

## 津波シミュレータ T-STOC を利用したサービス

富塚 孝之\* 鈴木 雅也\*\* 河野 裕暢\*\*\* 松原 聖\*\*\*\* 島田 昭男\*\*

## TSUNAMI simulator T-STOC

Takayuki Tomizuka\*, Masaya Suzuki\*\*, Hironobu Kouno\*\*\*, Kiyoshi Matsubara\*\*\*\* and Akio Shimada\*\*

津波シミュレータ T-STOC は、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様（以下、港湾空港技術研究所様）で開発されたソフトウェアである。このソフトウェアは、津波による流体運動およびそれらによって生じる漂流物の挙動を計算するための数値計算モデルであり、Web サイト[1]で公開されている。これを受けて、当社では津波シミュレータ T-STOC を利用した受託解析その他のサービスを開始した。具体的には、まずクライアントの要望により、解析対象地域および着目する事象を解析するためのデータをもとにして、T-STOC のためのデータ作成を行う。次いでこのデータを当社計算サーバー上で T-STOC により解析する。最後に、得られた結果の可視化処理を行う。また受託解析のみならず、クライアントのニーズに合わせて T-STOC の改良を実施する。さらに、利用支援サービスとして、継続的に利用されるクライアントに対して T-STOC の利用方法やデータ作成の支援を行う。

Key word: 流体解析、有限差分法、ネスティング、海底地形、遡上

## 1. はじめに

津波シミュレータ T-STOC は港湾空港技術研究所様の著作物である。本稿は、[1]に記載された使用許諾契約に基づいて、アドバンスソフト株式会社がクライアントにご提供する独自のサービスについて説明するものである。

港湾空港技術研究所様では、津波による流体運動およびそれらによって生じる漂流物の挙動を計算するための数値計算モデル「津波シミュレータ(T-STOC)」[2]を Web にて公開された。また、公開後に港湾空港技術研究所様では説明会を実施された。その公開を受けて、このたび当社では、

\*アドバンスソフト株式会社 第3事業部

3<sup>rd</sup> Computational Science and Engineering Group, AdvanceSoft Corporation

\*\*アドバンスソフト株式会社 第1事業部

2<sup>nd</sup> Computational Science and Engineering Group, AdvanceSoft Corporation

\*\*\*アドバンスソフト株式会社 営業部

Marketing Group, AdvanceSoft Corporation

\*\*\*\*アドバンスソフト株式会社 代表取締役社長

President, AdvanceSoft Corporation

これまで培った流体解析の技術および業務実績を基にして、津波シミュレータ T-STOC を利用した受託解析や関連するサービスを開始した[3]。

本稿では、津波シミュレータ T-STOC の概要を説明するとともに、当社から提供するサービスの概要についてまとめた。なお、津波シミュレータ T-STOC のモデル概要は[2]を基に当社の理解のもとでまとめた内容となっている。

## 2. 津波シミュレータ T-STOC とは

津波シミュレータ T-STOC は、太平洋など広い海域を伝播しかつ局所的に地形や構造物の影響を受けて変化する津波を高い精度で計算することができる。また、津波による漂流物の挙動を計算することにより、船舶・コンテナ等の漂流の危険性や漂流したときの挙動を推定することができる。T-STOC は STOC-ML、STOC-IC、STOC-DM の 3 つのモジュールから構成される。STOC-ML とは沖合の津波にはよい近似である静水圧近似を使用しつつ、流動場の鉛直方向の変化を考慮した多層に分割可能な準 3 次元モデルである。

STOC-IC とは津波による流体運動を計算する

ための、流体運動の最も基本となる方程式に基づいた3次元モデルである。臨海部に存在する構造物等による津波の変化を計算する必要があるときにSTOC-ICを適用する。

STOC-DMとは津波によって漂流する可能性のある船舶・コンテナなどの挙動を計算するモデルである。STOC-MLおよびSTOC-ICによって計算される津波の水位や流速により漂流する物体を解析する。

これらの連成により、沖合で発生した津波が大洋を伝播し、港湾などの臨海部を襲う挙動および津波によって生じる漂流物の挙動を高い精度で計算することが可能である。

文献[2]に示された実際の津波のシミュレーションにおいては、着目する領域をICで解析し、その外側にMLを複数段にネスティングしながら解析領域を設定する。最終的に着目する領域は、一番小さな領域である。このケースでは5m格子に設定してあるのに対して、MLについては、25m格子から、50m、100m、600m格子とし、最終的には波源を含むような数百km程度の大きさの解析領域となる。

