

# 沿岸海域における潮汐計算

環境システム工学専攻 地球環境研究室  
馬河 紘子  
指導教官 教授 早川 典生

## 1. 研究目的と背景

海洋工学における流体シミュレーション計算における数値手法としては差分法が一般的であり、長い年月を経て多くの手法が開発されている。しかし、これは差分近似によって支配方程式の連立解を求めることであり、どの手法も完全に自然現象を再現できるものではない。よって、潮汐流計算を行う場合、解析を目的とする潮流現象を潮流成分往復流成分と定常流成分である潮汐残差流成分とに分けて考え、その特性に最も適した計算手法を選択する必要がある。後者は物質輸送という観点からも極めて重要な意味をもつが、その値が小さいために計算モデルに採用する数値手法によっては異なる結果を生じることが危惧される。そこで本研究は、潮汐残差流に注目し差分法による潮汐計算のモデル依存性について検証を行う。

## 2. 潮汐流モデルと採用する差分法

### (1) 基礎方程式

使用した、**x-y** 水平 2 次元の潮汐流基礎方程式は、ブーシネスク近似条件下において式①～③のように表される。これらを各計算法によって適用した。各軸に対する格子や変数の配置は、各々一般的なものに設定した。

$$\frac{\partial z}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} [(h+z)u] + \frac{\partial}{\partial y} [(h+z)v] = 0 \quad \dots ①$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv + g \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{g \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 (h+z)} = 0 \quad \dots ②$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu + g \frac{\partial z}{\partial y} + \frac{g \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 (h+z)} = 0 \quad \dots ③$$

表 1 使用変数

ζ	水位変化[m]	t	時間
u	X方向流速	f	コリオリ力
v	Y方向流速	g	重力加速度
h	水深[m]	C	Chezy 係数

### (2) 差分スキーム

比較した潮汐流モデルの計算法について述べる。

#### ① Leap-frog 法を利用した空間中央差分法

未知数を求めるとともに、全ての変数の計算に前タイムステップにおける算出値を用いる差分法である。時間的にも空間的にも中央差分を採用するので、変数の配置がすべての次元において一つ置きとなる。差分式が簡単で理解しやすいが、計算の安定条件より時間・空間格子間隔設定に強く制約を受ける。

#### ② 全陽解法

差分手法としては Leap-frog モデルとほぼ同様の特徴を持つが、空間的には前進差分を行うので、全ての変数

が全てのタイムステップに配置される。

#### ③ ADI 法 (Alternating Direction Implicit Method)

半陰解法で、潮流及び拡散方程式の差分化に応用された手法である。半陰解法であるが、得られた多元連立方程式を係数マトリックスを対角行列に変換し漸化式を得るので、行列式をそのまま解くことなく、内部の未知数を決定できる。

#### ④ V.Casulli による半陰解法

イタリアの数学者 V.Casulli により考案された半陰解法である。この手法は、パラメータにより運動方程式における水位勾配の項及び鉛直混合項、連続式中の流速、移流項およびコリオリ項、水平粘性項の表示を入れ替え、各々表示する。これによって得られる多元連立方程式をマトリックス演算によって解く事により、内部の未知数を決定する。

