

12-NA05

分野横断型ハイパフォーマンス計算力学の新展開

牛島 省(代表者：京都大), 小山田耕二 (京都大), 岩下武史 (京都大),
檜山和男 (中央大), 京谷孝史 (東北大), 寺田賢二郎 (東北大), 木村一郎 (北海道大)
岡澤重信 (広島大), 松本純一 (産総研), 中畑和之 (愛媛大), 浅井光輝 (九州大)
加藤準治 (東北大), 藤岡奨 (土木研)

概要 当研究課題では、構造系の数値計算の専門分野と流体系の数値計算の専門分野の専門家がそれぞれの技術的課題に取り組むとともに、これらの分野を横断する課題については共同して取り組むこととした。本報告書では(1)分野を横断する課題に対する研究、(2)構造物の劣化過程および診断技術する研究および(3)構造物等に作用する流体力評価解析技術に関する研究のそれぞれの研究の研究成果と今後の展望を示すものである。

1. 研究の目的と意義

数値解析技術の進歩、計算機の高性能化により、現在、計算力学は実験や理論のみでは取り扱いが困難であった各種の工学問題を解決するための有効な手法となっており、これまでは困難であった実現象スケールの数値計算や、複数の専門分野にまたがる多重物理問題の数値計算に対する可能性が広がりを見せている。例えば、地震発生から津波の襲来による建物被害発生までの一連の物理現象は、マルチスケール・マルチフィジックスであり地盤・構造・流体を始め、多数の研究分野が相互に関連している。このような複合的な物理現象に対する総合的な研究を行うためには、個々の研究者がそれぞれの研究分野での研究を進めるのみならず、関連する物理現象を専門とする研究者が集まり、相互連携して研究を行う必要がある。

一方で、近年では取り扱う物理現象の複雑化、高度化に伴い必要とする計算資源は非常に大きくなる傾向があり、大規模計算による数値解析技術は必要不可欠なものになってきている。数値解析技術の成果を工学分野の実現象に広く応用し、社会でさらに役立つものとするには、関連する分野の研究者の連携、自由度の高い大規模高速計算を可能にする技術、現象を把握するための合理的な可視化技術の導入が不可欠となる。

今年度の研究においては、劣化診断技術など、構造物・材料に関する数値計算の専門家と、流体

計算・構造-流体連成数値計算の専門家の異なる領域の専門家の協調的な体制の下、計算機科学分野の専門家と連携しながら研究を進めることにより、分野間の相互理解を深め、計算力学分野に対して大規模高速計算に関わる最新技術を導入し、研究基盤の高度化と応用範囲の拡大を図ることを目的とする。

2. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

(1) 共同研究を実施した大学名

本研究では、「学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点」のネットワーク型拠点のうち、京都大学を共同研究先としており、計算機環境としては CRAY XE6 を利用した。

(2) 共同研究分野

本課題の共同研究分野は、超大規模数値計算系応用分野である。この研究グループでは、土木工学、機械工学分野における計算力学研究者が中心となり、これに計算機科学分野のメンバーを加えた連携体制に基づいて、固体材料力学、流体力学からマルチフィジックスおよび最適化問題にわたる広範囲の大規模計算利用の有効性を検討している。

(3) 当公募型共同研究ならではの事項など

本研究の特色は大きく以下の 2 点にある。

・本研究では、特定の計算対象を設定するのではなく、土木工学や機械工学の広範囲にわたる複数

の計算力学研究者の連携体制をとっている。すなわち、構造・材料力学，水理・流体力学，最適化問題など広範囲の応用対象を有する分野横断的な研究者が協調して，大規模計算における支配方程式の離散化手法や演算アルゴリズム，並列化手法や計算のプリ・ポスト処理など，分野共通技術に関する研究を進めている。

・共同研究先の拠点である京都大学学術情報メディアセンターのプログラム高度化支援研究者を加えることにより，計算力学分野の成果と大規模計算に関わる最新技術の融合を図り，研究基盤の高度化と応用範囲の拡大を目指している。

3. 研究成果の詳細と当初計画の達成状況

(1) 研究成果の詳細について

3.1 分野を横断する課題に対する研究

3.1.1 計算結果の可視化に係る分野および計算の出入力に係る大容量データハンドリングに係る分野【京大：小山田耕二，坂本尚久，趙堃，牛島省，藤岡奨，鳥生大祐】

数値計算の結果を第三者にわかりやすく伝え，有効に利用するためには大量の計算出力データを適切に可視化する技術が不可欠となる。本研究では，Kyoto Visualization System(KVS)を大規模計算機上にインストールし，大規模計算機から計算結果をダウンロードすることなく端末で可視化結果を確認できるシステムの構築を目指している。

上半期では，KVS を Cray XE6 上で正常に動作させるためのチューニングを施してインストールし，図-3.1.1に示される可視化表示システムを構築した。大規模計算機から計算結果をダウンロードすることなく可視化結果を端末で表示できるため，計算結果のダウンロード等に要する時間を削減できる。

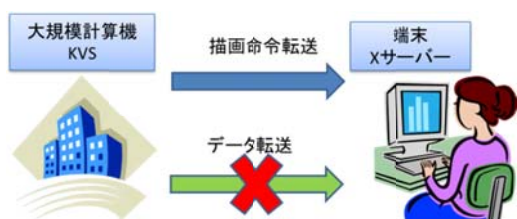


図-3.1.1 計算結果表示システム概念

3.2 構造物の劣化過程および診断技術に関する研究

3.2.1 構造物非破壊検査手法分野(トンネル覆工コンクリートの弾性波試験に関する数値解析)

