

M×N 通信による大規模連成シミュレーション

中島 研吾^{1,5} 長嶋 利夫^{2,5} 江連 真一³ 市村 強^{4,5} 奥田 洋司^{1,5}

「観測・計算を融合した階層連結地震・津波災害予測システム」における大規模連成シミュレーションのために、SPMD 環境における M×N 通信に基づく、フレームワークのプロトタイプを開発した。FORTRAN のモジュール、構造体の特性に基づき、連成シミュレーションに関連した処理を FORTRAN 環境で実施することにより、簡明なインタフェースにより、M×N 通信の機能を利用可能である。PC クラスタ上で地震波伝播、石油タンクスロッシング連成シミュレーションに適用した結果を紹介する。

Large-Scale Coupling Simulations through M×N Parallel Data Redistribution

K. NAKAJIMA^{1,5} T. NAGASHIMA^{2,5} S. EZURE³ T. ICHIMURA^{4,5} H. OKUDA^{1,5}

A prototype of framework for large-scale parallel coupling simulations through M×N parallel data redistribution under SPMD environment has been developed for “Integrated Predictive Simulation System for Earthquake and Tsunami Disaster”. Capabilities of “module” and “structure” in FORTRAN provide simple interface for use of M×N parallel data redistribution. A prototype system for coupled finite-element simulations for seismic response of multiple tanks for oil-storage with fluid-structure interaction has been developed and preliminary results on PC cluster will be demonstrated.

1. はじめに

わが国における地震・津波災害の軽減に資するために、2005 年 10 月から、科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 (CREST/JST) の一環として、「観測・計算を融合した階層連結地震・津波災害予測システム」の開発が進められている [1]。本プロジェクトは、プレート運動による地殻応力の蓄積を経て大地震が発生し、地震波が構造物を揺らし、津波が海岸部を襲うまでの一連の過程を「地球シミュレータ」等で再現・予測する観測・計算融合の階層連結型高精度シミュレーション・システムを世界に先駆けて開発するものである (Fig.1)。

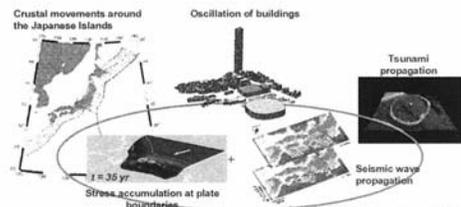


Fig.1 Goal of Integrated Predictive Simulation System for Earthquake and Tsunami Disaster

本システムを構成する各シミュレーションコードの多くは「地球シミュレータ」向けに並列化、最適化が実施されている。本プロジェクトでは、複数の大規模シミュレーションコードを連成させることによって、より現実的なシミュレーションを実現する。そのため、大規模連成計算のほか、データ同化 (観測、計算)、可視化、連立一次方程式求解等の機能を提供する階層連結プラットフォームを開発している (Fig.2)。本論文ではこのうち、大規模連成計算のためのフレームワークについて紹介する。

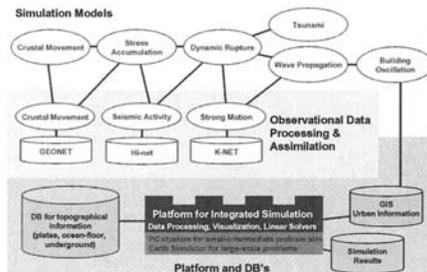


Fig.2 Outline of Integrated Predictive Simulation System for Earthquake and Tsunami Disaster

2. 連成シミュレーション

(1) 連成シミュレーションの現状

近年のシミュレーション技術 (物理モデル、計算機環境 (ハード/ソフトウェア)) の発展により、より現実的で精度の高い解を得るために、様々な分野で連成シミュレーションの試みがなされている。連成シミュレーションへのアプローチとしては、複数の現象を支配する方程式を連立して解くためのプログラムを新たに開発する場合と、個々の現象を解くための既存の

