

地震時の大規模平野の地盤挙動と斜面崩壊シミュレーション技術の開発

プロジェクト責任者

栗山 利男 株式会社 構造計画研究所

著 者

司 宏俊^{*1}、西條 裕介^{*1}、正月 俊行^{*1}、内山 不二男^{*1}、諸遊 克己^{*1}、嶋村 洋介^{*1}、戸井 隆^{*1}、渡辺 高志^{*1}、廣川 雄一^{*2}

*1 株式会社 構造計画研究所

*2 独立行政法人海洋研究開発機構

利用施設： 独立行政法人海洋研究開発機構 地球シミュレータ

利用期間： 平成 21 年 4 月 1 日～平成 22 年 3 月 31 日

アブストラクト

地震災害軽減のためには、ある特定の地震が発生した時の地震動の予測や、斜面崩壊等の現象のシミュレーション結果に基づいた対策を検討しておくことが有効な手段であると考えられる。広範囲な領域、かつ、広帯域を対象とした高精度の波動伝播解析や斜面（山体）崩壊などのシミュレーションでは、大規模な計算モデルが必要となる。しかし、通常の PC クラスタでは計算速度やメモリなどの制約から計算が困難である。そこで、計算能力の高い地球シミュレータを利用した大規模な計算が出来るように、計算プログラムを地球シミュレータへ移植した。移植したプログラムは、震源の物理や地震波動理論に基づいた地震波の伝播解析プログラム (K-fdm3d)、表層地盤の地震応答解析プログラム (SuperFLUSH/3DS)、および、大規模斜面（山体）崩壊シミュレーションプログラム (K-dem) の 3 種類である。

地震波の波動伝播解析については、移植したプログラムを用いて、地震が発生した場合に大きな被害が出ると予測されている大阪の上町断層を対象に大規模な波動伝播解析を行い、構造計画研究所所有の PC クラスタの約 90 倍の計算速度が得られることを確認した。表層地盤の地震応答解析、および、斜面崩壊シミュレーションについては、移植したプログラムを用いて試解析を行い、計算速度向上のための課題を整理した。

キーワード： 波動伝播、地盤応答、斜面崩壊、差分法、周波数応答解析、個別要素法

1. 目的

日本は、4つのプレートがぶつかり合う地域に位置しているため、地震が多く発生し、古くから地震災害に悩まされてきた。地震による被害を軽減するためには、あらかじめ起こりうる被害を予測しておき、予測結果に基づいた対策を講じておくことが重要である。計算技術の向上に伴い、地震波の伝播解析や地盤応答、斜面崩壊等の理論的なシミュレーションを、被害の予測に用いることが多くなってきている。広範囲な領域、かつ、耐震工学上重要な周期をカバーする広帯域を対象とした高精度の波動伝播解析や斜面(山体)崩壊などのシミュレーションでは、大規模な計算モデルが必要となる。また、計算モデルの増大に伴い、計算時間も膨大となる。そのため、通常のPCクラスタでは計算速度やメモリなどの制約から計算が困難なのが現状である。そこで、計算能力の高い地球シミュレータを利用して大規模な計算が出来るように、計算プログラムを地球シミュレータに移植し、最適化を行う。移植するプログラムは、震源の物理や地震波動理論に基づいた地震波の伝播解析を行うプログラム(K-fdm3d)、表層地盤の地震応答解析プログラム(SuperFLUSH/3DS¹⁾、および、大規模斜面(山体)崩壊シミュレーションプログラム(K-dem)の3種類である。各プログラムが対象とする範囲の概要を図1に示す。

