

流体と粒状体の大規模粒子法シミュレーション開発

Development of large-scale particle simulations for fluid and granular dynamics

*西浦 泰介¹、古市 幹人¹、都築 怜理¹、青木 尊之²、阪口 秀¹*Daisuke Nishiura¹, Mikito Furuichi¹, Satori Tsuzuki¹, Takayuki Aoki², Hide Sakaguchi¹

1.海洋研究開発機構、2.東京工業大学

1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2.Tokyo Institute of Technology

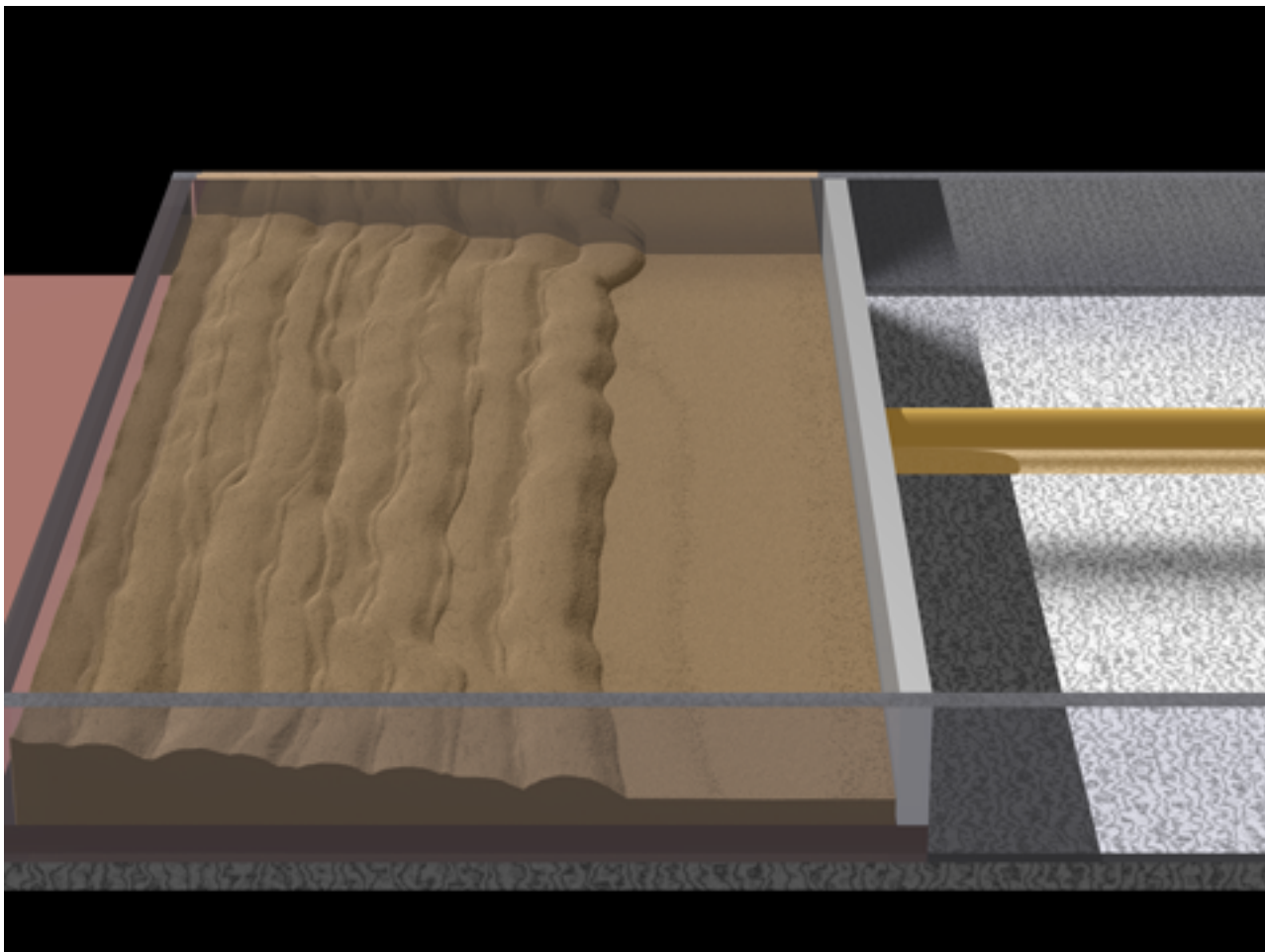
Large-scale parallel computing is important for numerically reproducing actual measurement results and dynamics of phenomena in various science and engineering areas, such as civil engineering, bioengineering, and earth sciences. The computational performance of parallelized software tools plays a critical role in such simulation studies, as these improve the computational accuracy relative to the simulation resolution within a limited computation time. Recent massively parallel computer systems based on shared- and distributed-memory architectures employ various types of arithmetic processors. Current processor designs are known to exhibit totally different computational performance depending on the numerical algorithms and implementation methods employed. Currently, parallel computing generally uses either a multi-core CPU, graphics processing unit (GPU), or many integrated core (MIC) processor. Multi-core CPUs have traditionally been used in high-performance computing, whereas GPUs were originally designed for computer graphics with many arithmetic cores. The common progress of current processor designs is the increase in the number of cores using vector operations such as single-instruction-multiple-data (SIMD). In such a situation, the shared-memory parallelization plays a basic but critical role in dealing with the increasing number of arithmetic cores in an efficient manner.

