

調査レポート

初心者のための津波解析ソフトウェア T-STOC の使用方法

先進技術システムチーム

荒木 和博, 全 種 赫

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所から公開されている津波解析ソフトウェア T-STOC の概要と、津波計算を対象とした使用方法を数値解析ソフトウェアの利用経験のあるユーザー向けに解説する。また、高潮解析への適用方法についても触れる。

1 はじめに

津波解析では非線形長波理論に基づく計算手法が一般的であり、国内では後藤モデル¹⁾が広く普及している。現在、海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所が公開している T-STOC^{2,3)}は後藤モデルを三次元に拡張し、更に非静力モデルにも適用可能としたモデルである。

本稿では、T-STOC の導入方法と基本的な使用方法（平面 2 次元の津波解析が対象）について解説する。ただし、T-STOC はソースプログラムの形式で配布されており、入出力用のツールがあるわけではない。このため、数値解析ソフトウェアのコンパイル・実行・ポスト処理の経験のあるユーザーを対象とする。

2 入手方法

T-STOC は、海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所の Web サイト⁴⁾からダウンロードすることができる。

ソースプログラムの中には、T-STOC の 3 つのモジュール ML, IC（フォルダ名は NS）, DM が含まれている。ML は静力学モデル、IC は非静力学モデル、DM は漂流物モデルである。ML と IC の違いは次のとおりである。

- ・ML……圧力を静水圧近似により決定する。流速の鉛直方向成分は連続の式から求められる。
- ・IC……圧力は連続の式と運動量保存式から導出されるポアソン方程式を解いて求められる。流速の鉛直方向成分は運動量保存式を解いて求められる。行列計算を行うため、ML より

も大きな計算時間を要する。PC で計算する場合は堤防や建物周辺等に計算範囲を限定しなければ、現実的な計算時間では計算できない。浸水深の評価を目的とするのであれば、通常は ML で十分である。

本稿では、3 つのモジュールのうち、ML を取り上げ、平面 2 次元の津波解析に適用する方法を説明する。ML の機能の一覧を表 1 に示す。

3 インストール方法

T-STOC はソースプログラムの形で配布されているので、使用するにはコンパイルする必要がある。その際、以下の環境が必要となる。

- ・FORTRAN コンパイラ（Intel Fortran 推奨, gfortran も可）。なお、2023 年現在、Intel Fortran コンパイラは intel oneAPI の名称で無償公開されている。
- ・MPI ライブラリ（Windows の場合は Microsoft MPI, Linux の場合は MPICH4 を推奨）。

ML をコンパイルするときは、Include フォルダの下にあるヘッダファイル (*.h) と COM 及び ML フォルダの下にある Fortran ソースファイル (*.f と *.f90) を用いる。なお、Linux 環境の場合は ML フォルダの中に Makefile があるので、それを修正して make コマンドによりコンパイルするとよい。Windows の場合は、Microsoft Visual Studio 等を用いるとよい。

※ Windows 環境でのコンパイル時の注意点

- ・Linker の追加入力ライブラリとして、「msmpi.lib」「msmpifec.lib」を追加する。また、無視するライブラリとして「libcmt」を追加する（Microsoft MPI の場合）。

表 1 T-STOC-ML の機能

	項目	特徴
物理モデル	支配方程式	<ul style="list-style-type: none"> ・連続の式 ・水平方向の運動量保存式 ・自由表面の式 ・静水圧条件の式
	座標系	<ul style="list-style-type: none"> ・デカルト座標系 ・経緯度を用いた球面座標系
	物理モデル	<ul style="list-style-type: none"> ・地震による水位変動モデル <ol style="list-style-type: none"> 1) 断層パラメータから変動量を計算 2) 外部ファイルから変動量を読み込み ・透過性構造物モデル ・越流モデル (本間公式, 相田公式, 段落ち公式)
境界条件		<ul style="list-style-type: none"> ・遡上先端境界 ・側面境界 <ol style="list-style-type: none"> 1) 透過境界モデル <ul style="list-style-type: none"> ・特性曲線法 ・今村ら(2001)⁵⁾のモデル 2) 水位・流速固定境界 3) 自由流入出境界 4) 壁境界 (スリップ, ノースリップ) ・底面境界 <ol style="list-style-type: none"> 1) マニングの粗度による摩擦条件 2) 壁境界 (スリップ, ノースリップ)
数値計算法	離散化方法	<ul style="list-style-type: none"> ・スタッガード・メッシュを用いた差分法 ・ポーラスモデルを用いた形状近似
	時間積分	Leap-frog 法
	移流項	1次風上差分と2次中心差分のハイブリッド差分

