

2008 年度 修士論文

境界条件の違いに着目した東京湾の流動の再現計算  
Flow simulation in Tokyo Bay focusing on the influence of boundary condition

牟田原 清孝  
Mutahara, Kiyotaka

東京大学大学院新領域創成科学研究科  
社会文化環境学専攻

## 目次

第1章 序論	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	2
1.3 研究手順	2
第2章 東京湾	3
2.1 はじめに	3
2.2 東京湾の現状	4
2.3 千葉灯標における観測結果	6
2.4 東京湾の数値計算	11
第3章 数値モデル	12
3.1 数値モデルとは	12
3.2 WESTech model	12
3.2.1 WESTech model の概要	12
3.2.2 流速場の方程式	12
3.2.3 水温場・塩分場の方程式	15
第4章 数値実験	16
4.1 数値実験の概要	16
4.2 数値実験の条件	17
4.3 境界条件	17
4.4 河川からの流入条件	22
第5章 結果・考察	25
5.1 東京湾の再現計算	25
5.2 境界条件の時間間隔を変えた場合	34
5.3 境界条件を短期的に変化させた場合	60
5.4 境界条件を長期的に変化させた場合	71
5.5 塩分の鉛直分布を変化させた場合	93
第6章 結論	100
参考文献	
謝辞	

## 第1章 序論

### 1.1 研究背景

近年、数値計算機の計算能力の向上やスーパーコンピュータの登場とともに、数値モデルを用いた自然現象の再現計算や将来予測が頻繁に行われるようになってきている。その分野は気象、大気、海洋など多岐にわたっている。陸と海と大気境界であり、人間の生活に非常に密接に関っている沿岸域においても、流動の再現計算や植物プランクトンの発生予測などで数値モデルによる数値実験が行われている。

沿岸域、とりわけ東京湾や三河湾などの内湾の数値計算を行う際に重要になってくるのが、外洋との開境界における潮汐、水温、塩分などの境界条件である。内湾の流動や水温・塩分の分布は境界条件に大きく影響されるので、数値モデルを用いた計算を行う際に、境界条件の精度をできるだけ高めることは、計算の再現性の精度を高めるのに非常に重要である。

本研究で対象とする東京湾は、港湾空港技術研究所が神奈川県・久里浜港と千葉県・金谷港を結ぶ東京湾フェリー“かなや丸”に設置した計器によって、湾口の水溫、塩分、クロロフィル、海上の風速などがフェリー走行中、1分ごとに計測されており、境界条件を作成するのに大変良好な環境であるといえる。しかしながら、東京湾以外に湾口部における水溫、塩分などの計測をこれだけ頻繁に行っている湾は、同じく港湾空港技術研究所が伊勢湾において、伊勢湾口フェリーに計器を搭載して観測を行っている以外にほとんどない。

一般的に内湾における数値計算を行う際には、研究機関・公的機関が観測、あるいは個人で観測した水溫や塩分のデータをもとに境界条件を作成しているのが現状である。観測データがほとんどない場合には、一定値を計算期間中与え続けるという手法もあるが、実際には水溫や塩分は時々刻々と変化しており、自然現象を忠実に反映しているとはいえない。

つまり、内湾の数値計算を行う際に用いられる境界条件を作成するには、現場における観測が必要となる。しかしながら、観測には多大な労力を要し、今回のように湾口の水溫や塩分を計るためには現場に行くために船を使う必要もある。こういった労力はできるだけ減らすことが望ましいが、数値計算のための境界条件を作成するために観測の間隔をどの程度で行えばよいのか、ということについて定量的に検証を行うことは非常に意義のあることだといえる。

## 1.2 研究目的

本研究では、東京湾フェリーにて観測されている水温・塩分値をもとに境界条件を作成し、内湾の再現計算を行う。その計算結果を本研究における基準値と定め、東京湾フェリーの観測データを仮に1日に1回観測した場合、3日に1回観測した場合、1週間に1回観測した場合など、観測頻度をあえて落とした境界条件を作成して再現計算を行い、基準値と比べて再現精度がどの程度変化するかを考察する。その上で、境界条件を作成するという観点からみて、どの程度の頻度で観測データがあれば再現計算の精度が保証されるのか、ということについて提言を行う。

また、境界から水温を短期的に変化させた場合に、湾内においてどのような変化がみられるかを数値実験を行い考察する。同じように水温・塩分を長期的に変化させた場合などにおいても数値実験を行い、湾内にどのような変化がみられるかを考察する。

## 1.3 研究手順

本研究における研究の手順を図 1.1 に示す。

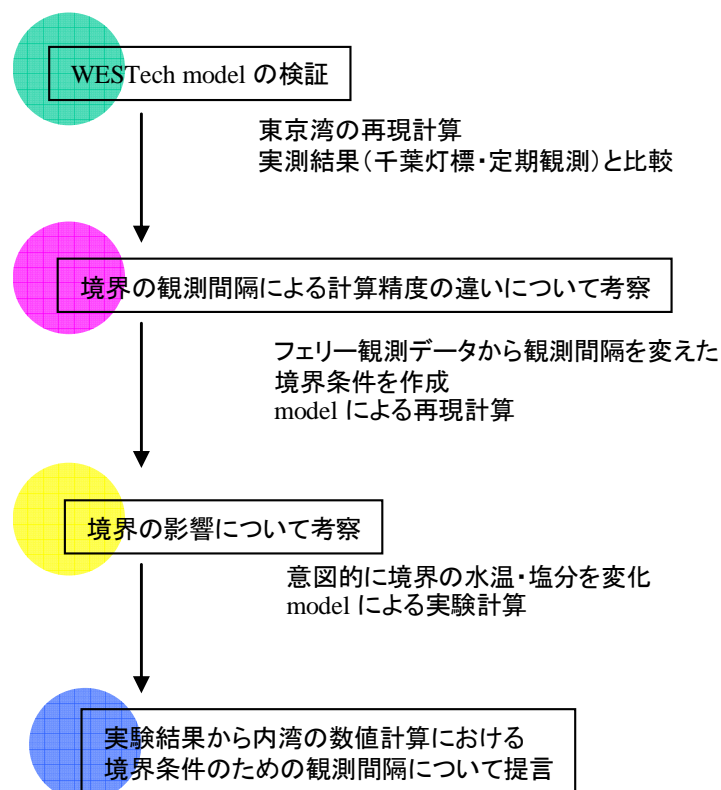


図 1.1 研究フロー

## 第2章 東京湾

### 2.1 はじめに

本研究で境界条件に使用した東京湾口フェリーの航路と、数値計算の検証に用いた千葉灯標の位置を、図 2.1 に示す。図で示した St.1~6 は本研究で計算結果を出力したポイントで、それぞれ開境界から 10[km], 20[km], 30[km], 40[km], 50[km], 60[km] 離れている。緑色の線は鉛直方向の水温・塩分分布の出力を行ったラインである。

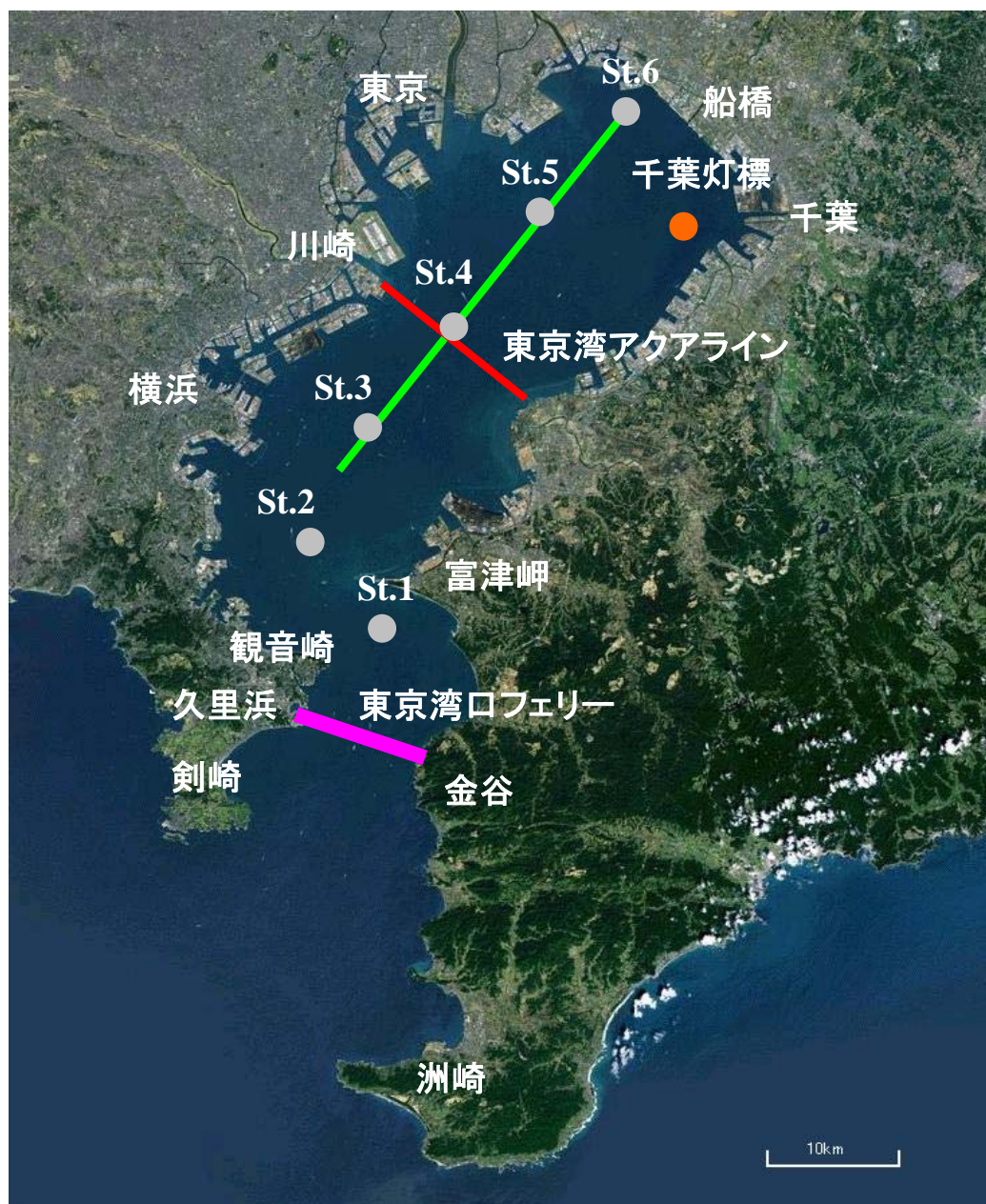


図 2.1 東京湾の全景 (yahoo!地図より転載)

## 2.2 東京湾の現状

東京湾の内湾（千葉県富津岬と神奈川県観音崎とを結んだ線の内側の領域）の広さは南北に約 50[km]、東西に約 30[km]で面積は約 960[km<sup>2</sup>]である。しかしながら平均水深が 15[m]と浅く、容積は 15[km<sup>3</sup>]である（小倉編，1993）。

東京湾の流域人口（東京都，神奈川県，埼玉県，千葉県の合計人口）は 2008 年 12 月時点で約 3500 万人（東京都，神奈川県，埼玉県，千葉県の各ホームページ）と、日本の全人口の 28%が集中する人口密集地域であり、東京湾には多大な流入負荷が掛かっていると推測される。

東京湾において、現在特に問題となっているもののひとつが、主に陸域からの流入負荷によって富栄養化した湾内で植物プランクトンが異常発生する赤潮と、湾底層に形成された貧酸素水塊の湧昇によって発生する青潮である。赤潮，青潮はともに漁業や養殖業，湾内の環境に大きな影響を与えるため，東京湾では水質改善のために下水道整備や水質総量規制など，様々な試みが行われている。また，数値シミュレーションを利用した閉鎖性海域における赤潮，貧酸素水塊発生の予報システムの開発（上野，2005）などの研究も行われている。

図 2.2，2.3 に東京湾における赤潮と青潮の発生状況を示す。

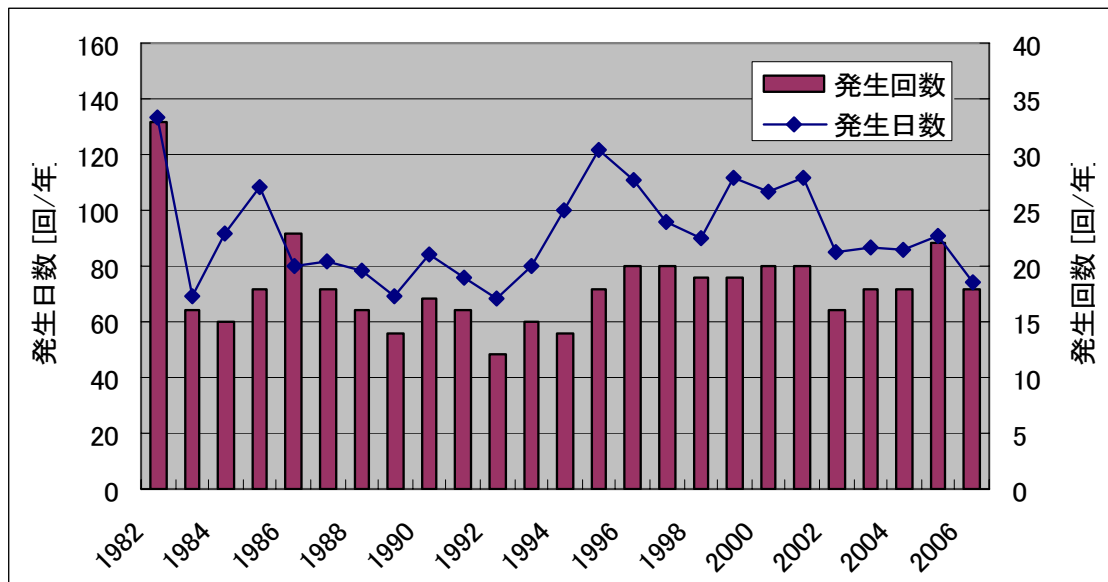


図 2.2 東京湾における赤潮発生状況（東京都環境局自然環境部，2008）

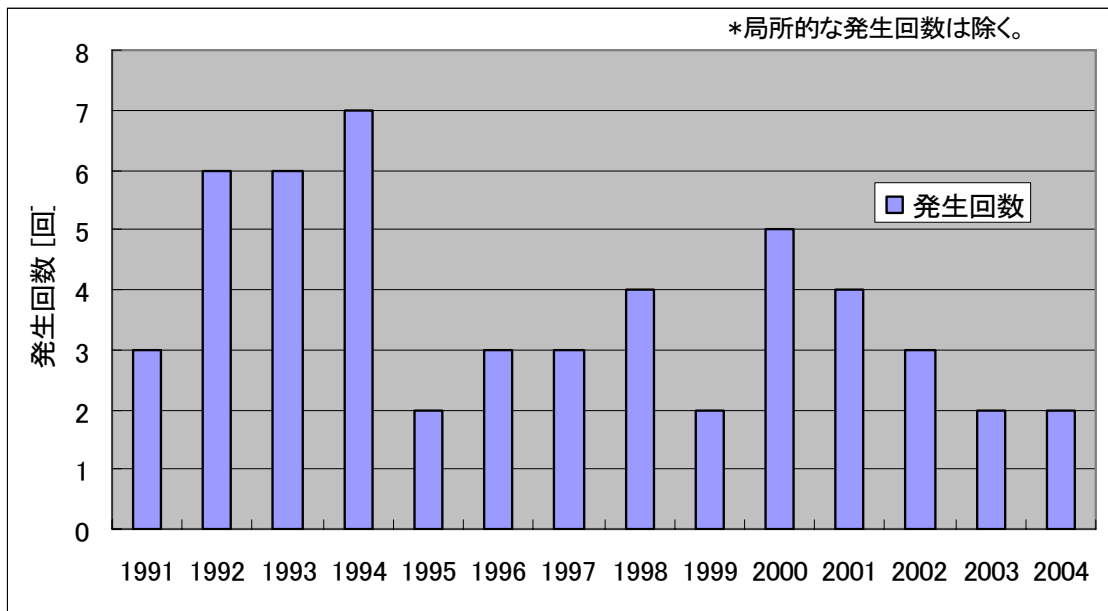


図 2.3 東京湾における青潮発生回数（東京湾岸自治体環境保全会議，2006）

高度経済成長期である 1960 年代の水質に比べて、近年の水質は改善されてきてはいるものの（東京湾岸自治体環境保全会議，2006），図 4.1 からは東京湾における赤潮の発生が 1980 年代からずっと横ばいであることが分かる。この原因として，岡田ら（2001）は東京湾の底泥から栄養塩が溶出して表層に供給されている事を現地観測ならびに数値シミュレーションからつきとめ，二瓶ら（2008）は陸上からの流入負荷の削減効果が，赤潮がもっとも発生しやすい夏季に表れていないことをつきとめた。

赤潮によって発生した大量の植物プランクトンの死骸が湾の底に沈み，プランクトンの分解のために湾の底の酸素が多量に消費されることにより，湾底層に貧酸素水塊が形成される。それが北よりの風が吹くことによって湧昇することにより，青潮が発生する。そのため，図 4.2 からは 1994 年の発生回数 7 回をピークに，年々発生が減少しているように見えるが，赤潮の発生が抑えられない限り，青潮の発生も抑えることができない。

今後は，流入負荷の季節変動や底層からの栄養塩溶出などを考慮した，より大局的な水質改善策が求められる。また同時に，湾奥の埋め立てによって消失されてしまった干潟やアマモ場の再生など，人と東京湾とがうまく共生できる環境を創造していくことが必要である。



### 2.3 千葉灯標における観測結果

本研究で再現計算の期間と定めた、2005年7～8月の千葉灯標における風、水温、塩分、DOの観測結果を図2.4に示す。なお、千葉灯標における観測データは、日本海洋データセンターより御提供頂いた。また、東京湾において風が吹いてくる方向の頻度を表した風配図を図2.5、2.6にそれぞれ示す。

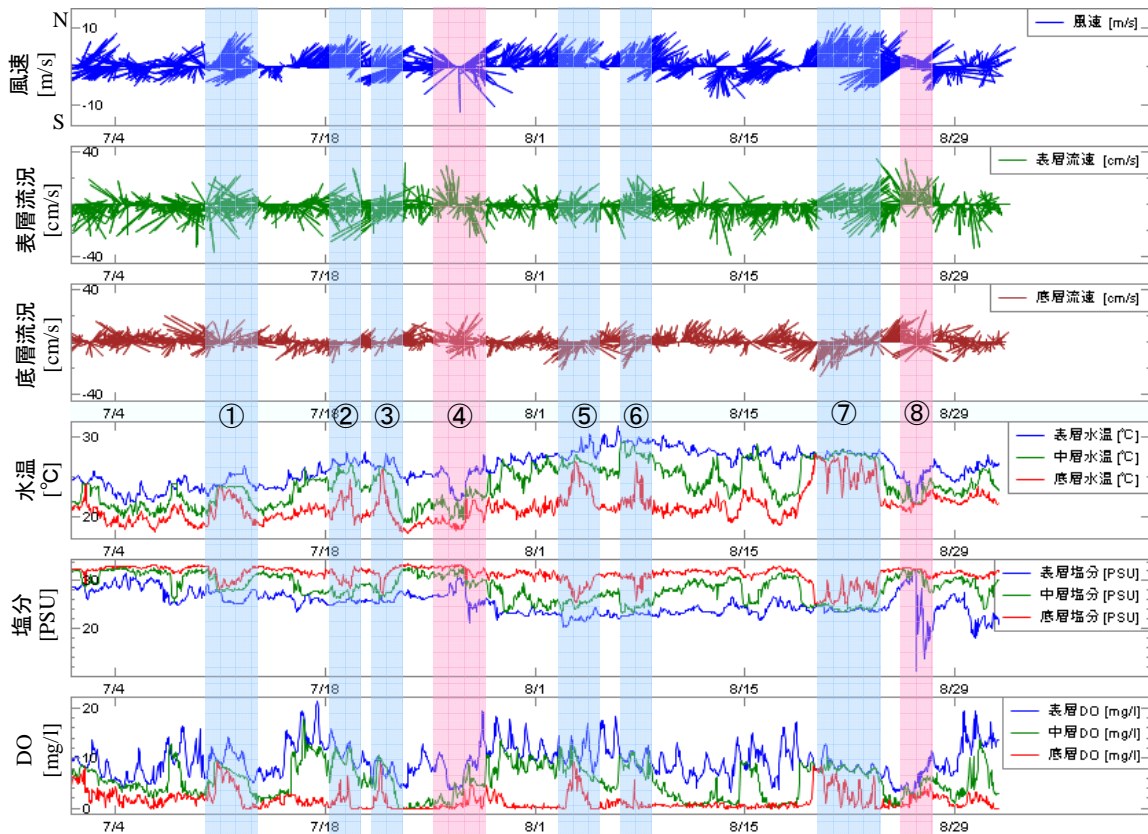


図 2.4 千葉灯標・観測結果（上から順に風速，表層流況，底層流況，水温，塩分，DO である。風速ベクトルの向きは風が吹き抜ける方向を示している。2005年7～8月）

図 2.4 において、①～③と⑤～⑦の水色のラインで示した部分は、南寄りの風によって表層の海水が底層まで潜り込んでいることを表している。④、⑧のピンク色のラインで示した部分は、台風によって表層と底層の水が混合していることを表している。水色のラインで示した現象を再現するため、東京湾を参考にして地形条件を図 2.7 に示したような水深が一様な  $20[\text{km}] \times 20[\text{km}] \times 15[\text{m}]$  のプール（開境界なし）に設定して数値実験を行った。水深  $15[\text{m}]$  は東京湾の平均水深と同じである。



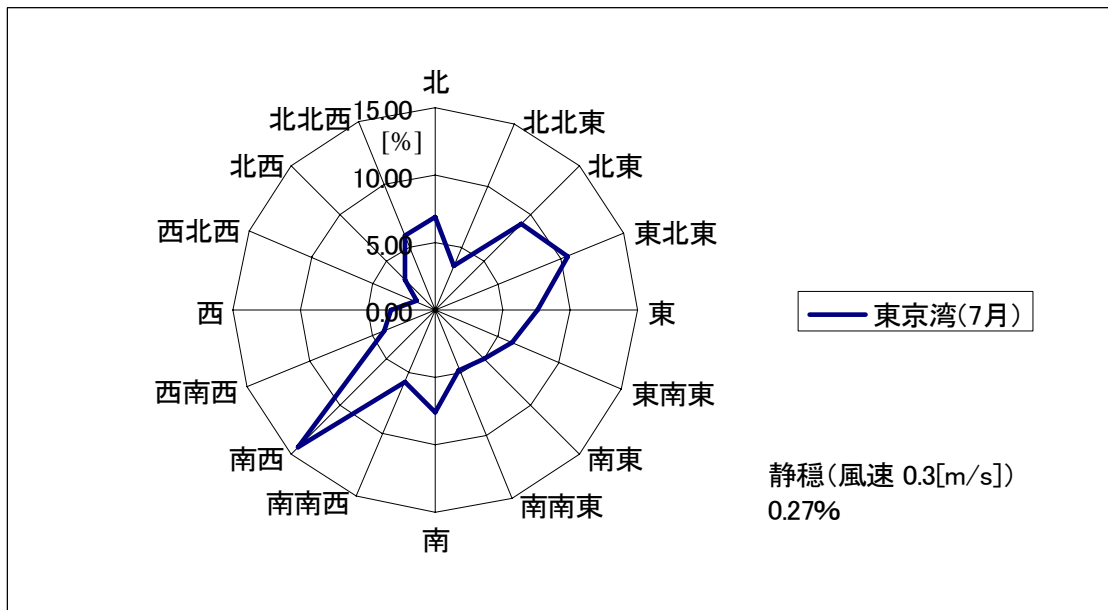


図 2.5 東京湾・風配図 (2005 年 7 月)

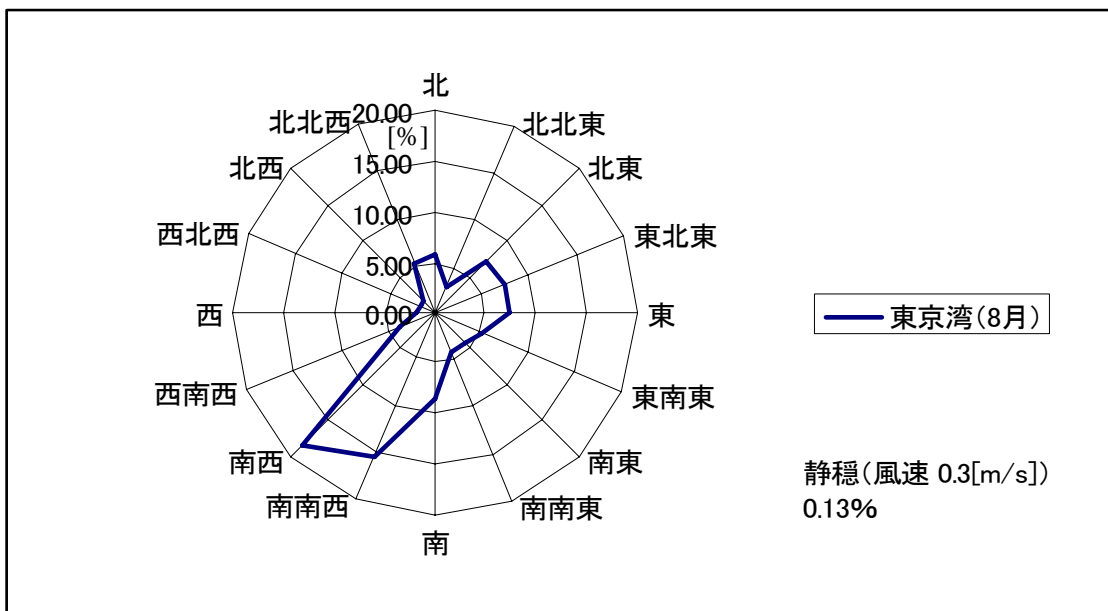


図 2.6 東京湾・風配図 (2005 年 8 月)

数値実験の内容は、水温はプール全体で同じ 20[°C]に設定し、表面から水深 7.5[m]までを上層として塩分濃度を 30[PSU]に、7.5[m]から底面までを下層として塩分濃度を 33[PSU]に設定して、最初からプール内部を成層状態にしておいて、風速 10[m/s]の風を一定方向から吹かせ続けた場合に、プール内部における塩分濃度分布と流速分布がどのように変化するかを観察した。メッシュの大きさは水平方向に 0.5[km]で鉛直方向に 0.3[m]である。数値実験の結果を図 2.8~2.11 に示す。

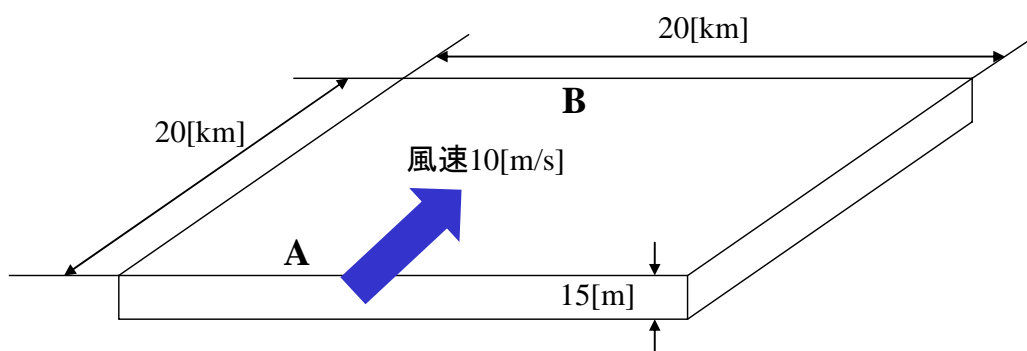


図 2.7 プールの地形

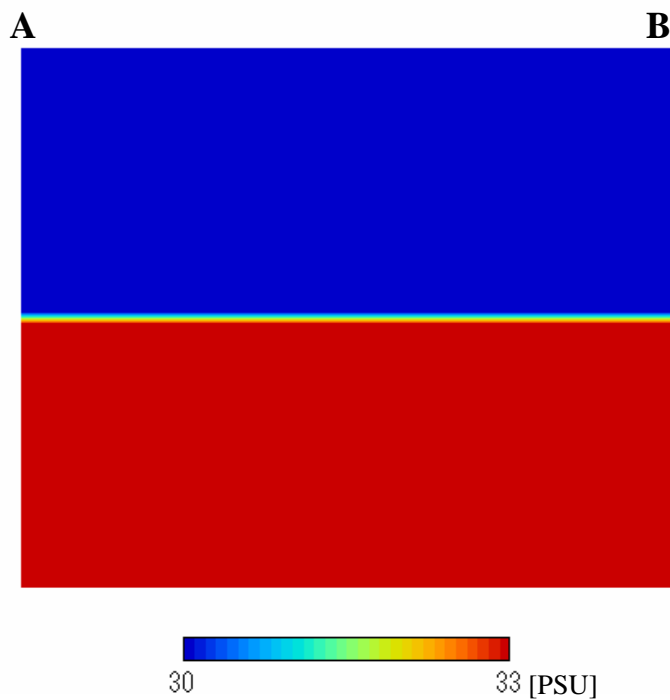


図 2.8 初期状態の塩分濃度分布

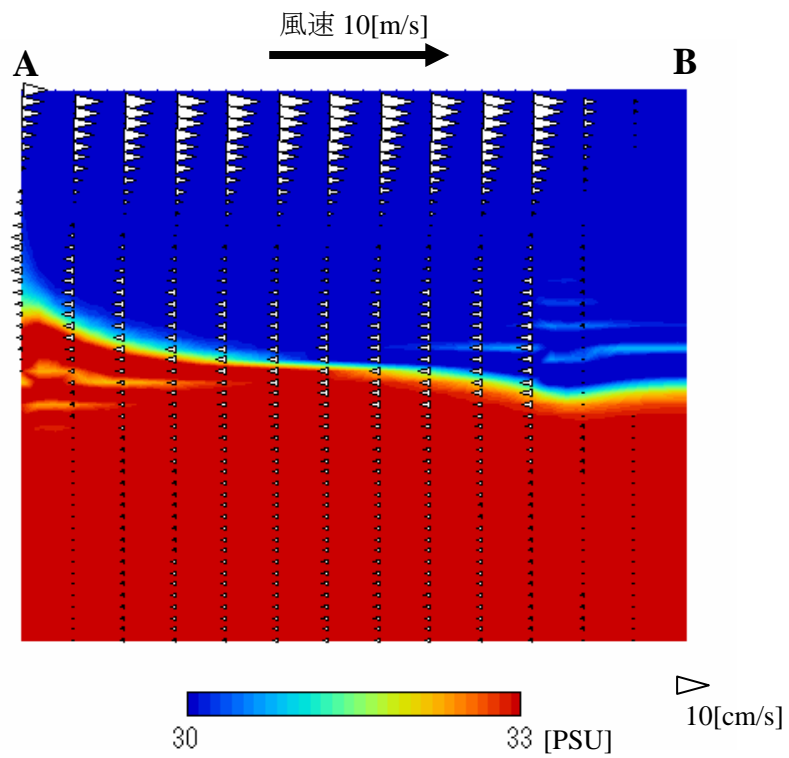


図 2.9 実験開始から 12 時間後の塩分濃度分布と流速分布

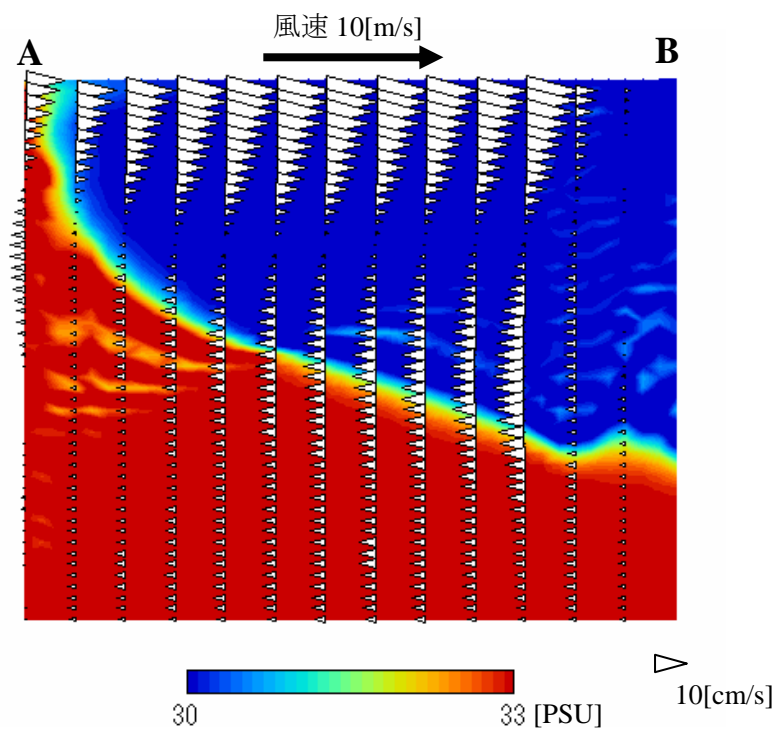


図 2.10 実験開始から 24 時間後の塩分濃度分布と流速分布

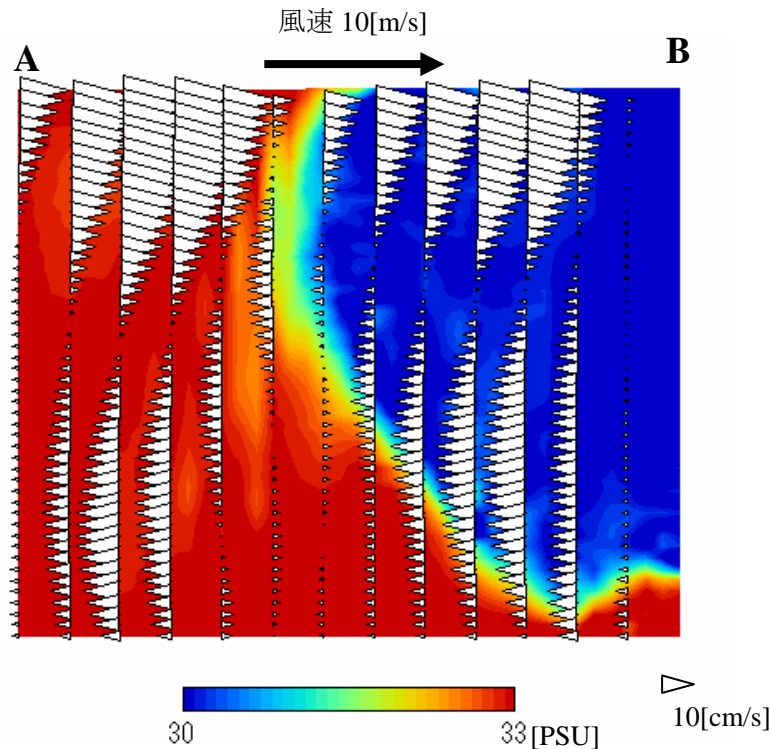


図 2.11 実験開始から 48 時間後の塩分濃度分布と流速分布

数値実験の結果から、一定方向に風速 10[m/s]という風が吹き続けることによって、プール内部に形成されていた塩分成層が、時間の経過とともに徐々に傾き、48 時間後には A 側でもともと下層にあった塩分濃度 33[PSU]の水が上層へと湧昇し、逆に B 側でもともと上層にあった塩分濃度 30[PSU]の水が下層へと沈み込むことが確認された。

この現象をより詳細に説明すると、風が吹くことによって上層の水が A 側（風上）から B 側（風下）へと吹き寄せられ、B 側で水位が上昇し、A 側では水位が低下する。B 側で水位が上昇することにより、上層から下層への鉛直方向の荷重が大きくなる。逆に水位が低下した A 側では上層から下層へ掛かる荷重が減少する。このメカニズムによってプール内部で形成されている上層と下層の境界である躍層が徐々に傾き、数値実験のような結果となった。

成層が弱い場合などは、躍層が傾く前に上下層で混合が生じて水質が一様となることも考えられるが、夏季の東京湾は強い成層が発達することが現地観測からも確認されており（図 5.6, 5.8, 5.10, 5.12 参照）、千葉灯標の周辺においても、今回行った数値実験から得られたような現象が生じていると推測される。

図 2.4 から, 2 ヶ月間で 6 回とかなり頻繁に千葉灯標周辺で上層水の下層への沈み込み現象が確認されている。図 2.5, 2.6 に示したように 2005 年 7, 8 月期において特に南西, 南南西方向からの風が吹く頻度が卓越しており, 沈み込み現象が多いことと吹いてくる風の方向の頻度とがよく一致していることが分かる。

#### 2.4 東京湾を対象とした数値計算

東京湾における数値計算は, 気象庁などが 1960 年代から高潮の予測計算などで用いており, 宇野木ら (1962) は計算機を利用した東京湾における高潮の数値実験を行っている。

現在までに, 東京湾を対象とした数値計算の例は数多く存在するが, おおまかな変遷として, 数値計算はもともと湾内の流動の解析に主眼が置かれていたが, 赤潮や青潮などの湾内における環境問題が注目されるようになるにつれ, 貧酸素水塊の形成過程におけるシミュレーション (塚田ら, 1997) や, 富栄養化現象ならびに赤潮発生のシミュレーション (佐々木ら, 1998), 湾内で原油が流出した場合の拡散現象を数値計算により明らかにした研究 (渡辺など, 1998), 生態系モデルを組み込み湾内における窒素・リンの物質循環を明らかにした研究 (鯉淵ら, 2001), 湾奥部における浮泥堆積の空間分布のシミュレーション (五十嵐ら, 2004) など, 様々な分野において数値計算が応用されるようになってきている。

しかしながら, 東京湾の数値計算が行われる際, 潮汐や河川流入量についてどのように定めたかを明記しているものは多いが, 湾口から入ってくる塩分や水温をどのように定めているのかを示した論文は少ない。仮に一定値を与えても, 計算期間が 2 週間程度で短い場合などは十分な再現性を得られる (田中ら, 1997)。ただ, 半年や 1 年といった長期の計算の場合は, 開境界での水温・塩分は季節ごとに変化するため, 一定値では自然現象を忠実に再現しているとはいえない。

本研究では, 数値計算を行うために境界条件を作成する際, どれくらいの時間間隔で観測データがあれば再現計算の精度を保てるのか, という視点から東京湾口フェリーの観測データを利用して様々な時間間隔の境界条件を作成し, 再現計算を行う。また, 湾口から湾奥に向かって開境界の影響が伝播していく様子や, 成層化など湾内の環境に対して湾口部で与えた条件がどの程度影響するのかなどを示すことで, 境界条件に着目した研究としての価値を出すことを目指している。

## 第3章 3次元数値モデル

### 3.1 数値モデルとは

数値モデルとは、実際には行うことが困難な実験や天気予報のように特定の自然現象の将来予測などを行うために、現象を論理的に単純化して解析的に解くために構成されたコンピュータプログラム全般のことを指す。

数値モデルを用いて沿岸域の流動の再現計算を行う利点は、観測ではある特定の地点における点データしか得られないのに対して、沿岸域全体における空間的かつ時系列のデータを得られることにある。

### 3.2 WESTech model

#### 3.2.1 WESTech model の概要

本研究で使用する、WESTech model の概要について記す。WESTech model は、佐々木 (1996) によって開発された3次元数値モデルを基礎にして、鯉渕 (2001) が生態系モデルを追加ならびにプログラムの再実装を行い、さらに小野澤 (2005)、神野 (2007) によって干出・冠水スキーム、底面熱収支・底面反射モデルの追加や差分精度の向上が図られ、現在に至っている。

WESTech model の基礎方程式は、流速に関しては Navier-Stokes 方程式および連続の式を用い、水温・塩分に関しては移流拡散方程式を用いている。詳細な方程式の導出過程や計算スキームの説明は佐々木 (1996)、鯉渕 (2001)、小野澤 (2005)、神野 (2007) を参照頂きたい。

以下の節では、流速場の方程式および水温場・塩分場の方程式について、簡潔に記す。

#### 3.2.2 流速場の方程式

直交座標系における3次元の Navier-Stokes 方程式は次のようになる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = fv - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( A_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( A_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = fu - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( A_x \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( A_y \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left( A_x \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( A_y \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (3.3)$$



ここに、 $u$ 、 $v$ 、 $w$ はそれぞれ $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向の流速、 $f$ はコリオリ係数、 $p$ は圧力、 $\rho$ は密度、 $g$ は重力加速度、 $A_x$ 、 $A_y$ 、 $A_z$ は各々、 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向の渦動粘性係数である。

ここで $z$ 方向の運動方程式のうち、加速度項である左辺と右辺の粘性項は重力加速度に比べ無視できると仮定（静水圧近似）すると、式（3.4）のようになる。

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g \quad (3.4)$$

次に $\rho$ および $p$ を参照値 $\rho_0$ 、 $p_0$ と偏差 $\rho'$ 、 $p'$ で表すと式（3.5）、（3.6）のように書ける。

$$\rho = \rho_0 + \rho' \quad (3.5)$$

$$p = p_0 + p' \quad (3.6)$$

水面では $z = \eta$ （図 3.1 参照）で大気圧 $p = 0$ と仮定できるので、式（3.4）は以下のようにになる。

$$p_0(z) = \rho_0 g(\eta - z) \quad (3.7)$$

$$0 = -\frac{\partial p'}{\partial z} - \rho' g \quad (3.8)$$

さらに、式（3.8）より $z$ における $p'$ は式（3.9）のようになる。

$$p' = -\int_z^{\eta} \rho' g dz \quad (3.9)$$

式（3.9）を式（3.1）、（3.2）に代入し、密度の変化は十分に小さいと仮定して Boussinesq 近似を用いると、基礎方程式は式（3.10）、（3.11）のようになる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x} \int_z^{\eta} \rho' g dz + \frac{\partial}{\partial x} (A_x \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (A_y \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \frac{\partial u}{\partial z}) \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = fu - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial y} \int_z^{\eta} \rho' g dz + \frac{\partial}{\partial x} (A_x \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (A_y \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \frac{\partial v}{\partial z}) \quad (3.11)$$

一方、連続式は式（3.12）で表される。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.12)$$

次に鉛直座標を水面で $\sigma = 1$ 、海底で $\sigma = 0$ となる $\sigma$ 座標系（図 3.1 参照）に変換する。

すなわち、 $\sigma$ 座標系と直交座標系の関係は基準面からの水深 $h$ を用いて式(3.13)で表される。

$$\sigma = \frac{z+h}{h+\eta} \quad (3.13)$$

この変換によって、連続式は次のように変換される。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} + \frac{\partial(H\dot{\sigma})}{\partial z} = 0 \quad (3.14)$$

ただし、

$$\dot{\sigma} = \frac{\partial \sigma}{\partial t} + u \frac{\partial \sigma}{\partial x} + v \frac{\partial \sigma}{\partial y} + w \frac{\partial \sigma}{\partial z} \quad (3.15)$$

以上を用いて最終的に得られる、 $\sigma$ 座標系における運動方程式を以下に示す。

$$\begin{aligned} \frac{\partial(Hu)}{\partial t} + \frac{\partial(Huu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hvu)}{\partial y} + \frac{\partial(H\dot{\sigma}u)}{\partial \sigma} \\ = Hfv - \frac{H}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( A_{\sigma} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + HA_h \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (3.16)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(Hv)}{\partial t} + \frac{\partial(Huv)}{\partial x} + \frac{\partial(Hvv)}{\partial y} + \frac{\partial(H\dot{\sigma}v)}{\partial \sigma} \\ = Hf(-u) - \frac{H}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( A_{\sigma} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + HA_h \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (3.17)$$

ただし、

$$-\frac{1}{\rho} \nabla p = -\frac{1}{\rho} \left[ (\rho_0 + \rho' \sigma) g \nabla_{\sigma} \eta + \rho' g (\sigma - 1) \nabla_{\sigma} h + \nabla_{\sigma} \left( H \int_{\sigma}^1 \rho' g d\sigma \right) \right] \quad (3.18)$$

$$H = \eta + h \quad (3.19)$$

また、 $A_h, A_{\sigma}$ はそれぞれ、水平、鉛直方向の渦動粘性係数である。

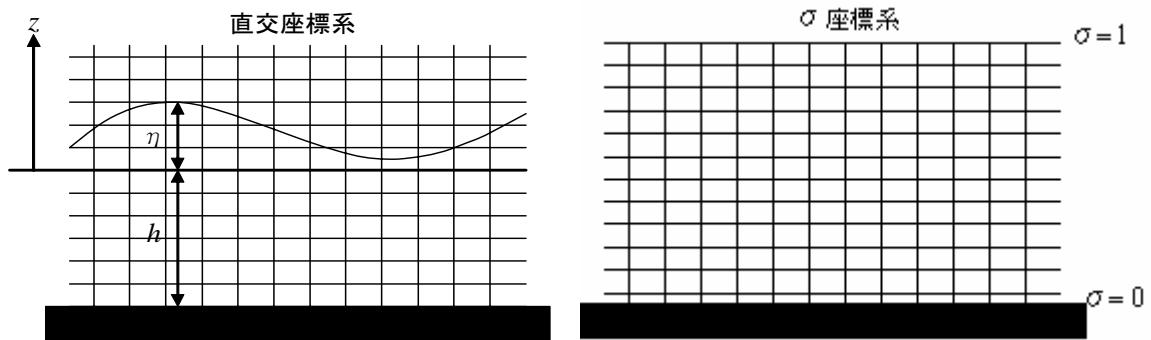


図 3.1 直交座標系および  $\sigma$  座標系の模式図

### 3.2.3 水温場・塩分場の方程式

水温，塩分に関する輸送方程式は  $\sigma$  座標系において，それぞれ式 (3.20)，(3.21) のように表される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial(HT)}{\partial t} + \frac{\partial(uHT)}{\partial x} + \frac{\partial(vHT)}{\partial y} + \frac{\partial(\dot{\sigma}HT)}{\partial \sigma} \\ = \frac{1}{H^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( K_v \frac{\partial(HT)}{\partial \sigma} \right) + HK_h \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{\rho C_p} \frac{dq(\sigma)}{d\sigma} \end{aligned} \quad (3.20)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(HS)}{\partial t} + \frac{\partial(uHS)}{\partial x} + \frac{\partial(vHS)}{\partial y} + \frac{\partial(\dot{\sigma}HS)}{\partial \sigma} \\ = \frac{1}{H^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( K_v \frac{\partial(HS)}{\partial \sigma} \right) + HK_h \left( \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} \right) - RS \end{aligned} \quad (3.21)$$

ここに， $K_h$  は水平拡散係数， $K_v$  は鉛直拡散係数である。また， $C_p$  は定圧モル比熱， $q$  は  $\sigma$  座標に対して定義された日光の下向き放射量である。 $R$  は河川流量 [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] である。

水温に関しては水面における顕熱輸送・潜熱輸送・正味長波放射，および日射の反射・吸収を，塩分に関しては降水・蒸発を，それぞれ水面境界条件として扱っている。顕熱輸送量・潜熱輸送量は近藤 (1994) のバルク式に，長波放射量は Kim (1992) によって日本近海で最も適当であることが示された式に従って評価する。

## 第4章 数値実験

### 4.1 数値実験の概要

本研究で行う数値実験は以下に示す、5種類である。

- ① 本研究で使用する WESTech model にて東京湾の再現計算を行い、数値実験を行うのに十分な再現性を有しているかどうかを確認する。
- ② 東京湾口フェリーにて観測された水温・塩分のデータから、1日毎に観測された場合、3日毎に観測された場合、1週間毎に観測された場合、2週間毎に観測された場合、1ヶ月毎に観測された場合を仮定して開境界条件を作成し、①と同様の東京湾の再現計算を行う。
- ③ 湾口フェリーから得られた水温の開境界条件のうち、7月20日から27日にかけて実測では水温が低下している部分を、水温が低下しなかった場合と、逆に上昇した場合の境界条件を作成し、短期的に変動した境界での水温が、湾奥に向かってどのように伝播するかを数値実験にて確かめる。
- ④ 湾口フェリーから得られた水温の境界条件を全体的に $+2[^\circ\text{C}]$ 、 $+1[^\circ\text{C}]$ 、 $-1[^\circ\text{C}]$ 、 $-2[^\circ\text{C}]$ した場合の境界条件をそれぞれ作成し、長期的に変動した境界での水温が、湾奥に向かってどのように伝播するかを数値実験にて確かめる。塩分の境界条件においても同様に、全体的に $+2[\text{PSU}]$ 、 $+1[\text{PSU}]$ 、 $-1[\text{PSU}]$ 、 $-2[\text{PSU}]$ した場合の境界条件をそれぞれ作成し、長期的に変動した境界での塩分が、湾奥に向かってどのように伝播するかを数値実験にて確かめる。
- ⑤ 湾口フェリーで計測されているのは、表層の水温と塩分であり、鉛直方向には JODC の水温・塩分統計を参考に分布させている。夏季の場合、湾内において成層が発達することはよく知られているが、境界から鉛直方向の塩分濃度が一定の海水が流入した場合、湾内の成層の発達にどのような影響を及ぼすか、数値実験にて確かめる。また、底層塩分を表層塩分の $+3[\text{PSU}]$ と定めて、その間を線形補間した三角形分布の境界塩分を与えた場合に、湾内の成層の発達にどのような影響を及ぼすか、数値実験にて確かめる。

