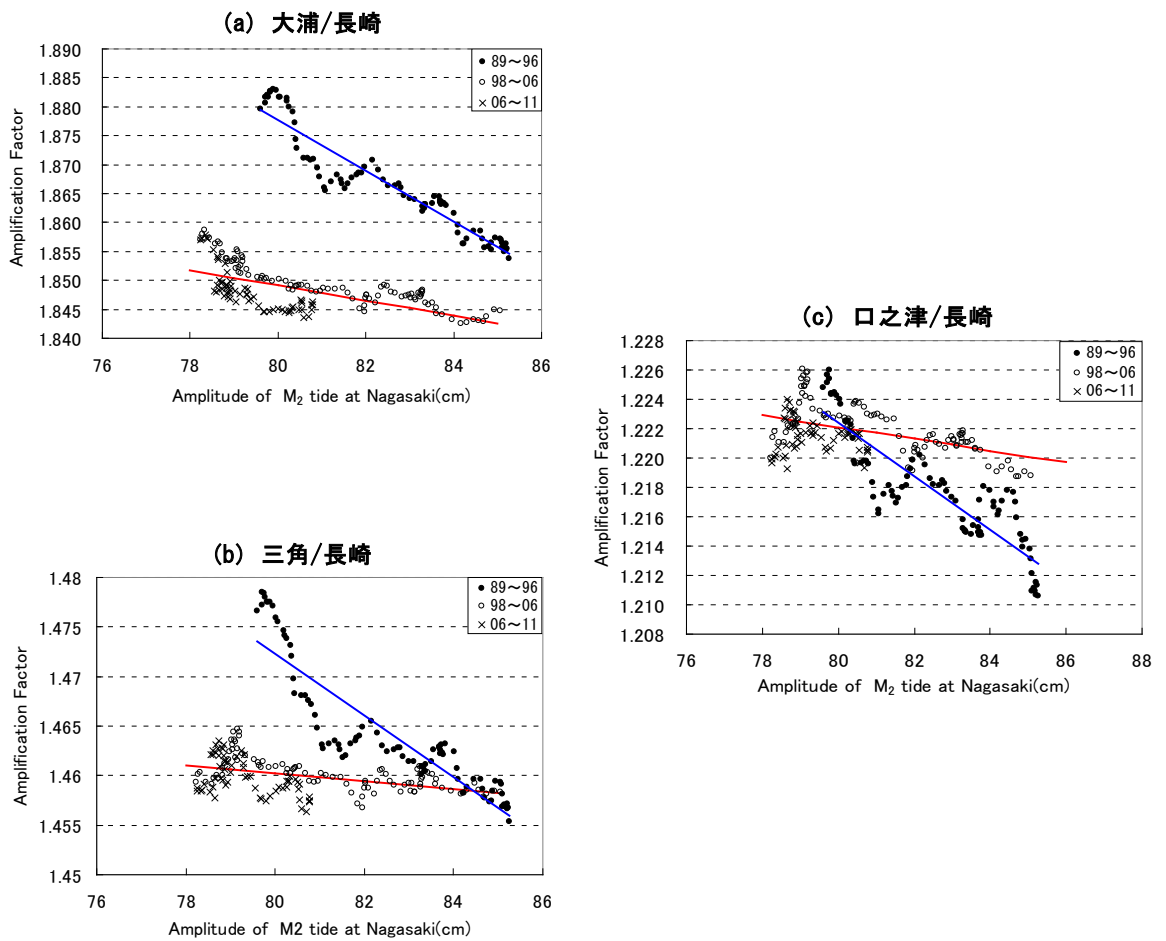


図 2.3-1 増幅率の変化 (観測データ)

2.3.3 シミュレーション結果

数値シミュレーションを行った結果について図 2.3-2 に示す。まず、湾奥に位置する大浦について論じる。潮受け堤防の締め切り前後で長崎基準・開境界基準ともに増幅率の減少が見られる。また、外海からの潮汐の振幅が小さいときは締め切りによる影響が大きく、逆に外海の潮汐の振幅が大きいときは締め切りの影響がほぼ見られない。以上の結果は、実測データと一致している。次いで、湾口の口之津の結果について述べる。潮受け堤防の締め切り後に長崎基準・開境界基準共に増幅率の増加が見られ、外海からの潮汐の振幅が大きいときは締め切りの影響が大きく、外海の潮汐の振幅が小さいときは締め切りの影響が小さかった。この結果も、実測データと一致する。また、三角についても湾奥・湾口の両地点の中間的な結果が得られた。

さらに、非線形特性への影響が考えられる回帰直線の傾きについても、全域において締め切り後に傾きが緩やかに変化していた。

これらの結果から、今回の数値シミュレーション結果は、実際に有明海に生じた挙動をよく表していると考えられる。

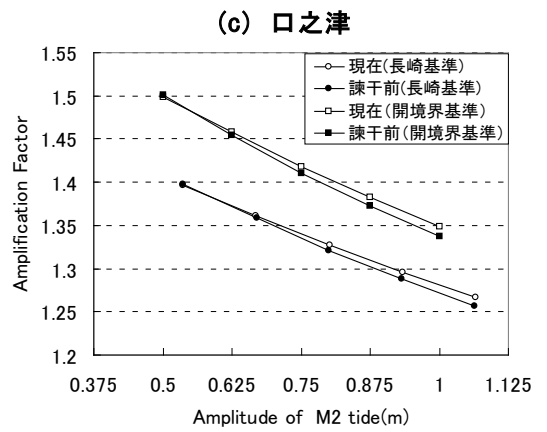
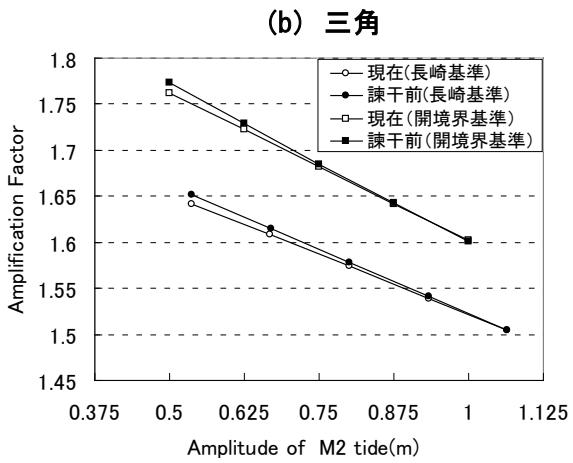
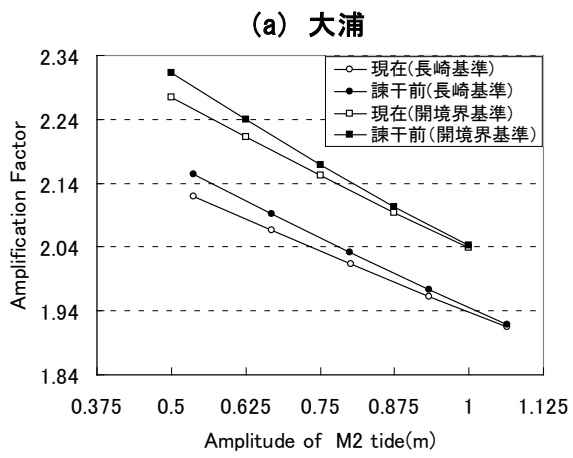


図 2.3-2 増幅率の変化 (シミュレーション)

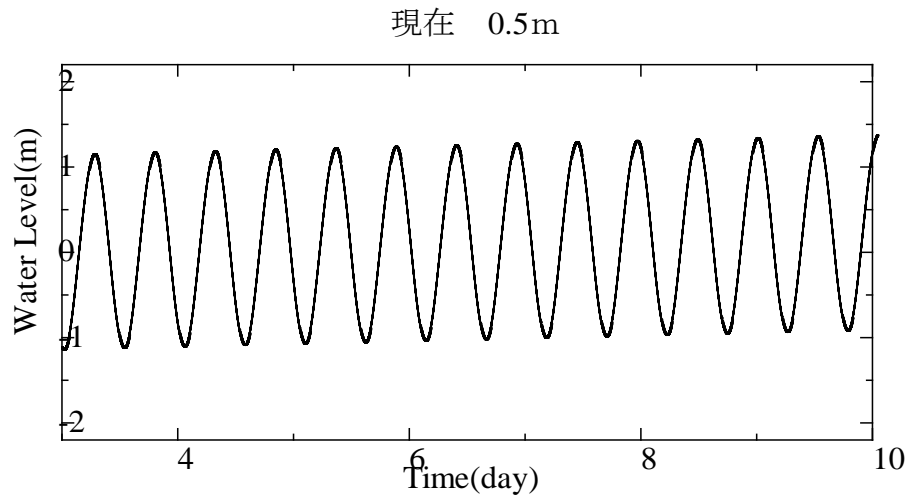


図 2.3-3 潮汐のグラフ(現在, 外海の潮汐振幅 0.5m)

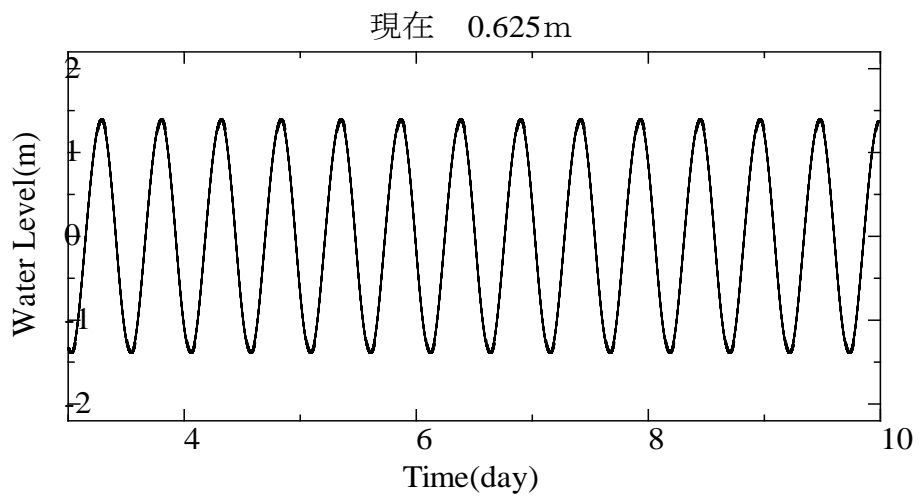


図 2.3-4 潮汐のグラフ(現在, 外海の潮汐振幅 0.625m)

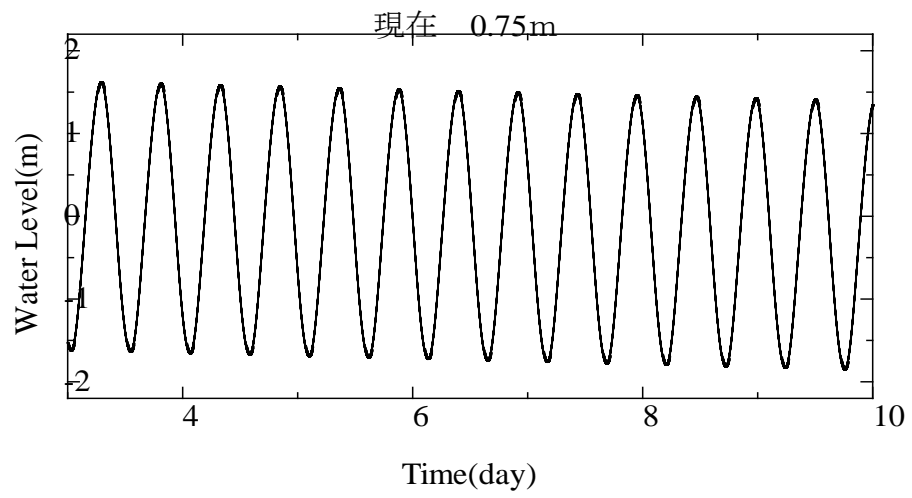


図 2.3-5 潮汐のグラフ(現在, 外海の潮汐振幅 0.75m)

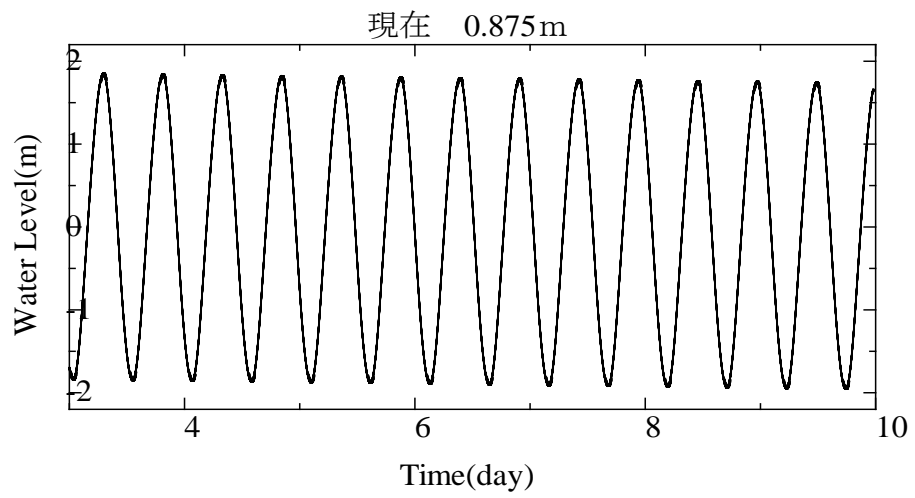


図 2.3-6 潮汐のグラフ(現在, 外海の潮汐振幅 0.875m)

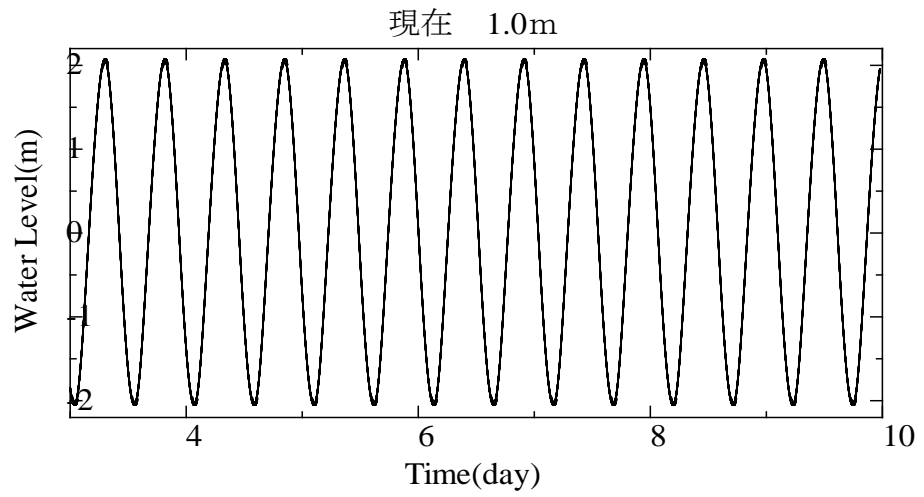


図 2.3-7 潮汐のグラフ(現在, 外海の潮汐振幅 1.0m)

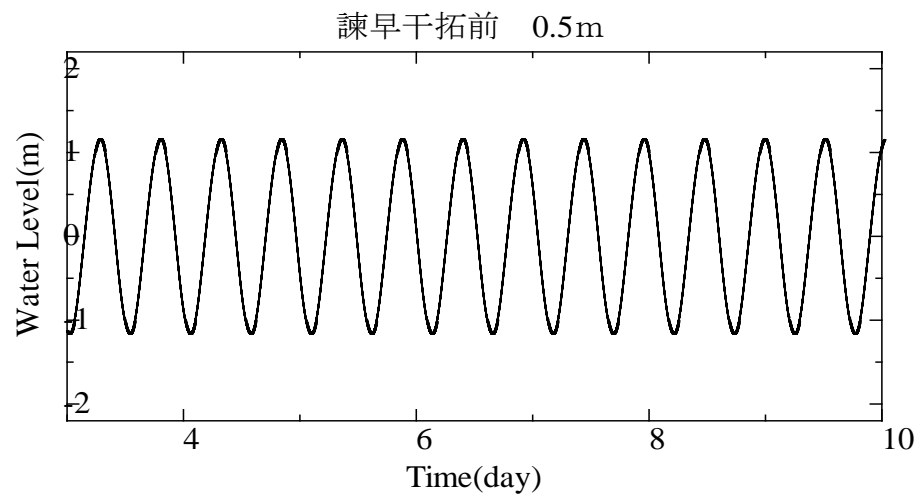


図 2.3-8 潮汐のグラフ(諫早干拓前, 外海の潮汐振幅 0.5m)

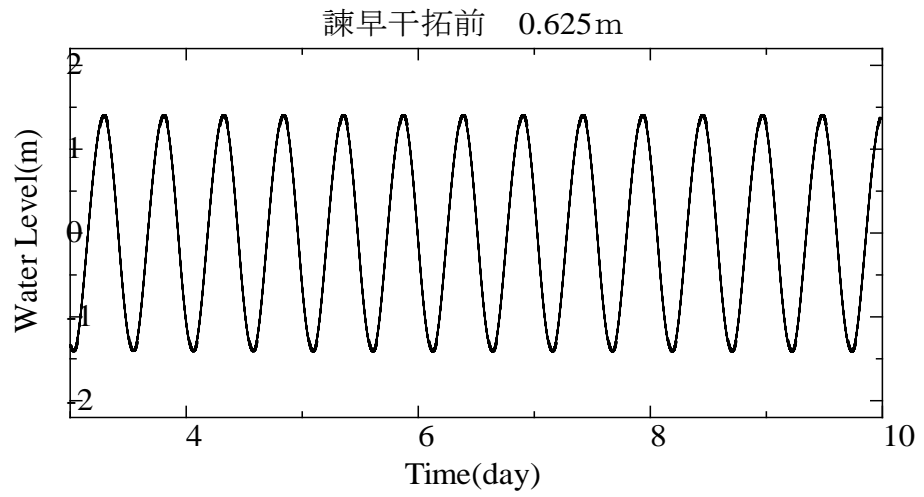


図 2.3-9 潮汐のグラフ(諫早干拓前, 外海の潮汐振幅 0.625m)

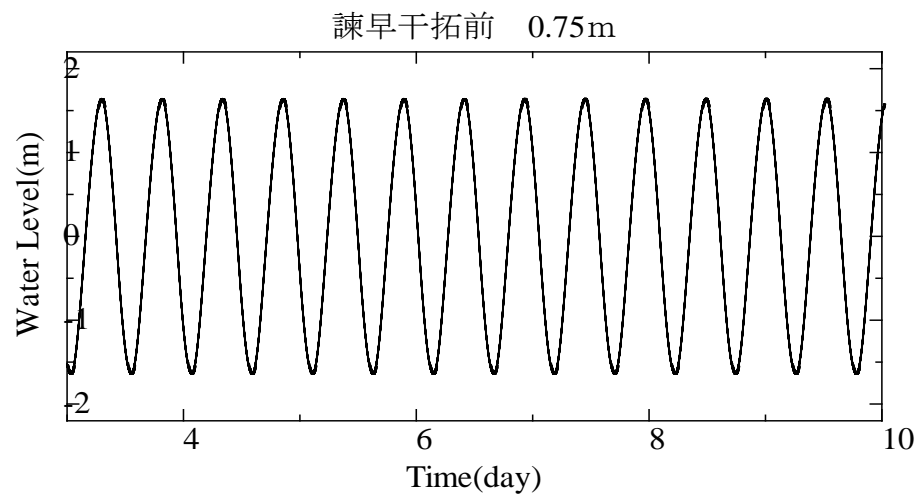


図 2.3-10 潮汐のグラフ(諫早干拓前, 外海の潮汐振幅 0.75m)