・Linker のオプションでスタックサイズを大きくする (10MB 程度)。実行時に「stack overflow」のエラーメッセージがでる場合は、スタックサイズの不足が原因である。

4 まずは動かしてみる

コンパイルが完了したら、配布時の「データ ¥case1」フォルダにサンプルの入力データが置かれているので、それを用いて動作確認を行う。入力データは data.in, a01, a01.str, a02, a02.str の5つである。a01 と a02 ファイルがアスキー形式の解析条件データで、拡張子 str のファイルがバイナリ形式の地形データである。このデータは、例えば、

```
mpicxec -n 2 ML.exe > log.txt 2>&1
```

のようにして実行することができる。

※ Linux 環境での実行時の注意点

- ・「stack overflow」のエラーが出る場合は、.bashrc 等の環境設定ファイルに「ulimit -s unlimited」の設定を追加してログインしなおす。

5 平面 2 次元津波計算の手順

5.1 概要

T-STOC による津波解析の処理の流れは以下のようになる。

- (1) 震源断層モデルの用意
- (2) 地形データの整備
- (3) 入力データの作成
- (4) 津波解析の実施
- (5) 解析結果の整理 (最大津波高や浸水深の分布等

(1)の震源断層モデル (震源断層の位置や幾何形状等) については、文部科学省の地震調査研究推進本部 (以下、地震本部と記す) の発表資料や文献 (例えば、日本の地震断層パラメータ・ハンドブック⁶⁾) 等で公開されているものがあるので、それらを参照するとよい。その際、断層のすべり量の設定については、地震本部が公開している津波レシピ等⁷⁾を参考にできる。

(2)の地形データについては、太平洋側 (福島県～九州・沖縄地方) であれば、内閣府中央防災会議の「南海トラフの巨大地震検討会」により作成された地形データが利用可能であり、G 空間情報センター (<https://front.geospatial.jp>) で公開されている。また、本州東側 (新潟・神奈川より東側) ～北海道にかけては、内閣府中央防災会議の「日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会」で用いられた地形データが同じく G 空間情報センターで公開されている。ただし、このデータはやや古く、(旧) 日本測地系で作成されたデータであることに留意する必要がある。

(3)以降については、以下で詳しく説明する。

5.2 入力データの作成

津波解析で最低限必要な入力は、以下のとおりである。

- ・ネスティング領域の指定 (data.in ファイル, アスキー形式)
- ・解析条件データ (アスキー形式)
- ・波源データ (fault.txt, アスキー形式)
- ・地形データ (str ファイル, バイナリ形式)

(a) ネスティング領域の指定 (data.in ファイル)

data.in はネスティング領域の接続関係を定義したファイルである。ネスティングは、計算コストの削減を目的とした計算手法であり、広域を解像度の粗い計算格子で表し、対象地域に近づくほど解像度の細かい計算格子で表す。図 1 に示すのは 3 段階のネスティング計算を行う場合の例である。data.in では領域の入れ子関係を定義し、図 2 のようなデータを作