## 4.2 数値実験の条件

本研究では、数値実験ごとに境界条件を変化させるが、初期条件や気象条件についてはすべての実験で共通である。表 4.1 に共通の実験条件について示す。

表 4.1 数値実験の条件

計算期間	2005.5.1～2005.8.31 (時間刻み幅 : dt = 200[s])	
初期条件	塩分 [PSU]	表層～10m : 31.0, 10m～底層 : 33.0
	水温[°C]	表層 : 16.96, それ以下は JODC* の水温統計をもとに与えた。
格子数	東西方向 : 50, 南北方向 : 62, 鉛直方向 : 20	
格子間隔	東西・南北方向 : 1000m, 鉛直方向 : 0.25～5.0m	
河川流量	水文水質データベースもしくは各河川事務所の観測データを参照。 荒川, 旧江戸川, 中川, 多摩川, 鶴見川	
気象条件	東京管区気象台の観測データを参照。	

\* JODC : 日本海洋データセンター ([http://www.jodc.go.jp/index\\_j.html](http://www.jodc.go.jp/index_j.html))

## 4.3 境界条件

本研究の数値実験に使用した東京湾の開境界条件は、神奈川県・久里浜港と千葉県・金谷港を結ぶ東京湾フェリー“かなや丸”に設置された機器によって計測されている表層の水温・塩分の観測値をもとに作成した。

図 4.1, 4.2 に水温・塩分の境界条件をそれぞれ示す。本研究では序論でも示したように、内湾の数値計算を行う上で、境界部における観測頻度を提言することを目的としている。2005 年 5～8 月まで 1 時間毎にある東京湾口での観測データから、図 4.1, 4.2 に示したように 1 日毎, 3 日毎, 1 週間毎, 2 週間毎, 1 ヶ月毎に観測値を抽出して、その間を線形補完して境界条件を作成した。

データの抽出間隔が 2 週間を超えると、水温の場合 7 月 20 日から 27 日まで短期的に水温が低下している現象を捉えられていない。他にも、8 月 10 日を中心とした水温の低下, 8 月 23 日を中心とした水温の低下も捉えることができていない。

塩分の場合は、データの抽出間隔が 1 週間を超えると 4, 5 日の周期で起こる塩分の上昇・下降現象を捉えることができなくなる。また、抽出間隔が 2 週間を超えると 8 月 19 日から

30日までに発生している塩分の変動を捉えることができていないことが分かる。

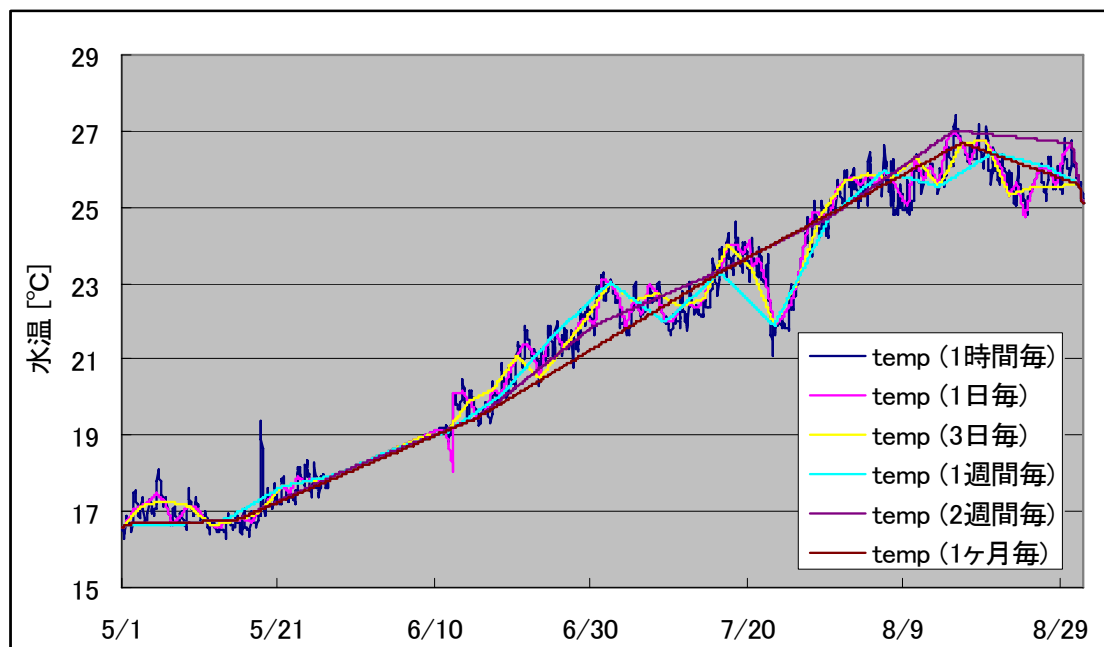


図 4.1 水温の境界条件

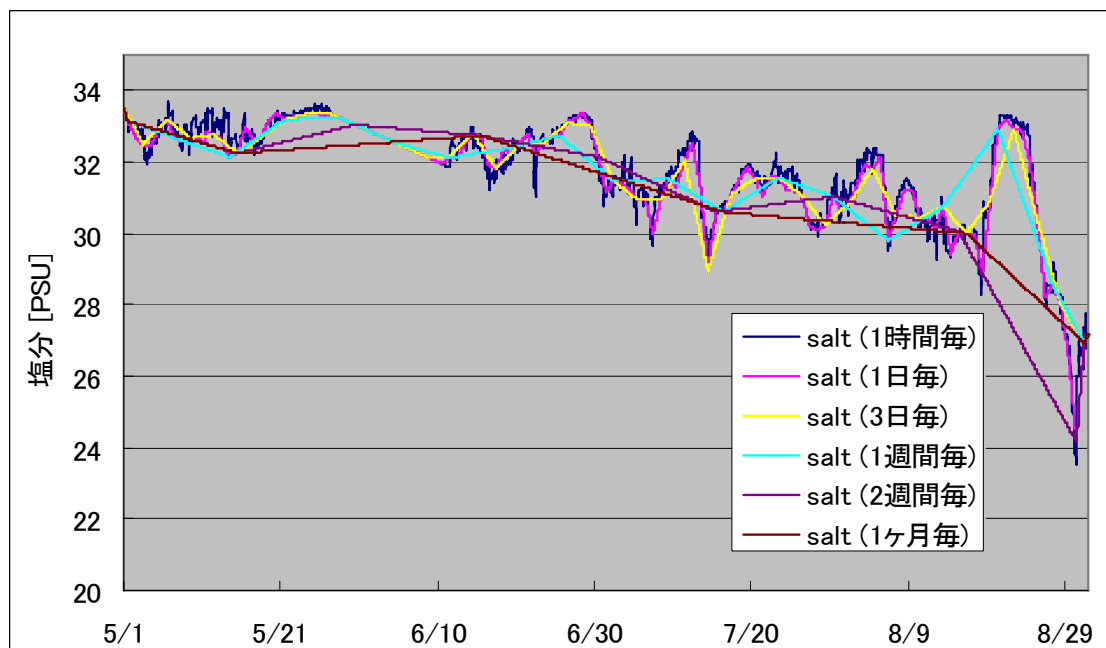


図 4.2 塩分の境界条件



データを抽出する時間は抽出間隔にかかわらず、12:00と定めた。実際に観測を行なう場合、特殊な場合を除いて日中(6:00~18:00)に行われるであろうと想定し、その中心時間帯である12:00のデータを抽出するのが妥当と判断した。

東京湾口フェリーの運行時間は6:20~19:20までであるため、1時間毎の境界条件データも観測データがない20:00~翌5:00までに関しては、線形補間を行っている。また、5月28日~6月10日まではデータの欠測があるため、この間も前後の値から線形補間を行っている。

本研究ではほかにも、水温を短期的に変動させた場合の数値実験、水温・塩分を長期的に変動させた場合の数値実験も併せて行った。図4.3に短期的に水温を変動させるために用いた境界条件のグラフを、図4.4、4.5に水温・塩分を長期的に変動させるために用いた境界条件のグラフをそれぞれ示す。

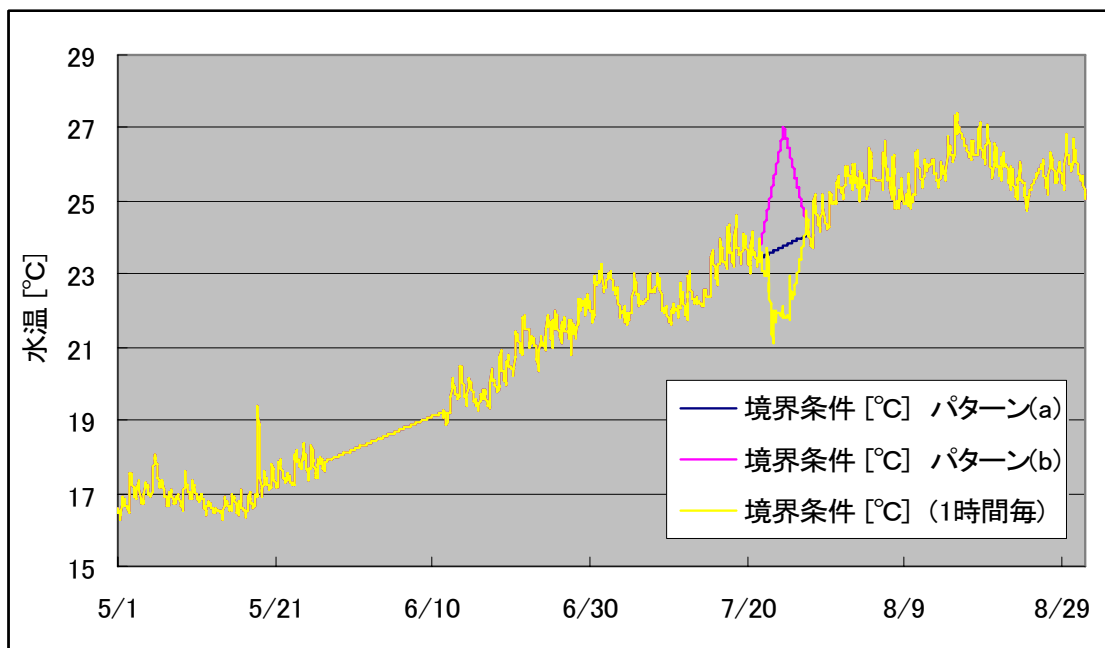


図 4.3 水温を短期的に変動させた場合

図 4.3 は 7 月 20 日から 27 日まで水温が短期的に下降して上昇している現象に着目し、7 月 20 日から 27 日にかけて水温が下降しなかった場合（パターン(a)）、逆に 7 月 20 日から 27 日にかけて水温が 27[°C]まで上昇して下降する場合（パターン(b)）と、実際の観測に基づいて得られた境界条件を比較したものである。それぞれの境界条件にて計算を行い、湾口における短期的な水温変動が湾奥（千葉灯標）での水温変動にどのような影響を及ぼすかについて考察を行う。

図 4.4 は、実際の湾口での水温の観測結果に、それぞれ+1 [°C]、+2 [°C]、-1 [°C]、-2 [°C] した場合の境界条件を示している。図 4.5 は、実際の湾口での塩分の観測結果に、それぞれ+1 [PSU]、+2 [PSU]、-1 [PSU]、-2 [PSU] した場合の境界条件を示している。ふたつのグラフのように長期的に水温や塩分を上げたり下げたりした場合に、湾奥（千葉灯標）において水温・塩分がどのように変動するかを考察する。

また、本研究では塩分の鉛直分布は、JODC による塩分統計をもとに近似式を作成し与えているが、図 4.6 のように一様に分布させた場合と、底面塩分（水深 100[m]）が表層塩分の+3[PSU]となるように塩分を三角形に分布させた場合の計算を行い、湾内において塩分がどのように変動するかを考察する。

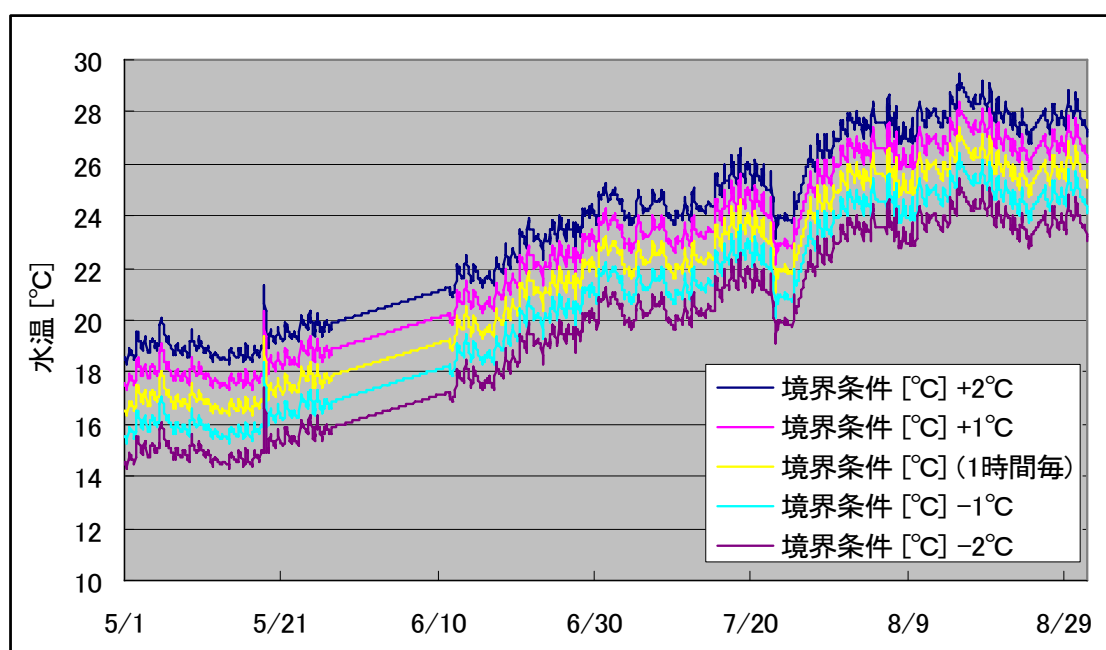


図 4.4 水温を長期的に変動させた場合

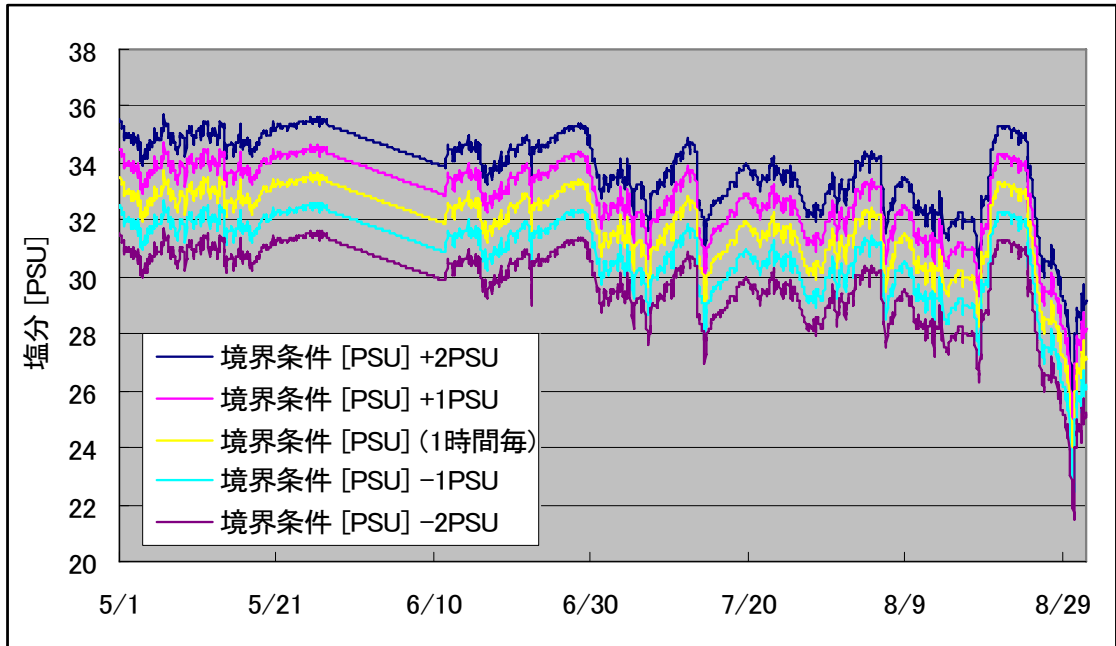


図 4.5 塩分を長期的に変動させた場合

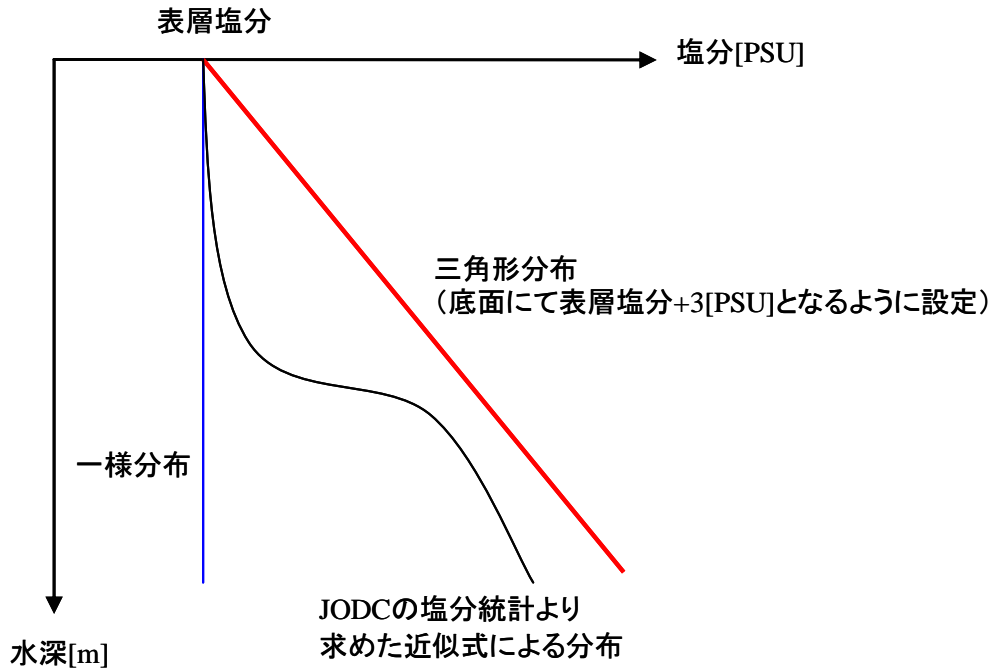


図 4.6 塩分の鉛直分布を変化させた場合

#### 4.4 河川からの流入条件

今回の数値実験では、東京湾に流入する河川のうち旧江戸川、荒川、中川、多摩川、鶴見川の計5河川について流量を与え、計算を行った。

多摩川、鶴見川については国土交通省・京浜河川事務所より2005年5～8月の流量観測データを御提供頂き、それをもとに河川流入量を定めた。旧江戸川、荒川、中川については水文水質データベースより2005年の水位観測データを入手し、さらに流量と水位の両方の観測を行っていた2001年の観測データから水位と流量の関係式を導き、2005年の各河川における河川流入量を推定した。図4.7～4.9に旧江戸川、荒川、中川の水位と流量の関係を表したグラフと近似式をそれぞれ示す。

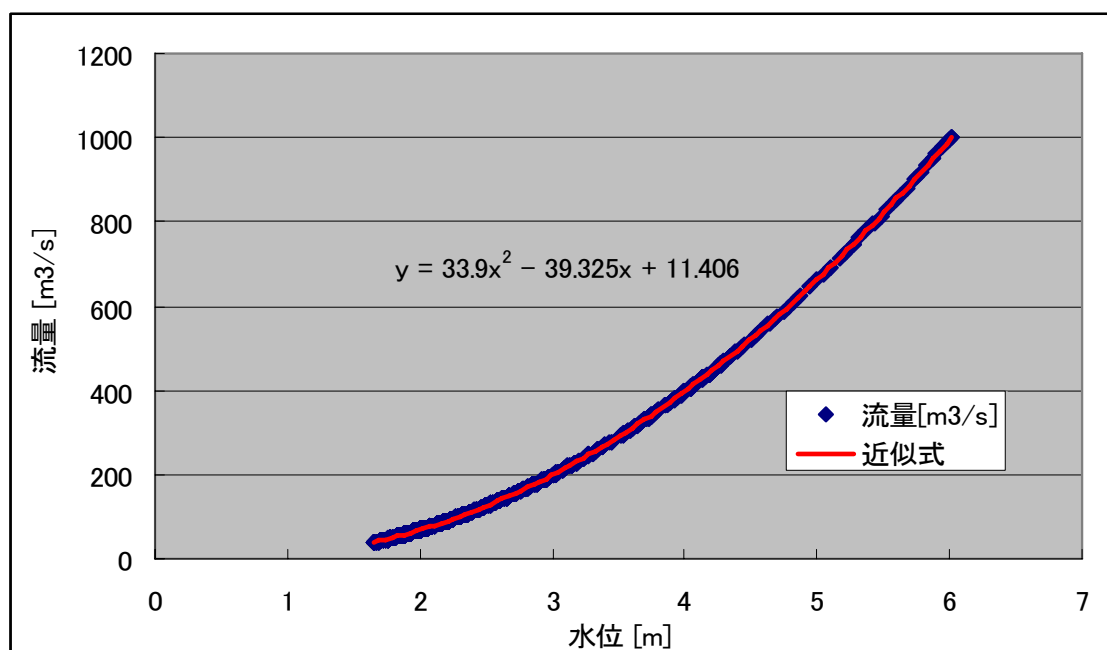


図 4.7 旧江戸川の水位と流量の関係 (2001 年)

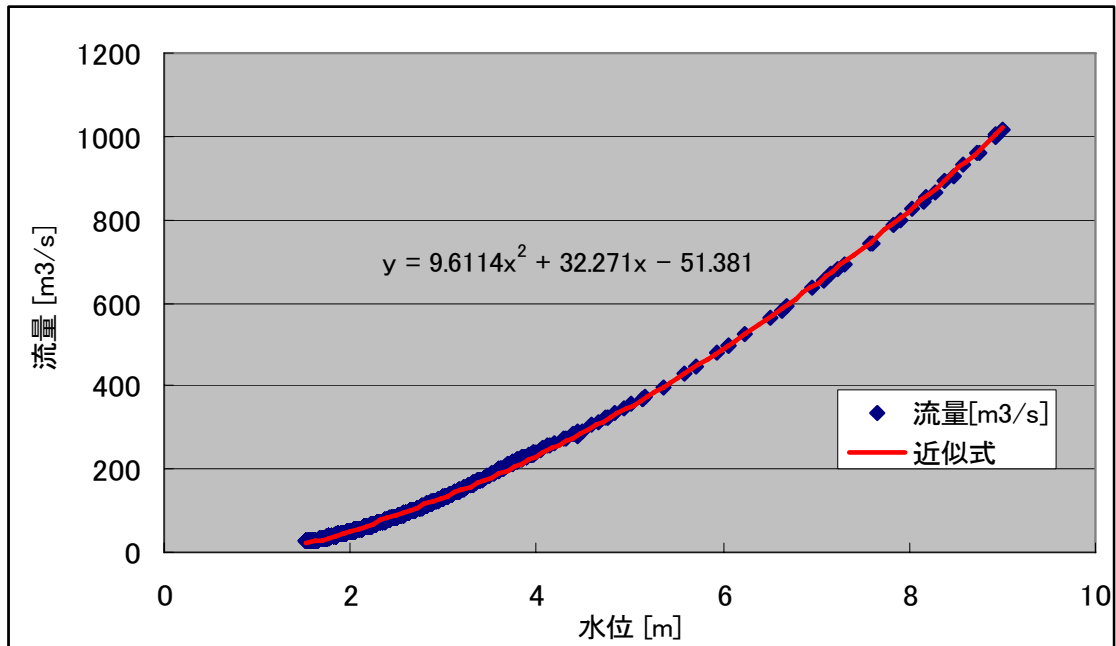


図 4.8 荒川の水位と流量の関係 (2001 年)

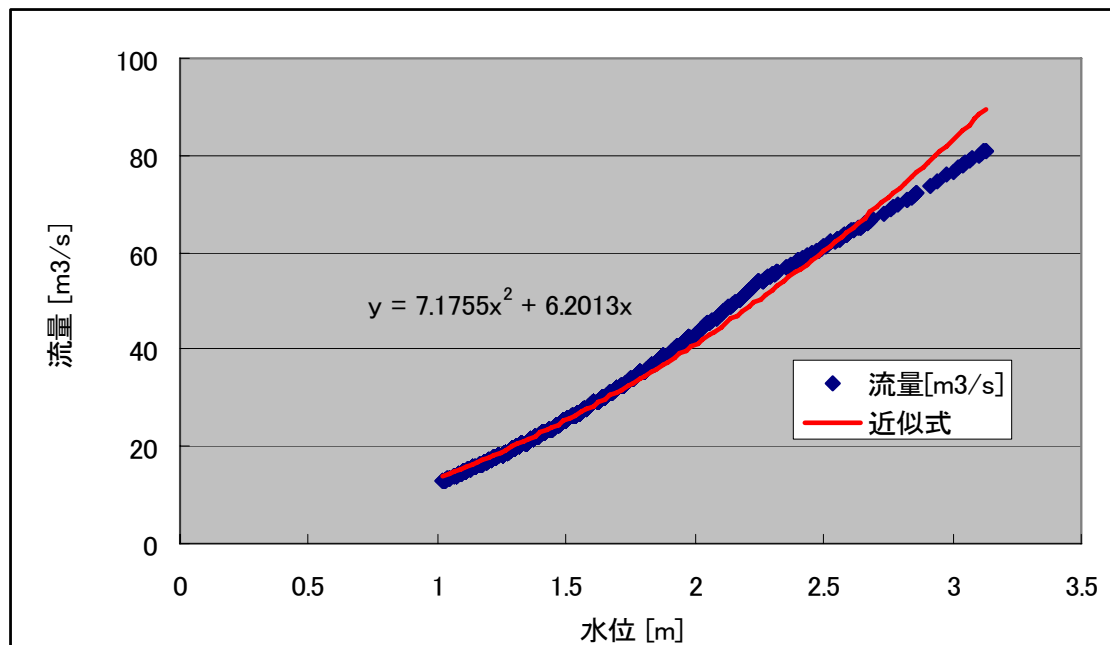


図 4.9 中川の水位と流量の関係 (2001 年)

ただし、各河川における水位と流量の関係は、出水による地形変動や河道内の改修工事などにより、河道断面の形状が変形することによって変化する恐れがある。今回のケースでも 2001 年の観測データから 2005 年の流量を導いていることについては、十分留意する必要があるように思われる。



## 第5章 結果・考察

### 5.1 東京湾の再現計算

図 5.1～5.12 までに、東京湾の再現計算の結果と実測結果を示す。

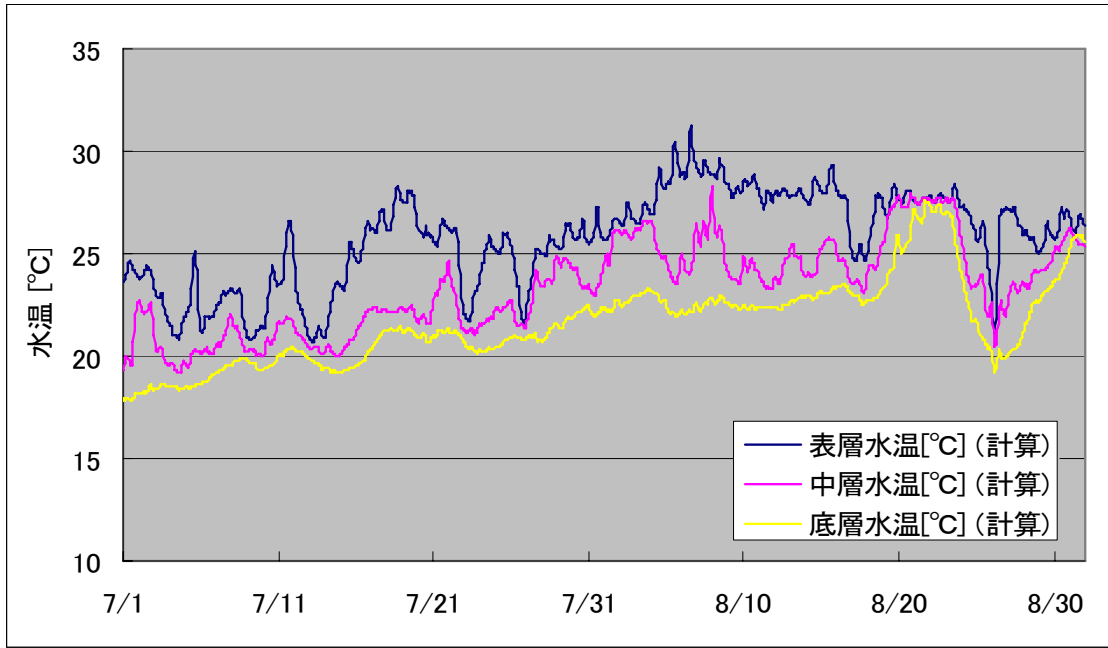


図 5.1 水温の再現計算結果

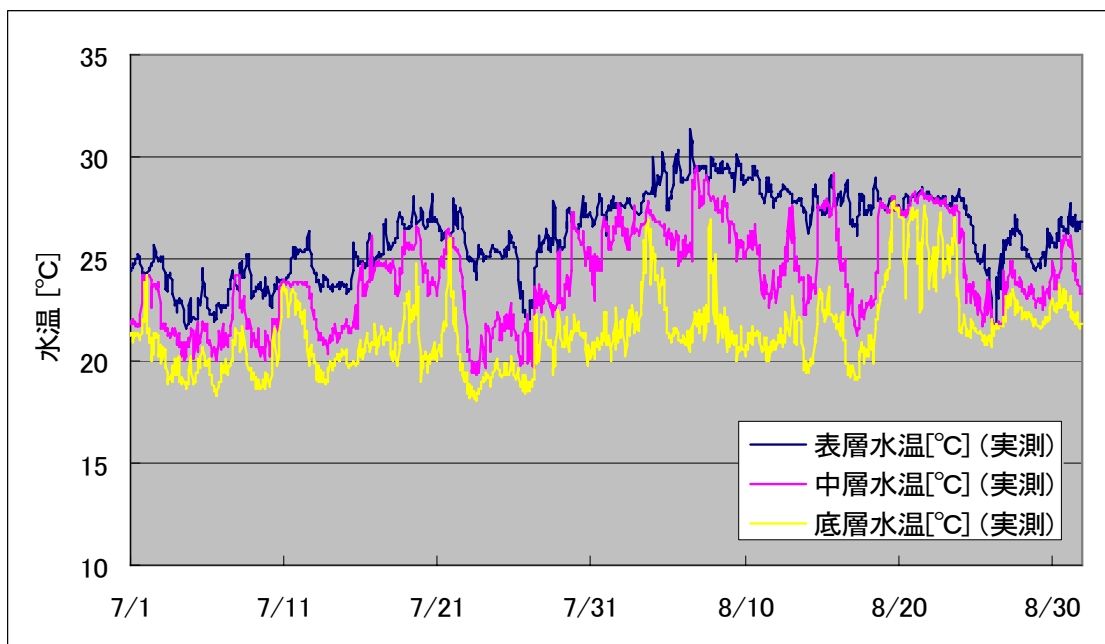


図 5.2 千葉灯標における水温の実測結果

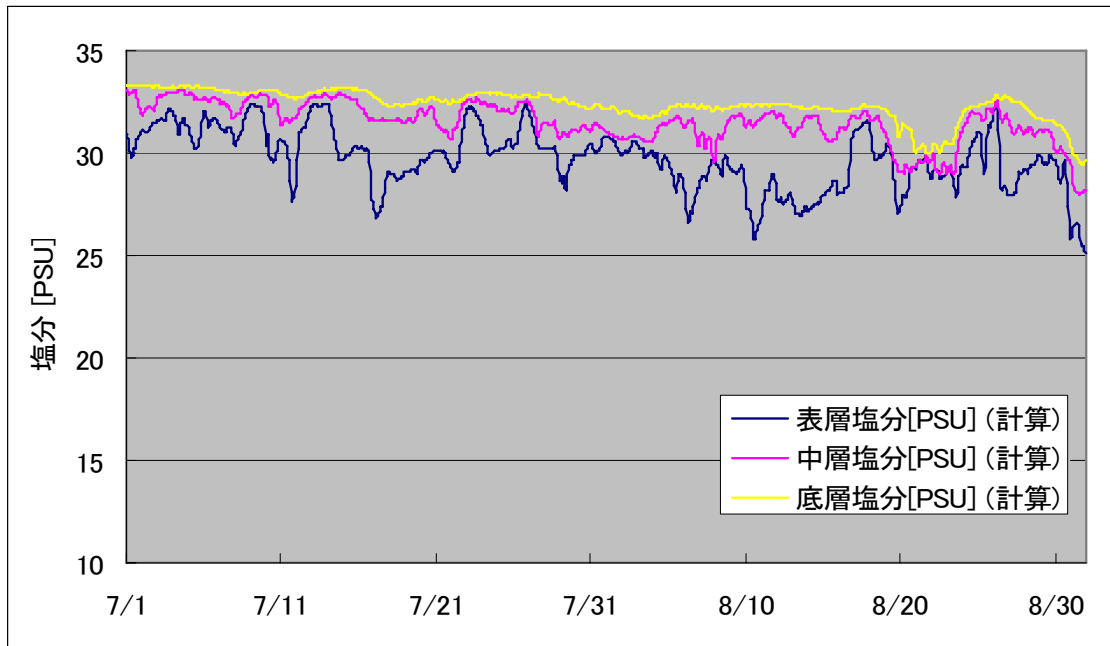


図 5.3 塩分の再現計算結果

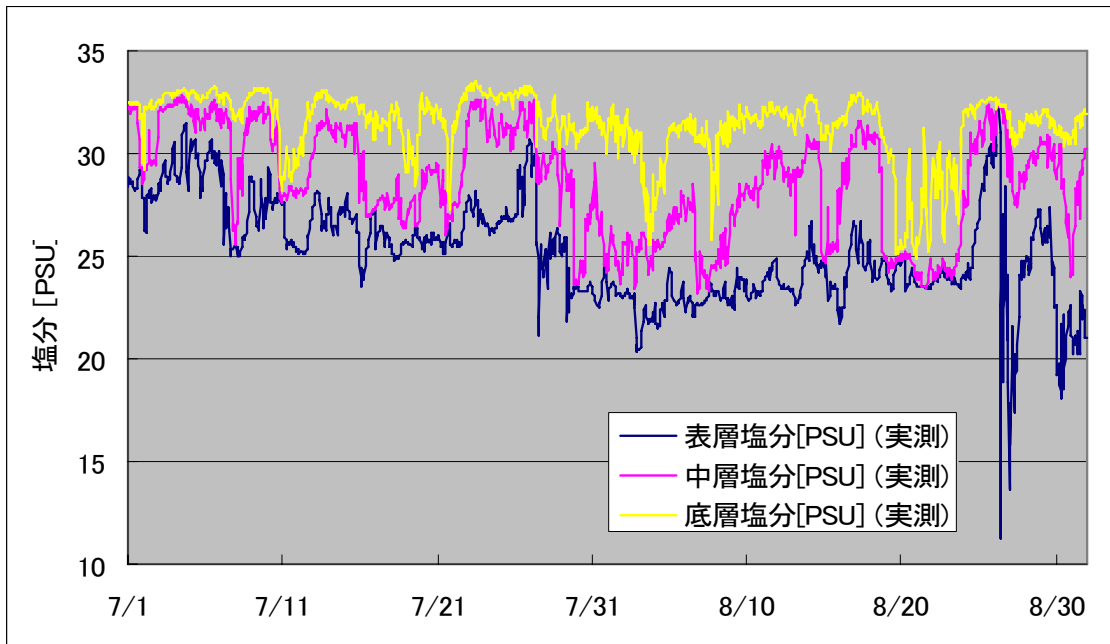


図 5.4 千葉灯標における塩分の実測結果

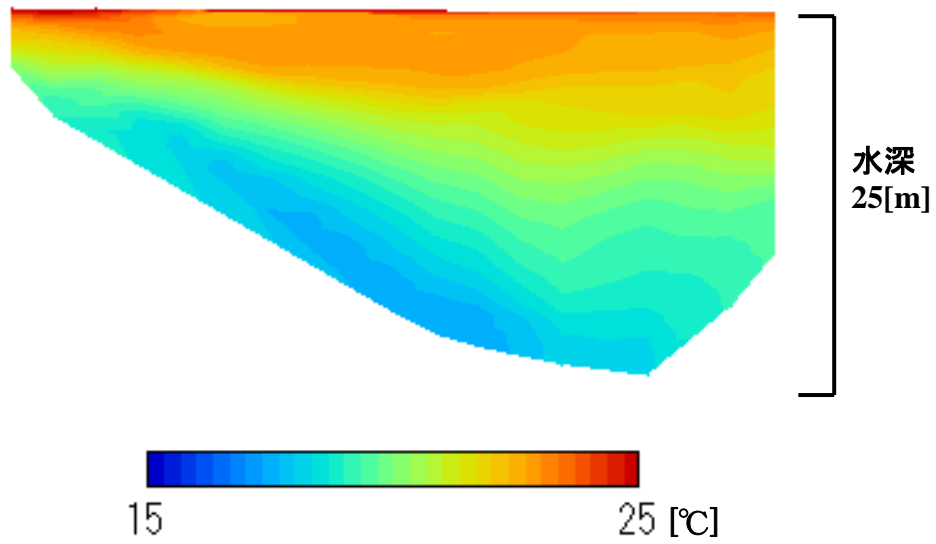


図 5.5 東京湾断面における水温の再現計算結果 (7月5日)

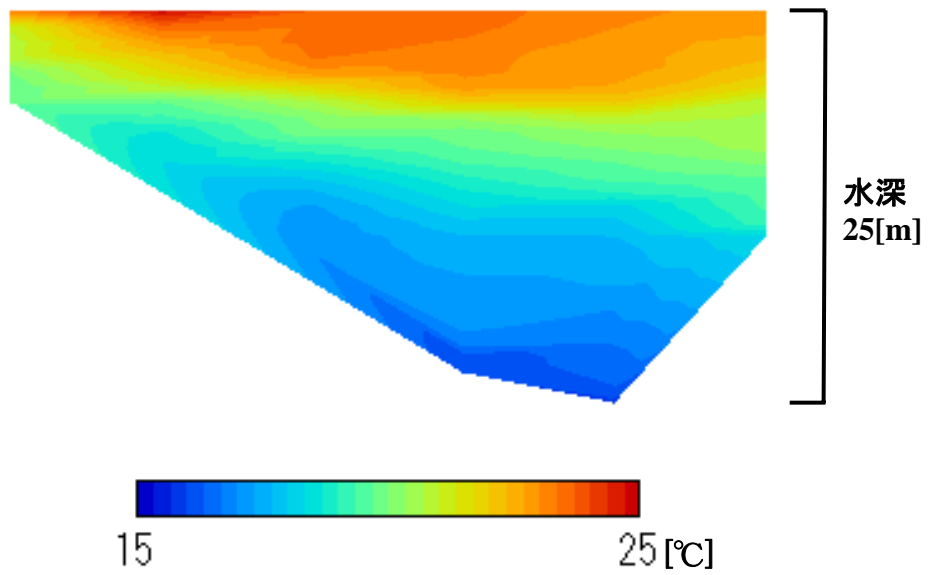


図 5.6 東京湾断面における水温の実測結果 (7月5日)

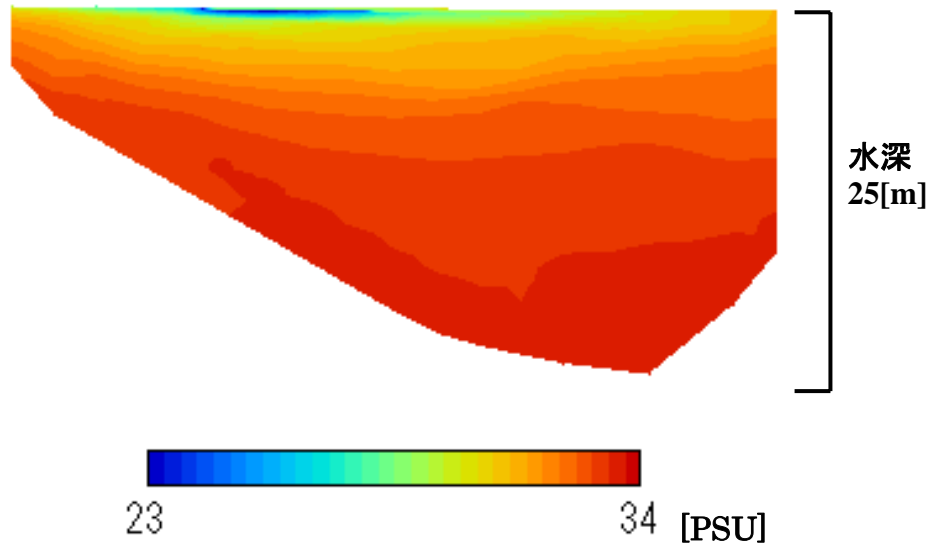


図 5.7 東京湾断面における塩分の再現計算結果 (7月5日)

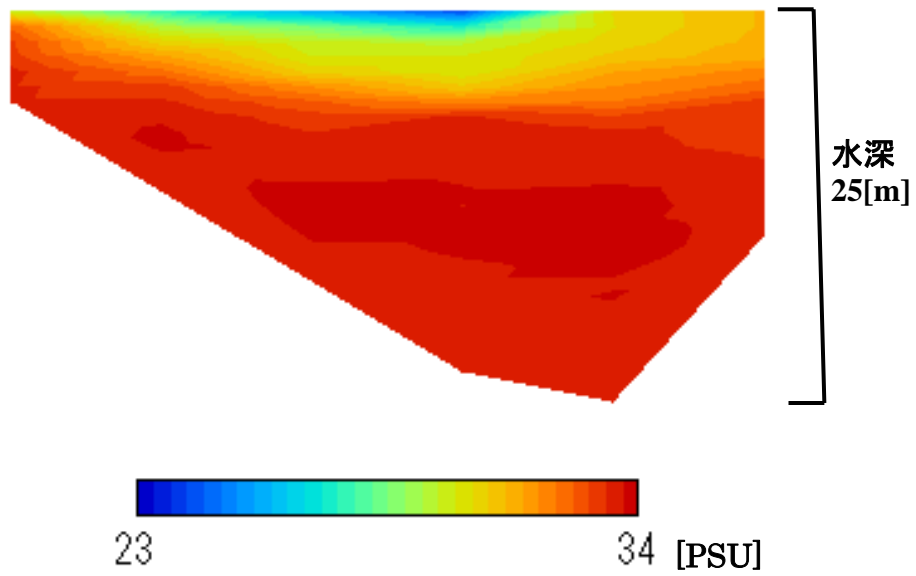


図 5.8 東京湾断面における塩分の実測結果 (7月5日)

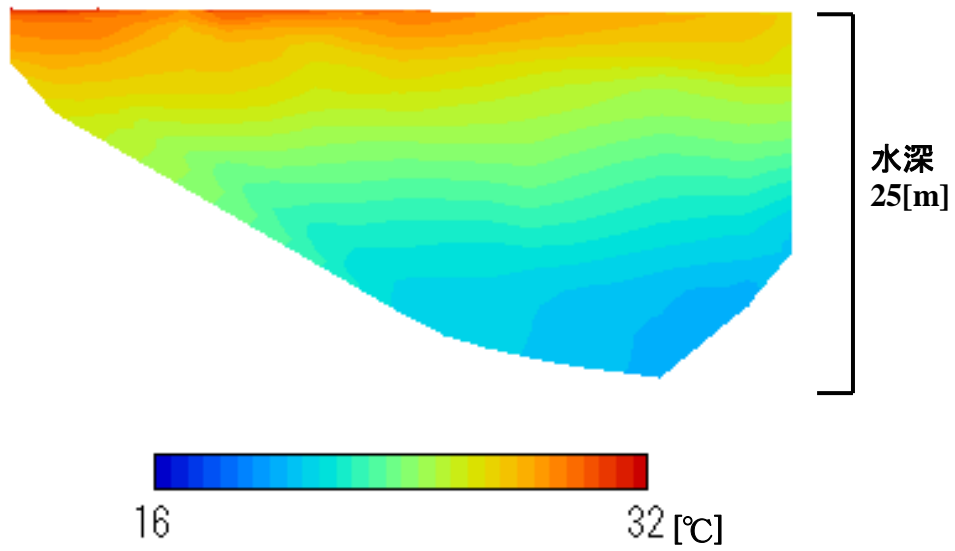


図 5.9 東京湾断面における水温の再現計算結果 (8月8日)

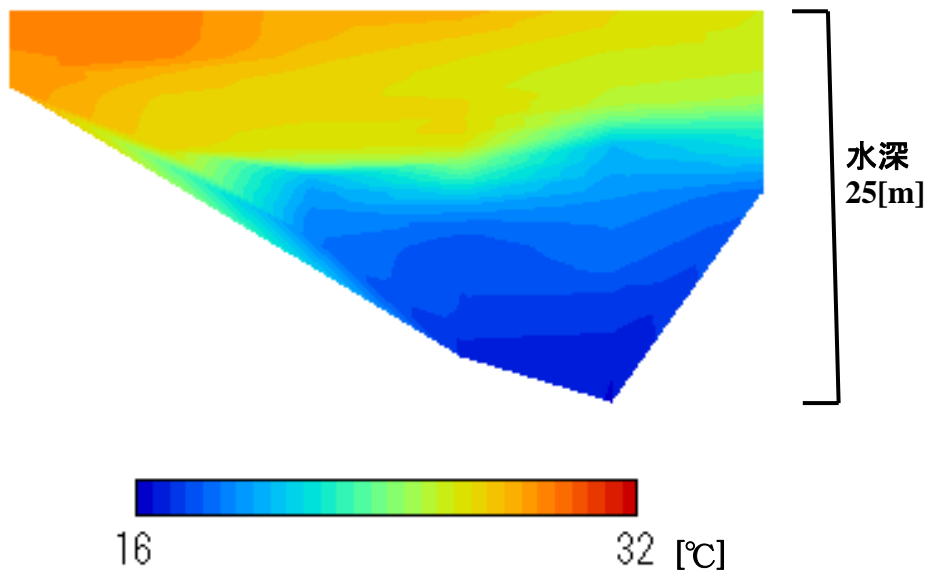


図 5.10 東京湾断面における水温の実測結果 (8月8日)

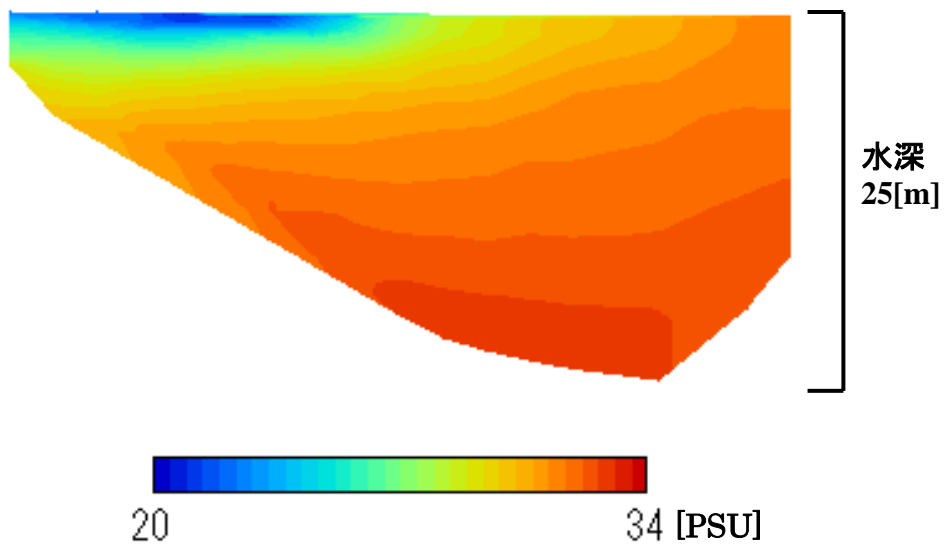


図 5.11 東京湾断面における塩分の再現計算結果 (8月8日)

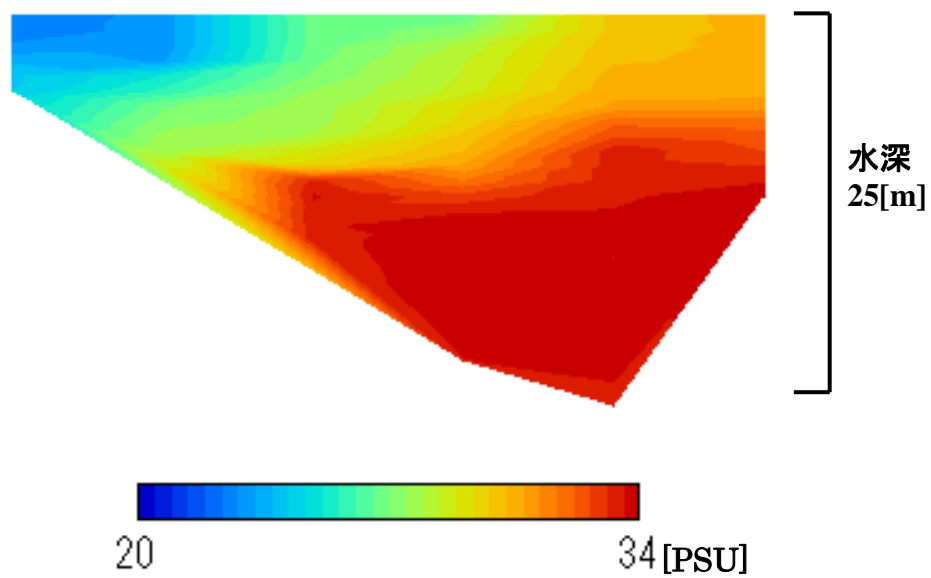


図 5.12 東京湾断面における塩分の実測結果 (8月8日)