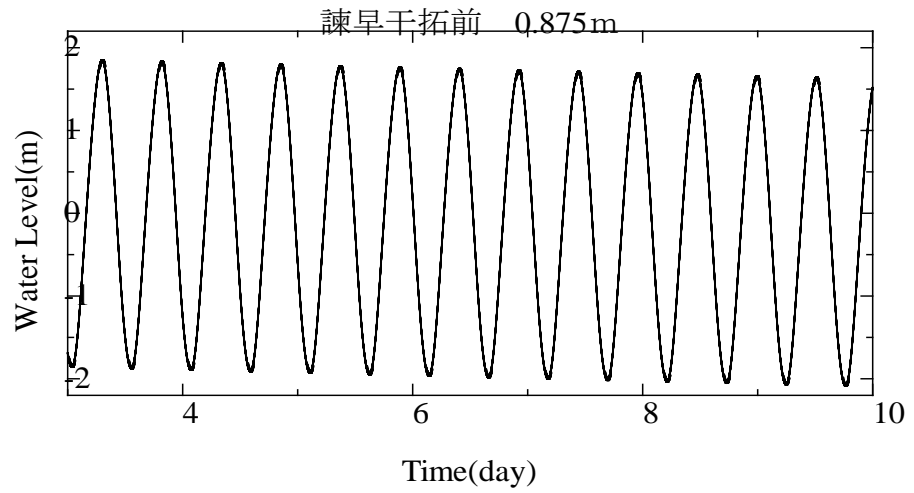


図 2.3-11 潮汐のグラフ(諫早干拓前, 外海の潮汐振幅 0.875m)

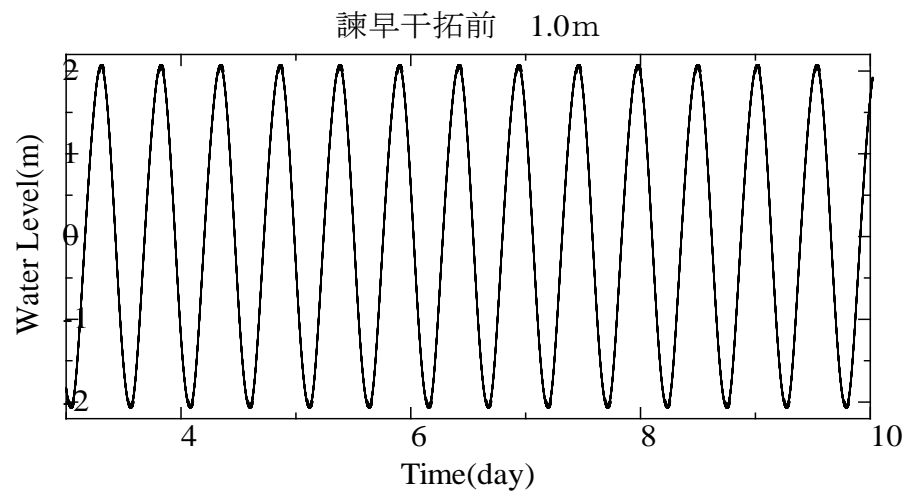


図 2.3-12 潮汐のグラフ(諫早干拓前, 外海の潮汐振幅 1.0m)

2.3.4 考察

諫早湾干拓事業における潮受け堤防締め切りが有明海の潮汐に与えた影響に対して、実測データから考察する。干拓事業が行われた97年を境に、89～96年と98～11年の間において大幅な増幅率の減少が見られる(湾奥の大浦にて)。この結果は、後述のシミュレーション結果との傾向の一致から考えても明らかに潮汐減少と締め切りとの関連を示すもので、宇野木(2007)が指摘した有明海とは無関係な要因によるものではなく、有明海の内部的な要因、具体的には潮受け堤防締め切りによる有明海の固有周期の減少であると考えられる。潮汐に変化が生じると攪拌作用が小さくなるなど自然浄化機能が低下し、赤潮発生等環境悪化の一因となるため対策が急がれる。また、外海の振幅の大小によって有明海内に与える影響は異なることも示された。外海の振幅が大きいときは、湾奥では影響が小さいが、湾口では大きな影響として現れ、さらに締め切りにより増幅率が増加していた。逆に、振幅が小さいときは湾奥で影響が大きく、締め切りにより増幅率が減少したが、湾口では影響が小さいという結果が得られ、田井・矢野(2008)が指摘した結果と一致した。このように、湾口に存在する口之津においても有明海の内部変化の影響を受けている。この結果から、口之津に対して大浦の増幅率が減少したとする結果(宇野木(2003)など)は、起潮力に対する応答の変化を正しく検討したとはいえない。やはり、今回行った解析のように締め切りの影響を受けない外海を基準とした議論がなされるべきであろう。

数値シミュレーションの結果に関して考察する。各観測点においてそれぞれ異なる増幅率の変化を示したことや、外海の振幅の大小によって現れる影響の違いなど実測データと同様の挙動を示していたことから、シミュレーションの結果は実海域の状況をよく表していると考えられる。今回の数値シミュレーションには、諫早湾の干拓事業における潮受け堤防の締め切りの影響のみを考慮している。このシミュレーションと実測データの傾向がほぼ一致したことから、有明海の潮汐の減少の原因が潮受け堤防の締め切りにある可能性が高いことが示された。

2.4 有明海内のノリ網が潮汐に与える影響

有明海内に広範囲に存在するノリ網の潮汐に与える影響を考察する。有明海には、図 2.4-1 に示すようにノリの養殖網が幅広く分布している。ノリの養殖網は、10月～3月ごろまで設置され、その後時期が終わると撤去される。すなわち、潮汐に季節的な変動を与える要因として考えることができる。諫早干拓における潮受け堤防の締め切りの潮汐に与える影響を調査した研究は数多く存在するが、塚本・柳(2002)は干拓事業による地形変化の影響は10～20%であるとし、安田(2006)は潮汐の増幅率を考える基準を外海にすると湾内の増幅率は潮受け堤防締め切り前後で変化していないことを示すなど、研究者間で統一した見解を得られていない。その大きな要因として干拓事業以外の要因が存在し、その影響を除去できていないことが考えられる。ここでは、POMを用いた3次元潮流シミュレーションにより、潮汐に対して季節的な変動を与えると考えられるノリ網の存在を考慮したデータを算出し、その影響を検討することにより干拓事業以外の要因を除去し、潮受け堤防締め切りの正確な見解を得るための足がかりとすることを目的とする。なお、ノリ網の潮汐に対する影響として考えられる摩擦に対して、千葉・武本(2002)はノリ網の存在する地点と存在しない地点ではおよそ摩擦が2倍になることを示しており、今回の解析ではこの結果に基づき計算を行っている。

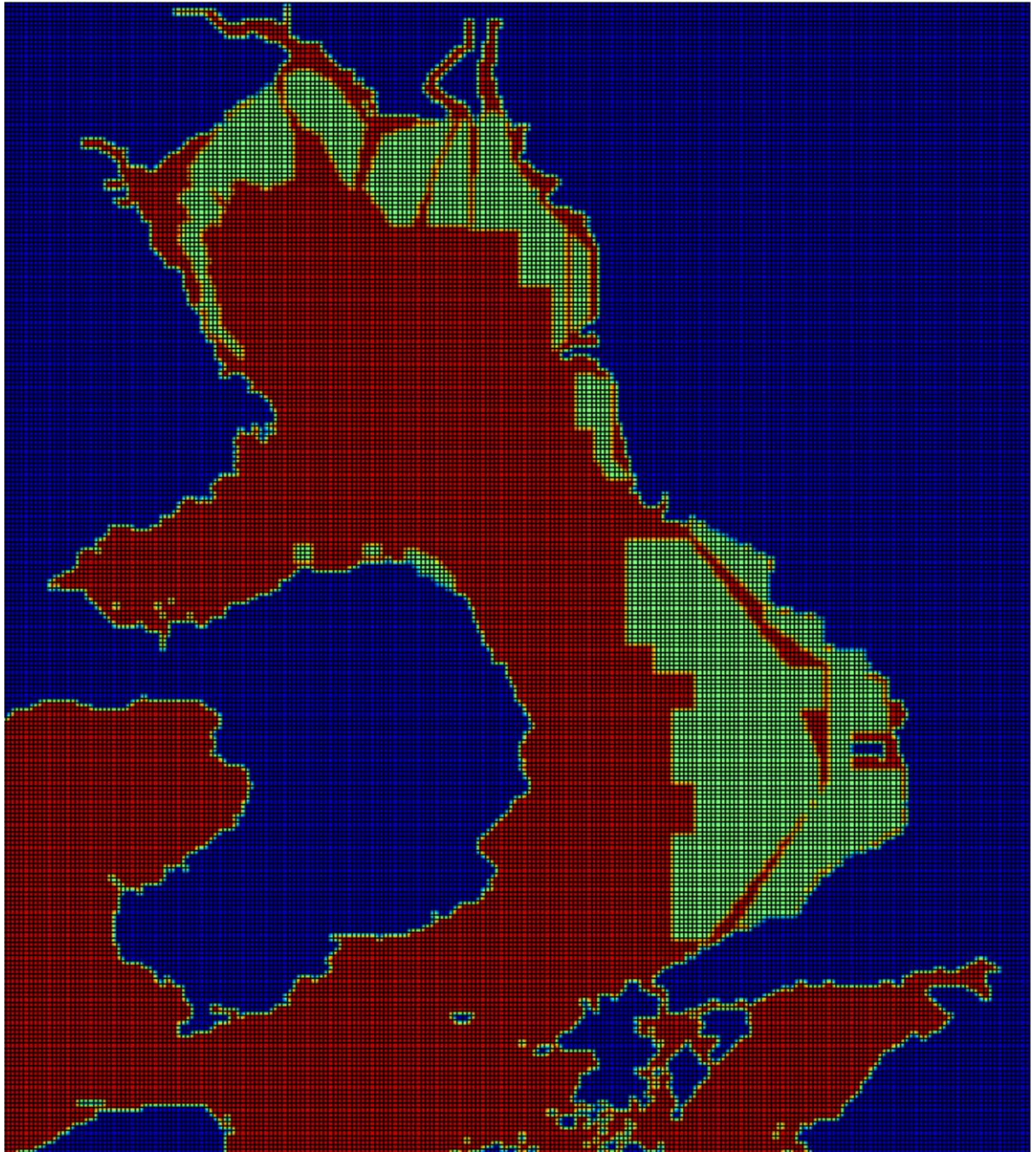


図 2.4-1 有明海内ノリ網分布地図(赤色領域：海域，青色領域：陸地，緑色領域：ノリ網分布範囲)

2.4.1 解析方法

前述の POM を用いた 3 次元潮流シミュレーションによる数値解析を行った。その際、ノリ網の影響の有無を明らかにするため図 2.4-1 に示すノリ網の分布する領域の摩擦を、千葉・武本(2002)に基づき 2 倍として計算した。今回の解析で得られた結果と、2.3.3 の結果とを比較・検討することで有明海におけるノリ網の存在による潮汐に対する影響を明らかにする。

2.4.2 結果

本解析で得られた結果を図 2.4-2 に示す。大浦・三角・口之津のそれぞれの点において、ノリ網を考慮していないデータと比較して増幅率は減少していることが見て取れる。すなわち、有明海にノリ網が存在している時期(主に冬季)は、存在していない時期(おもに夏季)と比較して潮汐が減少していることが明らかとなった。特に湾奥に位置する大浦においてはその影響が最も大きく現れている。反対に、湾口に位置する口之津ではその影響は大きく現れてはいない。数値として表すと、大浦では 0.47cm~0.84cm の振幅の減少(増幅率は平均 0.4% ほどの減少)、三角では 0.16cm~0.31cm の振幅の減少(増幅率は平均 0.2% の減少)、口之津では 0.16~0.25cm の振幅の減少(増幅率は平均 0.2% の減少)がそれぞれ確認された。ノリ網は、10 月~3 月ごろまで設置され、その後時期が終わると撤去される。冬季と夏季で潮汐に働く摩擦が異なることで季節的変動を与え、また地域的な影響のギャップも存在することが明らかとなった。

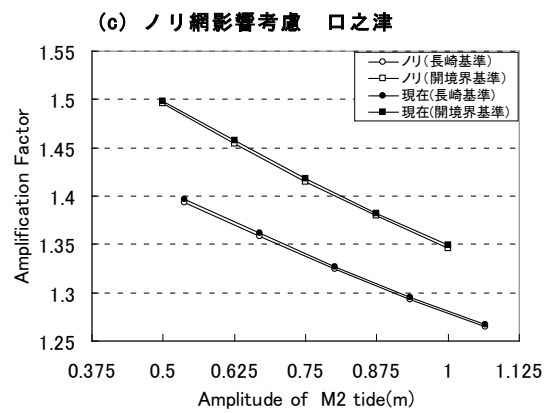
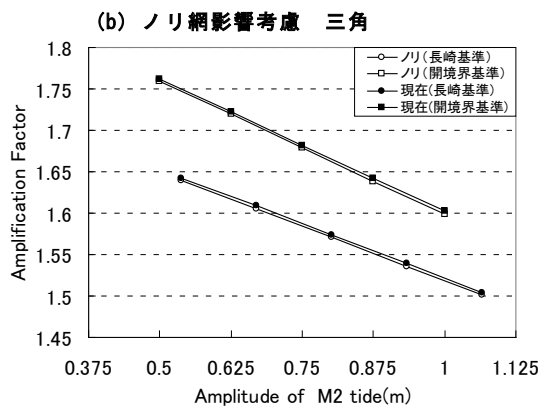
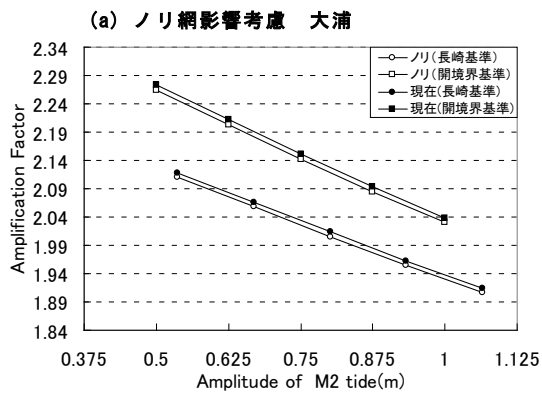


図 2.4-2 ノリ網の存在を考慮した増幅率のデータと考慮しないデータとの比較

ノリ網考慮 0.5m

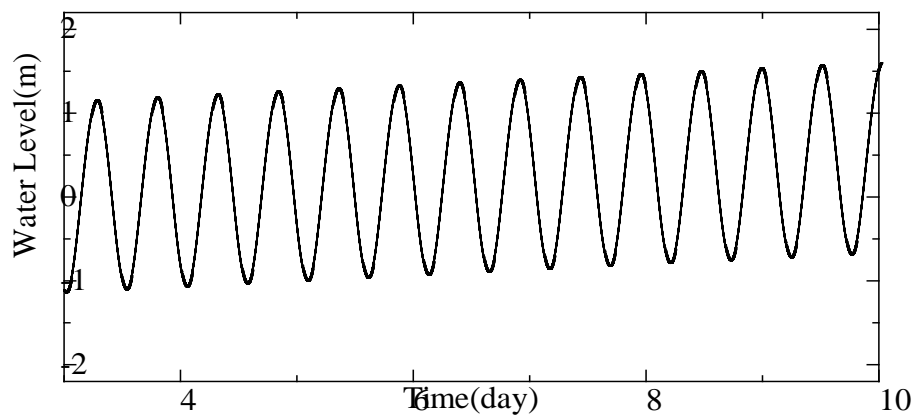


図 2.4-3 潮汐のグラフ(ノリ網影響考慮, 外海の潮汐振幅 0.5m)

ノリ網考慮 0.625m

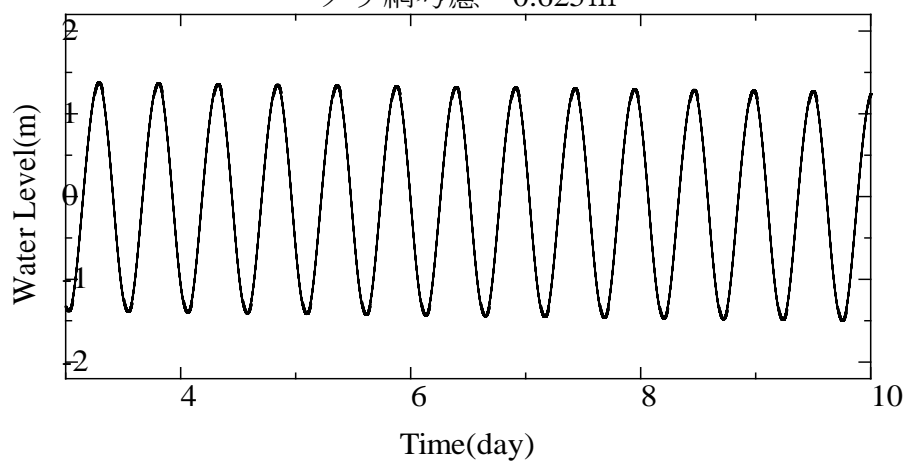


図 2.4-4 潮汐のグラフ(ノリ網影響考慮, 外海の潮汐振幅 0.625m)

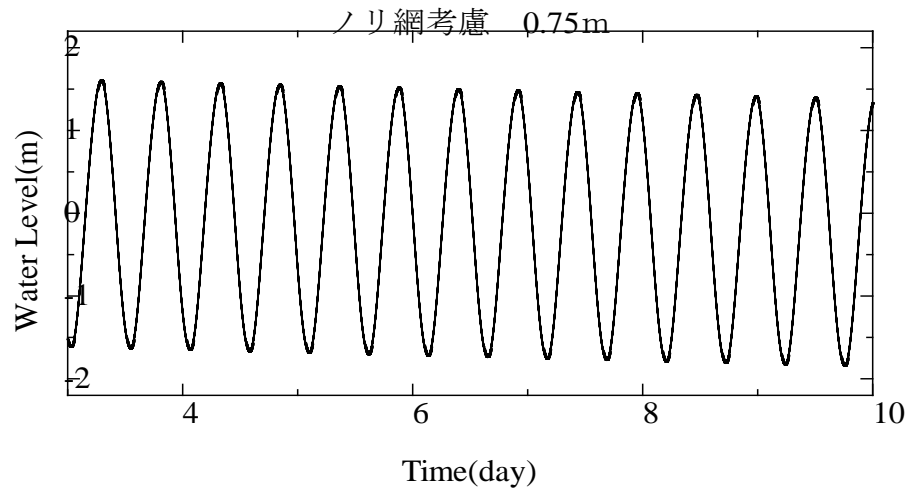


図 2.4-5 潮汐のグラフ(ノリ網影響考慮, 外海の潮汐振幅 0.75m)