【東北大：京谷孝史，寺田賢二郎，加藤準治】

本研究は，大型計算機を用いてトンネル覆工コンクリートの弾性波試験に関する数値解析的研究を実施するものである。

変状したトンネルの補修を計画する場合においての，最初に得られる情報が覆工コンクリートに発生するひび割れ状況であり，この情報を下にトンネルの状態を早期に把握することが，以後の補修・補強において重要である。しかしながら，このようなひび割れ情報のみから，トンネルの健全度を定量的または客観的に評価することは技術的に難しいのが現状である。そこで，本研究ではトンネル覆工コンクリートのひび割れ深さ評価法として，簡便に調査が行える衝撃弾性波法に着目し，波動伝搬シミュレーションからひび割れ評価法を構築することで，ひび割れに対する定量的な健全度評価手法の確立を目的とする。

ここでは，既往の実験的結果を参考に表面波エネルギーの減衰に着目し，ひび割れ以外からの反射や散乱，回折の影響を受けにくい数値実験を行うことで，ひび割れ深さを評価する式を提案する。また，トンネル全断面での弾性波伝搬シミュレーションを行い，測定方向および鉄筋の有無が伝搬波形に与える影響について考察する。

本研究は，大型計算機を用いてトンネル覆工コンクリートに関する弾性波試験に関する数値解析的研究を実施するものである。ここでは，(i) その数値計算結果を用いてひび割れに対する定量的な健全度評価式の確立を目指すことと，(ii) 実際の図面をもとに現実的なトンネル覆工コンクリート全体の数値シミュレーション行うものであった。なお，本研究で採用した解析手法はEFIT（動弾性有限積分法）と呼ばれるもので，愛媛大学中畑准教授提供による解析コード（以下，EFIT）を利用した。

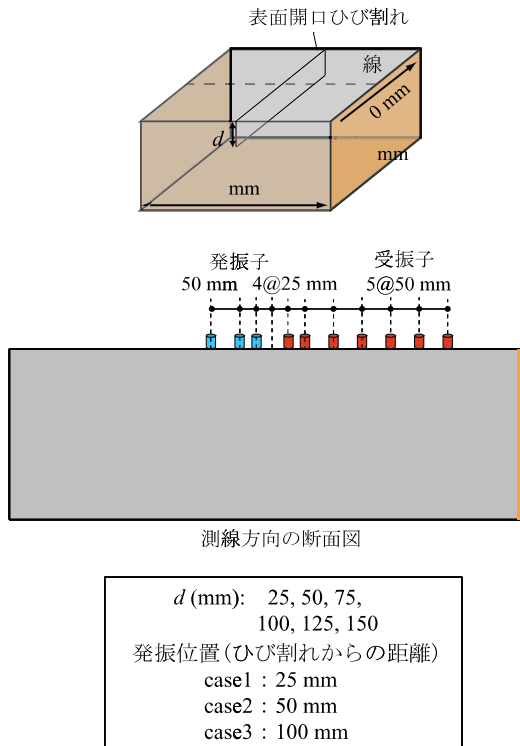


図-3.2.1 数値解析モデル

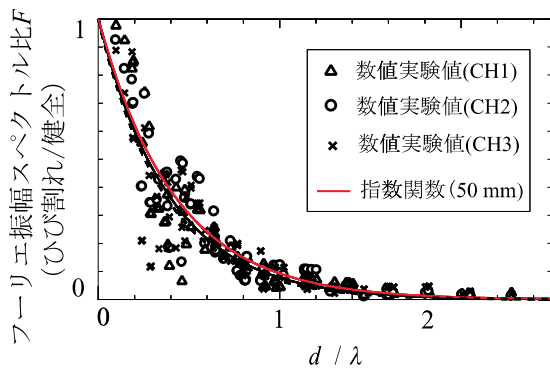


図-3.2.2 垂直ひび割れにおける数値実験結果

まず、(i)の健全度評価式については、ひび割れ深さ d と波長 λ の比とフーリエ振幅スペクトルの関係を示した Chai らの実験による評価式が広く用いられている。本研究では、数値計算を用いてその実験を模擬し、図-3.2.1のような数値計算モデルを用いてサンプリングを行い(図-3.2.2参照)、その近似曲線を用いて次のような評価式を提案するに至った。

$$d = -0.422 \cdot \ln F \cdot \lambda \quad (1)$$

また、(ii)の3次元数値シミュレーションでは、トンネル覆工コンクリートの数値解析モデルとして実トンネルの図面を参考にした。ここでは、独

立行政法人鉄道・運輸機構提供の2次元図面を参考にして、3次元CAD データを作成し、ボクセル有限要素法の汎用ソフトであるVOXELCON (くいと社)における、プリプロセッサ機能を利用して、CAD データから解析モデルを生成した。こうして得られたボクセル集合体の1ボクセルをEFITの1セルに整合させることで解析を実行した。

最後にEFITにより解析し得られた結果を汎用可視化ソフトウェアAVS/Express (サイバネット社)を用いてグラフィックス表示したものが図-3.2.3である。

ここでは、鉄筋配置までを考慮した複雑な解析モデルを構築した。解析条件は、要素サイズ $10 \times 10 \times 10 \text{mm}^3$ 、要素数92百万個、時間ステップ 1.25×10^{-7} 秒、プロセス数1024、プロセスあたりのメモリサイズ1800MB、総使用メモリ1.51TBで、約2.5時間で解析を終えた。

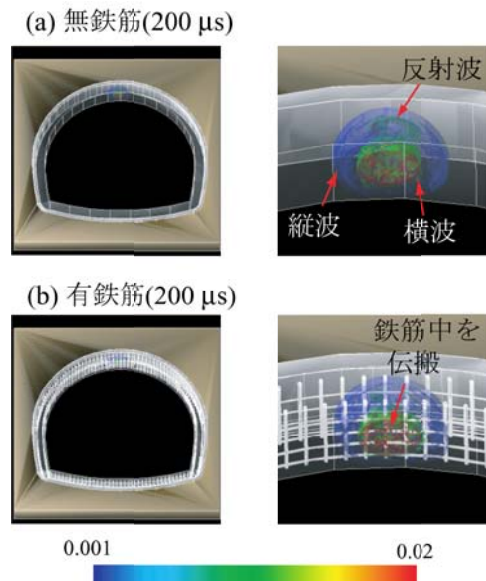


図-3.2.3 トンネル覆工モデルにおける弾性波伝搬挙動シミュレーションの結果

3.2.2 陽的有限積分法によるイメージベース弾性波・電磁波解析【愛媛大：中畑和之】

音波・弾性波・電磁波等の物理波動は、物理地下探査、魚群探知、室内音響、振動、エレクトロニクス機器など広く工学問題に応用されている。これら波動の物理的な性質や適用分野は全く異な