## 考察

図 5.1～5.4 を見ると、2.3 の千葉灯標での実測結果を解析した際に示したような、風によって水温や塩分が上昇あるいは下降する変動が再現できていることが分かる。特に表層水温と中層水温の結果は、実測値とほぼ完全に一致するほど再現性が高い。ただ、水温・塩分ともに底層の再現性はよくない。

図 5.6 の 7 月における水温の実測結果から、水深 6[m]付近において、水温成層が発達していることが分かる。これは図 5.5 から細かな水温の違いはあるものの、計算においても再現できていると判断できる。図 5.8 の 7 月における塩分の実測結果から水深 6[m]付近において塩分成層が発達していることが分かる。図 5.7 では実測結果によく似た結果を示しているものの、成層の発達が弱い。また、図 5.8 では水深 15～18[m]でもっとも塩分濃度の高い水塊が存在していることが分かる。しかし、図 5.7 の再現計算においてはそれを再現できてはいない。

このことは、図 5.9～5.12 に示した 8 月の再現計算と実測の結果からもいえる。特に 8 月の実測結果では、水深 10[m]付近に 7 月の実測結果よりもより発達した密度成層が確認できるが、計算結果では成層の再現性が落ちてしまう。

これは、水平方向に 1[km]で取っているメッシュの大きさの問題や、鉛直方向の層数が計算の再現性に関係しているものと考えられる。また、実際の現象と比べて、計算では鉛直方向の水が混ざりやすいために、明確な成層ができにくいものと考えられる。この現象を確かめるため、東京湾の地形を参考にした 20[km]×20[km]×15[m]のプール（開境界なし）で数値実験を行った。数値実験の内容は、2.3 で説明したものと同一である。ただし、メッシュの大きさのみ変化させ、プール内部における塩分濃度分布がどのように変化するかを観察した。メッシュの大きさは水平方向に 2[km]で鉛直方向に 1.5[m]のもの、水平方向に 1[km]で鉛直方向に 0.75[m]のもの（本研究の数値実験で採用しているメッシュサイズ）、さらに水平方向に 0.5[km]で鉛直方向に 0.3[m]のもの 3 種類である。数値実験の結果を図 5.13 に示す。各図は風の吹く方向に沿ってプール断面の塩分濃度を示しており、初期状態から風が 4 日間吹き続けた直後の結果である。

2.3 の千葉灯標での観測結果の解析において、湾内が成層化している場合、南寄りの風が吹くことによって成層が傾く現象について記述した。今回のプール実験においても、同様の現象が発生することが期待される。まず、図 5.13(b)についてであるが、風速 10[m/s]の風が 4 日間吹き続けたにもかかわらず、プール内の水の鉛直方向の動きがまったく見られ

ない。これは、メッシュサイズが大きすぎたために、現象を再現できていないものと判断される。次に本研究の数値実験で使用したメッシュサイズである図 5.13(c)についてであるが、風が吹くことにより、表層の水が底層に潜り込み、逆に底層の水が湧昇してきているのが分かる。しかしながら、図の中央部において、塩分濃度の高い水と低い水が混ざり合い、塩分濃度の高い水と低い水の境界である躍層が崩れてしまっていることが確認される。メッシュサイズを細かくした図 5.13(d)の場合、塩分濃度の高い水と低い水の混合がほとんどおきず、躍層が保たれている。このことから、メッシュサイズを細かくすることが、成層化の再現性をあげる有効な手段であることが確認された。また、図 5.1～5.4 を比較した場合に、底面の水温と塩分が実測値と比べて値の変動が小さく再現性が低いと記述したが、図 5.13(d)から、メッシュサイズを細かくすることで、底面の水もよりダイナミックに動くことが確認された。

本研究では一般的な家庭用コンピュータを用いて計算を行っており、メッシュサイズを細かくしすぎた場合、計算時間が膨大なものになってしまう。そのため、成層の再現性に若干の問題点はあるものの、風による成層の傾きなどは再現可能な  $1[\text{km}] \times 0.75[\text{m}]$  というメッシュサイズを採用した。

以上より、成層の再現性が弱いという点はあるものの、水温・塩分の時系列での変動や、風による成層の傾きなどはよく再現できており、大局的に見て、WESTech model を用いた東京湾の数値計算は、十分な再現性を有していると判断される。

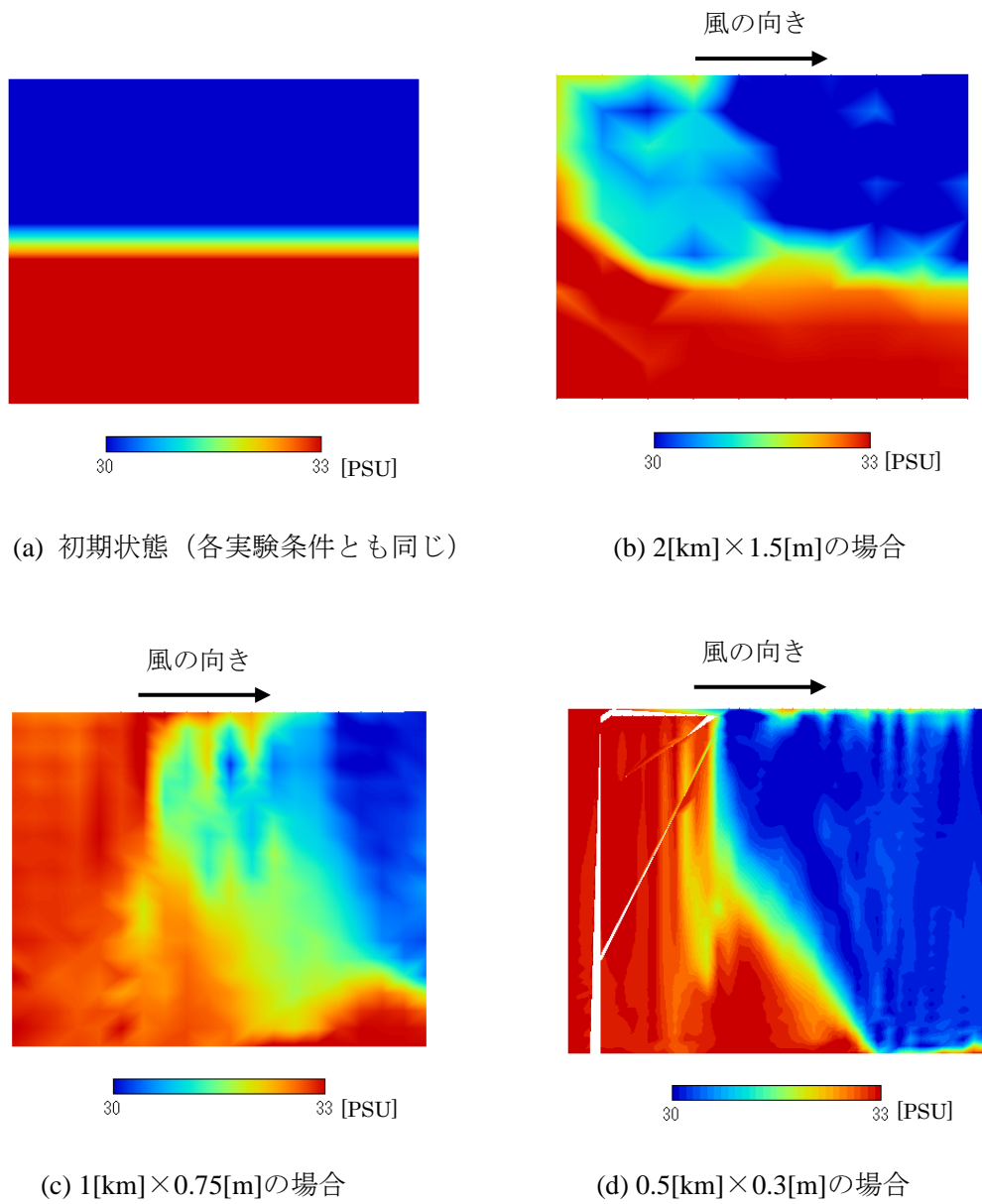


図 5.13 メッシュサイズの違いによる再現性の違い

## 5.2 境界条件の時間間隔を変えた場合

図 5.14～5.49 に境界条件の時間間隔を変えた場合の水温・塩分の計算結果を示す。

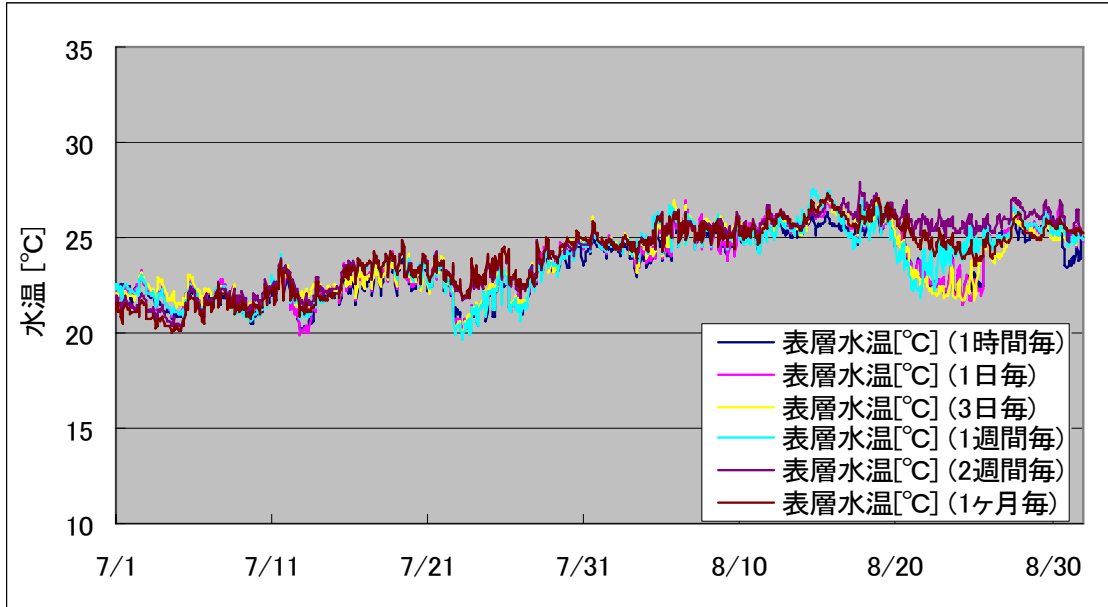


図 5.14 境界条件の時間間隔を変えた場合の表層水温の計算結果 (St.1)

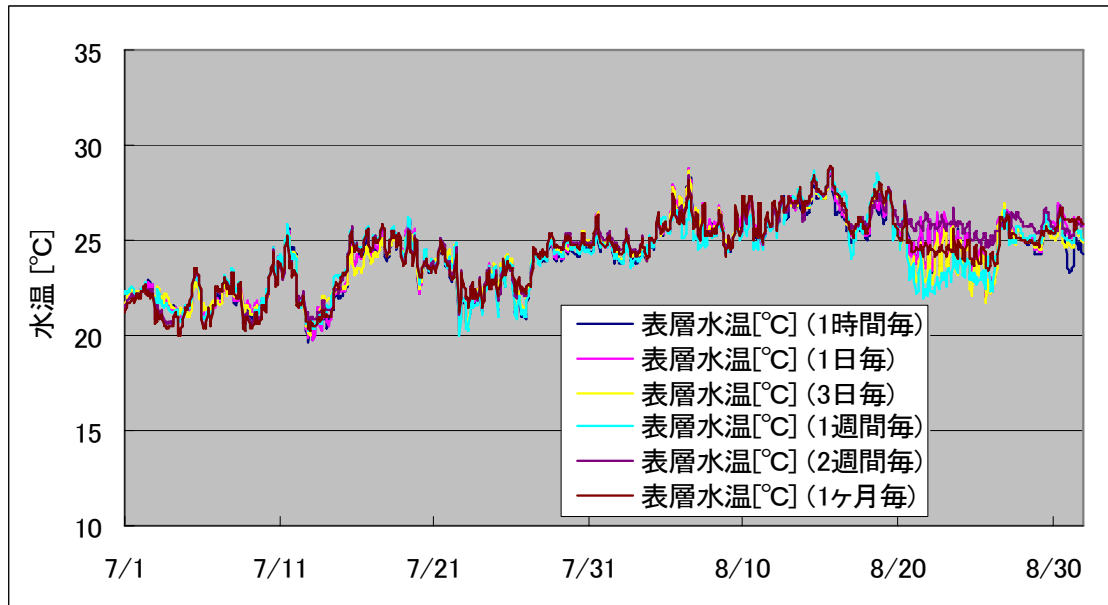


図 5.15 境界条件の時間間隔を変えた場合の表層水温の計算結果 (St.2)

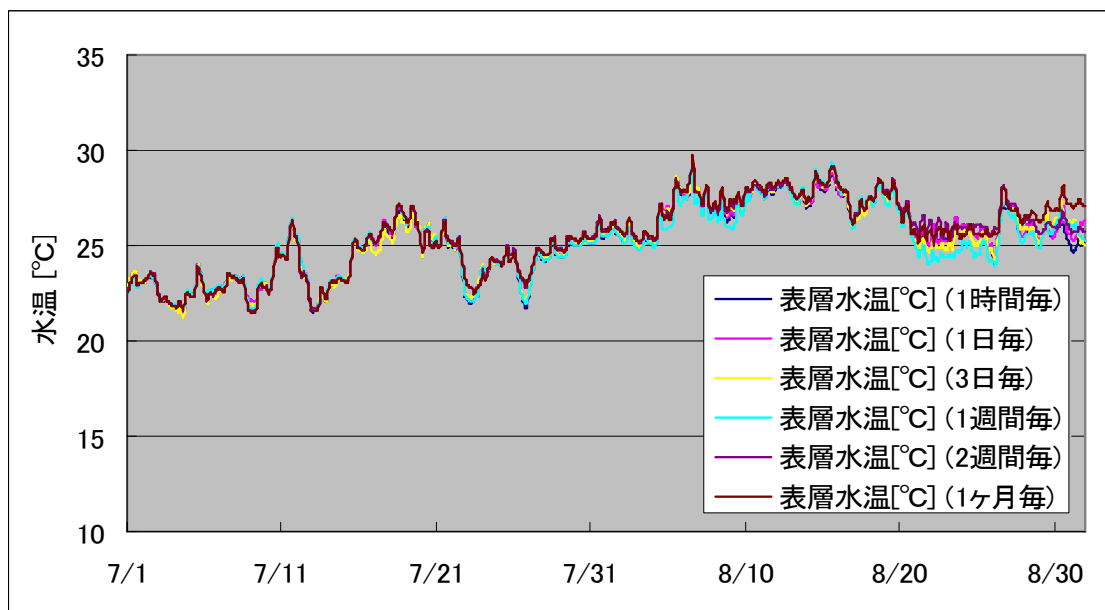


図 5.16 境界条件の時間間隔を変えた場合の表層水温の計算結果 (St.3)

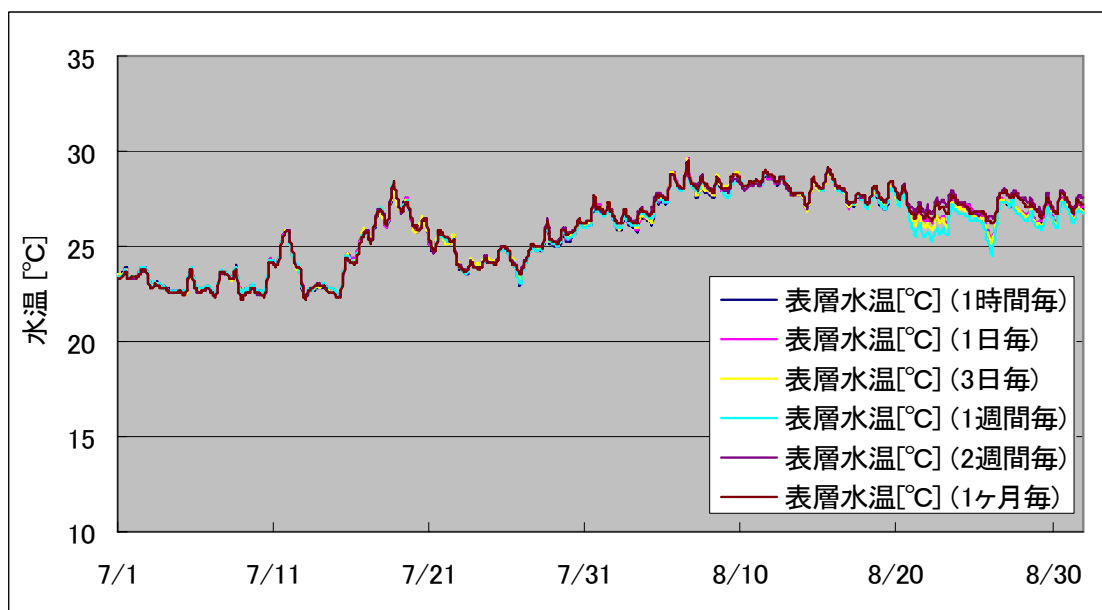


図 5.17 境界条件の時間間隔を変えた場合の表層水温の計算結果 (St.4)

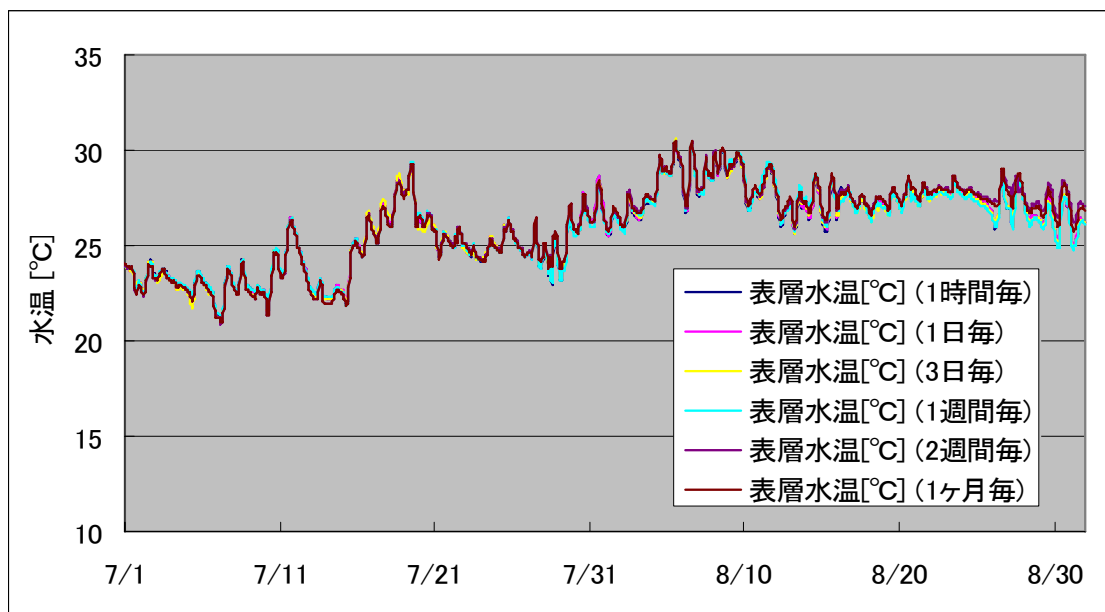


図 5.18 境界条件の時間間隔を変えた場合の表層水温の計算結果 (St.5)

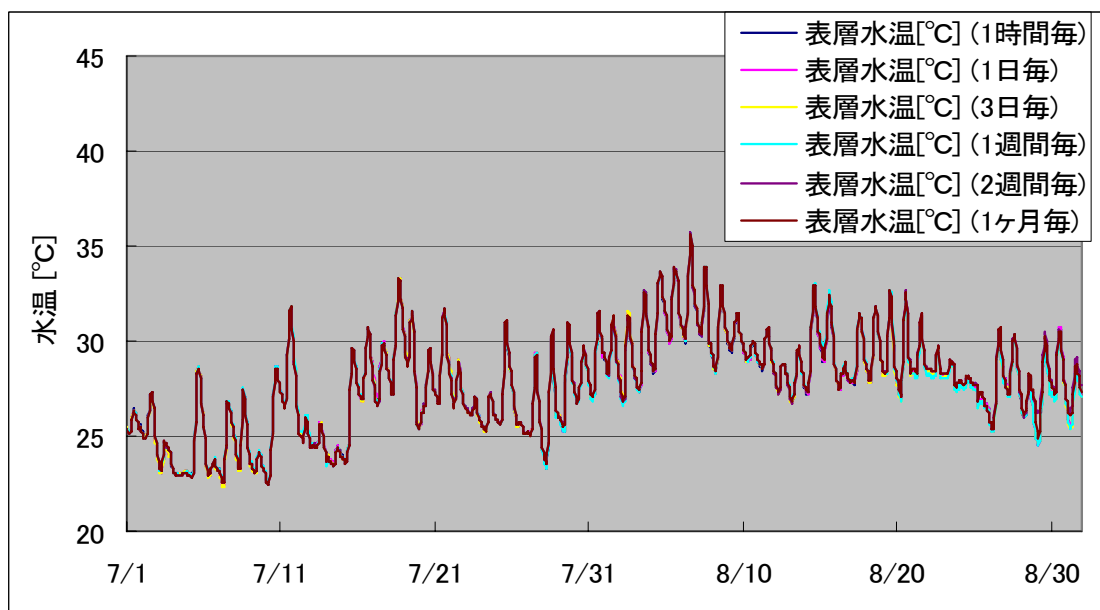


図 5.19 境界条件の時間間隔を変えた場合の表層水温の計算結果 (St.6)

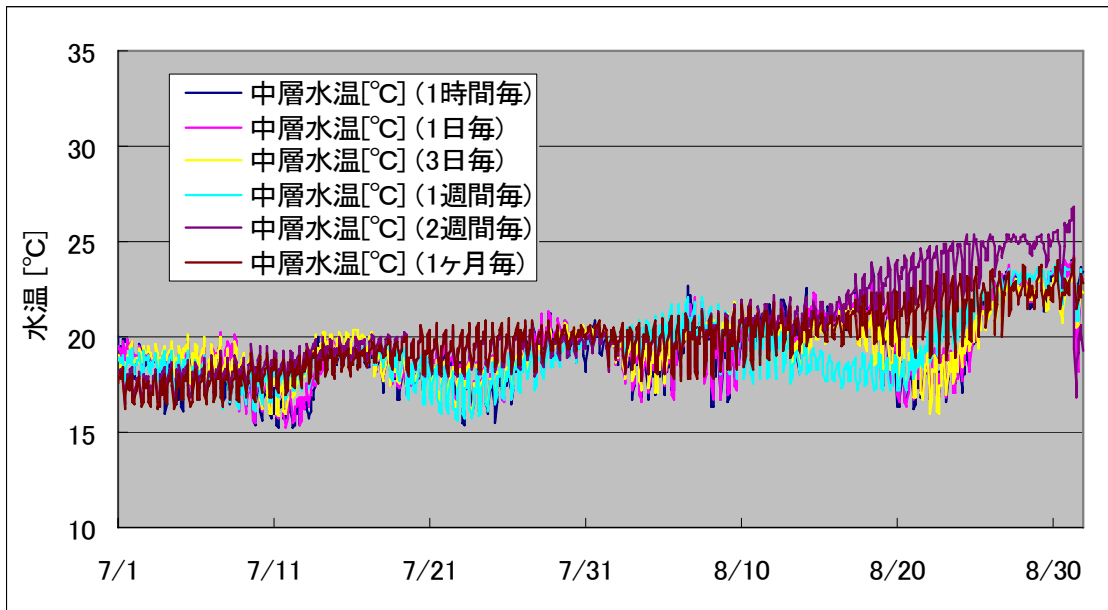


図 5.20 境界条件の時間間隔を変えた場合の中層水温の計算結果 (St.1)

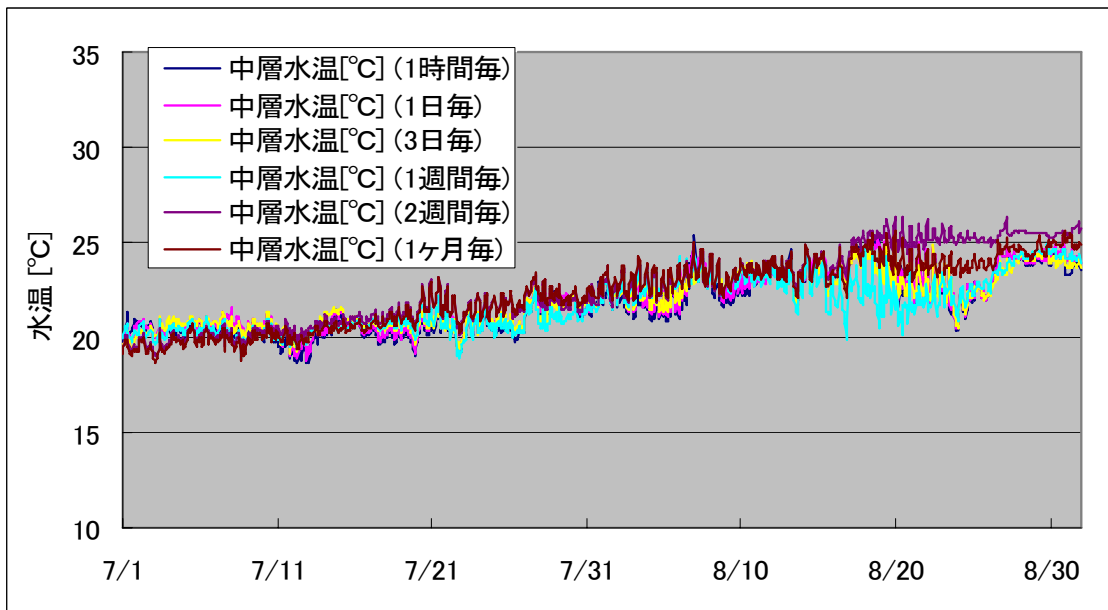


図 5.21 境界条件の時間間隔を変えた場合の中層水温の計算結果 (St.2)

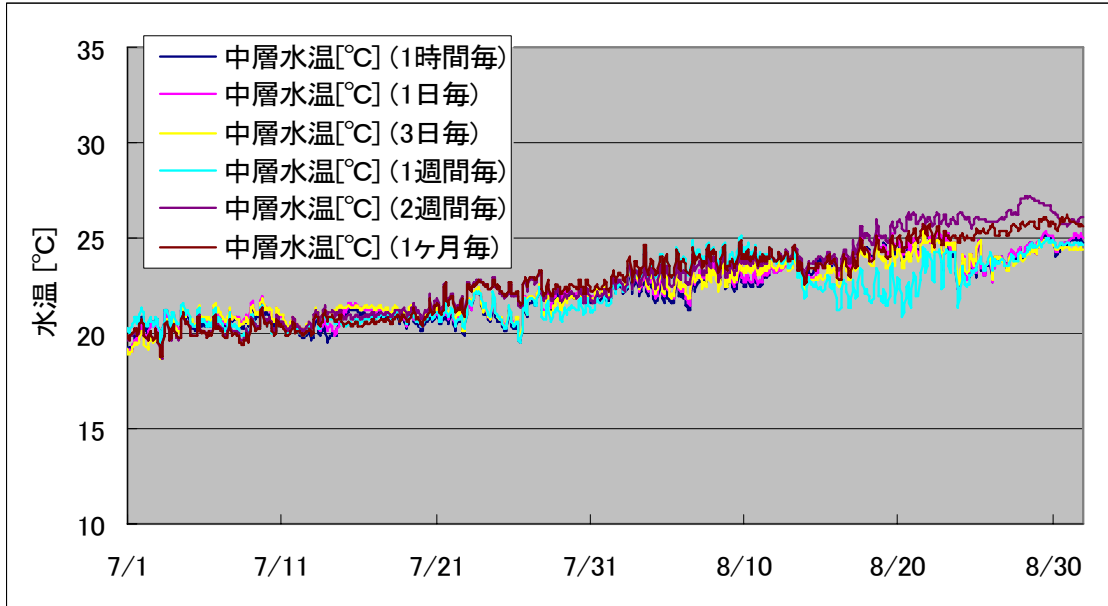


図 5.22 境界条件の時間間隔を変えた場合の中層水温の計算結果 (St.3)

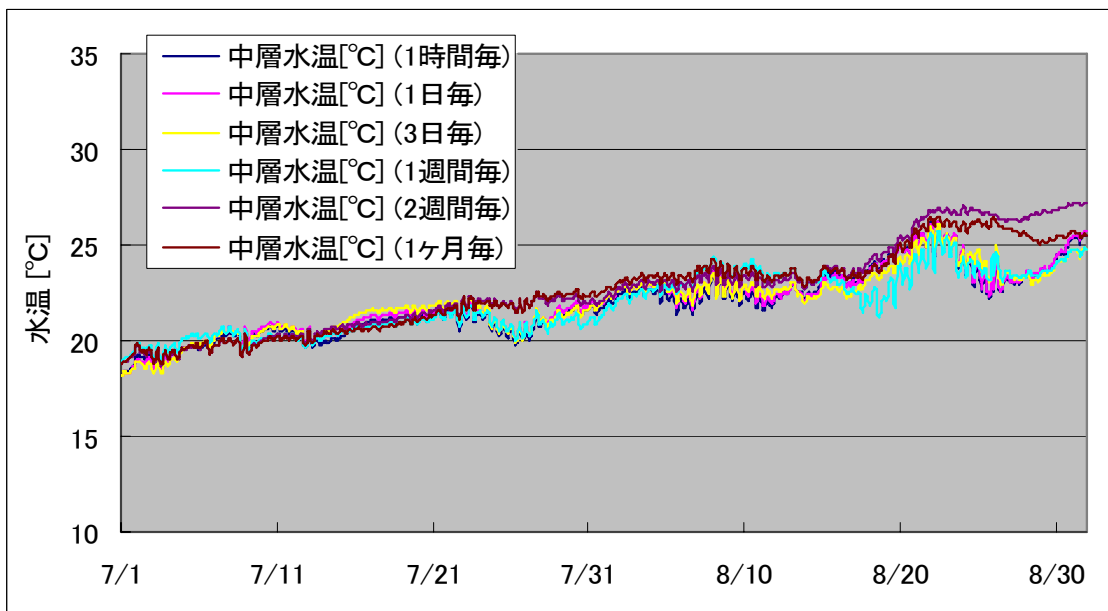


図 5.23 境界条件の時間間隔を変えた場合の中層水温の計算結果 (St.4)



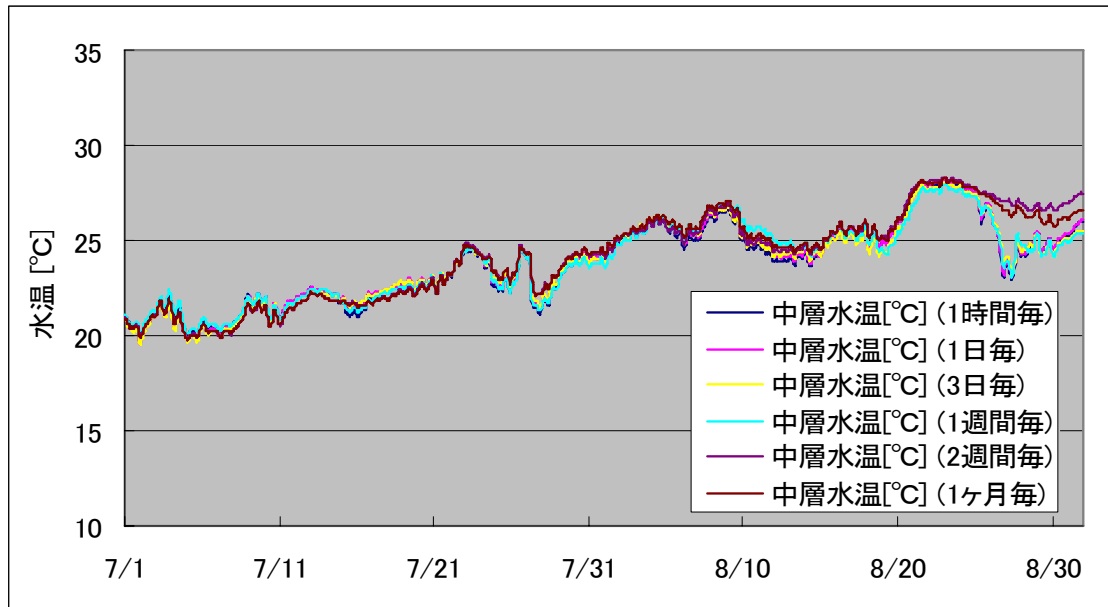


図 5.24 境界条件の時間間隔を変えた場合の中層水温の計算結果 (St.5)

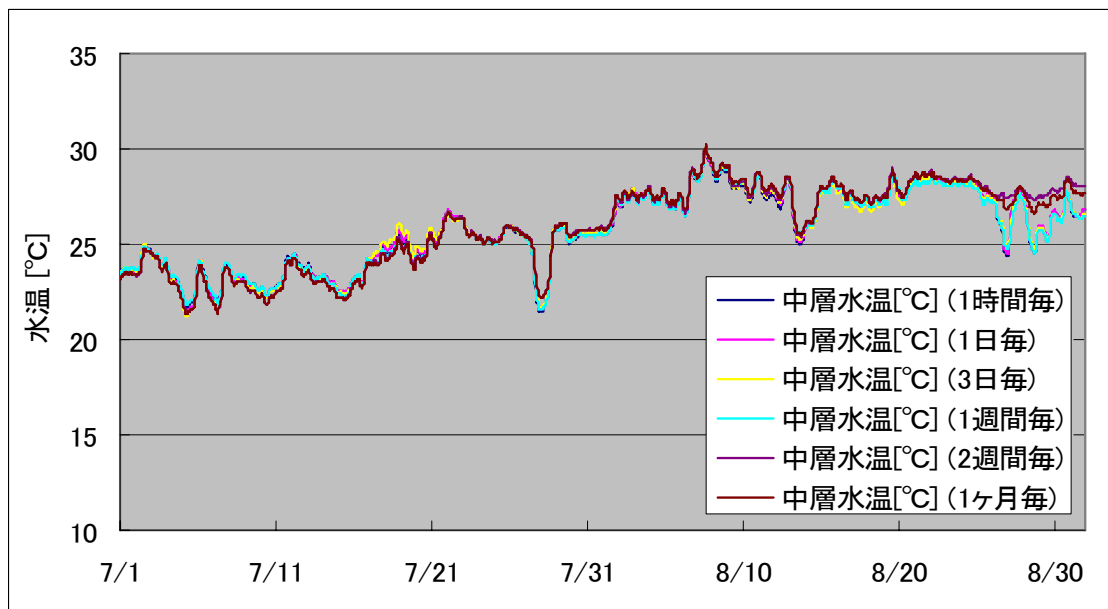


図 5.25 境界条件の時間間隔を変えた場合の中層水温の計算結果 (St.6)

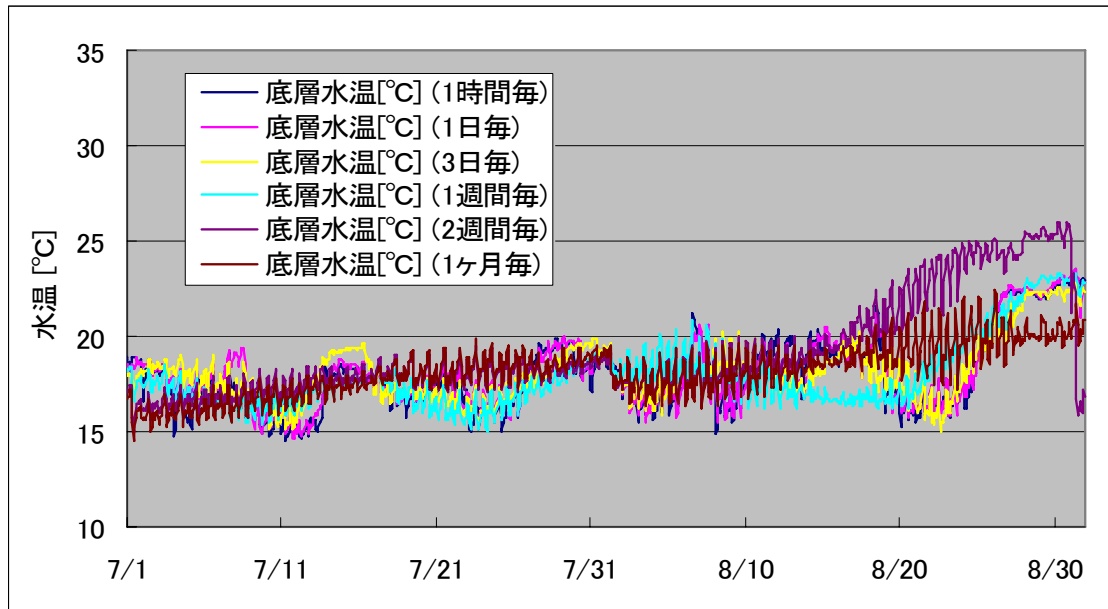


図 5.26 境界条件の時間間隔を変えた場合の底層水温の計算結果 (St.1)

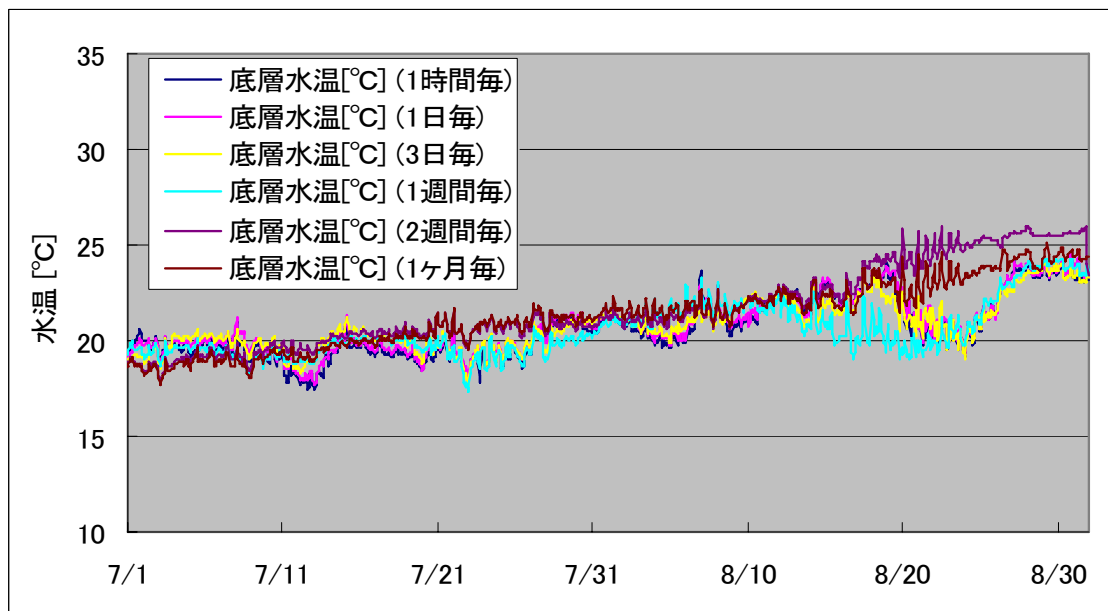


図 5.27 境界条件の時間間隔を変えた場合の底層水温の計算結果 (St.2)

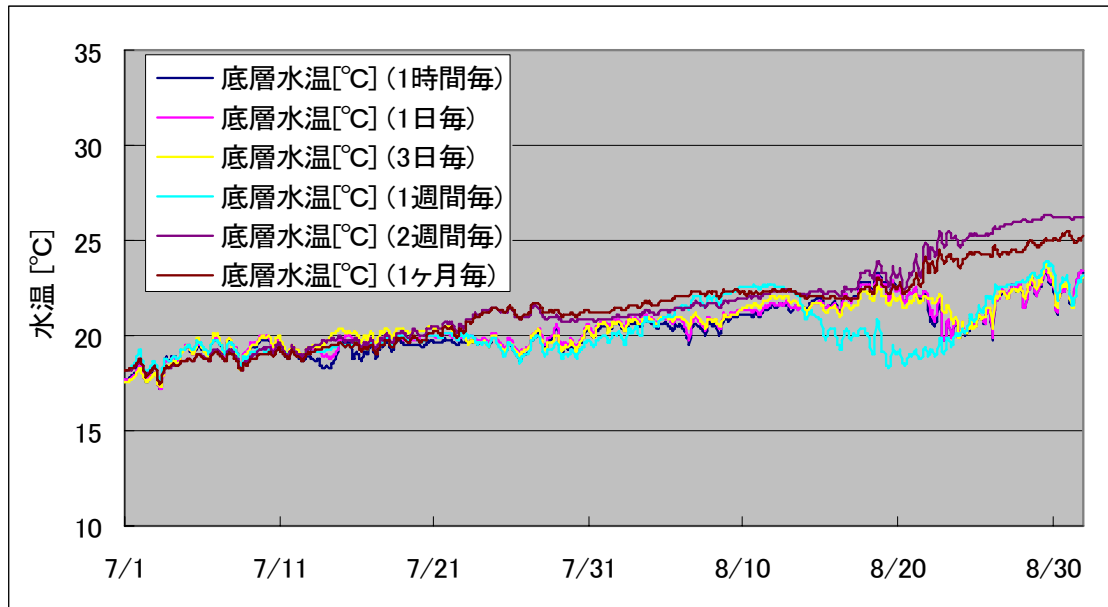


図 5.28 境界条件の時間間隔を変えた場合の底層水温の計算結果 (St.3)

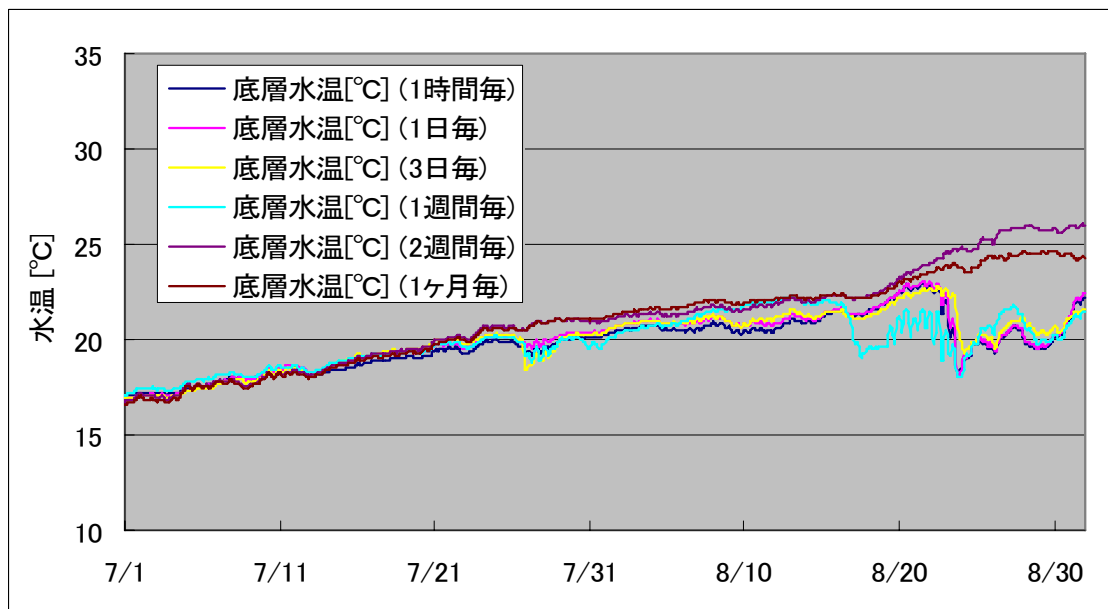


図 5.29 境界条件の時間間隔を変えた場合の底層水温の計算結果 (St.4)

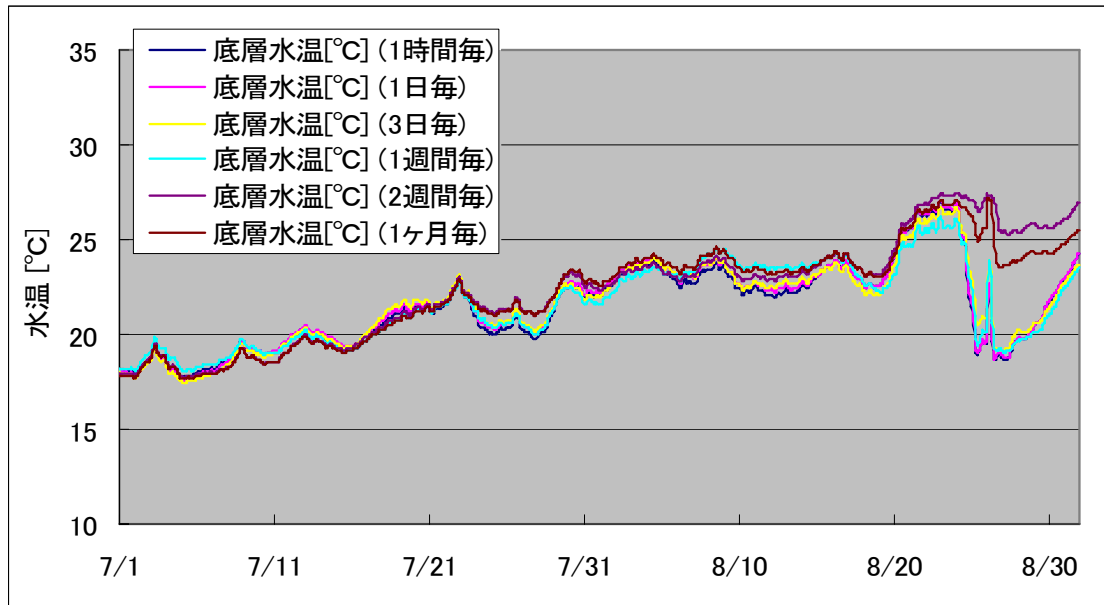


図 5.30 境界条件の時間間隔を変えた場合の底層水温の計算結果 (St.5)

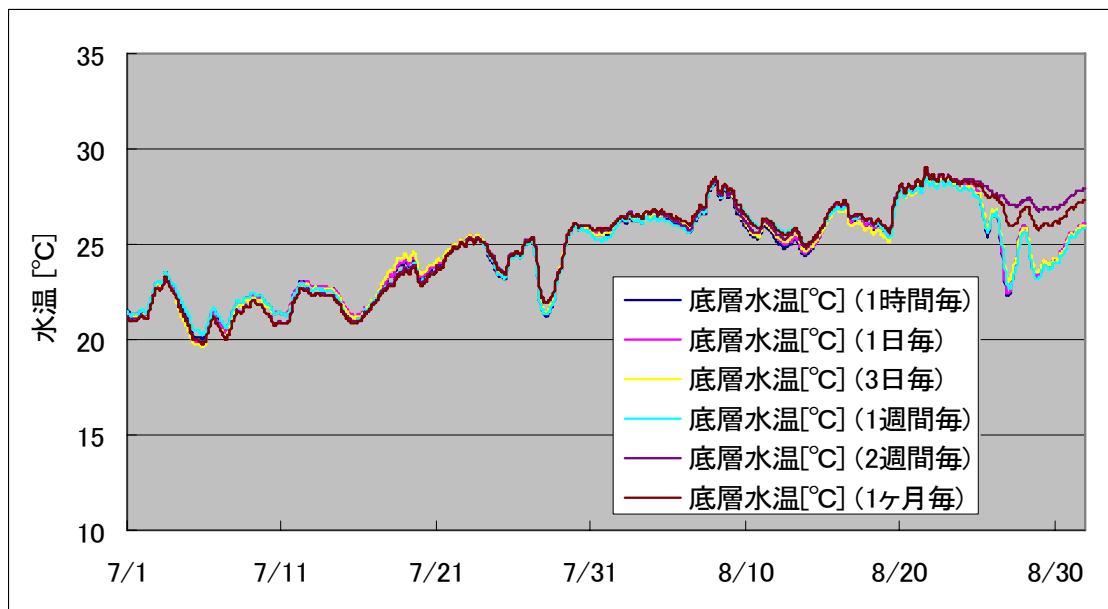


図 5.31 境界条件の時間間隔を変えた場合の底層水温の計算結果 (St.6)