- 1) 東京大学 The University of Tokyo
- 2) 上智大学 Sophia University
- 3) エム・アール・アイリサーチアソシエイツ MRI Research Associates, Inc.
- 4) 東京工業大学 Tokyo Institute of Technology
- 5) 科学技術振興機構 CREST CREST, Japan Science and Technology Agency (JST)

プログラムを組み合わせることで反復的に解く場合の2つがあり、前者を「強連成 (strong coupling)」、後者を「弱連成 (weak coupling)」と呼んでいる。各現象の時間、空間スケール、非線形性の度合いによっては、強連成でなければ安定な解が得られない場合もある。強連成については、対象とするアプリケーションに依存する要素が多いことから、ここでは弱連成を中心として扱う。

弱連成を実現するためのライブラリとしては、MpCCI (Mesh-based Parallel Code Coupling Interface) [2] が広く知られている。MpCCIはMPIをベースに開発されており、FORTRANまたはCで記述された複数のプログラムの連成をMPIと同様のインタフェースで容易に実現できる。構造格子、非構造格子などのさまざまなデータ形式をサポートしており、近年は特に商用コード間の連成システムの開発に利用されている。

CCA (Common Component Architecture) [3] などのプロジェクトでも連成シミュレーションのためのライブラリが開発が実施されている。2006年2月にサンフランシスコで開催されたSIAM Conference on Parallel Processing for Scientific Computing (PP06) [4] では、当該分野に関連したセッションが開催され、合計40件近い発表があった。これらは、いずれもMPIに基づく並列アプリケーションの開発を、並列計算機あるいはグリッド環境において実現するためのフレームワークであり、連成シミュレーションはそれらの提供する機能の一つである。様々な言語に対するインタフェースを備えており、関数・サブルーチンコールによって容易に並列アプリケーションが開発できる。反面、連成シミュレーションの機能を既存の並列アプリケーションに適用することは困難な場合がある。またこれらのフレームワークの多くは、いくつかの特定のアプリケーションを念頭に置いて開発されているという点も考慮する必要がある。

地球物理学の分野では、特に大気・海洋シミュレーションにおいて、連成解析のための環境整備が進められており、EUのPRISMプロジェクト (Program for Integrated Earth System Modeling) [5] で開発されている、OASISが有名である。大気・海洋シミュレーションでは、差分法、スペクトル法が主として使用されており、データ構造も似通っているため、データ構造そのものの共通化も進めやすく、有限要素法などと比較すると、共通フレームワークは受け入れられやすいと考えられる。

(2) 本プロジェクトにおける方針

本プロジェクトで開発、使用されるアプリケーション群は以下のような特徴がある：

- 離散化手法は有限要素法、差分法、境界積分法など様々である。
- ほとんどのアプリケーションはMPIを使用して既に並列化されている。また、FORTRANで記述されているものが多い。
- 連成する個々のアプリケーションの計算規模が大きく異なる場合がある。
- 連成時のアプリケーション間の通信は主として領域境界で発生する (通信量は比較的少ない)。

このような状況を考慮して、個々のアプリケーションの特性を念頭においた連成シミュレーションのための独自のフレームワークを開発することにした。本フレームワーク開発の基本方針は以下の通りである：

- 多様なアプリケーションに対応するため、節点、要素、面等さまざまな境界におけるデータ交換をサポートする。
- FORTRAN90のモジュール、構造体機能を最大限に利用する。
- FORTRANからの呼び出しを基本とする。内挿計算等の処理はFORTRAN側で実施する。
- SPMD (Single Program Multiple Data) での稼働を想定し、M×N通信をサポートする。

M×N通信 (M×N parallel data redistribution) とは、M個とN個のプロセス数を有する (MとNは異なる数である必要はない) 複数の並列アプリケーション間のデータ転送に関連した分野であり、計算機リソースを効率的に利用する手法として注目されている。Fig.3は流体解析 (4プロセス) と構造解析 (9プロセス) のための並列アプリケーションを連成させた場合である。アプリケーション間での通信が各プロセスにおいて必要になる。

