

# 港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE  
OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

**No.1411**      September 2023

非構造格子を用いた計算手法の土砂輸送解析への導入の試み

大竹 剛史, 中川 康之, 小裕 大地

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

National Institute of Maritime,  
Port and Aviation Technology, Japan

## 目 次

要 旨 .....	3
1. はじめに .....	4
1.1 研究の背景と目的 .....	4
1.2 オープンソースモデルの比較 .....	4
1.3 有限体積法の基礎理論と非構造格子の取り扱い .....	5
1.4 非構造格子における有限体積法の離散化 .....	7
2. 格子の設定条件の差異が計算結果に及ぼす影響 .....	9
3. 実地形を用いた土砂輸送数値実験 .....	11
3.1 計算条件 .....	11
3.2 計算結果および考察 .....	13
4. 防砂堤設置港形における土砂輸送数値実験 .....	14
4.1 計算条件 .....	14
4.2 計算結果および考察 .....	14
5. おわりに .....	15
謝辞 .....	15
参考文献 .....	15
記号表 .....	16

# Introducing the Calculation Method Using Unstructured Grids for Sediment Transport Analysis

**Takeshi OTAKE\***

**Yasuyuki NAKAGAWA \*\***

**Taichi KOSAKO\*\*\***

## Synopsis

One of the causes of errors in numerical calculations of flow is the uneven and discontinuous boundaries when using structured grids. Therefore, unstructured grids are oftentimes used. Therefore, unstructured grids are often used. On the other hand, the effects of using unstructured grids on topographical changes are not well understood, because there are few studies on sediment transport calculations using unstructured grids. Therefore, in this study, with the purpose of introducing sediment transport analysis into numerical calculations using unstructured grids, we investigated the characteristics of topographic changes in unstructured grid models through comparison of numerical calculations of unstructured grids and structured grids.

The finite volume method among the discretization methods for unstructured grid models is taken up, and the basic theory and discretization method are summarized. We conducted numerical wave experiments on structured and unstructured grid models, and summarized the features and considerations of unstructured grid models. As a result, when using an unstructured grid, the orthogonality is important, and the treatment of the advection term and the horizontal viscosity term is different between the unstructured grid model and the structured grid model, which affects the results. Next, using the open software model SUNTANS, we performed sediment transport calculations on the actual landscape around the Patimban port in Indonesia. The results were compared with the structured grid model to show the features in sediment transport calculations. The calculation results show that the difference in the grid shape causes the difference in the flow along the coastline, which affects the range of the erosion area. We also examined the case of installing a sand protection dyke that blocks the tidal current. As a result, it was found that there is a difference in the range of variation of current velocity, which affects the variation of topography.

**Key Words:** Sediment transport model, Unstructured grid, Finite Volume method

---

\* Reserch trainee, Coastal and Estuarine Sediment Dynamics Group, Coastal and Estuarine Environment Department (Ecoh Co., Ltd.)

\*\* Senior Director for Research

\*\*\* Senior Researcher, Coastal and Estuarine Sediment Dynamics Group, Coastal and Estuarine Environment Department

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5045 Fax : +81-46-844-1274 e-mail:nakagawa@p.mpat.go.jp

# 非構造格子を用いた計算手法の土砂輸送解析への導入の試み

大竹 剛史\*・中川 康之\*\*・小裕 大地\*\*\*

## 要 旨

正方格子に代表される構造格子を用いた流動場や土砂輸送等の数値シミュレーションでは、海岸線や防波堤などの施設形状が、格子サイズに依存して凹凸のある不連続な境界として扱われてしまうため、土砂輸送量に変化を与える可能性があり、地形や施設形状に沿って格子形状を任意に変更可能な非構造格子モデルが導入される場合がある。一方、非構造格子を用いて土砂輸送計算が行われた研究事例はあるが、非構造格子を用いることによる地形変化への影響はあまり分かっていない。そこで本研究では、非構造格子モデルを用いた土砂輸送計算の特徴を把握するため、非構造格子モデルによる数値シミュレーション手法の把握および構造格子モデルとの比較を通じた、格子形状が異なる条件の下での流れ場および地形変化の計算結果に与える影響について評価する事を目的とした。

非構造格子モデルの離散化手法のうち有限体積法を取り上げて基礎的な理論と離散化手法について整理した。整理した手法を用いて数値波動水槽を用いた簡易な数値実験を実施し、構造格子モデルと非構造格子モデルでの比較を通じて、非構造格子モデルの特徴と留意点について整理した。その結果、非構造格子を取り扱う際の直交性の重要性や移流項および水平粘性項の取り扱いの違いによる結果の差異を示した。三角形格子の中心点に外心を用いることにより直交性を確保しているオープンソフトウェアモデル SUNTANS を用いて、インドネシア・パティンバン港周辺を対象とした実地形での土砂輸送計算を実施し、構造格子モデルとの比較を通じて土砂輸送計算における特徴を整理した。その結果、海岸線に沿う流れの違いが見られ、侵食域の範囲に影響を与えることが分かった。さらに、潮流を遮るような防砂堤を設置したケースについて検討を行い、流動場と土砂輸送への影響に注目したところ、流速の変化量の範囲に差異が見られ、地形変化量に影響を与えることがわかった。

キーワード：土砂輸送モデル，非構造格子，有限体積法

---

\* 沿岸環境研究領域 沿岸土砂管理研究グループ 元・依頼研修員（株式会社エコー）

\*\* 特別研究主幹（前・沿岸土砂管理研究グループ長）

\*\*\* 沿岸環境研究領域 沿岸土砂管理研究グループ 主任研究官  
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所  
電話：046-844-5045 Fax：046-844-1274 e-mail:nakagawa@p.mpat.go.jp

## 1. はじめに

### 1.1 研究の背景と目的

正方格子に代表される構造格子を用いた流動場や土砂輸送等の数値シミュレーションでは、海岸線や防波堤などの施設形状が、格子サイズに依存して凹凸のある不連続な境界として扱われてしまう。この凹凸が海陸境界付近の流速に影響を与え、浮遊土砂の拡散場に影響を与えるのみならず、浮遊土砂の巻き上げ・沈降や掃流砂量に関連する底面せん断力の評価にも影響を与える等、土砂輸送量に変化を与える可能性がある。これら格子サイズや凹凸の影響を軽減するため、非構造格子モデルが導入される場合がある。非構造格子は、三角形格子に代表されるように格子形状を任意に変更することが可能であり、複雑な海岸形状や港湾施設形状に沿った格子を配置することや、格子サイズを沖から対象付近にかけて徐々に小さくすることが可能である。一方、非構造格子を用いた数値シミュレーションでは、構造格子モデルとは基礎方程式を離散化する手法が異なり、このことが流体場や土砂輸送計算へどのような影響を与えるかを把握する必要があると考えられる。

非構造格子モデルを用いた検討としては、有限体積法を採用した非構造格子海洋流動モデルであるFVCOM<sup>1)</sup>を用いて、高潮や津波計算に適用した例が報告されている(例えば小松ら<sup>2)</sup>、木梨ら<sup>3)</sup>)。増永ら<sup>4)</sup>は、やはり同様なオープンソースモデルの一つであるSUNTANS<sup>5)</sup>を用いて、伊豆大島周辺海域における潮流計算を、内部潮汐の影響も考慮して検討している。また、中谷ら<sup>6)</sup>は流動モデルに有限要素法を採用した非構造格子モデルSCHISM<sup>7)</sup>を用いて瀬戸内海-太平洋領域の外用水の挙動について黒潮の蛇行の影響を考慮した検討を実施している。一方、地形変化計算では、山縣ら<sup>8)</sup>がFVCOMを用いて、潮位偏差を考慮した関門航路のサンドウェーブについての地形変化シミュレーションを検討しているものの、非構造格子を用いることによる地形変化への影響はあまり分かっていない。

そこで本研究では、非構造格子モデルを用いた土砂輸送計算の特徴を把握するため、非構造格子モデルによる数値シミュレーション手法の把握および構造格子モデルとの比較を通じた、格子形状が異なる条件の下での流れ場および地形変化の計算結果に与える影響について評価する事を目的とした。本研究では、まず非構造格子モデルの現在公開されているオープンソースモデルについて整理し、それらで扱われている離散化手法のうち有限体積法を取り上げて基礎的な理論と離散化手法について整

理した(1章)。整理した手法を用いて数値波動水槽を用いた簡易な数値実験を実施し、構造格子モデルと非構造格子モデルでの比較を通じて、非構造格子モデルの特徴と留意点について整理した(2章)。次に、オープンソフトウェアモデルSUNTANSを用いて、インドネシア・パティンバン港周辺を対象とした実地形での土砂輸送計算を実施し、構造格子モデルとの比較を通じて土砂輸送計算における特徴を整理した(3章)。また、予測計算時に流れを遮るような構造物が設置された場合の流動場と土砂輸送への影響を把握するため、3章で実施した港形に防砂堤を設置して、その影響を確認することで非構造格子の特徴について整理した(4章)。

### 1.2 オープンソースモデルの比較

非構造格子モデルの流体モデルは、前節に使用例を示したようにオープンソース化されている代表的なモデルがいくつか公開されている。表-1.1に代表的なオープンソースモデルの特徴を示す。表に示すように、それぞれ偏微分方程式の離散化手法や鉛直方向のメッシュの切り方が異なる。