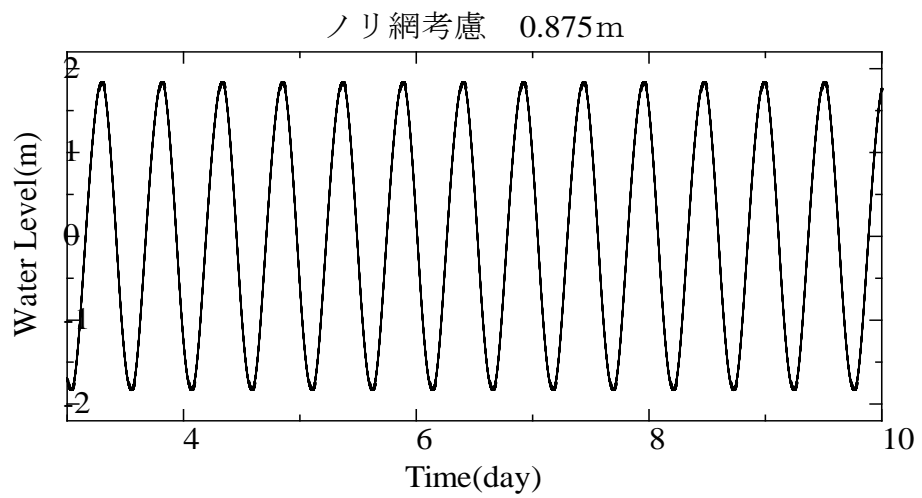


図 2.4-6 潮汐のグラフ(ノリ網影響考慮, 外海の潮汐振幅 0.875m)

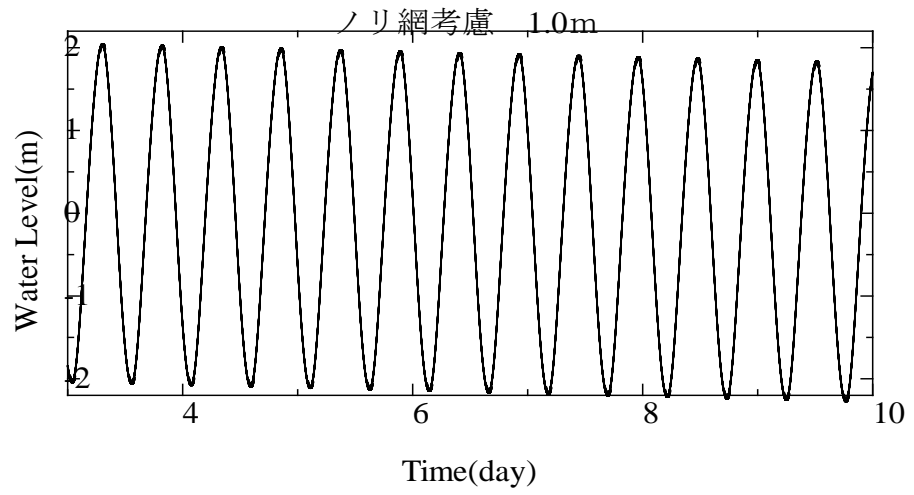


図 2.4-7 潮汐のグラフ(ノリ網影響考慮, 外海の潮汐振幅 1.0m)

2.4.3 考察

今回の解析結果から、諫早干拓における潮受け堤防の締め切り事業が有明海の潮汐増幅率に与えた影響(2.3.3 参照)と比較しても、ノリ網の潮汐に与える影響は無視できるほど小さいものではないことが明らかとなった。

【ノリ網の影響】 振幅の減少について…大浦：0.47cm～0.84cm， 三角：0.16cm～0.31cm，
口之津：0.16cm～0.25cm

【締め切りの影響】 振幅の減少について…大浦：0.351cm～1.949cm， 三角：0.129cm～0.54cm
口之津：0.11cm～1.142cm

また、特に湾奥において大きな影響を及ぼし、湾口や湾央における影響の2倍以上の値で潮汐に寄与している。すなわち、ノリ網の潮汐に与える影響は場所的なギャップを伴うものであることが明らかとなった。

有明海に存在するノリ網の潮汐に与える影響は、潮受け堤防締め切りによる潮汐の減少を検討したデータ解析において一定の見解が得られていないことの要因として位置づけることができる。言い換えれば、諫早湾干拓事業後に有明海に生じた潮汐変動の問題を議論する際には、今回影響が大きいことが示されたノリ網をはじめとした諸々の要因を除去する必要があるということである。

特にノリ網に関しては、夏季の間は存在せず、冬季にのみ影響を及ぼす季節的な変動要因であるので、場所的な影響の違いに加えて年間でも誤差が生じてくる点も含めて考察する必要がある。

2.5 おわりに

今回の研究で明らかになったことを以下に示す.

- ①有明海では, 諫早湾干拓事業による潮受け堤防の締め切りが行われた 1997 年を境に潮汐に変動が見られる. 締め切りの影響のみを考慮した数値シミュレーションで同様の結果が得られたことから, この潮汐の変動傾向は潮受け堤防締め切りの影響によるものであると考えられる.
- ②潮受け堤防の締め切りが外海を基準とした有明海の M_2 潮振幅に与えた影響は, 起潮力の大きさに依存し, 時空間的に異なることが明らかとなった. すなわち, 起潮力が大きいときは, 湾奥(大浦)で影響が小さいが, 湾口(口之津)では影響が大きく, 締め切りによって増幅率が増加している. 逆に起潮力が小さいときは, 湾奥(大浦)で影響が大きく, 締め切りによって減少したが, 湾口(口之津)では影響が小さいことが明らかとなった. また, 湾央(三角)では両者の中間的な特性を有していることが明らかとなった.
- ③湾口の口之津においても増幅率の増加が見られることから, 締め切りの影響を受けていると考えられ, 潮受け堤防締め切りによる湾内の潮汐応答特性の変化を検討する際に口之津を基準とすると大浦での潮汐増幅率の減少を過大に見積もる可能性があることが示された.
- ④有明海に広範囲に存在するノリの養殖網は, その存在する期間中に諫早湾潮受け堤防の締め切りの影響と比較しても無視できないほどの影響を潮汐に与える. すなわち, 潮汐に季節的な変動を与える存在として考えられ, 締め切りが潮汐に与えた影響に関して統一した見解が得られていないことの大きな要因である可能性が示された.

以上, 本章では潮受け堤防締め切りによる有明海の潮汐への影響について議論してきたが, 有明海の環境変化への影響は潮汐よりもむしろ潮流の方が重要であるとする研究も多い(武岡, 2003 ; 宇野木, 2003 ; 安田, 2007). しかし, 潮受け堤防締め切り以前の潮流の観測データは非常に少なく, 数値シミュレーションを用いたとしても観測地を用いた精度の確認が困難な状況となっている. その際に, 本章で得られた潮汐変動に関する知見が一助になることを期待している.

第3章 簡易モデルを用いた閉鎖性内湾の振動特性の検討

3.1 はじめに

ここまで、諫早湾干拓事業に伴う潮受け堤防の締め切り以降有明海に生じた潮汐の減少について述べてきた。前節においては、実際に得られた潮位データを取りまとめた実測データと、有明海の地形データ等から算出されたシミュレーションデータを用いて、潮汐の減少の実態の把握とその原因の解明を試みた。それにより、

1. 諫早湾干拓事業以降見られている潮汐の減少は現在も継続している。潮受け堤防締め切りとの関連性は高いと考えられる。
2. 潮汐減少の傾向は、外海から入射する潮汐の振幅の大小によって異なる。
3. 潮汐減少の傾向は各観測点によっても異なる。特に湾口の口之津では他と大きな相違点がある。

等の結果を得た。本章においては、上記の結果の潮汐減少の傾向が、外海から入射する潮汐の振幅や各観測点によって異なる(2.および3.)点に着目する。このように締め切りの影響に地域的なギャップが生じることについて宇野木(2005)は「内部の地形変化の影響が場所的に逆のセンスで現れることは普通には起こりがたい」とし、データ解析や数値計算の問題点を指摘している。今回の解析は、以上のような議論を解決する糸口となることを期待して行っている。それにあたって、今回の研究では極力簡略化した閉鎖性内湾の簡易モデルを作成し、それについて数値解析を行った(モデルについての説明は3.2に示すとおりである)。数値解析については、前章と同様POMを用いた3次元潮流シミュレーションにて行っている。

3.2 簡易モデルについて

まず、本節で用いる閉鎖性内湾の簡易モデルについて説明を加える。
水深 h が一様で長さ l , 幅 b の矩形湾を考える。湾の一角に原点を置き、長さ方向に x 軸、幅方向に y 軸をとる。湾はあまり大きくないとしてコリオリの力は考慮しない。

ナビエ・ストークスの方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - f v = F_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

(y, z 成分は省略)

において、重力の場で流れが弱く、粘性を無視しかつ圧力 $p = p_0 + \rho g(\eta - z)$ を代入すれば、微小振幅 ($\eta \ll h$) の長波に対して

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x}, \quad \frac{\partial v}{\partial t} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} \dots\dots\dots \textcircled{1}, \textcircled{1}'$$

ここで、 $\eta(x, t)$: 水位

なる式が得られる。

また、同様の仮定をすれば、長波の連続方程式は

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -h \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \dots\dots\dots \textcircled{2}$$

となる。

②式を t で微分し、①, ①'式を代入すると、

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} = C^2 \left(\frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} \right), \quad C = \sqrt{gh} \dots\dots\dots \textcircled{3}$$

境界条件は

$$(u)_{x=0} = 0, \quad (u)_{x=l} = 0, \quad (v)_{y=0} = 0, \quad (v)_{y=b} = 0 \dots\dots\dots \textcircled{4}, \textcircled{4}', \textcircled{4}'', \textcircled{4}'''$$

①, ①'式, ④, ④'''の境界条件を満足する解として

$$\eta = A \cos kx \cos k'y \cos \sigma t \dots\dots\dots \textcircled{5}$$

$$u = \frac{CA}{h} \sin kx \cos k'y \sin \sigma t, \quad v = \frac{CA}{h} \cos kx \sin k'y \sin \sigma t \dots\dots\dots \textcircled{6}, \textcircled{6}'$$

これらが④', ④'''式を満たすためには、

$$k = m\pi/l, \quad k' = n\pi/b \quad (m, n = 1, 2, \dots)$$

が必要である。⑤式を③式に代入すると、

$$\sigma^2 = C^2(k^2 + k'^2)$$

を得る。

ゆえに、横方向の振動も考慮した矩形湾の周期は

$$T_{m,n} = \frac{2\pi}{\sigma} = \frac{2\pi}{C\sqrt{k^2 + k'^2}} = \frac{2}{\sqrt{gh}} \left\{ \left(\frac{m}{l} \right)^2 + \left(\frac{n}{b} \right)^2 \right\}^{-1/2}$$

で与えられる。

有明海の固有周期は 6.9 で、平均水深は 20m、長さ $l=90\text{km}$ であるため、上式に代入すれば $b=57.2\text{km}$ という結果を得る。

以上のような計算から導かれた有明海をベースにした閉鎖性内湾の簡易地形モデルを図(図 3.2-1～図 3.2-6)に示す。図中の黒の部分は陸地を表している。

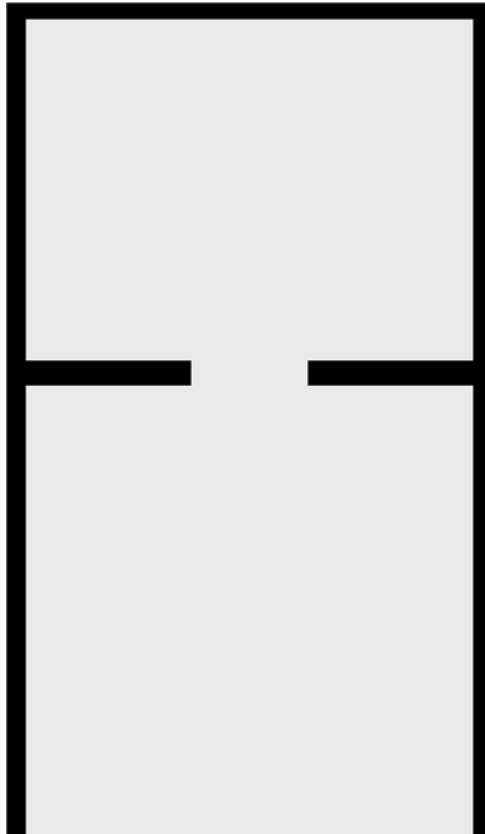


図 3.2-1 有明海仮想モデル(100%) (固有周期 : 6.82, 縮小部 : 100%, 水深 : 湾奥方面に浅くなる)

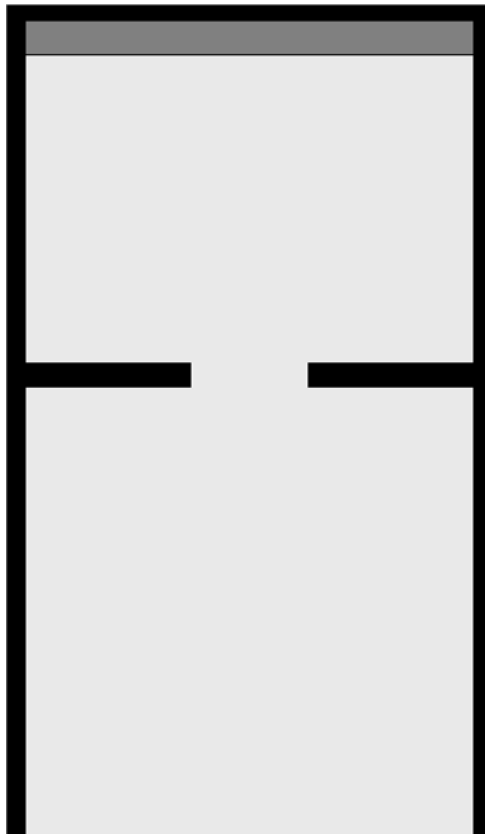


図 3.2-2 有明海仮想モデル(90%) (固有周期 : 6.11, 縮小部 : 100%, 水深 : 湾奥方面に浅くなる)

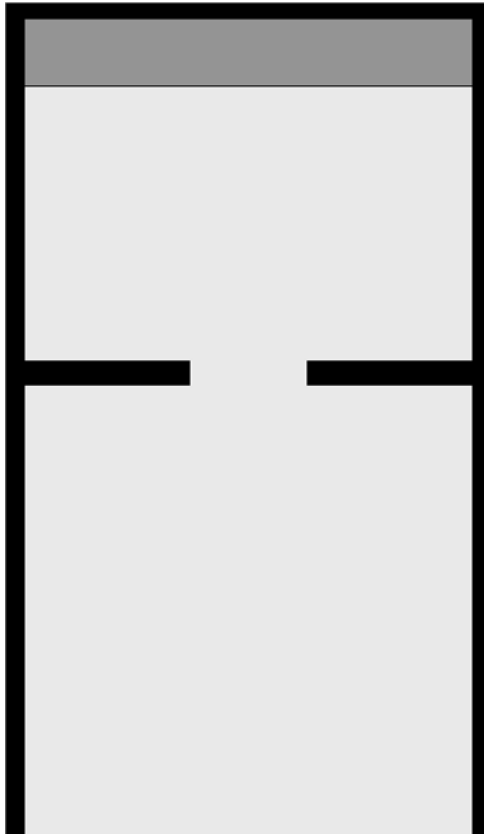


図 3.2-3 有明海仮想モデル(80%) (固有周期 : 5.40, 縮小部 : 100%, 水深 : 湾奥方面に浅くなる)

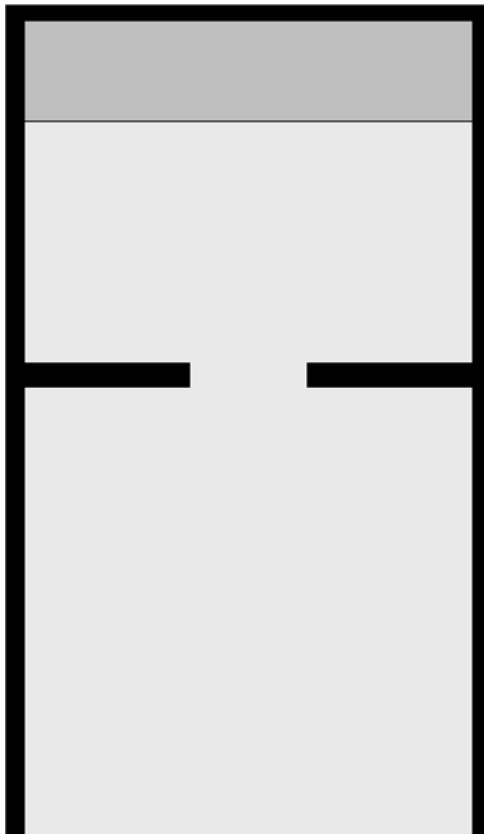


図 3.2-4 有明海仮想モデル(70%) (固有周期 : 4.69, 縮小部 : 100%, 水深 : 湾奥方面に浅くなる)

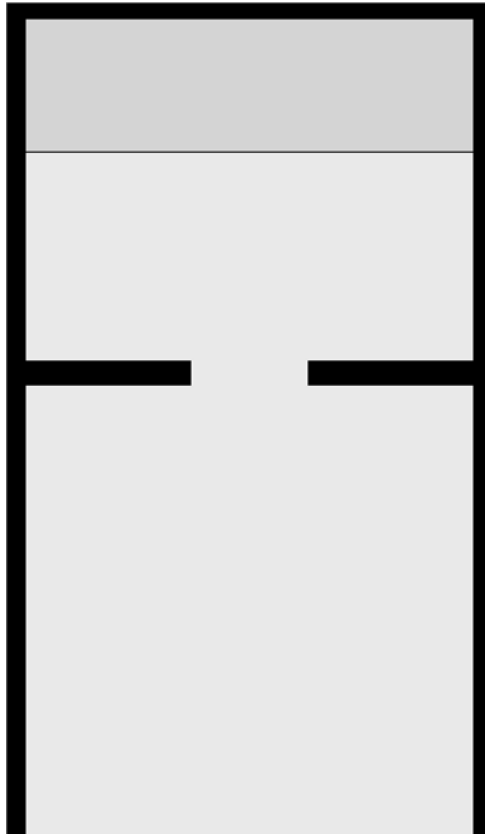


図 3.2-5 有明海仮想モデル(60%) (固有周期 : 3.98, 縮小部 : 100%, 水深 : 湾奥方面に浅くなる)