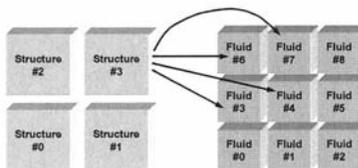


Fig.3 Example of M×N parallel data redistribution: coupled fluid-structure interaction with different number of processes

通常、連成させる複数のアプリケーションに必要な計算機資源、計算機時間はさまざまであり、M×N通信を実現することによって、計算機資源の効率的な活用が可能になるものと考えられる。

M×N通信の事例としては、前述CCAの一環として実施されているPAWS、SEINEなどがあるが、研究段階のものが多く、また対象とするデータ構造も差分格子など限られている。[6]では著者等により、並列有限要素法による非定常熱伝導解析とリアルタイム可視化に対して、M×N通信が適用されている。

[6]では、並列有限要素法の計算メッシュをParMETIS [7]を使用して再分配し、M側で非定常熱伝導計算を実施している間に、N側で前のステップの可視化処理をすることによって、いわゆる「待ち時間」無しに計算実行が可能となる。

各アプリケーション内での座標、メッシュなどの分散データから得られる情報を使用して、アプリケーションにまたがった各プロセス間の通信情報を自動的に効率よく生成することが、重要な技術的課題である。

(3) 地震波、石油タンクスロッシング連成問題

2003年9月26日に発生した「平成15年十勝沖地震」において、震源から200km以上離れた苫小牧で石油備蓄タンクが長周期表面波によってスロッシング (液面振動) を起こし、火災に至った事故はよく知ら

れている。近年、大型建造物の増加により、周期 10 秒程度の長周期地震波への対策が注目されている〔8, 9〕。長周期波の発生メカニズムも含めて、このような現象は本プロジェクトで取り組むべき重要な課題であり、本フレームワーク整備のためのターゲットアプリケーションとすることにした。

地下で発生した地震波は硬い岩盤層（地震基盤）を伝わって、比較的浅く軟らかい堆積層、工学基盤、表層を伝わって、地上の建造物を振動させる（Fig.4）。地震基盤と工学基盤・表層では性質、挙動が異なるため、別々のモデルが必要であり、本プロジェクトでも、地震基盤⇒工学基盤・表層⇒石油タンクという手順で連成シミュレーションが実施される予定である。

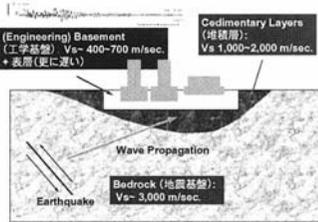


Fig.4 Seismic wave propagation

今回は、フレームワーク整備のため、このうち「工学基盤・表層⇒石油タンク」という部分を取り出して、シミュレーションを実施する。Fig.5 に示す、工学基盤・表層を模擬した「地盤モデル」と、石油タンクを模擬した、内部に液体を有する複数の円筒型薄肉構造物から成る「タンクモデル」の連成シミュレーションを実施する。タンクと地盤の相互作用については、今後の本プロジェクトにおける重要な課題であるが、今回は、地盤表層の変位をタンクモデル底部の節点の強制変位として与え、タンク側から地盤への影響はないものとした。すなわち、フレームワーク開発にあたっては、地盤モデルにおける地表面変位をタンクモデルに底部に通信によって伝えることに着目した（Fig.5）。

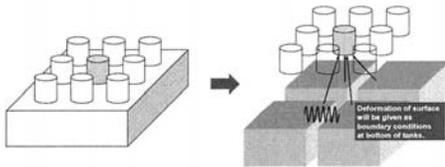


Fig.5 Coupling between engineering basement and tanks for oil-storage

地盤側は 240m×240m×100m の三次元領域とする。この領域を 16 ないし 32 の領域に分割し、前進オイラー法を使用した有限要素法による非定常計算を実施する。プログラムは FORTRAN で記述されている。地表面において表面波に相当する強制振動を与える。地盤側の各プロセス間では通信が発生する。