SUNTANS, FVCOM, D-FLOW FM(Flexible Mesh)<sup>9)</sup>は、任意の検査体積領域の体積積分をガウスの発散定理を用いて表面積分に変換し、その流束を評価する有限体積法を採用している。一方、SCHISMの流体計算は、領域を多くの要素に分割し、要素毎に多項式で近似して求める有限要素法を採用している。

鉛直方向のメッシュについては、それぞれ異なる手法を採用しており、SUNTANSは水平方向に一樣に層を分ける鉛直レベルメッシュを用いている。D-FLOW FMは $\sigma$ 座標を採用しており、海面から海底までを等間隔にメッシュ切りすることが可能である。これにより、地形変化が急峻な領域に対しても、鉛直メッシュ数を減らさずに計算することが可能である。FVCOMの鉛直方向メッシュ切りにみられるS- $\sigma$ ハイブリッド座標のSとは、ストレッチの略称であり、 $\sigma$ 座標において等間隔である各層厚を、任意の層厚間隔の割合で表現する手法である。SCHISMの鉛直方向メッシュ切りにみられるS-Zハイブリッド座標のSも同様の意味であり、Zは鉛直レベルメッシュのことである。浅い領域で鉛直レベルメッシュに切り替えることにより、層厚が薄くなりすぎてしまうことを防ぐことが可能である。

近年、それぞれモデルにおいて徐々に土砂輸送計算モジュールの実装も進みつつあるものの、論文として公表されている最新の土砂輸送計算が公開モデルには実装されていないSUNTANSや、有料版に先行で公開されてい

表-1.1 非構造格子を用いたオープンソースモデルの比較

モデル名	SUNTANS <sup>5)</sup>	FVCOM <sup>1)</sup>	SCHISM <sup>7)</sup>	D-FLOW FM <sup>9)</sup>
開発グループ	Fringer ら	Chen ら	Zhang ら	Deltares
離散化手法	有限体積法	有限体積法	流動場 : 有限要素法 物質輸送 : 有限体積法	有限体積法
近似方法	静水圧近似または 非静水圧を選択  ブシネスク近似	静水圧近似または 非静水圧を選択	静水圧近似  ブシネスク近似	静水圧近似
Z方向メッシュ	鉛直レベルメッシュ	S- $\sigma$ ハイブリッド座標	S-Zハイブリッド座標	$\sigma$ 座標
ライセンス	GPL(ver. 2)に準ずる	商用利用は有償 開発者らへの報告義務	Apache License	GPL(ver. 3)または LGPL(ver. 2)に準ずる
土砂輸送計算 モジュール	あり (浮遊成分のみ)	あり	あり	あり

るDeltaresの地形変化モジュール等, そのオープンソース化の対応も異なっている。

オープンソースモデルの使用にあたっては, それぞれ異なるライセンスが定められているため注意が必要である。SUNTANSで用いられているGPL(GNU General Public License)は, フリーソフトウェアマシ・コラボレーションプロジェクトの1つであるGNUプロジェクトのために作成されたフリーソフトウェアライセンスである (<https://www.gnu.org/licenses/licenses.en.html>)。GPLは代表的なコピーレフトのソフトウェアライセンスの1つであり, プログラムの実行, プログラムの動作確認および改変, 複製物の再頒布, プログラムの改良および公衆にリリースする権利が許諾される。また, 商用利用可能なことや利用に伴い作成者がいかなる責任も負わないことなどが特徴である。GPLがversion2.0からversion3.0にアップデートされるにあたり, 特許条項が追加されている。D-FLOW FMはソースコードの範囲により, GPLとLGPLが使用されている。LGPL(Lesser GPL)とは, ライブラリなどの他のプログラムからリンクされる形で使用されるソフトウェア向けのライセンスであり, GPLでは部分的なプログラムを組み入れるだけでもソフトウェア全体を公開しなければいけないという条件を緩和したものである。SCHISMで用いられているApache Licenseは, Apacheソフトウェア財団によるライセンス規定であり, GPLとの互換性を有している (<https://httpd.apache.org/>)。一方, FVCOMは, GPLやApache Licenseのような汎用的なライセンスではなく, 独自のライセンスを定めている<sup>10)</sup>。利用者は, FVCOMのソースコードおよびその改変を, 非商業利用に限り認められ, 第三者への配布または譲渡も許可されていない。このように, オープンソースモデルを選定するにあたっては, その利用目的により, 計算手法や計算目的に限らず, ライセンス的な側面からも適切に

選択する必要がある。

### 1.3 有限体積法の基礎理論と非構造格子の取り扱い

#### (1) 有限体積法による保存式の導出

非構造格子に基づく偏微分方程式の解法は, 有限体積法, もしくは有限要素法によって実装される。ここでは, 多くのオープンソフトウェアモデルに採用され, 質量保存則が数値計算上満たされる利点を有する有限体積法について説明する。

質量や運動量などの任意の保存量 $\phi$ に対する保存式の導出は, 図-1.1のような検査体積(Control Volume)を仮定して導かれる。 $dt$ 時間に検査体積の曲面から流出する $\phi$ の正味の量と, 検査体積内の $\phi$ の増減の総量は保存されるとして保存式は式(1)に示すように積分形で表される。

$$\int_{CV} \frac{\partial}{\partial t} \rho \phi \, dV dt + \int_A \rho \phi \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} \, dA dt = 0 \quad (1)$$

ここで,  $\rho$ は流体密度,  $\mathbf{u}$ は流体の速度ベクトル,  $\mathbf{n}$ は単位法線ベクトル,  $t$ は時間,  $CV$ は検査体積,  $V$ は体積,  $A$ は検査体積の表面積である。式(1)にガウスの発散定理を適用して表面積分を発散の体積積分に書き直し, 検査体積の大きさをゼロに近づけてその極限を取ると, 式(2)のように一般的な任意の保存量 $\phi$ に対する保存式が導出される。有限差分法等で解かれる。

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \phi + \text{div} \rho \phi \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

有限体積法は, はじめに仮定した離散空間の検査体積が有限のものであるので, もとの積分形のまま扱うという思想である<sup>11)</sup>。

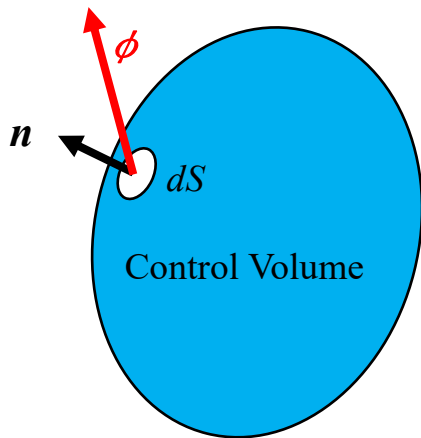


図-1.1 保存則導出時のコントロールボリューム

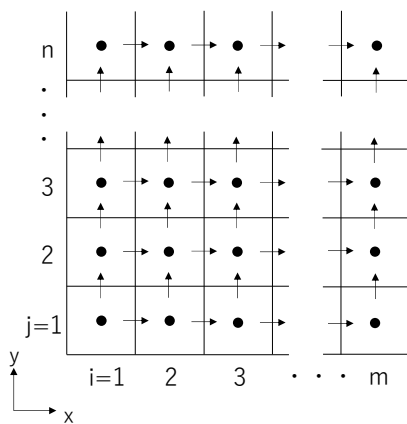


図-1.2 保存則導出時のコントロールボリューム

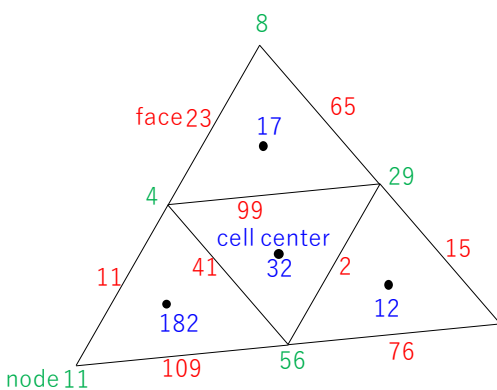


図-1.3 非構造格子における変数格納点  
(赤:辺 (face), 青:中心点 (cell), 緑:頂点 (node))

(2) 非構造格子による有限体積法計算

構造格子とは、座標軸に沿った方向に対して絶対的な構造が存在する格子のことである。例えば、 $x$ 、 $y$ 方向の座標軸を持つ2次元のスタガード正方格子では、図-1.2に示すように、それぞれの座標方向に対し構造的なナンバリングがされる。一方、非構造格子は、それらの