## 3. 大連湾における潮汐流計算の比較

まず中国北東部遼寧省の大連市大連湾にそれぞれの数値モデルを適用した。

### (1) 計算領域

図 1 に、大連湾における計算領域の等深線図と経珊瑚領域が擁する潮流観測所 (大連・大弧口) の位置を示す。

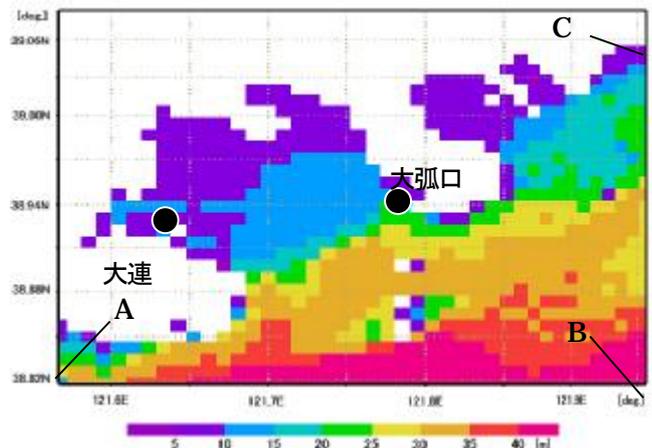


図 1 大連湾計算領域等深線図

### (2) 入力条件

表 2 計算条件

パラメータ	詳細
空間格子間隔	900 m
時間格子間隔	60 min.
周期 (潮汐)	43,200 sec. (半日周期)
潮汐定数	$h = A \cos \theta$ A : 振幅, $\theta$ : 位相差
Coriolis 係数	$f = 2\Omega \sin \phi, \phi = 38^\circ$

### (3) 境界の取り扱いについて

本研究における潮流数値シミュレーション計算では、外海と計算領域の境界において、強制水位を与えた。

図2に示されるように、大連湾付近の各地点における位相及び振幅の値は、経度方向への線形的な変化を示す。よって、図1に示されたA,B,Cの3点における位相差、及び、点A,Cにおける振幅は、図2の近似直線によって換算を行った。

また、点Bにおける振幅はこの換算を行う事ができなかったため、まず代入実験を行い、その結果を潮流観測所（大連・大弧口）の水位観測値と比較し、最も良好な結果を得られる値を点Bに与える振幅として採用した。

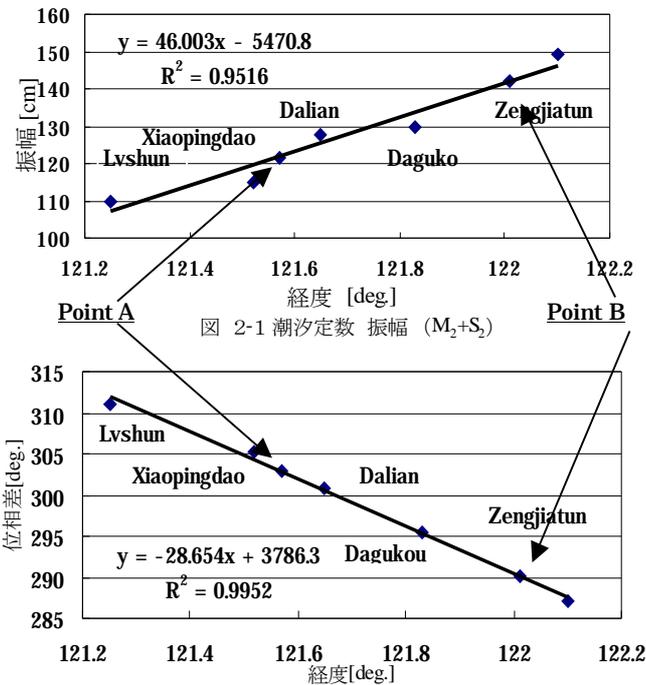


図 2-1 潮汐定数 振幅 (M<sub>2</sub>+S<sub>2</sub>)

図 2-2 潮汐定数 位相差 M<sub>2</sub>

図 2 潮汐定数と近似直線

図2に、この推算に用いた各地点における潮汐調和定数と近似直線を示す。各地点の位置は、図1の等深線図中にも記した。表4は、図1中の3点で計算仮定において与えた振幅と位相差である。