タンク側では、有限要素法により薄肉構造物振動、内部の液体のスロッシングを計算する〔10〕。時間積分は後退オイラー法によっており、プログラムは C で記述されている。薄肉構造物は鋼、内部液体は水と同様の物性を有するものとし、液体については粘性の効果を見逃したポテンシャル流れとしてモデル化してい

る。タンクは直径 42.7m、高さ 24.9m、厚さ 20mm とし、高さ 12.45m まで液体に満たされている。この場合のスロッシングの固有周期は 7.6sec.である〔10〕。このようなタンクを中心 60m ずつ離して、4×4（合計 16 個）に配置する（Fig.6）。MPI の 1 プロセスを 1 つのタンクに割り当て、タンク側の各プロセスの計算は独立に実施されているが、各タンクは地盤側の複数のプロセスとの相互作用が発生する可能性がある（Fig.5）。Fig.6 に解析モデルの全体図とメッシュ分割を示す。

メッシュサイズは、地盤側が一辺 2m の立方体、タンク側が、XY 平面方向約 1.5m（タンク周方向 80 分割）、Z 方向約 0.6m である。合計要素数 1,104,000、節点数 1,162,387、自由度数は 2,918,169 である。

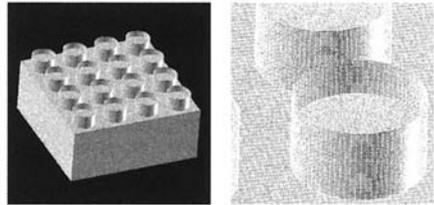


Fig.6 Model for coupling simulations between engineering basement and tanks for oil-storage

3. 並列連成シミュレーションのためのフレームワークの開発

(1) 並列連成プログラムの概要（初期化部分）

前節で述べたように、今回は、地盤の表面変位をタンク底面の強制変位として送信することに着目する。計算開始時点においては、地盤モデルとタンクモデルの相互の関係に関する情報はない。地盤モデルとタンクモデル間の M×N 通信のための通信テーブル〔11〕を作成し、それを使用して情報を通信する、ということが本フレームワークの役割である。また、地盤モデルは FORTRAN、タンクモデルは C で記述されているため、異なる言語間で情報を共有するための機能も必要である。以下に、実際のプログラム例を示しながら、フレームワークの機能について説明する。

Fig.7 は、本フレームワークを使用して開発した並列連成シミュレーションコードの初期化部分である。ここでは以下が実施されている。

- コミュニケータの定義
- メッシュ情報等の読み込み
- M×N 通信テーブルの作成

```

use m_local_mesh    ;; module for local mesh
use m_boundary_mesh ;; module for boundary values
use m_comm_table    ;; module for boundary exchange

type (local_mesh)   ;; meshGLOBAL, meshBASE, meshTANK
type (boundary_mesh) ;; bcBASE, bcTANK
type (comm_table)   ;; commToT

!-----*!

call hpc_INIT_steer (meshGLOBAL, meshBASE, meshTANK)

if (BASE) call INIT_base (meshBASE, bcBASE)

if (TANK) call INIT_tank ()
           call COPY_CtoF (bcTANK)

call CREATE_comm_table (meshGLOBAL, meshBASE, meshTANK, &
                       bcBASE, bcTANK, commToT, D)

```

Fig.7 Initialization part of parallel coupled simulation code
前節で述べたように、本フレームワークでは、FORTRAN90 のモジュール、構造体の機能を最大限利

用し、FORTRAN コードからの呼び出しを中心とする。各構造体の内容は以下の通りである。

構造型	構造体	内容
local_mesh	meshGLOBAL	全体
コミュニケータ、ランク番号、メッシュ情報	meshBASE	地盤モデル
	meshTANK	タンクモデル
boundary_mesh 境界節点情報	bcBASE	地盤モデル
	bcTANK	タンクモデル
comm_table 通信テーブル情報	commBtoT	地盤からタンクへの通信テーブル