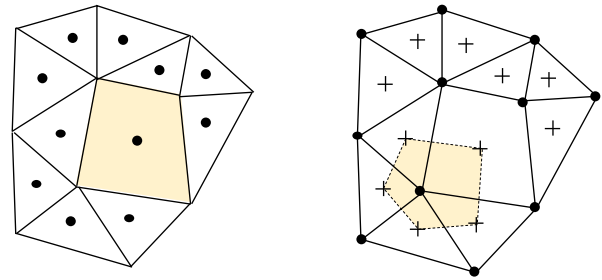


図-1.4 コントロールボリュームの定義方法  
(a) セル中心 CV, (b) 接点中心 CV

構造が存在せず、図-1.3に示すように格子の特徴点のナンバリングを不規則に設定することができる格子を指す。

非構造格子の検査体積（コントロールボリューム：CV）の定義方法は、(a)セル中心コントロールボリューム（cell-centred control volume）と(b)節点中心コントロールボリュームの2つの方法がある。図-1.4に2次元問題に対するこれら2つを示す。セル中心コントロールボリュームでは、格子点をコントロールボリュームの中心に配置する。それに対して、節点中心コントロールボリュームでは、計算格子の節点に格子点を配置する。この方法では、要素の中心と節点の中点を結び、サブボリュームを生成する過程に従う。その後、離散化するために、格子点を取り囲むサブボリュームでコントロールボリュームを生成する。本研究では、理解しやすいセル中心コントロールボリュームでの検討を進める。ここで、格子の中心に定義される格子点はcell center、格子の辺はfaceまたはedge、格子の節点はpointやnodeと呼ばれる。以降、cell centerは省略してcell、格子の辺をface、格子の節点をnodeと表記した。

構造格子は、座標軸に沿った方向に対して絶対的な構造が存在するため、離散化計算を行う際に必要な格子同士の繋がり情報は、順番に並んだ番号を参照することで隣り合う格子の計算を行うことができる。一方、非構造格子はこうした構造が存在しないため、コンネクティビティと呼ばれる格子情報同士の関係をメモリに保存しておく必要がある。例えば以下のようなコンネクティビティを保存することで格子同士の情報を参照することができる。

- cell-to-faceコンネクティビティ
- face-to-cellコンネクティビティ
- face-to-nodeコンネクティビティ

cell-to-faceコンネクティビティでは、cellの番号およびcellにおけるローカルのface番号（三角形の場合は1~3個）を指定することで、faceの情報が返る変数である。cell-to-faceの配列要素を(cell番号,ローカルface番号)として、図-1.3のcell(32)を例にとると、下記のように3辺の

face番号を得ることができる。

- cell-to-face(32,1)=99
- cell-to-face(32,2)=41
- cell-to-face(32,3)=2

同様に、face-to-cellコネクティビティは、face番号およびfaceにおけるローカルcell番号(通常2個)を指定することで、cellの情報が返る変数である。face-to-cellの配列要素を(face番号,ローカルcell番号)として、図-1.3のface(2)を例にとると、下記のように2つのcell番号を得ることができる。

- face-to-cell(2,1)=32
- face-to-cell(2,2)=12

face-to-nodeコネクティビティは、face番号およびfaceにおけるローカルnode番号(通常2個)を指定することで、nodeの情報が返る変数である。face-to-nodeの配列要素を(face番号,ローカルnode番号)とすると、図-1.3のface(2)を例にとると、下記のように2つのnode番号を得ることができる。

- face-to-cell(2,1)=56
- face-to-cell(2,2)=29

#### 1.4 非構造格子における有限体積法の離散化

ここからはH.K.Versteegら<sup>12)</sup>に基づいて、非構造格子における有限体積法の離散化について説明する。有限体積法を非構造格子に適用する出発点として、式(3)に示す積分形の保存式を考える。

$$\int_{cv} \frac{\partial}{\partial t} (\rho\phi) dV + \int_{cv} \text{div}(\rho\phi\mathbf{u}) dV = \int_{cv} \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) dV + \int_{cv} S_\phi dV \quad (3)$$

ここに、 $\Gamma$ は拡散係数、 $S_\phi$ は $\phi$ の生成量である。また、積分範囲 $CV$ は検査体積を表す。検査体積の境界表面を $A$ とし、ガウスの発散定理を適用すると

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \int_{cv} \rho\phi dV \right) + \int_A \mathbf{n} \cdot (\rho\phi\mathbf{u}) dA = \int_A \mathbf{n} \cdot (\Gamma \text{grad}\phi) dA + \int_{cv} S_\phi dV \quad (4)$$

と表せられ、 $A$ において面積分を実行する必要がある。

異なる形状の検査体積を図-1.5に示す。これら検査体積それぞれの境界表面は、有限の長さの直線要素で構成される閉輪郭であり、その面積を $\Delta A$ で表す。式(4)中の $A$ は検査体積表面の全領域、 $dA$ は微小表面積を意味するので、直線要素すべてに対して面積分を実行すると式(5)の

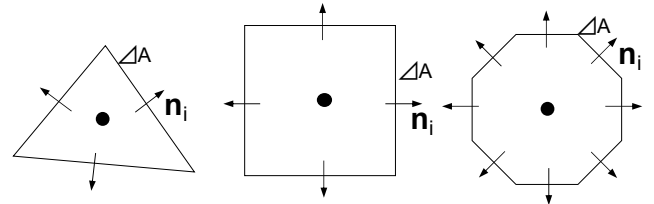


図-1.5 非構造格子による多角形メッシュの例

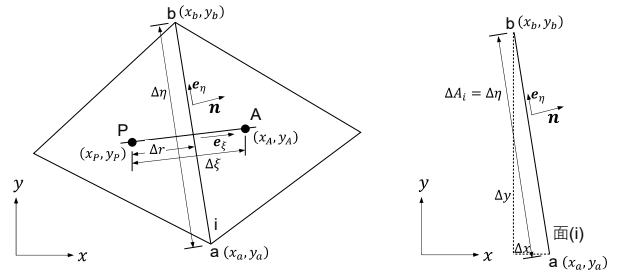


図-1.6 左図：セル中心  $CV$   
右図：face  $i$  における単位法線ベクトル

ように表される。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \int_{cv} \rho\phi dV \right) + \sum_{\text{all surface}} \int_{\Delta A_i} \mathbf{n}_i \cdot (\rho\phi\mathbf{u}) dA = \sum_{\text{all surface}} \int_{\Delta A_i} \mathbf{n}_i \cdot (\Gamma \text{grad}\phi) dA + \int_{cv} S_\phi dV \quad (5)$$

面積分を計算するためには、流速ベクトル  $\rho\phi\mathbf{u}$  と  $\Gamma \text{grad}\phi$  に加えて、幾何学量  $\mathbf{n}_i$  と  $\Delta A_i$  が必要となる。外向きベクトル  $\mathbf{n}_i$  と  $\Delta A_i$  は、非構造格子のnodeの座標から、単純な三角法とベクトル代数を用いて計算する。図-1.6に一般的なセル中心コントロールボリュームとその表面における単位法線ベクトルを示し、図中に離散化手順を記述するために用いる記号を示した。図中の点Pは離散化を行うコントロールボリュームの中心 (cell center) である。点Aは隣接するcell centerであり、 $\mathbf{e}_\xi$  は点Pと点Aを結ぶ線に平行な単位ベクトルである。2つのコントロールボリュームを分ける面(face)を $i$ と定義し、 $ab$ は2つのコントロールボリュームを共有する節点(node)である点aと点bを結ぶ線である。点aと点bの座標はそれぞれ $(x_a, y_a)$ と $(y_a, y_b)$ である。単位ベクトル $\mathbf{n}$ と $\mathbf{e}_\eta$ はそれぞれ面 $i$ の外向きの単位ベクトルと接線ベクトルである。

同図より、face  $i$  における面積は式(6)、face  $i$  に対する単位法線ベクトルは式(7)のようになる。ただし、 $\Delta x = x_b - x_a$  および  $\Delta y = y_b - y_a$  である。

$$\Delta A_i = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \quad (6)$$



$$\mathbf{n} = \frac{\Delta x}{\Delta A_i} \mathbf{i} + \frac{\Delta y}{\Delta A_i} \mathbf{j} \quad (7)$$

a) 拡散項の離散化

式(5)右辺第1項の拡散項を離散化する。要素それぞれの面積分を、コントロールボリュームの表面要素 $\Delta A_i$ に対する外向きの単位法線ベクトル $\mathbf{n}_i$ と拡散流速ベクトル( $\Gamma \text{grad } \phi$ )の内積で近似する。線PAに沿う中心差分法を用いて、式(8)のように近似できる。

$$\int_{\Delta A_i} \mathbf{n} \cdot (\Gamma \text{grad } \phi) dA \cong \Gamma \left( \frac{x_b - x_a}{\Delta \xi} \right) \Delta A_i \quad (8)$$

式中の $\Delta \xi$ は、点A点Pの間の距離である。点Pと点Aを結ぶ線と単位法線ベクトル $\mathbf{n}_i$ が同じ方向同じ方向である場合のみ、式(8)は正確であることに注意が必要である。そのため、この近似は格子が完全に直行している場合のみ正確である。図-1.6に示すように、非構造格子では一般に点Pと点Aを結ぶ線とベクトルは平行ではない。これは、計算格子のゆがみ、あるいは非直交性として知られている。そのため、流束の計算の式(8)に、非直交性に起因する寄与を加えることで修正しなければならない。流束を修正する方法の1つとして、交差拡散項として知られる

