

## 播磨灘の流動及び水質拡散機構の把握

建設工学課程 川上 誠司

指導教官 犬飼 直之

### 1. はじめに

日本の代表的な閉鎖性水域である瀬戸内海は東西に 450 km、南北に 15 - 55 km、平均水深 37.3m、最大水深 105mの内海で複数の島嶼群により構成されている。瀬戸内海には『領海及び接続水域に関する法律』により 10 区分された海域が存在するが、本論文ではその中の播磨灘について研究を行っている。播磨灘は、瀬戸内海東部の海域であり、兵庫県南西部の南側に位置し、東は淡路島、西は小豆島、南は四国で区切られて西北部に家島諸島がある。面積約 2500 km<sup>2</sup>、深さ 40 m前後であるが、海峡部では 100 mを越えるところもある。交通面では近畿地方から中国地方・四国地方・九州地方方面への重要航路が横断している。地理面においては、岩礁が多く、鯛などの好漁場であり、また播州の特産品であるイカナゴもよく獲れる事で有名である。

この播磨灘において高度経済成長期後期にダイオキシン類及びPCB等の汚染物質により灘全体に大きな影響を与えたと言われている。その裏づけとなる調査を 2001 年に行っており、この調査結果をまとめたものが交通エコロジー・モビリティ財団の「瀬戸内海（播磨灘）におけるダイオキシン類分布調査報告書」によって記載されている。この報告書では 10 の調査地点を設けてそれぞれでエックマンバージ型採泥器とコアサンプラーを用いて、表層泥及び柱状泥を採取しそれらの成分分析を行っている。この報告書の結論としては兵庫県を流れる加古川下流にPCB製造工場及び使用工場がある影響からこの沿岸部にPCBが堆積する傾向があることに加え、沖に流出したPCBは灘の中央部に堆積するという結果が出ている。この灘中央部に堆積する理由には潮汐残差流という播磨灘を大きく時計回りに動く流れがあり、この流れを大きな渦と捉えて灘中心部にPCBが堆積するという理論でまとめられているのであるが、その裏づけとなる学術的な

数値はこの報告書には記載されていなかった。

そこで、この報告書の調査結果を工学的アプローチによって紐解いていくことでPCBの堆積メカニズムをさらに具体的なものにしていくというのが本論文の目的である

### 2. 数値解析手法

#### 2.1 連続方程式

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - A_h \left( \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) + \frac{\tau_y(-h)}{\rho(\zeta+h)} = 0$$

t : 時間  $\tau_x(-h)$ ,  $\tau_y(-h)$  : 海底摩擦応力

A : 渦動粘性係数時間

#### 2.2 運動量方程式

x方向の運動方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - A_h \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{gu\sqrt{u^2+v^2}}{(\zeta+h)C_z^2} = 0$$

y方向の運動方程式

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - A_h \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{gv\sqrt{u^2+v^2}}{(\zeta+h)C_z^2} = 0$$

u, v :  $-h \leq z \leq \zeta$  間平均流速  $C_z$  : Chezy係数

#### 2.3 拡散方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \end{aligned}$$

### 3. 計算条件

#### 3.1 対象地形

播磨灘は、北緯 34~35°、東経 134~135° に位置する閉鎖性海域で、最北地点市川河口を最奥に、西は備讃瀬戸、東は明石海峡、南は鳴門海峡に囲

平成 23 年 3 月 8 日

まれた範囲となっている。明石海峡以東は大阪湾  
になっている。

### ① 流入河川

播磨灘は瀬戸内海東部の海域で兵庫県南西部  
の南側に位置し兵庫県では加古川、市川、夢前  
川、揖保川、千種川(以上を播磨五川と称する)、  
船場川、野田川(外堀川)、大津茂川(姫路市)、  
三原川(南淡路市)から、香川県では湊川(東  
かがわ市)から流れ込んでいる。

### ① 地形

播磨灘の面積は約 2500 km<sup>2</sup>で平均水深  
は約 40 m であるが、最大水深は 145m 程あ  
る。岩礁が多く水産の好漁場となっており、全  
体的に遠浅の見ればさほど起伏に富んでないな  
だらかな海底地形であると言える。