構造型 local_mesh は、モジュール m_local_mesh において定義され、本来メッシュ情報を記述する構造型であるが、ここではコミュニケータ、ランク番号 (local_mesh%MPI_COMM, %my_rank) が重要である。構造体 meshBASE は地盤モデル、meshTANK はタンクモデル、meshGLOBAL は両者を合わせた全体系に関する情報が収納されている。本フレームワークでは、各モデルにおけるプロセス数は計算の前に決められており、Fig.7 に示すように FORTRAN のサブルーチン hpcmw_INIT_steer [6] によって読み込まれ、定義される。ここでは、hpcmw_INIT_steer の引数の順番、すなわち meshBASE、meshTANK の順で全体のランク番号が定義されている。Fig.8 に地盤、タンクのプロセス数が各々4、9である場合のランク番号を示す。

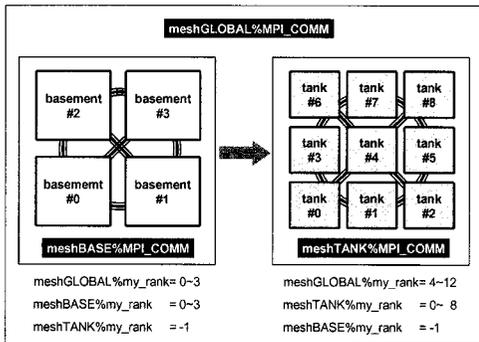


Fig.8 Local and global rank number of processes

Fig.9 に示すように、境界面（地表面）において、地盤モデルとタンクモデルの節点の位置は必ずしも一致しない。従って何等かの形で内挿する必要がある。

「連成ライブラリ」の役割は、このような領域境界における節点（あるいは要素）の組み合わせをそれぞれのモデルから探索し、内挿・外挿のための係数を算出し、物理量を通信することに帰着される。MpCCI では、節

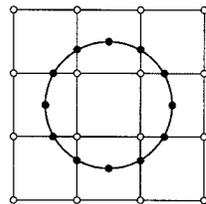


Fig.9 Node distribution at boundary surface (○: nodes in basement model, ●: nodes in tank model)

点、要素中心、面中心など、様々な位置で物理量が定義されることを想定しており、本フレームワークでも同様の機能をサポート予定であるが、今回は、全ての物理量は節点において定義されるものとし、節点群に着目して処理を行う。

境界面における連成シミュレーションのための節点群を Fig.10 に示すようなモジュール m_couple (構造型名: couple) によって定義する。

```

module m_couple
  type node_grp
  integer::
    character(len=80),pointer:: n_grp
    grp_name (:)
    integer,pointer:: grp_index (:)
    integer,pointer:: grp_item (:)
    integer,pointer:: bc_grp_dof (:)
    real(kind=kreal),pointer:: bc_grp_val (:)
    real(kind=kreal),pointer:: bc_grp_coord (:)
  end type node_grp

  type couple
  type (node_grp) :: node_grp
  end type couple
end module m_couple

```

Fig.10 Module m_couple which defines boundary nodes for coupled simulations

構造体の各成分の内容は以下の通りである：

成分名	内容
n_grp	境界節点グループの数
grp_name (:)	境界節点グループ名
grp_index (:)	各グループの節点数
grp_item (:)	各グループの節点番号
bc_grp_dof (:)	各節点における自由度数
bc_grp_val (:)	各節点における自由度
bc_grp_coord (:)	各節点の座標値

この構造体は各モデルで「連成シミュレーションに関連した」節点群の情報を格納したものであり、このような構造体を、地盤側、タンク側で独立に定義し、境界面における節点 (Fig.9 において○、●で示されている点) の情報を入力しておく。これらが Fig.7 における、bcBASE、bcTANK である。この構造体は各モデルで独立に定義されるが、節点グループ名 (上記の grp_name) を一致させておけば、後述する M×N 通信テーブルの作成も容易に実施可能である。