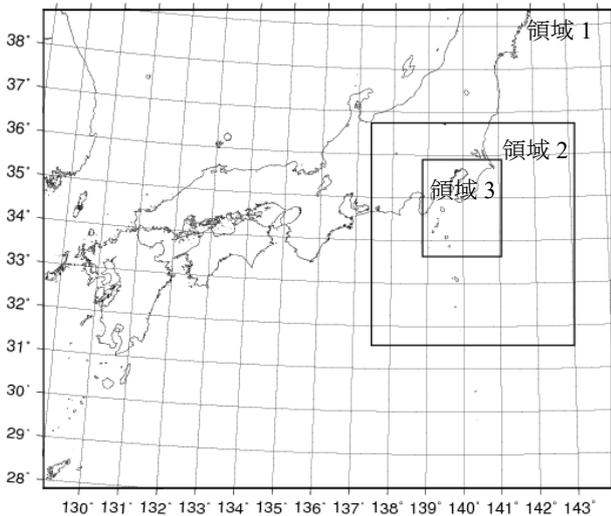


図 1 平面 2 次元津波解析の体系の例

1	99	2	99	99	99	99	0	a01
2	1	3	99	99	99	99	0	a02
3	2	99	99	99	99	99	0	a03

図 2 data.in ファイルの例

%ブロック名
#“#”文字よりも右側はコメントとして無視される
変数 1 = 値 1
変数 2 = 値 2
配列変数 1 = (値 1 値 2
値 3 値 4 …) #空白もしくは改行で区切る
%END

図 3 解析条件データのブロックの書式

成する。各データ列の意味は以下のとおりである。列間は空白文字で区切る。

- 1 列目：領域番号
- 2 列目：親領域番号 (親領域がない場合は 99)
- 3 列目：子領域番号 (子領域がない場合は 99)
- 4~7 列目：99 としておく
- 8 列目：0 としておく (IC を使う場合は 1 になる)
- 9 列目：各領域の解析条件ファイル名を記載

ここで、「親領域」は自分の領域の一つ外側の領域を意味し、「子領域」は自分の領域の一つ内側の領域を意味する。

(b) 解析条件データ

解析条件データの記載方法については、配布の「STOC 入出力データ一覧」の 1.2.2.3 に詳細な説明がある。初めて作成する場合には「STOC 入出力データ一覧」の Figure 1-5 の内容をテンプレートとして用いるとよい。解析条件データは図 3 のような形式のブロックの集まりとなっている。ブロック名には、GRID (計算格子)、BOUNDARY (境界条件)、OUTPUT (出力指定) 等がある。

図 2 の a01~a03 は、ほぼ同じ内容のファイルとなるが、以下については領域毎に変更する必要がある。

・GRID ブロック (計算格子)

格子点の座標値 X, Y, Z は領域毎に異なる値を指定する。平面 2 次元計算の場合、Z 座標値は、例えば最大水深が 9500m の場合

$$Z = (-10000.0 \ 50.0)$$

のように指定する (Z 座標の最小値は最大水深よりも絶対値の大きな負の値を設定する。最大値は通常 50.0m としておけばよい)。

・PROPERTY ブロック (物性値)

VISCOSITY-H の値は格子サイズに応じて設定する (「STOC 入出力データ一覧」の Figure 1-9 参照)。

・BOUNDARY ブロック (境界条件)

OPEN-SOMMER (透過境界の条件) は最も外側の領域のみ設定し、それ以外の領域では OVERLAP (親領域との格子サイズの比) を設定する。なお、FREE-I, FREE-J の設定は不要である。

BOUNDARY ブロックでは、追加で以下の 4 変数を設定する。

- ① COORDINATE
- ② RECTANGULAR-ZONE または UTM-CENTER
- ③ FAULT-SYSTEM
- ④ GRID-SYSTEM

これらの設定は、断層の位置 (経緯度で定義) を

計算格子の座標系に変換するために用いられる。また、「STOC 入出力データ一覧」の Figure 1-5 にある SEA-BOTTOM の値は ON から CALC に変えておく。

・ OUTPUT ブロック (出力指定) の各種指定

時系列出力の点の位置は、HISTORY-CELL=(IJK) の形式に必要な点の数だけ指定する。ここで位置は座標値ではなく、計算セルインデックスで指定することに注意する必要がある。計算セルインデックスは 2 から始まる整数であり、平面 2 次元解析の場合、K は常に 2 となる。

時刻毎の物理量の分布は LIST-* で指定する。出力できる変数としては水位、流速の 3 方向成分、圧力等がある。アスキー形式で出力する場合は、LIST-SECT-K=2 を指定する (平面 2 次元解析の場合)。バイナリ形式の場合は、配列データが全て出力される。水位分布図等を作成する場合はバイナリ形式の方が後処理を行いやすい (ただし、FORTRAN の入出力を記述する必要あり)。

(c) 波源データ (fault.txt ファイル)