表 3 図1各点における強制水位の振幅・位相差

	点 A	点 B	点 C
振幅[cm]	1.22	1.42	102.8
位相差 [deg]	302.9	290.2	296.61

### (4) 各モデルの出力結果比較

#### ・ 観測点における水位変化量の時間推移

大連湾の潮流観測所（大連・大弧口）における水位変化量の時間推移を、観測値・各モデル出力について比較する。各モデルとも良い追従を示している。

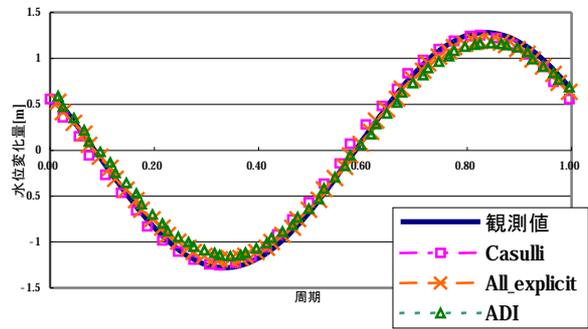


図 3 大連湾における水位変化

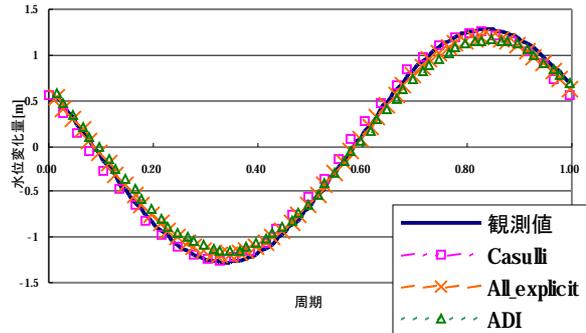


図 4 大弧口における水位変化

#### ・ 流速分布

図5～8に、各モデルによる干満時流速分布を示す。流速最強時である上下潮時には余り違いが見られず、流速微弱時である干満時の流速分布には各モデル毎顕著に違いが現れた。



図 5 満潮時流速分布 (Casulli モデル)

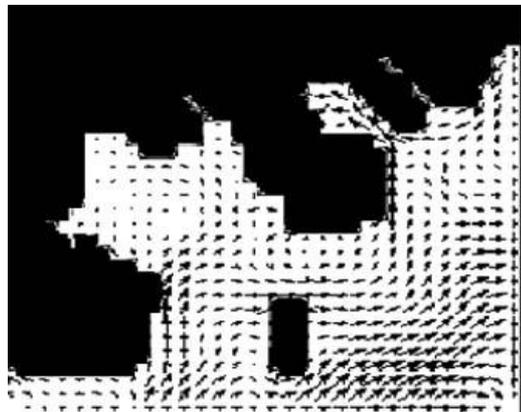


図 6 満潮時流速分布 (ADI モデル)

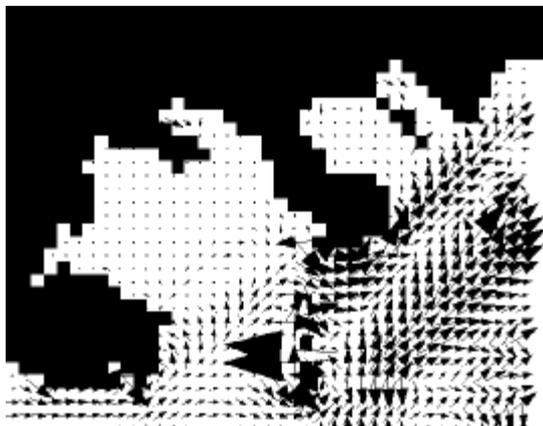


図7 干潮時流速分布 (Casulli モデル)

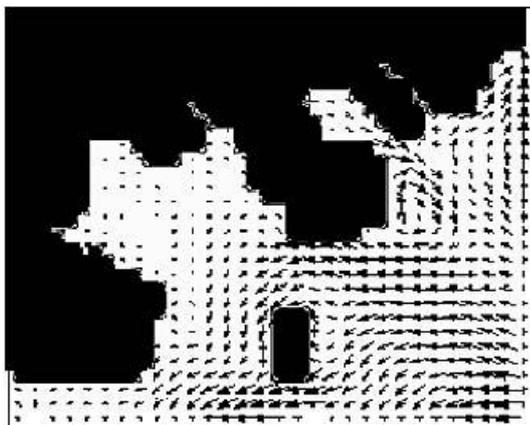


図8 干潮時流速分布 (ADI モデル)

・ 潮汐残差流出力  
各モデル毎に異なる結果が得られた。



図9 全陽解モデル



図10 ADI モデル



図11 Casulli モデル

#### 4. 潮汐残差流機構へのアプローチ

潮汐流は、振動成分である潮流成分と非振動成分である潮汐残差流成分から成り立つと考えた場合、潮流基礎方程式①～③は2成分各々についての潮流方程式の和となる。潮汐残差流とは流速の1周期平均である。よって2成分により表される潮流方程式の1周期平均を行うと、振動成分による1次微分項の1周期平均は0になることから、振動成分の2次微分項が潮汐残差流の強制力となることが考えられる。つまり、運動方程式中の非線形項による影響である。