タンクモデルの計算コードは C で記述されており、構造体 bcTANK に相当する内容も C のプログラムで読み込まれている。Fig.7 で呼ばれている COPY_CtoF は構造体 bcTANK の情報を FORTRAN 側に確保する機能を持っている。FORTRAN と C の言語間で関数呼び出しによるデータの授受を行う際の本フレームワークにおけるポイントは以下の通りである。

- 必ず C の関数を FORTRAN から呼び出す。
- FORTRAN のサブルーチンの呼び出しでは、引数は全て参照渡しとなるため、C では全ての引数をポインタで受け取る。
- 配列の受け渡しは、以下のように行う。なお、FORTRAN と C では多次元配列のメモリへの格納の仕方が異なるため、1次元配列に変換した上で引き渡す。
 - FORTRAN から C へ配列を引き渡す場合 (COPY_FtoC) は、配列のサイズを同時に引き渡し、C で配列を格納する領域を新たに確保した上でメモリコピーを行う。

- ▶ C から FORTRAN へ配列を引き渡す場合 (COPY_CtoF) は、FORTRAN で配列を格納する領域を新たに確保し、その先頭ポインタを C へ引き渡してメモリコピーを行う。
- 文字列 (文字型の配列) については、C では末尾にナル文字 (0) が付加されるために下記のような処理が必要となる。
 - ▶ FORTRAN から C へ文字列を引き渡す場合には、末尾にナル文字を付加する。
 - ▶ C から FORTRAN へ文字列を引き渡す場合には、C で末尾のナル文字を削除した上で FORTRAN 側へ返す。
- 構造体を引き渡す場合には、メンバ変数を個別に引き渡す。

続いて、サブルーチン CREATE_comm_table を呼び出し、M×N 通信による地盤モデルの境界節点 (bcBASE) からタンクモデルの境界節点 (bcTANK) への通信テーブルを作成する。通信テーブルの内容は Fig.11 に示すようなモジュール m_comm_table (構造体名: comm_table) によって定義する。

```

module m_comm_table
  type node_grp
    integer:: n_neighbor_pe
    integer,pointer:: neighbor_pe(:)
    integer,pointer:: import_index(:),import_item(:)
    integer,pointer:: export_index(:),export_item(:)
    real(kind=real), pointer:: val_import (*)
    integer,pointer:: coef_index(:),coef_item(:)
    real(kind=real), pointer:: coef_coef(:)
  end type node_grp

  type comm_table
    type (node_grp):: node_grp
  end type comm_table
end module m_comm_table

```

Fig.11 Module m_comm_table which defines communication table for coupled simulations

構造体の各成分の内容は以下の通りである。

成分名	内容
n_neighbor_pe	隣接プロセス数
neighbor_pe(:)	隣接プロセス番号 (グローバル)
import_index(:) import_item(:)	隣接プロセスからの受信情報 (地盤⇒タンク)
export_index(:) export_item(:)	隣接プロセスへの送信情報 (地盤⇒タンク)
val_import (:)	受信する変数値 (地盤⇒タンク)
coef_index(:) coef_item(:) coef_coef(:)	各タンクモデル境界節点へ地盤モデル境界節点からの寄与に関する情報

CREATE_comm_table では、タンクモデルの各境界節点 (bcTANK) の境界条件設定に寄与する地盤モデルの境界節点 (bcBASE) を探索し、通信テーブルを生成する。引数 (構造体名) の順番を変更すれば、タンクから地盤への寄与についても探索が可能である。ここで作成した通信テーブルは地盤モデルとタンクモデルを合わせた全体系に対するものであるため、通信実施時のコミュニケータとしては、meshGLOBAL&MPI_COMMを使用する必要がある。

境界節点探索では CREATE_comm_table の引数 D が重要な役割を果たす。D は影響範囲を特定するため

のパラメータであり、Fig.12 に示すように、タンクモデルの境界節点 (●) からの距離が D/2 以下の範囲にある地盤モデルの境界節点 (○) が、境界条件設定にあたって考慮される。