るが、支配方程式は双曲型偏微分方程式であり、統一的なアプローチで波動問題を解くことができる。H23 年度の本事業の共同研究課題で、イメージベース処理を導入した動弾性有限積分法(EFIT: Elastodynamic Finite Integration Technique)の大規模計算の性能について検討を行ったが、本年度は京都大学学術情報メディアセンターの新スパコンである CRAY XE6 システムを用いて、最大 4096 コアを用いた並列計算時の EFIT の性能を検証した。また、コンクリート非破壊検査への応用を意図し、鉄筋位置検出に用いられる電磁波レーダ法の大規模解析例を報告する。この解析のために、電磁界有限積分法(EMFIT: Electromagnetic FIT)の 3 次元コードを開発した。

(1) イメージベース EMFIT

EMFIT は時間領域の波動伝搬解析法である。マクスウェル方程式のファラデー則とアンペール則を微小領域で積分する。

$$\int_S \mu(\mathbf{x}) \frac{\partial H_i(\mathbf{x})}{\partial t} n_i dS = - \int_C E_i(\mathbf{x}, t) t_i dC$$

$$\int_S \left(\varepsilon(\mathbf{x}) \frac{\partial E_i(\mathbf{x}, t)}{\partial t} + \sigma(\mathbf{x}) E_i(\mathbf{x}, t) \right) n_i dS = \int_C H_i(\mathbf{x}, t) t_i dC$$

イメージベース処理のために積分領域 C を四角形とする。時間域で中心差分を用いることで、上式から電場と磁場の更新式が導出される。これを陽的に更新する。なお、電氣的に等方な場合を解析する場合、スタッガード格子を用いる一般的な FDTD 法と EMFIT のグリッド配置は同じになる。

(2) 計算性能の検証

ここでは、EFIT を用いて大規模計算時の性能検証を行った。実施日は、H24 年 6 月 14 日である。ここでは、計算領域の総ボクセル数を 1000^3 , 2000^3 , 2500^3 , 3000^3 , 3500^3 の 5 パターンについて検証を行った (最大 428 億 7500 万ボクセル)。計算領域を 3 次元方向に計 n^3 個の副領域に分け、副領域間は MPI を用いて袖部分のみデータを通信した。

なお、本検証はプロセス並列のみを用いた Flat MPI によるものである。 $n=10, 12, 14, 16$ の 4 パターンについて台数効果を検証した結果を図-3.2.4 に示す (最大で 16^3

=4096 プロセス)。

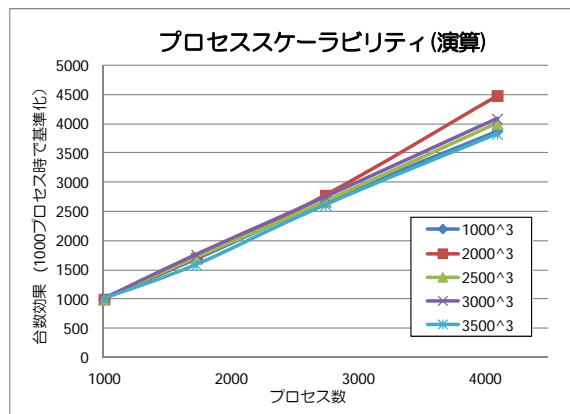


図-3.2.4 プロセス数を変化させた場合の台数

図-3.2.4 の縦軸は、ボクセル数を変化させた各パターンについて、プロセス数 10^3 のときの計算時間でそれぞれ基準化した台数効果を示している。入出力の時間は考慮せず、演算に関する elapsed time から台数効果を求めたものである。図-3.2.4 より、プロセス数の増加に伴い、台数効果もリニアに増加している。京都大学の新システムにおいても、EMFIT コードは非常に良い効率を得られることが分かった。

(3) EMFIT における電磁波レーダ法のモデル化および大規模波動伝搬解析

コンクリート非破壊検査への応用を意図し、鉄筋位置検出に用いられる電磁波レーダ法のモデル化、および電磁波の伝搬解析を行った。ここでは、EMFIT にイメージベース処理を組み合わせた 3 次元コードを開発した。鉄筋コンクリート床版の上表面から電磁波を放射した場合の、床版内部の電磁波の伝搬を可視化した結果を図-3.2.5 に示す。セメントと骨材の電氣的な特性インピーダンスに顕著な違いは無いため、ここではコンクリートを均質体 (誘電率 $\varepsilon=43.85\text{pF/m}$, 透磁率 $\mu=1.257\mu\text{H/m}$, 導電率 $\sigma=0.001\text{S/m}$) としてモデル化した。床版の高さは 40cm, 幅は 85cm×90cm とし、直径 1cm の鉄筋をかぶり 15cm の位置に配置した。送信周波数は 1GHz である。ボクセル数は約 38 億個、更新数は 3 万ステップである。図-3.2.5 は、ある時間ステップにおける電場の等値面および断面を表示したものである。電磁波が床版内部を球面状に広がり、鉄筋によって散乱されている様子がわかる。