Particle simulation method (PSM) has a benefit of being mesh-free, allowing the computation of large-scale deformations and fractures of a continuum body without expensive remeshing tasks. As a PSM, smoothed particle hydrodynamics (SPH) is often used for tsunami disaster simulations because of its robustness in free-surface fluid dynamics. The discrete element method (DEM) is one popular PSM for granular dynamics in which geometrical size and shape attributes are provided for each particle. Therefore, the DEM is attractive to simulate granular materials such as sand, pebbles, and other grains.

An efficient parallel implementation of SPH and DEM methods is however known to be difficult especially for the distributed-memory architecture. Particle methods inherently have workload imbalance problem for parallelization with the fixed domain in space, because particles move around and change workloads during the simulation run. Therefore, dynamic load balance is key technique to perform the large scale SPH or DEM simulation. In this presentation, we introduce the several techniques of parallel implementation utilizing dynamic load balancing algorithms toward the high resolution simulation over large domain using the massively parallel super computer system. We will also introduce the applications of large-scale particle simulations such as Tsunami disaster simulation in consideration of structures-soil-fluid interactions and sandbox simulation for thrust dynamics of an accretion prism that require a high performance computing resources.

キーワード：離散要素法、SPH、並列計算、津波、砂箱、付加体

Keywords: DEM, SPH, Parallel computing, Tsunami, Sandbox, Accretion prism



線形分散波理論に基づく理論津波波形データベースの作成とそれを活用した津波即時予測
Development of tsunami Green's function database based on linear dispersive-wave theory
and its application to real-time tsunami forecasting

*対馬 弘晃¹、林 豊¹、馬場 俊孝²、安藤 和人³、加藤 季広⁴

*Hiroaki Tsushima¹, Yutaka Hayashi¹, Toshitaka Baba², Kazuto Ando³, Toshihiro Kato⁴

1.気象庁気象研究所、2.徳島大学、3.海洋研究開発機構、4.日本電気株式会社

1.Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, 2.Tokushima University,
3.JAMSTEC, 4.NEC Corporation

沖合で観測される津波波形からリアルタイムに津波波源を推定し、それに基づき沿岸の津波を即時に予測して、津波警報を住民まで適切に伝達できれば、津波被害の軽減につながる事が期待される。我々は、近地津波を対象として、リアルタイム波源推定に基づく津波予測手法tFISH (Tsushima et al., 2009)の高度化を進めている。本研究では、京コンピュータを活用して、tFISHの構成要素の一つである津波波形グリーン関数のデータベース(DB)を高精度化することが目的である。tFISHの津波予測は、津波波形逆解析と予測波形合成によって行われるものであり、これらの線形解析は津波波形グリーン関数の重ね合わせに基づく。そのため、グリーン関数が実際の津波現象を正しく再現できていないと、その誤差が波源推定と津波予測の誤差に直結する。既存のグリーン関数は線形長波近似によって数値計算したものである。一般に、津波の波長は水深に比べて十分長く、通常はこの近似で伝播過程を再現できるが、深海域で短波長に富む津波が発生すると、たとえ近地であっても波数分散性が強く現れるため(Saito and Furumura, 2009)、線形長波で計算した波形グリーン関数を使うと、波源の推定精度が低下する(Saito et al., 2010)。こうした波源推定および津波予測の精度低下を回避するには、線形分散波理論に基づいて津波波形グリーン関数DBを更新する必要がある。しかし、分散波理論に基づく津波計算は長波理論計算に比べて計算コストが非常に高く、しかもDB構築には3000以上の波源についての津波計算が必要であり、計算資源の総量は膨大になる。そこで本研究では、京コンピュータを活用して大量の高精度津波計算を実施し、津波波形グリーン関数DBの高精度化を図る。対馬ほか (2015, JpGU)では、京コンピュータとそれに最適化された津波計算コードJAGURS (Baba et al., 2015)を活用して現実的な時間内で大量・高精度津波波形計算を効率的に実施する計算方法の設計・実装と、南海トラフ沿い海域のDB構築について報告した。本発表では、千島・日本海溝沿い海域のDB構築と、分散波理論に基づく津波波形グリーン関数を用いることの有効性を調べるために行った津波予測実験について紹介する。

数値実験では、まず断層運動を仮定し、非線形分散波理論に基づいてJAGURS (Baba et al., 2015)によって津波計算をして、得られた津波波形を観測波形とみなす。そして、沖合の観測波形を用いてtFISHで津波予測を行い、沿岸付近のFP(Forecast Point: 気象庁が津波予測で用いる沖合の仮想点)における観測波形と予測波形の比較によって予測結果を評価する。