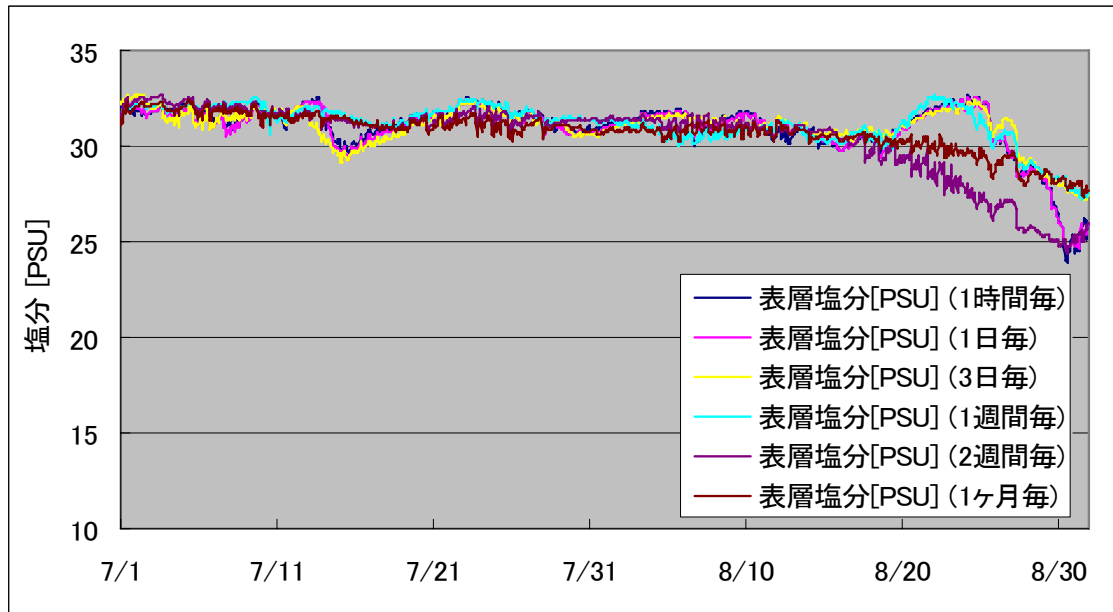


図 5.32 境界条件の時間間隔を変えた場合の表層塩分の計算結果 (St.1)

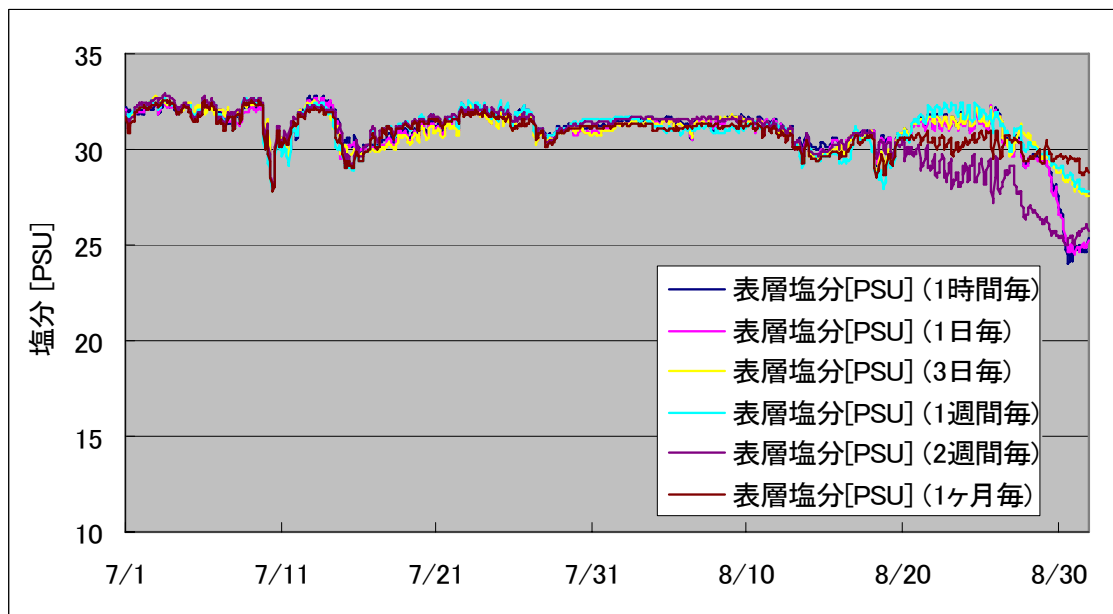


図 5.33 境界条件の時間間隔を変えた場合の表層塩分の計算結果 (St.2)

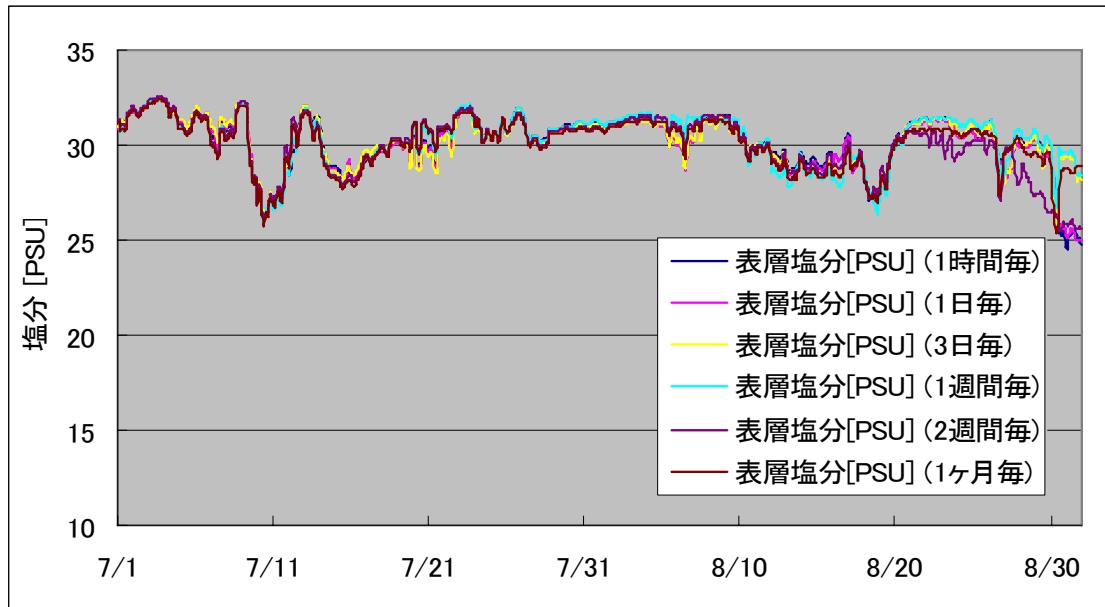


図 5.34 境界条件の時間間隔を変えた場合の表層塩分の計算結果 (St.3)

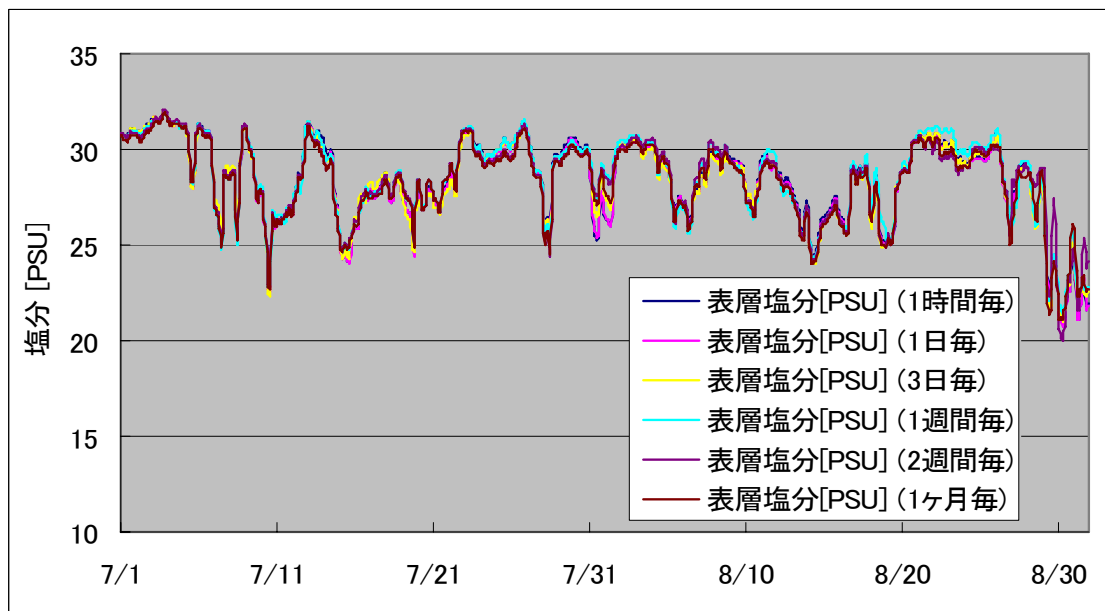


図 5.35 境界条件の時間間隔を変えた場合の表層塩分の計算結果 (St.4)

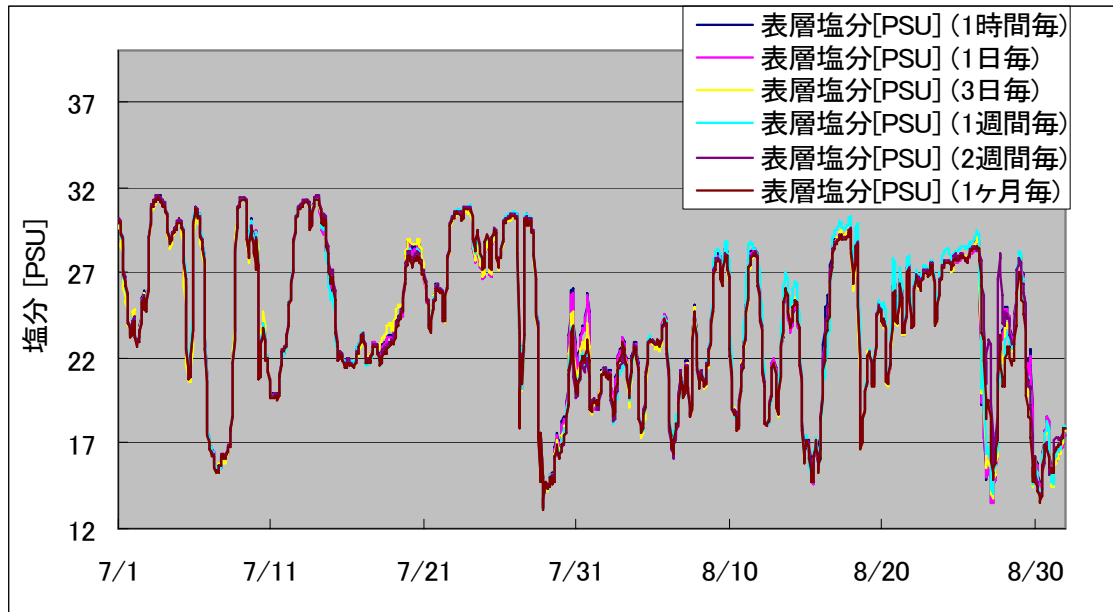


図 5.36 境界条件の時間間隔を変えた場合の表層塩分の計算結果 (St.5)

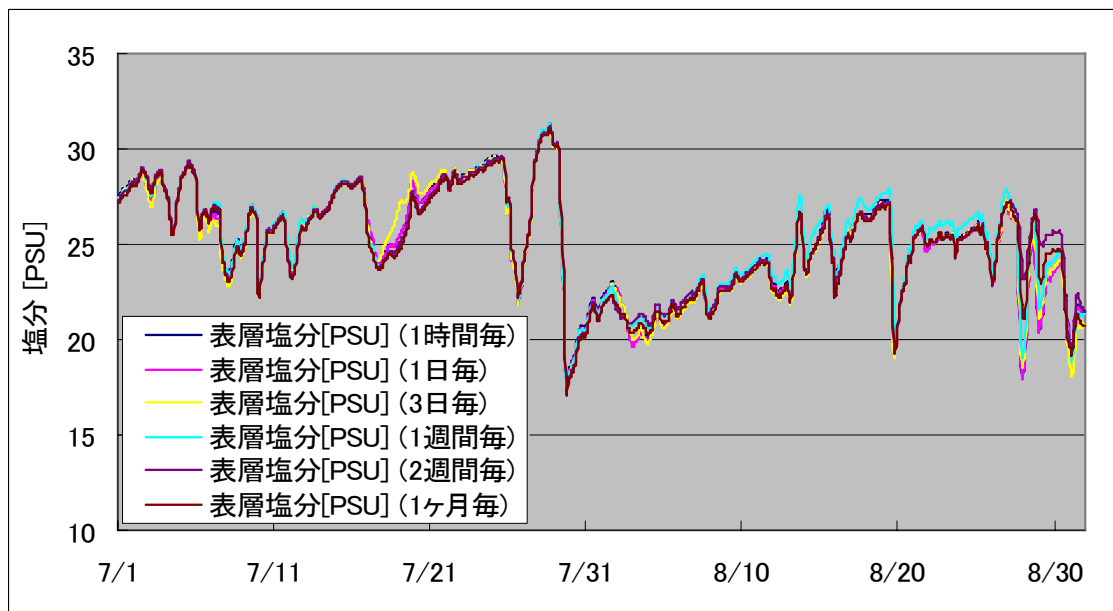


図 5.37 境界条件の時間間隔を変えた場合の表層塩分の計算結果 (St.6)

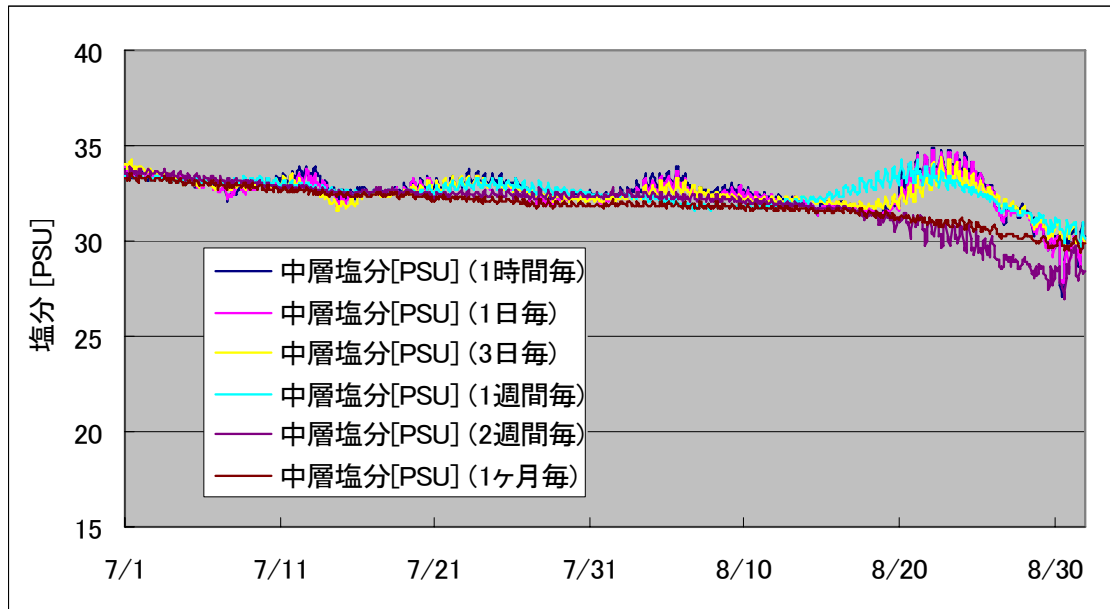


図 5.38 境界条件の時間間隔を変えた場合の中層塩分の計算結果 (St.1)

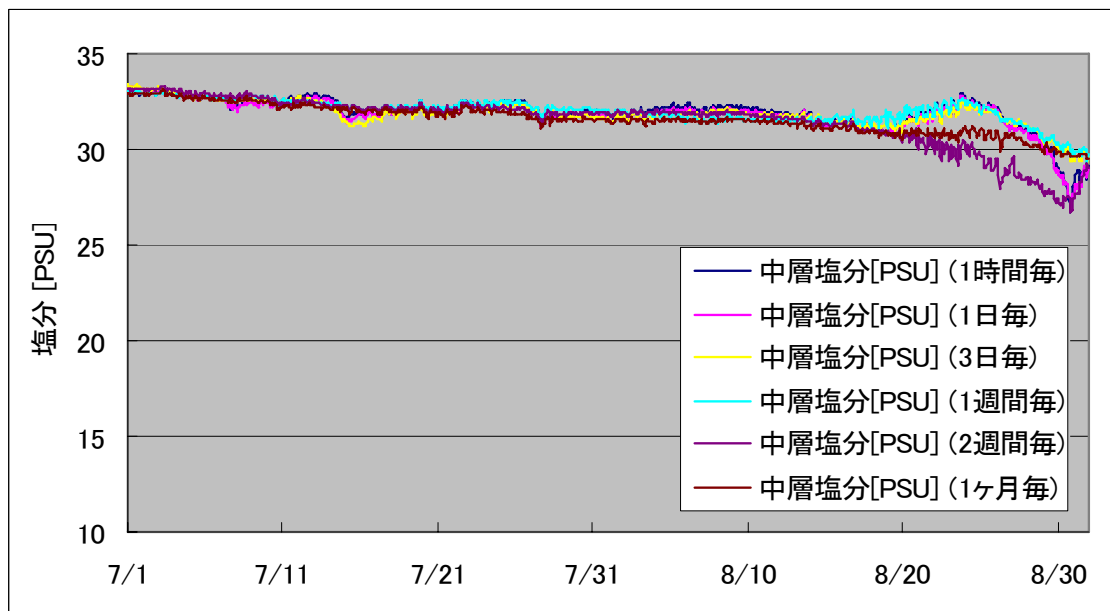


図 5.39 境界条件の時間間隔を変えた場合の中層塩分の計算結果 (St.2)



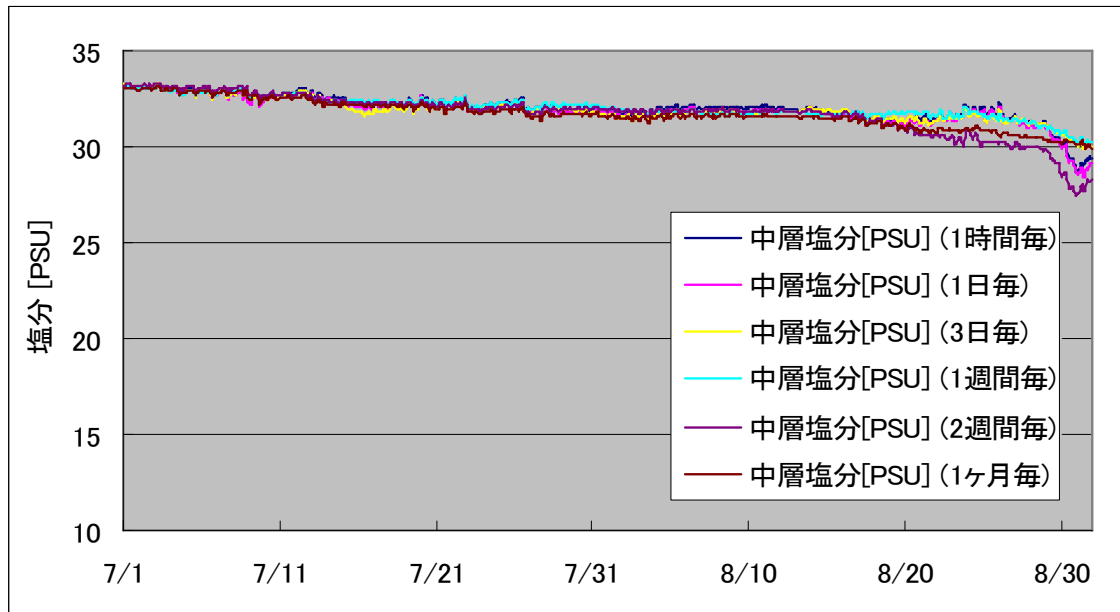


図 5.40 境界条件の時間間隔を変えた場合の中層塩分の計算結果 (St.3)

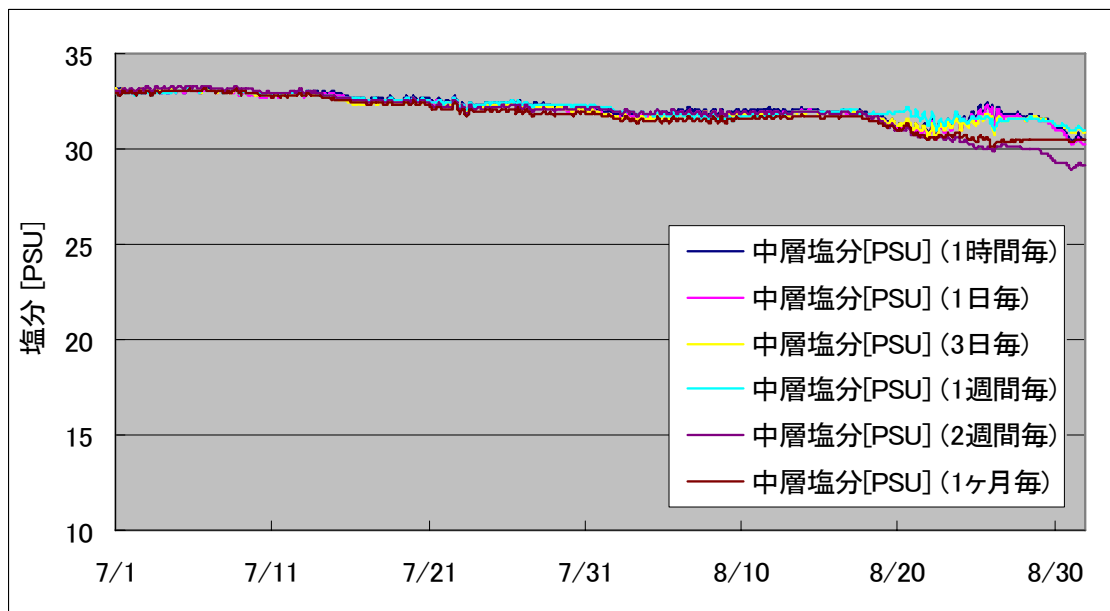


図 5.41 境界条件の時間間隔を変えた場合の中層塩分の計算結果 (St.4)

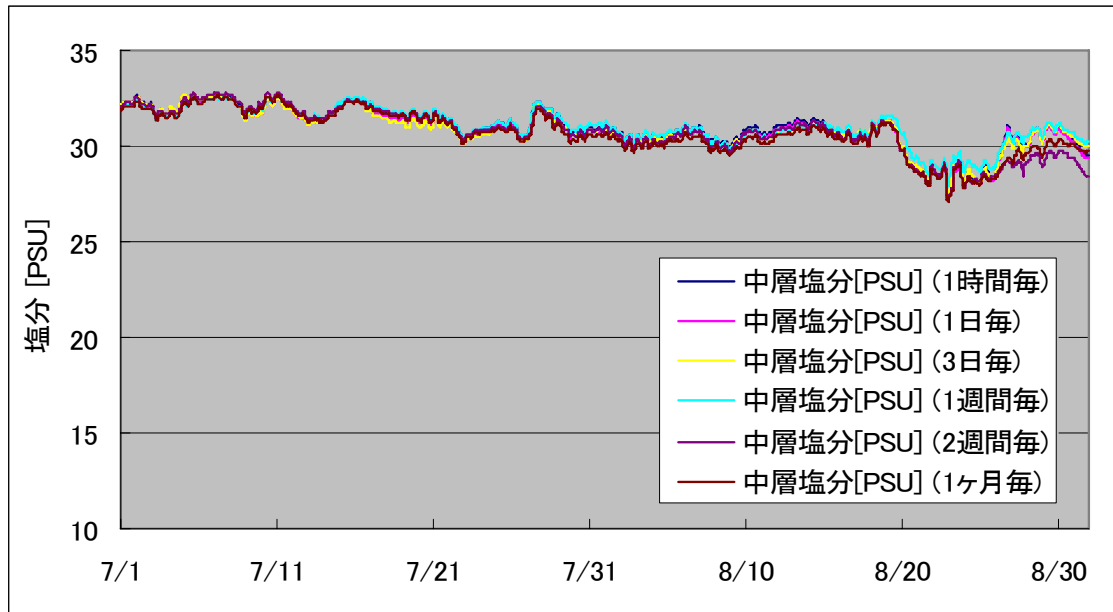


図 5.42 境界条件の時間間隔を変えた場合の中層塩分の計算結果 (St.5)

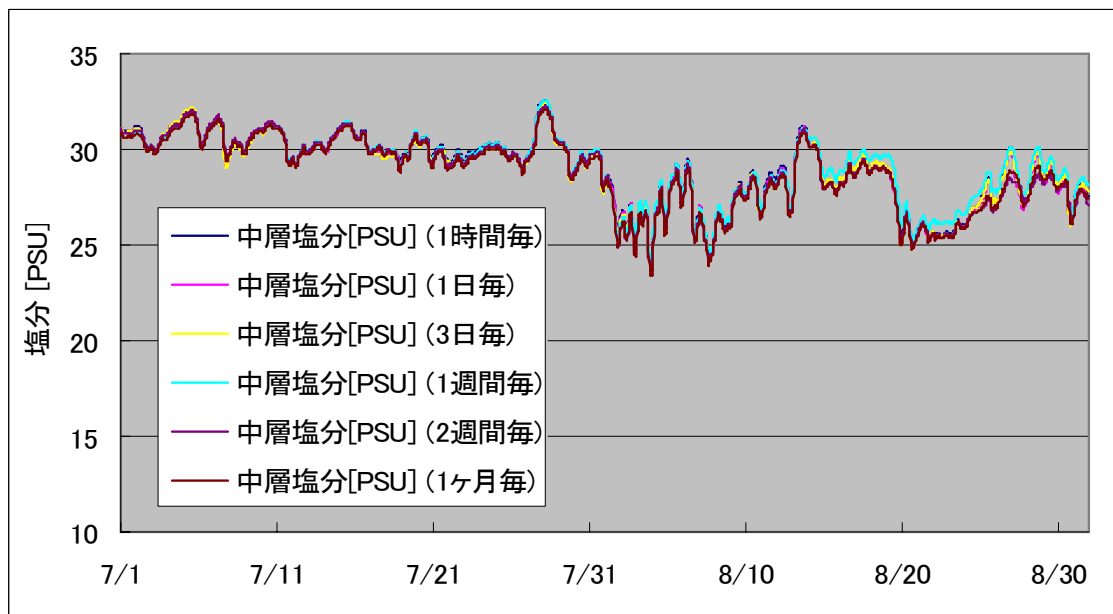


図 5.43 境界条件の時間間隔を変えた場合の中層塩分の計算結果 (St.6)

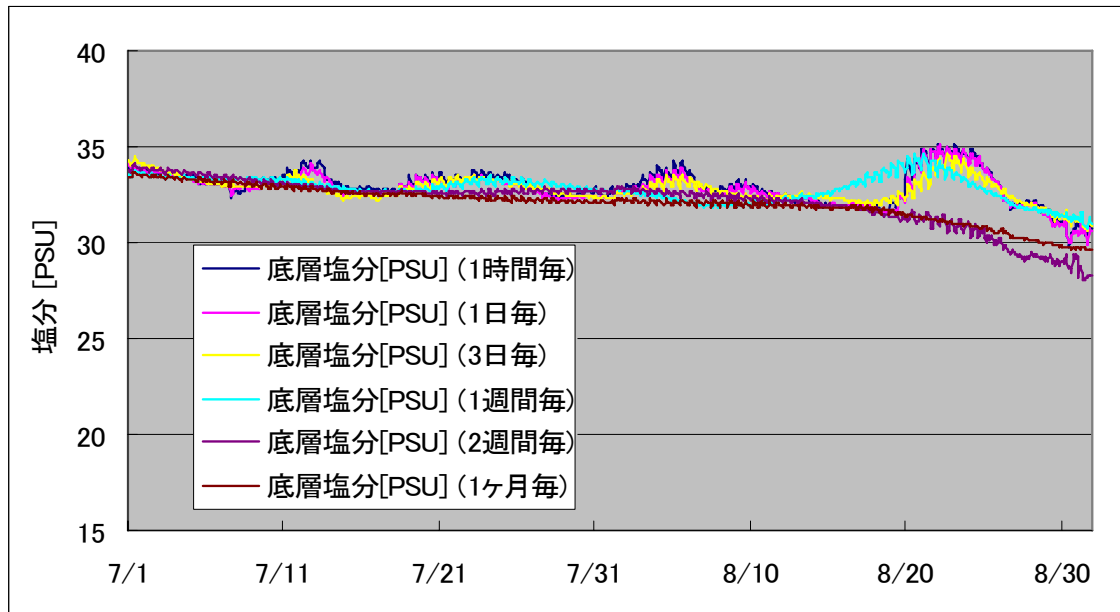


図 5.44 境界条件の時間間隔を変えた場合の底層塩分の計算結果 (St.1)

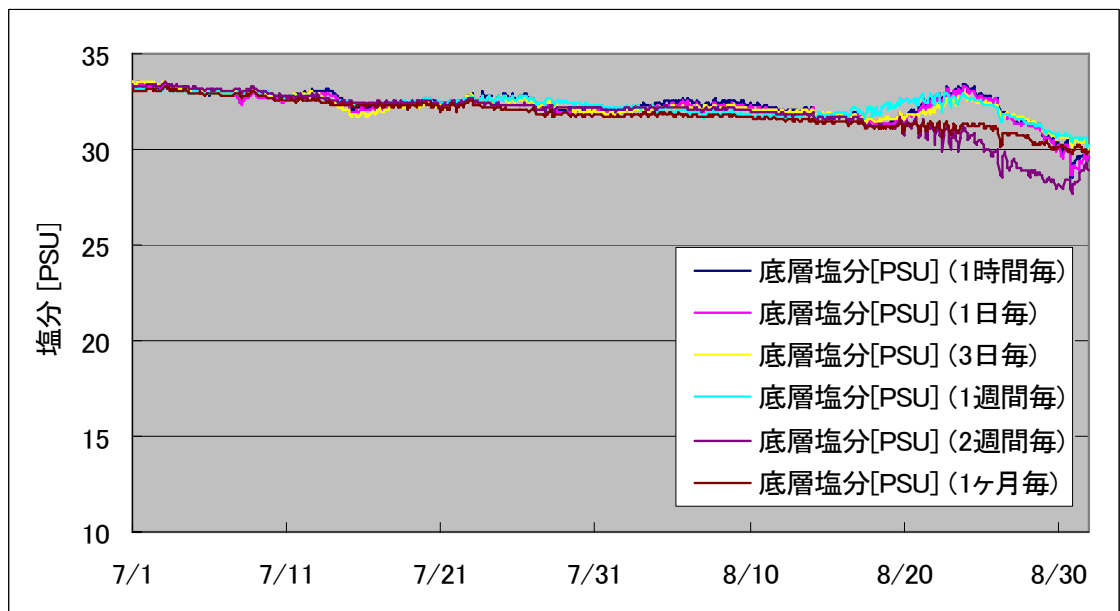


図 5.45 境界条件の時間間隔を変えた場合の底層塩分の計算結果 (St.2)

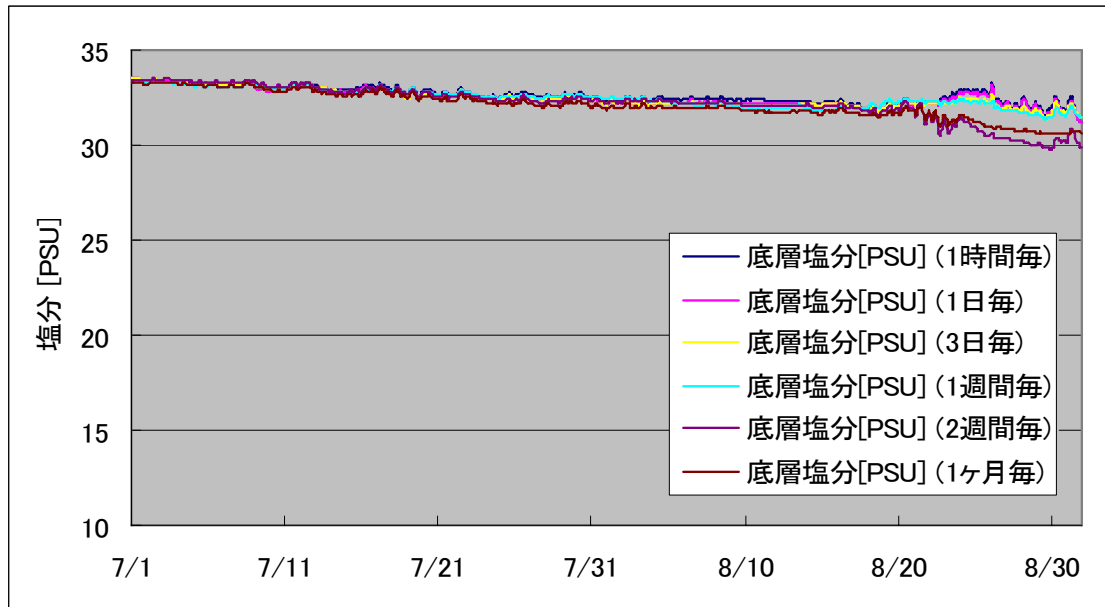


図 5.46 境界条件の時間間隔を変えた場合の底層塩分の計算結果 (St.3)

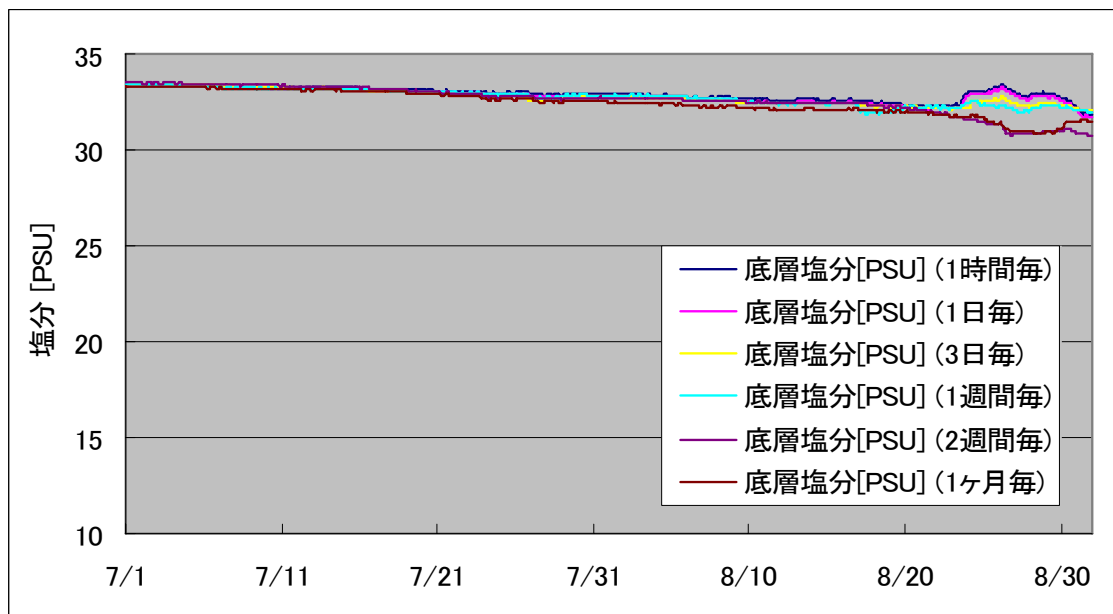


図 5.47 境界条件の時間間隔を変えた場合の底層塩分の計算結果 (St.4)

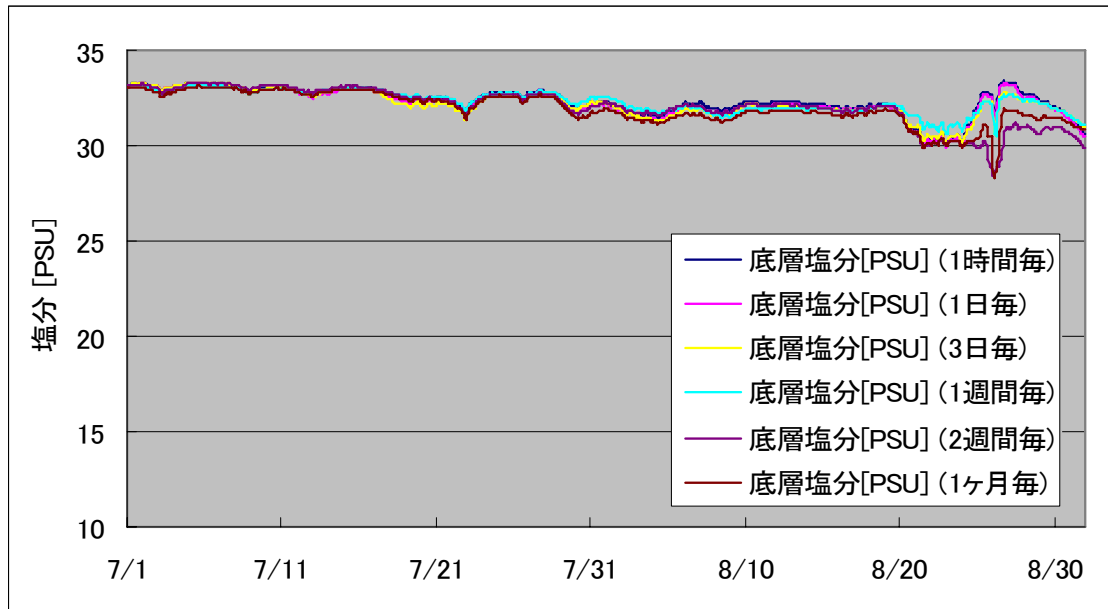


図 5.48 境界条件の時間間隔を変えた場合の底層塩分の計算結果 (St.5)

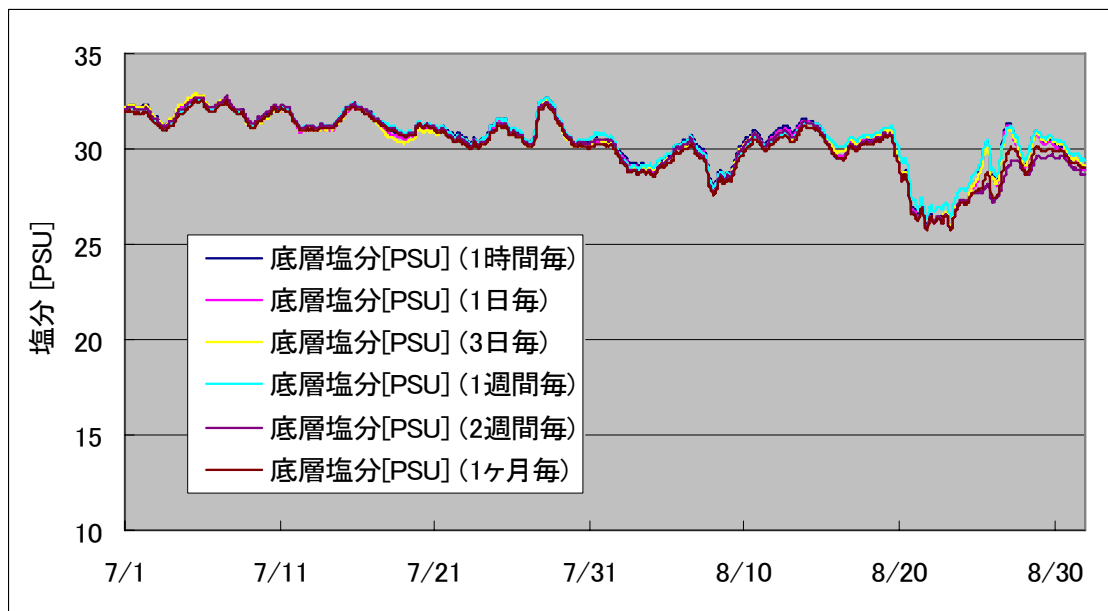


図 5.49 境界条件の時間間隔を変えた場合の底層塩分の計算結果 (St.6)

## 考察

### ・ 表層水温

図 5.14～5.19 は表層水温の計算結果を示している。表層水温の場合、開境界から 10[km] 離れた St.1 では、境界条件の時間間隔による計算結果の違いが生じている。特に台風の影響を受けて気温が下がった 7 月 21 日から 7 月 26 日までと、8 月 23 日から 25 日では表層水温も同様に下がる傾向にあるが、境界条件の時間間隔が 2 週間と 1 ヶ月の場合はほとんど下がっていないことが分かる。この原因として、図 4.1 から台風期の境界における水温の低下を時間間隔が 2 週間を超えると捉えることができていないことが挙げられる。実際には境界から冷たい水が入り込まなければならないのに、実際よりも温かい水が境界より供給されたことで、水温の低下がほとんど起こらなかったのだと考えられる。

しかしながら、開境界から離れるにつれて、境界条件の時間間隔の違いによる計算結果の違いは小さくなっていき、St.4 よりも湾奥側では時間間隔による計算結果の違いはほとんどない。つまり、湾奥に行くに従って境界条件の影響は小さくなり、かわりに太陽からの短波放射によって水が温められる効果のほうが大きくなるものと考えられる。特に St.6 の水温変動は、図 5.50 に示した気温の変動とほぼ一致する。

図 5.51 は開境界から離れることで、境界条件が 1 時間毎のデータをあたえて再現計算を行った場合の計算結果を基準値として、境界条件の時間間隔が違うことで基準値から平均してどの程度の誤差が生じたかを表したものである。この図からは開境界からの距離が 30[km] を超えれば、境界条件の時間間隔が広くても平均の水温差は 0.2[°C] 以下に収まるということが分かる。もっとも誤差が大きい場合でも、時間間隔が 2 週間の場合に開境界から 10[km] の位置で 0.5[°C] であり、表層では時間間隔の違いによる再現計算の違いはそれほど大きくないといえる。しかしながら、St.1、St.2 では 8 月の台風期に基準値と時間間隔 2 週間・1 ヶ月の場合の計算結果を比較すると約 1～2.5[°C] の差が生じており、局所的に時間間隔の違いによる再現性の違いが生じていることに留意しなければならない。

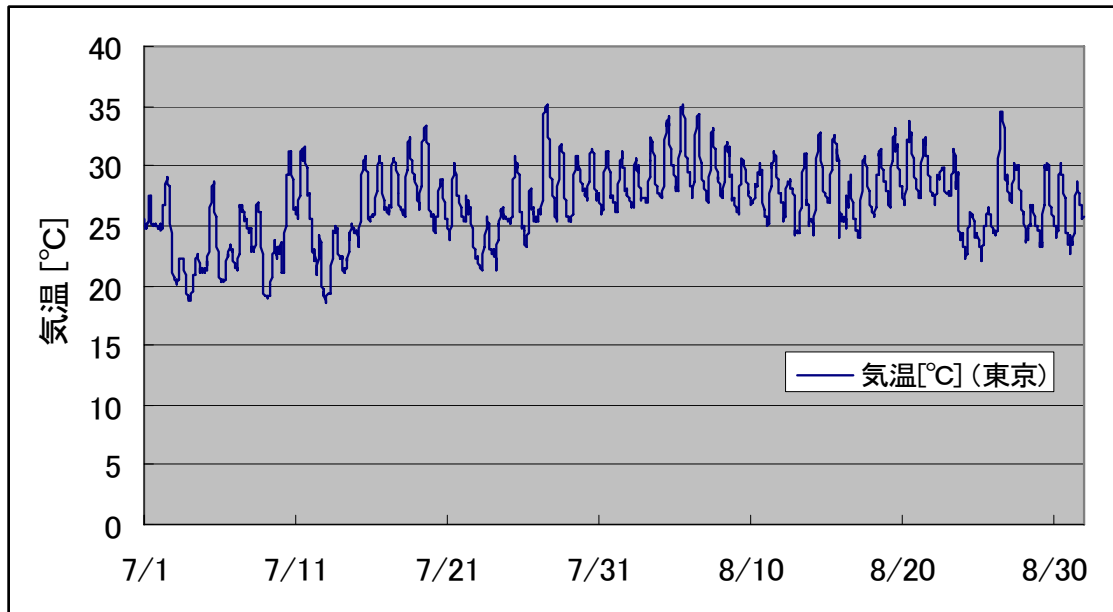


図 5.50 2005 年 7～8 月の気温

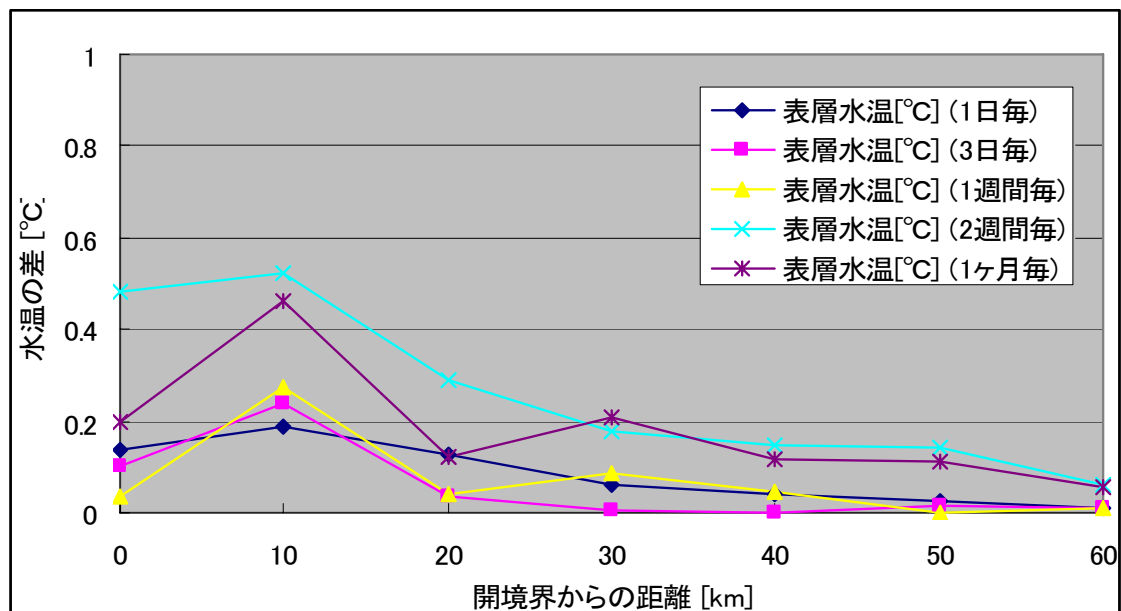


図 5.51 開境界からの距離による表層水温の差

・ 中層水温

図 5.20～5.25 は中層水温の計算結果を示している。St.1 では潮汐の影響が大きいため水温の変動が大きい。境界条件が 1 時間毎の計算結果と比較すると、表層水温と同じように 7・8 月の台風期に水温が下がる現象を境界条件の時間間隔が 2 週間を超えると再現できていないことが分かる。また、時間間隔が 1 週間の場合でも、8 月 17 日を中心に時間間隔が 1 時間毎の場合の計算結果よりも水温が低下する現象がみられた。開境界から離れる毎に時間間隔が広くても、時間間隔が 1 時間毎の場合の計算結果に一致するようになるが、表層水温とは異なり、St.6 でも 8 月 25 日以降の計算結果が、時間間隔が 2 週間と 1 ヶ月の場合は一致しない。この原因としては、表層と異なり中層は太陽からの短波放射による温め効果が薄く、そのため表層水温よりも境界からの影響を大きく受けているためだと推測される。

図 5.52 は境界条件の時間間隔が 1 時間の場合の計算結果を基準値として、7～8 月の計算期間で平均してどれくらい水温の差が生じるかを表している。この図から、平均すれば基準値からもっとも平均して誤差が大きい時間間隔 2 週間の場合の計算結果でも、1[°C]以内に収まっていることが分かる。しかしながら、St.2 や St.4 の結果からは基準値と比較して 2 週間毎の結果と基準値とで 8 月後半に約 4[°C]も水温差が生じていることが分かる。

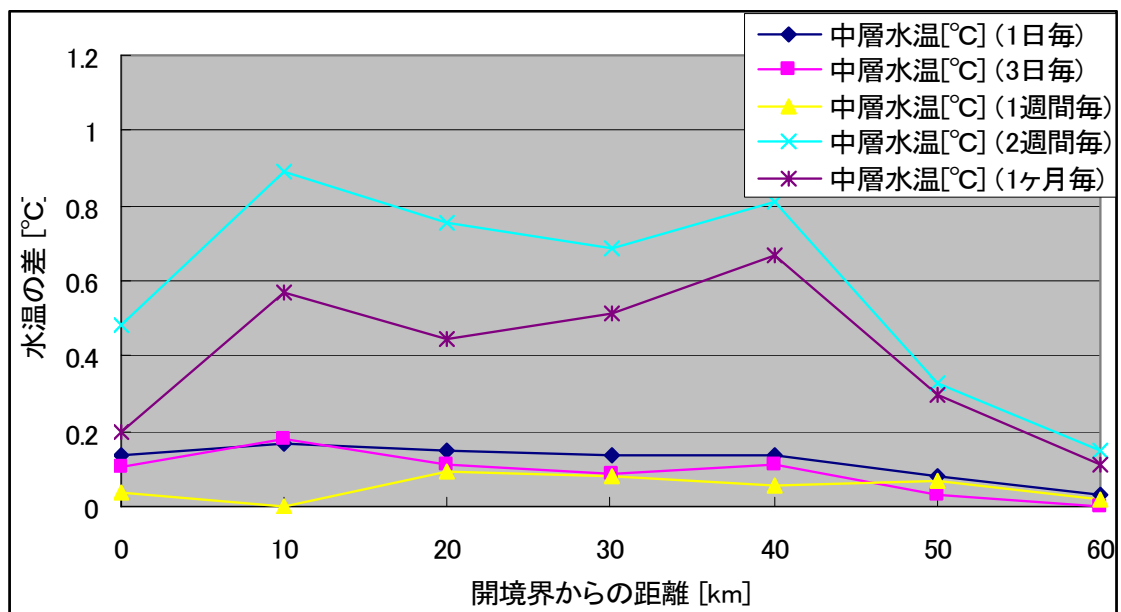


図 5.52 開境界からの距離による中層水温の差



- ・ 底層水温

底層水温の計算結果は図 5.26～5.31 に示される。中層水温と同様，St. 1 では潮汐による影響のため水温の変動が激しい。また，境界条件の時間間隔が 2 週間を超えると，時間間隔 1 時間の場合の計算結果を基準値とした場合に，台風期における水温の低下など，細かい水温変動が再現できていない。また，底層の場合，境界の時間間隔が 1 週間の場合でも，St.1 から 4 において，8 月 20 日を中心に基準値よりも水温が下がるなど，局所的に一致しない部分が存在する。この原因として，図 4.1 において 8 月 13 日を中心に境界部における水温が上昇している現象を時間間隔が 1 週間だと捉えられていないからだと推測される。