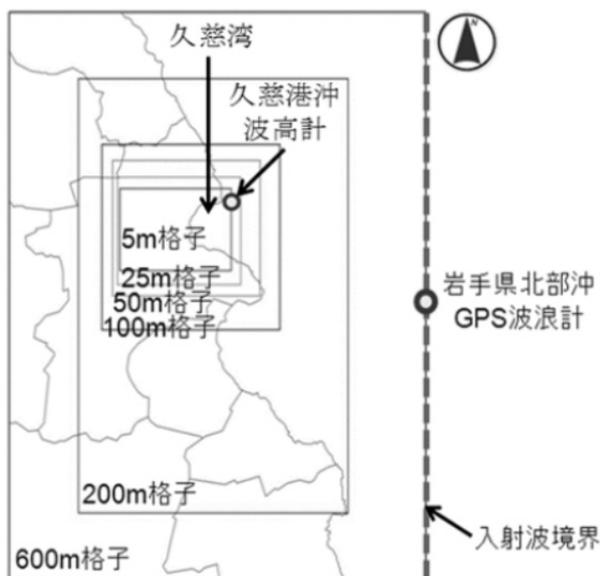


図1 メッシュの作成例 (出典[2])

### 3. モデル

#### 3.1. 概要

本節では、津波シミュレータ T-STOC を構成する3つのソフトウェアのうち、STOC-IC と STOC-ML

の2つのモデルを説明する。ここでは、2つのプログラムで利用する基礎方程式と物理モデルについて説明する。

#### 3.2. 基礎方程式と物理モデル

津波シミュレータ T-STOC の基礎方程式は、近海の解析では平面座標系であり、地球規模の解析では球面座標系である。いずれもナビエストークスの方程式を基本とする。ここでは、平面座標系における基礎式を示す。STOC-ML (以下、ML と略す) と STOC-IC (以下、IC と略す) とで共通する部分は多いが、異なる部分についてはその内容をそれぞれの箇所で記述するものとする。

T-STOC で解くべき変数は

- ・  $u, v, w$  : 流速の各成分 [m/s]
- ・  $\eta$  : 海面高さ [m]

の4つの変数である。連続の式および水平方向 (x 方向と y 方向) の運動方程式は STOC-ML と STOC-IC で共通である。

##### (1) 連続の式

まず、連続の式は、

$$\frac{\partial}{\partial x}(\gamma_x u) + \frac{\partial}{\partial y}(\gamma_y v) + \frac{\partial}{\partial z}(\gamma_z w) = 0 \quad (1)$$

である。ここで、

$$\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z : \text{各方向の面透過率 (開口率)} [-] \quad (2)$$

である。

##### (2) 運動方程式

また、x 方向の運動方程式は

$$\begin{aligned} \gamma_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\gamma_x uu) + \frac{\partial}{\partial y}(\gamma_y uv) + \frac{\partial}{\partial z}(\gamma_z uw) - \gamma_v f_0 v \\ = -\gamma_v \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \gamma_x v_H 2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \gamma_y v_H \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left( \gamma_z v_H \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right) \end{aligned} \quad (3)$$

である。ここで、

$$\rho : \text{海水の密度} [kg/m^3] \quad (4)$$

$$\gamma_v : \text{有効体積率 (体積占有率)} [-] \quad (5)$$

$$\nu_H : \text{水平方向の動粘性係数} [m^2/s] \quad (6)$$

$$f_0 : \text{コリオリパラメータ} [1/s] \quad (7)$$

とした。ここで

$$f_0 = 2\Omega \sin \theta \quad (8)$$

$$\Omega : \text{地球の自転角速度} [1/s] \quad (9)$$

$$\theta : \text{北向きを正とした場合の緯度} [-] \quad (10)$$

である。また、y 方向の運動方程式は、

$$\begin{aligned} & \gamma_v \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\gamma_x v u) + \frac{\partial}{\partial y} (\gamma_y v v) + \frac{\partial}{\partial z} (\gamma_z v w) + \gamma_v f_0 u \\ &= -\gamma_v \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \gamma_x \nu_H \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left( \gamma_y \nu_H 2 \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \gamma_z \nu_H \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right) \end{aligned} \quad (11)$$

である。次に z 方向の運動方程式では、ML と IC とで異なる。まず、最初に Z 方向には非静水圧近似を利用している IC の運動方程式は、

$$\begin{aligned} & \gamma_v \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\gamma_x w u) + \frac{\partial}{\partial y} (\gamma_y w v) + \frac{\partial}{\partial z} (\gamma_z w w) \\ &= -\gamma_v \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + g_z + \frac{\partial}{\partial x} \left( \gamma_x \nu_H \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left( \gamma_y \nu_H \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \gamma_z \nu_H 2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