なお、計算時間は 2048 プロセス並列(Flat MPI)で約 3 時間であった。

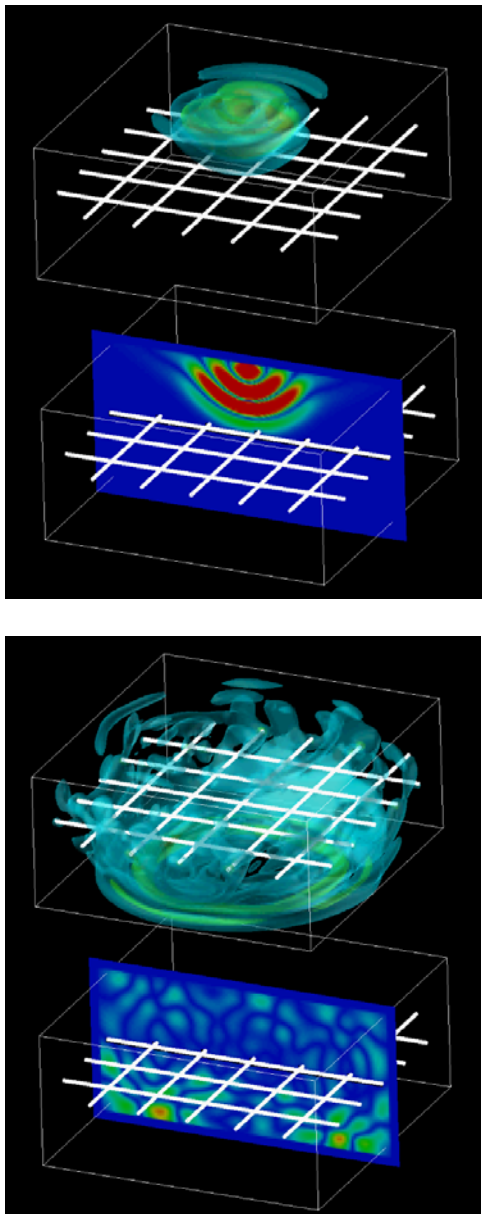


図-3.2.5 鉄筋コンクリート床版中を伝搬する電磁波の 3次元可視化

3.2.3 損傷モデルの概念を導入したボクセル FEM による物質拡散とひび割れ進展問題の連成解析 【九州大：浅井光輝】

(1) 緒言

コンクリート構造物の経年劣化の要因は、中性化・アルカリシリカ反応(ASR)・塩害等のさまざまな現象が考えられる。その多くは力学的要因と化学的要因が複雑に連成しており、劣化メカニズムを詳細に把握したうえで合理的な対策することは非常に困難である。

そこで、まずコンクリート材料のさまざまな劣化要因の中から ASR を取りあげ、連成解析を実施することで、ASR 現象の特徴的な損傷である亀甲状のひび割れパターンの再現することを目標とし、コンクリート材料をモルタルと骨材、そして両者の界面の 3 相に分けたメゾコンクリート材料モデルを用いた数値解析モデルの確立を試みた。

(2) 拡散・膨張・不連続面進展の連成解析

(2-1) ASR 損傷の仮説とそのモデル化 非定常拡散解析と内在物膨張に伴う不連続面進展解析とを組み合わせ、連成解析手法の構築を行う。コンクリートのアルカリ骨材反応を想定した連成解析の手順を図-3.2.6 に示す。

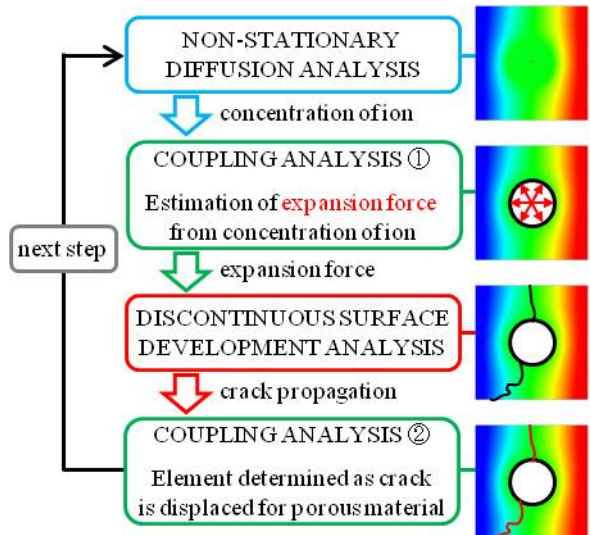


図-3.2.6 Coupling analysis procedure

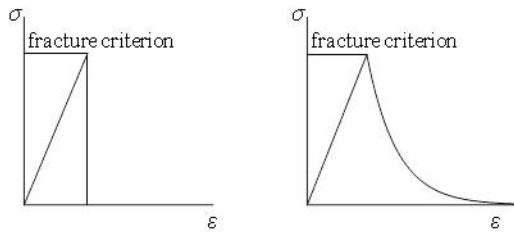
(2-2) ASRによる骨材の膨張 非定常拡散解析により得られた濃度分布をもとにひび割れ進展解析を行う。本研究では固体は線形弾性体を仮定する。

実際のアルカリシリカ反応では、コンクリート内のアルカリ反応性骨材と微細空隙中のアルカリ溶液が化学反応により生成するアルカリシリカゲルが吸水、膨張し骨材周辺からひび割れが進展する。本研究ではアルカリシリカゲルの吸水による体積膨張を骨材の体積膨張として表現した。具体的には、骨材要素のみに次式に示すように濃度に比例する膨張ひずみを与えた。

$$\begin{aligned} \{\varepsilon^c\} &= \{\varepsilon_x^c \ \varepsilon_y^c \ \varepsilon_z^c \ \gamma_{xy}^c \ \gamma_{yz}^c \ \gamma_{zx}^c\}^T \\ &= \{ac \ ac \ ac \ 0 \ 0 \ 0\}^T \end{aligned} \quad (2)$$

a は膨張係数, c はイオン濃度を表す. ここで与えた膨張ひずみをもとに膨張力を決定し, 力学計算を行う.