しかしながら，図 5.53 に示した 7～8 月における基準値との平均の水温差のグラフをみると，基準値と時間間隔 1 週間の場合の計算結果との水温差は最大でも 0.1[°C]程度であり，計算の再現性は高いと判断される。また，同グラフにおいて，時間間隔が 2 週間毎，1 ヶ月毎の場合でも，湾奥に行くにつれて水温差が小さくなっているのは，湾奥部の水深が浅く，表層で温められた水が底層に届きやすいためであると考えられる。

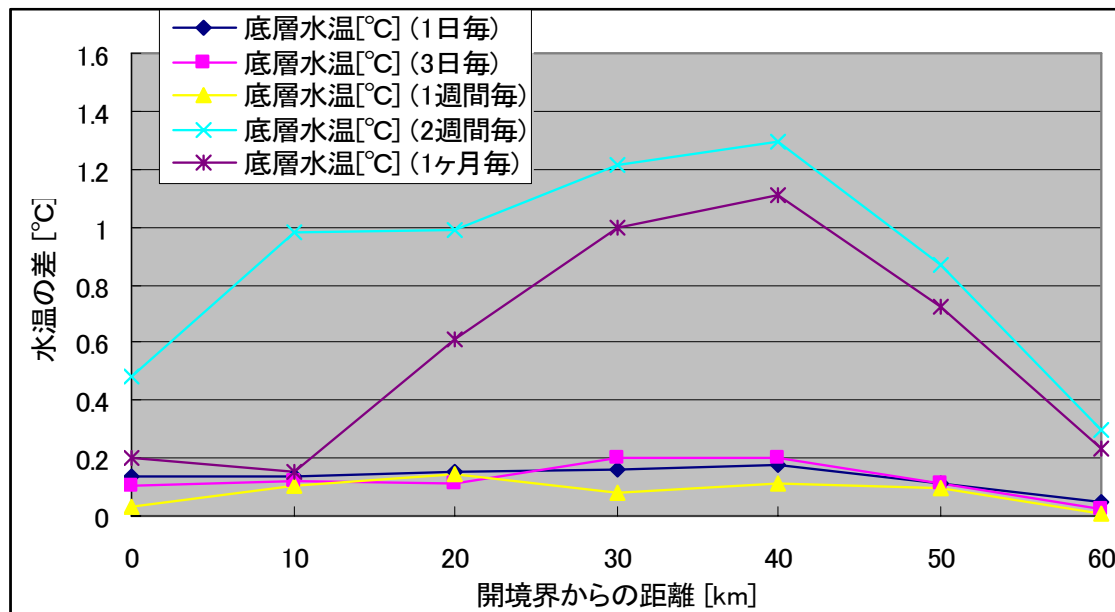


図 5.53 開境界からの距離による底層水温の差

・ 表層塩分

表層塩分の計算結果は図 5.32～5.37 に示される。境界条件の時間間隔 1 時間の計算結果を基準値とした場合、St.1～2 において基準値とほぼ同じ結果を示したのは時間間隔が 1 日の場合のみであった。これは図 4.2 に示した塩分の境界条件のグラフにおいて、基準値の境界条件は細かい変動が多く、そのため時間間隔が大きくなるほど基準の境界条件の値との差が大きくなり、St.1～2 は開境界から近いことから、計算結果にもその影響が出たものと考えられる。しかしながら、開境界から離れる毎に境界条件の時間間隔が広くなっても基準値と一致するようになり、St.4 以降は時間間隔が 1 ヶ月であっても基準値とよく一致する。

このことは、図 5.54 に示した開境界からの距離による基準値と比較した場合の平均の塩分の差を表したグラフからも分かる。開境界から離れるほど塩分の差が小さくなるのは、河川からの淡水の流入によるところが大きいと推測される。図 5.55 は河川からの淡水流入によって表層塩分濃度が下がっていることを示したものである。湾奥に行くほど、荒川や旧江戸川といった流量の多い河川が存在するので、塩分濃度が下がるのだと考察される。

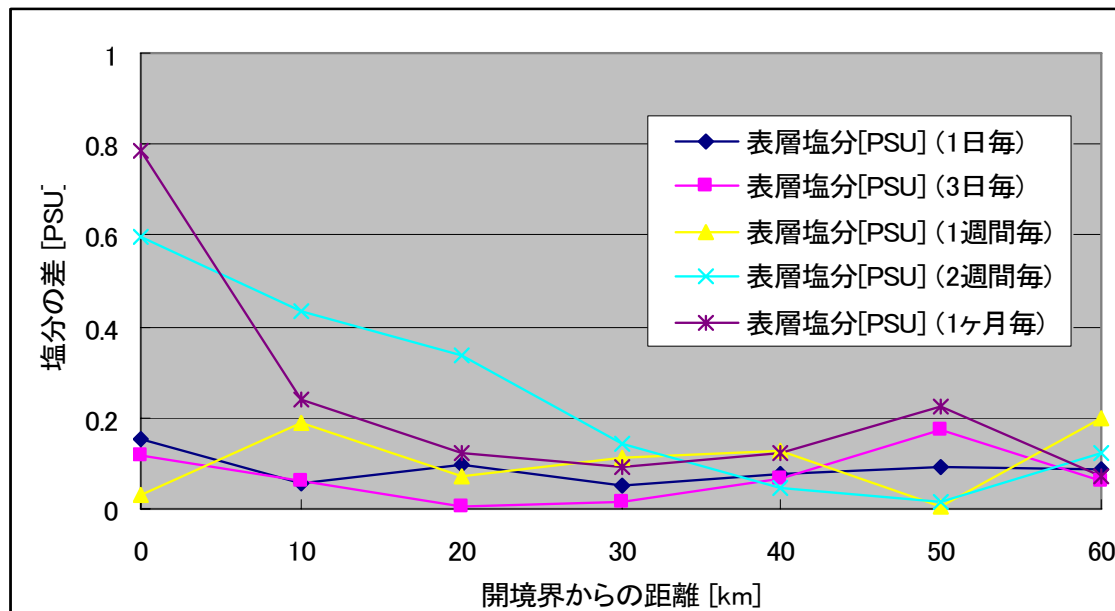


図 5.54 開境界からの距離による表層塩分の差

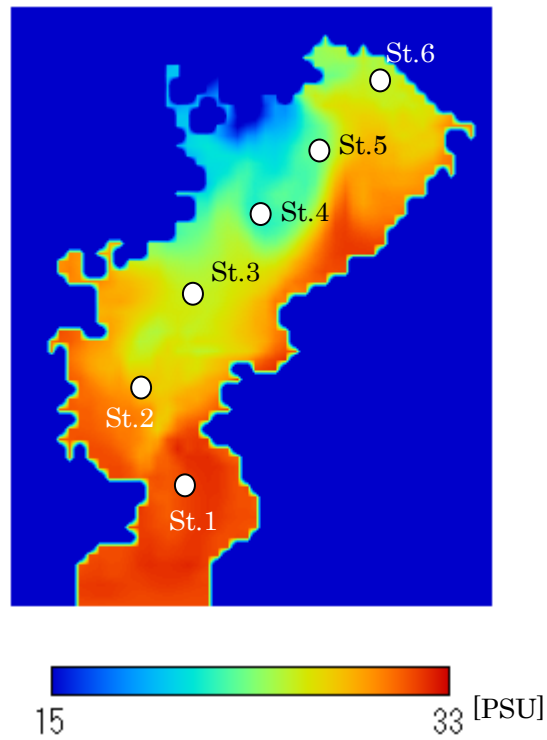


図 5.55 2005 年 7 月 10 日における表層塩分濃度

・ 中層塩分

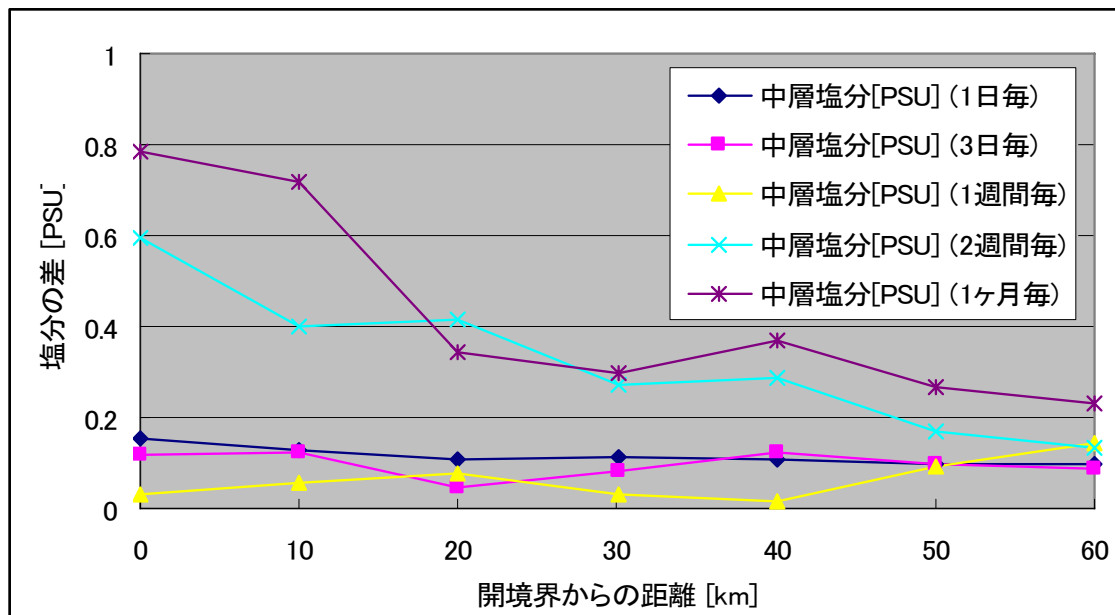


図 5.56 開境界からの距離による中層塩分の差

中層塩分の計算結果は図 5.38～5.43 に示される。境界条件の時間間隔 1 時間の計算結果を基準値とした場合、St.1～4 において基準値とほぼ同じ結果を示したのは時間間隔が 1 日の場合のみであった。これは表層塩分の計算結果と同様に図 4.2 に示した塩分の境界条件のグラフにおいて、基準値の境界条件は細かい変動が多く、そのため時間間隔が大きくなるほど基準の境界条件の値との差が大きくなったものと考えられる。また、表層と違い中層は河川からの流入による塩分の希釈が少ないため、表層塩分の計算結果よりも境界条件の影響が湾奥に届いたものと推測される。

図 5.56 は、開境界からの距離による基準値と比較した場合の平均の塩分の差を表したグラフである。表層と同様に開境界から離れるにつれて境界条件の時間間隔が広くても塩分差が小さくなる傾向にあるが、淡水流入の影響が中層のほうが小さいので、湾奥まで境界条件の影響が及んでいることが分かる。

#### ・ 底層塩分

底層塩分の計算結果は図 5.44～5.49 に示される。境界条件の時間間隔 1 時間の計算結果を基準値とした場合、表層・中層と異なり、St.1 において基準値とほぼ同じ結果を示したのは時間間隔が 1 日と 3 日の場合で、St.2 以降では境界条件の時間間隔が 1 週間であっても基準値とよく一致する。この原因として、底層の塩分そのものがほとんど変動しないため、境界部分での時間間隔による細かい塩分の誤差を無視できるのだと考えられる。

図 5.57 は、開境界からの距離による基準値と比較した場合の平均の塩分の差を表したグラフである。表層・中層と同様に開境界から離れるにつれて境界条件の時間間隔が広くても塩分差が小さくなる傾向にあるが、淡水流入の影響が表層・中層に比べて小さいので、湾最奥部である St.6 まで、わずかではあるが境界条件の影響が及んでいることが分かる。

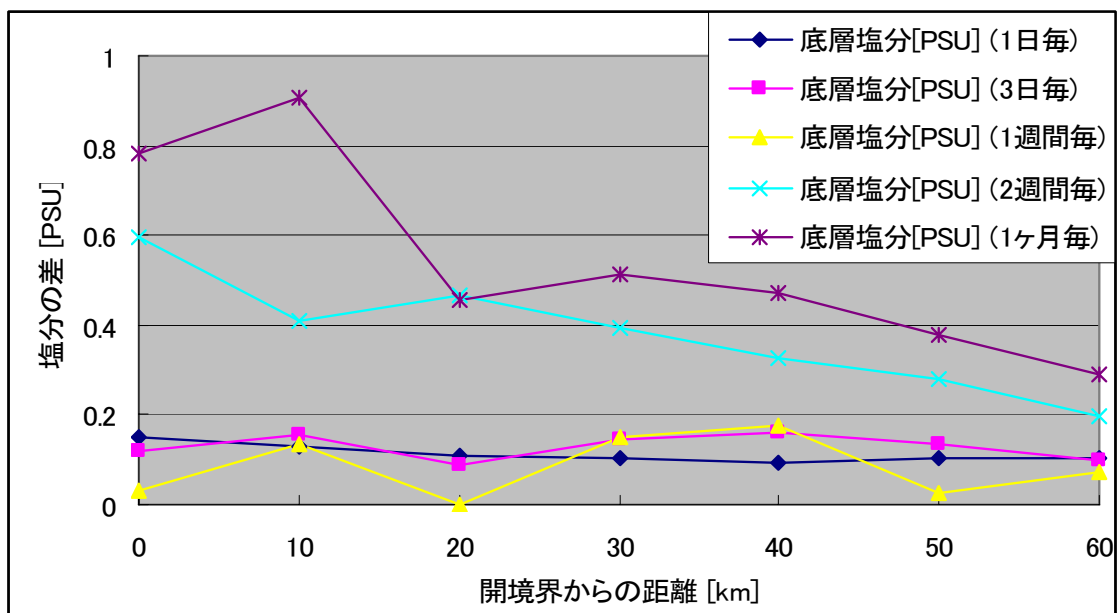


図 5.57 開境界からの距離による底層塩分の差

・ まとめ

水温・塩分ともに湾奥に行くほど、境界条件の影響が小さくなる傾向にあることが分かった。その原因としては、水温は短波放射による温め効果であり、塩分の場合は河川からの淡水流入による塩分の希釈効果である。その効果は特に表層に表れやすい。

表層<中層<底層の順に境界条件による影響が伝播しやすいことが分かった。それは、中層と底層は長波放射による温め効果や、淡水流入による希釈効果が薄いためである。

境界条件の時間間隔が2週間を超えると、境界における細かい水温・塩分の変動が再現できないため、時間間隔1時間の場合の計算結果を基準値として考えた場合、誤差が大きくなることが分かった。

今回の計算結果から、境界条件を作成するのに適当な時間間隔を決める場合、時間間隔が3日であれば、基準値に非常に近い結果が得られるということが分かった。また、時間間隔が1週間の場合でも、局所的に見て基準値と異なる結果を得る場合もあるが、基準値に近い結果を得ることが可能である。

ただし、本研究では夏季2ヶ月間のみを計算対象にしており、より計算期間が長くなる場合や、季節が異なる場合などにおける検討も行うことが望ましい。

### 5.3 境界条件を短期的に変化させた場合

水温の境界条件を短期的に変動させた場合における数値実験結果を図 5.58～5.77 に示す。

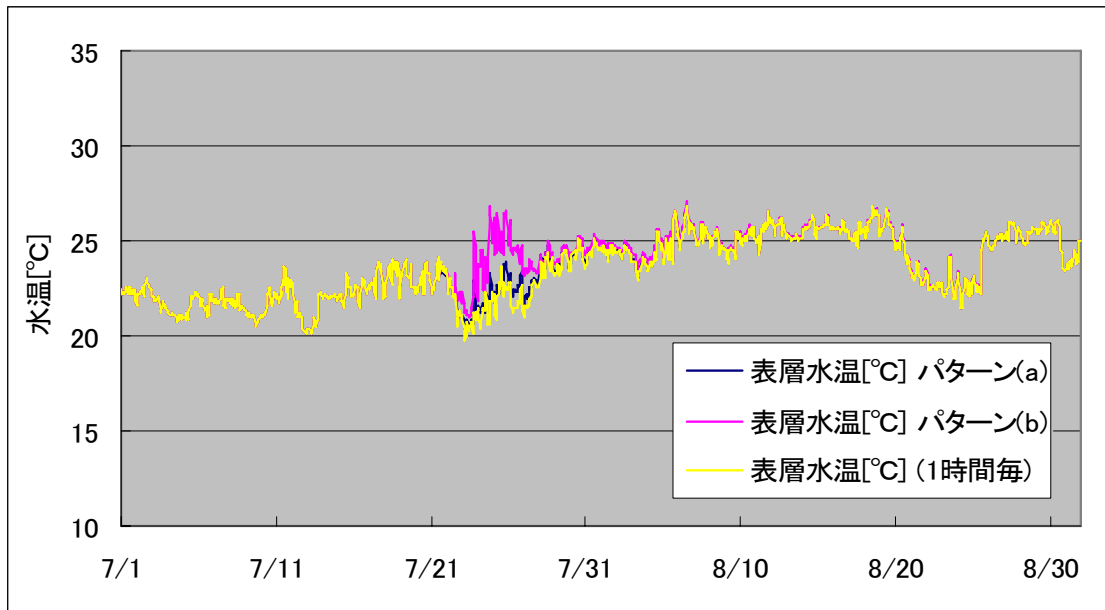


図 5.58 境界条件を短期的に変化させた場合の表層水温の計算結果 (St.1)

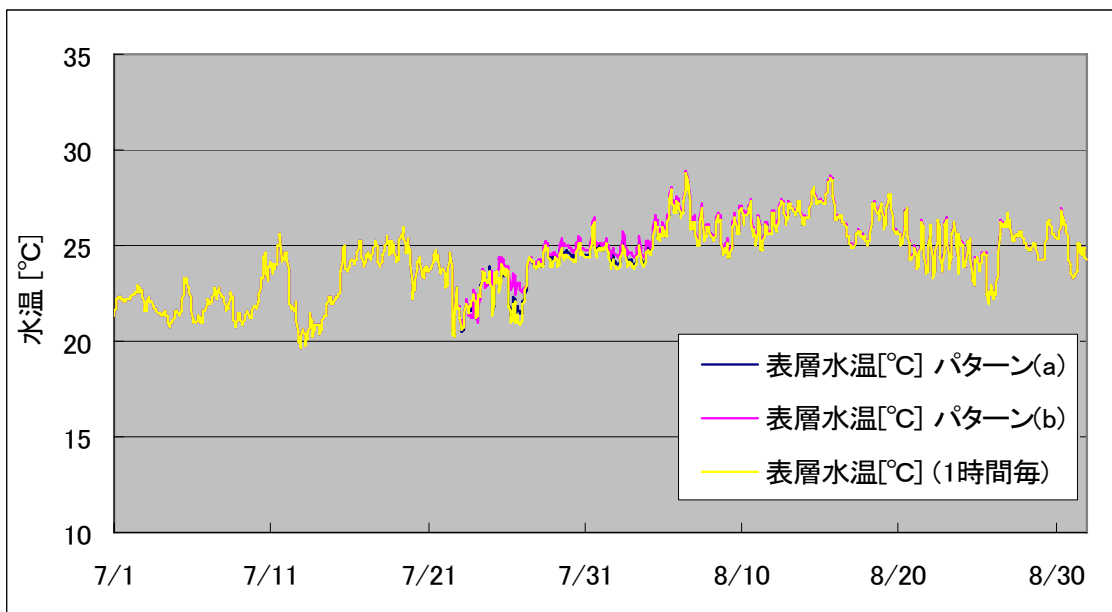


図 5.59 境界条件を短期的に変化させた場合の表層水温の計算結果 (St.2)

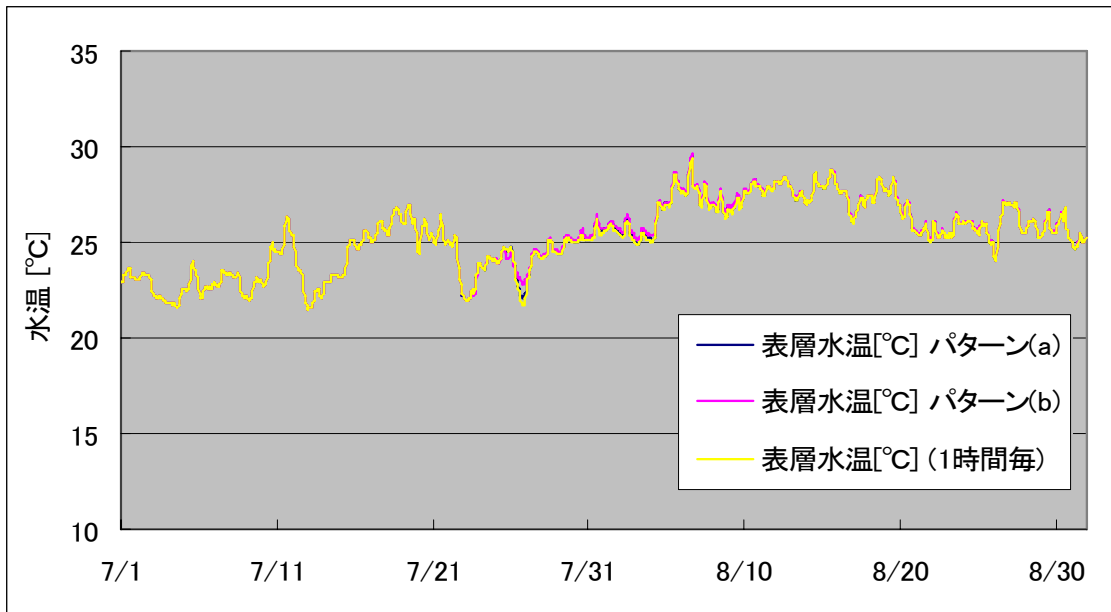


図 5.60 境界条件を短期的に変化させた場合の表層水温の計算結果 (St.3)

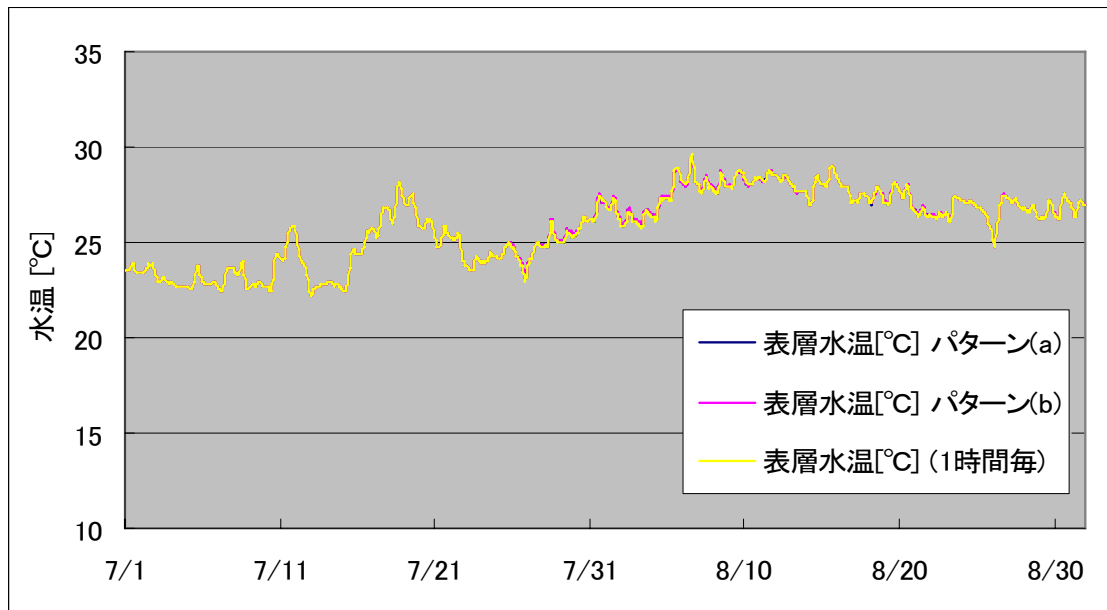


図 5.61 境界条件を短期的に変化させた場合の表層水温の計算結果 (St.4)

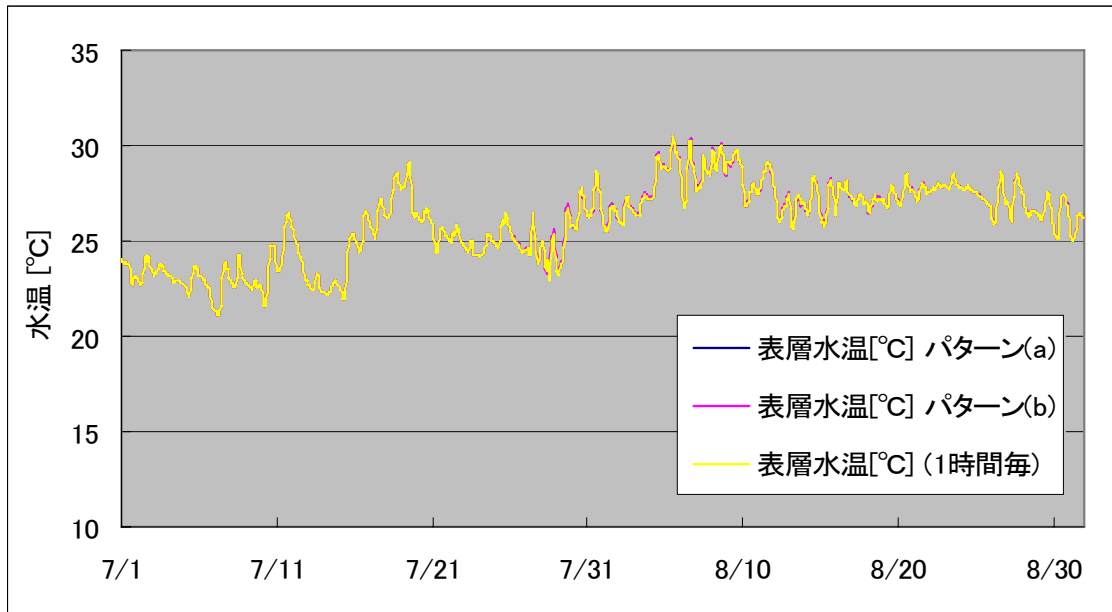


図 5.62 境界条件を短期的に変化させた場合の表層水温の計算結果 (St.5)

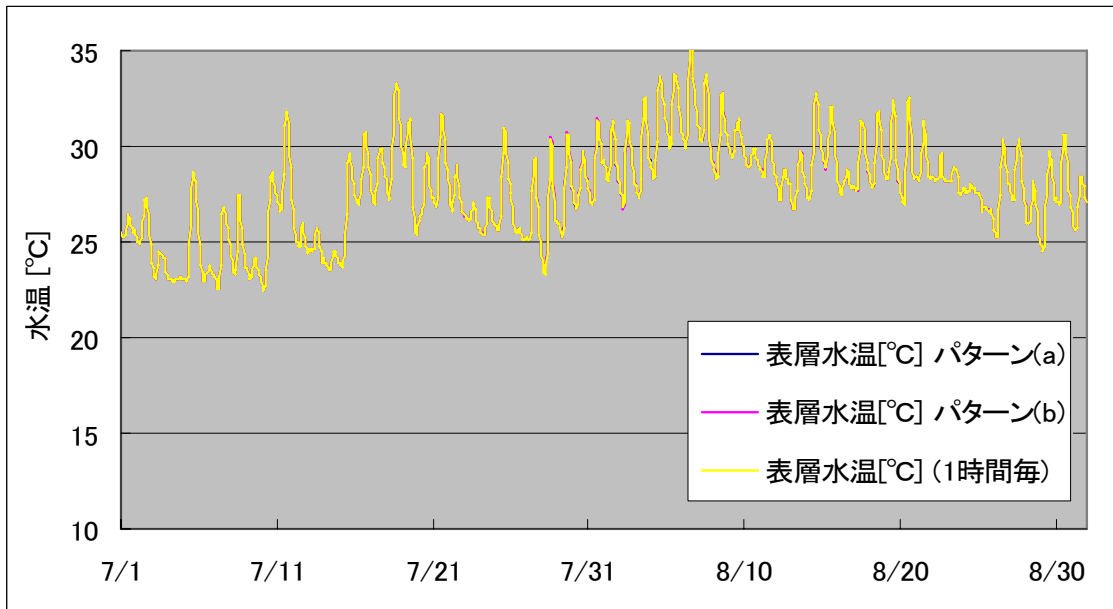


図 5.63 境界条件を短期的に変化させた場合の表層水温の計算結果 (St.6)



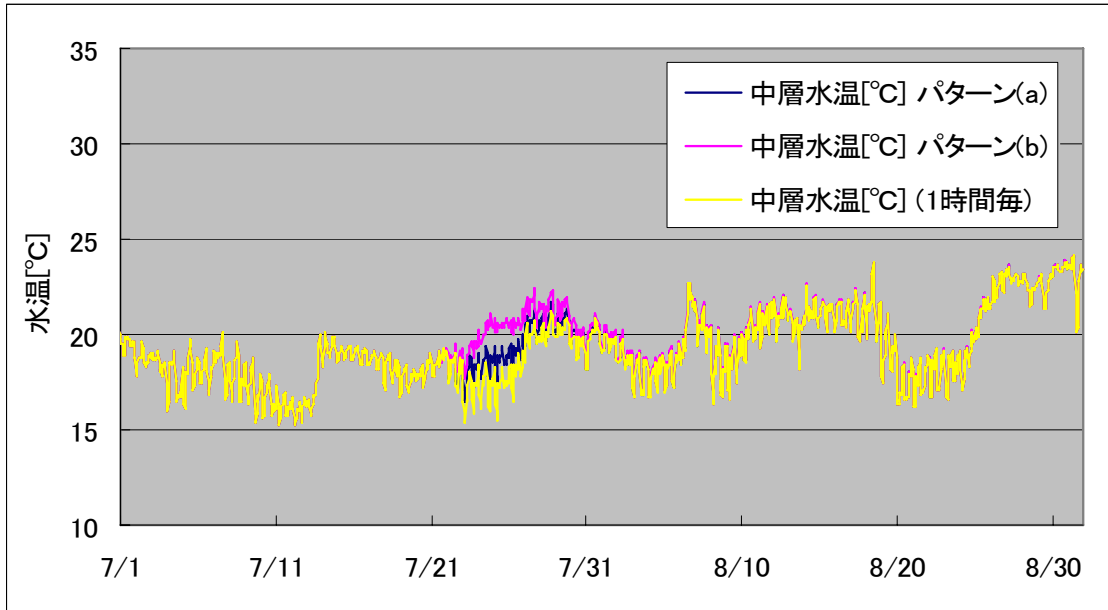


図 5.64 境界条件を短期的に変化させた場合の中層水温の計算結果 (St.1)

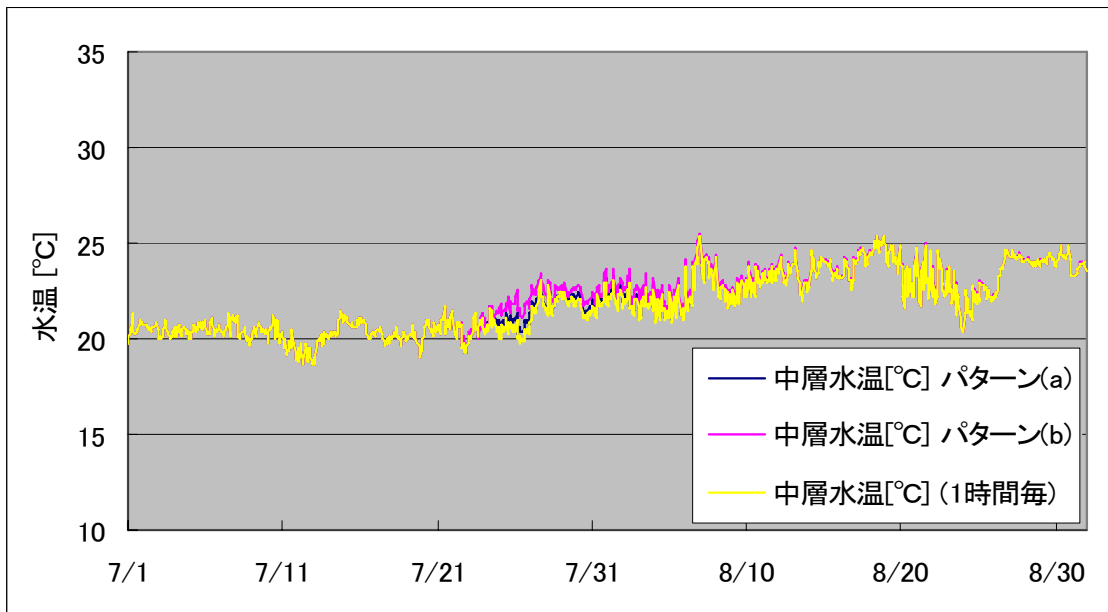


図 5.65 境界条件を短期的に変化させた場合の中層水温の計算結果 (St.2)

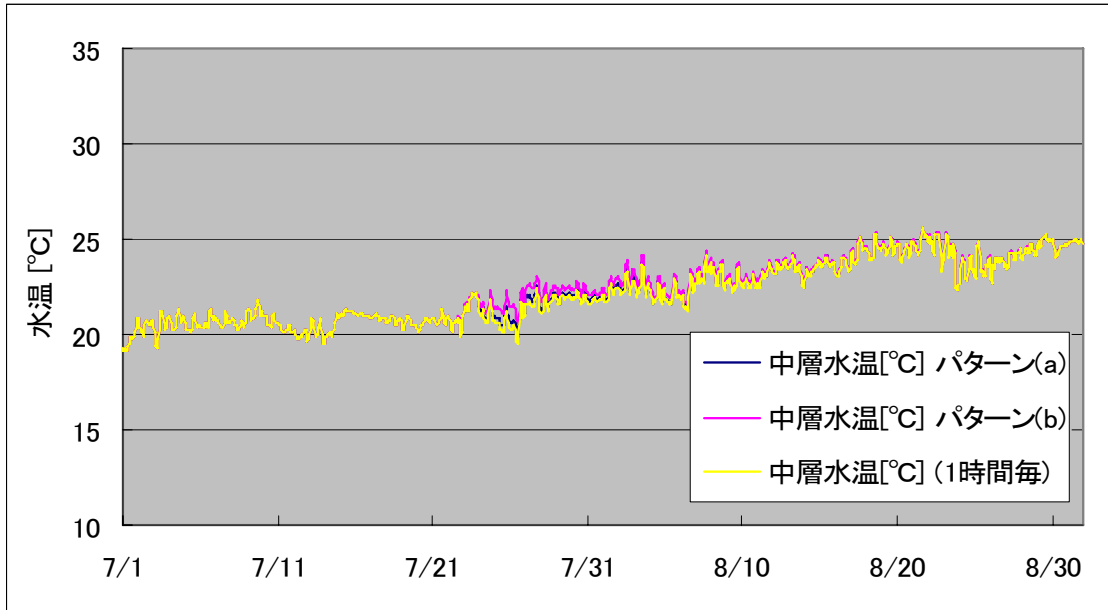


図 5.66 境界条件を短期的に変化させた場合の中層水温の計算結果 (St.3)

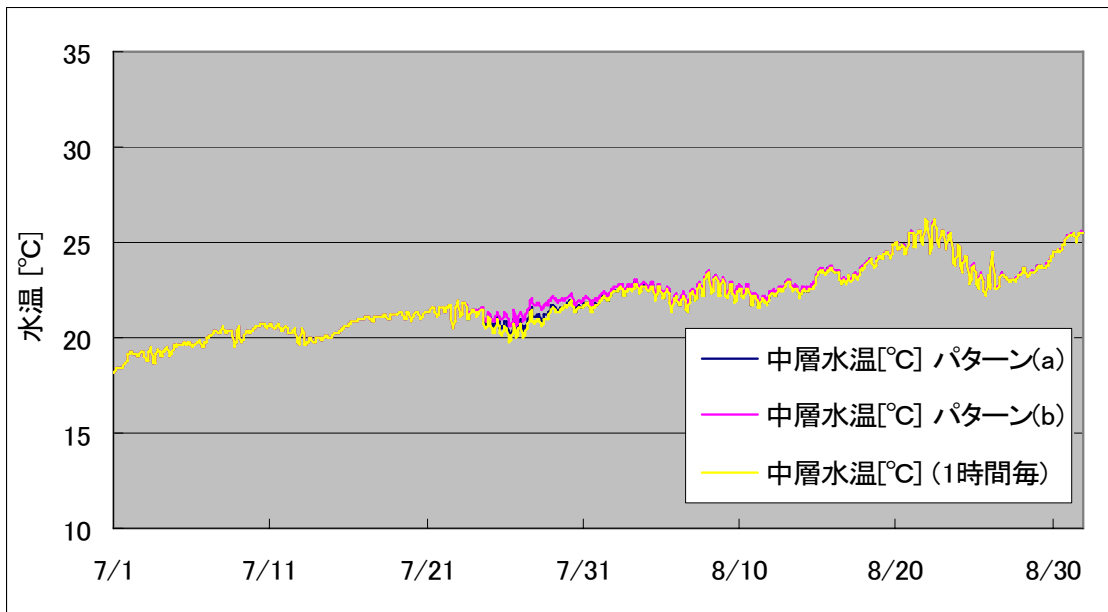


図 5.67 境界条件を短期的に変化させた場合の中層水温の計算結果 (St.4)

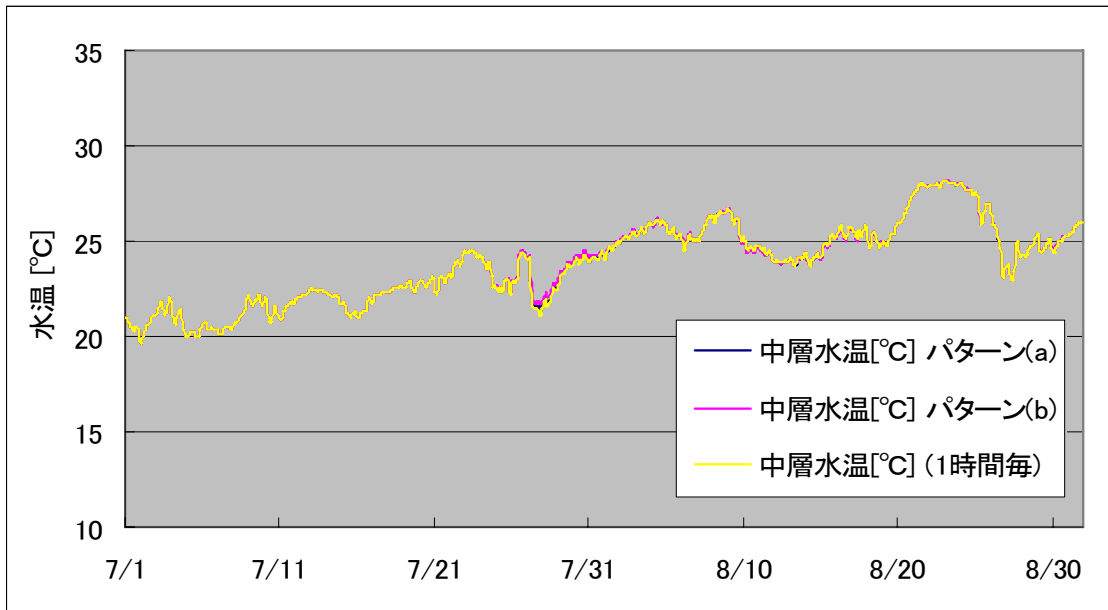


図 5.68 境界条件を短期的に変化させた場合の中層水温の計算結果 (St.3)

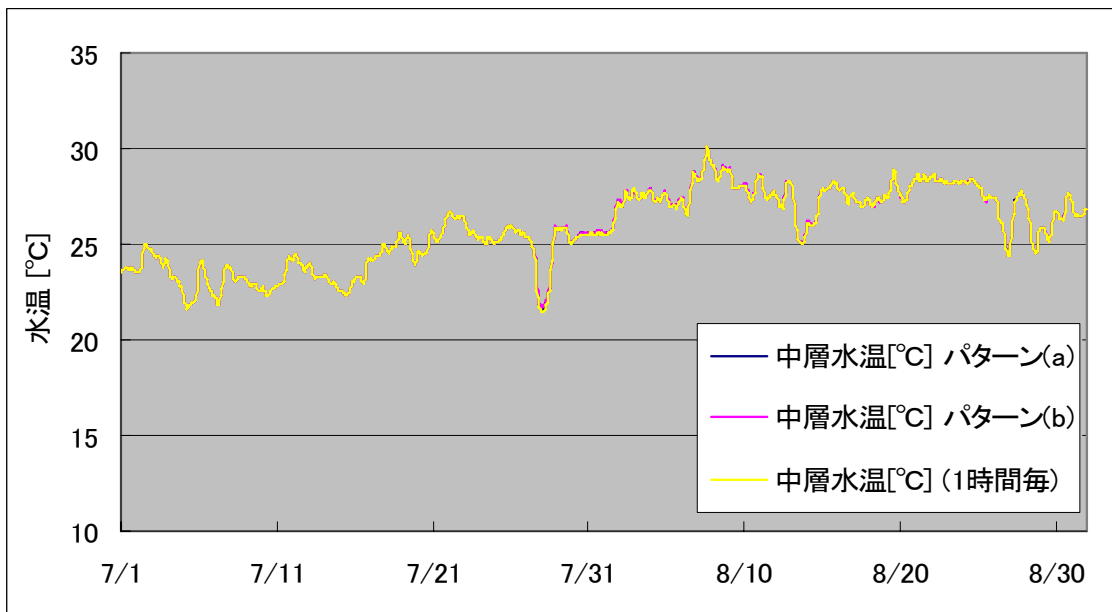


図 5.69 境界条件を短期的に変化させた場合の中層水温の計算結果 (St.6)

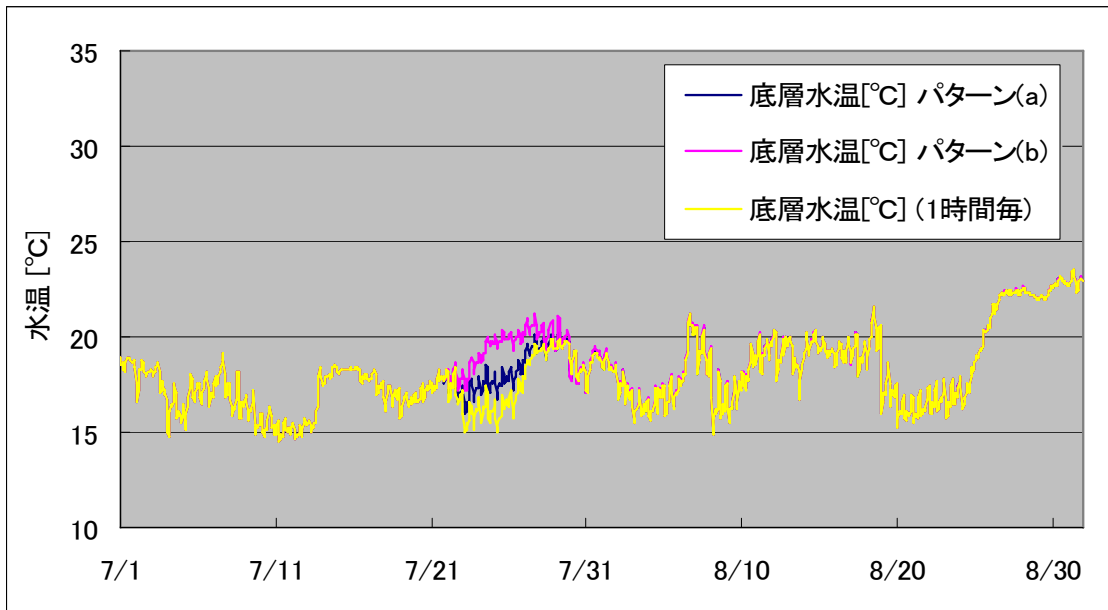


図 5.70 境界条件を短期的に変化させた場合の底層水温の計算結果 (St.1)

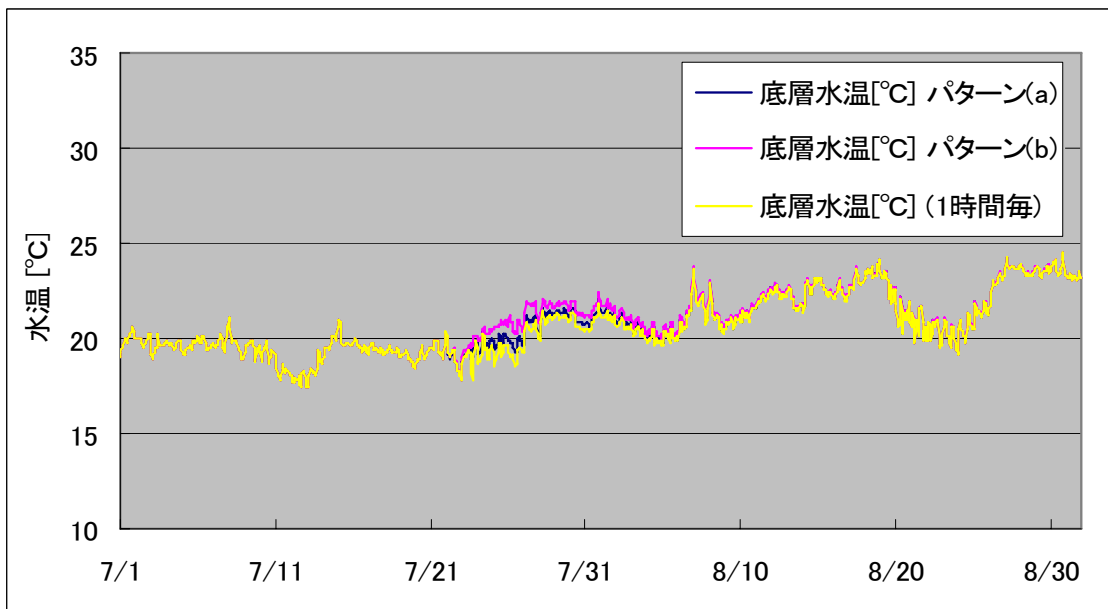


図 5.71 境界条件を短期的に変化させた場合の底層水温の計算結果 (St.2)

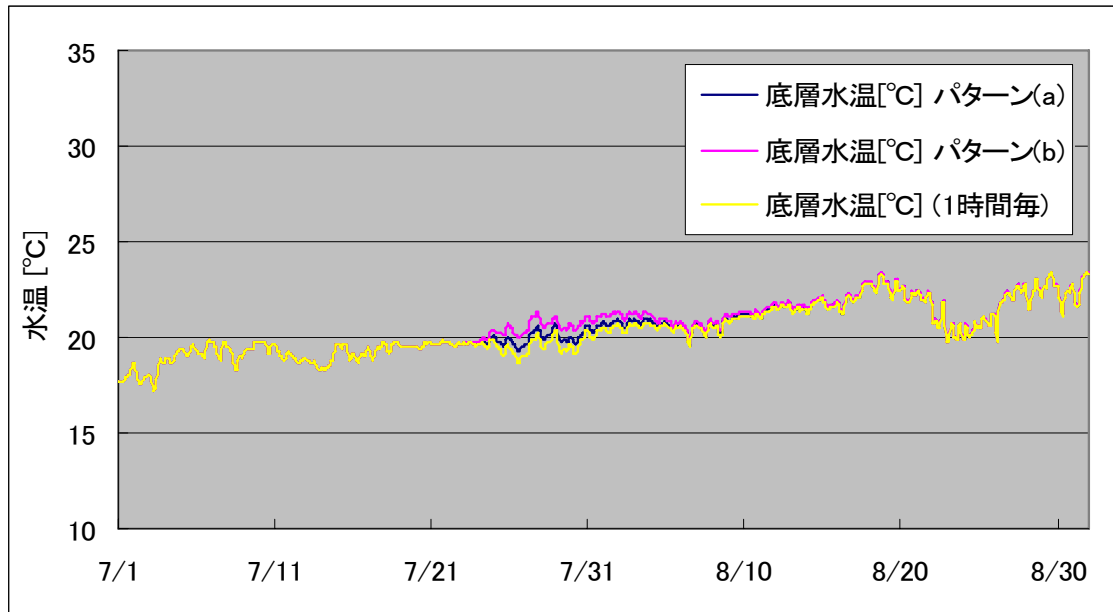


図 5.72 境界条件を短期的に変化させた場合の底層水温の計算結果 (St.3)