そこで、ADI モデルと Leap-frog モデルを図12のような基礎地形に適用し、残差流機構解明のための実験を行った。図12は(1)で用いた地形である。本研究において使用した潮流の基礎方程式においては、非線形項は移流項を指すので、各実験では、潮汐残差流の非線形影響を確かめるため、基礎地形に各々の水深変化を与え、各モデルによる潮汐残差流出力を比較した。

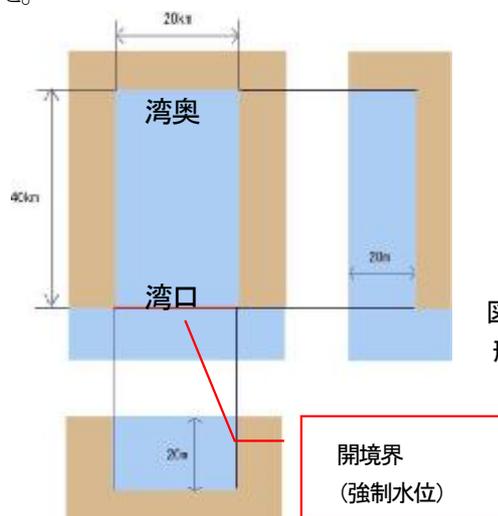


図12 基礎地形実験の地形図

- (1) 海底面を一定水深とした場合  
どちらも潮汐残差流は見られなかった。
- (2) 海底面に流れと平行方向へ勾配を与えた場合  
図??に各モデル潮汐残差流出力の流線図を示す。背景は等深線図である。両モデルとも潮汐残差流が得られたが、図に示される様にまったく異なる形の流線を持ち、Leap-frog モデル出力の方が小さい平均値となった。

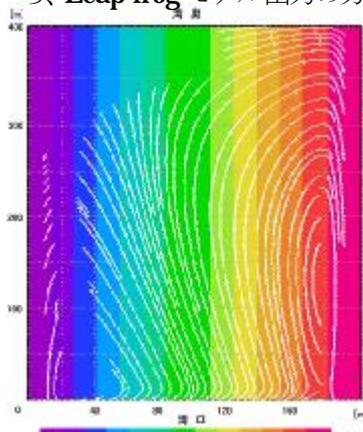


図13 潮汐残差流流線図 (ADI モデル)

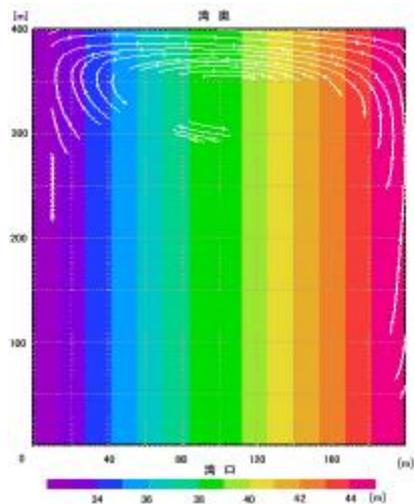


図 14 潮汐残差流流線図 (leap-frog モデル)

表 4 潮汐残差流 値の比較

	平均値[m/sec]	最大値[m/sec]	最小値[m/sec]
ADI	0.004	0.025	0.001
Leap-frog	0.001	0.036	0.000

(3) 海底面に流れと直角方向へ勾配を与えた場合わずかに現れたが、直角方向への勾配を与えた場合のほうが顕著になる。

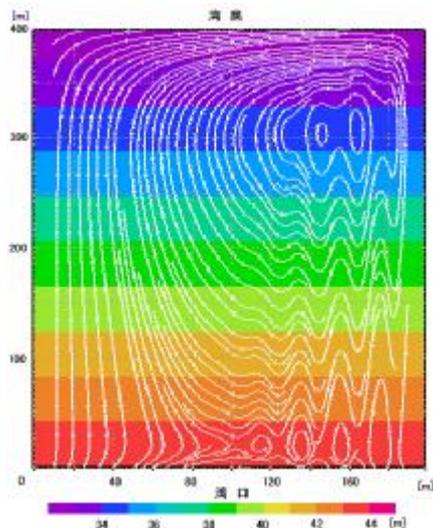


図 15 潮汐残差流流線図 (ADI モデル)