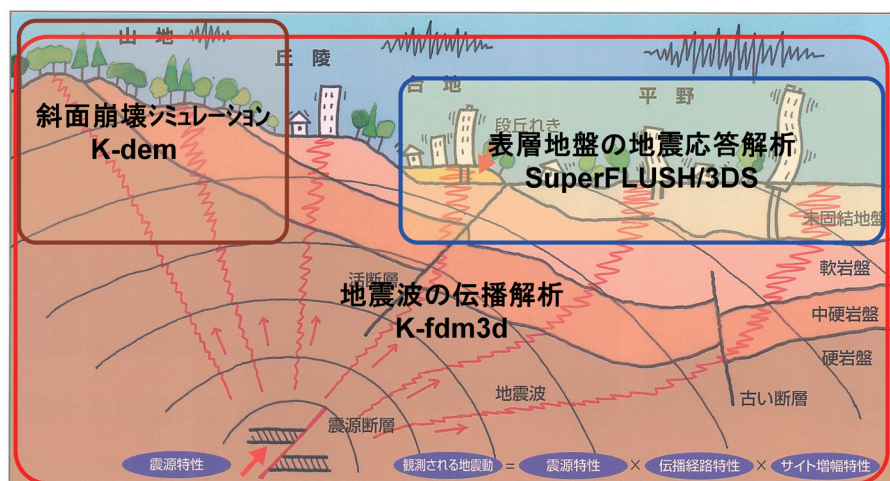


図1 各プログラムが対象とする範囲

2. 地震波の伝播解析

2.1 概要

長周期から短周期までの広帯域における波動伝播解析を高精度で行うには、震源過程や地震波の伝播経路を実際の物理現象に基づいて忠実にモデル化し、理論的方法により計算することが望ましい。しかし、3次元差分法などの理論計算が行われているのは、周期1～2秒以上の長周期領域のみであり、短周期領域については、半経験的な計算手法で計算しているのが現状である。短周期領域まで理論的方法で計算を行おうとすると、透過振動数の関係から非常に細かな差分格子間隔の設定が求められ、

莫大な格子点数が必要となるが、通常の PC クラスタではこれだけの格子点数を処理することは困難である。また、広範囲な領域に対して理論的手法により波動伝播解析を行う場合でも、莫大な格子点数が必要となるため、やはり通常の PC クラスタでの処理は困難である。そこで、計算機による制約を解決するために波動伝播理論に基づいた 3 次元差分法による地震伝播解析プログラム K-fdm3d を地球シミュレータに移植し、広範囲な領域で理論的な計算を行なう。

計算ケースとして、地震が発生した場合に大きな被害が出ると予測されている上町断層を想定地震とした大阪平野の波動伝播解析を行った。上町断層の震源モデルは、推本レシビ²⁾に基づき構築した(図 2 参照)。地盤モデルは、堀川・ほか(2001)³⁾を参考に設定した(図 3 参照)。地盤モデルの大きさは約 75x50x20km で、メッシュ間隔は 100m、計算規模は約 7500 万メッシュ規模である。地震動の評価地点(サイト)は堺市とした。