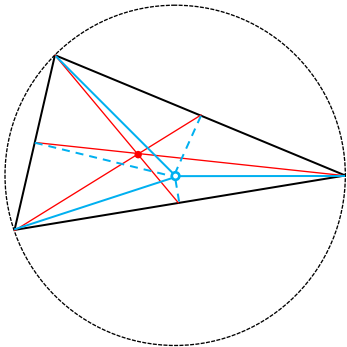


図-1.7 2つの cell center の定義  
赤色塗りつぶし点：重心，青色白抜き点：外心

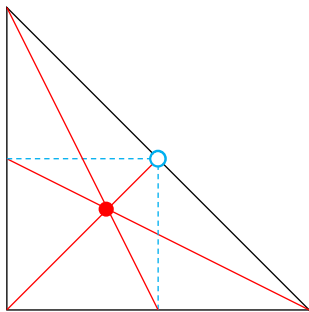


図-1.8 直角二等辺三角形における cell center  
色塗りつぶし点：重心，青色白抜き点：外心

項を導入し、離散化方程式を構築する際に生成項として取り扱う方法がある。詳しくはMathur and Murthy<sup>13)</sup>を参考されたし。

三角形格子に対する非直交性の問題に対するもう一つの留意点としては、cell centerの位置がある。三角形格子のcell centerとして一般的なものには重心と外心が知られる。図-1.7に2種類のcell centerを示す。図で示すように、外心は各辺の垂直二等分線が必ず通る。したがって、隣り合う格子とは辺を共有するため直交性が保たれる。しかしながら、内角に直角、または鈍角が存在する場合は外心が三角形の边上、または外側になり、格子の代表点として扱うことができない。図-1.8に直角二等辺三角形の場合の例を示す。一方、重心は必ず三角形の内側に存在する。この場合は非直交性が保証されないため、前述した交差拡散項の導入等を導入する必要がある。外心と重心が一致する場合、格子形状は正三角形となり、外心の垂直二等分線も全ての辺から等距離になる。このため、直交性を保証する格子三角形は理想的に正三角形となる。

b) 対流項の離散化

式(5)左辺第2項の対流項を離散化する。コントロールボリュームの表面要素 $\Delta A_i$ においてすべて積分し、和をとるように面積分を計算する。外向きの単位法線ベクトル $\mathbf{n}_i$ とコントロールボリュームの表面要素 $\Delta A_i$ を乗じた対流流束ベクトル( $\rho \phi \mathbf{u}$ )の内積で、これらの積分をそれぞれ式(9)のように近似する。

$$\sum_{\text{all surface}} \int_{\Delta A_i} \mathbf{n}_i \cdot (\rho \phi \mathbf{u}) dA = \sum_{\text{all surface}} \mathbf{n}_i \cdot (\rho \mathbf{u}) \Delta A_i \phi_i \quad (9)$$

ここで、対象としている任意の保存量 $\phi$ がSS濃度である移流拡散方程式を例とした場合、cell centerに保存されている保存量 $\phi$ をface  $i$ におけるSS濃度へ補完する必要がある。代表的な方法の1つに距離の重み付け補完法がある。図-1.9に示す2つの格子に挟まれた面*i*における保存量 $\phi$ を求める場合、点1および点2の値と、それぞれの面までの距離 $d_1$ 、 $d_2$ を用いて式(10)のように重み付け補完を行う。

$$\phi_f = w_f \phi_2 + (1 - w_f) \phi_1 \quad (10)$$

ここに、 $w_f$ は距離の重み関数であり、式(11)のように表す。

$$w_f = \frac{\frac{1}{d_1}}{\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}} \quad (11)$$

対象としている任意の保存量 $\phi$ が流束ベクトル $\mathbf{u}$ である運動量保存式を例とした場合かつ、faceに流速ベクトル

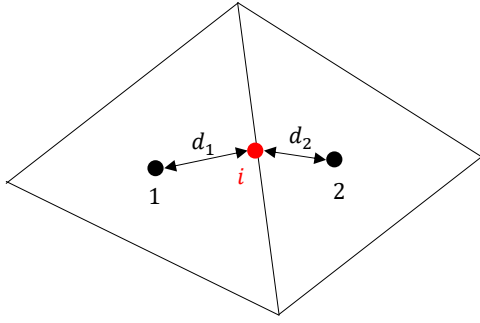


図-1.9 cell変数のfaceへの補完方法

ルが保存されているスタaggerド格子の場合、格子の各faceに保存されている流速からcell centerにおける $\mathbf{u}$ を補完する必要がある。例えばSUNTANSやD-FLOW FMでは、perot<sup>14)</sup>による方法によりこの解法を得ている。

### c) 生成項の離散化

式(5)の右辺第2項は生成項であり、式(12)のように取り扱う。

$$\int_{cv} S_{\phi} dV = \bar{S}_{\phi} \Delta V \quad (12)$$

ここに、 $\Delta V$ はコントロールボリュームの体積、 $\bar{S}_{\phi}$ はコントロールボリュームにおける $S_{\phi}$ の平均値である。

### d) 非定常項の離散化

式(5)の左辺第1項は非定常項であり、時々刻々の変化を計算する場合には、離散化の過程でこの項を取り扱わなければならない。式(5)の非定常項以外の項を右辺に集め $R$ と置き、式(13)のように表す。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \int_{cv} \rho \phi dV \right) = R \quad (13)$$

式(13)をコントロールボリュームにおいて有限の体積で積分することに加え、さらに有限の時間刻み $\Delta t$ において積分する。非定常項の積分の順序を入れ替えて式(14)を得る。

$$\int_{cv} \left[ \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \phi) dt \right] dV = \int_t^{t+\Delta t} R dt \quad (14)$$

格子点における保存量 $\phi$ がコントロールボリュームにおいて全体で一様であると仮定し、陽的に離散化を行うと式(15)のように書くことができる。

$$\rho(\phi_{t+\Delta t} - \phi_t) \Delta V = R \Delta t \quad (15)$$

式(15)中の $R$ について、a)~c)で示したように各項を離散化し、 $\phi_{t+\Delta t}$ について毎ステップ解くことで、時々刻々の解を得る。

## 2. 格子の設定条件の差異が計算結果に及ぼす影響

1章で示した非構造格子における有限体積法を用いた簡略化した連続式と運動方程式を用いて流体計算を実施し、構造格子との取り扱いの違いとそれに伴う計算結果への影響について確認する。検討は幅10m、距離1,000m水路を仮定し、図-2.1に示す構造格子による有限差分法(FDM)と図-2.2に示す非構造格子による有限体積法(FVM)で比較する。水路の片端において水位を振動させる造波境界を設け、ここでは水位変動の伝搬過程(波動場)の計算を実施した。使用した連続式と運動方程式を以下に示す。

$$\frac{\partial \eta_l}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (16)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -gD \frac{\partial \eta_l}{\partial x} - \frac{gn^2 M \sqrt{M^2 + N^2}}{D^3} \quad (17)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -gD \frac{\partial \eta_l}{\partial y} - \frac{gn^2 N \sqrt{M^2 + N^2}}{D^3} \quad (18)$$

ここで $\eta_l$ は水位、 $M$ 、 $N$ はそれぞれ $x$ 、 $y$ 方向の線流量、 $g$ は重力加速度、 $D$ は水深(ここでは10mの一定とする)、 $n$ は粗度係数である。運動量は水位勾配で決まるとし、底面摩擦によって減衰するとした。

有限差分法の計算を実施した図-2.1の構造格子において、 $i$ は格子番号であり、 $i=1$ において以下の水位を与える。格子幅 $dx$ を10mとし100格子配置した。また、計算間隔 $dt$ は0.001sとした。

$$\eta = \alpha \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \quad (19)$$

ここに、 $\alpha$ は振幅、 $T$ は周期であり、本計算では $\alpha=1.0$ m、 $T=20$ sとした。計算時間は200sとし、10波分の波を入射させた。 $\eta_l$ を中心格子、 $M$ 、 $N$ を格子界面に配置するスタaggerド格子で計算を実施し、流入、流出境界部の線流量(流速)を0とする壁面境界とした。

有限体積法を用いた非構造格子計算の格子形状を、有

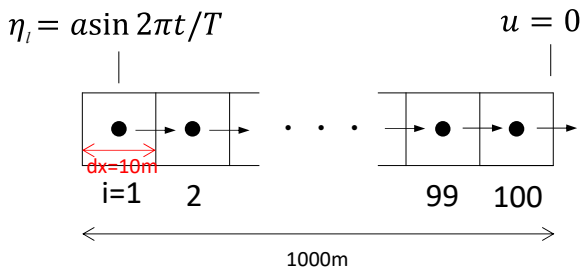


図-2.1 有限差分法における計算構造格子

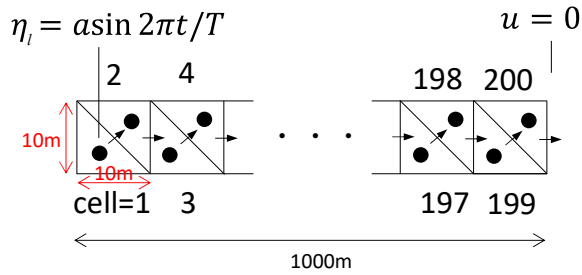


図-2.2 有限体積法における計算非構造格子

有限差分法に用いた矩形格子と同様の形状にすると、両モデルの離散化は同様の式が導出され結果が等しくなるため、有限差分法と全く同じ離散化式が導出されるため、図-2.2 に示す三角格子で検討を行った。幅 10m、高さ 10m の直角二等辺三角形格子を 200 格子配置し、トータルの水路長を有限差分法と同等とした。なお、有限差分法では 1 次元の計算であったが、有限体積法では三角形格子を用いたため  $y$  方向成分が出てしまい、平面 2 次元計算となっている。cell=1 において有限差分と同様に造波しており、定義点がずれている。その他の条件については有限差分法と同様とした。