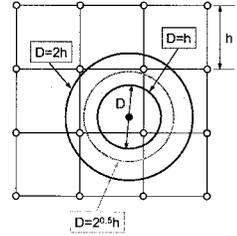


Fig.12 Searching boundary nodes in effective zone (D: effective diameter) (○: nodes in basement model, ●: nodes in tank model)

地盤モデルの境界節点における節点値を内挿してタンクモデルの節点の値を求める場合の内挿手法としては、節点からの距離の逆数を重み付けして平均している (距離が 0 の場合には 10^{10} 程度の大きな数を重み係数とする)。

(2) 並列連成プログラムの概要 (計算本体)

Fig.13 は Fig.7 に示した初期化を実施した後に行われる非定常シミュレーション部分である。グローバルなランク番号 (meshGLOBAL&my_rank) に従って、地盤あるいはタンク部分に関連した処理を実施する。EXCHANGE_nod_val は commBtoT で定義されている M×N 通信テーブルを使用して、地盤モデルの境界節点値をタンクモデルのプロセスに送信するためのサブルーチンであり、MPI_ISEND、MPI_IRECV、MPI_WAIT_ALL を使用した 1 対 1 通信を実施している [11]。本プログラムでは、各タイムステップごとに境界値を送信するようになっていたため、このサブルーチンと呼ぶ部分で必ず同期を取ることができるが、そうでない場合には、タンクモデル側が受信待ちの状態で停止しないような配慮が必要である。

```

do iter= 1, ITERtot
  TIME= TIME + delt
  if (BASE) then
    (FEM computation for "BASE" part)
    (calc. boundary values for bcBASE)
  endif

  call EXCHANGE_nod_val (meshGLOBAL, meshBASE, meshTANK, &
    bcBASE, bcTANK, commBtoT)

  if (TANK) then
    (prep. boundary values for bcTANK)
    call COPY_FtoC (bcTANK)
    call EXEC_c ()
  else
    (other works for "BASE" part: i.e. writing results)
  endif
enddo

```

Fig.13 Main part of parallel coupled simulation code

上記の例では、地盤モデル側では、境界値を送信したのち、結果ファイルのアウトプットを実施している。タンクモデル側では、FORTRAN 上で境界節点値 (bcTANK) を更新したのちに、COPY_FtoC というサブルーチン呼んで、bcTANK の中身を C 側にコピーする。EXEC_c はタンクモデルのシミュレーションモデルを起動する。

このように境界節点、通信テーブルに関する構造体、サブルーチンを利用することにより M×N 通信を容易に実装可能である。

4. 計算例

Fig.6 で示した解析モデルに関して：

- ① 地盤：16 領域，タンク：16 個，計 32 プロセス
- ② 地盤：32 領域，タンク：16 個，計 48 プロセス

の 2 つの場合について，並列連成解析を実施した。地表面表面波として， $X=0$ の面より，周期 3.14sec.（スロッシング固有周期は 7.6sec.），伝播速度 15m/sec.，振幅 1mm の正弦波を X 方向の強制変位として入力した。タイムステップを 0.1sec. とし 200 ステップ（合計 20sec.）の非定常計算を実施した。

計算環境として，Visual Technology 社製の AMD Opteron 275（2.2MHz, dual-core）によるクラスタを使用した。コンパイラは PGI FORTRAN/C，ネットワークとしては Infiniband と Gigabit Ethernet の両方について計算を実施した。

通信テーブル作成時のパラメータ D の値は 2.00（地盤モデルのメッシュ長に相当する）とした。この場合の各タンクモデルの地盤モデル側からの受信パワファのサイズは 272 であり，地盤モデル計算時の各領域間の通信量と比較すると 10 分の 1 以下である。Fig.14 に時間経過後の液面振動の様子を示す。並列可視化には AVS/Express PCE（Parallel Cluster Edition）〔12〕を使用した。