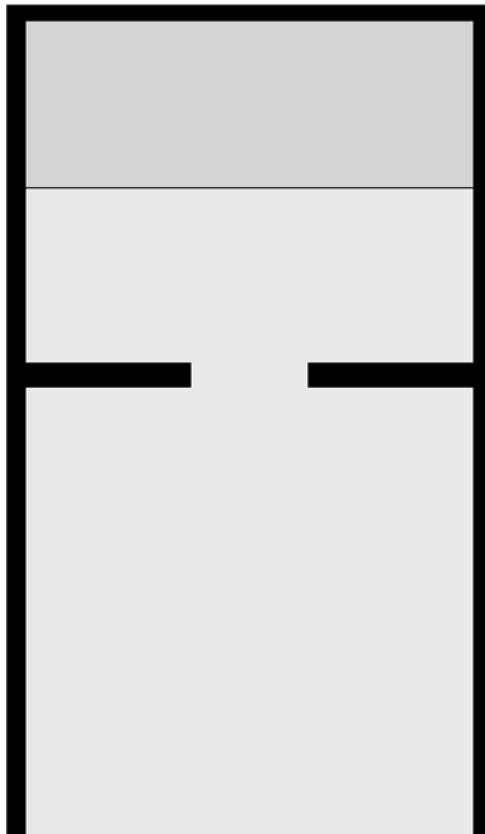


図 3.2-6 有明海仮想モデル(50%) (固有周期 : 3.27, 縮小部 : 100%, 水深 : 湾奥方面に浅くなる)

3.3 解析方法

今回の解析では、3.2節で解説したような閉鎖制内湾の簡易モデルを用いて行う。湾奥の締め切りに伴う面積減少が増幅率に与える影響を考慮するため、内湾の面積を100%、90%、80%、70%、60%、50%と変化させ、外海から振幅が1.0m、0.875m、0.75m、0.625m、0.5mの5パターンの潮汐が流入したとして計算を行った。解析をおこなった地点は、実測データと比較をするため湾奥、湾央、湾口(3点、外海側から①、②、③とする)の計5地点である。湾口について3点としたのは縮小地点とその前後のデータを得るためである。水深に関しては、有明海の平均水深(約20m)と、2.3.2で基準に設定した長崎付近の水深70mをもとに、湾口付近において奥に進むにつれてなるべく自然に浅くなる(以下、漸浅水深と呼ぶ)よう設定した。さらに、閉鎖性内湾の特徴である湾口の縮小地点(以下、縮小部と呼ぶ)を100%、50%、0%と変更したモデル(図3.3-1～図3.3-12)や、水深を一定(20m、70m)にしたモデル、その両方を採用したモデルなどを用意して同様の計算を行い、比較・検討する。

表 3-1 各水深・内湾面積ごとの固有周期

水深	内湾の面積	固有周期
湾奥方面に漸浅	100%	6.82
	90%	6.11
	80%	5.40
	70%	4.69
	60%	3.98
	50%	3.27
一様(20m)	100%	7.14
	90%	6.43
	80%	5.71
	70%	5.00
	60%	4.29
	50%	3.57
一様(70m)	100%	3.82
	90%	3.44
	80%	3.05
	70%	2.67
	60%	2.29
	50%	1.91

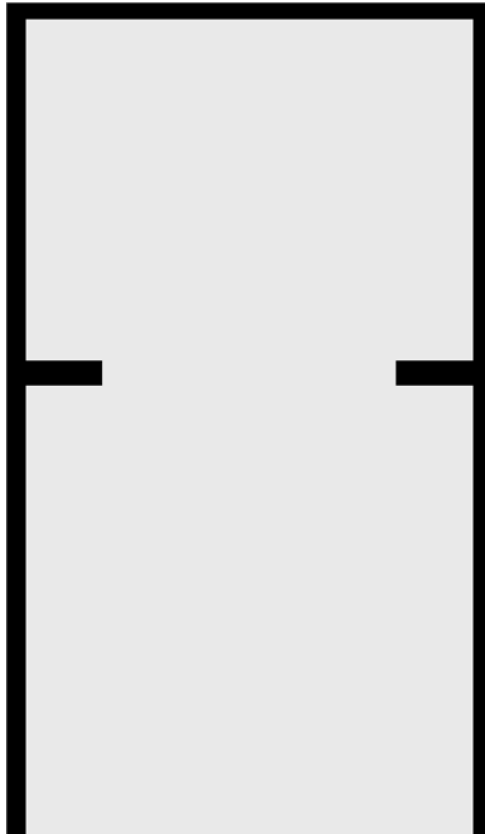


図 3.3-1 有明海仮想モデル(100%) (固有周期 : 7.14, 縮小部 : 50%, 水深 : 一様水深(20m))

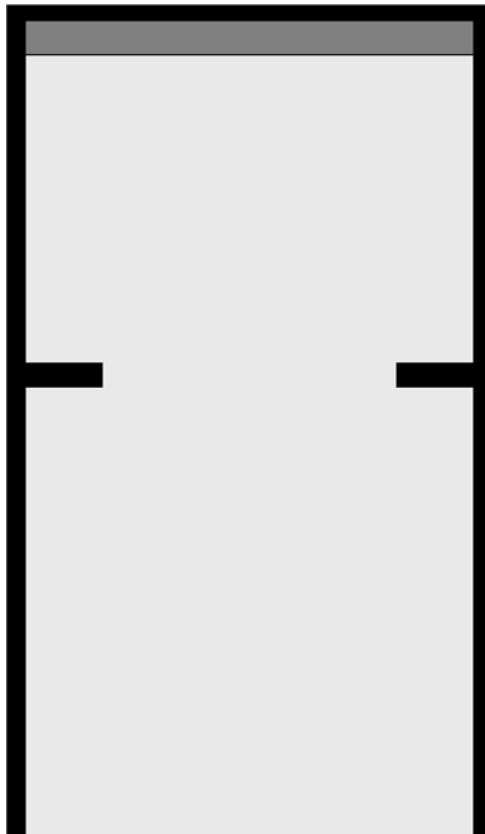


図 3.3-2 有明海仮想モデル(90%) (固有周期 : 6.43, 縮小部 : 50%, 水深 : 一様水深(20m))

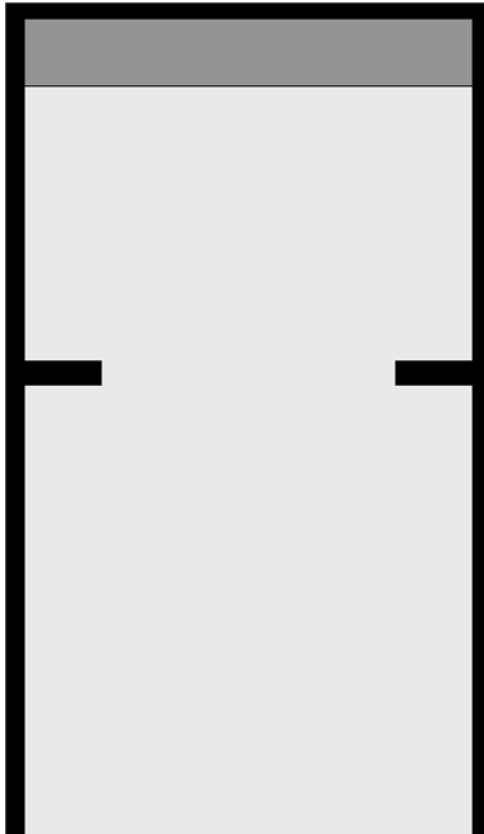


図 3.3-3 有明海仮想モデル(80%) (固有周期 : 5.71, 縮小部 : 50%, 水深 : 一様水深(20m))

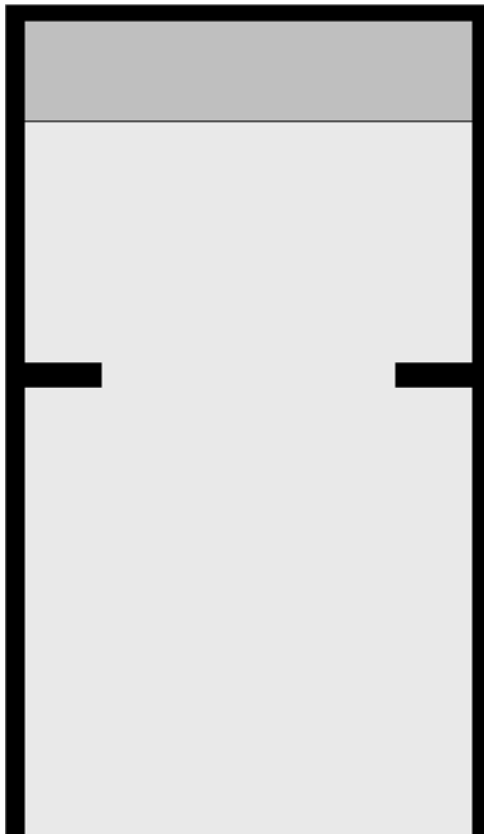


図 3.3-4 有明海仮想モデル(70%) (固有周期 : 5.00, 縮小部 : 50%, 水深 : 一様水深(20m))

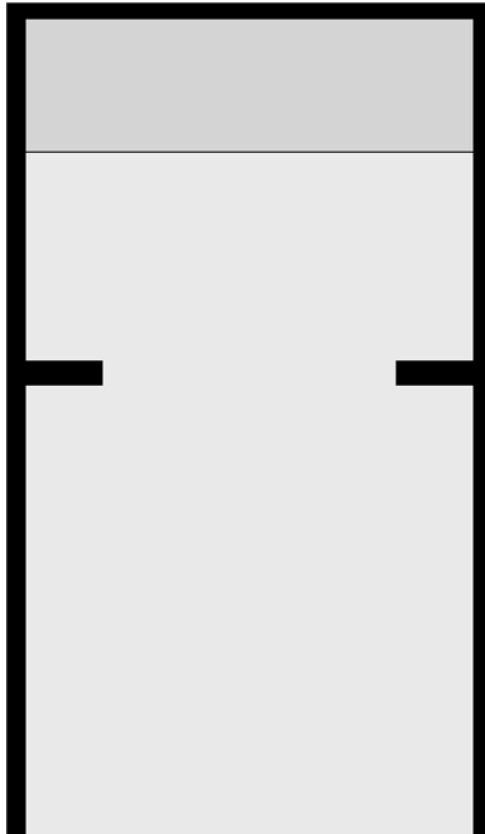


図 3.3-5 有明海仮想モデル(60%) (固有周期 : 4.29, 縮小部 : 50%, 水深 : 一様水深(20m))

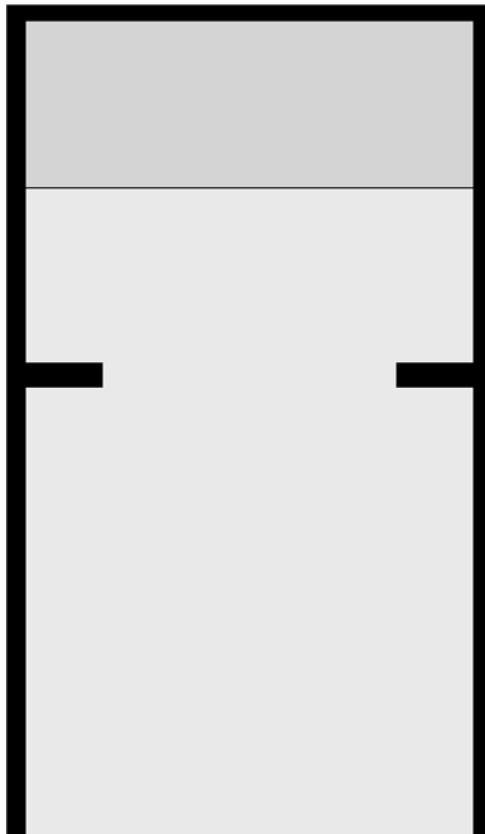


図 3.3-6 有明海仮想モデル(50%) (固有周期 : 3.57, 縮小部 : 50%, 水深 : 一様水深(20m))



図 3.3-7 有明海仮想モデル(100%) (固有周期 : 7.14, 縮小部 : 0%, 水深 : 一様水深(20m))



図 3.3-8 有明海仮想モデル(90%) (固有周期 : 6.43, 縮小部 : 0%, 水深 : 一様水深(20m))



図 3.3-9 有明海仮想モデル(80%) (固有周期 : 5.71, 縮小部 : 0%, 水深 : 一様水深(20m))



図 3.3-10 有明海仮想モデル(70%) (固有周期 : 5.00, 縮小部 : 0%, 水深 : 一様水深(20m))



図 3.3-11 有明海仮想モデル(60%) (固有周期 : 4.29, 縮小部 : 0%, 水深 : 一様水深(20m))



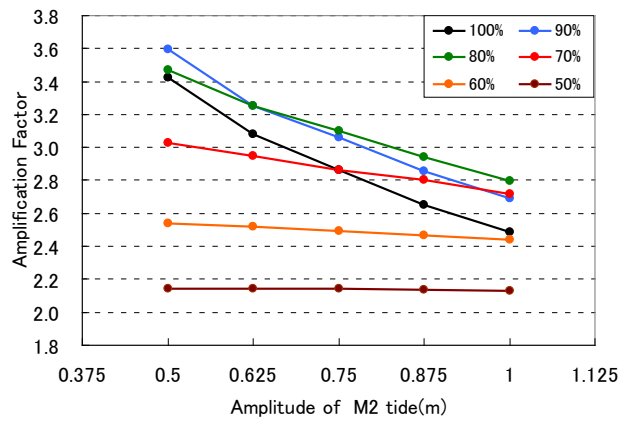
図 3.3-12 有明海仮想モデル(50%) (固有周期 : 3.57, 縮小部 : 0%, 水深 : 一様水深(20m))

3.4 結果

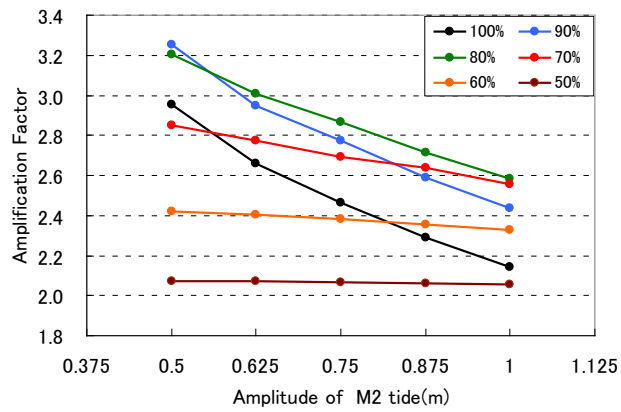
簡易地形モデルを用いた数値解析の結果を図 3.4-1 に示す。それぞれのグラフを見てみると、面積が 100%の状態から 90%、80%と減少が進むにつれて増幅率が増加していることが分かる。しかし、そこからさらに面積減少が進行すると次第に増幅率は落ちていく傾向があることが見て取れる。この傾向は湾の奥の点ほど、早い段階で顕著に見られた。また、面積減少に伴い回帰直線の傾きにも変化が見られることが分かった。湾の面積が広いほど回帰直線の傾きは大きく、湾奥の締め切りが進むに従って傾きが小さくなりなだらかな直線を描く。この傾向は、どの点においても一様に見られた。

次に、水深を変更したモデルの結果について述べる。外海・内湾ともに一様に 20m の水深を与えたモデルの結果を図 3.4-2 に示す。湾口①以外は概ね増幅率が 1.0 を下回る状態となり、増幅はしないという結果を得た。同じ一様の水深で、外海・内湾とも 70m に設定しなおしたモデルの結果について図 3.4-3 に示す。このモデルでは、図 3.4-1 と同様に、100%～80%まで増幅率は増加傾向を示し、さらに湾奥の面積減少が進むと下降傾向に転じる。湾奥地点では面積減少後増幅率が減少し、起潮力が小さいときに影響がその大きく、起潮力が大きいときはその影響が小さく表れている。また、湾口では面積減少後増幅率は増加し、起潮力が小さいときにはその影響は小さいが、大きいときは影響が大きい。以上は実測のデータとよく一致する点である。回帰直線の傾きが全域で減少する点も共通していた。

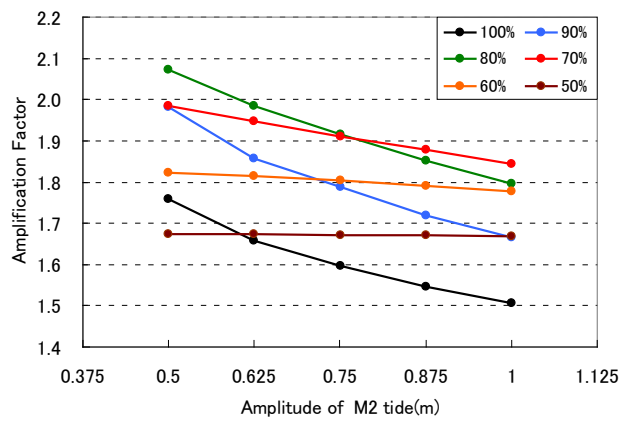
以上のモデルは閉鎖性内湾という仮定のもとに製作したため、湾口付近で十分に縮小するように設定した。ここからはその影響を段階的に除去したモデルの結果について述べる。まず、図 3.4-4 に水深が 20m で一様、縮小部を 50%とした解析の結果を示す。おおよその地点で増幅率が 1.0 を下回り、図 3.4-2 と同様に増幅しないという結果となった。さらに、水深が 20m で一定のまま縮小部の影響を完全に除去したモデルの結果が図 3.4-5 である。このモデルにおいてもおおよその地点で増幅率が 1.0 を下回ったことから、増幅は起きないという結果を得た。次に、水深が湾奥方向に浅くなるように設定したモデルの結果について述べる。縮小部の影響を 50%とした図 3.4-6、0%とした図 3.4-7 のどちらのグラフにおいても、内湾の面積が 100%から 90%と遷移する段階で実測データと一致する点が見られた。