(ADI モデル)

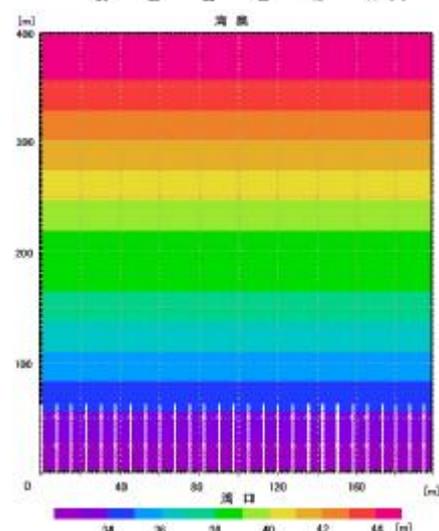


図 16 潮汐残差流流線図 (leap-frog モデル)

表 5 潮汐残差流 値の比較

	平均値[m/sec]	最大値[m/sec]	最小値[m/sec]
ADI	0.005	0.02	0.015
Leap-frog	0.0001	0.0001	0.0000

(4) 移流項影響を考慮しない場合

潮汐残差流は発生しなかった。この結果からも、潮汐残差流は潮汐流の非線形項を強制力とすることがわかる。

## 5. 観測による恒常流と潮汐残差流出力の比較

以上の結果を踏まえ、Leap-frog 法モデルを用い観測データが豊富で地形変化の激しい広島湾における潮汐流計算を行った。

### (1) 計算領域

図 17 に広島湾における計算領域の等深線図を示す。

●点は潮流観測地点である。

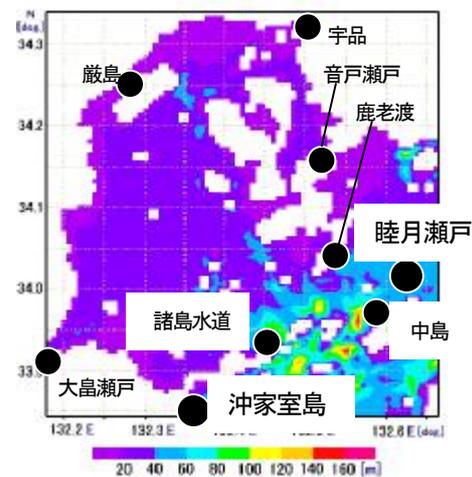


図 17 広島湾計算領域等深線図

### (2) 入力条件

表 6 計算条件

パラメータ	詳細
空間格子間隔	600 m
時間格子間隔	30 min.
周期 (潮汐)	43,200 sec. ( 半日周期)
潮汐定数	$h = A \cos sq$ A : 振幅、 $\theta$ : 位相差
Corioli 係数	$f = 2\Omega \sin f, f = 34^\circ$

### (3) 境界の取り扱いについて

広島湾計算領域において、南側開境界上および東側開境界上においては各々調和定数位相・振幅は計算に影響するほどの変化をしない。よって、南側では南側開境界最近隣の沖家室島における調和定数を、東側では東側開境界最近隣の睦月瀬戸における調和定数を、開境界条件である強制水位のパラメータに採用した。