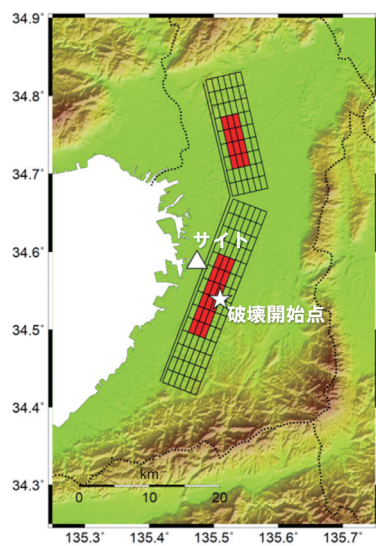


図 2 震源モデル

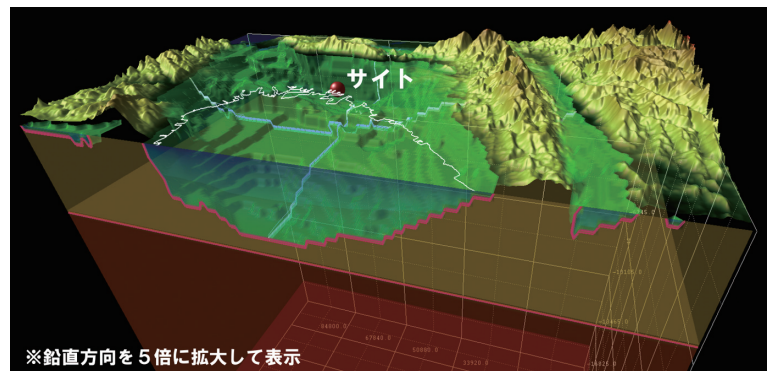


図 3 地盤モデル

2.2 結果

図 4 に波動伝播の様子のスナップショットを示す。図を見ると、断層面上から放出された地震波が伝播していく様子が分かり、堆積層の厚い平野部では比較的大きな振幅の波が長時間続いているのが分かる。図 5 に、サイトにおける速度時刻歴波形を示す。断層に対して直交する成分の振幅が大きくなる傾向があることが知られているが、図を見ると、EW 成分の振幅が最も大きくなっており、前述の現象と調和的な結果が得られていることが分かる。プログラムの性能は、2 ノード (16CPU) の場合において、平均ベクトル化率 98.8%、並列化率 90%であった。計算速度は、構造計画研究所所有の計算 PC クラスタ (3 ノード (6CPU)、AMD AthlonX2 2.1GHz) の約 90 倍となった。現状では、並列化率が低く、地球シミュレータの性能を発揮しきれていないが、最適化を行うことにより、さらに高速な計算が期待できる。それにより、より広範囲な領域における計算が可能になるとともに、細密な地盤モデルを用いればより短周期側まで精度よく計算ができると思われる。