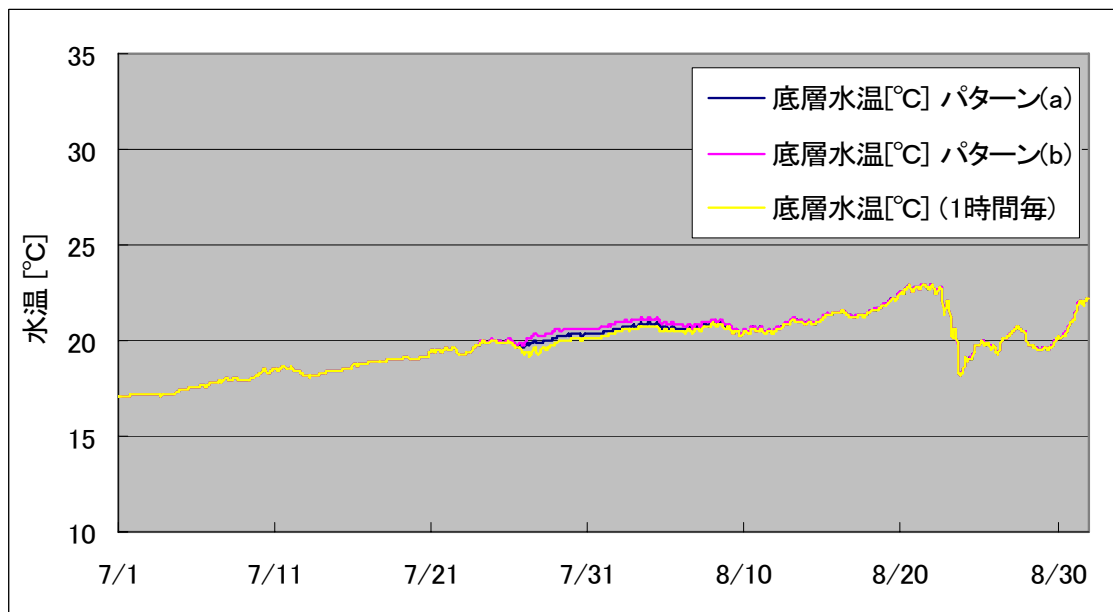


図 5.73 境界条件を短期的に変化させた場合の底層水温の計算結果 (St.4)

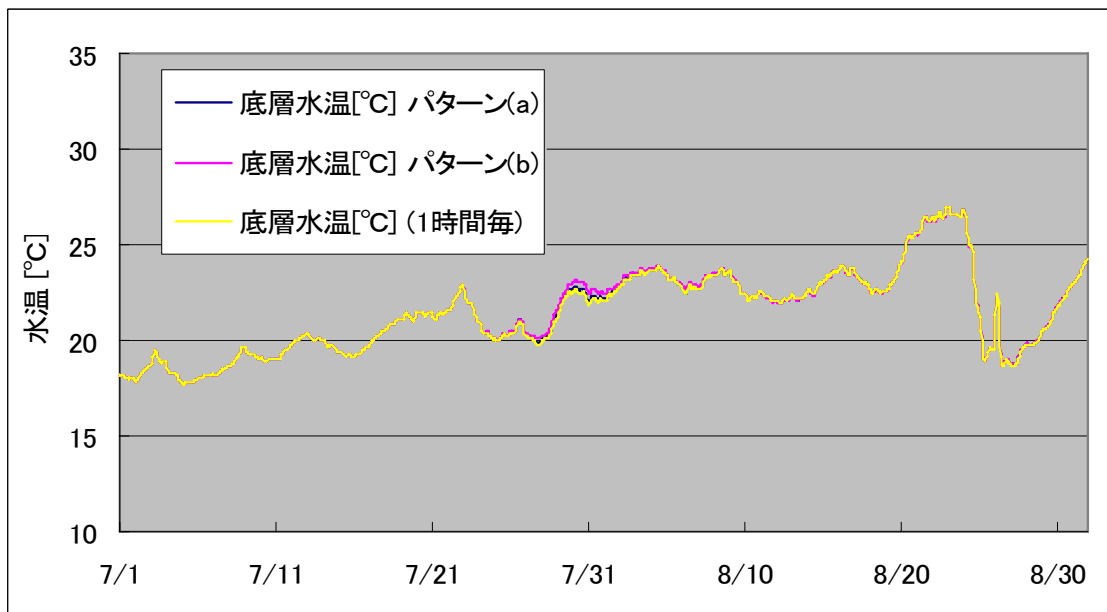


図 5.74 境界条件を短期的に変化させた場合の底層水温の計算結果 (St.5)

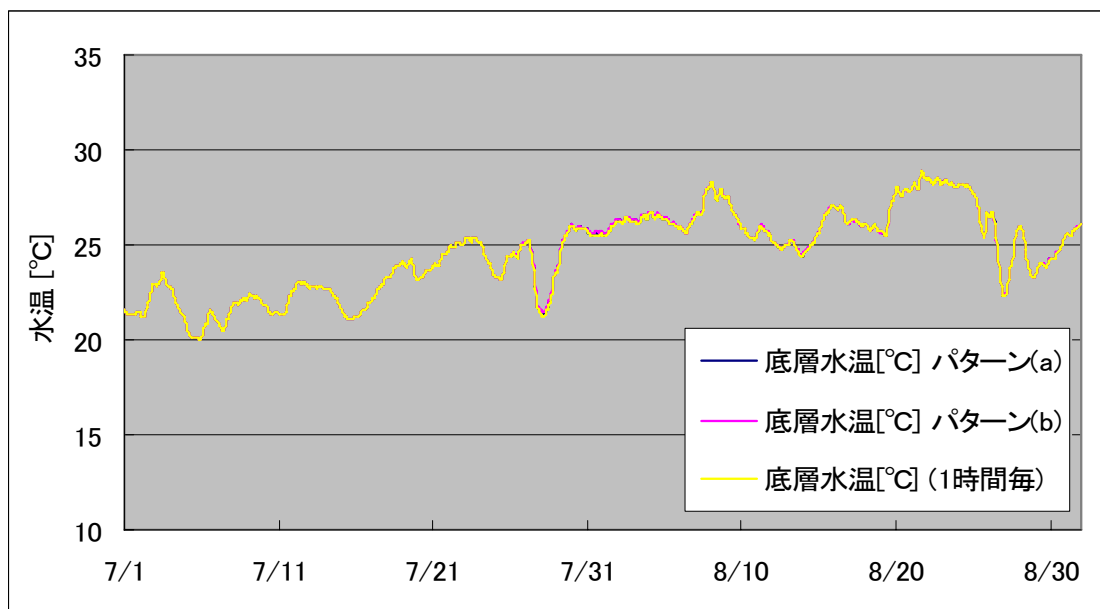


図 5.75 境界条件を短期的に変化させた場合の底層水温の計算結果 (St.6)

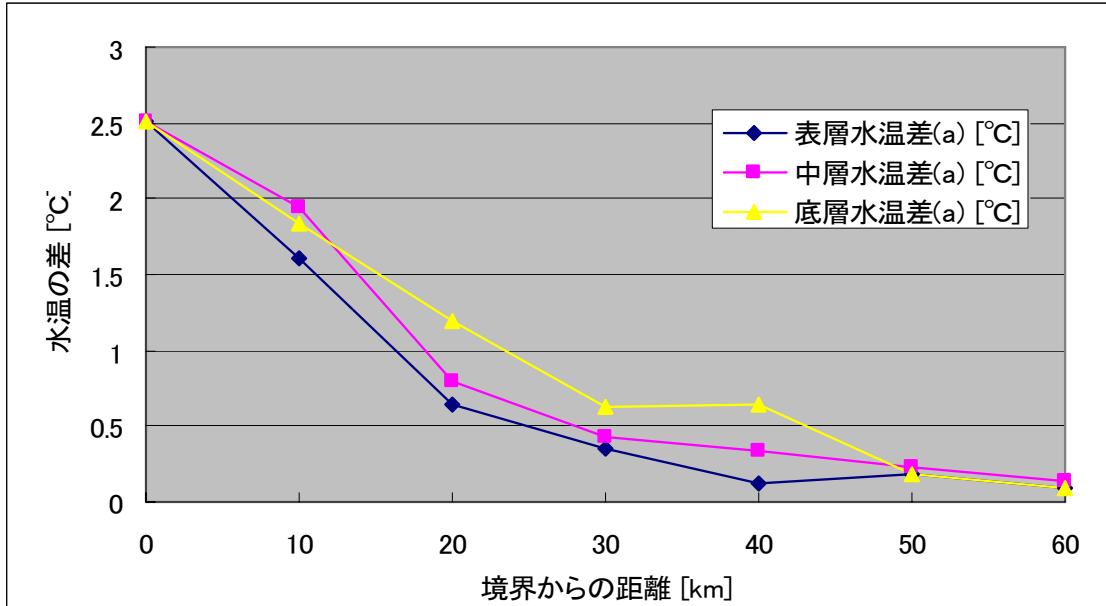


図 5.76 短期的変動によって生じた距離別の最大水温差 (パターン(a))

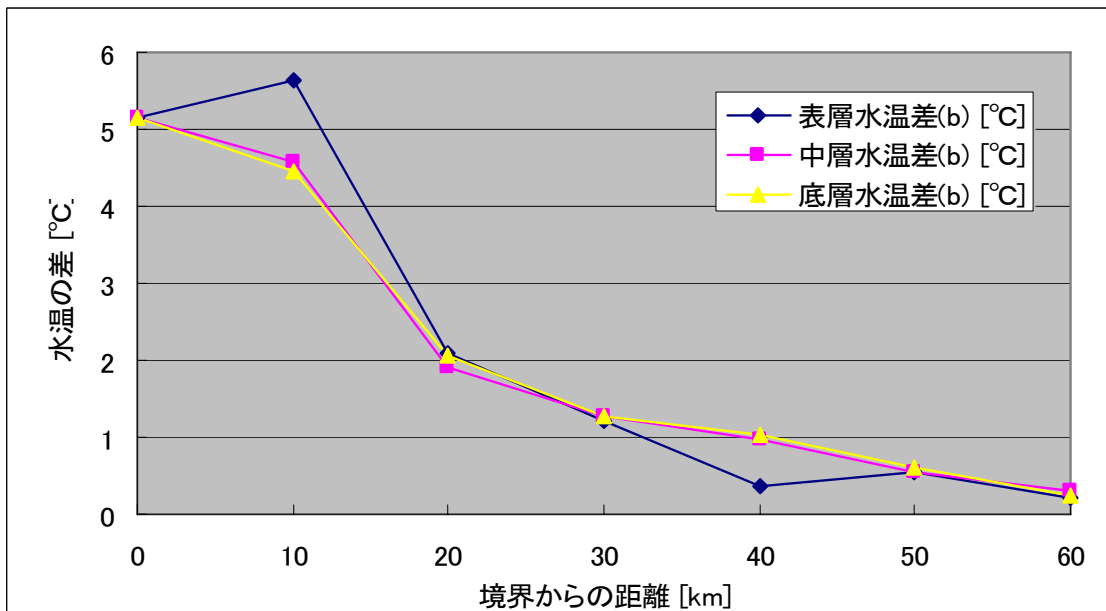


図 5.77 短期的変動によって生じた距離別の最大水温差 (パターン(b))

## 考察

図 5.76, 5.77 は境界条件をパターン(a)とパターン(b)にして計算した結果と、通常の境界条件で計算を行った結果との水温の最大の差を示したものである。グラフから、開境界からの水温の伝播は湾奥に進むに連れて、指数関数的に減少していることが分かる。水温の場合は短波放射の影響による温め効果や、あるいは長波放射、潜熱輸送、顕熱輸送による冷却効果のため、境界条件が湾奥に届きにくい、今回の結果からも同様のことがいえる。

開境界からもっとも近い St.1 においては、表層 (図 5.58)、中層 (図 5.64)、下層 (図 5.70) ともに境界条件パターン(a)とパターン(b)の影響がはっきりと表れている。しかし、開境界から離れるに従って境界条件の影響が小さくなり、表層では St.3 まで、中層では St.4 まで、底層では St.5 まで、わずかではあるが計算結果の違いが確認された。

また、パターン(a)、パターン(b)ともに 7 月 20 日～27 日までの水温を意図的に変化させたが、例えば St.3 の底層水温 (図 5.72) では 8 月 10 日あたりまでわずかではあるが、影響が持続していることが分かる。



#### 5.4 境界条件を長期的に変動させた場合

図 5.78～5.98 に水温の境界条件を長期的に変動させた場合の計算結果を示す。

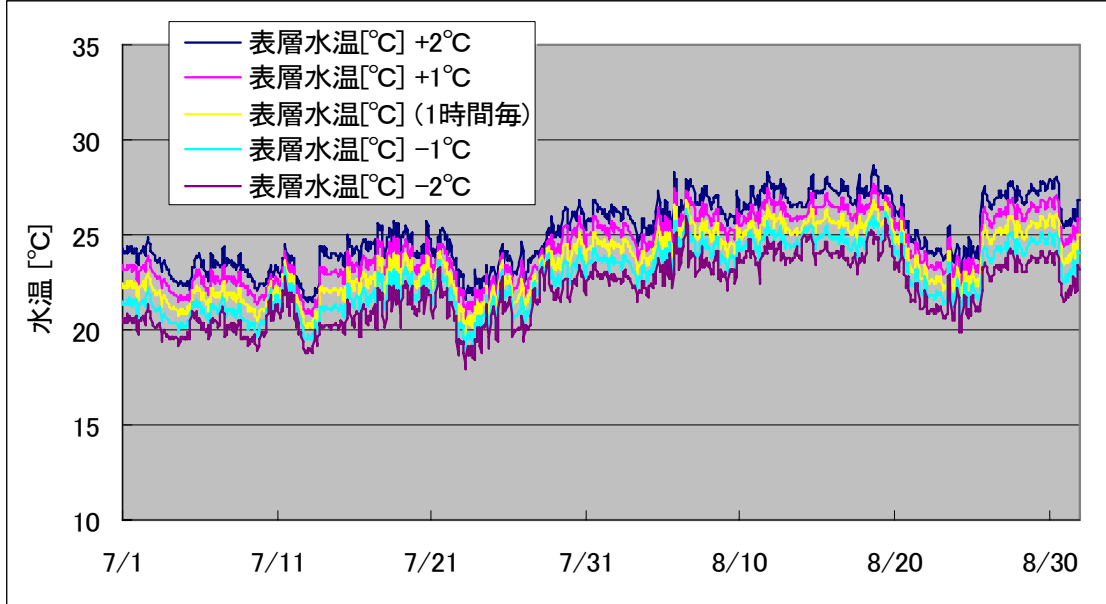


図 5.78 境界条件を長期的に変化させた場合の表層水温の計算結果 (St.1)

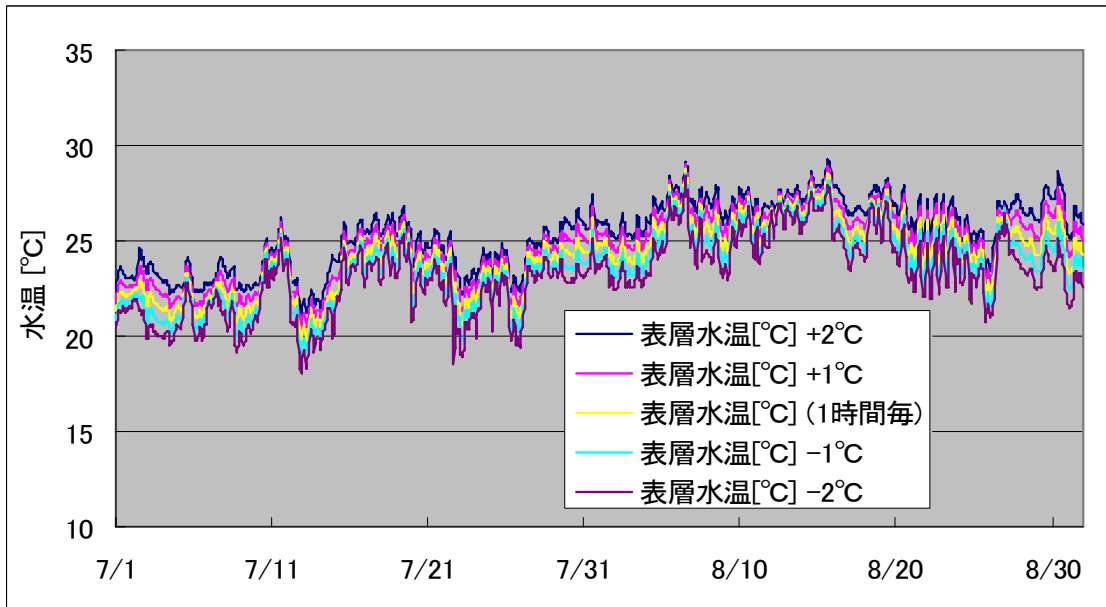


図 5.79 境界条件を長期的に変化させた場合の表層水温の計算結果 (St.2)

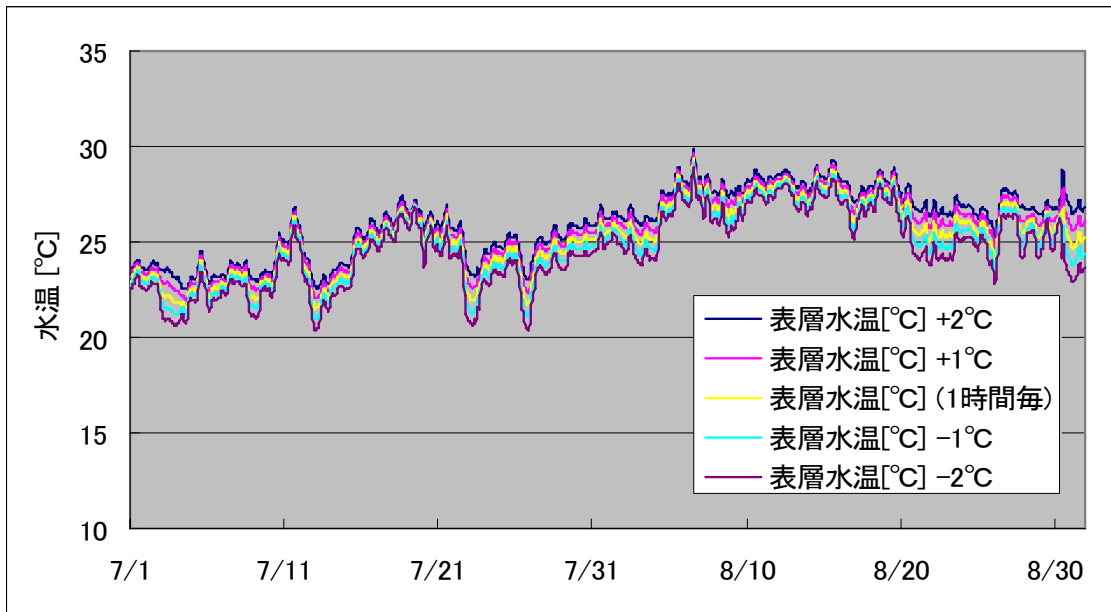


図 5.80 境界条件を長期的に変化させた場合の表層水温の計算結果 (St.3)

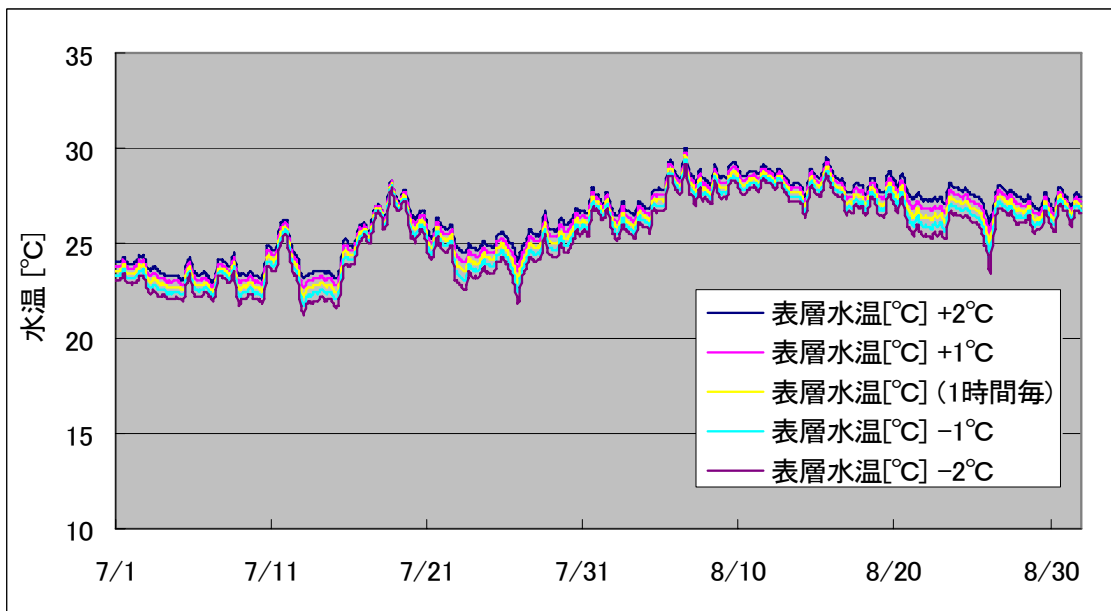


図 5.81 境界条件を長期的に変化させた場合の表層水温の計算結果 (St.4)

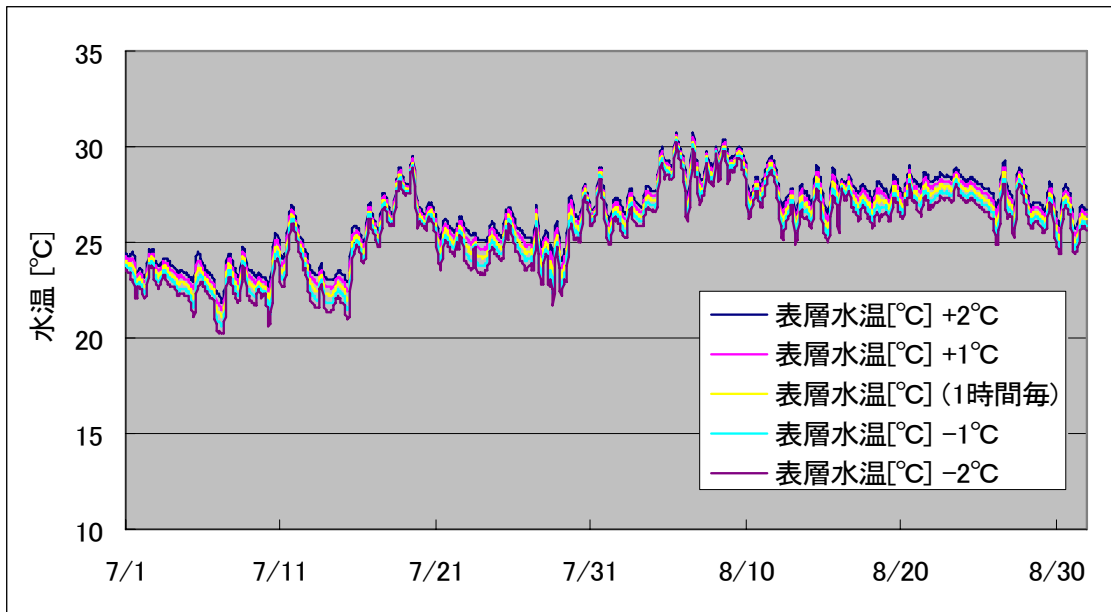


図 5.82 境界条件を長期的に変化させた場合の表層水温の計算結果 (St.5)

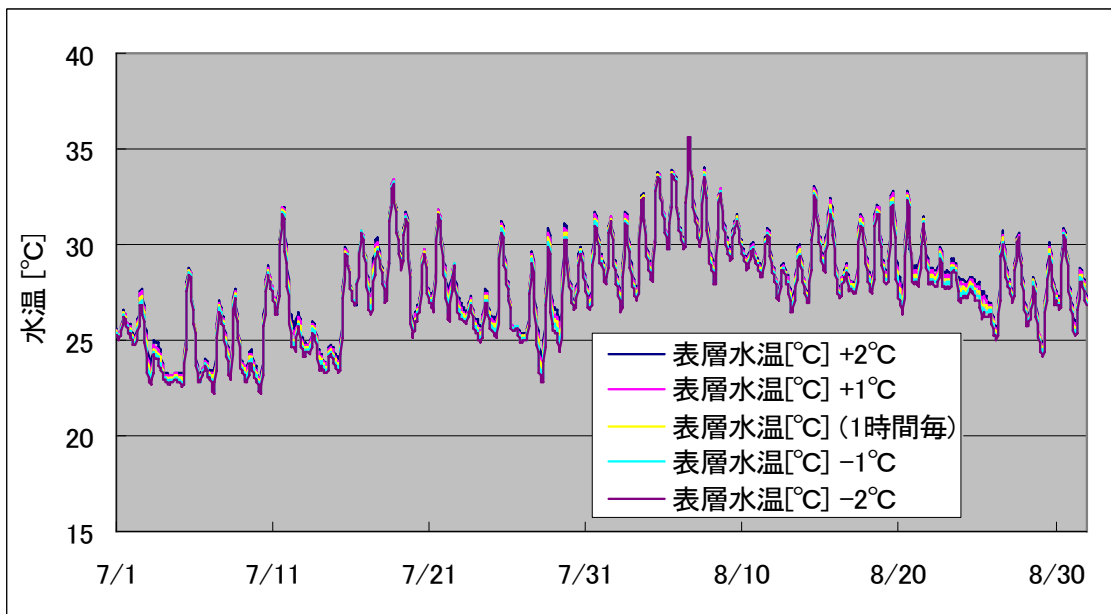


図 5.83 境界条件を長期的に変化させた場合の表層水温の計算結果 (St.6)

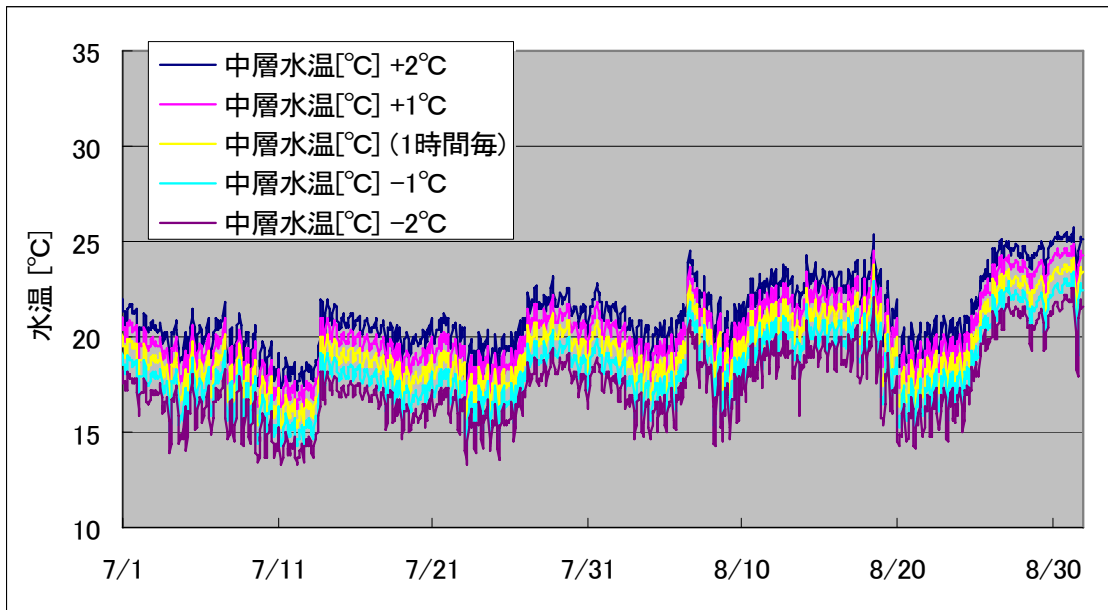


図 5.84 境界条件を長期的に変化させた場合の中層水温の計算結果 (St.1)

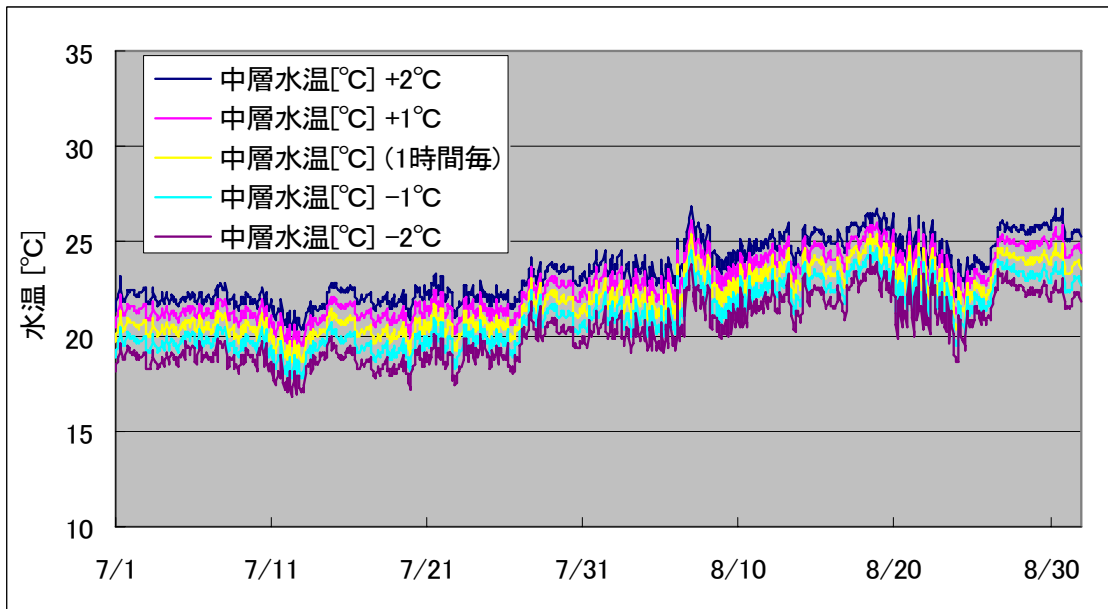


図 5.85 境界条件を長期的に変化させた場合の中層水温の計算結果 (St.2)

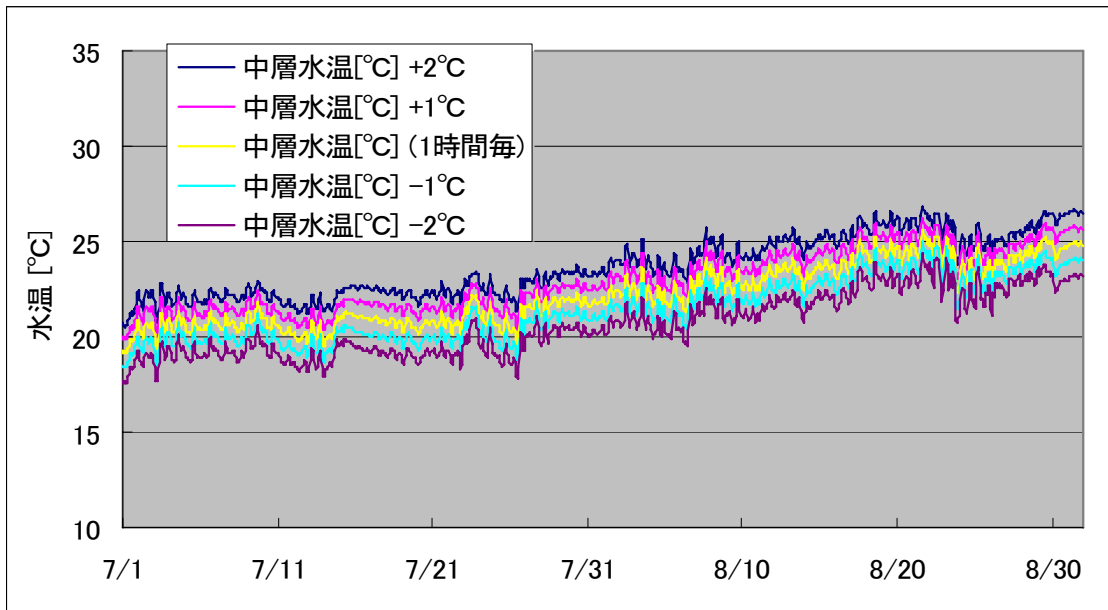


図 5.86 境界条件を長期的に変化させた場合の中層水温の計算結果 (St.3)

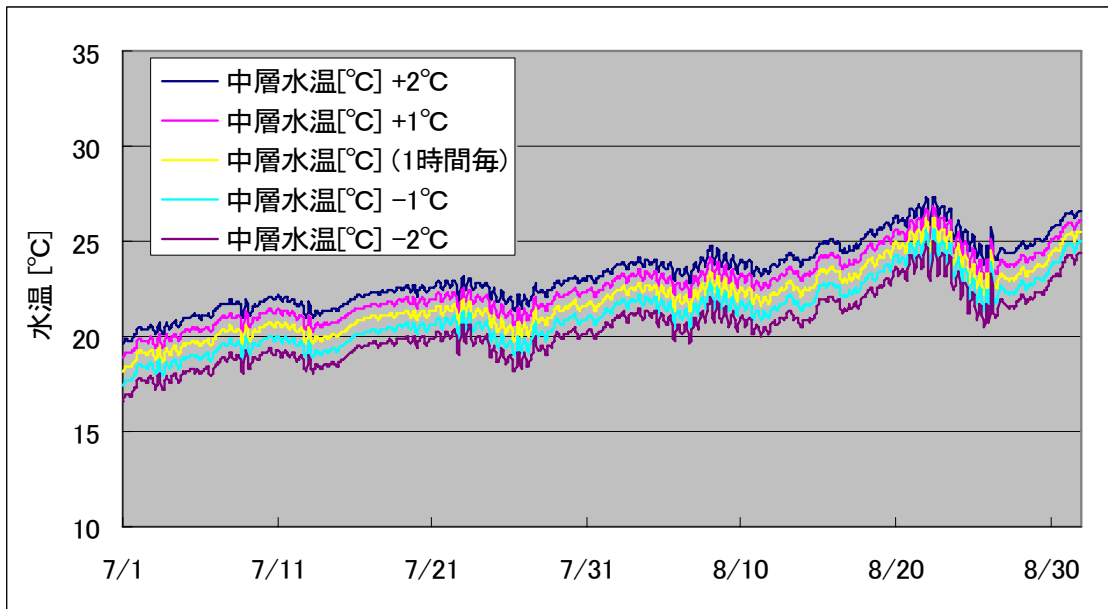


図 5.87 境界条件を長期的に変化させた場合の中層水温の計算結果 (St.4)

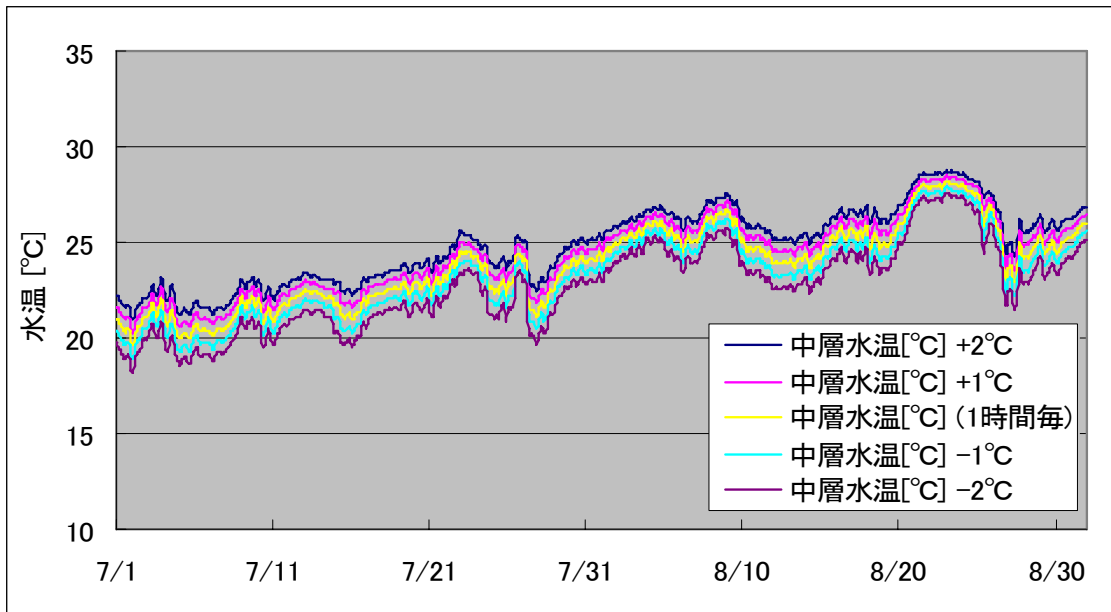


図 5.88 境界条件を長期的に変化させた場合の中層水温の計算結果 (St.5)

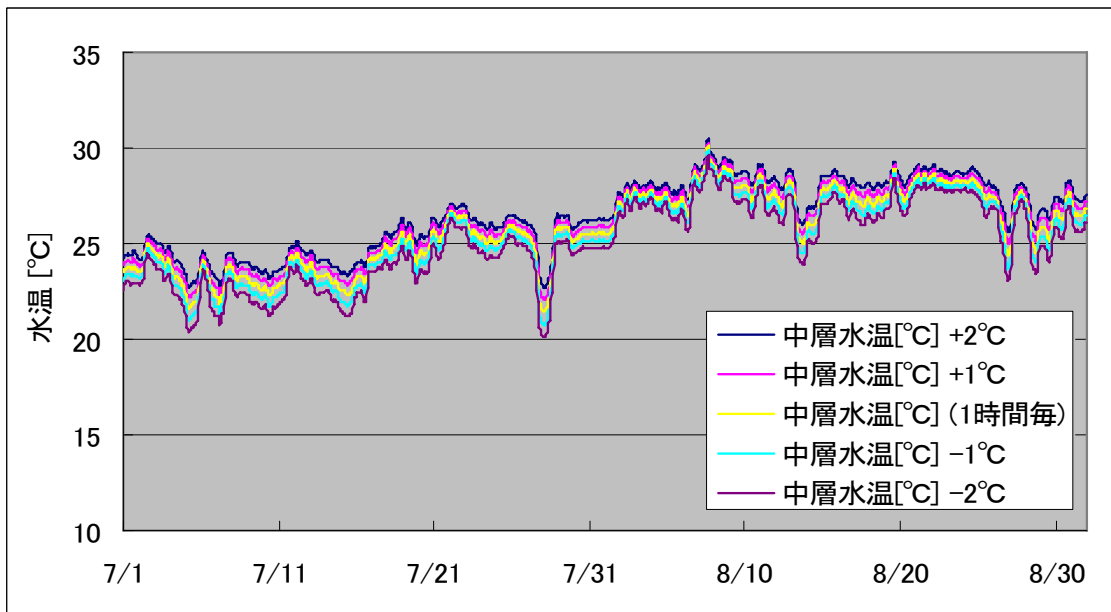


図 5.89 境界条件を長期的に変化させた場合の中層水温の計算結果 (St.6)

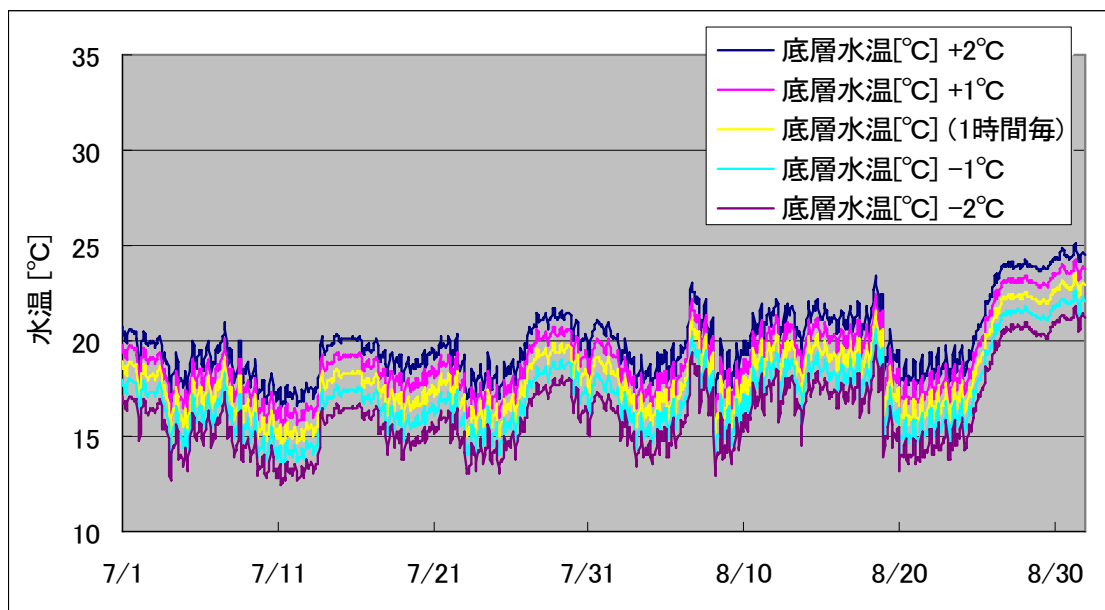


図 5.90 境界条件を長期的に変化させた場合の底層水温の計算結果 (St.1)

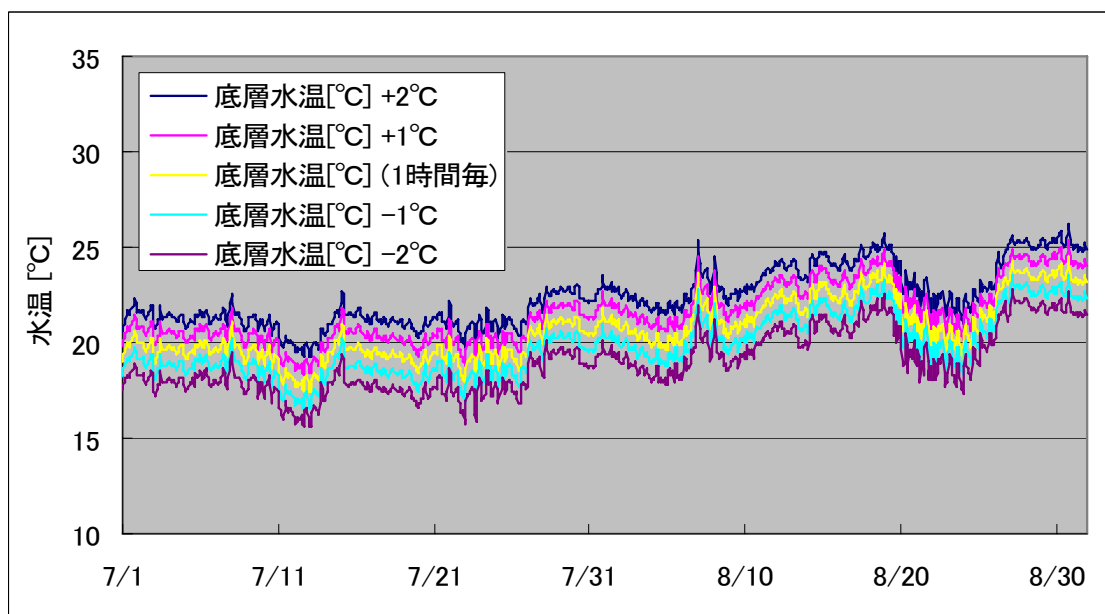


図 5.91 境界条件を長期的に変化させた場合の底層水温の計算結果 (St.2)

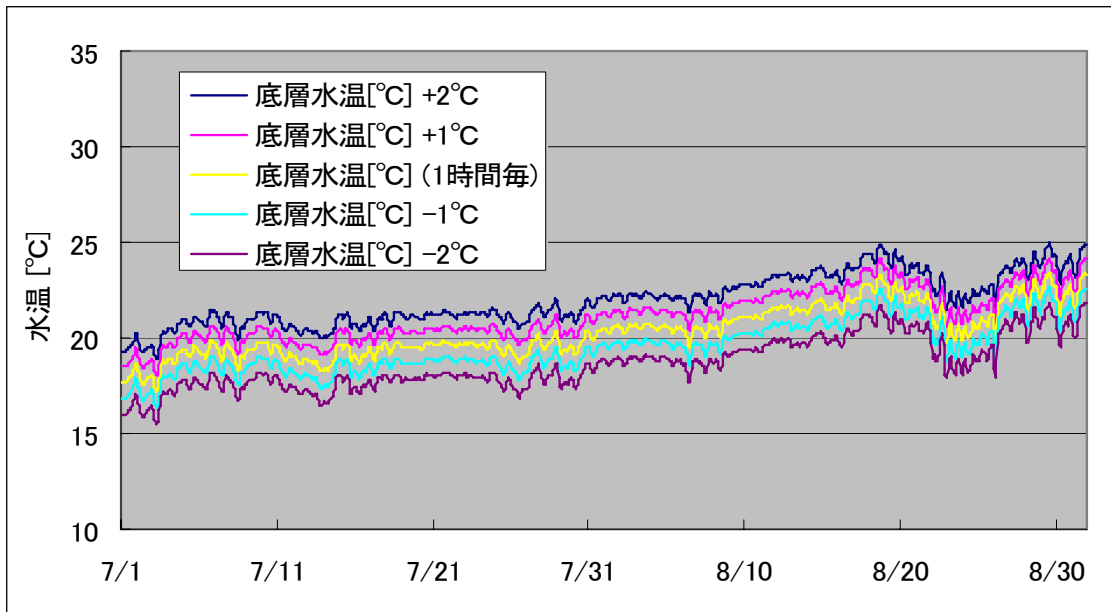


図 5.92 境界条件を長期的に変化させた場合の底層水温の計算結果 (St.3)

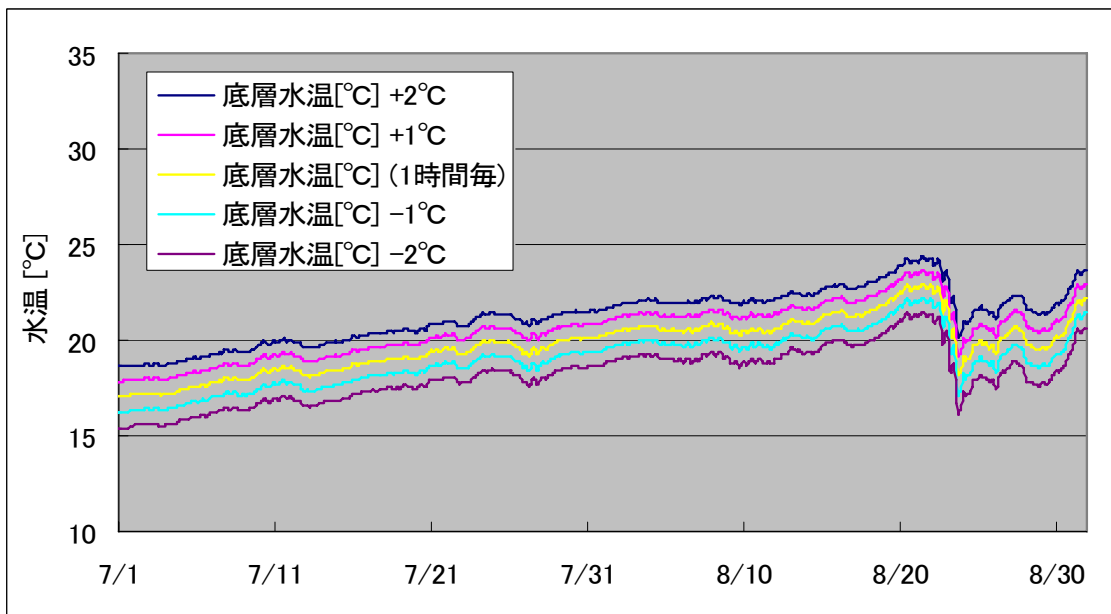


図 5.93 境界条件を長期的に変化させた場合の底層水温の計算結果 (St.4)



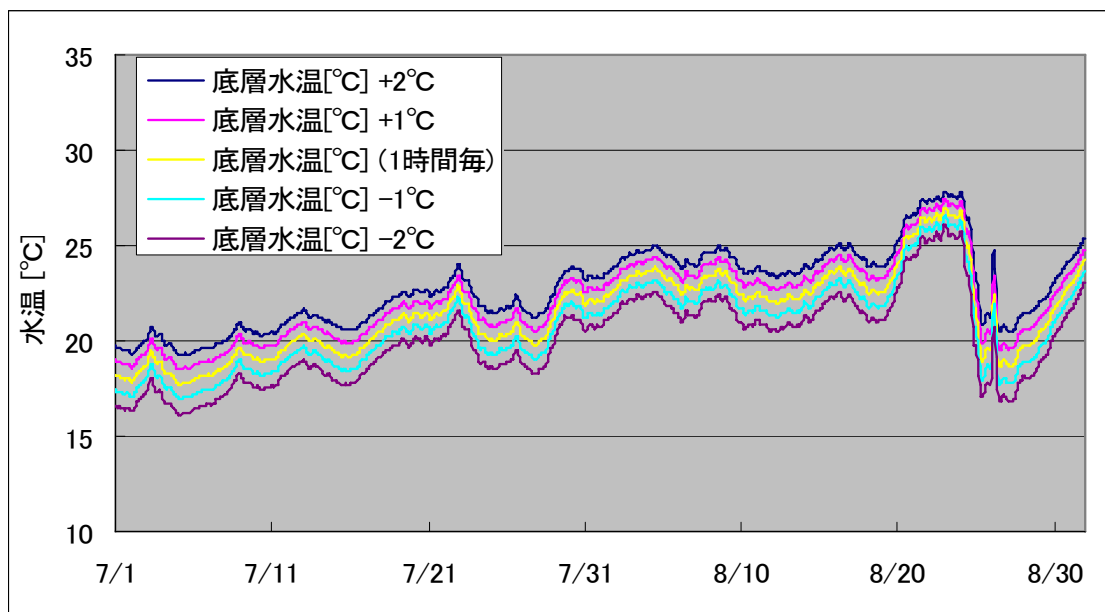


図 5.94 境界条件を長期的に変化させた場合の底層水温の計算結果 (St.5)