波源データには、3 通りの入力方法があるが、ここでは最も簡単な断層パラメータを入力する方法を説明する。前述のように SEA-BOTTOM=CALC を指定した場合、断層のすべりによる地殻変動の計算が T-STOC の内部で行われる。このとき、入力データとして断層パラメータファイル fault.txt が読み込まれる。

fault.txt ファイルはアスキー形式ファイルで、以下のデータを空白区切りで 1 行に記載したものである (長さの単位が m であることに注意すること)。

- (1) 断層の長さ [m]
- (2) 断層の幅 [m]
- (3) 断層の深さ [m]
- (4) 走向 [°]
- (5) 傾斜角 [°]
- (6) すべり角 [°]
- (7) すべり量 [m]
- (8) 緯度 [°]
- (9) 経度 [°]
- (10) 断層の破壊時間 [s]

断層を複数設定する場合は、1 行に 1 断層ずつ、断層の枚数分だけデータを設定する。

(d) 地形データ (str ファイル)

T-STOC を用いる上で、最大のハードルとなるのが str ファイルの作成である。str ファイルはバイナリ形式 (厳密には、FORTRAN の順次アクセスの

UNFORMATTED 形式) であるため、データを作成するには FORTRAN プログラムを用意する必要がある。

配布の「STOC 入出力データ一覧」の 1.2.3 項にデータ形式の説明があり、Figure 1-13 にデータの読み込み例があるので、この例の READ を WRITE に変えた FORTRAN プログラムを実行することで str ファイルを作成することができる。

ポーラス値 (GV, GX, GY, GZ) は一般的な平面 2 次元の津波計算では出てこない変数であるが、T-STOC では 3 次元的な地形に対しても汎用性をもたせるために、これらのポーラス値を用意している。平面 2 次元の津波解析におけるポーラス値の設定方法を以下に説明する。

ポーラス値は、計算セルにおいて地形を除く部分の割合として定義される。有効体積率 GV は図 4 の中央の計算セルにおいて(1)式で定義する。また、その右側の面の面透過率 GX は(2)式で定義する。

$$GV = (Z_{max} - HDEP) / (Z_{max} - Z_{min}) \quad (1)$$

$$GX = (Z_{max} - HX) / (Z_{max} - Z_{min}) \quad (2)$$

なお、HX の決め方によって、直立護岸のように段差のある地形と、斜面を区別して表現することができる。また、HX の位置に線境界として定義される堤防データがある場合には、(2)式の HX の値を堤防の天端高とする。GY も方向が異なるだけで同様である。GZ の値は平面 2 次元解析においては全て 1.0 に設定する。

水位 ZZ の値は通常は 0.0 等の一定値を設定する。注意点として、水位を一定値で設定した場合には内陸の標高 0m 地帯にも同じ水位が設定されるため、最初から浸水した状態になることがある。これを避けるには、0m 地帯の水位 ZZ の値を地盤高 HDEP と同じか HDEP よりも小さな値に設定する。

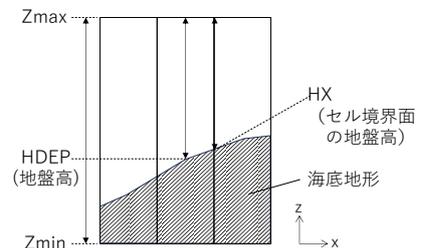


図 4 ポーラス値の定義の説明

5.3 解析結果の整理

T-STOC の計算が終わると、領域毎に以下のデータが出力される (OUTPUT ブロックで出力が指定された場合)。

- ・時系列出力ファイル (拡張子:.hist, アスキー形式)
- ・集計値分布ファイル (拡張子:.end, アスキー形式)
- ・空間分布ファイル (拡張子:.list, バイナリ形式)

共通の注意点として、STOC ではネスティング計算の場合、自分の子領域と重なる部分は構造物扱いになっており計算が行われない(OVERLAP で指定した幅だけは計算される)。このため、例えば水位分布を可視化すると子領域と重なる範囲の水位は一定となっている (大きさは Z 座標の最大値)。このため、外側領域の分布図を作成する場合は、内側領域も同時に描画する必要がある。

以下、各ファイルの処理について説明する。

(a) 時系列出力ファイル (拡張子:.hist, アスキー形式)