### ② 環境問題

瀬戸内海の海砂は、橋やビルなど陸上のコン  
クリート構造物の必須材料として使われてきた  
ため、日本の経済成長に伴って盛んに採取され  
てきた。ただ、海砂を採取することでイカナゴ  
の生息場所が消滅することにつながり減産せざ  
るを得なくなったという環境問題に直面してい  
る。

### ③ 水質

本研究で取り扱う PCB 汚染以外だと、兵庫  
県南部地震により阪神地区の下水、排水処理施  
設が大きな損傷を受けたため、未処理水、各種  
廃棄物などによる流入汚濁負荷が増加した事  
がある。このため総量規制の効果などで改善が  
進んでいた大阪湾の水質の再悪化が懸念され  
た。特に汚濁負荷の流入が集中する神戸地先  
では、水質等海域環境に大きな影響が出るもの  
と考えられた。

## 3.2 諸条件

### ① 座標軸の測定の仕方

本計算では、正方形の形をとる格子網の差分

式を使用している。よって、陸地や外界との境界  
は直行分で表示されるが、座標の与え方によっ  
ては陸地や外界との境界線分が異なり、計算結  
果にも影響をあたえるようになる。なので、対  
象領域において座標を与える場合には自然な流  
れを発生させるように座標を決定する必要がある。

### ② 格子間隔

格子間隔は出来るだけ小さいほうが望ましい。  
当初 ETOPO1 で地形データを手に入れる予定であ  
ったがこちらは 1 分メッシュしかないため、それ  
よりも細かい JODC (日本海洋データセンター)  
が提供する 500mメッシュの地形データを利用  
することにした。ちなみに格子数は 159×101 である

### ③ 水深

JODC (日本海洋データセンター) の 500mメ  
ッシュ地形データを図化ソフトである TRANSFORM  
に取り込んだところ、最大水深は 145m である  
ことが分かった。また、播磨灘の平均水深は約  
40m である。

### ④ タイム・ステップ

タイム・ステップは計算の所要時間、安定性、  
収束性にとくに強い影響を与える。一般に陽解  
法ではタイム・ステップは、以下のクーラン条  
件といわれる条件を満たさなくてはならない。

$$\frac{1}{2} \frac{\Delta S}{\sqrt{gH_{\max}}} > \Delta t$$

$\Delta t$  : タイム・ステップ,  $\Delta S$  : 格子間隔

$g$  : 重力加速度,  $H_{\max}$  : 最大水深

上式は、刻み  $\Delta t$  の間に水深  $H_{\max}$  での波速  
 $\sqrt{gH_{\max}}$  で伝達される距離が空間格子幅  $\Delta S$   
を越えてはならないことを意味する。伝達距離  
と格子幅の比  $C = \sqrt{gH_{\max}} \Delta t / \Delta S$  はクー  
ラン数 (Courant number) とよばれ、移流方  
程式の安定性を評価する大変重要な無次元値  
である。

播磨灘の最大水深は 145m であるので、上式より本研究では、タイム・ステップを 6 秒とした。

### ⑤ 粗度係数

粗度係数は特に計算の収束性に影響を及ぼす。本計算では、前章でも既に述べたように以下の式を用いた。

$$\tau_b = \rho_w c_f \sqrt{|u|u}$$

$C_f$  : 海底摩擦係数 (=0.0026)

### ⑥ 渦動粘性係数 (拡散係数)

海の拡散現象は、密度躍層付近のきわめて小さい乱れから数十メートル規模の対流・乱れ、さらに水平方向に卓越した大きい渦、内部波、潮汐流、循環流などに支配され、対象とする時間・空間スケールにより異なる。しかし、その特性は渦動粘性係数 (拡散係数) という形で代表される。そのため、その海域における拡散特性を知ることが重要である。