(2-3) ひび割れ進展解析 ひび割れ進展の判定において, 完全脆性モデルと損傷モデルの2つのモデルを用いて比較を行った.



(a) Perfectly brittle model (b) damage model

図-3.2.7 Stress-strain behavior

a) 完全脆性モデル 完全脆性モデルでは最大主応力をひび割れ発生の判定基準として, 最大主応力が引張強度 f_{ct} に到達した要素をひび割れとみなし, その要素を除去する.

b) 損傷モデル 損傷モデルでは連続体損傷力学を導入し, 損傷変数 D を用いるにより要素剛性 (材料割線係数) を段階的に減少させる. 損傷変数は $0 \leq D \leq 1$ であり, $D=0$ のときには健全な状態を示し, $D=1$ は最終的な破壊状態を表す.

なお, 損傷モデルにおける損傷進展の判定には以下に示す相当ひずみを用いる. コンクリートは引張り応力に弱い材料であり, 圧縮強度に比べて引張強度は, 約 1/10 程度である. そこで, 圧縮域と引張域の相対的な影響度を考慮した相当ひずみを定義することが望ましい. 本研究では Peerlings らが提案した次式の相当ひずみを用いて損傷を評価することにした.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{eq} &= \frac{m-1}{2m(1-2\nu)} I_1 \\ &+ \frac{1}{2m} \sqrt{\left(\frac{m-1}{1-2\nu} I_1\right)^2 + \frac{2m}{(1+\nu)^2} J_2} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで, I_1 はひずみの 1 次不変量, J_2 は偏差ひずみ

の 2 次不変量であり, m がコンクリートの圧縮強度と引張強度の比を示す.

また損傷の進展則は以下の式を採用した.

$$D = 1 - \frac{\kappa_0}{\kappa} [1 - A + A \exp\{-B(\kappa - \kappa_0)\}] \quad (4)$$

ここで A , B は損傷の進展を表すパラメータ, κ は材料が過去に受けた最大の相当ひずみである.

(3) 連成解析例

3次元コンクリートモデルを用いて完全脆性モデル, 損傷モデルによる解析を行った. 解析モデルのサイズは 100 万要素である.

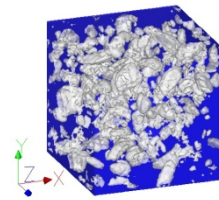
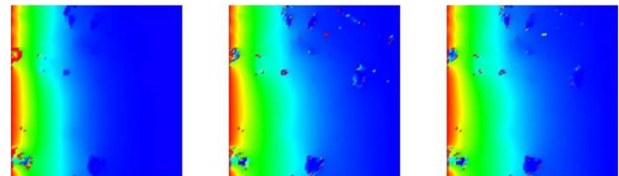


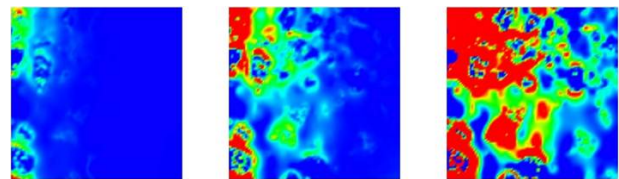
図-3.2.8 3D concrete model

(3-1) 完全脆性モデルによる解析 モルタルおよび界面の引張強度は立方体内在モデルと同様に 4.0MPa, 1.0MPa とした. 解析結果を図-3.2.9 に示す.

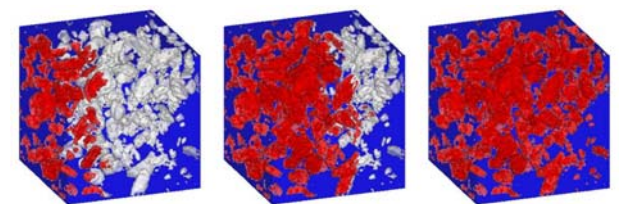
Concentration distribution



Maximum principal stress



Discontinuous surface



250days

1,000days

2,500days

図-3.2.9 The result of analysis with concrete model (Perfectly brittle model)

立方体内在モデルと同様にイオンが骨材に到達すると応力が高くなり、骨材周辺に不連続面が進展する様子が解析できた。しかし、2,500days以降ひび割れがほとんど進展せず、モルタルへとひび割れが進展しなかった。

(3-2) 損傷モデルによる解析

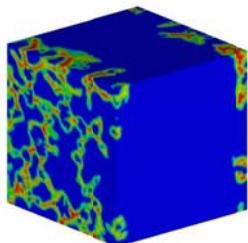


図-3.2.10 Damage variable on concrete surface

図-3.2.10 に、損傷モデルを用いた際の 2500 日後の損傷係数の分布を示す。損傷モデルを用いることで、段階的に損傷が進展し、骨材周辺での膨張力が継続して外部へと伝達することで、ひび割れがモデル中へと進展する過程をより自然に表現することができた。結果として、アルカシリカ反応の特徴である表面上の亀甲状のひび割れを定性的に表現することができた。

3.3 構造物等に作用する流体力評価解析技術に関する研究

3.3.1 最適化, FEM による流体解析に関する分野
【産総研：松本純一】

Navier-Stokes 方程式における最小化手法を用いた最適形状問題は、数値的に形状を求めていく反復過程において計算された形状が振動し、一般的に形状の波打ち現象が発生する。2011 年度は 2 次元問題を並列化し、形状の振動を適切に緩和させるような平滑化作用の検討を行い良好な結果を得た。

Navier-Stokes 方程式における随伴法を用いた逆問題は、非定常問題および状態方程式（有限要素方程式）が非線形であり図-3.3.1 に示す計算アルゴリズムとなる。図-3.3.1 の逆解析のステップは、「状態方程式を解く」「随伴方程式を解く」「状態量、随伴量を用いて制御量を求める」の三つからなり、三つの各部分において並列化を実施して