図-2.3 に水位分布の時系列を示す。縦軸は経過時間、横軸は造波地点からの距離である。左図が有限差分法、右図が有限体積法の結果であり、水位をコンターで表している。結果を見ると、右端境界において流出を 0 としているため、完全反射が起きていることがわかる。図中に、計算開始 100 秒時の破線を示している。有限差分法では、100 秒時に 1 波目が到着しているが、有限体積法では到達しておらず、波速は有限体積法の方が遅くなっている。この原因の 1 つとして、cell center を重心に設けたため、前述したように cell center を結ぶ線と法線の方向が一致していないために現れた誤差（非直交性）だと考えられる。

有限体積法で同様の格子および中点近似を用いると、有限差分法と全く同じ離散化式が導出されるが、移流項および水平粘性項の影響を把握するため、有限体積法の

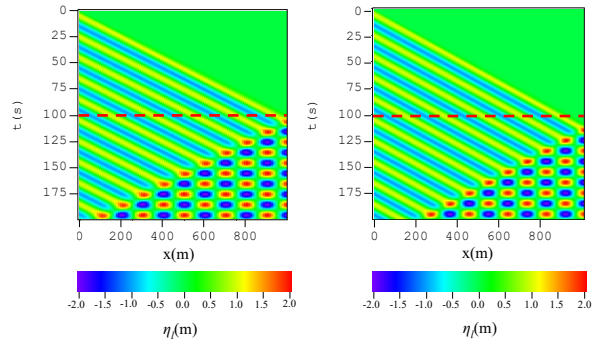


図-2.3 水位時間変化の比較  
(左：有限差分法，右：有限体積法)

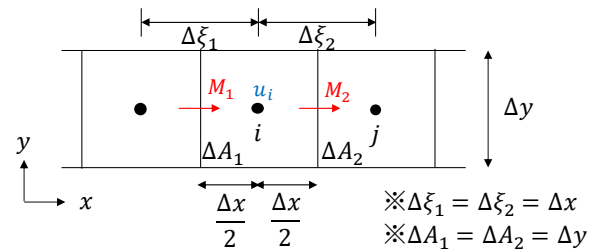


図-2.4 有限体積法に使用する矩形格子

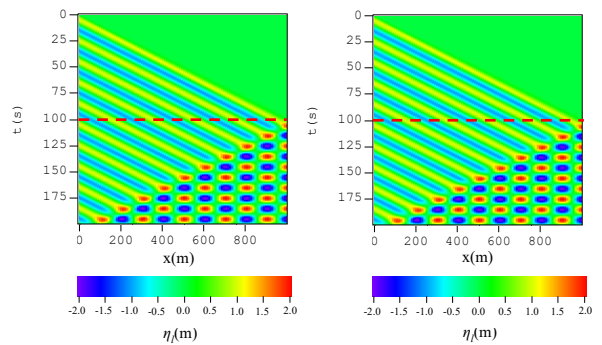


図-2.5 水位時間変化の比較（矩形格子）  
(左：有限差分法，右：有限体積法)

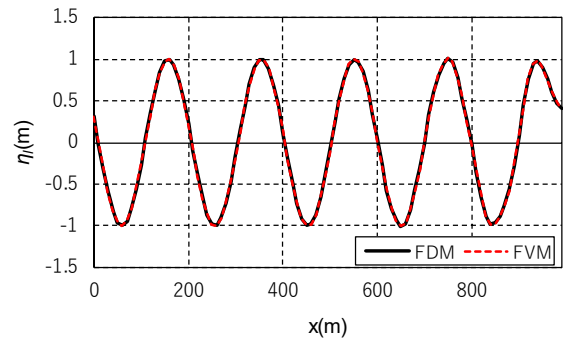


図-2.6 水位の分布（矩形格子）

格子を図-2.4 のように変更した。ただし、格子形状は同じ正方格子ではあるが、格子情報は非構造形式としている。ここで、 $i$  は計算対象となる格子番号であり、格子同士の計算を行う際に、面を挟んで対になる格子番号を  $j$  として表す。図-2.5 に水位分布の時系列を示す。縦軸は経

過時間，横軸は造波地点からの距離である．正方格子にしたことで，有限体積法においても100秒時に1波目が到着している．また，図-2.5の100秒時（破線時）におけるx方向の水位分布を図-2.6に示す．

移流項および水平粘性項による違いを比較するため，式(18)に移流項および水平粘性項を追加し，perot<sup>14)</sup>を参考に離散化を行った．用いた格子形状は図-2.4と同様である．移流項は，対象となる格子まわりのfaceそれぞれ次式のように計算した．

$$\frac{1}{V} \sum_{all\ surface} \{ \mathbf{n} \cdot \mathbf{u}_i M \Delta A \} \quad (20)$$

ここで， $\mathbf{u}_i$ はcell centerにおける値なので，faceに保存されている各流速を用いて以下のように内挿する．

$$u_i = \frac{1}{2} (u_1 \Delta \xi_1 + u_2 \Delta \xi_2) \quad (21)$$

水平粘性項についても同様に，対象となる格子まわりのfaceについて次式のように計算する．

$$\frac{1}{V} \sum_{all\ surface} \left\{ \mathbf{n} \cdot \nu D \frac{M_j - M_i}{\Delta \xi} \Delta A \right\} \quad (22)$$

ここで， $\nu$ は動粘性係数である．これらのように求めた移流項，水平粘性項の値は，対象となる格子のcell centerで求めている．流速計算のためにfaceでの値とするためには，図-1.4で示した補完を行う必要がある．

図-2.7の水位の時間変化を見ると，両モデルに違いが出ており，有限体積法の方がピークの水位が高くなっている．図-2.7中の100秒時（破線）におけるx方向の水位分布を図-2.8に示す．図-2.8を見ると，有限体積法の波形が有限差分法よりも顕著に前傾していることがわかる．図-2.6と比較して移流項および水平粘性項を追加したことにより水位分布に違いが表れた．これは，有限体積法の移流および水平粘性項の計算において，cellとfaceにそれぞれ内挿操作を実施していることによる水位差であると考えられる．

### 3. 実地形を用いた土砂輸送数値実験

#### 3.1 計算条件

実海域におけるケーススタディとして，インドネシアのジャワ島北西部(図-3.1(a))にて，現在建設が進められ

ているパティンバン港周辺の沿岸域を対象とし，潮流による地形変化計算の数値実験を実施した．計算に使用する港湾形状について，パティンバン港は現在建設中であるが，2017年に実施された開発調査<sup>15)</sup>の計画港形を本研究の基本港形として計算を実施することとした(図-3.1(b))．

本研究の計算対象とする沿岸域での現地データは地点・期間とも限られている中で，小碓<sup>16)</sup>は当海岸を対象とする地形変化計算を実施する際に，潮位の現地観測データと比較を通じて，使用した構造格子モデルによる潮位変動の再現性については，その妥当性を確認している．本研究では，この小碓らの構造格子モデルと非構造格子モデルによる計算結果の比較を通じて，両者の差異を把握・評価することを試みた．非構造格子モデルは，局所的な質量保存則が数値計算上保証される利点を有する有限体積法を採用しており，ソースコードの改良後における利用上の制約等も考慮してSUNTANSを使用することとした．非構造格子モデルでは，図-3.1(a)に示す計算領域の沖合で最大格子間距離1,080m，港周辺で図-3.2(b)のように港湾形状に合わせて格子を細かくする可変メッシュとした．一方，比較用の構造格子モデルでは，

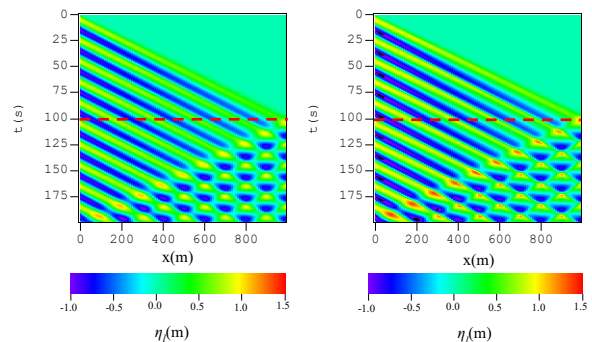


図-2.7 水位の時間変化（移流項と水平粘性項の追加）  
（左：有限差分法，右：有限体積法）

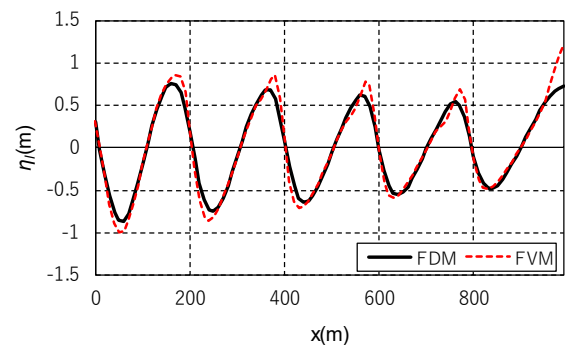


図-2.8 水位分布（移流項と水平粘性項の追加）

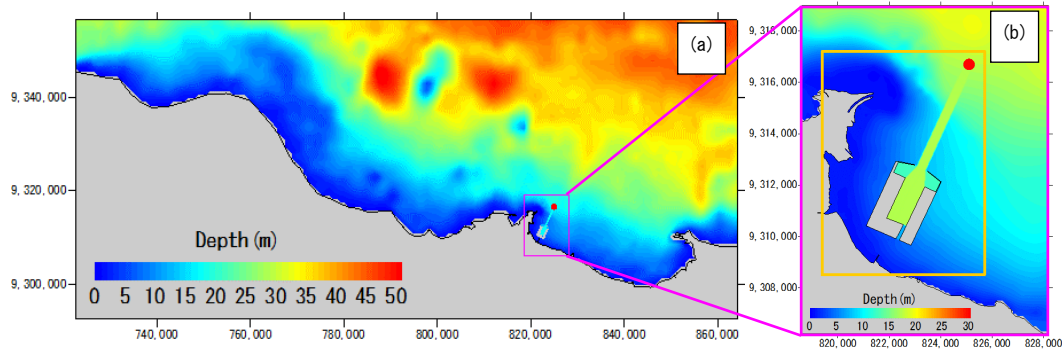


図-3.1 計算領域および水深分布 (a)全体領域(構造格子の格子間隔800m), (b)構造格子中領域(同100m), (□)構造格子小領域(同30m), (●)時系列比較位置