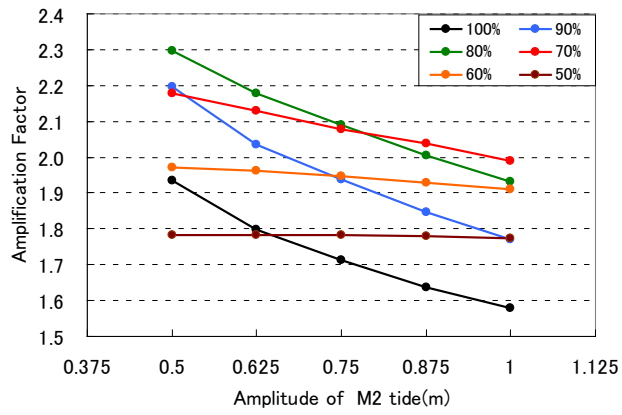
(a) 簡易地形モデル 縮小部100% 湾奥



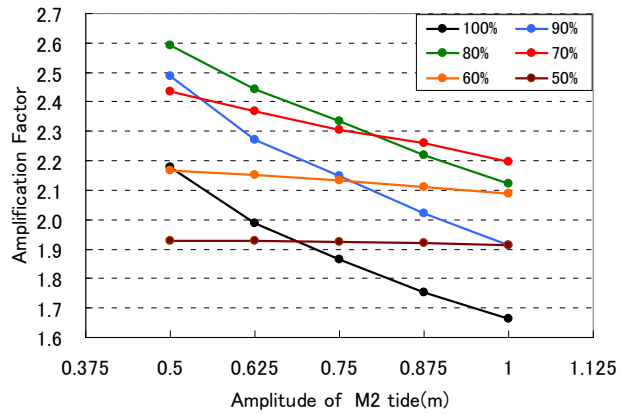
(b) 簡易地形モデル 縮小部100% 湾央



(c) 簡易地形モデル 縮小部100% 湾口 ①

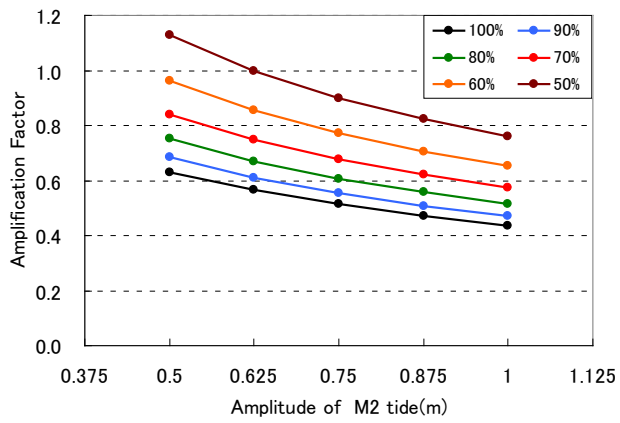


(d) 簡易地形モデル 縮小部100% 湾口 ②

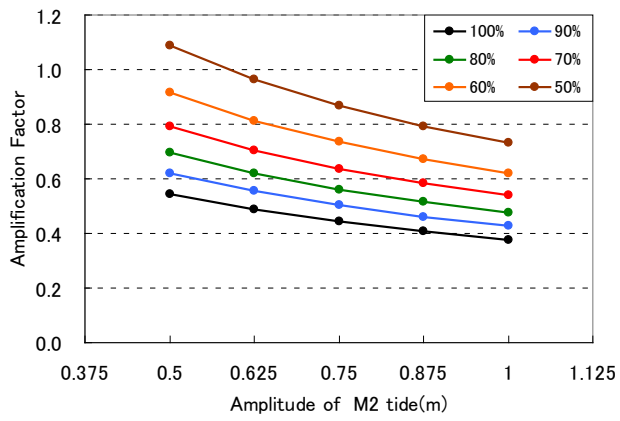


(e) 簡易地形モデル 縮小部100% 湾口 ③

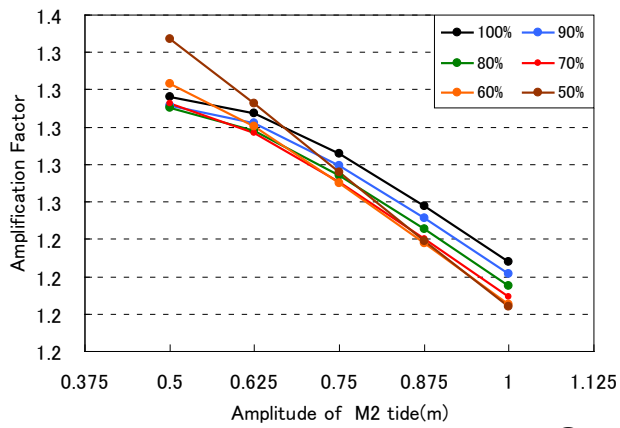
図 3.4-1 簡易地形モデル(水深漸浅, 縮小部 100%)解析結果



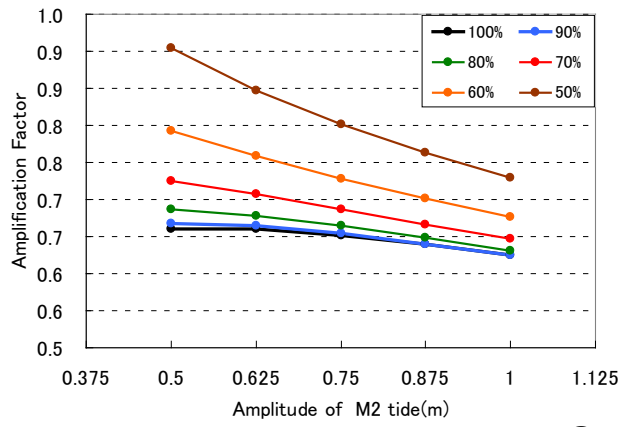
(a) 水深一様(20m) 縮小部100% 湾奥



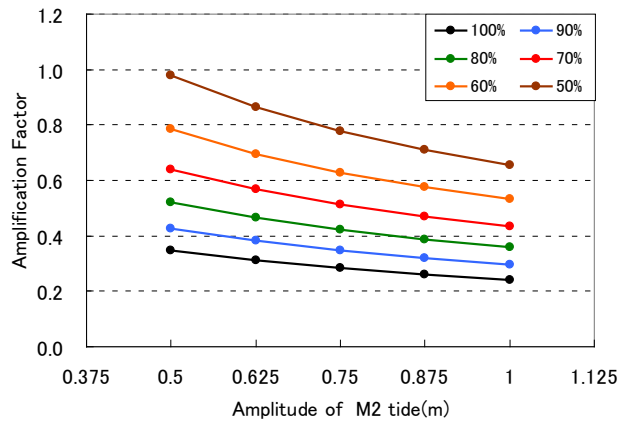
(b) 水深一様(20m) 縮小部100% 湾央



(c) 水深一様(20m) 縮小部100% 湾口 ①

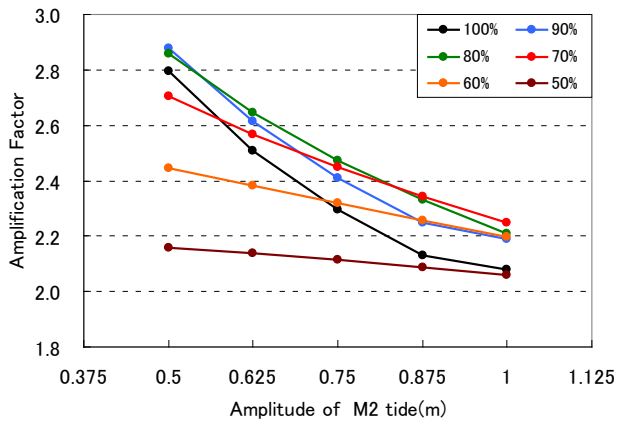


(d) 水深一様(20m) 縮小部100% 湾口 ②

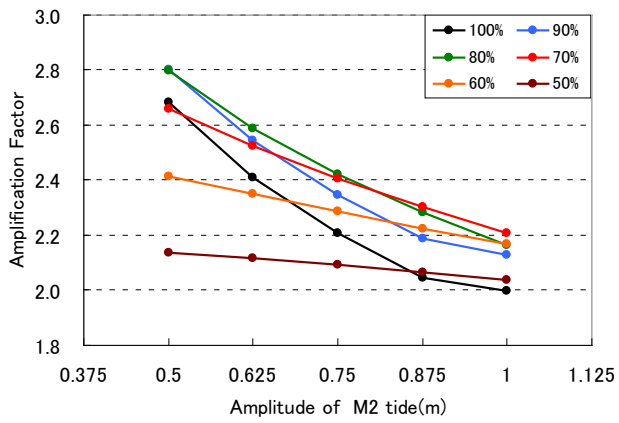


(e) 水深一様(20m) 縮小部100% 湾口 ③

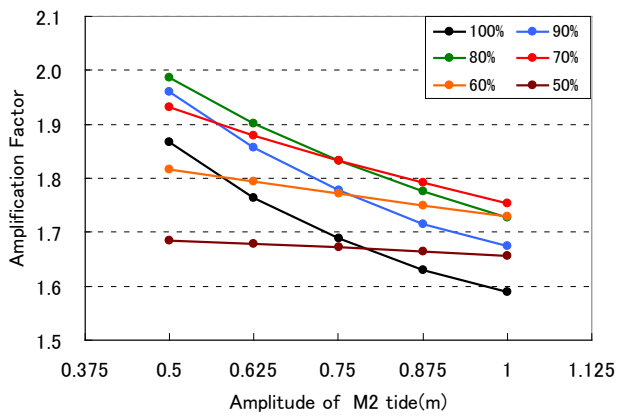
図 3.4-2 簡易地形モデル(水深一様(20m), 縮小部 100%)解析結果



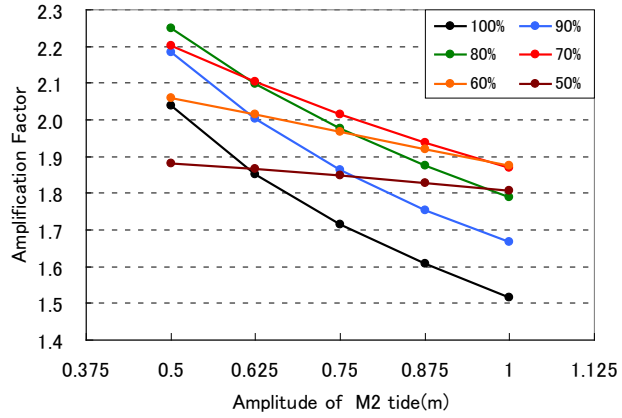
(a) 水深一樣(70m) 縮小部100% 湾奥



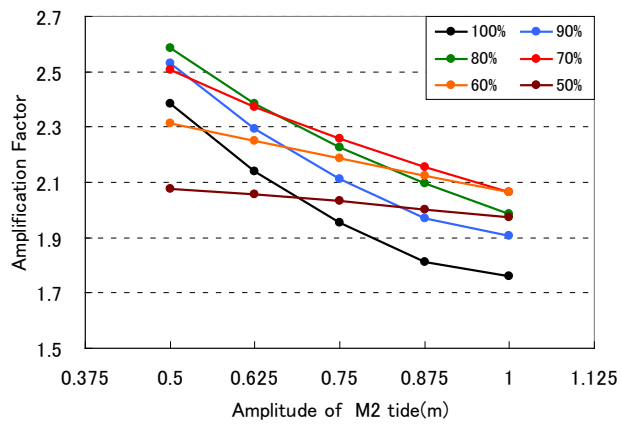
(b) 水深一樣(70m) 縮小部100% 湾央



(c) 水深一樣(70m) 縮小部100% 湾口 ①

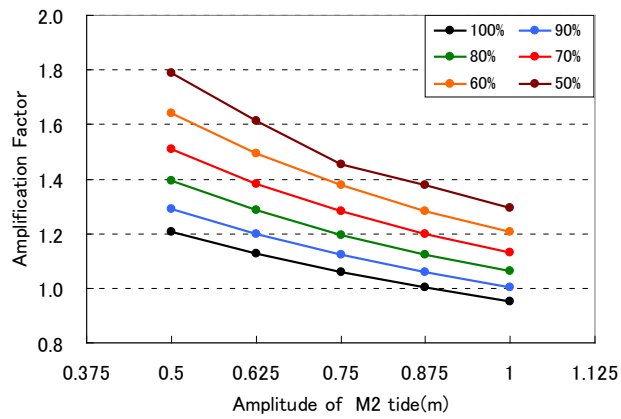


(d) 水深一様(70m) 縮小部100% 湾口 ②

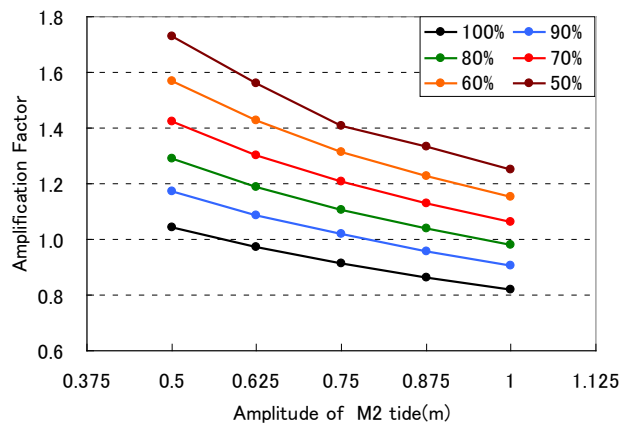


(e) 水深一様(70m) 縮小部100% 湾口 ③

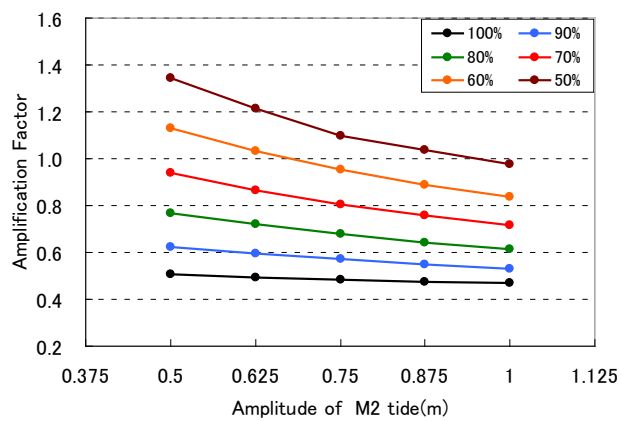
図 3.4-3 簡易地形モデル(水深一様(70m), 縮小部 100%)解析結果