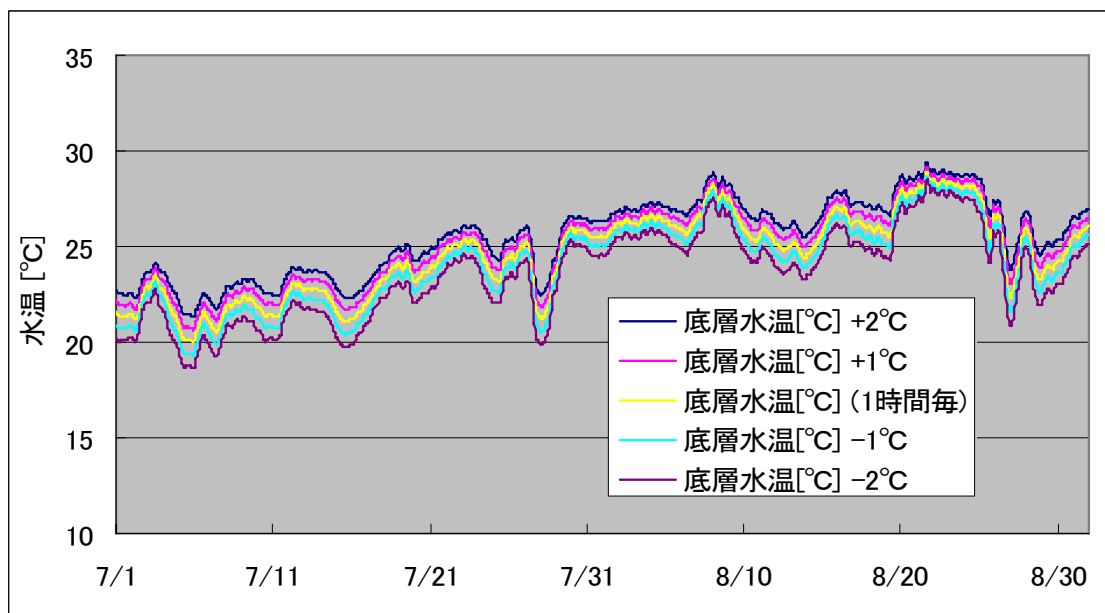


図 5.95 境界条件を長期的に変化させた場合の底層水温の計算結果 (St.6)

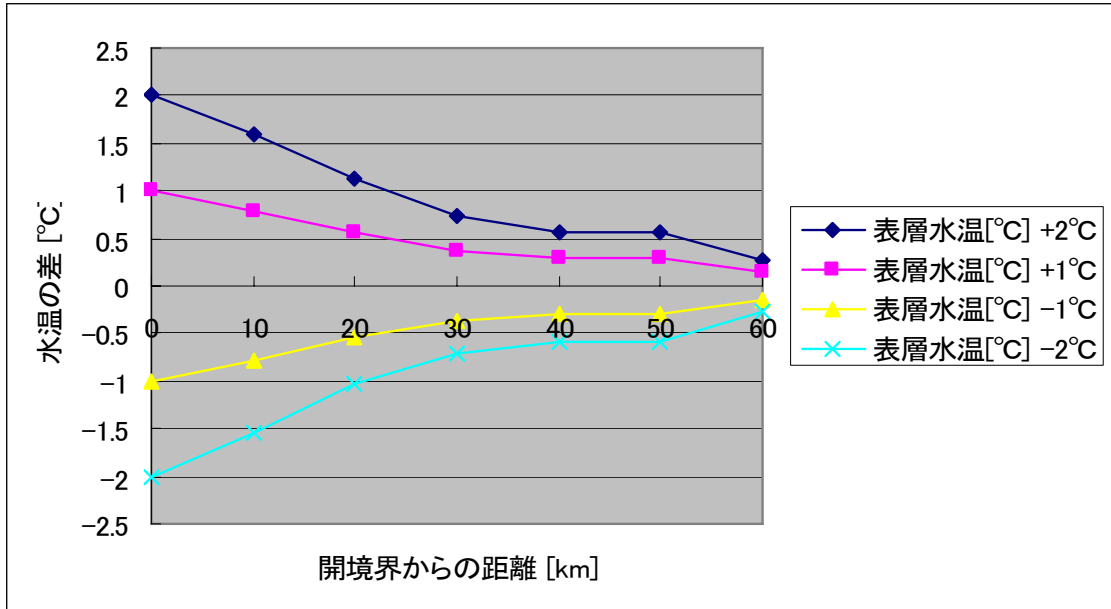


図 5.96 境界条件を長期的に変化させた場合の開境界からの距離による水温の差

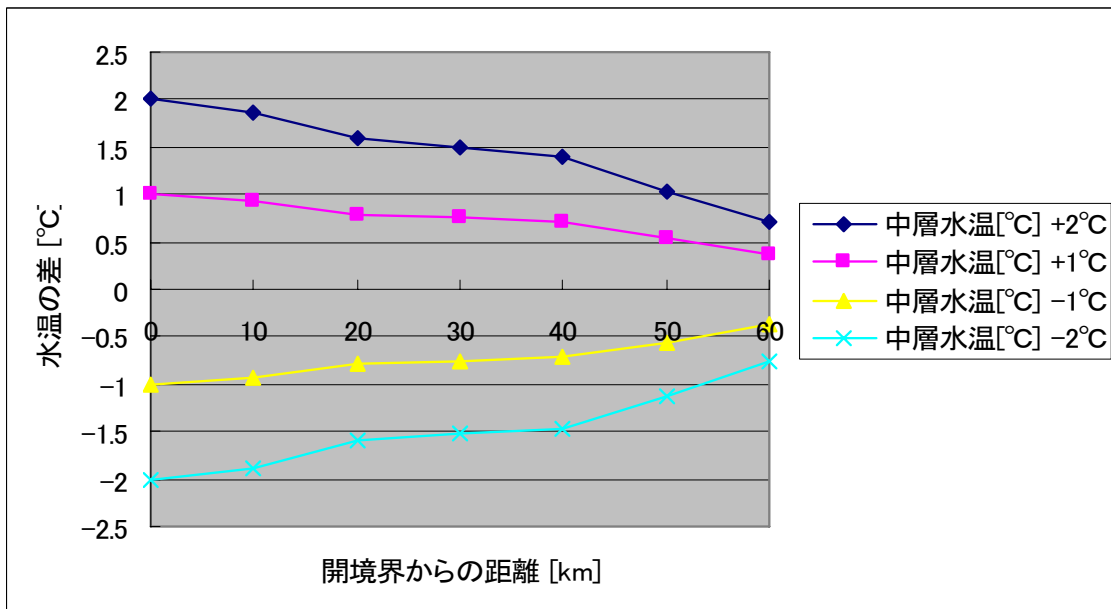


図 5.97 境界条件を長期的に変化させた場合の開境界からの距離による中層水温の差

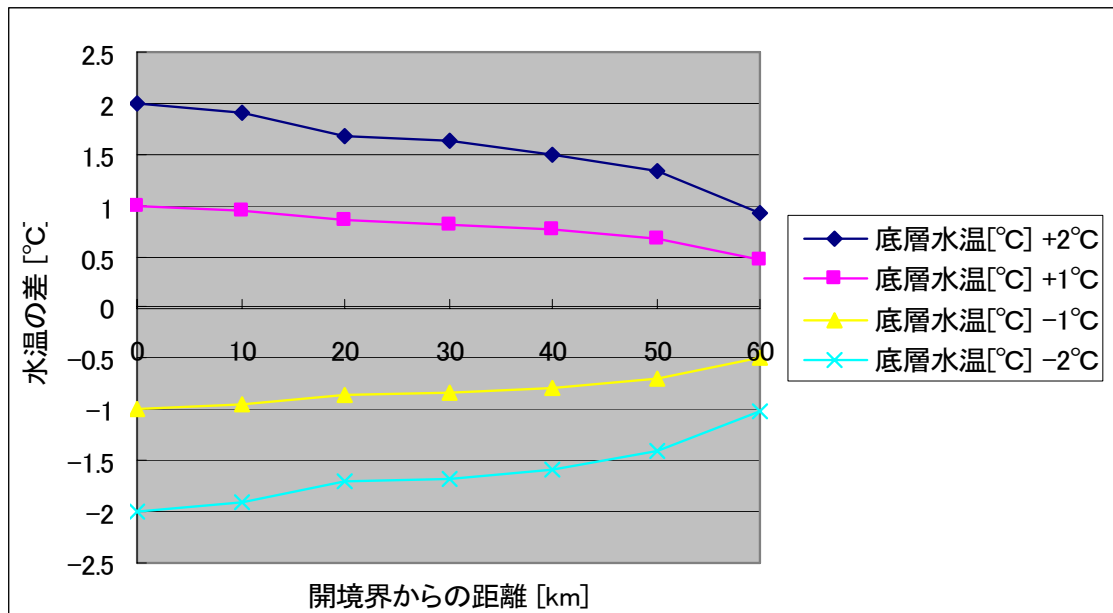


図 5.98 境界条件を長期的に変化させた場合の開境界からの距離による底層水温の差

### 考察

短期的に水温を変動させた場合、開境界で与えた境界条件の影響は湾奥にはほとんど届かないことが、5.3 で示された。本実験では、計算開始から終了まで、水温の境界条件を通常の境界条件よりもそれぞれ+2[°C], +1[°C], -1[°C], -2[°C]した水温の境界条件を作成し、湾内においてどの程度影響が出るかを調べた。

図 5.96～5.98 は 1 時間間隔の境界条件にて計算した結果を基準値として、7～8 月の計算期間で平均してどれくらいの水溫の差が生じるかを表している。境界から離れるにつれて、-1[°C], -2[°C]の境界条件は表層、中層、下層を問わず、水温が上昇している。これは短波放射の影響による温め効果によって湾奥に進むにつれて水温が上昇したものと考えられる。+2[°C], +1[°C]の境界条件は逆に、表層、中層、下層を問わず、水温が低下している。これは長波放射、潜熱輸送、顕熱輸送による冷却効果のため、湾奥に進むにつれて水温が低下したものと考えられる。

図 5.97, 5.98 では+2[°C]と-2[°C]の水を比較した場合、-2[°C]の水が湾奥に届くまでに上昇する水温の幅と、+2[°C]の水が湾奥に届くまでに低下する水温の幅を比較した場合、前者の方が小さい。これは-2[°C]の水のほうが密度が重いため、+2[°C]の水よりも多く外洋から湾内に流入したものと考えられる。

図 5.99～5.119 に塩分の境界条件を長期的に変動させた場合の計算結果を示す。

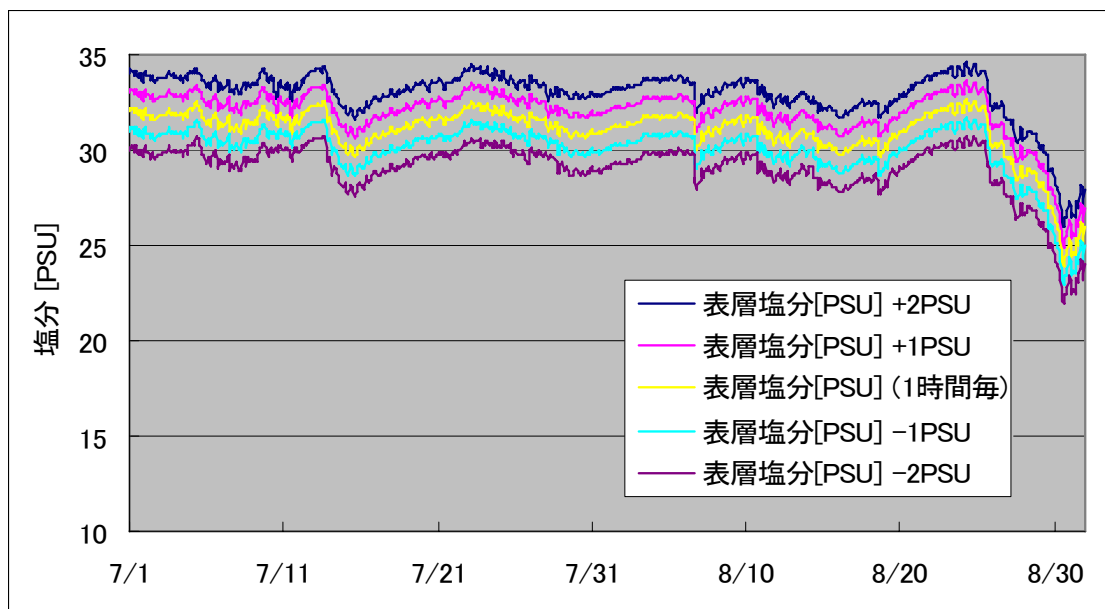


図 5.99 境界条件を長期的に変化させた場合の表層塩分の計算結果 (St.1)

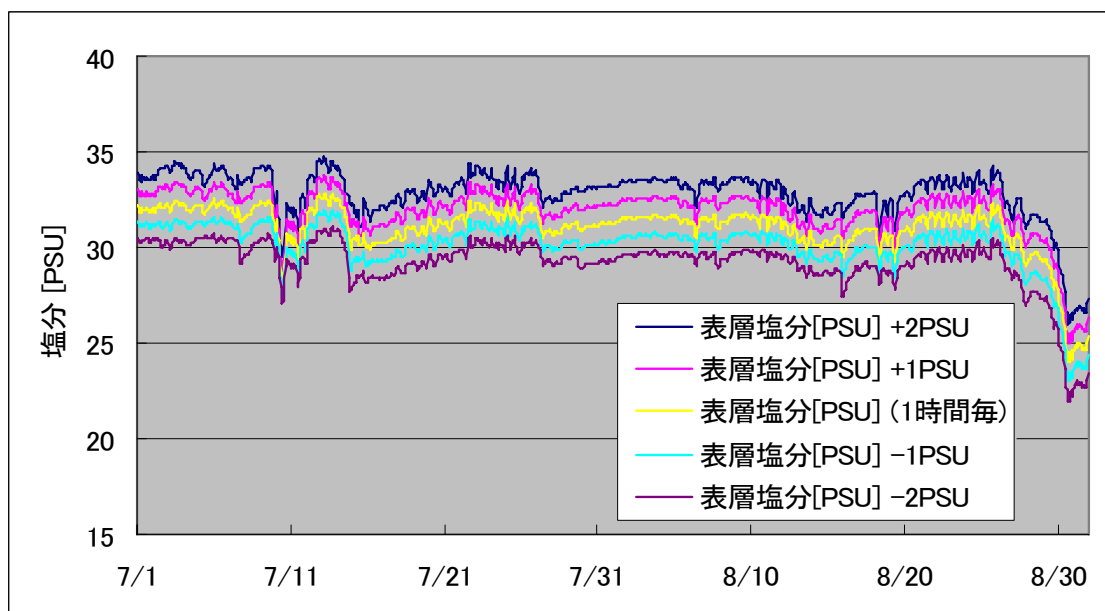


図 5.100 境界条件を長期的に変化させた場合の表層塩分の計算結果 (St.2)

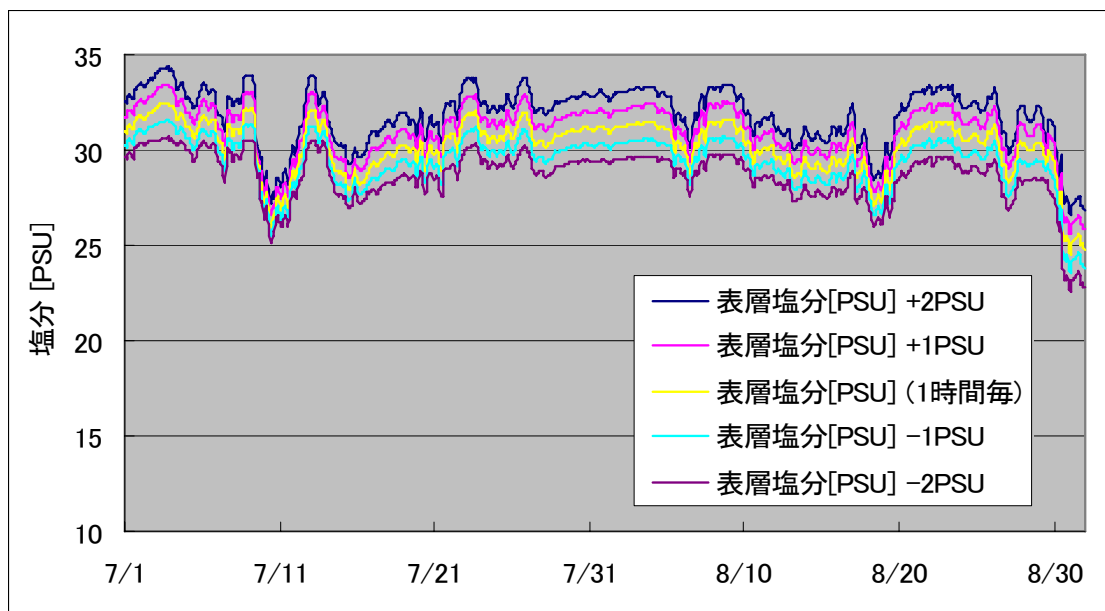


図 5.101 境界条件を長期的に変化させた場合の表層塩分の計算結果 (St.3)

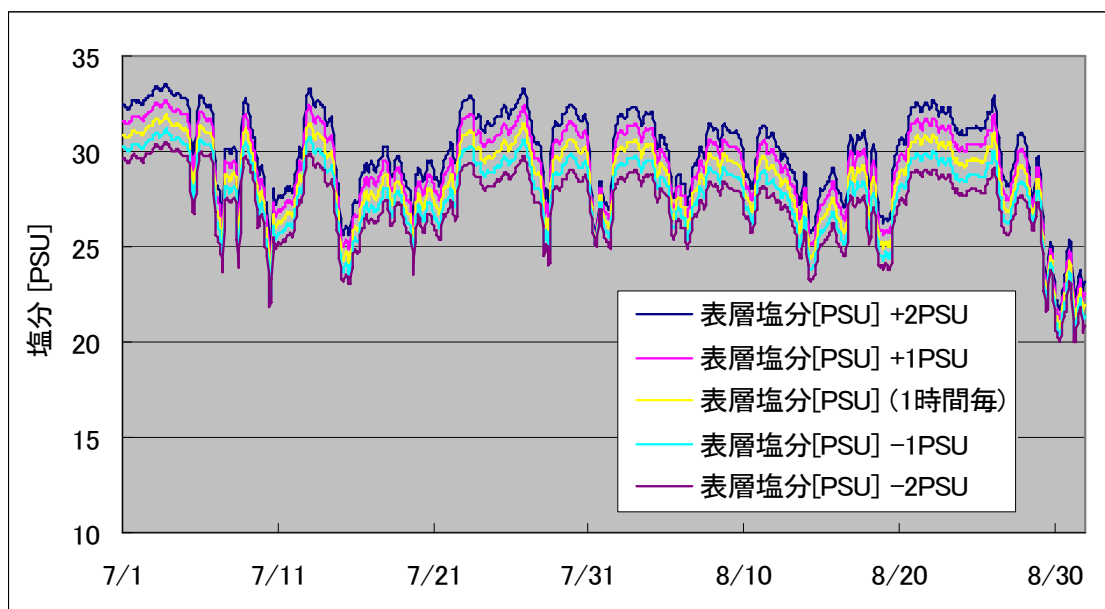


図 5.102 境界条件を長期的に変化させた場合の表層塩分の計算結果 (St.4)

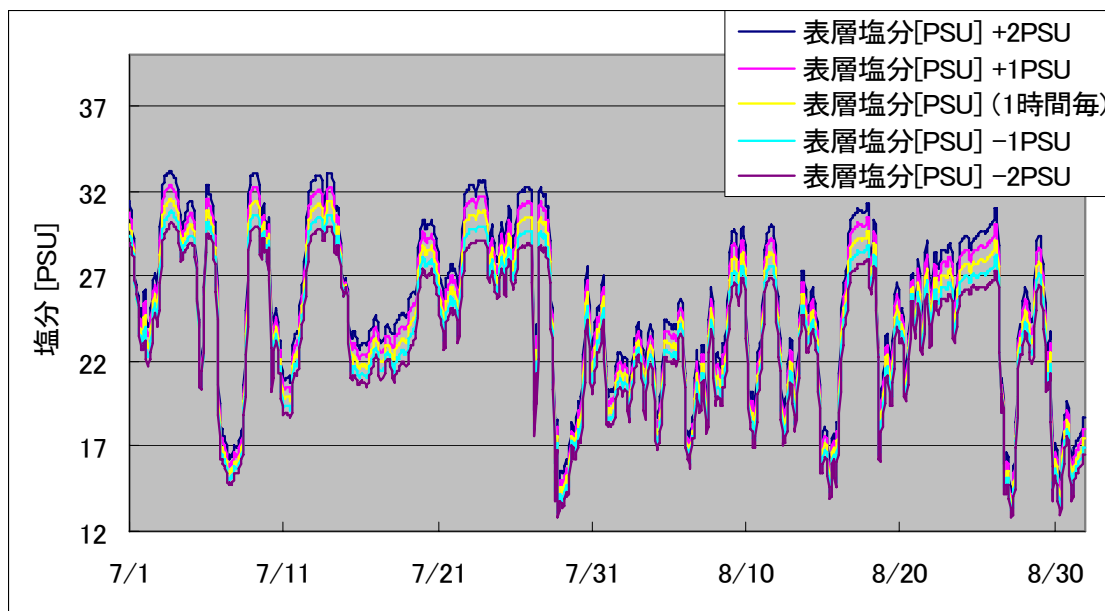


図 5.103 境界条件を長期的に変化させた場合の表層塩分の計算結果 (St.5)

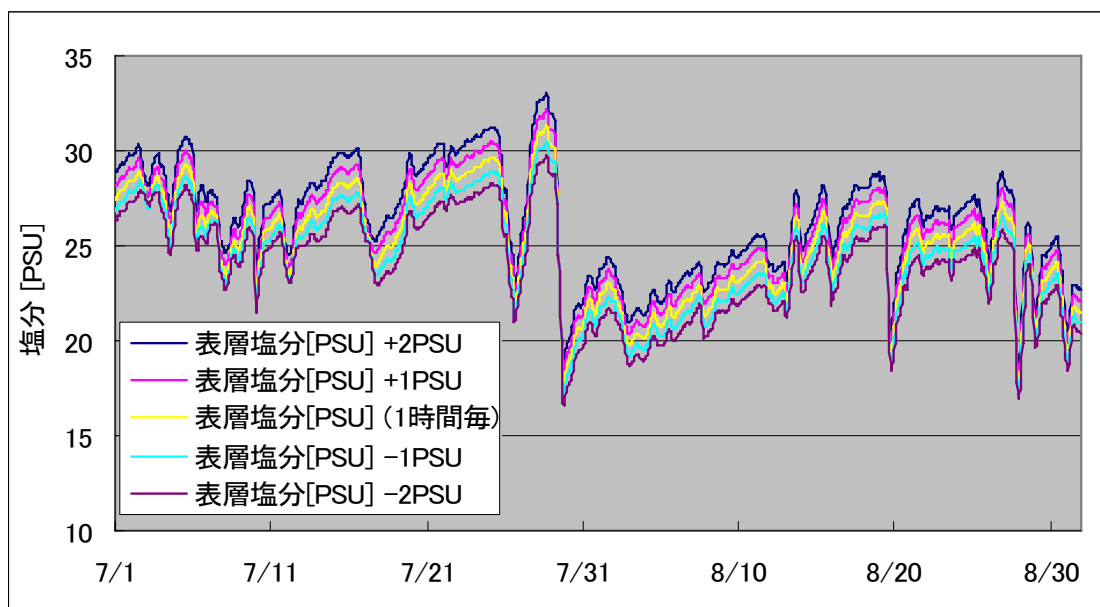


図 5.104 境界条件を長期的に変化させた場合の表層塩分の計算結果 (St.6)

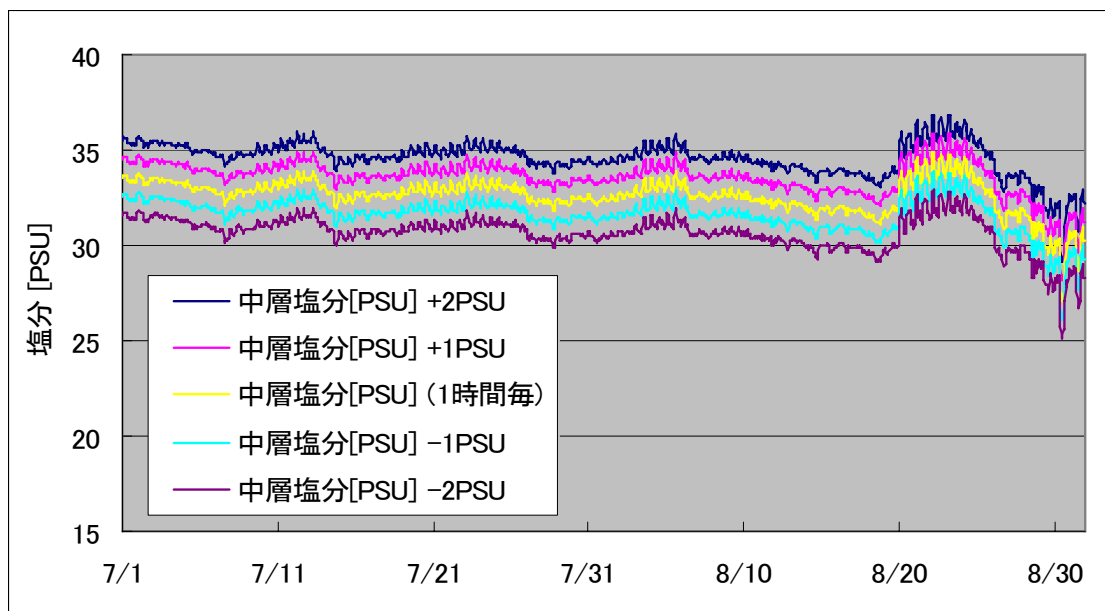


図 5.105 境界条件を長期的に変化させた場合の中層塩分の計算結果 (St.1)

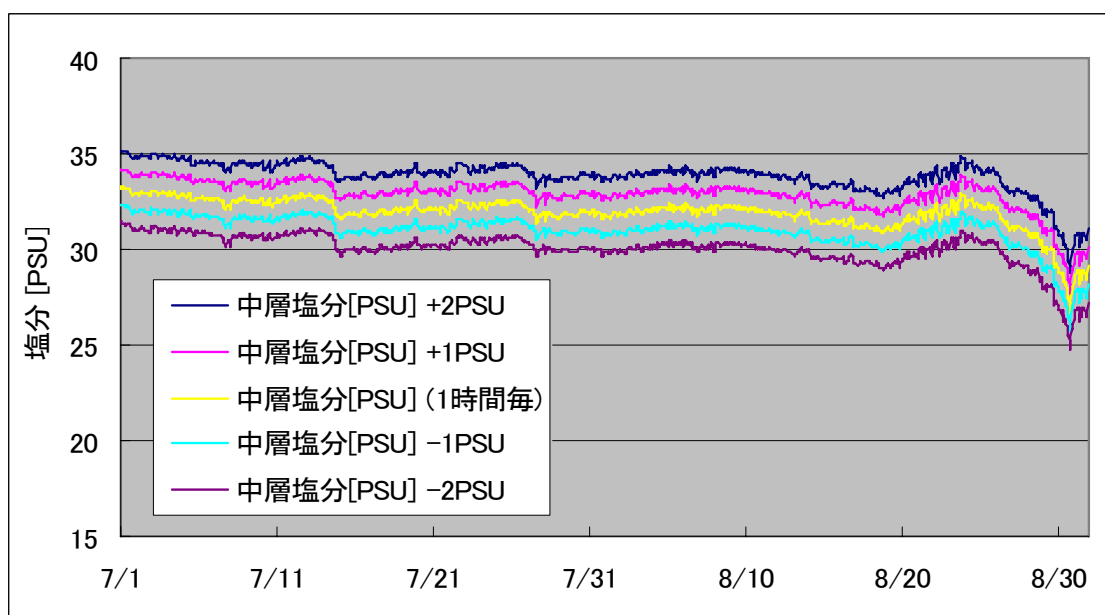


図 5.106 境界条件を長期的に変化させた場合の中層塩分の計算結果 (St.2)

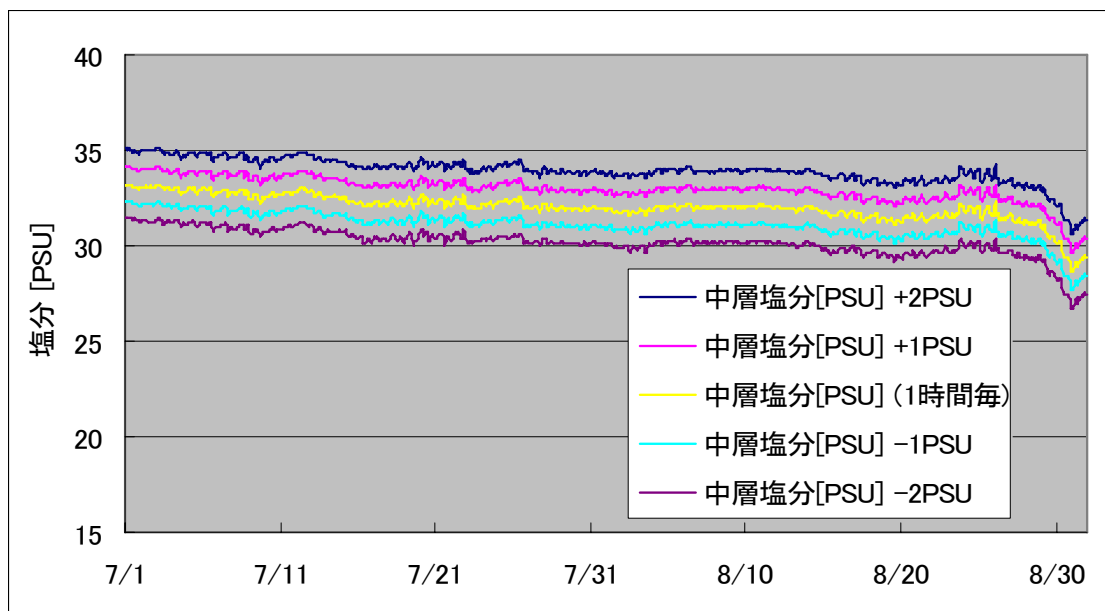


図 5.107 境界条件を長期的に変化させた場合の中層塩分の計算結果 (St.3)

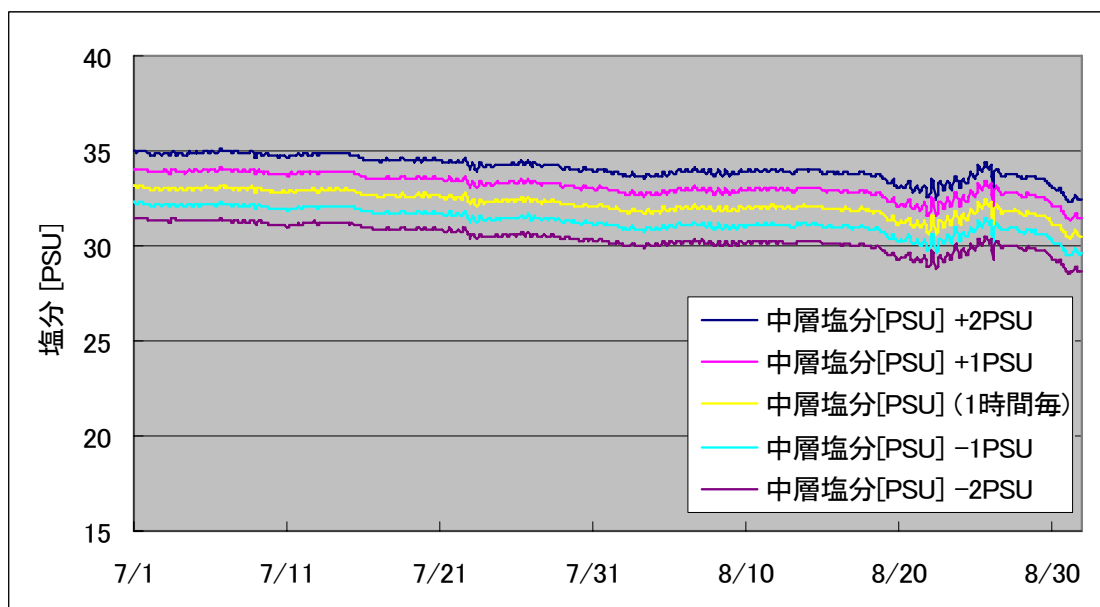


図 5.108 境界条件を長期的に変化させた場合の中層塩分の計算結果 (St.4)



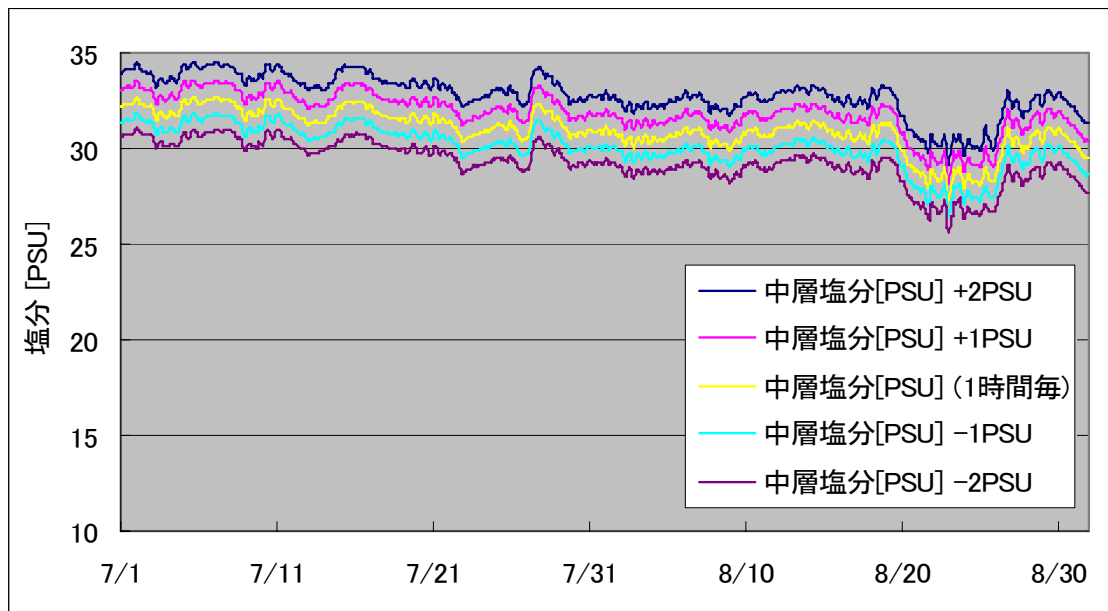


図 5.109 境界条件を長期的に変化させた場合の中層塩分の計算結果 (St.5)

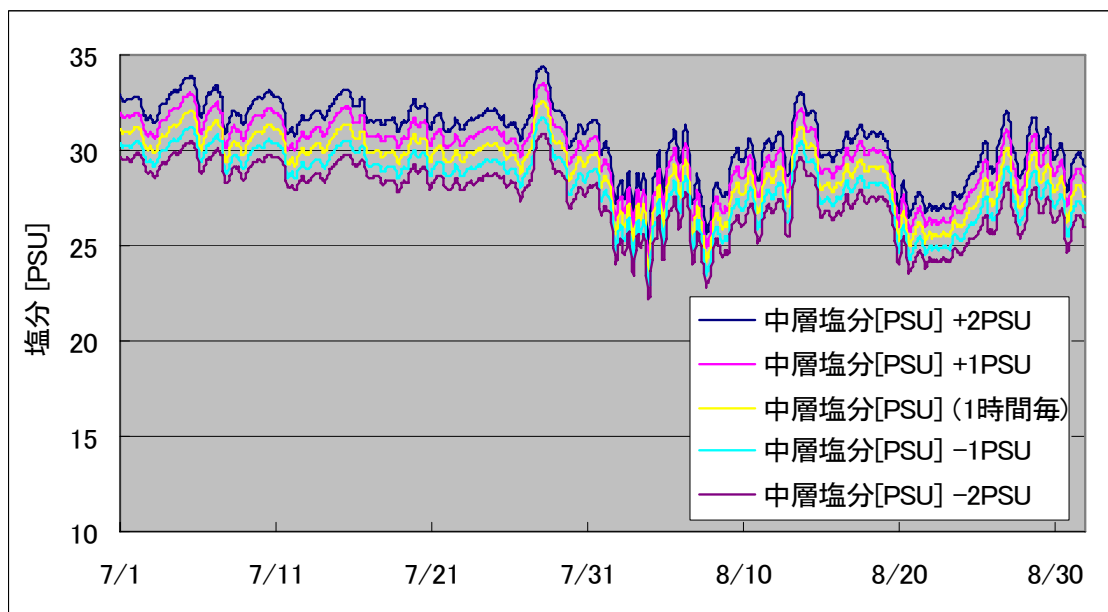


図 5.110 境界条件を長期的に変化させた場合の中層塩分の計算結果 (St.6)

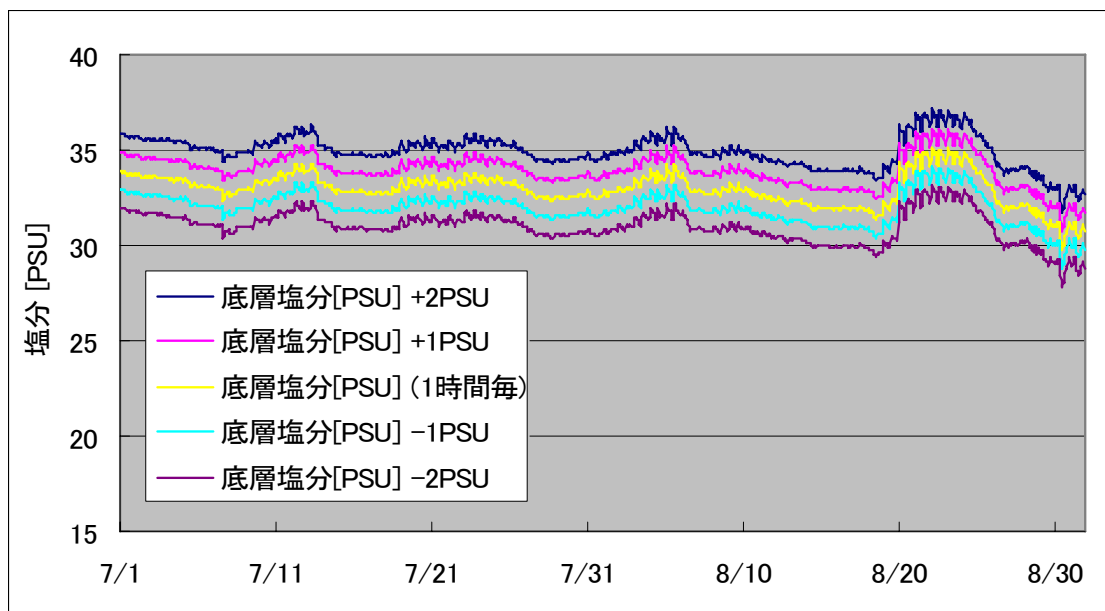


図 5.111 境界条件を長期的に変化させた場合の底層塩分の計算結果 (St.1)

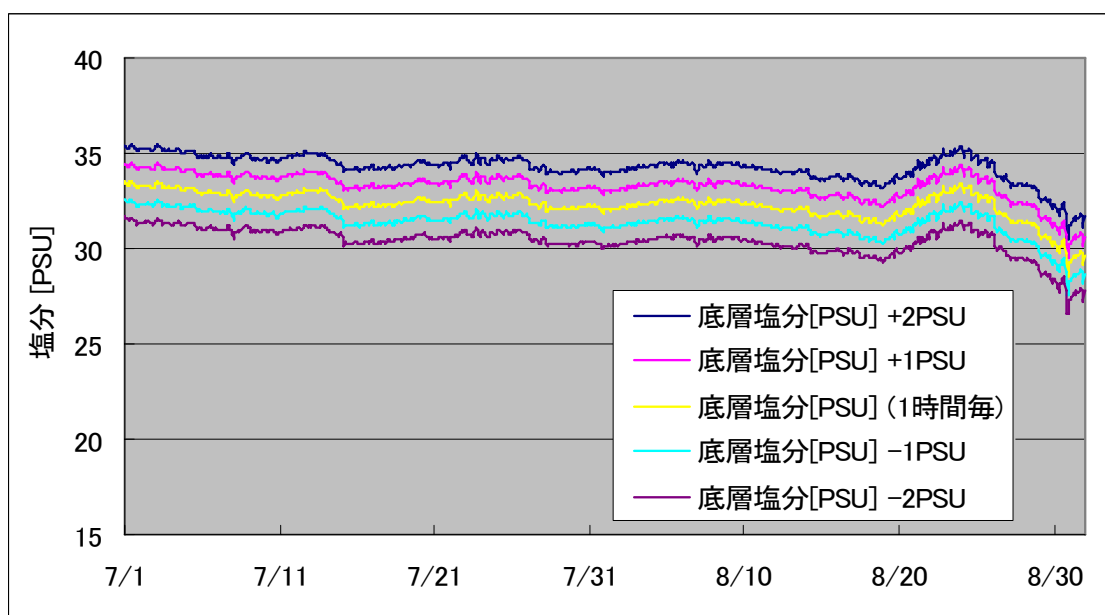


図 5.112 境界条件を長期的に変化させた場合の底層塩分の計算結果 (St.2)

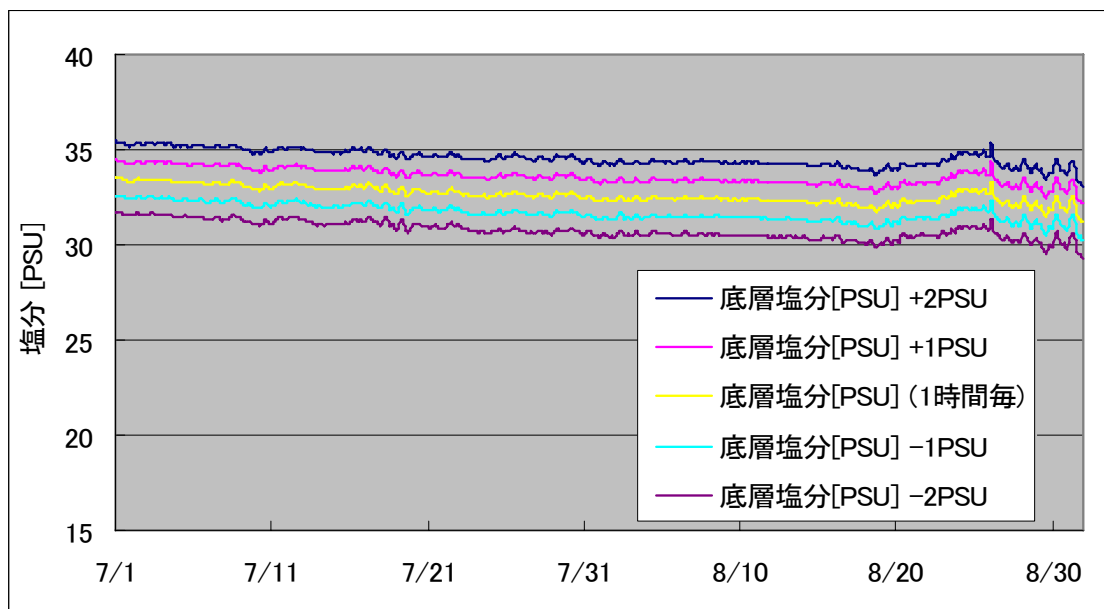


図 5.113 境界条件を長期的に変化させた場合の底層塩分の計算結果 (St.3)

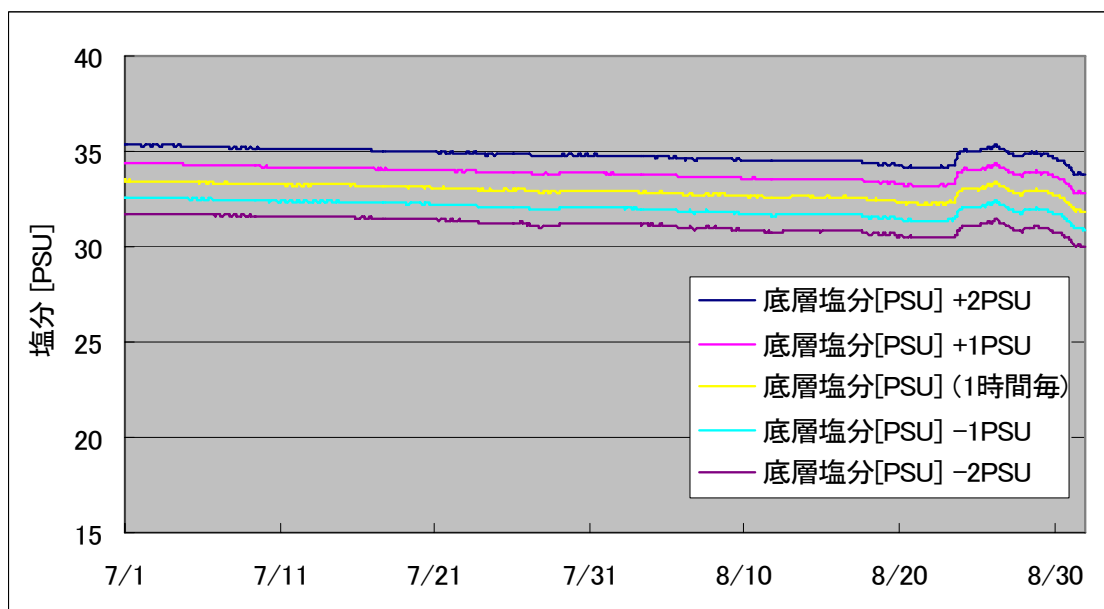


図 5.114 境界条件を長期的に変化させた場合の底層塩分の計算結果 (St.4)

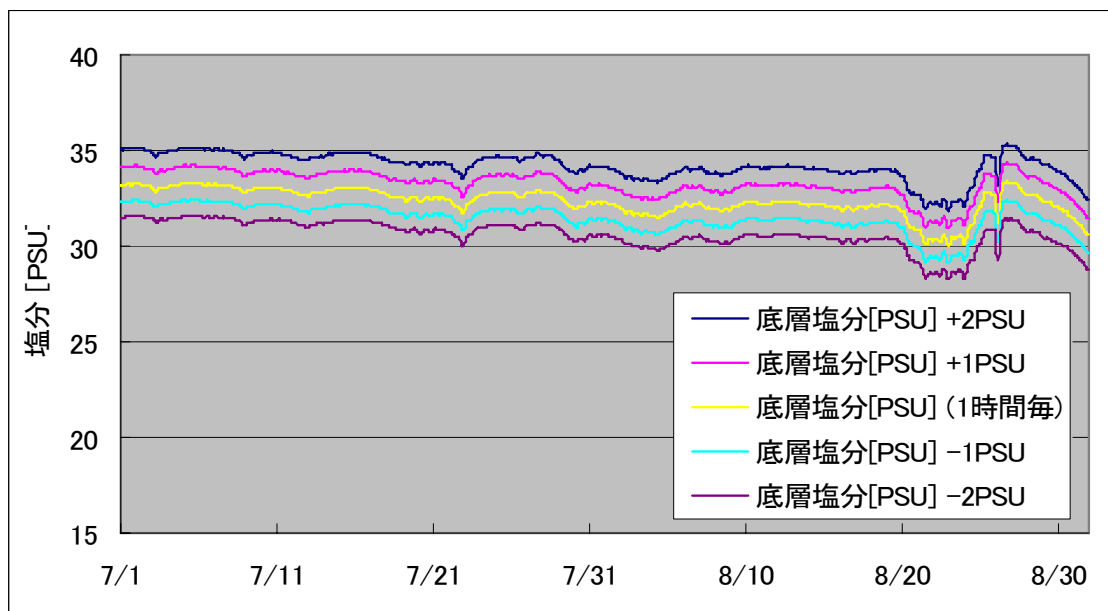


図 5.115 境界条件を長期的に変化させた場合の底層塩分の計算結果 (St.5)