時刻と出力値が空白区切りで整列して出力されているアスキー形式のファイルであるため、Microsoft Excel 等の表計算ソフトに取り込んでグラフを作成することが可能である。ファイルの先頭のコメント行 (“#”文字で開始される行) には、各列に出力されている変数と位置 (I,J,K) の対応リストが出力される。

(b) 集計値分布ファイル (拡張子:.end, アスキー形式)

全解析時間における最大水位、最大浸水深、津波の第一波到達時刻等が出力される。アスキー形式ファイルであるが、FORTRAN の(10E10.3)書式で出力されており、10 データ毎に改行が入るため、可視化を行う場合はデータ形式の変換が必要となる。

(c) 空間分布ファイル (拡張子:.lst, バイナリ形式)

指定した時刻における空間分布が出力される。入力で LIST-TYPE=ASCII とすると、FT16_で始まる名前の計算経過情報ファイルにアスキー形式で書き出されるが、計算の途中経過と出力が混ざるため、後処理がしづらい。このため、大量の可視化を行う場合には、LIST-TYPE=BINARY を指定することを推奨する。

バイナリ形式を選択した場合、FORTRAN を用いたデータ変換が必要となるが、「STOC 入出力データ一覧」の Figure 1-23 をテンプレートとして用い、WRITE を READ に書き換えることで、lst ファイルを読み込むことができるので、使用する可視化ツールに合わせて出力しなす。なお、注意点として、流速成分 U, V, W はスタッガード配置となっており、計算セルの境界面の値が出力される。セル中心値を出力したい場合は、変換プログラムにおいて

$$UCENTER(I,J,K)=0.5*(U(I-1,J,K)+U(I,J,K))$$

$$VCENTER(I,J,K)=0.5*(V(I,J-1,K)+V(I,J,K))$$

$$WCENTER(I,J,K)=0.5*(W(I,J,K-1)+W(I,J,K))$$

のように記述する (変数配置は「STOC 入出力データ

一覧」の Figure 1-23 に合わせた)。

6 高潮解析への応用

6.1 概要

高潮解析では、津波解析と同じく非線形長波理論に基づく計算手法が用いられる。このため、外力以外には津波解析と同じプログラムを使用することができ。津波の場合は、地震による水面変動量が外力となり、高潮の場合は、気圧勾配と海上風が外力となる。T-STOC でも、海面気圧と海上風を境界条件として設定できるようになっているため、高潮解析に応用しやすい。

具体的には、予め経験台風モデル等により海面気圧と海上風を計算しておき、その値をファイルに出力しておく。このデータを読み込んで、海面気圧の 2 次元配列 PATM と海上 10m 風速 2 次元配列 WX, WY に取り込むことで、高潮計算が可能となる。

注意点として、初期の静水面に急に台風の外力を与えると大きな波が発生し、減衰に時間がかかることがあるため、助走区間を設けて外力を徐々に大きくすることが望ましい。

実際に T-STOC で高潮計算を行った例として、2018 年台風 21 号の計算を取り上げる。海面気圧分布は Myers の式から設定し (例を図 5 に示す)、海上 10m 風速を傾度風と台風の移動速度から設定した (例を図 6 に示す)。比較のため、同じ計算を当社で開発した津波・高潮シミュレータ Q-WaveTMでも実施した。Q-Wave は BCM 手法を用いているため、計算時間は T-STOC の 1/2 程度である。T-STOC と Q-Wave による大阪の潮位偏差を、気象庁観測値 (Observation) と比較して図 7 に示す。いずれのもの観測値をよく再現した結果が得られることが確認できる。

7 おわりに

T-STOC の開発にあたって、当社の前身である富士総合研究所が主にソースプログラムの開発を担当した経緯から、本稿で T-STOC の導入方法を紹介した。T-STOC に関しては、現在入出力のツールが公開されていないため、本格的に利用するには、FORTRAN を用いたデータ変換のスキルが必要となる。本稿が T-STOC の利用者にとって最初の一步を踏み出す一助となれば幸いである。