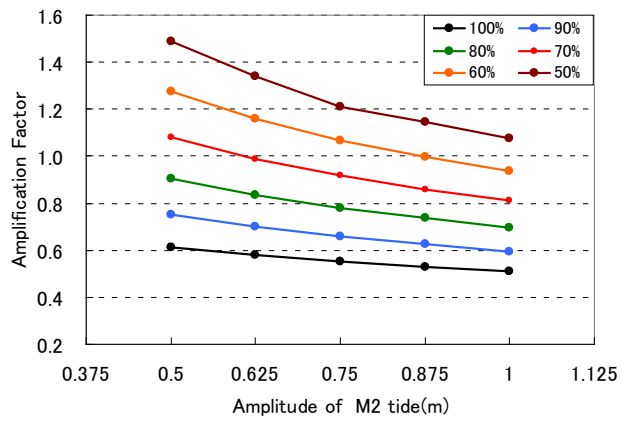
(a) 水深一樣(20m) 縮小部50% 灣奥



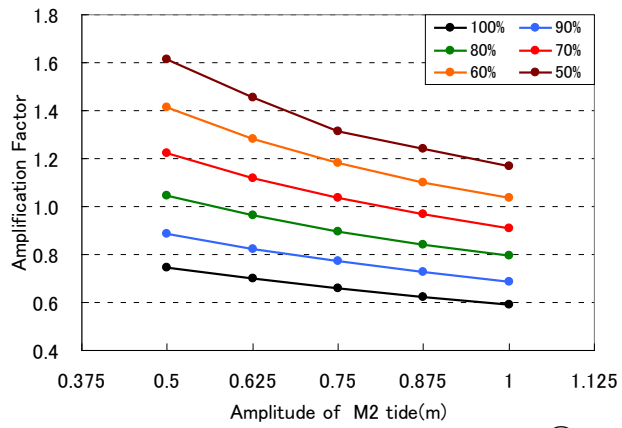
(b) 水深一樣(20m) 縮小部50% 湾央



(c) 水深一樣(20m) 縮小部50% 湾口 ①

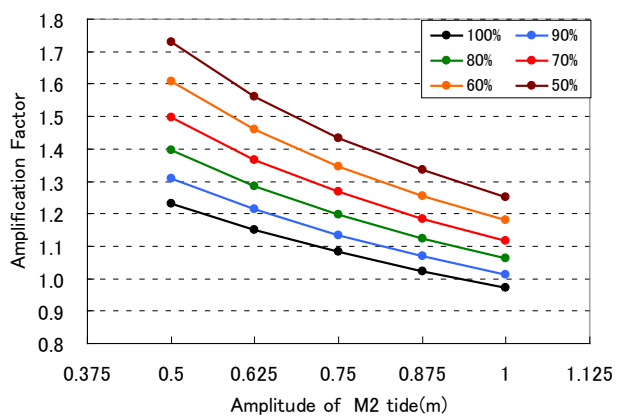


(d) 水深一様(20m) 縮小部50% 湾口 ②

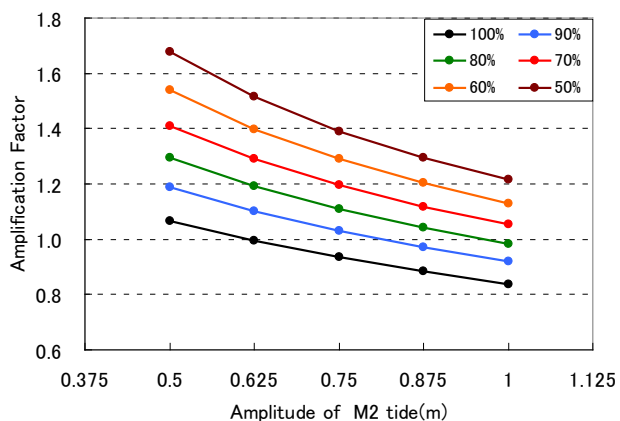


(e) 水深一様(20m) 縮小部50% 湾口 ③

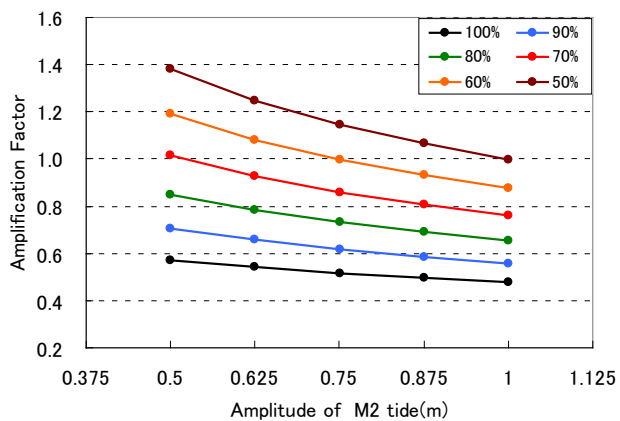
図 3.4-4 簡易地形モデル(水深一様(20m), 縮小部 50%)解析結果



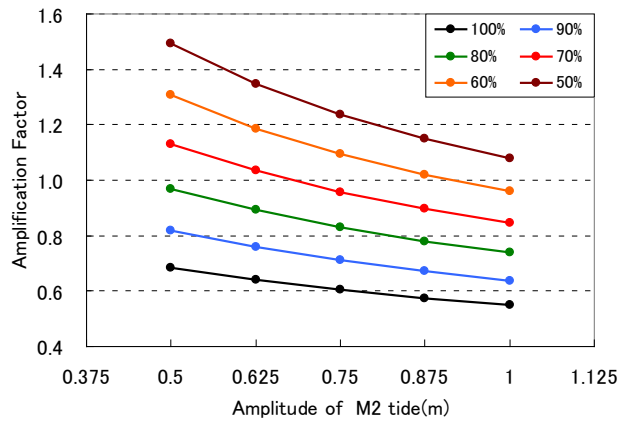
(a) 水深一樣(20m) 縮小部0% 灣奥



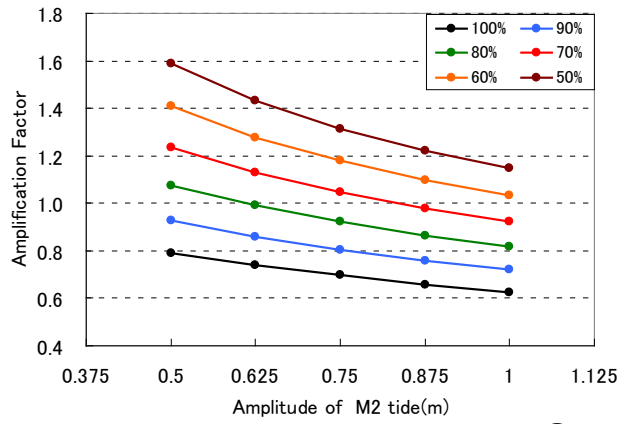
(b) 水深一樣(20m) 縮小部0% 湾央



(c) 水深一樣(20m) 縮小部0% 湾口 ①

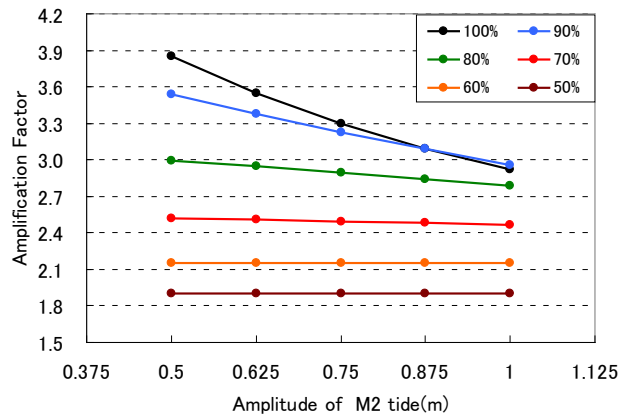


(d) 水深一様(20m) 縮小部0% 湾口 ②

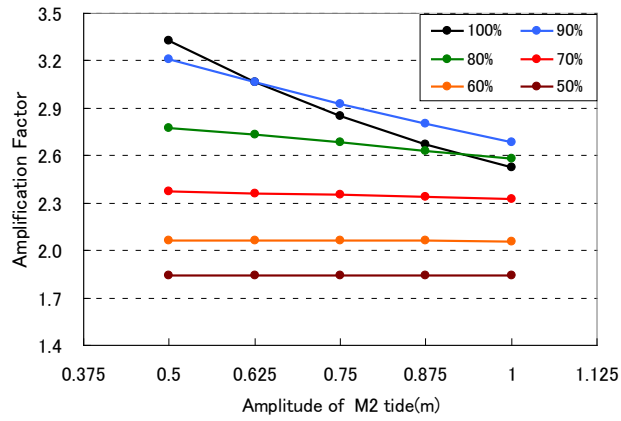


(e) 水深一様(20m) 縮小部0% 湾口 ③

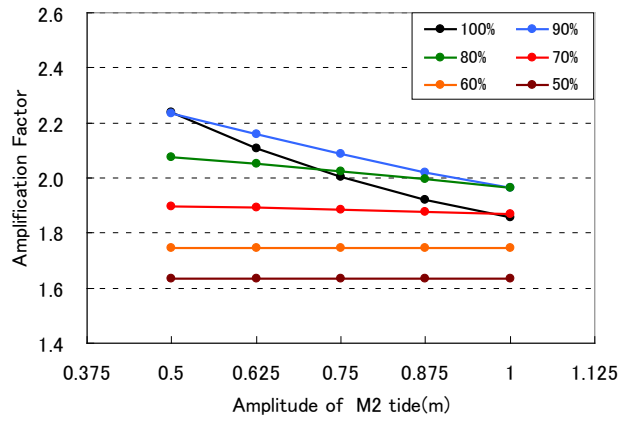
図 3.4-5 簡易地形モデル(水深一様(20m), 縮小部0%)解析結果



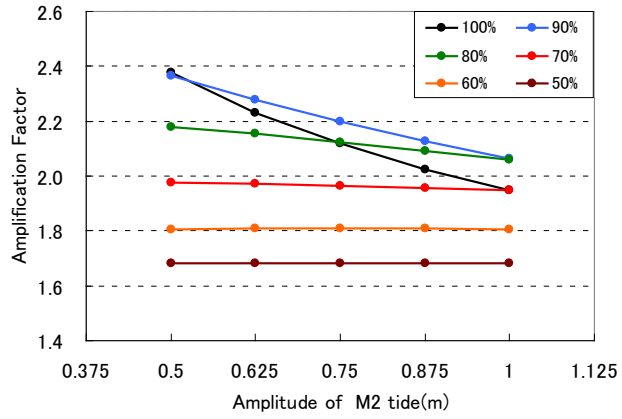
(a) 水深漸浅 縮小部50% 湾奥



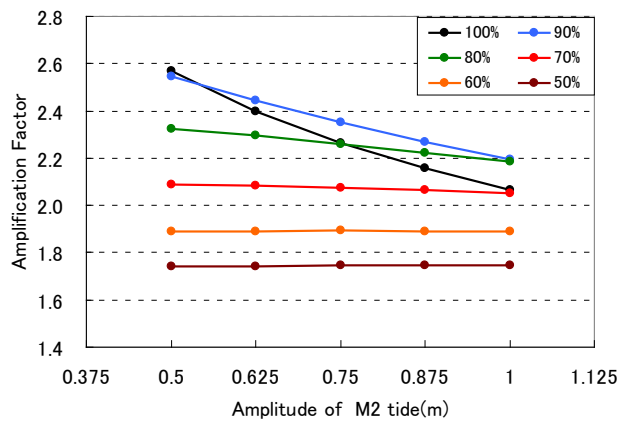
(b) 水深漸浅 縮小部50% 湾央



(c) 水深漸浅 縮小部50% 湾口 ①

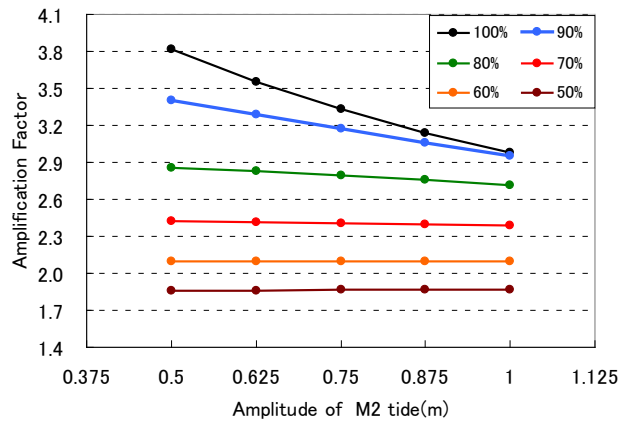


(d) 水深漸浅 縮小部50% 湾口 ②

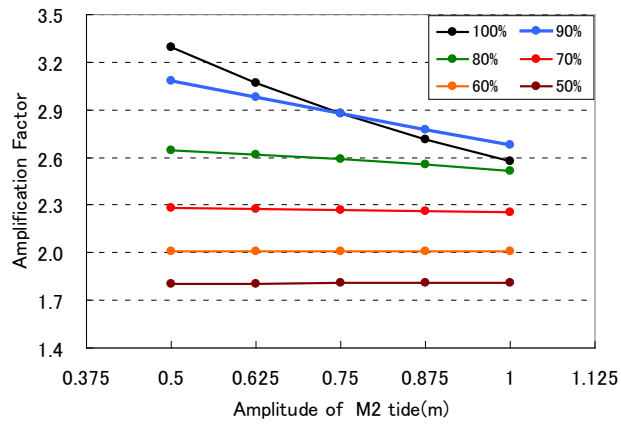


(e) 水深漸浅 縮小部50% 湾口 ③

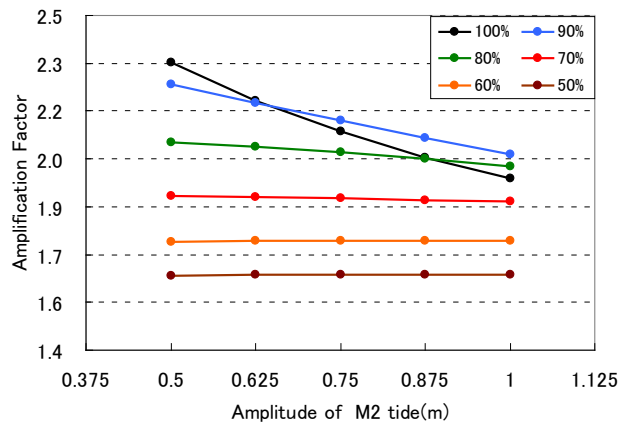
図 3.4-6 簡易地形モデル(水深漸浅, 縮小部 50%)解析結果



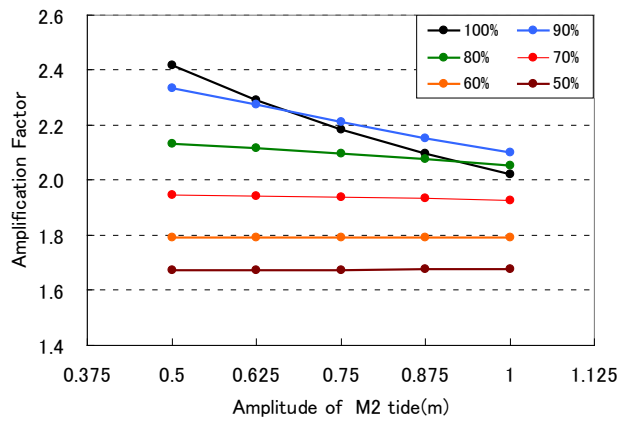
(a) 水深渐浅 縮小部0% 湾奥



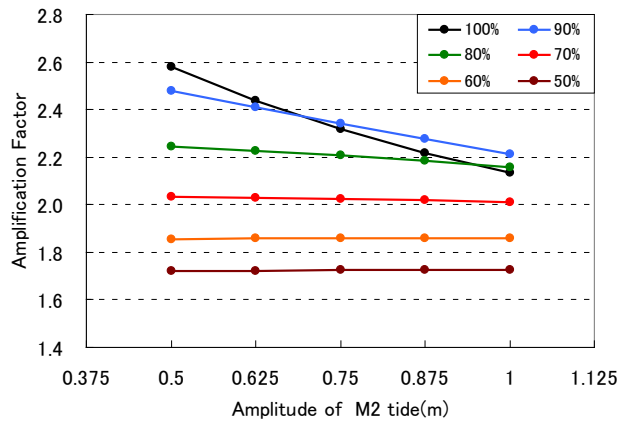
(b) 水深渐浅 縮小部0% 湾央



(c) 水深渐浅 縮小部0% 湾口 ①



(d) 水深漸浅 縮小部0% 湾口 ②



(e) 水深漸浅 縮小部0% 湾口 ③

図 3.4-7 簡易地形モデル(水深漸浅, 縮小部 0%)解析結果

3.5 考察

今回の解析結果について述べる。全ての点において一様に増幅率の増加が見られる 100%~90% の段階は有明海の現状とは当てはまらない。90%から、湾奥の点(外海のM₂潮振幅が小さいとき)で増幅率の減少が見られ始める面積 80%, 全域で減少が見られる 70%にかけての間で有明海の実測データと近い状況となっていることが分かる。図 3.5-1~図 3.5-3 にそれぞれを比較した図を示す。左図上段が有明海実測データ, 下段が有明海シミュレーションデータ, 右図が今回得られた簡易モデルの解析結果のデータ(90%~70%)である。比較してみると, 特に 90%と 70%の関係において, 湾奥(大浦)では干拓に伴い増幅率が減少し, 湾口①~③ (口之津)ではその逆の挙動, 湾央 (三角)ではそれらの中間的な性質をそれぞれ示すなど有明海の実際の状況を良く表していることが分かる。また, 外海の振幅が小さいときは湾奥では面積減少の影響が顕著に現れるが湾口ではあまりその影響が見られず, 外海の振幅が大きいときには湾奥では面積減少の影響があまり見られないが湾口ではその影響が顕著に見られる。さらに, 面積減少によって回帰直線が全域で傾きが小さくなだらかになっている等の点も実測データと一致する。以上のような結果から, 今回の簡易モデルは実際の有明海に生じた状況をよく再現しているといつてよく, 諫早湾の干拓事業に伴う潮受け堤防の締め切りによって今回の簡易モデルの 90%の状態から 70%の状態に変化したことと類似の状況が有明海に起きたと考えられる。

条件を変更したモデルと比較・検討について考察を述べる。まず, 一様に水深 20m を与えたモデルの結果(図 3.4-2, 図 3.4-4, 図 3.4-5)については, 増幅率が概ね 1.0 以下となり増幅が見られなかった。縮小部を 100%から 0%まで変化させても結果に影響は見られなかった。一方で, 水深を一様に 70m とすると, ある程度の再現性が見られた。この点に関しては, 固有周期が異なることと, 後述の非線形効果の影響の違いが原因であると考えられる。次に, 水深が湾口付近においてなだらかに変化するよう設定した漸浅水深のモデル(図 3.4-6, 図 3.4-7)では, 縮小部の影響の有無に関わらず実際のデータとよく一致している結果が得られた。以上より, 諫早湾潮受け堤防締め切り以降有明海に見られる潮汐の変動傾向は, 有明海固有の特性ということではなく湾口付近において水深が浅くなることなどによる潮汐の非線形効果によるものであると考えられる。特に閉鎖性内湾においては, 縮小部が存在することにより非線形効果をさらに高めているものと考えられ, 湾奥における面積減少の影響が時空間的に異なって現れているものと思われる。

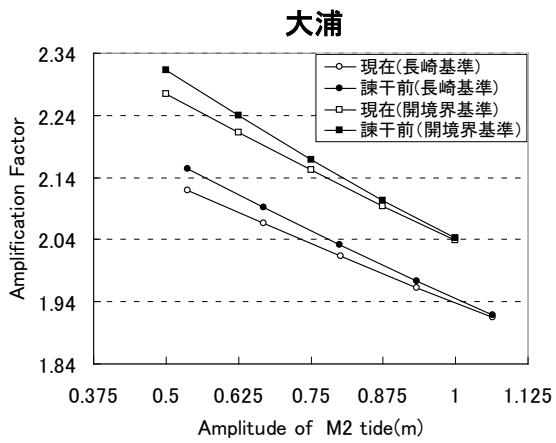
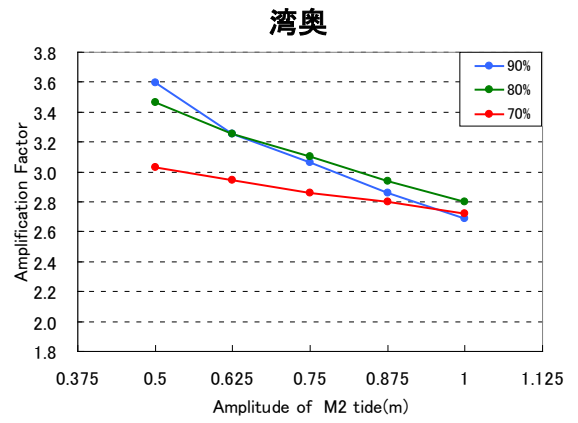
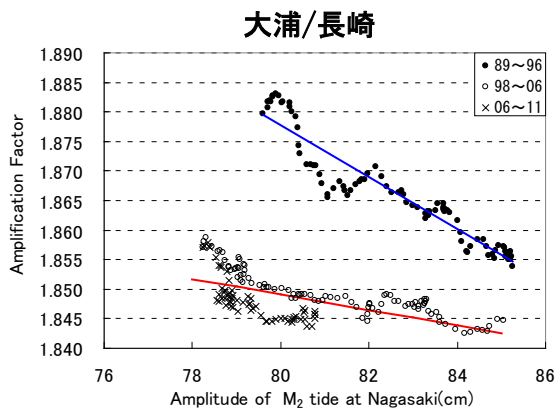


図 3.5-1 湾奥(大浦)に対する実測データ(左図上段)・シミュレーション(同下段)と簡易モデル(右図, 90%, 80%, 70%)の比較

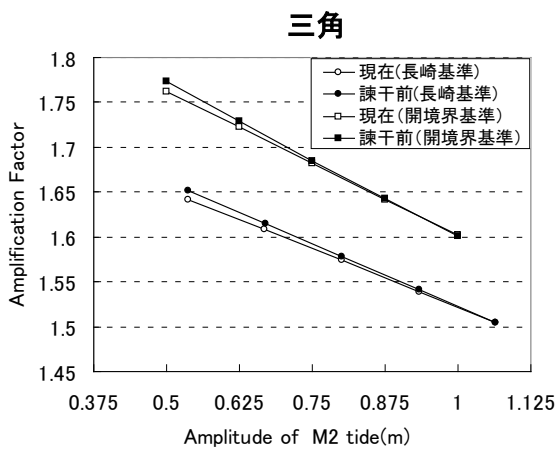
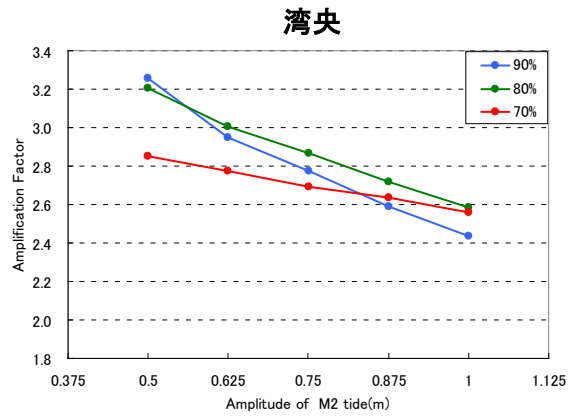
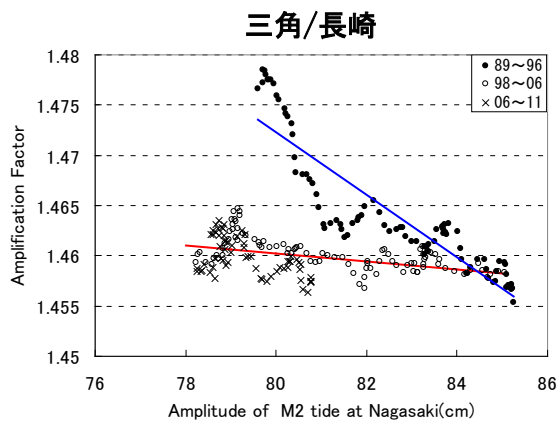