この水平渦動粘性係数は下図に示すリチャードソンの 4/3 乗則に従い比例することが知られており、本研究でもこの関係を利用した。

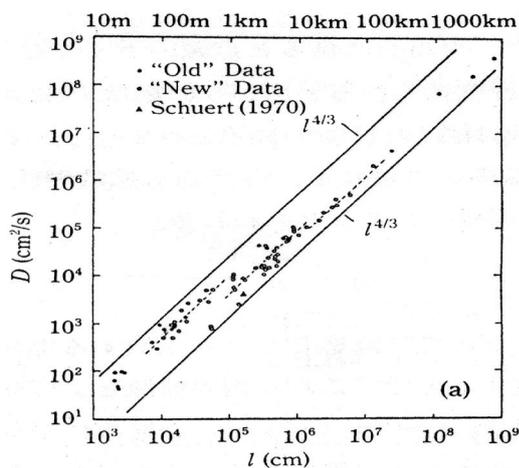


図 3.1 リチャードソンの 4/3 乗則

本計算では播磨灘の格子間隔を 500m としたので水平渦動粘性係数は 10.0 m<sup>2</sup>/s とした。

### ⑦ コリオリ力

コリオリ力は、地球の自転により北半球では右

回り、南半球では左回りの見かけの力が働く。本研究では、非常に広域な領域を取り扱うため、このコリオリ力の影響が大きい。コリオリ力を考慮した計算を行う場合は、コリオリ力は緯度によって強さが異なるので計算を行う領域の緯度を考慮しなければならない。コリオリ力は対象物の移動速度とコリオリ・パラメータの積で表される。ここで、コリオリ・パラメータとは、緯度  $\phi$  における接平面の回転角速度を 2 倍したものをいい、次式で表す。

$$f = 2\omega \sin \phi$$

$f$  : コリオリ・パラメータ,  $\phi$  : 緯度,  $\omega$  : 緯度  $\phi$  での各速度

### ⑧ 初期水深, 初期流速

初期水位と初期流速は、実際の流れに合うように適当に与えることによって計算をより安定にし、より早く解を求めることができるが、湾内の流れが単純でないことから本計算では、初期水位と初期流速ともに全域で 0 とした。

## 4. 播磨灘の流動機構

### 4.1 潮汐流

多くの海岸では 1 日にほぼ 2 回規則正しく海面が昇降する。これが潮汐の現象である。これに伴う水平方向の流れは潮汐流 (tidal current) といわれる。

### 4.2 使用する潮汐モデル

潮流計算に使用した潮汐条件について述べる。潮汐流の計算を行うために、本研究では 4 つの地点を指定した。それぞれ、①東経 134.12°・北緯 34.410°、②東経 134.12°・北緯 34.625°、③東経 135.02°・北緯 34.67°、④東経 135.68°・北緯 34.295° で潮汐条件を調べた。これらの地点で、主要 16 分潮分の潮汐調和定数を得られた。なお、この潮汐調和定数は国立天文台水沢観測所の松本が作成した海洋潮汐モデル NAO.99b によって得られた値である。国内の潮汐調和定数は気象庁

などで入手できるのだが，入手できない地点もあるためこのモデルを使用した次第である．

### 4.3 結果

潮汐により，海水面が最も低くなる時を干潮，最も高くなる時を満潮という．また海水は干潮から満潮までは湾内に向かい，満潮から干潮までは湾外へ向かう．これらを上げ潮および下げ潮という．また，潮汐流の1周期平均をとったときに，海域にまとまった流系が現れる場合がある．これが潮流の非線形性と地形の効果で生じているときに，この流れは潮汐残差流と呼ばれる．この潮汐残差流は海水交換が行われる際に影響を与える流れとして知られている．以下に，満潮，干潮，及び上げ潮，下げ潮時の流速と水位の分布図を示す．また，潮汐残差流の流速分布図も示す．そして，播磨灘の海水交換の様子を見るために，加古川河口に水質汚濁負荷源を与え拡散計算を行った計算結果も示す．