いる。ここで、注目すべきは「随伴方程式を解く」の部分で、非定常問題では逆時間で求める必要があること、Navier-Stokes 方程式の離散化で見られる行列は非対称となるため状態方程式と随伴方程式が異なること、そして状態方程式が非線形のため全時間の各節点の状態量（流速と圧力の変数）を記憶する必要があることである。状態方程式が非線形であるために生じる全時間の状態量の記憶には、非常に膨大な記憶容量が必要となる。本研究では、2010 年度に実施した気液二相流解法での並列効率の検証で 3 ケースとも記憶容量の効率（分散率）が 1024 コアで 90%以上である分散性の高い並列化手法を採用し、膨大な記憶容量の問題に対応している。

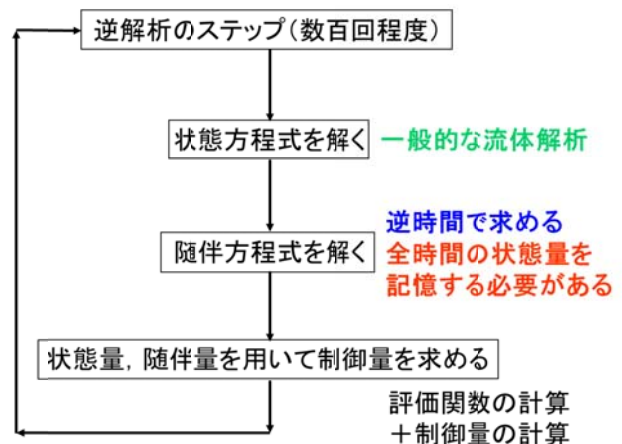


図-3.3.1 非定常非線形逆問題に対する計算アルゴリズム

図-3.3.2 の 3 次元問題も並列化し約 9 万自由度の計算を実施したが計算時間が通常の流体解析に比べて約 500 倍と非常に時間がかかることがわかった。

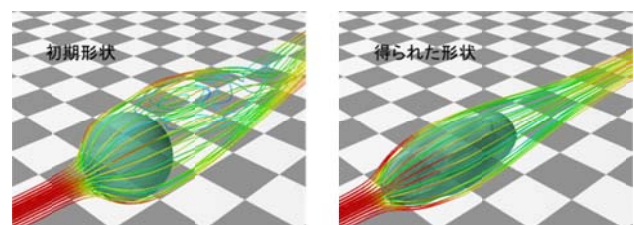


図-3.3.2 球周りの形状最適化問題(抗力最小・面積一定, Re=400)
2012 年度はより高速な並列化アルゴリズムや並列計算手法を検討中である。

FEM による非構造格子を用いた気液二相流問題では、実験結果との比較の準備のため 2010 年度に開発を行った計算プログラムにおいて、2011 年度

は並列性能を保ったままより高い表面張力下でも計算が可能となる表面張力項の評価の改良，図-3.3.3 のような流入・流出を伴う場合においても体積保存が可能な体積補正法の提案を行った。

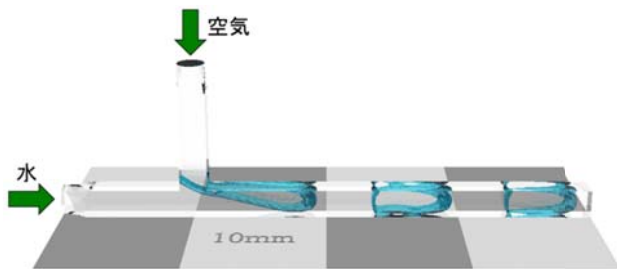


図-3.3.3 スラッグ流れ（空気，水を流入）の計算

また，実験結果との比較を想定し，表面張力係数を実問題で用いられる大きさで計算を可能にし，領域をより広域にした図-3.3.4 の約 1 億 2 千万自由度のミルククラウンの計算結果を実施した。

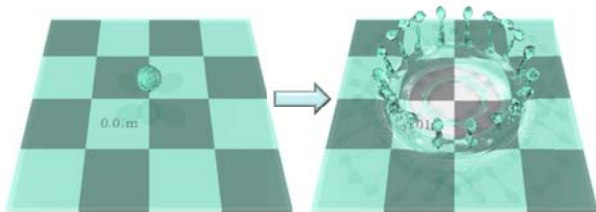


図-3.3.4 ミルククラウンの計算

2012 年度は実際の実験結果との比較を検証中である。

3.3.2 地表面での熱収支を考慮した非等温場における都市域の大気環境流れ解析【中央大：池田哲也，櫻山和男】

地表面での熱収支を考慮した非等温場における都市域の大気環境流れ解析において，構造物や地形の影響を正確に考慮した解析を行うため，任意形状への適合性に優れる非構造格子に基づく安定化有限要素法を用いた解析手法の構築を行う。本手法の妥当性について検討をするため，熱収支を考慮した立方体周辺の風況解析を行った。

支配方程式は，Boussinesq 近似を用いた非圧縮性 Navier-Stokes 方程式及びエネルギー方程式，乱流モデルには RANS に基づく $k-\epsilon$ 型 2 方程式モデル（改良 Launder-Kato モデル）を用いた。空間方向の離散化には，SUPG/PSPG 法に基づく安定化有限要素法を適用し，時間方向の離散化には Crank-