図 3.5-2 湾央(三角)に対する実測データ(左図上段)・シミュレーション(同下段)と簡易モデル(右図, 90%, 80%, 70%)の比較

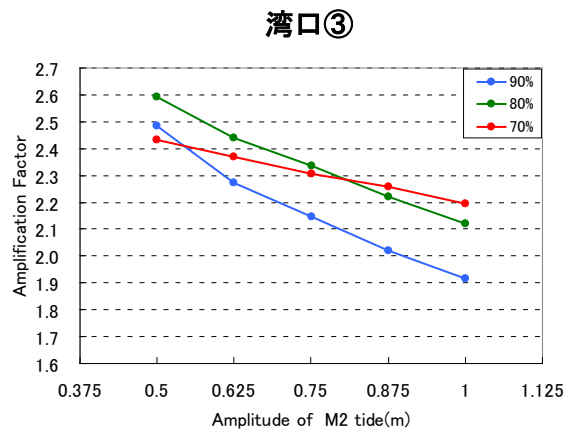
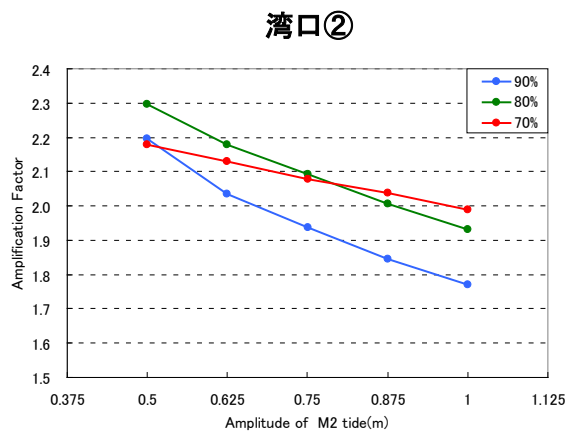
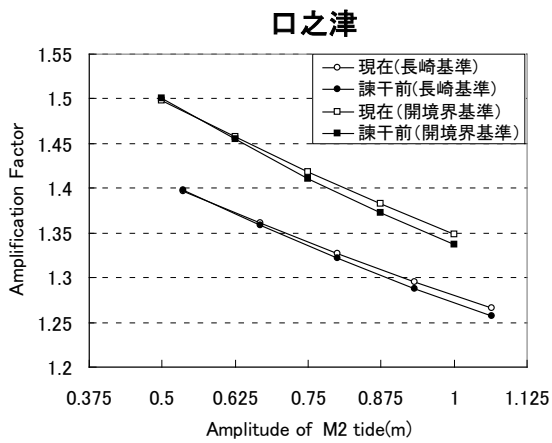
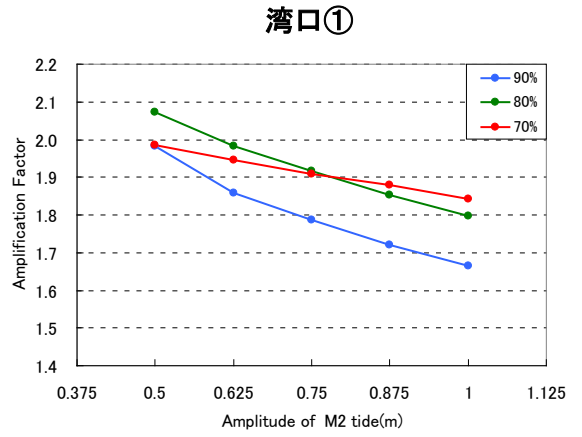
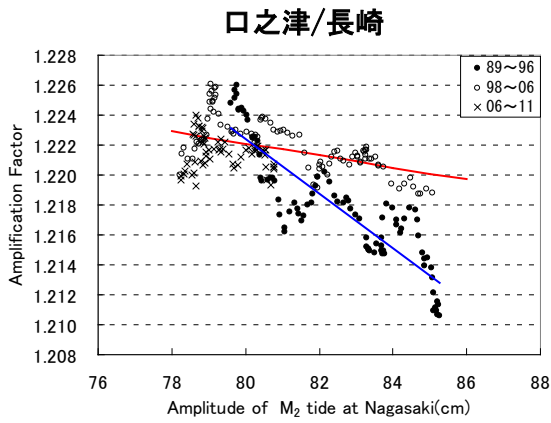


図 3.5-3 湾口(口之津)に対する実測データ(左図上段)・シミュレーション(同下段)と簡易モデル(右図 90%, 80%, 70%)の比較

3.6 おわりに

今回の研究で明らかになったことを以下に示す.

- ①有明海をベースに作成した簡易地形モデルで，湾奥で面積減少が起きたと仮定して数値シミュレーションを行うと，内湾の面積が 90%の場合と 70%の場合との比較において湾奥・湾口とも実際の状況に近い特性を示す.
- ②簡易地形モデルで水深を一様に設定すると，20m では増幅が見られないが 70m では実際の状況を良く表す. 固有周期の違いと，非線形効果の大小によるところが大きいものと考えられる.
- ③簡易地形モデルで縮小部を変化させると，水深一定(20m)のモデルでは増幅が見られず，水深漸浅のモデルでは実際の状況を再現できた.
- ④諫早湾潮受け堤防締め切り後に有明海で見られる潮汐の変動傾向は，有明海固有の特性ではなく湾口付近における水深の変化等によって生じる潮汐の非線形効果によるものであると考えられる. 特に，湾口で縮小する閉鎖性内湾においてはその影響が大きくなる可能性がある.

以上，本章では簡易地形モデルを用いた数値シミュレーションにより，潮受け堤防締め切り以降有明海に生じた潮汐の変動傾向のメカニズムについて議論してきた. 今回得られた解析結果によって，藤原ら(2004)が指摘した締め切りの影響が場所により異なり， M_2 潮の振幅が湾口の口之津では増加し，湾奥の大浦では減少しているという現象は，宇野木(2005)が述べたように「内部の地形変化の影響が場所的に逆のセンスで現れることは普通には起こりがたいこと」でありデータ解析・数値解析の問題であるということはないと考えられる.

今回得られた結果から，閉鎖性内湾において湾奥の面積減少が生じると潮汐が変動し，近年有明海で見られるような環境悪化を引き起こす可能性があることが示された.

第4章 有明海内の表層低塩分水輸送パターンの変化

4.1 はじめに

九州西部に位置する有明海は最大 6m ともなる干満差を有し、その独自の環境からムツゴロウに代表される固有種が存在するなど海産資源が豊富である。干潮時に出現する広大な干潟は多くの生物を育み、タイラギ等二枚貝が多く獲れるほかその干満差を利用したノリの養殖が盛んであった。このような状況から、有明海周辺の漁民からは「宝の海」と呼ばれ親しまれてきた。

その有明海において、環境の悪化が指摘されるようになったのはごく最近のことである。特に1997年に行われた諫早湾干拓事業における潮受け堤防の締め切りに関しては、潮流・潮汐にまで影響を与えるものとして考えられ、これまで観測されていなかった大規模な赤潮が発生するようになった。これは、有明海に生じた変化によって本来海域が有している自然浄化機能が低下したためであり、今後さらに水質や環境が悪化することが懸念される。浅海定線データをとりまとめて表層塩分水輸送パターンの変化を調べた程木(2005)は、有明海において潮受け堤防締め切り以降見られている潮流の減少により、南方向(福岡県大牟田方面)への低塩分水塊の輸送が弱まり、有明海西側(佐賀県側)への輸送が強まったとした。しかし、2000年までの解析しかなされておらず締め切りから約15年が経過した現在における有明海の状況は不明であり、明らかにする必要がある。

そこで、本研究では最新のデータを用いて整理・解析し、現在の有明海の状態を把握するとともに潮受け堤防締め切り後の生じた影響についてより詳しく考察する。

4.2 方法

本研究は1980年1月から2011年3月までの福岡県・佐賀県浅海定線調査データを使用して解析を行う。各調査点の位置は図 4.2-1 に示すとおりである。調査点名については、福岡県が L1, L3, L5, L7, L9, S1, S3, S4, S6, S8(ただし,S 観測線については都合上 F1~F8 にそれぞれ対応させて置き換えている), 佐賀県が S1~S11 となっている。各県で異なる日時に調査が実施されており他県との比較は困難であるため, 程木(2005)の方法にのっとり, 佐賀県の調査地点については St.S6 を, 福岡県浅海定線調査の L 観測線は St.L1 を, S 観測線では St.F3 を筑後川河口と定め, 回帰分析を行った。さらに二元配置分散分析を用いた平行性の検定を行い, 潮受け堤防の前後での回帰直線の傾きの差を評価した。二元配置分散分析を行うと 2 つの要素による交互作用の有無を明らかにすることができ, 交互作用が有意であれば回帰直線の間平行性が無い, すなわち潮受け堤防締め切りの影響が存在すると考えることができる。

なお, 2006年4月に福岡県で調査点の変更が行われ, 基準とする St.S3 が消滅したため福岡県の解析は2006年3月までとしている。

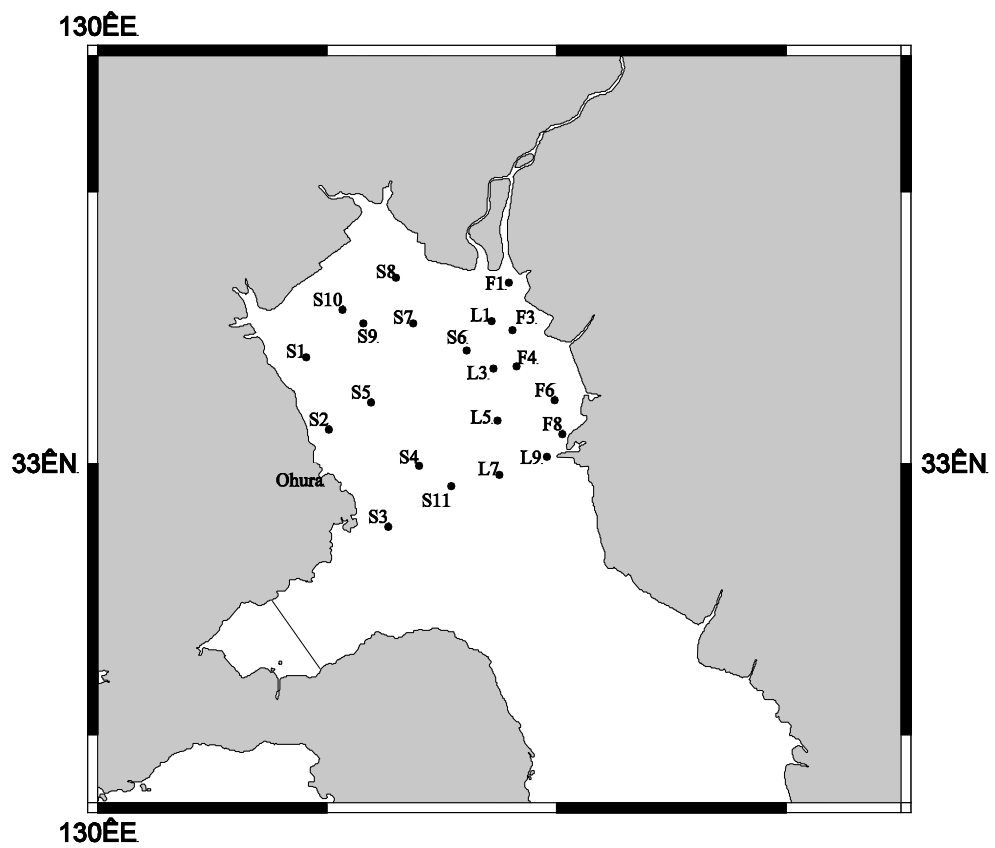


図 4.2-1 各調査点の位置関係

4.3 結果

締め切り前後でデータを分け、回帰分析を行った結果を図 4.3-1～図 4.3-3 に示す。福岡県のデータを見てみると、筑後川河口(St.F3, St.L1)付近では締め切り前後で回帰直線の傾きに有意差は見られなかった(St.F4, St.L3)。一方、福岡県の内部大牟田付近の観測点 St.F6, St.F8, St.L5, St.L7, St.L9 においては締め切り前に比べて締め切り後に回帰直線の傾きが有意に小さくなっている。すなわち、潮受け堤防締め切り以降筑後川河口付近で形成された低塩分水塊が大牟田付近に輸送されにくくなったことを示している。

同様に佐賀県のデータを見てみる。有明海最奥の観測点 St.S1, St.S8, St.S10 において締め切り前後で傾きが有意に増加していることが分かる。この結果から、これらの地点では潮受け堤防締め切り後に筑後川からの河川水が輸送されやすくなった、と考えられる。その他の観測点については回帰直線の傾きの差に有意性が見られなかった。以上のような結果から、潮受け堤防の締め切り後に筑後川由来の低塩分水塊は、西側(佐賀県側)に流れやすくなったということは無く、より北側の有明海奥部に向かって流れるような変化をした、といえる。

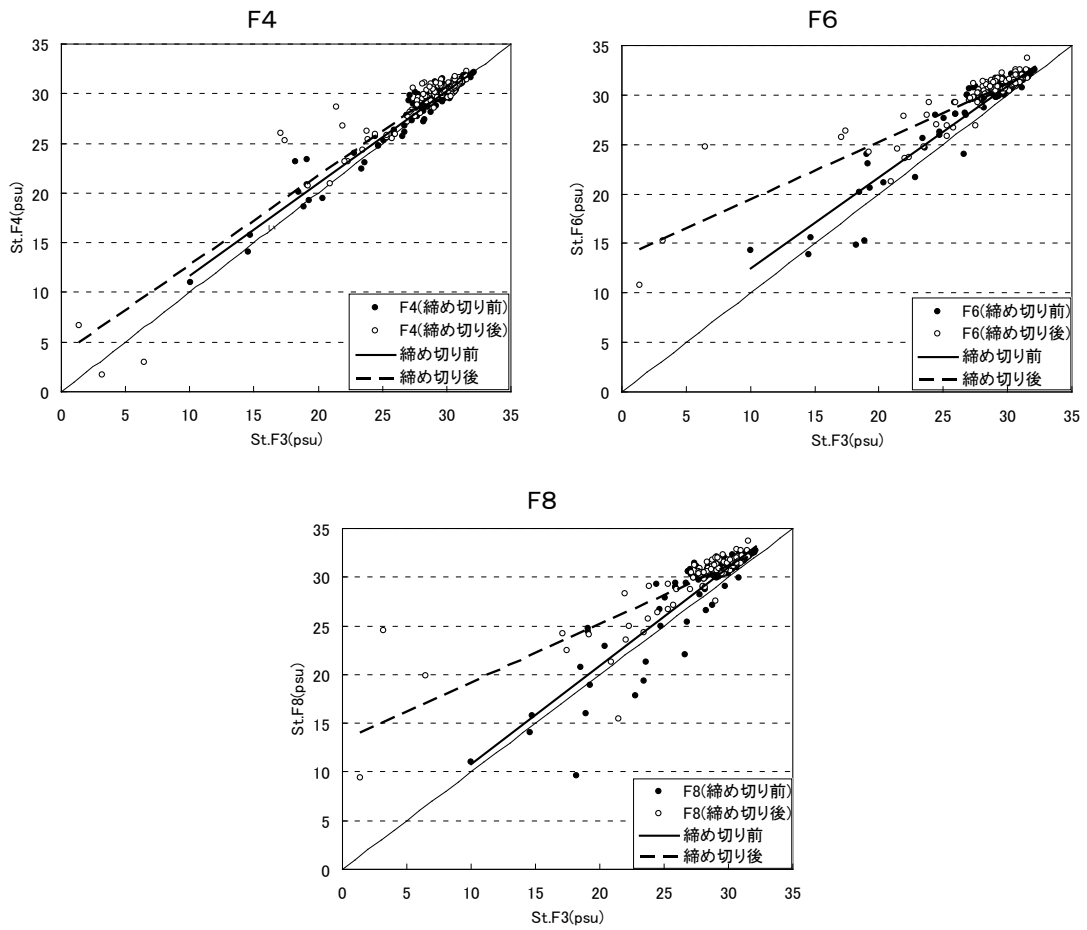


図 4.3-1 締め切り前後における低塩分水輸送パターンの変化(福岡県S観測線)