まず、昭和三陸地震(マグニチュード8.4)を想定した。日本海溝沖よりも沖合のアウトターライズ領域で発生した地震で、高角正断層の震源メカニズムを持つことと、波源域の水深が深いことから、短距離を伝播するうちに分散する。こうした分散の影響が強い津波に対して、本研究で構築したDBは威力を発揮するものと期待される。Kanamori (1971)が推定した震源断層モデルを使って観測波形を作成し、tFISHで津波予測を行った。その結果、線形長波のグリーン関数を用いると、真値にはみられない偽の隆起域が求まってしまい、結果として周辺の沖合津波計が少ないFPでは津波第一波の予測精度が低下した。一方で、分散波グリーン関数を用いると、こうした偽像が解消されるとともに、予測精度も改善した。このように、分散波グリーン関数を用いれば、波源推定と津波予測の精度改善につながりうることがわかった。

次に、内閣府が発表した想定南海トラフ地震(高知沖大すべりモデル)を対象に実験を行った。ここでは簡単のため、破壊伝播速度は無限大として模擬観測データを生成した。試みに、非線形分散波理論と非線形長波理論に基づいて模擬観測波形を計算したところ、両者はほぼ一致した。したがって、この模擬データは分散性の影響が小さい津波といえる。先と同様、分散波と長波でそれぞれ計算したグリーン関数を用いて津波予測を行ったところ、FPの予測波形はほとんど変わらないものとなった。これは、模擬観測データに分散性が含まれ

なかったためであると解釈できる。同時に、対象とする津波の分散性の強さに関わらず、分散波理論に基づく津波波形グリーン関数を常時用いるようにすれば、予測精度を確保できる可能性があることを示唆している。今後さらなる数値実験を行うことで分散波グリーン関数の詳細な性能評価を進める予定である。

本論文の結果の一部は、理化学研究所のスーパーコンピュータ「京」を利用して得られたものです（課題番号：hp150216）。

キーワード：京コンピュータ、津波即時予測、データベース、線形分散波理論、災害軽減

Keywords: K computer, Real-time tsunami forecasting, Database, Linear dispersive-wave theory,
Disaster mitigation

大規模高詳細有限要素シミュレーションコードを用いた日本列島とその周辺の地殻活動予測モニタリング・予測システムの提案

A proposal of monitoring and forecasting system for crustal activity in and around Japan using a large-scale high-fidelity finite element simulation codes

*堀 高峰¹、市村 強²、高橋 成実^{3,1}、汐見 勝彦³、金田 義行^{1,4}

*Takane Hori¹, tsuyoshi ichimura², Narumi Takahashi^{3,1}, Katsuhiko Shiomi³, Yoshiyuki Kaneda^{1,4}

1.独立行政法人海洋研究開発機構、2.東京大学地震研究所、3.防災科学技術研究所、4.香川大学

1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2.Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 3.National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, 4.Kagawa University

Here we propose a system for monitoring and forecasting of crustal activity, especially great interplate earthquake generation and its preparation processes in subduction zone. Basically, we model great earthquake generation as frictional instability on the subjecting plate boundary. So, spatio-temporal variation in slip velocity on the plate interface should be monitored and forecasted. Although, we can obtain continuous dense surface deformation data on land and partly at the sea bottom, the data obtained are not fully utilized for monitoring and forecasting. It is necessary to develop a physics-based data analysis system including (1) a structural model with the 3D geometry of the plate interface and the material property such as elasticity and viscosity, (2) calculation code for crustal deformation and seismic wave propagation using (1), (3) inverse analysis or data assimilation code both for structure and fault slip using (1)&(2). To accomplish this, it is at least necessary to develop highly reliable large-scale simulation code to calculate crustal deformation and seismic wave propagation for 3D heterogeneous structure. Actually, Ichimura et al. (2014, SC14) has developed unstructured FE non-linear seismic wave simulation code, which achieved physics-based urban earthquake simulation enhanced by 10.7 BlnDOF x 30 K time-step. Ichimura et al. (2013, GJI) has developed high fidelity FEM simulation code with mesh generator to calculate crustal deformation in and around Japan with complicated surface topography and subducting plate geometry for 1km mesh. Further, for inverse analyses, Errol et al. (2012, BSSA) has developed waveform inversion code for modeling 3D crustal structure, and Agata et al. (2015, this meeting) has improved the high fidelity FEM code to apply an adjoint method for estimating fault slip and asthenosphere viscosity. Hence, we have large-scale simulation and analysis tools for monitoring. Furthermore, we are developing the methods for forecasting the slip velocity variation on the plate interface. Basic concept is given in Hori et al. (2014, Oceanography) introducing ensemble based sequential data assimilation procedure. Although the prototype described there is for elastic half space model, we will apply it for 3D heterogeneous structure with the high fidelity FE model.