Nicolson 法を用いた。

・計算条件

図-3.3.5 に解析領域の概要図を示す。立方体の一辺長は 30[m] とした。解析には総節点数 2,344,659，総要素数 13,607,424，最小メッシュ幅 0.63[m] の不等分割メッシュを用い，微小時間増分量は $\Delta t = 0.001[\text{sec}]$ とした。流入境界条件として水平方向流速を $u = z^{0.25} [\text{m/s}]$ で与え，流出境界は traction-free とし，上端面と側面には slip 条件，底面と壁面には一般化対数則を適用した。また，法線面直達日射量は $765 [\text{W/m}^2]$ ，水平面天空日射量は $136 [\text{W/m}^2]$ ，アルベドは 0.8，バルク係数は裸地を仮定して $0.0027 + 0.0031 \times 0.2U$ ，蒸発効率は 0.3，熱伝導率は地表面で $1.16 [\text{W/m} \cdot \text{K}]$ ，コンクリート壁面で $1.29 [\text{W/m} \cdot \text{K}]$ ，地中温度は地表面から 0.5[m] の位置で $26 [^\circ\text{C}]$ とした。形態係数の算出の際の全放射束は 10,000 本とした。

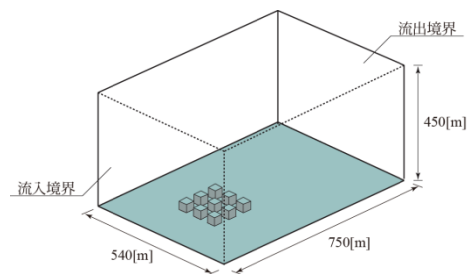


図-3.3.5 解析領域図

・計算結果

図-3.3.6，図-3.3.7 に 50[sec] における流線図及び立方体周辺の地表面温度分布を示す。日照部と日陰部で温度の差が表現されており，定性的には妥当な結果が得られている。

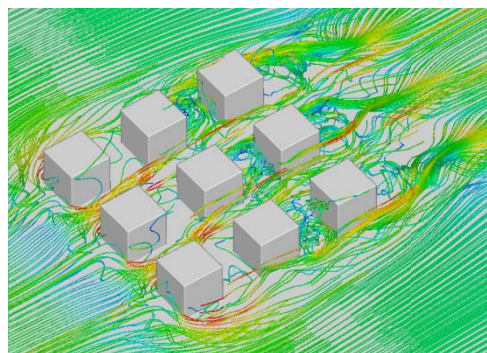


図-3.3.6 流線図

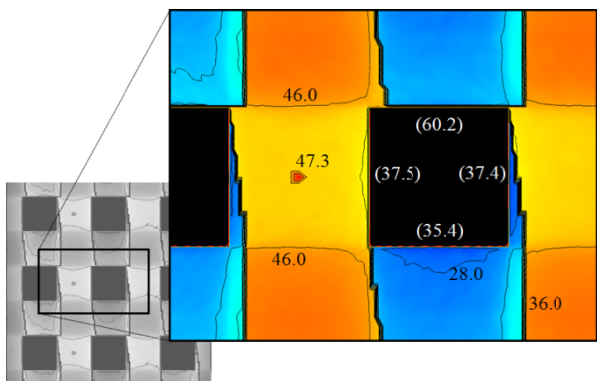


図-3.3.7 温度分布[°C]

3.3.3 多相流場の解法による固体と流体の連成問題分野【土木研：藤岡奨，京都大：牛島省】

本研究では、流体と固体を統一的に流体として扱う一流体モデルを利用し、多数の漂流物を含む流れの予測と漂流物との衝突や流体力による構造物の大変形に関する問題について取り上げる予定である。基礎方程式は連続式、平均化された運動方程式および非圧縮条件である。

可能な限り実現に近い数値計算を実施するために実地形データを用いた気液混相 3 次元計算による海水侵入計算を試験的に行った。得られた浸水域の時系列を図-3.3.8 に示す。

上記の解析においては解析対象領域は $200 \times 80 \times 20\text{m}^3$ の直方体領域で 1 辺 2m の立方体計算セルを用いている。計算機等の制約等により、実領域を対象とした場合には 2m 程度の計算セルサイズを用いざるを得ないことが予想されている。現在、実際領域を対象とした数値計算の実施に向けて、2m 程度の格子解像度を利用することを想定して複雑地形の境界条件の取り扱いおよび波の境界条件等の検討を行っているところである。

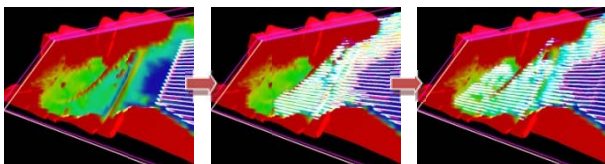


図-3.3.8 海岸から堤防を越えて侵入する海水
(2) 当初計画の達成状況について

3.4 個別課題の当初計画の達成状況について

本研究の当初計画では、構造系・流体系の異なる専門分野の研究者の協同のもと、構造系分野・流体系分野およびこれらの研究分野に共通する可

視化等の分野に大きく分け、それぞれの分野について進捗を図るものとした。今年度の達成状況としては、構造系、流体系およびこれらの分野を横断する課題については、以下に述べるとおりの進捗が得られた。したがって、異なる分野の研究者が協同して共通課題および個々の課題に取り組むという研究の進め方についてはある程度当初目的を達成したと考えられる。

3.4.1 分野を横断する課題に対する研究

計算結果の可視化に係る分野および計算の入出力に係る大容量データハンドリングに係る分野においては上半期では、KVS を CRAY XE6 上にインストールし、大型計算機から KVS による描画命令を端末に転送し、端末の X サーバにて可視化する手法を利用してシステム構築を行った。しかし、大規模計算結果のデータを取り扱う際には描画命令数も増えるため、通信容量が制限された状況下では端末におけるレスポンスが遅く感じられる。

異なる分野の数値計算であっても使用する計算機に係るノウハウや計算機科学技術情報の共有は、研究遂行上非常に重要である。また、計算機使用やチューニングをはじめとする計算機科学上の留意点を計算機使用前に十分に理解しておくことが望ましい。本年度は、計算機使用開始前および開始後にそれぞれ一回ずつの共同研究者の情報交換会を設け、進捗状況および計算機使用に係るノウハウについて共有化を図った。今後は大規模計算機上で可視化画像までを生成し、画像を端末に転送するシステムを検討する予定としている。