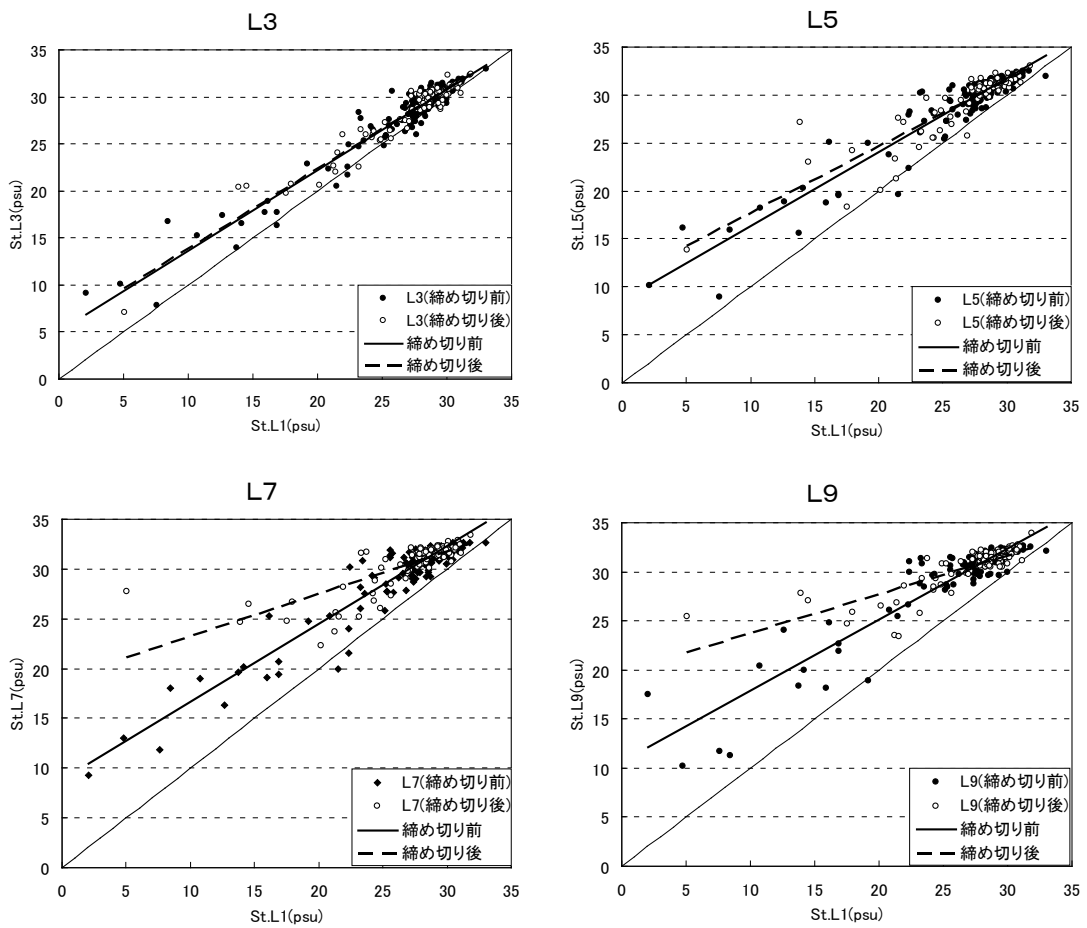
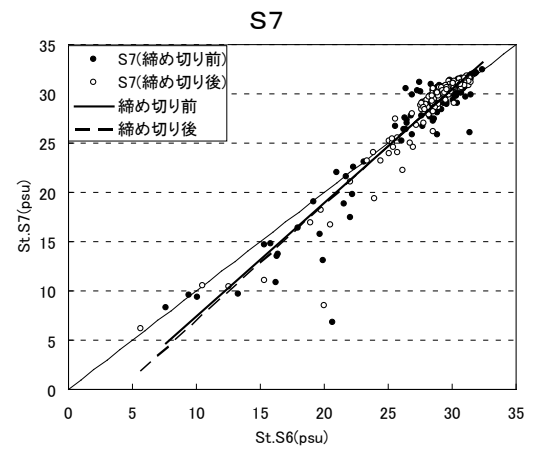
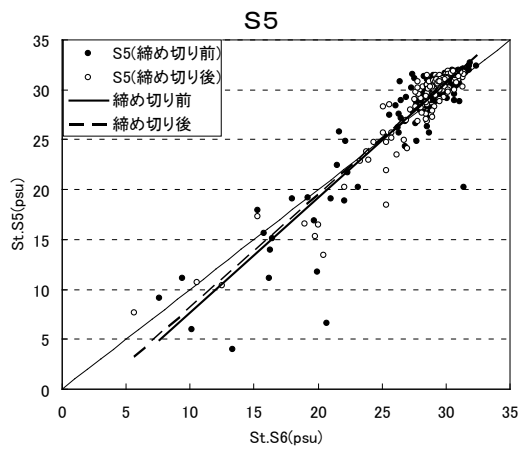
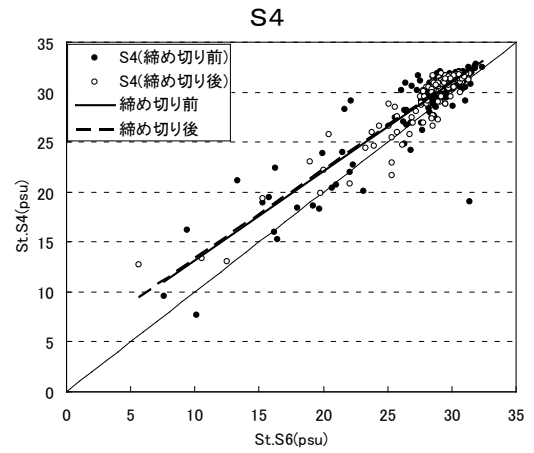
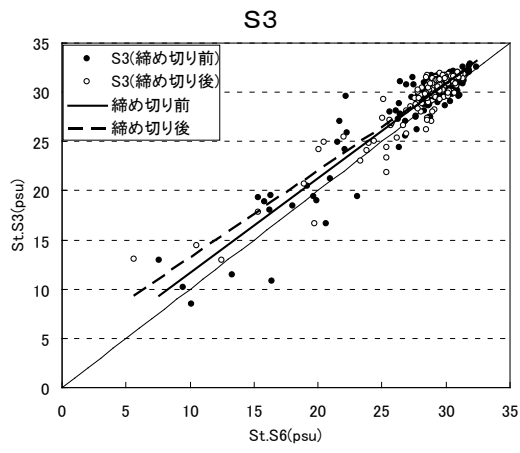
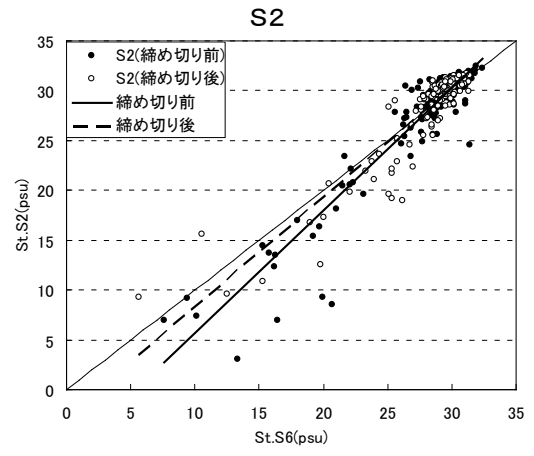
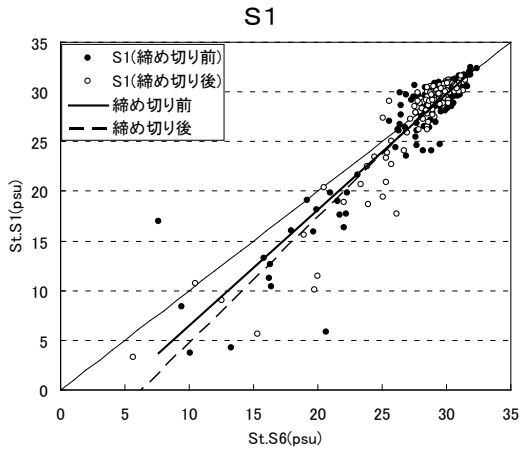


図 4.3-2 締め切り前後における低塩分水輸送パターンの変化(福岡県L観測線)



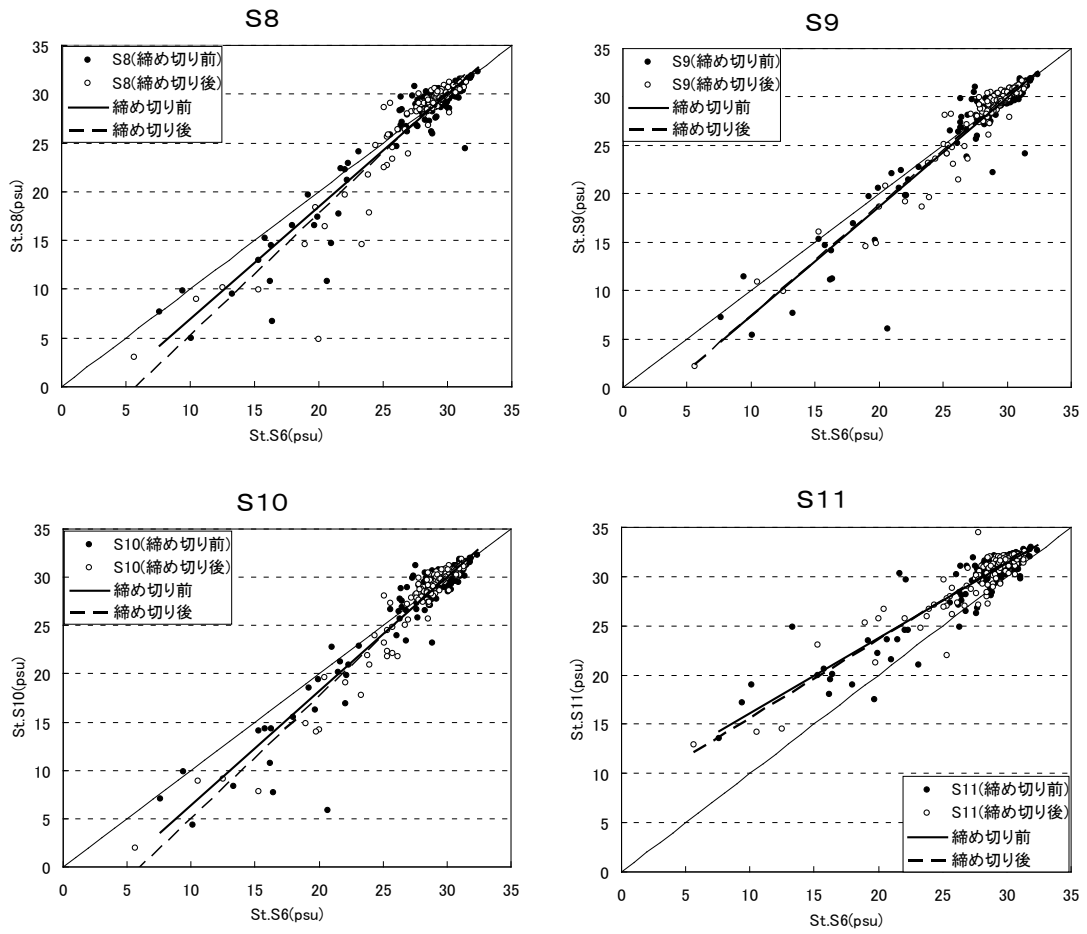


図 4.3-3 締め切り前後における低塩分水輸送パターンの変化(佐賀県)

4.4 考察

本研究と同様の解析を1980年1月～2000年12月まで行った程木(2005)は、潮受け堤防の締め切り以降有明海奥部における低塩分水輸送パターンが変化し、筑後川由来の低塩分水の輸送は南方向へは西側に強まった、とした。それを踏まえた上で今回の解析結果を見てみると、福岡県南部の大牟田付近では潮受け堤防締め切り以降回帰直線の傾きが減少、すなわち筑後川からの低塩分水塊が輸送されにくくなったことが明らかとなった。この結果は程木(2005)の指摘した、締め切り以降筑後川由来の低塩分水の輸送が南方向へは弱まったとする説と合致する。しかし、佐賀県のデータを見てみると、データに有意性があったのは St.S1, St.S8, St.S10 の3点のみであり、その他の点では締め切りの影響が見られなかった(程木(2005)では St.S1, S2, S5, S7, S8, S10 で有意となったとしている)。この結果より、低塩分水塊の輸送が有明海の西側に強まったとは必ずしも言えないということが分かる。輸送強度が増加した3点はいずれも有明海最奥部に位置しており何らかの原因が存在していると考えられる。地球の自転の影響で有明海では西側の佐賀県側に流れる低塩分水が、諫早湾潮受け堤防締め切り後にはより北側に流れるような変化をしたということができる。このような結果となったメカニズムについては今回のデータ解析では明らかにすることができなかったが、今後の研究で明らかにすべき問題であろう。

このように本研究と程木(2005)において異なる結果となった要因として、出水量の違いによるデータのばらつきが考えられる。また、程木(2005)は潮受け堤防締め切り(1997年4月)以前のデータに対し、締め切り以降のデータが少ない(2000年12月までしか考慮していない、すなわち締め切り以降は3年分のデータしかない)。本研究以降も継続してデータ採取・解析が行われ、さらに詳細な結果が得られることを期待する。

4.5 おわりに

本研究で明らかになったことは以下の通りである。

- ①筑後川由来の低塩分水塊の輸送は南側へは弱まっている。
- ②西側への低塩分水塊の輸送は強まったとは必ずしもいえない。有明海最奥部に関しては輸送が強くなった。
- ③今回の解析方法では出水量の違いを考慮していないため、出水量が多い月(年)と少ない月(年)が同じ条件で比較されている。より詳細な結果を得るためには、出水量別に取りまとめる必要がある。

本研究では、福岡・佐賀両県の浅海定線調査データを用い、有明海における表層塩分の平面的な輸送パターンについての解析を行った。筑後川から流入した河川水は地球の自転の影響を受け、有明海西側(佐賀県側)に流れる傾向があるが、諫早湾の潮受け堤防締め切りによって低塩分水の輸送パターンが変化し、筑後川からの低塩分水塊の輸送が南方向(福岡県大牟田方面)には弱まり、西側には変化が見られず、より北側(有明海奥部方面)に流れやすくなったとの結果を得た。これは、堤防締め切り後に地球の自転の影響を強く受けてさらに西側に流れやすくなるとする説(松川(2005), 程木(2005))とは異なるものである。今後は、今回の解析を継続して行うとともに有明海最奥部で輸送が強化された要因を調査し、有明海における諸々の問題の解決の足がかりとなることを期待する。

最後に、本研究で用いた浅海定線調査データ等長期間にわたり継続して現地の調査を継続してきた各県の水産研究センターに多大な敬意と謝意を表す。

第5章 結論

以下に、本論分のまとめを示す。

第1章では、研究の背景と既往の研究について解説し、本研究の目的と本論文の構成について述べた。

第2章では、潮汐データを用いた解析と数値シミュレーションにより、有明海で支配的な分潮である M_2 潮について諫早湾潮受け堤防締め切りの影響と、ノリ網の潮汐に与える影響について検討を行った。

- ①有明海では、諫早湾干拓事業による潮受け堤防の締め切りが行われた1997年を境に潮汐に変動が見られる。締め切りの影響のみを考慮した数値シミュレーションで同様の結果が得られたことから、この潮汐の変動傾向は潮受け堤防締め切りの影響によるものであると考えられる。
- ②潮受け堤防の締め切りが外海を基準とした有明海の M_2 潮振幅に与えた影響は、起潮力の大きさに依存し、時空間的に異なることが明らかとなった。すなわち、起潮力が大きいときは、湾奥(大浦)で影響が小さいが、湾口(口之津)では影響が大きく、締め切りによって増幅率が増加している。逆に起潮力が小さいときは、湾奥(大浦)で影響が大きく、締め切りによって減少したが、湾口(口之津)では影響が小さいことが明らかとなった。また、湾央(三角)では両者の中間的な特性を有していることが明らかとなった。
- ③湾口の口之津においても増幅率の増加が見られることから、締め切りの影響を受けていると考えられ、潮受け堤防締め切りによる湾内の潮汐応答特性の変化を検討する際に口之津を基準とすると大浦での潮汐増幅率の減少を過大に見積もる可能性があることが示された。
- ④有明海に広範囲に存在するノリの養殖網は、その存在する期間中に諫早湾潮受け堤防の締め切りの影響と比較しても無視できないほどの影響を潮汐に与える。すなわち、潮汐に季節的な変動を与える存在として考えられ、締め切りが潮汐に与えた影響に関して統一した見解が得られていないことの大きな要因である可能性が示された。

第3章では、簡易地形モデルを用いて締め切りが潮汐に与える影響について詳しく検討を行った。

- ①有明海をベースに作成した簡易地形モデルで、湾奥で面積減少が起きたと仮定して数値シミュレーションを行うと、内湾の面積が90%の場合と70%の場合との比較において湾奥・湾口とも実際の状況に近い特性を示す。
- ②簡易地形モデルで水深を一様に設定すると、20mでは増幅が見られないが70mでは実際の状況を良く表す。固有周期の違いと、非線形効果の大小によるところが大きいものと考えられる。

- ③簡易地形モデルで縮小部を変化させると、水深一定(20m)のモデルでは増幅が見られず、水深漸浅のモデルでは実際の状況を再現できた。
- ④諫早湾潮受け堤防締め切り後に有明海で見られる潮汐の変動傾向は、有明海固有の特性ではなく湾口付近における水深の変化等によって生じる潮汐の非線形効果によるものであると考えられる。特に、湾口で縮小する閉鎖性内湾においてはその影響が大きくなる可能性がある。

第4章では、浅海定線調査データを用いて、潮受け堤防締め切り後の筑後川由来の低塩分水塊輸送の変化を調べた。

- ①筑後川由来の低塩分水塊の輸送は南側へは弱まっている。
- ②西側への低塩分水塊の輸送は強まったとは必ずしもいえない。有明海最奥部に関しては輸送が強くなった。
- ③今回の解析方法では出水量の違いを考慮していないため、出水量が多い月(年)と少ない月(年)が同じ条件で比較されている。より詳細な結果を得るためには、出水量別に取りまとめる必要がある。

本研究では、まず**第2章**で実測データと数値シミュレーションの結果を算出し、近年有明海で見られる潮汐の変動傾向が、諫早湾干拓事業における潮受け堤防の締め切りによるものであることを示した。次いで**第3章**では、簡易地形モデルを用いて比較・検討することで、湾奥の締め切りに起因する潮汐の変動傾向は有明海固有の特性ではなく、潮汐の非線形作用による閉鎖性内湾の特徴であることを示した。さらに、**第4章**では低塩分水塊の輸送の変化を調べ、潮受け堤防の締め切りが潮流に与える影響について既存の解析から得られている結論の問題点を指摘した。

諫早湾干拓事業以降、有明海には環境悪化等諸々の問題が生じた。それらは近隣住民にとっては死活問題と言っても過言ではなく、司法問題にまで発展した。堤防の締め切りから約15年が経過した現在でも、不明な点は多く問題の解決までは程遠い状態である。本研究で得られた知見が一刻も早い問題解決の一助となることを期待してやまない。

なお、本研究を行うに際し、福岡県と佐賀県により観測されている浅海定線調査結果を用いた。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

宇野木早苗(1993)：沿岸の海洋物理学， p.672， 東海大学出版会.

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， 第 12 卷， 第 3 号， pp.307-313.

宇野木早苗(2005)：共振潮汐の数値計算における開境界条件の影響 - 有明海異変の場合 - ， 海の研究， 第 14 卷， 第 1 号， pp.47-56.

宇野木早苗(2006)：有明海の自然と再生， 築地書館， 264p.

宇野木早苗(2007)：諫早堤防が有明海の潮汐に及ぼす影響に関する二つの見解に対するコメント， 海の研究， 第 16 卷， 第 3 号， pp.253-255.

宇野木早苗・佐々木克行(2007)：有明海異変の発生システムについて， 海の研究， 第 16 卷， 第 4 号， pp.319-328.

環境省(2006)：有明海・八代海総合調査評価委員会報告， 85p.

気象庁：<http://www.jma.go.jp>

小松利光・矢野真一郎・齋田倫範・田井明(2006)：有明海の潮流ならびに物質輸送の変化に関する研究， 海岸工学論文集， 第 53 卷， pp.326-330.

齋田倫範・田井明・矢野真一郎・小松利光(2009)：護岸建設による干潟上の流速減少に関する一考察， 水工学論文集， 第 53 卷， pp.1465-1470.

齋田倫範・矢野真一郎・田井明・重田真一・小松利光(2008)：筑後川から有明海へ流入する河川水の挙動， 水工学論文集， 第 52 卷， pp.1327-1332.

佐賀県浅海定線調査データ

田井明・Hatta,M.P.・矢野真一郎・齋田倫範・小松利光(2006)：諫早湾湾奥の締切りが有明海の潮汐・潮流に与えた影響， 海岸工学論文集， 第 53 卷， pp.331-335.

田井明(2010): 有明海における潮汐・潮流ならびに水質の変化とその要因に関する研究, 九州大学
学位論文

千葉賢・武本行正(2002): 諫早湾潮受け堤防の影響評価のために潮位観測値の分析と流況数値解析,
四日市大学環境情報論集, 第 5 巻, 第 1・2 号合併号, pp.39-70.

千葉賢・武本行正(2003): 諫早湾潮受け堤防設置に伴う有明海の流況変化に関する研究, 海岸工学
論文集, 第 50 巻, pp.376-380.

椿東一郎(1974): 水理学Ⅱ, 森北出版, 272p.

日本海洋学会編(2005): 有明海の生態系再生をめざして, 恒星社厚生閣, 211p.

日本海洋学会沿岸海洋研究部会編(1990): 続・日本全国沿岸海洋誌, 東海大学出版, 839p.

日本海洋データセンター: 毎時潮高データ, http://www.jodc.go.jp/index_j.html

福岡県浅海定線調査データ

藤原考道・経塚雄策・濱田考治(2004): 有明海における潮汐・潮流減少の原因について, 海の研究,
第 13 巻, 第 4 号, pp.403-411.

安田秀一(2006): 内湾における副振動の発生と有明海の潮汐増幅について - 複合潮の振舞いと固有
振動との共振, 海の研究, 第 15 巻, 第 4 号, pp.403-411.

安田秀一(2007): 有明海の潮汐に及ぼす諫早堤防の影響について - コメントへの回答と回答者から
のコメント, 海の研究, 第 16 巻, 第 3 号, pp.257-260.

安田秀一・松永信博・徳永貴久・阿部淳・高島創太郎(2004): 有明海北部海域における夏季洪水期
の物理的環境と溶存酸素の変動, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp.911-915.

Princeton 大学 Princeton Ocean Model 公式ページ:

<http://www.aos.princeton.edu/WWWPUBLIC/htdocs.pom/>