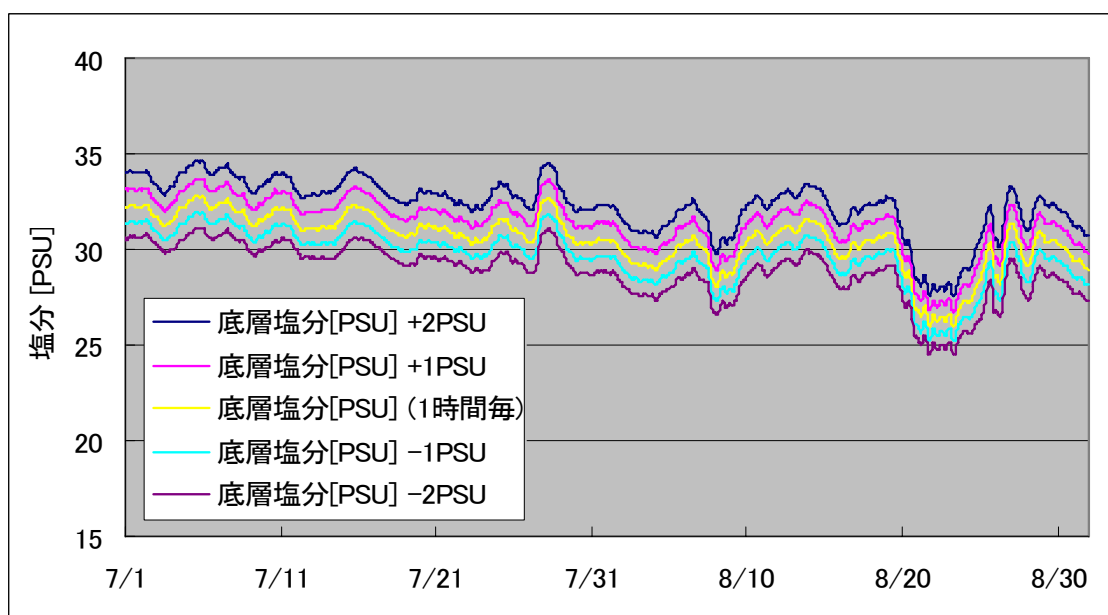


図 5.116 境界条件を長期的に変化させた場合の底層塩分の計算結果 (St.6)

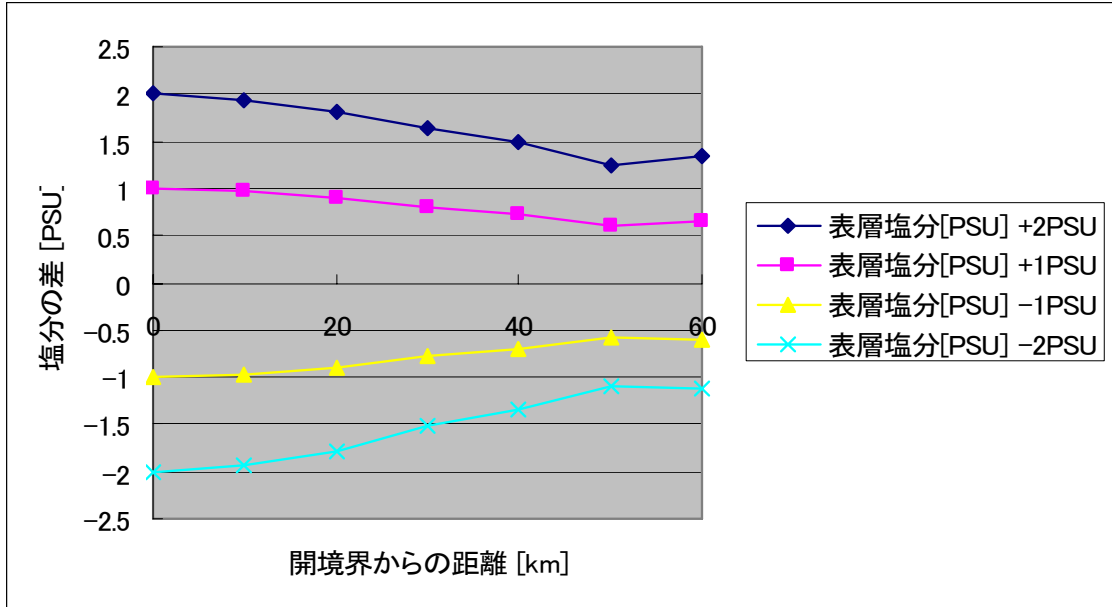


図 5.117 境界条件を長期的に変化させた場合の開境界からの距離における表層塩分の差

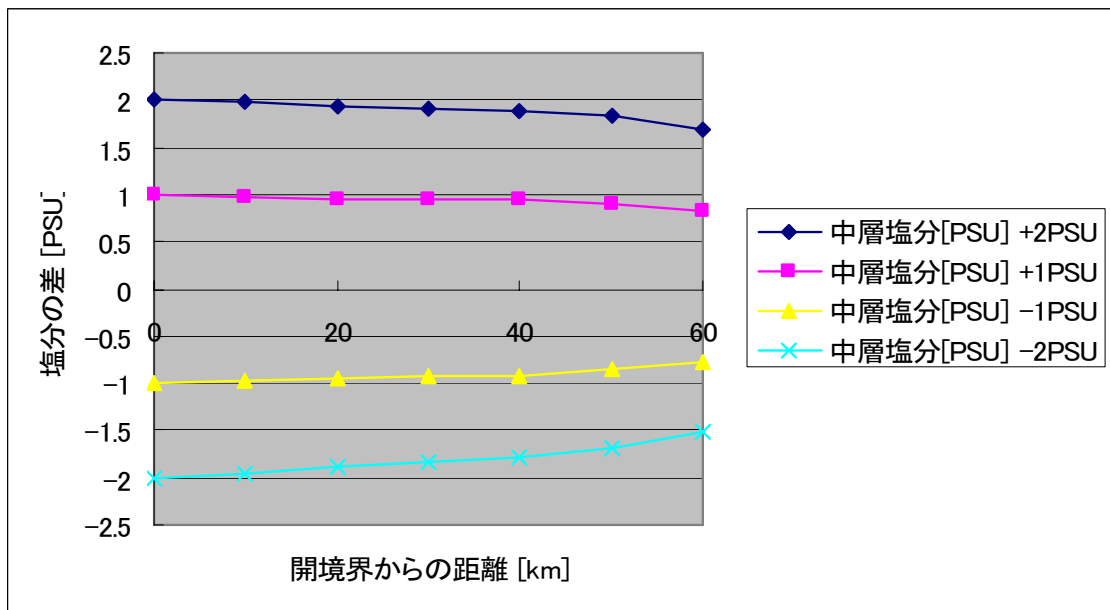


図 5.118 境界条件を長期的に変化させた場合の開境界からの距離による中層塩分の差

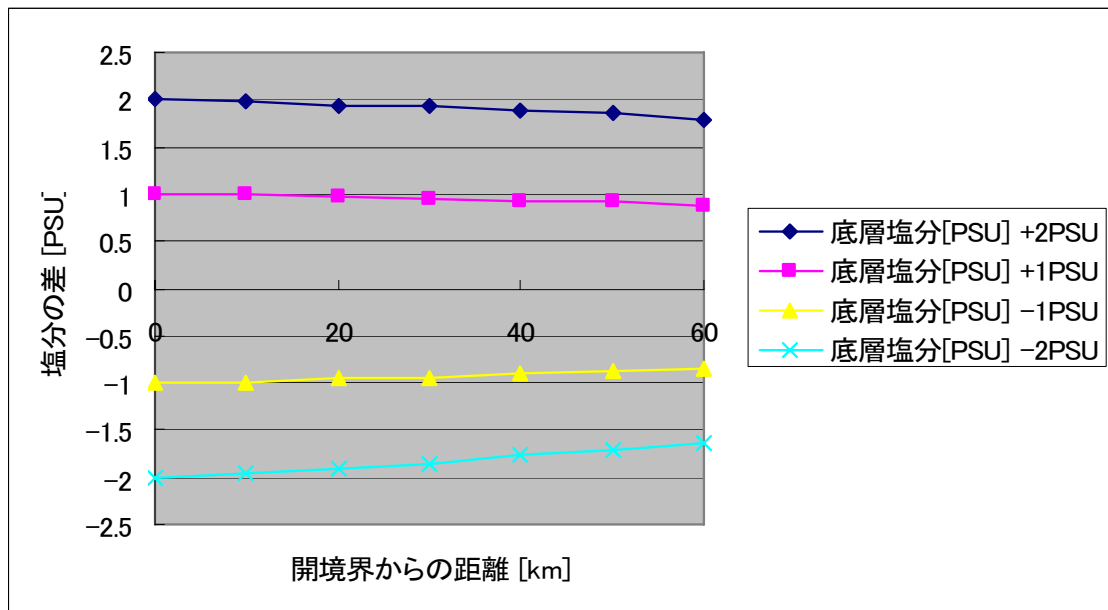


図 5.119 境界条件を長期的に変化させた場合の開境界からの距離による底層塩分の差

### 考察

本実験では、計算開始から終了まで、塩分の境界条件を通常の境界条件よりもそれぞれ +2[PSU], +1[PSU], -1[PSU], -2[PSU]した塩分の境界条件を作成し、湾内においてどの程度影響が出るかを調べた。

図 5.117 は 1 時間間隔の境界条件にて計算した結果を基準値として、7~8 月の計算期間で平均してどれくらいの塩分濃度の差が表層で生じるかを表している。境界から離れるにつれて、-1[PSU], -2[PSU]の境界条件は塩分が上昇している。これはもともと湾内にあった海水のほうが塩分濃度が高いために、境界から入ってきた海水と混合されることで塩分濃度が上昇したものと考えられる。+2[PSU], +1[PSU]の境界条件は逆に、塩分が低下している。これは河川からの淡水の流入によって低下したものと考えられる。

図 5.118 では、中層における河川からの淡水の流入による塩分濃度の低下はほとんど見られない。-2[PSU], +2[PSU]のグラフを比較すると、-2[PSU]の場合、湾奥に到達するまでに塩分濃度が 0.5[PSU]上がっている。しかし、+2[PSU]では湾奥に到達するまでに 0.3[PSU]しか下がっていない。これは+2[PSU]の境界条件のほうが水の密度が重く、-2[PSU]の境界条件の時よりもより多くの外洋水が湾内に流入していると考察される。

図 5.119 でも、図 5.118 と同じように+2[PSU]の水のほうが、-2[PSU]の水よりも多く湾内に流入していると考えられる。

### 5.5 塩分の鉛直分布を変化させた場合

図 5.120～5.132 に塩分の鉛直分布を変化させた場合の計算結果を示す。

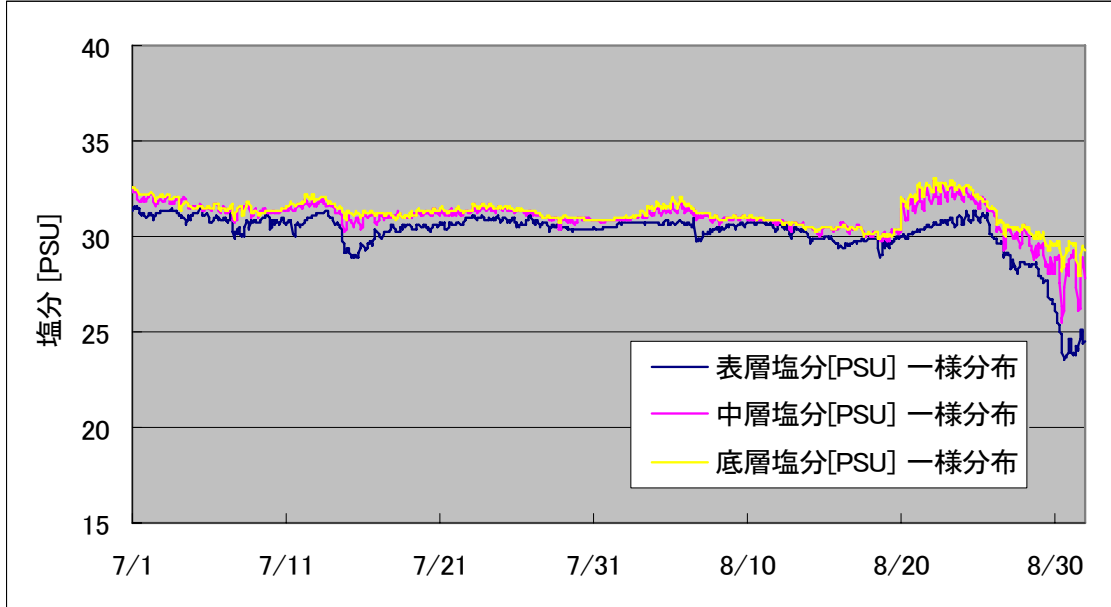


図 5.120 塩分の鉛直分布を一様としたときの表層塩分の計算結果 (St.1)

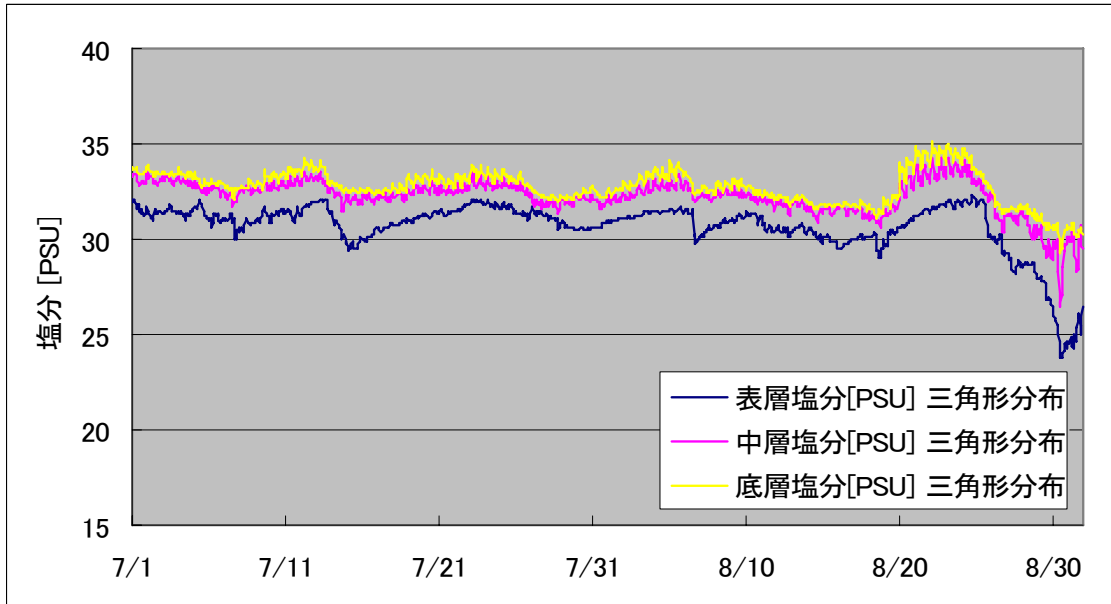


図 5.121 塩分の鉛直分布を三角形としたときの表層塩分の計算結果 (St.1)

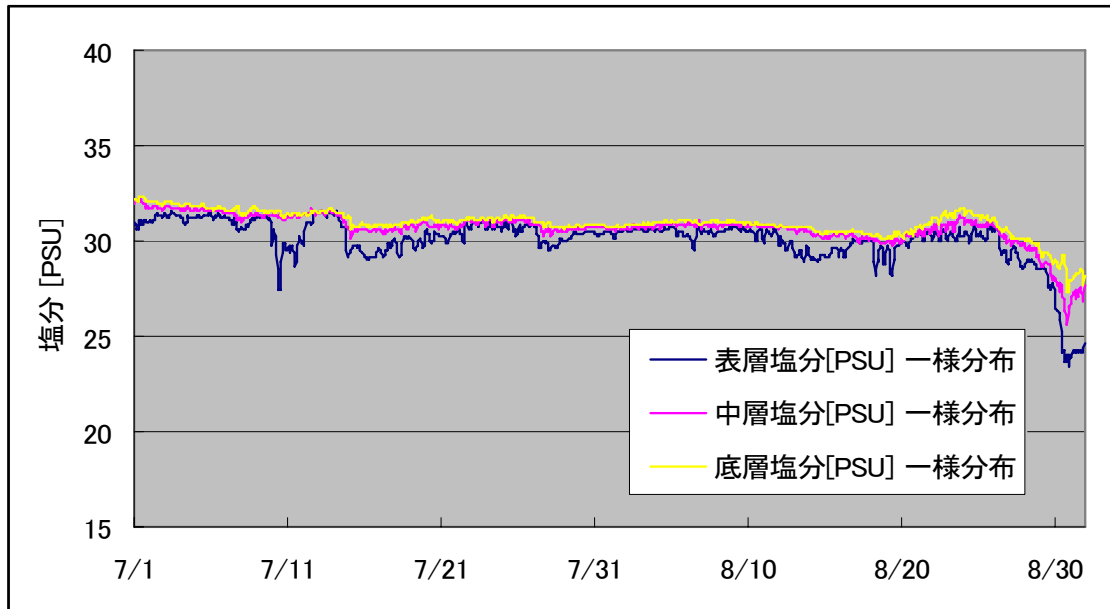


図 5.122 塩分の鉛直分布を一様としたときの表層塩分の計算結果 (St.2)

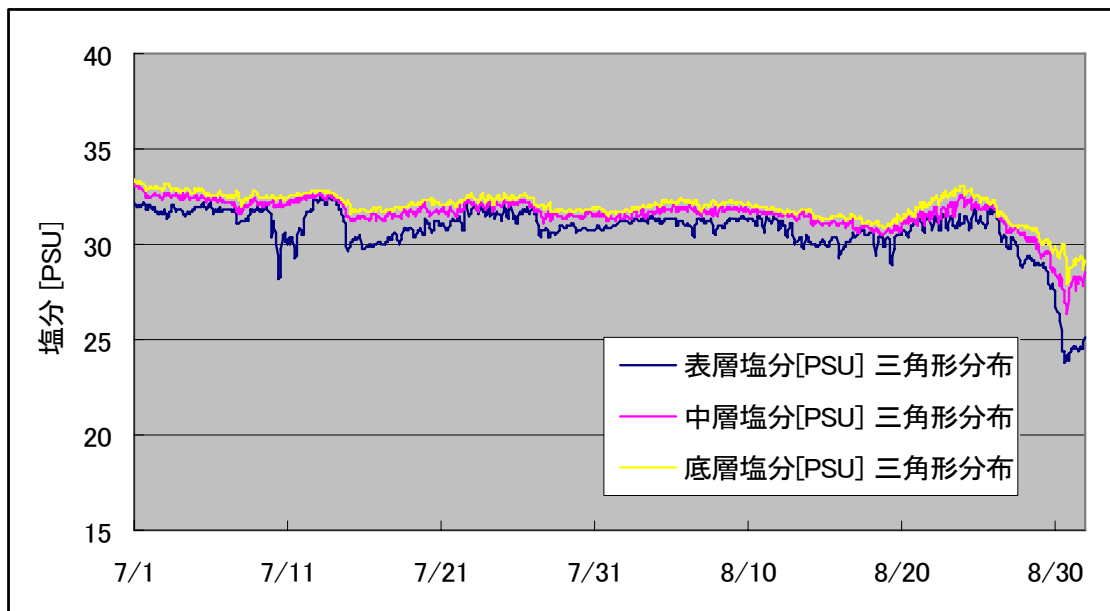


図 5.123 塩分の鉛直分布を一様としたときの表層塩分の計算結果 (St.2)



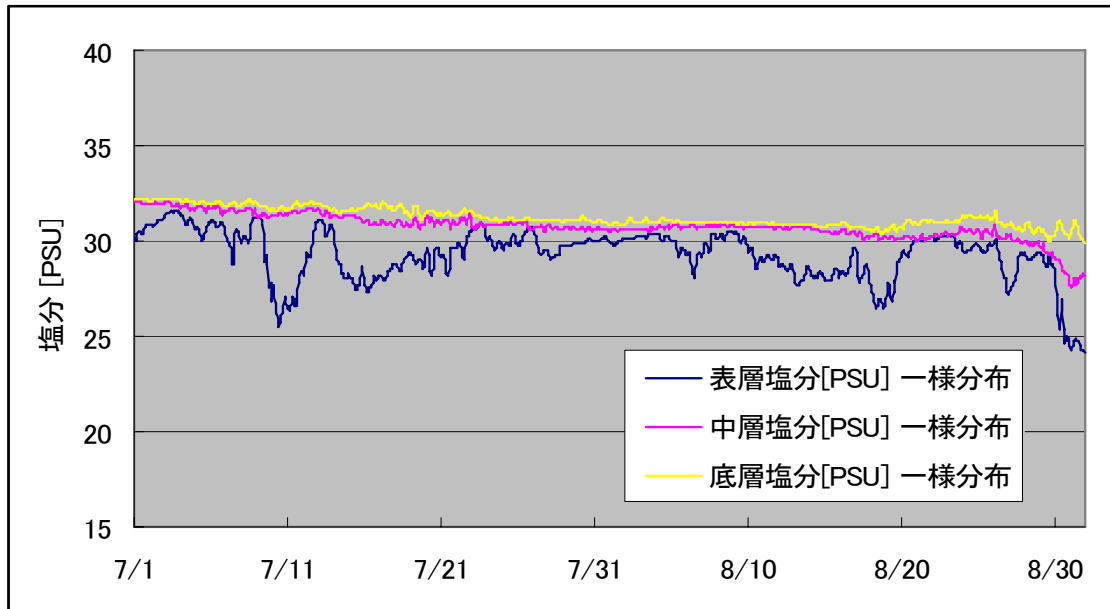


図 5.124 塩分の鉛直分布を一様としたときの表層塩分の計算結果 (St.3)

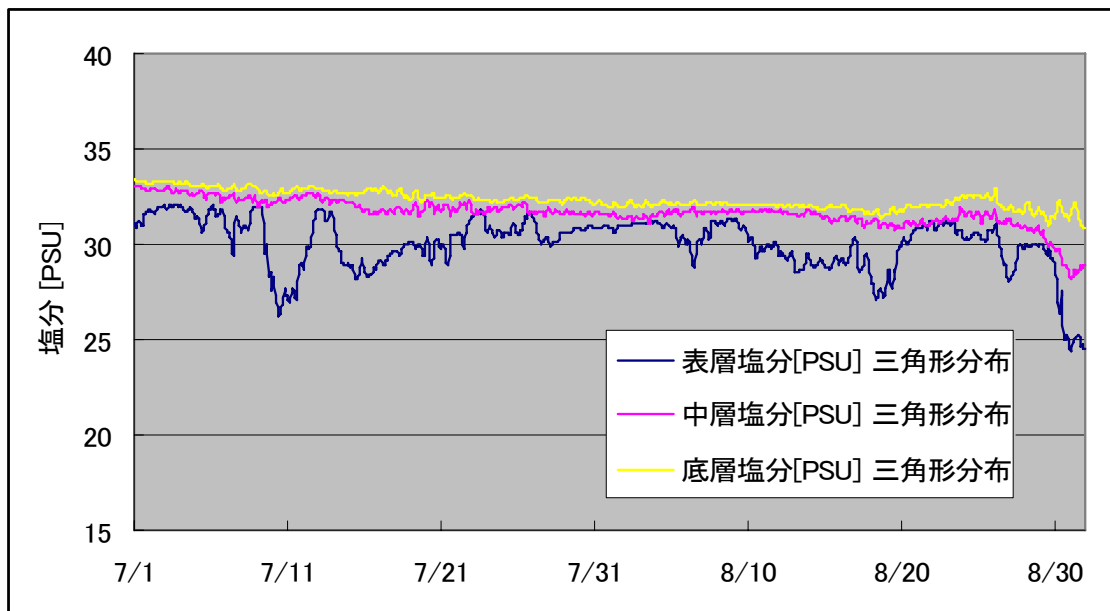


図 5.125 塩分の鉛直分布を一様としたときの表層塩分の計算結果 (St.3)

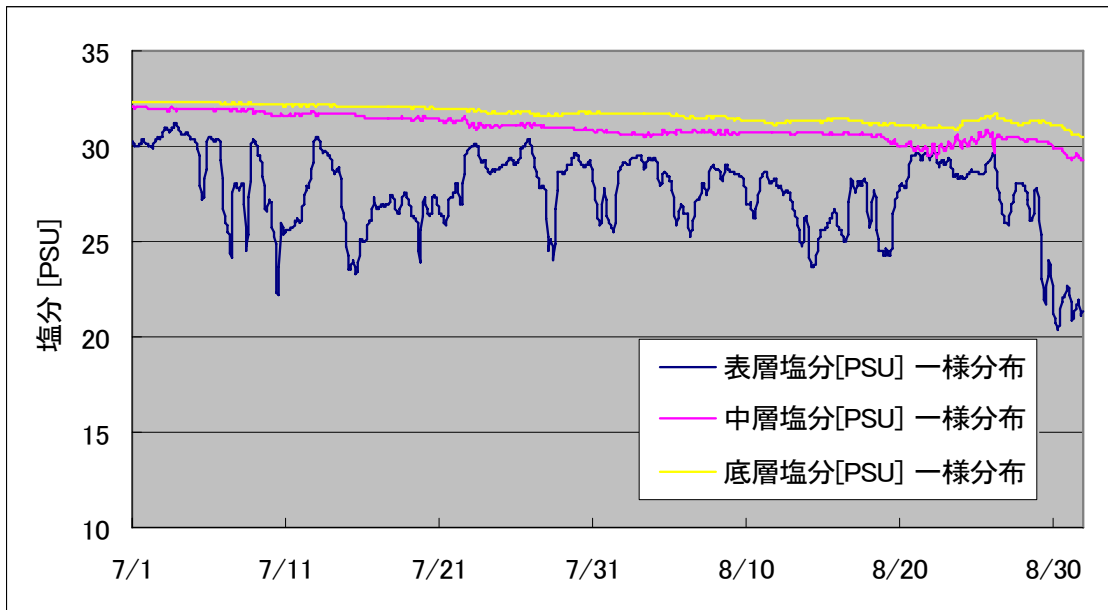


図 5.126 塩分の鉛直分布を一様としたときの表層塩分の計算結果 (St.4)

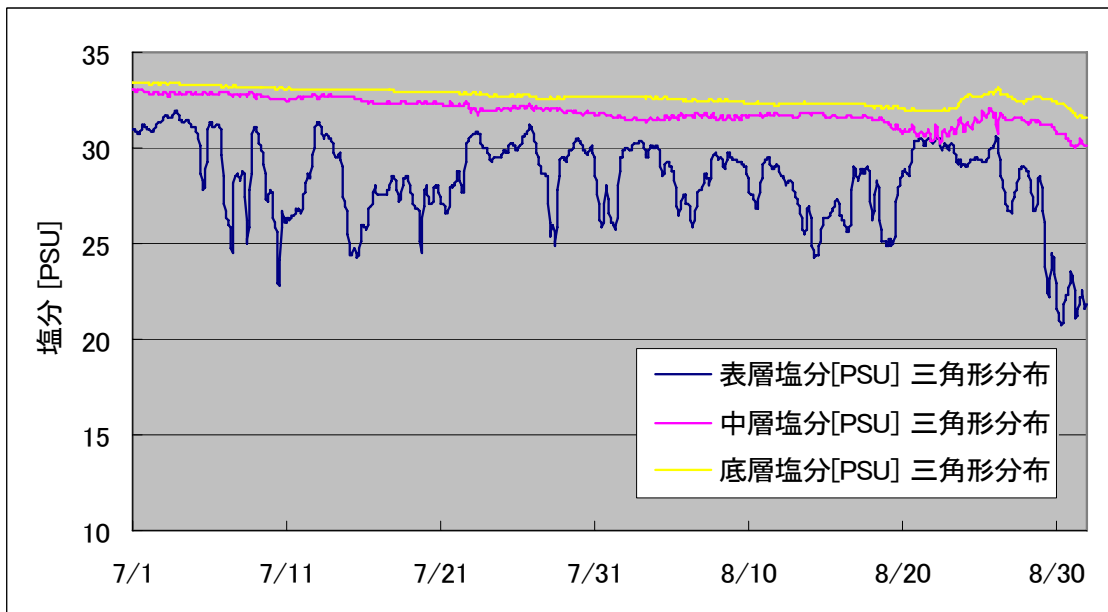


図 5.127 塩分の鉛直分布を一様としたときの表層塩分の計算結果 (St.4)

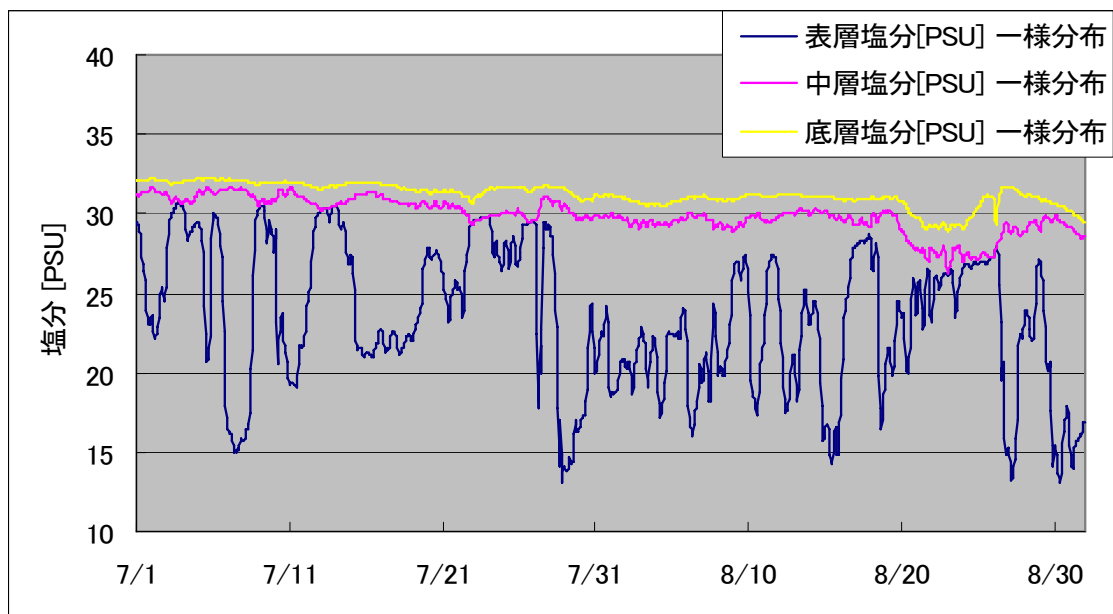


図 5.128 塩分の鉛直分布を一様としたときの表層塩分の計算結果 (St.5)

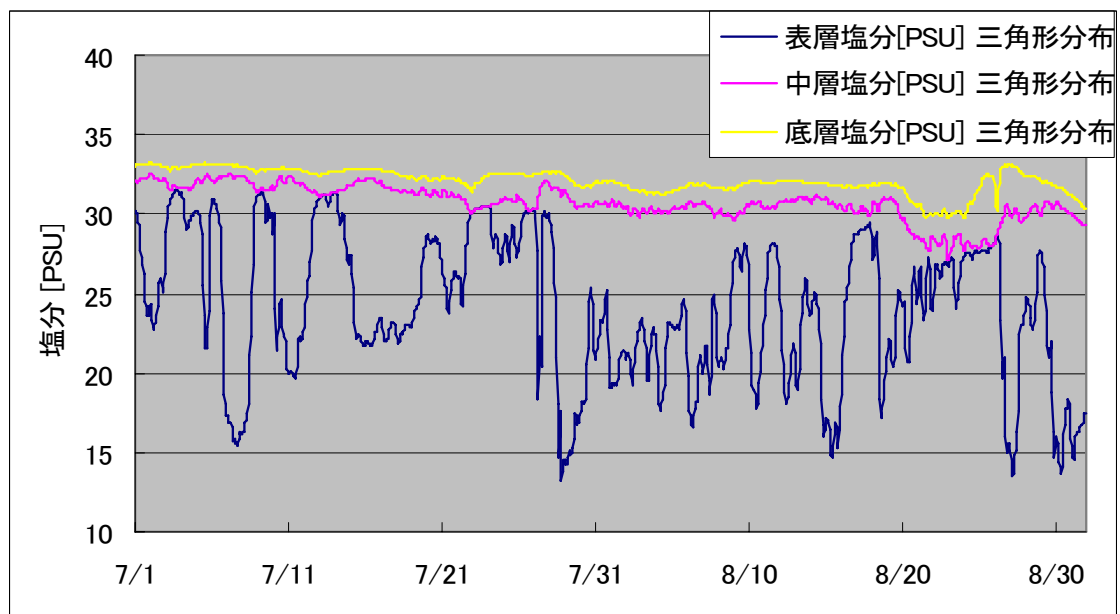


図 5.129 塩分の鉛直分布を一様としたときの表層塩分の計算結果 (St.5)

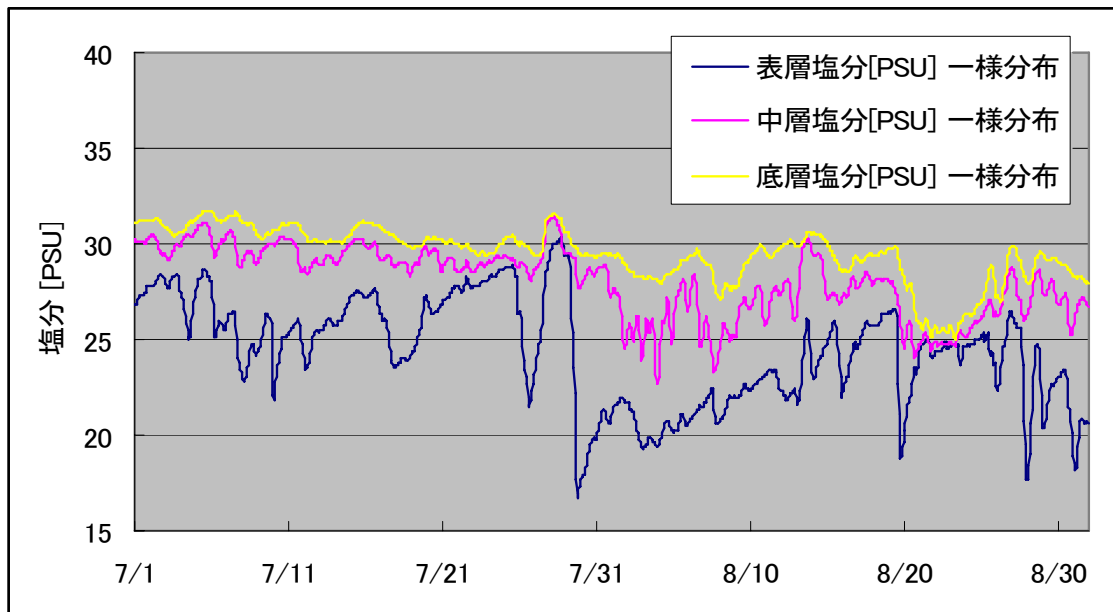


図 5.130 塩分の鉛直分布を一様としたときの表層塩分の計算結果 (St.6)

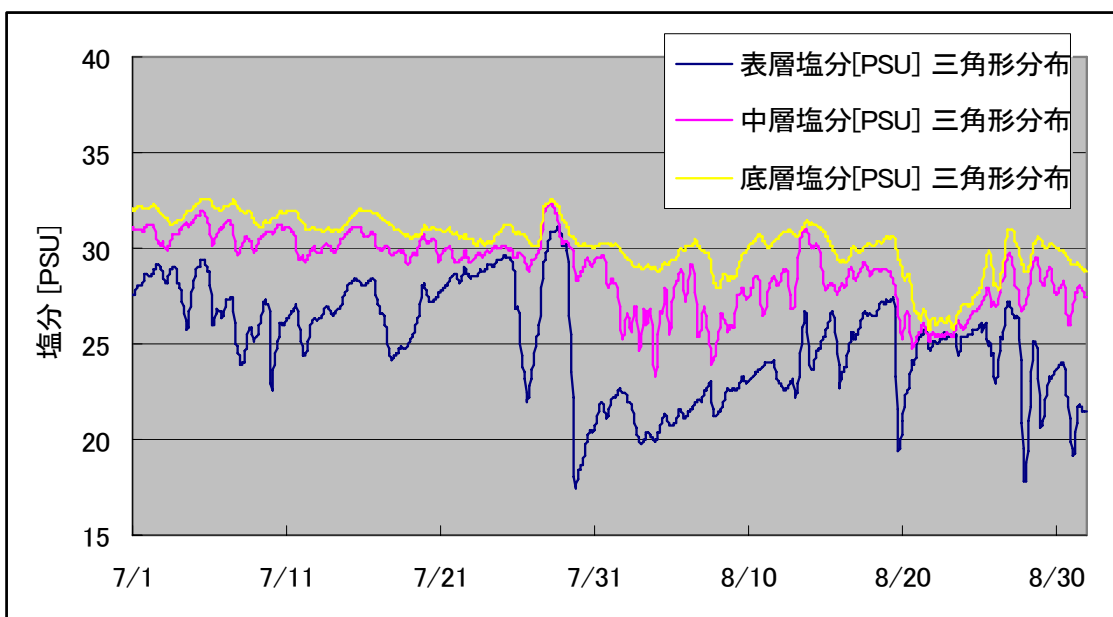


図 5.131 塩分の鉛直分布を一様としたときの表層塩分の計算結果 (St.6)

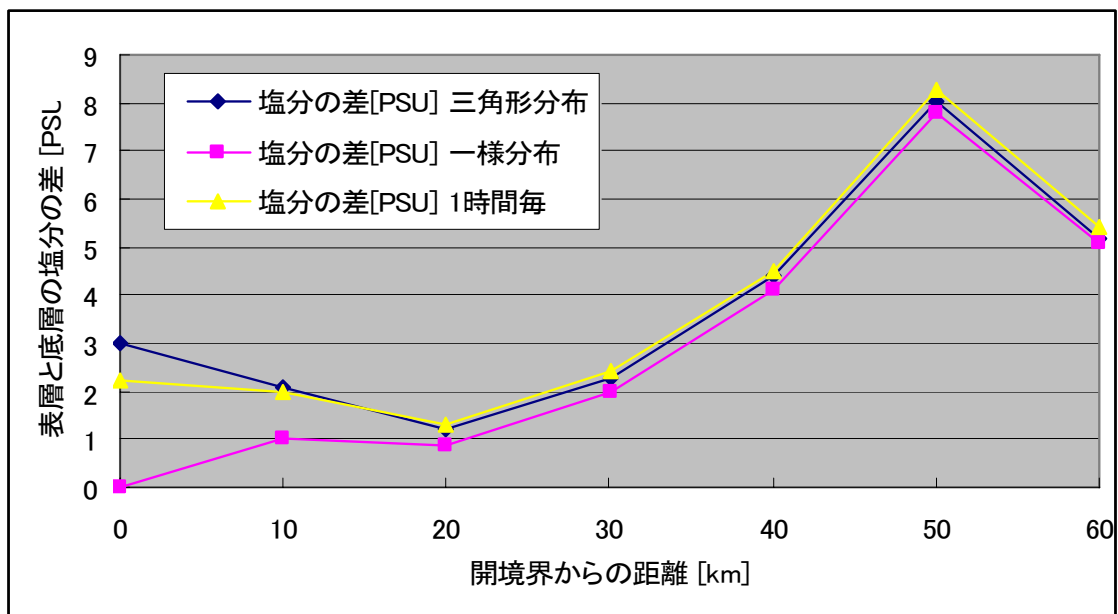


図 5.132 開境界からの距離による表層と底層の塩分の差

### 考察

本実験では、開境界において成層化しないように表層から底層まで一様な塩分分布とした場合、湾内の成層化にどの程度影響を及ぼすかを見るために行った。逆に、境界条件の時間間隔を1時間毎として計算した場合よりも、より表層と底層の塩分濃度の差をつけた境界条件で計算した場合に、湾内の成層化が強化されるのかどうかについて確認するため、底層の塩分濃度を表層の塩分濃度+3[PSU]と定めた三角形分布でも計算を行った。

図 5.132 は表層と底層の塩分濃度の差の平均を、開境界からの距離ごとに示したものである。この差が大きいほど、上下層で成層が発達しているといえる。開境界からの距離が10[km]の地点において、一様分布で境界を与えた場合は他のふたつの境界条件のときの計算結果に比べて、成層がそれほど発達していないことが分かる。しかし、20[km]地点においては3ケースとも塩分差が同じとなり、湾奥まで値に若干の差がありながらも、ほぼ同じ塩分差となる。これはすなわち、湾内の成層化現象に対して、開境界塩分がどのように分布していても関係ないことを示している。

特に開境界からの距離が50[km]の地点でもっとも成層が発達しているが、これは50[km]地点が位置的に河川からの影響をもっとも受けやすく、下層に比べて上層が高温かつ低塩分な水になり成層化しやすいためだと考えられる。

## 第6章 結論

本研究にて得られた知見について、以下に記す。

- 千葉灯標における観測結果から、南寄りの風が吹いたときに湾内の成層が傾くことで表層水が底層に沈み込む現象について、地形を水深が一様なプールに設定して数値実験を行い、湾内の躍層が傾く現象を再現した。
- 本研究では港湾空港技術研究所が実施している、東京湾フェリー“かなや丸”を利用した湾口での環境モニタリングデータから、水温と塩分の観測値を利用して東京湾の数値計算のための境界条件を作成し、東京湾の再現計算を行い、WESTech model が十分な再現性を有していることを確かめた。
- メッシュサイズの違いによる、計算の再現性の違いについて地形を水深が一様なプールに設定して数値実験を行い確かめた。
- 時間間隔を変化させた場合の境界条件を作成、東京湾の再現計算を行い、数値計算を行うという観点から、1週間に1回の観測データがあれば、数値計算の再現性を保証できることを確かめた。
- 水温の境界条件を短期的に変化させた場合の数値実験を行い、その影響が湾奥部までは到達しないことを確かめた。
- 水温・塩分の境界条件を長期的に変動させた場合の数値実験を行い、その影響が湾奥部まで伝播することを確かめた。また、境界水温を $-2[^\circ\text{C}]$ した場合や境界塩分を $+2[\text{PSU}]$ した場合、水の密度が大きくなるため、湾内に境界から流入する水の総量が多くなることを考察した。
- 開境界において、塩分濃度分布を一様分布にした場合と三角形分布にした場合で数値計算を行った。しかし、開境界における成層の有無は、湾奥での成層の形成にほとんど影響しないことが確かめられた。また、河川からの淡水流入の影響を受ける場所が強く成層化することも確かめられた。

以上のことを踏まえた上で、今後の展望について記す。

- 本研究では夏季における東京湾の再現計算しか行っていない。成層化が解消される冬季や、ほかの季節についても再現計算を行い、数値計算を行う上で有効な境界条件データの時間間隔について知見の蓄積を行う。
- 本研究では、水温や塩分といったスカラー量に関する議論がほとんどであったが、境界

条件の違いによって、湾内の流動がどのように変化するとか、成層化などの現象に影響はないのか、などのさらに多角的な議論が望まれる。

- 東京湾フェリーは深夜の観測データがない。例えば、フェリーの発着点である金谷と久里浜に係留計を設置することで深夜の時間帯のデータを補完し、24時間体制で湾口部における環境モニタリングを行い、数値モデルを用いた東京湾のリアルタイムシミュレーションシステムなどを構築できれば、東京湾の環境把握あるいは予測に大きく寄与するものと思われる。
- 本研究では東京湾を対象にしたが、三河湾や大阪湾などほかの内湾においても、境界条件を1週間に1回の時間間隔で与えた場合に十分な再現精度が得られるのか、検証することが望ましい。特に伊勢湾では港湾空港技術研究所が同様の観測を伊勢湾口にて行っているため、本研究と同様の数値実験を行ってみるのも興味深い。

## 参考文献

- Yahoo!地図：<http://map.yahoo.co.jp/>，東京湾の衛星写真，2009年1月5日取得
- 小倉 紀雄 編（1993）：東京湾 - 100年の環境変遷 - ，恒星社厚生閣，p.12
- 東京都ホームページ：<http://www.toukei.metro.tokyo.jp/jsuikai/js-index.htm>，東京都の人口，2009年1月19日取得
- 神奈川県ホームページ：<http://www.pref.kanagawa.jp/tokei/tokei/204/jinko.html>，神奈川県の人口，2009年1月19日取得
- 埼玉県ホームページ：<http://www.pref.saitama.lg.jp/A01/BP00/03.html>，埼玉県の人口，2009年1月19日取得
- 千葉県ホームページ：[http://www.pref.chiba.lg.jp/syozoku/b\\_toukei/joujuujinkou/saishin.html](http://www.pref.chiba.lg.jp/syozoku/b_toukei/joujuujinkou/saishin.html)，千葉県の人口，2009年1月19日取得
- 上野 成三（2005）：閉鎖性海域の赤潮・貧酸素化の予報システムの開発，大成建設技術センター報第38号
- 東京都環境局自然環境部（2008）：平成18年度 東京湾調査結果報告書，東京都，p.7
- 東京湾岸自治体環境保全会議（2006）：東京湾水質調査報告書（平成16年度），東京湾岸自治体環境保全会議，p.42
- 岡田 知也，中山 恵介，野村 宗弘，古川 恵太（2001）：夏季の東京湾湾奥における表層の植物プランクトンに対する底層栄養塩の影響，海岸工学論文集・第48巻，pp.1086-1090
- 二瓶 泰雄，大塚 慧，影山 英将，広瀬 久也（2008）：東京湾における流入負荷の経年変化，海岸工学論文集・第55巻，pp.1226-1230
- 宇野木 早苗，磯崎 一郎（1962）：高潮の数値実験による二，三の結果について，海岸工学論文集・第9巻，pp.1-6
- 塚田 光博，三村 信男，鈴木 雅晴（1997）：東京湾における貧酸素水塊の形成・停滞・消滅過程シミュレーション，海岸工学論文集・第44巻，pp.1086-1090
- 佐々木 淳，佐貫 宏，磯部 雅彦（1998）：東京湾における富栄養現象の再現計算，海岸工学論文集・第45巻，pp.1036-1040
- 渡辺 正孝，天野 邦彦，石川 裕二，田村 正行，村上 正吾，木幡 邦男（1998）：東京湾におけるタンカー事故による原油流出解析，海岸工学論文集・第45巻，pp.926-930
- 鯉渕 幸生，佐々木 淳，磯部 雅彦（2001）：東京湾における窒素・リンに着目した物質循環機構，海岸工学論文集・第48巻，pp.1076-1080



- 五十嵐 学, 佐々木 淳 (2004) : 東京湾奥部における浮泥堆積層厚の空間分布特性, 海岸工学論文集・第 51 卷, pp.981-985
- 田中 昌宏, 稲垣 聡, 八木 宏 (1997) : 東京湾成層期の流動のリアルタイムシミュレーション, 海岸工学論文集・第 44 卷, pp.386-390
- 佐々木 淳 (1996) : 東京湾における青潮の発生機構に関する研究, 東京大学大学院・工学系研究科・社会基盤工学専攻 博士論文
- 鯉渕 幸生 (2001) : 東京湾における物質循環機構に関する研究, 東京大学大学院・工学系研究科・社会基盤工学専攻 博士論文
- 小野澤 恵一 (2005) : お台場における雨天時越流水の数値解析, 東京大学大学院・工学系研究科・社会基盤工学専攻 卒業論文
- 神野 有生 (2007) : 川平湾周辺のサンゴ礁海域における水環境に関する研究, 東京大学大学院・新領域創成科学研究科・社会文化環境学専攻 修士論文
- 近藤 純正 (1994) : 水環境の気象学, 朝倉出版
- Kim, Y.-S. (1992) : Estimate of heat transport across the sea surface near Japan with bulk methods, 東京大学大学院・理学系研究科 博士論文

## 謝辞

本研究を行うにあたり、国土交通省関東地方整備局・京浜河川事務所様より多摩川と鶴見川の流量データを、日本海洋データセンター様から千葉灯標における水質・流況・海上風の観測データを、千葉県水産総合研究センター様より東京湾海況情報の観測データをそれぞれ御提供頂いた。ここに記して、謝意を示す。

修士課程の2年間において、大変多くの方のお世話になり、無事に修士論文を書き上げることができた。ここに感謝の意を表したいと思う。

指導教員の磯部先生にはお忙しい中、懇切丁寧に研究のご指導を頂いた。ただ、入学した直後に「修士なんだから、学生が先生に教えるくらいじゃないとだめだよ」というお言葉を残念ながら達成できなかったことが、心残りです。

副指導教員の神田先生には、研究だけでなく授業でも大変お世話になった。講義のレポートの内容が分からなくて頻繁に質問に行かせて頂いても、いつも熱心にご指導頂いた。

黄先生には研究のことだけでなく、就職のことや社会のことなど様々な興味深いお話を聞かせていただいた。

鯉淵先生には、先生がアメリカに行かれていたときに、わざわざ私の研究の進捗状況を心配してメールを頂いたことが忘れられない。また、「まわりのひとを大切にしてください」という人生訓までご教授頂いた。

博士課程の佐藤さんにはご自身の研究でお忙しい中、研究の要旨を添削して頂いたり、興味深い河川の話をお聞かせ頂いた。寺田さんからは研究のことだけでなくその明るいキャラクターからいつも元気を頂いた。篠原さんには何度も手賀沼に連れて行って頂き、現場を知ることの重要性を教えて頂いた。「まずは現場なんだよ」というお言葉が忘れられない。神野さんからは私の研究の要である WESTech model の使い方を何度も初歩的な質問を繰り返してもいやな顔ひとつされず、基本から丁寧に教えて頂いた。WESTech の修了生である國分さん、吉田さんにも M1 のころ随分お世話になった。

同期の大久保君、大城君、垣内君、笠松君、木村さん、近藤君、俵山さん、藤井君、三浦さんにも大変お世話になった。これからも、良い仲間同士でいたいと、心の底から思う。

秘書の室園さんにも、書類の申請などいろいろな面でお世話になった。

先生方、先輩方、同期のみんな、室園さん、後輩のみんな、とにかくたくさんの方の支えがあって今の私があります。心から本当にありがとうございました。