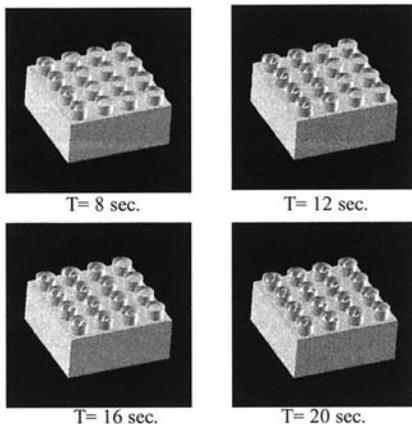


Fig.14 Results of coupled finite-element simulations for seismic response of multiple tanks for oil-storage with fluid-structure interaction

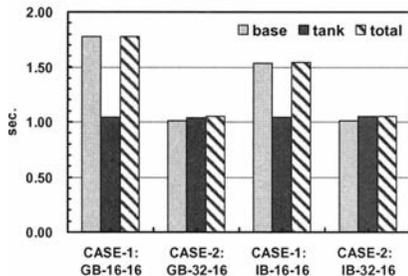


Fig.15 Results of coupled finite-element simulations for seismic response of multiple tanks for oil-storage with fluid-structure interaction (GB: Gigabit Ethernet, IB: Infiniband, 16-16: 16 cores for basement (total: 32 cores), 32-16: 32 cores for basement (total: 48 cores))

Fig.15 は Gigabit Ethernet, Infiniband を使用した場合の計算時間である。各ケースとも，BASE, TANK のうち計算時間の多い方が全体の計算時間にほぼ等しくなっており，計算機資源が有効に利用されていることがわかる。M×N 通信によるオーバーヘッドはこの場合ほとんど無視できる。

5. まとめ

「観測・計算を融合した階層連結地震・津波災害予測システム」における大規模連成シミュレーションのために，SPMD 環境における M×N 通信に基づく，フレームワークのプロトタイプを開発した。FORTRAN のモジュール，構造体の特性に基づき，連成シミュレーションに関連した処理を FORTRAN 環境で実施することにより，簡明なインタフェースにより，M×N 通信の機能を利用可能である。

PC クラスタ上で地震波伝播，石油タンクスロッシングの連成シミュレーション予備評価に適用し，M×N 通信により計算機資源が有効に利用されていることが示された。

今後は，地盤モデル，タンクモデル間の相互作用を考慮した連成シミュレーションを実施するとともに，M×N 通信テーブル作成時の効率化など，フレームワークの改良，機能拡張も実施していく予定である。

謝辞

本研究は，東京大学 21 世紀 COE プログラム「多圏地球システムの進化と変動の予測可能性」，および科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業（CREST）の補助を受けている。AVS/Express PCE による並列可視化を支援していただいた宮地英生博士（ケイ・ジー・ティール）に感謝する。

参考文献

- [1] <http://www-solid.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~crest/>
- [2] <http://www.scai.fraunhofer.de/mpcci.html>
- [3] <http://www.cca-forum.org/>
- [4] <http://www.siam.org/meetings/pp06/index.htm>
- [5] <http://prism.enes.org/>
- [6] 陳莉，中島研吾，藤代一成（2004），Parallel Computational Steering using M x N Communication Model on HPC-MW，日本計算工学会第 9 回計算工学講演会，計算工学講演会論文集 9, 867-868.
- [7] <http://glaros.dtc.umn.edu/gkhome/metis/parmetis/>
- [8] Furumura, T. (2006), Computer Simulation of Long-period Ground Motions for the Nankai Trough Earthquakes, 2006 CREST/JST Symposium.
- [9] Hori, M. and Ichimura, T. (2006), Integrated earthquake simulation of strong ground motion, structural responses and evacuation processes in urban area, 2006 CREST/JST Symposium.
- [10] Nagashima, T. (2006), Numerical Simulation of the Seismic Response of a Thin-walled Cylindrical Liquid Storage Tank, 2006 CREST/JST Symposium.
- [11] <http://geofem.tokyo.rist.or.jp/>
- [12] <http://www.kgt.co.jp/features/pce/>