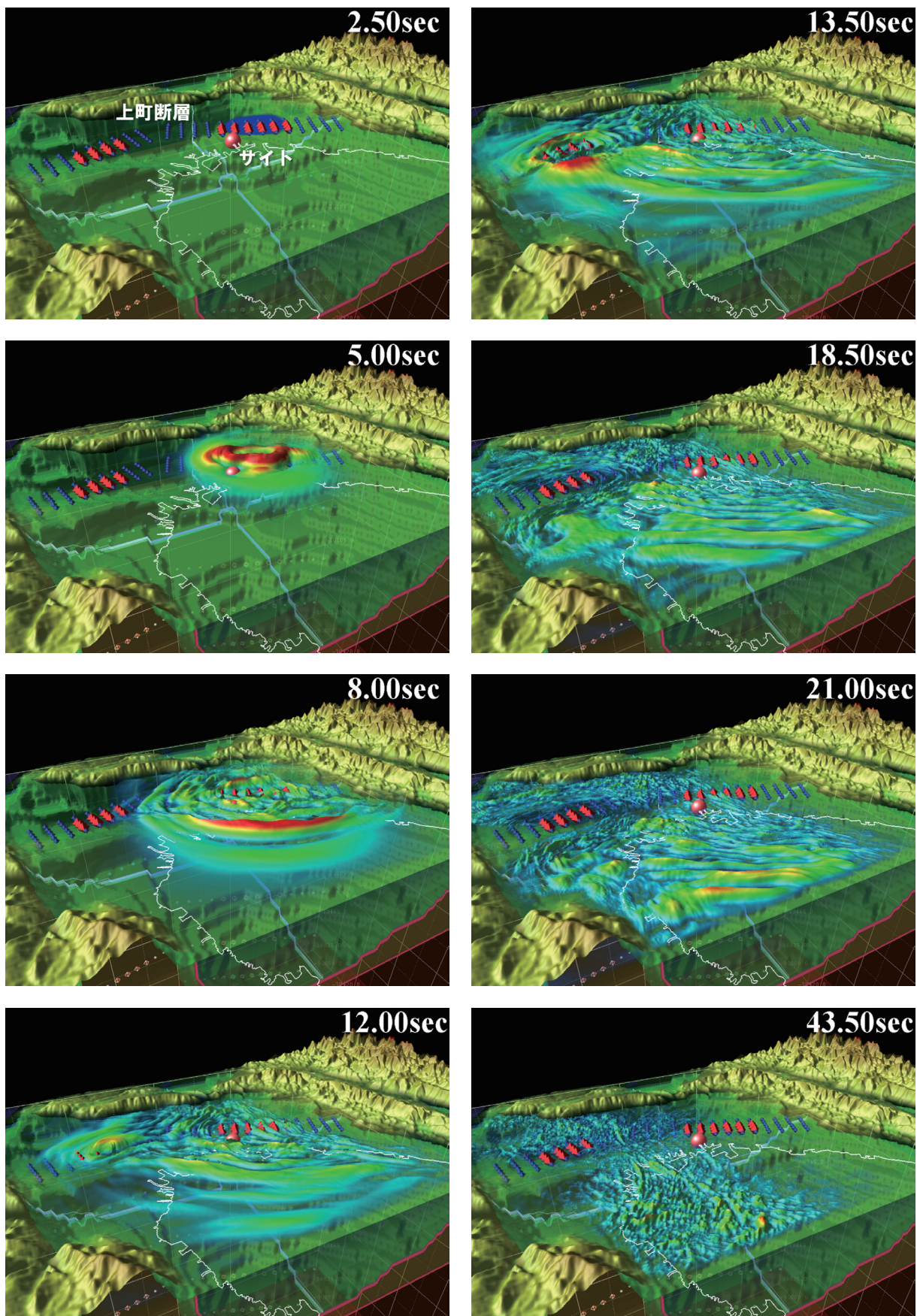


図 4 波動伝播の様子

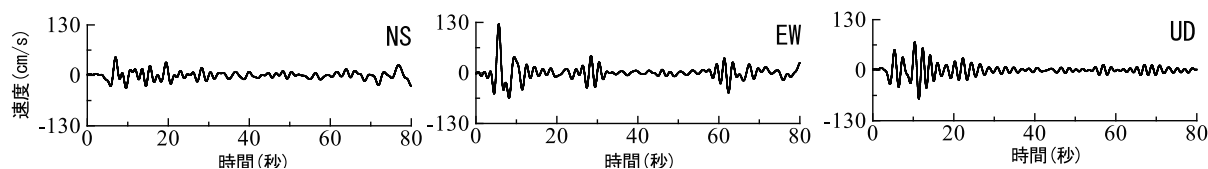


図 5 サイトにおける速度時刻歴波形
(NS：南北成分、EW：東西成分、UD：上下成分)

3. 表層地盤の地震応答解析

3.1 概要

兵庫県南部地震、新潟県中越沖地震以降、各指針の改訂もあり、建築・土木構造物の被害想定 の精度向上が求められている。被害想定 の精度向上には、その構造物近傍を含む地盤の地震動に対するシミュレーションの精度向上が必要となる。そのためには、遠方の影響も考慮した広範囲の領域を解析領域とし、さらに、空間及び時間方向の解像度を向上させたモデルによるシミュレーションが必要となる。近年の計算機性能の向上に伴い、広範囲かつ高解像度の計算モデルの解析が徐々に可能となっているが、一般に入手可能な計算機環境では必要な精度を十分に満たすモデルを解析するのは困難である。本章では、地球シミュレータ上で解析を実施することにより、今後求められる、大規模・高解像度モデルをシミュレーションする上での問題点を確認する。

計算に用いるプログラム SuperFLUSH/3DS¹⁾ は、運動方程式に基づき振動数領域で応答解析を行うプログラムであり、減衰を複素剛性として評価し、また地盤の非線形性は等価線形として評価する。SuperFLUSH/3DS の計算部のおおよその流れを図 6 に示す。本プログラムの特徴である振動数領域で計算を実施するため、それぞれの振動数は独立して解くことが可能である。この部分を並列化し地球シミュレータ上で計算することとする。一般の大規模解析で行われる領域分割による並列化ではないため、プログラムの構成がシンプルとなる。図 7 に検討に用いたモデルを示す。