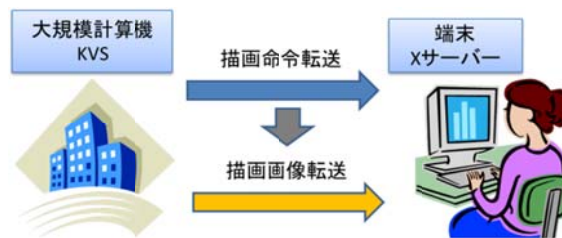


図-3.4.1 今後予定の計算結果表示システムの概念

3.4.2 構造物の劣化過程および診断技術する研究 構造物非破壊検査手法分野(トンネル覆工コン

クリートの弾性波試験に関する数値解析)においてはこれまでは垂直ひび割れを考慮したものを中心に数値シミュレーションを実施してきた。しかし、より現実的な健全度評価式を確立するためには、あらゆる方向のひび割れ配置を考慮する必要がある。そのため、今後はひび割れの角度や方向をパラメータとした同様の数値シミュレーションを実施する予定である。また、これまでは比較的大きなひび割れを対象とした動弾性波伝搬解析の研究を行ってきたが、実際の構造物においては微視的な亀裂の発現により強度が急激に低下することが知られていることから、微視的亀裂の影響を考慮したマルチスケール解析法の導入を検討している。

陽的有限積分法によるイメージベース弾性波・電磁波解析分野においては、京都大学の新スパコンシステムにおいて、最大 4096 コアを利用したプロセス並列の計算を行い、EFIT の性能を検証した。コア数が増加してもリニアな台数効果が得られた。

今後は、EFIT および EMFIT の数値結果と実験結果との比較を行うこと、さらに、逆解析ツールに組み込む形で本解析法を非破壊検査に積極的に活用したいと考えている。また、大規模 GPU 計算への拡張を考えている。

損傷モデルの概念を導入したボクセル FEM による物質拡散とひび割れ進展問題の連成解析分野においては現在、並列化コードが不完全のため、100 万要素の連成解析に留まっている。今後はハイブリット並列に対応させ、数千万要素の問題を解くことで、より広範な領域の解析を実施し、実験結果と比較検討を実施する予定である。

3.5 構造物等に作用する流体力評価解析技術に関する研究

最適化に関する分野においては、2012 年度は、3 次元問題において 2 次元問題で行った適切な平滑化作用の検討を実施し、通常の流体解析に比べて約 500 倍を要する 100 万自由度の 3 次元形状最適化問題における並列計算を 4096 コアを用いて実施した。FEM による流体解析に関する分野にお

ける気液二相流問題は、ミルククラウン問題において、表面張力の効果の検証、実現象の再現性、実験結果との比較検証を 4096 コアを用いて進める予定である

地表面での熱収支を考慮した都市域の大気環境流れ解析の分野においては放射計算と熱収支式を計算することで、定性的に妥当な地表面温度分布を得ることができた。今後の課題として本手法の定量的検証や並列化効率の検討、実際の都市モデルを用いた解析などが挙げられる。

多相流場の解法による固体と流体の連成問題分野においては、試験的に実地形に対して海水浸入計算を実施しており、限られた格子解像度における境界条件の検討を行っているところである。今後、これらの技術的課題を克服し実地形を利用した実地形に浸入する海水の 3 次元気液混相流れ数値計算を実施する予定である。

4. 今後の展望

当初計画では、構造および構造・流体連成の研究者が協同し、計算機および可視化に係る共通課題に関しては協同して取り組み、それぞれの専門分野については個々の研究者で取り組む体制で進めてきた。このような、広範囲の分野の専門家が協同して課題に取り組む意義は大きく、当初研究目的は一定の成果を上げたと考えられる。一方で、研究対象が広範囲にわたることにより、研究チーム全体としての研究のフォーカスが定まらないことにより、対外的に雑多な印象を与えるという指摘を受けていた。

研究審査の指摘に対応する体制に移行するために、次年度以降では構造系テーマおよび流体系テーマに大きく分割し、グループ内の研究テーマの統一を図ることとする。可視化等の共通テーマについては、次年度以降も引き続き取り組むものとする。

5. 研究成果リスト

(1) 学術論文

1. [K. Nakahata](#), [K. Terada](#), [T. Kyoya](#), [M. Tsukino](#) and

K. Ishii, Simulation of ultrasonic and electromagnetic wave propagation for nondestructive testing of concrete using image-based FIT, Journal of Computational Science and Technology, Vol.6, No.1, pp.28-37, 2012.

2. 中畑和之, 中 民矢, 飯田洋志, 石井 武, 松田吉人, EMFIT を用いた電磁波の伝搬解析とアレアンテナを用いた鉄筋の映像化シミュレーションへの応用, コンクリート構造物の非破壊検査論文集, Vol.4, pp.253-262, 2012.

(2) 国際会議プロシーディングス

1. K. Nakahata, S. Ichikawa, T. Saitoh and S. Hirose, Acceleration of the 3D image-based FIT with an explicit parallelization approach, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol.31, pp.769-776, 2012.

2. Matsumoto, J., Takada, N. and Matsumoto, S., "Two-phase flow analysis based on a phase-field model using mixed finite element method", 17th International Conference on Finite Elements in Flow Problems (FEF2013), No.WeA08-3, 2013/02/27.

(3) 国際会議発表

1. K. Nakahata, T. Matsumoto and T. Yano, Image-based FIT simulations for ultrasonic and electromagnetic wave propagations and their experimental verifications, 2nd International Conference on Computational Design in Engineering (CODE2012), 2012.11.

(4) 国内会議発表

池田哲也, 檜山和男, 安定化有限要素法による都市の温熱環境解析, 第 26 回 数値流体力学シンポジウム, E11-1