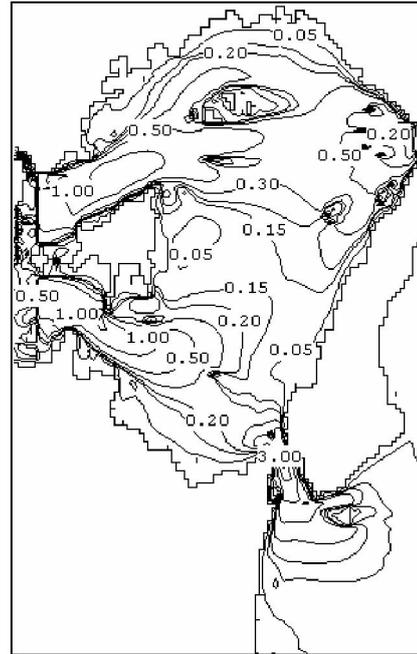


図 2 播磨灘干潮時の流速分布図

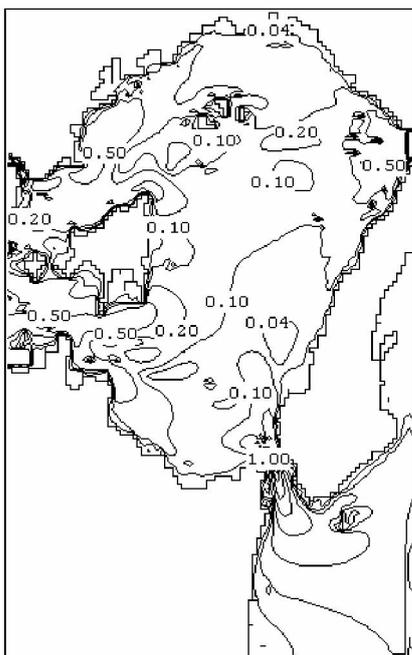


図 1 播磨灘満潮時の流速分布図

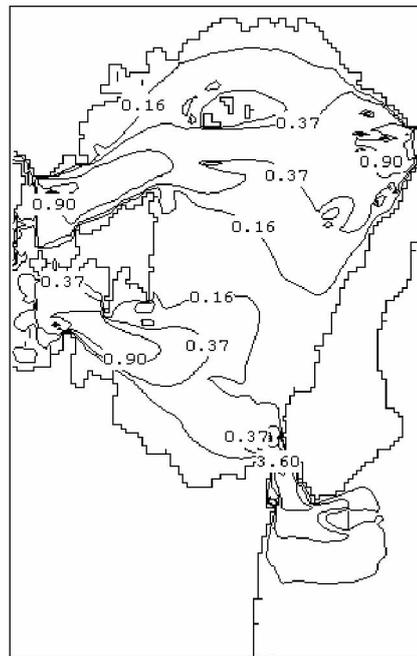


図 3 播磨灘上げ潮時の流速分布図

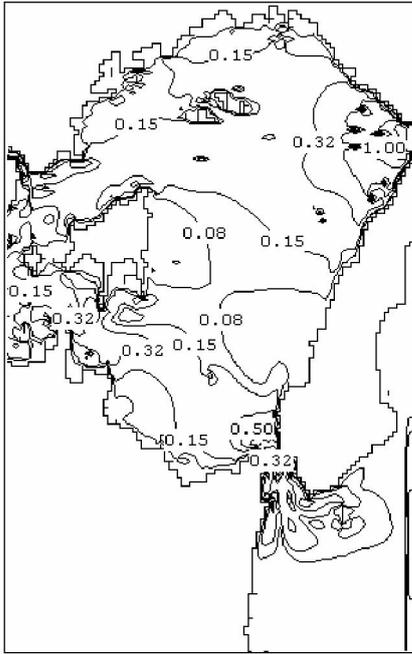


図 4 播磨灘下げ潮時の流速分布図