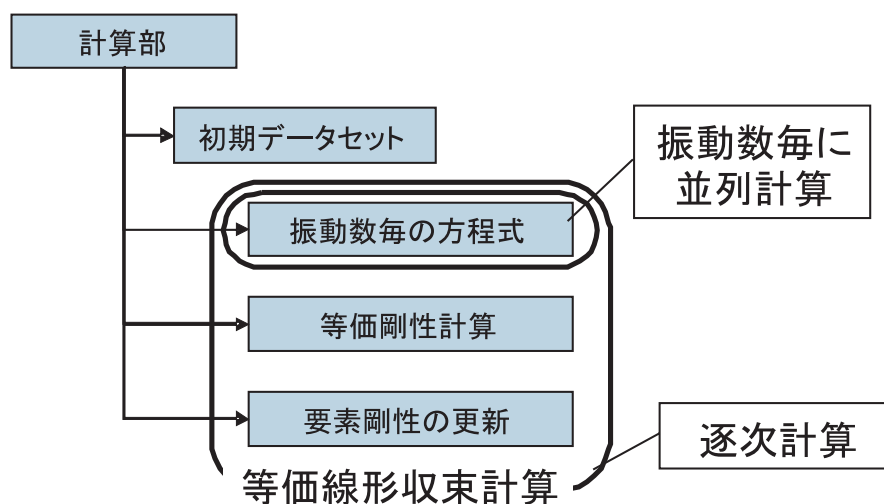


図 6 SuperFLUSH/3DS の計算処理

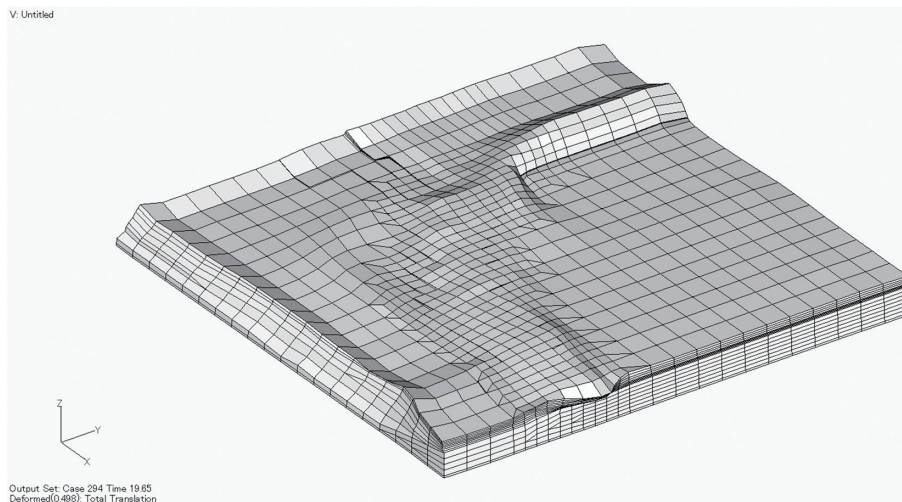


図 7 計算に用いたモデル（変形図）

3.2 結果

地球シミュレータ上で SuperFLUSH/3DS の計算を行い、大規模シミュレーションを実施する上での基礎的なデータを収集した。

- ベクトル化率 97.5%を達成した。
- 本プログラムは、アルゴリズム上、互いに独立な振動数単位で分割可能なため、使用ノード数にほぼ比例する性能向上を確認した。
- ベースとしたプログラムが古いコードであり、各処理間のデータ授受にファイルで受け渡しを行っているため SystemI/O の時間が多い。地球シミュレータの各ノードに搭載されているメモリを十分に活用し、これらのファイルでのデータ授受を削減すると更なる高速化が得られることが予想される。（今後の課題である）

4. 斜面崩壊シミュレーション

4.1 概要

斜面崩壊は、表層に伝播した地震動により地盤が大きく崩れる現象である。K-dem で用いている計算手法は、このような大変形が生ずる現象の再現に適している 3 次元 DEM（個別要素法）である。DEM は個々の要素運動を時々刻々と解き進めることでモデル全体の動的挙動を計算する手法であり、要素形状としては粒子および多面体が一般に用いられている。K-dem では、要素形状として、接触判定が簡便である粒子モデルを用いている。3 次元解析では粒子数が膨大となるため、時間増分の小ささと相まって極めて大規模な計算となる。そのため、一般的な計算機では十分な計算速度を得ることが困難である。

ベクトル計算機である地球シミュレータの性能を引き出すためには、ベクトル長を長くすることが必要である。しかし、DEM による数値解析を実施する場合、粒子間作用力計算において接触粒子数が限られるために、ベクトル長を稼ぐことが難しく、1 プロセッサあたりの能率が極めて低い水準となってしまうことが多い。そこで、地球シミュレータの性能を発揮できるように、プログラムの改造を行った。試解析に用いたモデルを図 8 に示す。なお、初期地圧解析後に境界条件として既往波より作成した強制変位時刻歴を境界面要素に与え、モデル全体を振動させることで、地震波の入力を行った。