となる。一方で z 方向に静水圧近似を利用している STOC-ML では

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + g_z \quad (13)$$

を利用している。ここで、

$$g_z : z \text{ 方向の重力加速度} [m/s^2] \quad (14)$$

である。すなわち、ML のプログラム内では

$$p(z) = p_{atm} - \rho g_z (\eta - z) \quad (15)$$

を利用して、水面からの距離を用いて水中の圧力を求めている。一方で、IC のプログラム内では連

続の式と運動方程式から連立一次方程式を解き圧力を計算する。乱流モデルに関しては、SGS モデルが利用可能である。

### (3) 自由表面の式

T-STOC では、1 つの座標につき 1 つの海面高さを持つ。言い換えれば、自由表面の高さは 1 つだけ定義される。すなわち、波が覆い被さることはないという前提をするが、これは十分に現実的な前提である。自由表面の高さの基礎式は、

$$\gamma_z \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-H}^{\eta} \gamma_x u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-H}^{\eta} \gamma_y v dz = 0 \quad (16)$$

となる。

### (4) 物理モデル

砕波モデルは、砕波によるエネルギー損失を考慮するモデルであり、Kennedy モデルが組み込まれている。越流モデルは、防波堤や護岸を越流するときの流量を、基礎方程式を解いて求めるのではなく、実験相関式から求めるモデルである。防波堤を波が越流する場合の本間公式を用いたモデルが利用可能である。

## 4. データ作成方法

T-STOC のうち、STOC-ML および STOC-IC においては、まず、地形・形状データを指定する必要がある。ここでは、有効体積率、セル界面における面透過率、水深、水位、粗度等を記述する。地形データを作成するための収集方法の 1 つに、国土地理院の航空レーザー測量データのダウンロードサービスを利用する方法がある[4]。基盤地図情報の標高モデルの種類と概要は下記のようになっており、解析対象のメッシュサイズにあわせたものを選択する。海底地形データに関する情報は海図から得る方法がある（例：日本水路協会[5]）。また、STOC-DM では、漂流物の初期配置等の初期条件を定義する。

表 1 基盤地図情報数値標高モデルの種類と概要

種類	作成方法		種類	範囲	精度	
					水平	高さ
5m メッシュ	航空レーザー測量	基本測量	3次メッシュ	都市域等	1m	0.3m
		公共測量		河川流域等	1m	0.3m
	写真測量	基本測量		都市域周辺等	1m	0.3m
10m メッシュ	火山基本図の等高線	基本測量	2次メッシュ	26火山のみ	基図	2.5m
	地形図の等高線			全国	基図	5m

### 5. 今後の事業展開

当社では、津波シミュレータ T-STOC を利用した関連サービスとして、以下に示すサービスを行っている。

受託解析サービスについては、データ作成、解析実施、結果処理を行う。ここでは、クライアントの解析対象地域のデータを入手し T-STOC のためのデータ作成をする。そのデータを当社計算サーバーで処理する。得られた結果の可視化処理を行う。

ご要望によるプログラム改良については、必要によって、T-STOC を改良し、クライアントの要望される解析を実施できるようにする。その際、港湾空港技術研究所様へ、当社にて必要な手続きを行う。

利用支援サービスについては、継続的にクライアントが利用される T-STOC に対して、利用方法やデータ作成の支援を行う。利用支援については、メールベースでの Q&A サービスをご提供する。

当社で計画しているサービスの流れは下記の通りである。

T-STOC はすでに実用の問題でも広く利用されてきた。それに加え、今後、当社ではクライアント等に広く T-STOC を宣伝し、本ソフトウェアをより広い範囲で利用いただくことができるように進めていく計画である。

### 参考文献

- [1] <http://www.pari.go.jp/unit/trc/events/t-stoc.html>
- [2] 富田孝史・本多和彦・千田優 "高潮津波シミュレータ (STOC) による津波被害解析手法", 港湾空港技術研究所報告 第 55 巻第 2 号
- [3] [http://www.advancesoft.jp/topics/20160908\\_t-stoc.html](http://www.advancesoft.jp/topics/20160908_t-stoc.html)
- [4] [http://www.gsi.go.jp/kankyochiri/Laser\\_index.html](http://www.gsi.go.jp/kankyochiri/Laser_index.html)
- [5] <http://www.jha.or.jp/jp/jha/purchase/index.html>

※ 技術情報誌アドバンスシミュレーションは、アドバンスソフト株式会社 ホームページのシミュレーション図書館から、PDF ファイルがダウンロードできます。(ダウンロードしていただくには、アドバンス/シミュレーションフォーラム会員登録が必要です。)

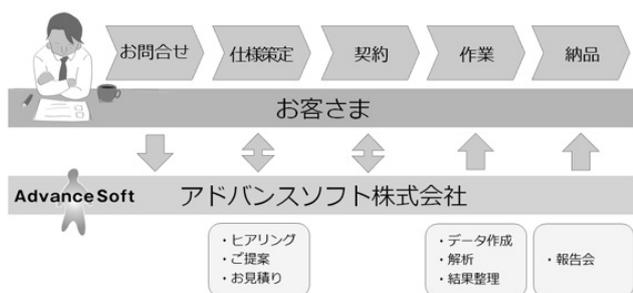


図 2 受託解析サービスの流れ