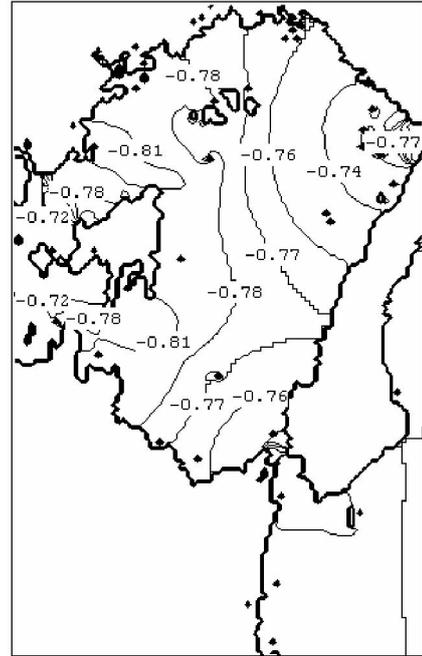


図 6 播磨灘干潮時の水位分布図

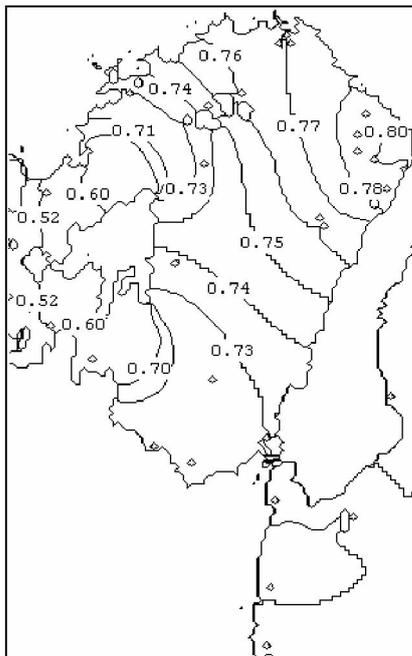


図 5 播磨灘満潮時の水位分布図

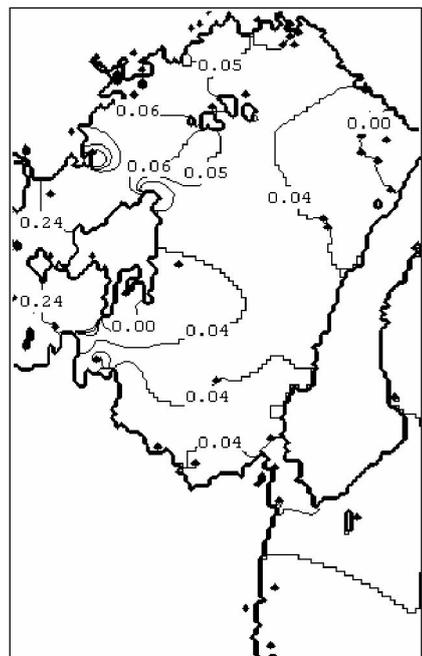
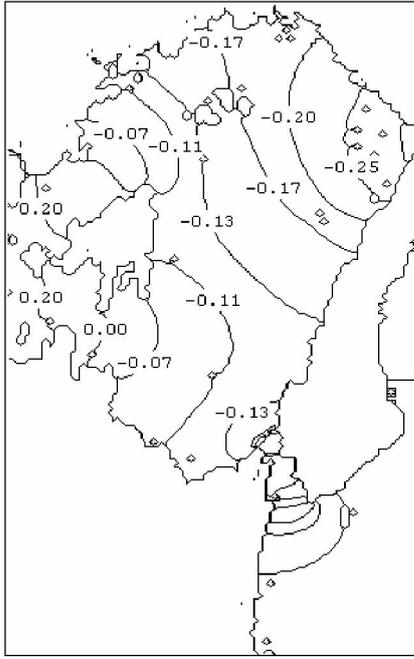
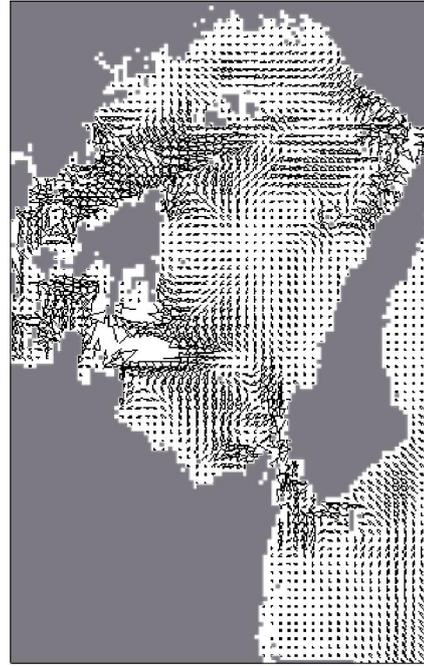