### (4) 潮汐残差流出力

図 18 に、得られた潮汐残差流出力の流線図を示す。

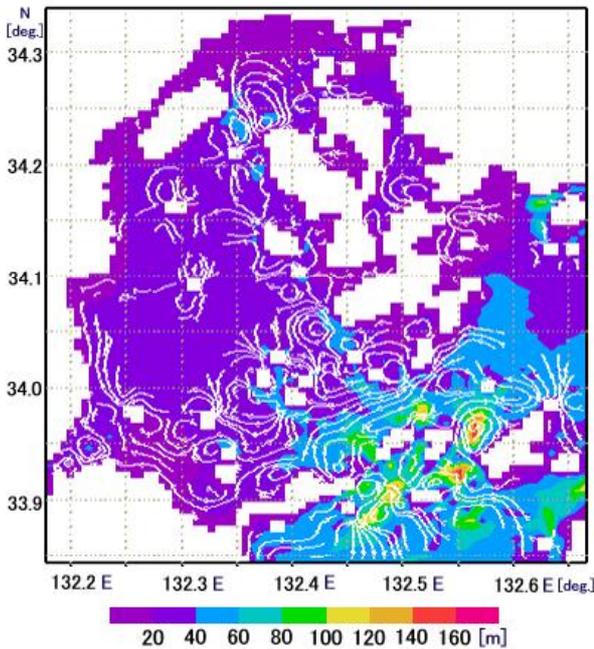


図 18 潮汐残差流出力の流線図

### (5) 観測値による広島湾の恒常流推測との比較

図 19 に、潮流観測による広島湾の推測恒常流流線図を示す。モデル出力である図 18 と比べると、強い流れは一致を得たが、複雑地形の部分においてはやはり異なる結果が得られた。

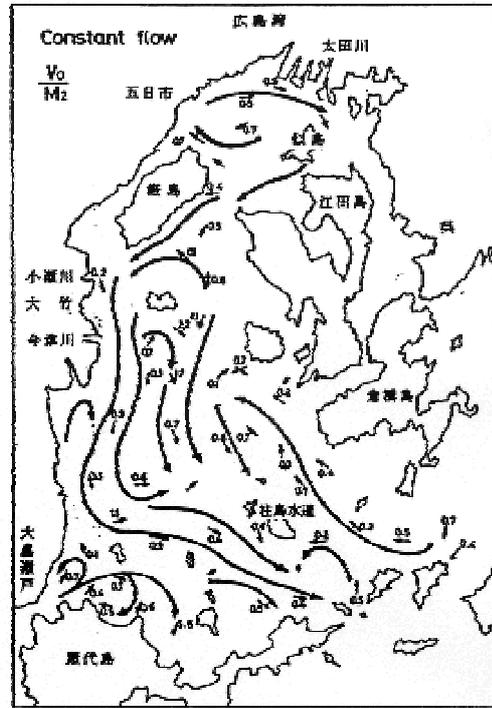


図 19 潮流観測による広島湾の推測恒常流流線図

表 7 潮汐残差流 値の比較

	平均値[m/sec]	最大値[m/sec]	最小値[m/sec]
推測値		0.002	0.000
Leap-frog	0.03	0.1	0.0015

## 6. 結論

本研究より、以下に挙げる結論が得られた。

- ・ 潮汐流計算はモデル依存性を持ち、特に干満時流速と潮汐残差流については大きな違いが得られる。
- ・ 潮汐残差流は地形が流れと直角方向に不均一である場合に最も発生し、潮汐残差流のモデル依存は、モデルの非線形項の取扱いによる。

## 7. 参考文献

- ・ 数値計算による広島湾の流れと物質の移動に関する研究

森正浩・早川典生・福嶋裕介

長岡技術科学大学大学院修士論文（平成6年2月）

- ・ コンピューターシミュレーションによる水質汚濁予測  
技術研究会

演題 「潮流および拡散の数値計算法」 講師：中国工業  
技術研究所 内海研究室 宝田盛康

公演日：昭和52年9月27日 財団法人 中国工業技術協会  
（昭和52年9月）

- ・ Dispersion of Pollutant out of the Dalian Bay  
(Preliminary Study)

N. Hayakawa, N. Inukai, and H. Umakawa

Dispersion of Multi-outfalls into the Coastal Waters,  
Grant-in-Aid Scientific Research (B) No.10045039  
(March 2001)

- ・ Semi-implicit finite difference methods for  
three-dimensional shallow water flow

V.Casulli

International journal for numerical methods in  
fluids, vol.15 629-648 (1992)

- ・ Stability, accuracy and efficiency of  
semi-implicit method for three-dimensional  
shallow water

V.Casulli and E.Catani

Computers Math, Applic., Vol.27, No.4, pp99-112  
(1994)

- ・ 流体力学の数値計算法

藤井孝藏

東京大学出版会（1994年2月）