表-3.1 主な計算条件

海底地形	GEBCO2014+深浅測量データ
潮汐	TPXO9-atlasの10分潮 (M2,S2,N2, K2,K1,O1,P1,Q1,Mf,Mm)
圧力	静水圧近似
密度	一定 (=1,025 kg/m <sup>3</sup> )
水平粘性・拡散	1.0 m <sup>2</sup> /s
粗度長	0.4mm
海底摩擦係数	流速の対数分布則
土粒子密度	2,650 kg/m <sup>3</sup>
沈降速度	SS濃度に依存 <sup>17)</sup> (最小値: 0.002mm/s, 最大値: 2.58mm/s)
巻き上げ係数	0.0001 kg/m <sup>2</sup> /s
侵食の限界せん断応力	0.03 Pa
堆積の限界せん断応力	∞
底質の空隙率	0.80

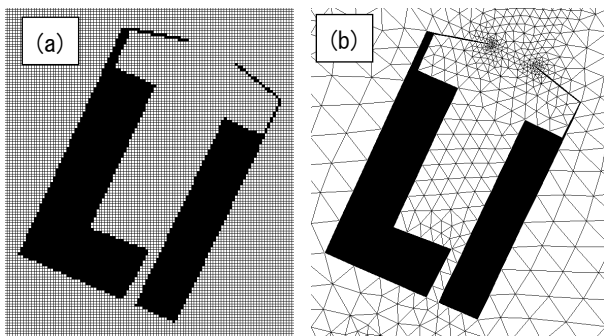


図-3.2 港湾施設周辺の格子形状 (a)構造格子, (b)非構造格子

第1領域の範囲を非構造格子モデルの領域に合わせて図-3.1(a)の範囲とし, 第2, 第3領域の範囲を図-3.1(b)の桃色枠, 橙色枠で示すように港周辺の格子を細かくする3段階の1-wayネスティングにより計算した(図-3.2(a)). 構造格子モデルのために構造物との境界で凹凸が生じてしまうものの, 防砂堤を十分表現できるように, ここでは第1領域を800m, 第2領域を100m, 第3領域を30m格子と

した. 1wayネスティングは, 接続境界において粗格子の水位, 流速およびSS濃度の物理量を, 細格子の接続境界に線形補間し受け渡すことで計算を行った.

外力は潮流のみを対象とし, 構造格子モデル・非構造格子モデルとも全球潮汐モデルTPXO9-atlasの主要10分潮の振幅・遅角の情報を開境界に与えた. 計算の対象期間は小碓ら<sup>16)</sup>の計算期間を内包する2017年8月15日から8月22日とし, 前半の5日間は助走期間とした. 両モデルとも, 鉛直方向のメッシュを複数に切ることができる多層計算が可能なモデルであるが, 本検討では単純化のために単層計算とした. 圧力の近似についても, SUNTANSモデルは非静水圧計算が可能なモデルであるが, ここでは計算時間の短縮と構造格子モデルと条件を揃えることを目的として静水圧近似とした. なお, 前述したように非構造格子の計算では直交性の問題が発生するが, SUNTANSでは外心を使用しておりcell centerを結ぶ線と法線方向は一致する. ただし, 三角形格子に鈍角が存在する場合は, cell centerが三角形の外に設定されてしまうため, SUNTANSでは鈍角が存在する場合にcell centerを外心から重心に近づける操作を行う. この際は誤差が増大してしまうことに注意が必要である.

土砂輸送シミュレーションは, 小碓ら<sup>16)</sup>と同様に海岸の底質調査結果から泥粒子(粒形5 $\mu$ m)の輸送を対象とし, 沈降速度はフロクキュレーションの影響を加味するためにSS濃度に依存して変化させた<sup>17)</sup>. 非構造格子モデルの計算は, 構造格子モデルにおける底質の巻き上げ, 沈降, 底面せん断応力の評価方法を, SUNTANSにデフォルトで用意されている物質輸送の移流・拡散モジュールに組み込み土砂輸送計算を実施した. 地形変化量の評価は, 底面における巻き上げ量と沈降量の収支として時々刻々の地盤高変化を計算した. その他の計算条件を表-3.1に示す.

### 3.2 計算結果および考察

#### (1) 航路沖における定点モニタリング

図-3.1(b)の赤点部にモニタリング地点を設け、潮位および流速の比較によって非構造格子モデルの妥当性について確認した。モニタリング点における潮位の時系列を図-3.3(a)に、東向き成分流速(U)および北向き成分流速(V)の時系列を図-3.3(b)に示す。潮位の結果(図-3.3(a))を見ると、非構造格子モデルの計算結果は従来の構造格子モデルとほぼ一致している。従って、構造格子モデル・非構造格子モデル両者の潮位は、小裕ら<sup>16)</sup>において現地観測データと比較しており、両モデルの潮位は妥当であると言える。一方、流速は(図-3.3(b))、東向き流速、北向き流速ともに流速のピークで非構造格子モデルの方がわずかに小さくなる傾向はあるものの、位相や振幅などの時系列変化の特徴について、概ね同様な結果を示している。

#### (2) 流れ場の平面分布比較

前節で示した外力条件を基に港湾施設周辺での計算結果の比較を行った。図-3.3に橙色破線で示した上げ潮最強時刻における、基本港形を対象とした構造格子モデル、非構造格子モデルそれぞれによる流速場の計算結果を図-3.4(a)(b)に示す。図-3.3(b)および図-3.4を見ると、当海域の上げ潮時は、港湾北側の航路堀込部を西向きに横断する流れが発生している。図-3.4(a)(b)を比較すると、西向きの流れの主流が港湾の沖側を通過しており、航路堀込部や港湾に遮蔽領域では流速が小さくなるという流況の空間分布の大局的な特徴は両モデルで一致している。

岬の北部付近では図-3.4(b)に示すように非構造格子モデルの海陸境界に沿う流れが、構造格子モデルと比較して明瞭に示されている。また、岬北東部では、構造格子モデルと比較して非構造格子モデルの流速が大きい。これは、非構造格子モデルで見られた岬北部での海陸境界に沿う流れによって、岬北東部で要求される流量が大きくなったためと考えられる。一方、港湾北東部において、岬北東部ほど顕著ではないものの、港湾構造物の境界付近で流速に差が見られ、非構造格子モデルの流速の方が大きくなっている。また、同図の青色の矢印で示す地点は、領域の東側から西方向への流れが港湾施設の東側にぶつかり、流向が港湾の北側に進む流れと、南側に進む流れに分岐する地点である。この位置は、構造格子モデルと非構造格子モデルで異なっている。その結果、港湾の南西部を通過する流速が、構造格子モデルよりも非構造格子モデルの方が大きくなっている。

#### (3) 地形変化パターンの比較

以上のような流れ場の違いを基に土砂輸送シミュレーションを実施し、両モデルの地形変化パターンについて比較した。図-3.5(a)(b)は、図-3.3の紫色破線で示す上げ潮期間中の、底面における巻き上げ量と沈降量の収支の積算値として算定した、基本港形に対する地形変化パターン(空間分布)を示したものである。両モデルとも、図-3.4(a)(b)において流速が大きく表れている部分で侵食を示しているが、前述したモデル間の流速分布の差により、図-3.5(a)(b)中に白枠で示した港北東部、港湾北東部および港湾南西部において、侵食域が非構造格子モデル