4.2 結果

ベクトル長を確保するため、1 プロセッサが担当する計算領域内の全ての接触関係を一つの長大な配列として記録するようにプログラムを改良した。この改良により 95% を超えるベクトル化効率を達成することに成功した。

図 8 に解析結果を示す。右側の図を見ると、破壊の生じた粒子が分離流動している様子が確認できた。しかしながら、モデル分解能が粗いためか、流動粒子が直ぐに隙間にはまることで想定していた規模の流動とはならなかった。今後は領域間通信部分を追加することで高速化を図り、より規模の大きい問題に適用していくことを検討する。ただ、領域を分割する際には、各計算領域間で接触関係の整合性が保持出来るように注意する必要がある。

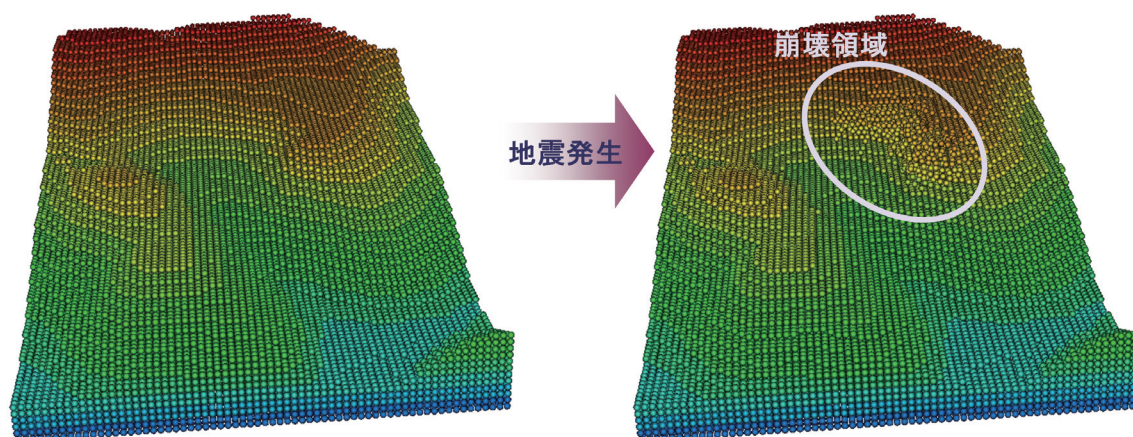


図 8 モデルの崩壊前(左)と崩壊後(右)

5 まとめ

地震時の大規模平野の地盤挙動と斜面崩壊シミュレーション技術の開発を目的に、計算能力の高い地球シミュレータを利用した大規模な計算が出来るように、計算プログラムを地球シミュレータへ移植した。地震波の波動伝播解析については、移植したプログラムを用いて、地震が発生した場合に大きな被害が出ると予測されている大阪の上町断層を対象に大規模な波動伝播解析を行い、構造計画研究所所有の PC クラスタの約 90 倍の計算速度が得られることを確認した。表層地盤の地震応答解析、および、斜面崩壊シミュレーションについては、移植したプログラムを用いて試解析を行い、計算速度向上のための課題を整理した。

参考文献

- 1) (株)構造計画研究所, (株)地震工学研究所, “SuperFLUSH/3D 理論説明書”, Ver3.0.
- 2) 地震調査研究推進本部, 分冊 2 震源断層を特定した地震動予測地図の説明,
http://www.jishin.go.jp/main/chousa/06_yosokuchizu/bunsatsu2.pdf, 2007.
- 3) 堀川晴央, 水野清秀, 石山達也, 佐竹健二, 関口春子, 加瀬祐子, 杉山雄一, 横田裕, 末廣匡基, 横倉隆伸, 岩淵洋, 北田奈緒子, A. Pitarka, “断層による不連続構造を考慮した大阪堆積盆地の 3 次元地盤構造モデル”, 活断層・古地震研究報告, No.3, p.225-229, 2003.