引用文献

- 1) 後藤 智明: 津波による木材の流出に関する計算, 海岸工学論文集, 第30巻 (1983), pp. 594-597.
- 2) 柿沼太郎, 富田孝史, 秋山実: 海水流動の3次元性を考慮した高潮・津波の数値計算, 海岸工学論文集, 第50巻 (2003), pp. 286-290.
- 3) 富田孝史, 本多和彦: スリランカにおけるインド洋津波の数値計算による再現に向けて, 海岸工学論文集, 第53巻 (2006), pp. 251-255.
- 4) 港湾空港技術研究所 津波高潮研究グループ: 開発プログラム, URL: <https://www.pari.go.jp/unit/tsunamitakashio/software/>
- 5) 今村文彦, 吉田功, Andrew Moore: 沖縄県石垣島における1771年明和大津波と津波石移動の数値解析, 海岸工学論文集, 第48巻(2001), pp.346-350.
- 6) 佐藤良輔, 岡田義光, 鈴木保典, 阿部勝征, 島崎邦彦: 日本の地震断層パラメーター・ハンドブック, 鹿島出版会(1989).
- 7) 地震調査研究推進本部 地震調査委員会: 波源断層を特性化した津波の予想手法 (津波レシピ), URL: https://www.jishin.go.jp/main/tsunami/17jan_tsunami-recipe.pdf (2017).
- 8) 吉村英人, 坂本大樹, 荒木和博, 眞鍋尚: 津波高潮シミュレータ Q-Wave®を用いた2019年台風19号の高潮解析, みずほリサーチ&テクノロジーズ技報 Vol.1 No.1, URL: https://www.mizuho-rt.co.jp/publication/giho/mhrt_001.html (2020).

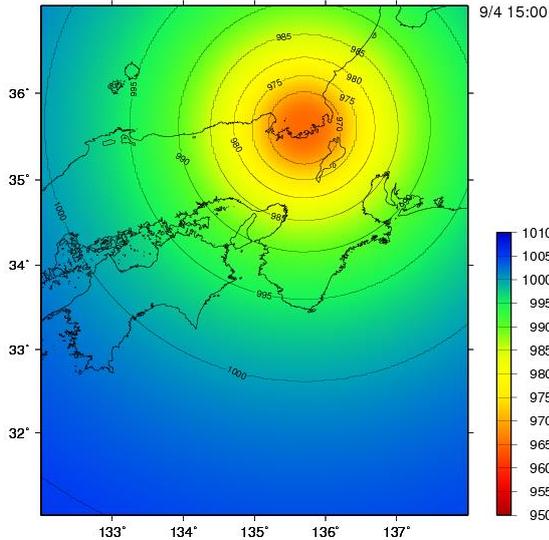


図5 海面気圧分布 (9月4日15時)

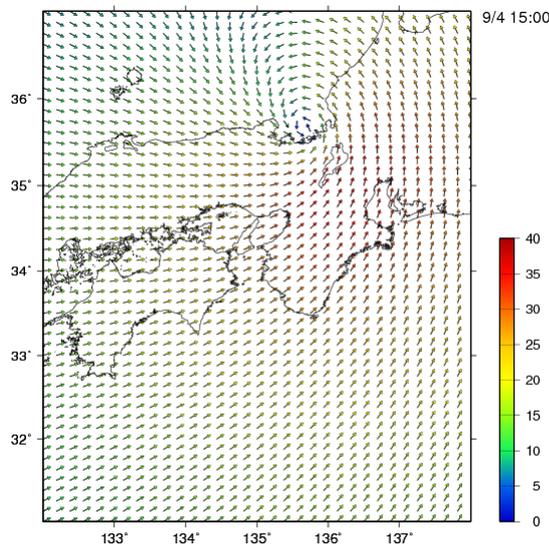


図6 海上10m風速 (9月4日15時)

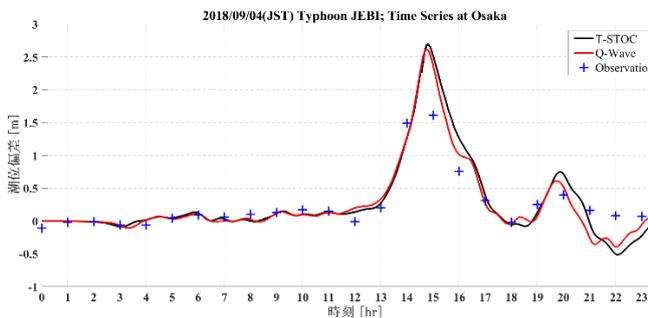


図7 大阪における潮位偏差の時間変化