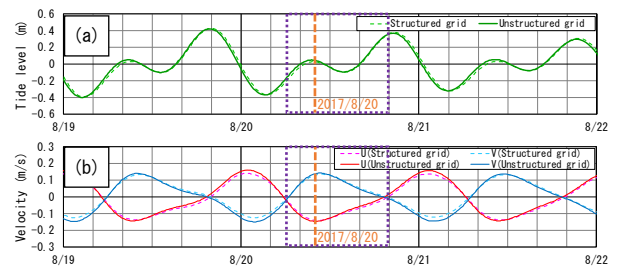


図-3.3 潮位および鉛直平均流速の時系列図  
(a)潮位, (b)鉛直平均流速, (c)上げ潮期間

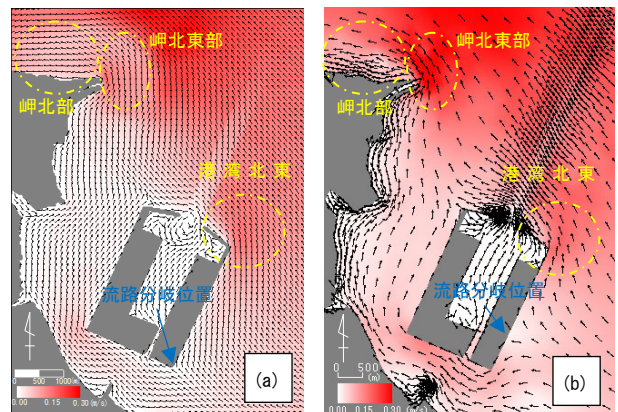


図-3.4 基本港形における上げ潮時の流速場  
(矢印: 流れの向き, カラーコンター: 絶対値)  
(a)構造格子, (b)非構造格子

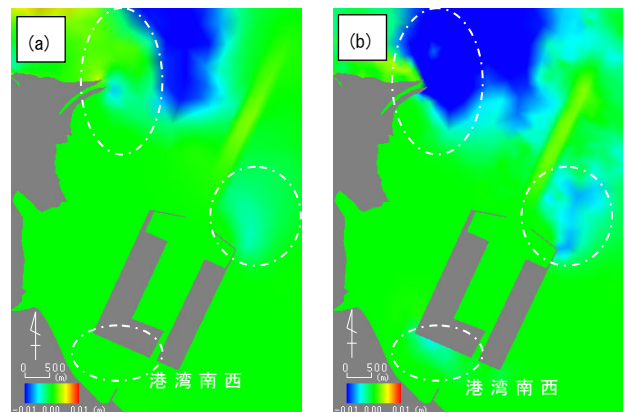


図-3.5 上げ潮時の地形変化パターン(基本港形)  
(a)構造格子, (b)非構造格子

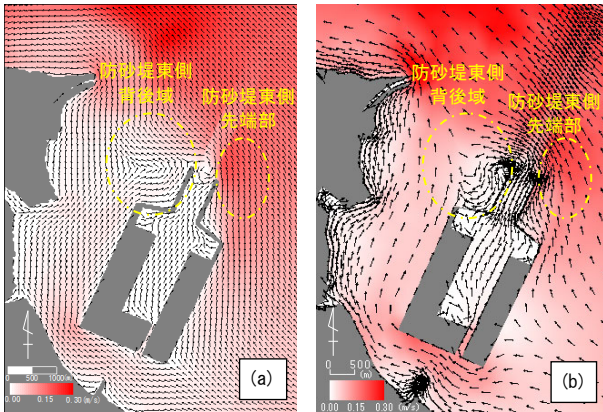


図-4.1 防砂堤 1,000mにおける上げ潮時の流速場  
(矢印：流れの向き，カラーコンター：絶対値)  
(a)構造格子，(b)非構造格子

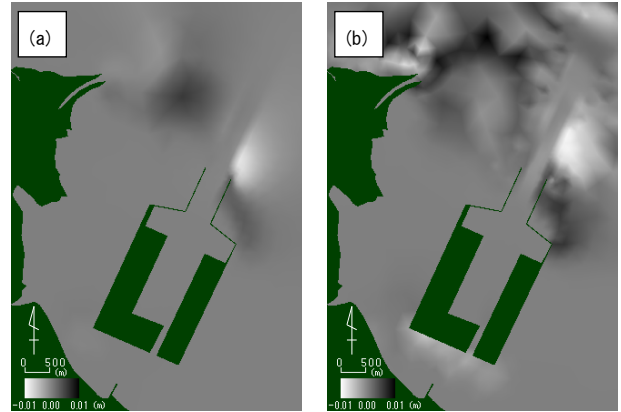


図-4.3 防砂堤設置に伴う地形変化量の変化  
(防砂堤 1,000m 設置，上げ潮時)  
(黒色：基本港形より侵食量減又は堆積量増，  
白色：基本港形より侵食量増又は堆積量減，  
灰色：変化なし) (a)構造格子，(b)非構造格子

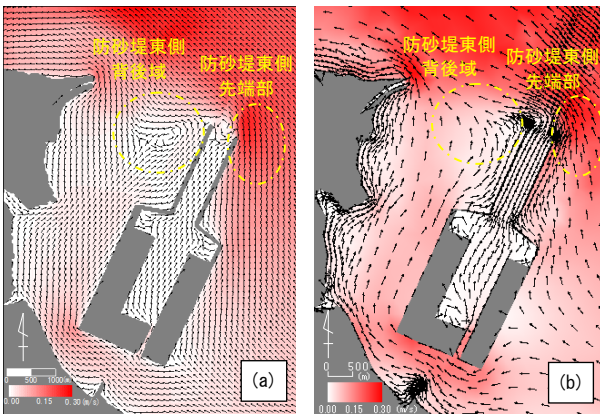


図-4.2 防砂堤 2,000mにおける上げ潮時の流速場  
(矢印：流れの向き，カラーコンター：絶対値)  
(a)構造格子，(b)非構造格子

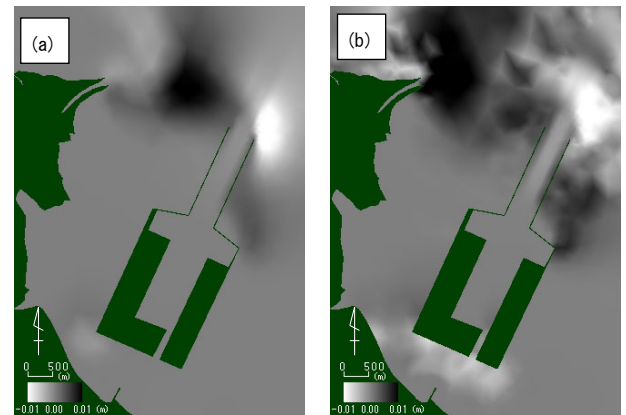


図-4.4 防砂堤設置に伴う地形変化量の変化  
(防砂堤 2,000m 設置，上げ潮時)  
(黒色：基本港形より侵食量減又は堆積量増，  
白色：基本港形より侵食量増又は堆積量減，  
灰色：変化なし) (a)構造格子，(b)非構造格子

ルの方が広く分布している．このように，格子形状の違いによって港湾施設や岬等の海陸境界付近で流速に違いが見られ，地形変化パターンにも影響を与えることが分かった．

#### 4. 防砂堤設置港形における土砂輸送数値実験

##### 4.1 計算条件

東西方向に潮流が往復する当海域において，流れを遮る構造物を設置した場合に，格子形状の違いが流れ場および地形変化パターンにどのような影響を与えるのかを把握するために，3章で計算を実施した基本港形の沖合に向けて1,000mあるいは2,000m防砂堤を設置したケースを設定し，基本港形との比較を行った．構造格子モデルについては，防砂堤の位置に対応する箇所のメッシュを

非計算点にすることで表現した．非構造格子モデルは防砂堤形状に沿って格子を生成することにより，正確に表現することが可能である．港湾形状以外の潮位条件やその他計算条件は，基本港形ケースと同様とした．

##### 4.2 計算結果および考察

###### (1) 防砂堤設置による流れ場への影響

図-4.1(a)(b)と図-4.2(a)(b)はそれぞれ，図-3.4(a)(b)と同時刻における，防砂堤を1,000mおよび2,000m設置したケースの流速場である．防砂堤1,000m港形，防砂堤2,000m港形とも，基本港形における岬の北東部や港湾北東部，港湾南西部で見られた流速の違いが同様に表れている．基本港形時に航路上を通過していた西向きの流れが，防砂堤を設置したことにより，東側先端部で流速が

大きくなる。その一方で、防砂堤の背後域では流れが遮蔽され、流速が小さくなる領域が発生している。防砂堤1,000m港形での背後域は、流速としては小さいものの、構造格子モデルの流向(図-4.1(a))が防砂堤に沿って北東方向に流れているのに対し、非構造格子モデルの流向(図-4.1(b))が南西方向と逆向きの流れになっている。また、流速が小さくなる影響範囲については、カラーコンターが白色で描かれている部分を見て分かるように、構造格子モデルの方が広く分布している。これらの流れ場の差異は、格子形状の違いによって、格子の凹凸および防砂堤先端の延長の微妙な差異が影響を与えたものと考えられる。防砂堤2,000m港形での遮蔽域については、構造格子モデルの防砂堤背後域(図-4.2(a))で渦の形成が強調され、非構造格子モデル(図-4.2(b))と比べて流速が小さくなっている。