図 7 播磨灘上げ潮時の水位分布図



1



2

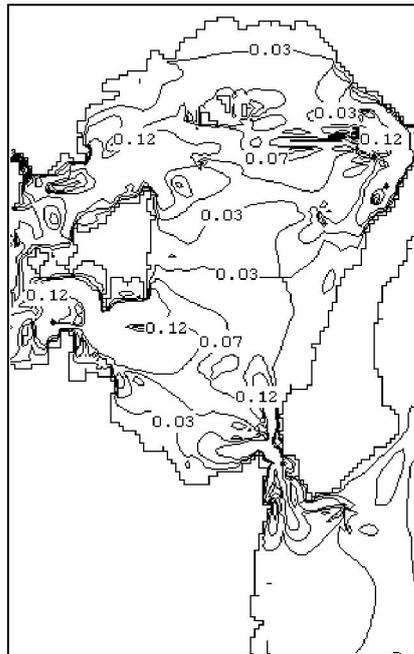
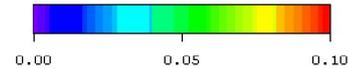
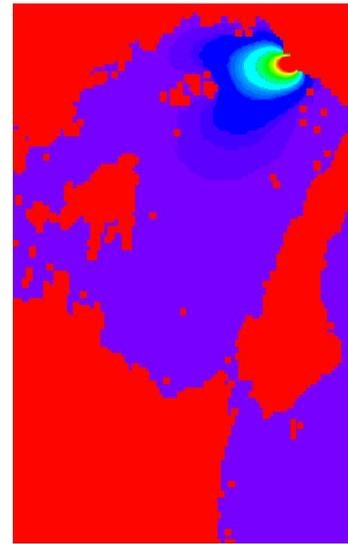


図 9 潮汐残差流の流速分布



concentration distribution

図 10 拡散計算濃度分布(開始時)

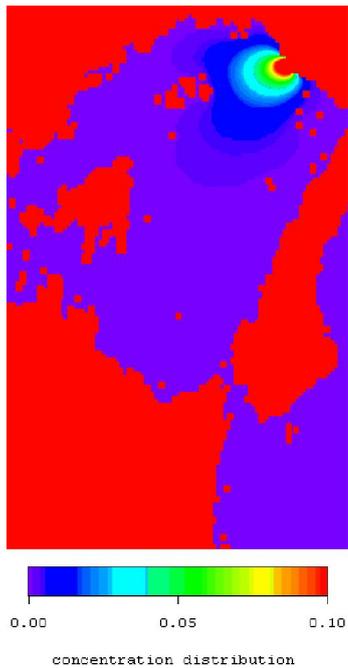


図 11 拡散計算濃度分布(一年後)

## 5. 結論

流速に関しては明石海峡，鳴門海峡付近で常に強い流れが起きているが，干潮から上げ潮にかけては小豆島の南北付近の方が強い流れを示した．そして，灘の中心部の流れは常時穏やかな流れとなっていた．水位の変化は，明石海峡付近から播磨灘全体へ伝播するような挙動を示している．播磨灘において時計回りの潮汐残差流が起こるといふ仮説があるがシミュレーションの結果からその流れは確認することはできなかった．また，灘の中央部の流れは比較的緩やかなものになっており，大きな流れが起きないということが分かった．そして，拡散計算の結果汚濁物質は同心円状に緩やかに拡散することが分かった．これらのことから今後播磨灘では，汚染底質の浚渫及び河川の排水計画の徹底をすることが望まれる．本研究の今後の課題としては，水質汚染が底質汚染に繋がるプロセスについてさらに詳しい検討が必要である。