#### (2) 防砂堤設置による地形変化への影響

次に、防砂堤を設置したことによる地形変化パターンへの影響についても調べた。図-4.3(a)(b)、図-4.4(a)(b)は、図-3.5(a)(b)の地形変化パターンを算定した期間と同じ期間に、防砂堤設置港形から基本港形の地形変化量を差し引いた空間分布である。防砂堤設置港形が基本港形よりも堆積側に变化した場合は黒色に、侵食側に变化した場合は白色に描かれている。従って、図-3.5(a)(b)において侵食を示していた領域が黒色を示す場合は、侵食量が減少していることを表している。反対に、図-3.5(a)(b)において堆積を示していた領域が黒色を示す場合は、堆積量が増加していることを表している。防砂堤を設置したことにより、防砂堤1,000m港形、防砂堤2,000m港形のケースとも、防砂堤東側先端部の流速が大きくなる領域で、せん断応力の増大により侵食が進む傾向となることや、防砂堤背後の流速減速域での堆積傾向など、両計算方法の結果において共通して見られることが分かる。しかしながら、防砂堤1,000m港形ケース、防砂堤2,000m港形ケースとも、構造格子モデルと比較して非構造格子モデルは防砂堤の背後のみならず、岬の先端まで堆積傾向を示す黒色の領域がより広く分布することなど、異なる格子条件での流速場の結果の差異に依存して、地形変化パターンの計算結果にも影響を与えることが示唆された。

## 5. おわりに

本研究では、非構造格子モデルを用いた土砂輸送計算の特徴を把握するために、有限体積法を用いた非構造格子計算の基礎的な計算手法の整理および、構造格子モデ

ルとの比較を通じた数値波動実験水槽と実海域における潮位計算の比較を行った。

基礎的な計算手法の整理では、有限体積法を用いた非構造格子計算の理論および離散化手法について整理した。非構造格子を用いた数値シミュレーションでは、座標に沿った構造的なナンバリングがされないため、特徴的なデータ構造を必要とすることについてもまとめた。また、波動の伝搬過程計算による構造格子モデルとの比較によって、離散化式の取り扱いの違いについても整理した。その結果、非構造格子を取り扱う際の直交性の重要性や移流項および水平粘性項の取り扱いの違いにより波形の違いが見られることを示した。実海域の計算では、非構造格子モデルSUNTANSを用いて、インドネシアのパティンバン港周辺をケーススタディとし、潮汐流場のみを基本とする地形変化計算を試みた。既存の構造格子モデルによる計算結果との比較を通じて、格子条件の違いによる流速場や地形変化パターンなどの計算結果の差異について評価した。その結果、非構造格子モデルと構造格子モデルでは、海岸線に沿う流れや流路の分岐点に違いが見られ、侵食域の範囲に影響を与えることが分かった。また、防砂堤を設置して潮流を遮ることにより変化する流速場は、流速の増大や、背後域での流速の減少の範囲や流向に差異が見られた。これに伴い、防砂堤等の地形境界周辺での地形変化量やその空間分布において差異が生じることがわかった。これらのことから、地形変化を予測評価する上では、海陸境界の近傍における流速や地形変化等のモデル間の相違点に注意することが重要であると考えられる。

ただし、本研究の実海域の計算では、主に格子形状の違いに基づく計算結果の違いを確認したものであり、対象とした海域での流れ場や地形変化等の再現性に関する検証については、現地データの取得を踏まえて、さらなる計算精度の検証を行うことが今後の課題である。

(2023年8月3日受付)

## 謝辞

本研究で用いた地形データは、インドネシア国立研究革新庁より提供されたものです。また、査読意見を頂いた勝谷一則特別研究主幹をはじめ公表審査委員の各位に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) Chen, C. et al.: An unstructured grid, finite-volume, three-dimensional, primitive equations ocean model: application to coastal ocean and estuaries. J.Atmos.&Oceanic Tec., 20,



- 159-186, 2003.
- 2) 小松雄二, 佐々木淳, 松丸 亮: 非構造格子モデルを用いたバンダアチェにおける2004年インド洋大津波の追算, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 66, No. 1, pp. 256-260, 2010.
  - 3) 木梨行宏, 山城 賢, 姫野慎太郎, 中野俊夫, 横田雅紀, 橋本典明: 高潮推算における非構造格子モデルの適用性に関する基礎的検討, 土木学会論文集B3 (海洋開発), Vol. 68, No. 2, pp. I\_858-I\_863, 2012.
  - 4) 増永英治, 山崎秀勝, 山口邦久: 内部潮汐を考慮した伊豆大島周辺海域における潮流予測システムの開発と運用, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 74, No. 2, pp. I\_643-I\_648, 2018.
  - 5) Fringer, O.B., Gerritsen, M. and Street, P.L.: An unstructured-grid, finite-volume, nonhydrostatic, parallel coastal ocean simulator, Ocean Modeling, vol.14, pp.139-173, 2006.
  - 6) 中谷祐介, 戸松祐希, 西田修三: 非構造格子モデルを用いた瀬戸内海-太平洋領域における外洋水の挙動解析, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 76, No. 2, pp. I\_997-I\_1002, 2020.
  - 7) Zhang, Y., Ye, F., Stanev, E.V., and Grashom, S.: Seam-less cross-scale modeling with SCHISM, Ocean Modeling, vol.102, pp.64-81, 2016.
  - 8) 山縣史朗, 折敷瀬翔耶, 山城 賢, 中川康之, 橋本典明, 松延嘉國, 井方弘正: 関門航路のサンドウエープに及ぼす潮位偏差の長期変動の影響に関する数値シミュレーション, 土木学会論文集B3 (海洋開発), Vol. 75, No. 2, pp. I\_665-I\_670, 2019.
  - 9) Deltares : D-Flow Flexible Mesh, Technical Reference Manual, Version: 1.1.0, 2021
  - 10) Chen, C. et al.: An Unstructured Grid, Finite-Volume Community Ocean Model FVCOM User Manual, 2013.
  - 11) 松田卓也: 数値流体力学における差分法, 有限体積法の応用(爆発的天体現象における流体力学的不安定性, 研究会報告). 素粒子論研究, 82(1), A42-A47, 1990.
  - 12) H. K. Versteeg, W. Malalasekera, 松下洋介, 齋藤泰洋, 青木秀之, 三浦隆利: 数値流体力学 [第2版], 森北出版, 2011.
  - 13) Mathur, S.R. and Murthy, J.Y.: A Pressure-Based Method for Unstructured Meshes, Numer. Heat Transfer Part B, Vol.31, pp.195-215, 1997.
  - 14) Perot, B.: Conservation properties of unstructured staggered mesh schemes. Journal of Computational Physics, 159(1), 58-89, 2000.
  - 15) (独法) 国際協力機構: ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT REPORT OF NEW PORT DEVELOPMENT PROJECT IN EASTERN METROPORITAN AREA (PATIMBAN) , p.241, 2017.
  - 16) 小裕大地, 田村 仁, Aloysius Bagyo Widagdo, Dinar Catur Istiyanto, 中川康之: 海陸風に伴う波浪変動がジャワ島北西部沿岸域の底質移動に及ぼす影響, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 77, No. 2, pp. I\_583-I\_588, 2021.
  - 17) Tsuruya, H., Murakami, K., and Irie, I.: Mathematical modeling of mud transport in ports with a multi-layered model -Application to Kumamoto Port-, Report of Port and Harbour Research Institute, vol.29, No.1. pp.3-55, 1990.

#### 記号表

$A$	: 検査体積の表面積 ( $\text{m}^2$ )
$CV$	: 検査体積の体積 ( $\text{m}^3$ )
$D$	: 水深 ( $\text{m}$ )
$d$	: cell centerとfaceとの距離 ( $\text{m}$ )
$e$	: 接線単位ベクトル
$g$	: 重力加速度 ( $\text{m/s}^2$ )
$i$	: 構造格子の場合はx方向の格子番号, 非構造格子の場合は計算対象となる格子番号
$j$	: 構造格子の場合はy方向の格子番号, 非構造格子の場合は計算対象とfaceを挟んで対となる格子番号
$M$	: x方向の線流量 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
$N$	: y方向の線流量 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
$n$	: 粗度係数 ( $\text{s}/\text{m}^{1/3}$ )
$\boldsymbol{n}$	: 単位法線ベクトル
$R$	: 右辺
$S_\phi$	: 任意の保存量 $\phi$ の生成量
$T$	: 周期 ( $\text{s}$ )
$t$	: 時間 ( $\text{s}$ )
$\boldsymbol{u}$	: 流速ベクトル ( $\text{m}$ )
$V$	: 体積 ( $\text{m}^3$ )
$w_f$	: 距離の重み関数
$x, y$	: 座標系
$\Gamma$	: 拡散係数
$\alpha$	: 振幅 ( $\text{m}$ )
$\Delta A$	: 検査体積の表面要素 ( $\text{m}^2$ )
$\Delta x$	: x座標の差 ( $\text{m}^2$ )

$\Delta y$  : y座標の差 (m<sup>2</sup>)  
 $\Delta \eta$  : node間の距離 (m<sup>2</sup>)  
 $\Delta \xi$  : cell center間の距離 (m<sup>2</sup>)  
 $\eta$  : face方向に平行な座標系  
 $\eta_i$  : 水位変動量 (m)  
 $\nu$  : 動粘性係数 (m<sup>2</sup>/s)  
 $\xi$  : cell center間に平行な方向の座標系  
 $\rho$  : 流体密度 (m<sup>3</sup>)  
 $\phi$  : 任意の保存量

港湾空港技術研究所資料 No.1410

2023.9

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 港湾空港技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号  
TEL. 046(844)5040 URL. <https://www.pari.go.jp/>

Copyright © (2023) by MPAT

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of MPAT

この資料は、海上・港湾・航空技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は海上・港湾・航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。