

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 30 日現在

機関番号：82706

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18140

研究課題名(和文)粘弾性体の粒子ベース数値計算法開発 - バラスト軌道沈下メカニズムの解明に向けて -

研究課題名(英文)Development of particle-based simulation method for viscoelastic materials towards elucidation of subsidence mechanisms of ballasted track

研究代表者

西浦 泰介(NISHIURA, Daisuke)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・数理科学・先端技術研究分野・技術研究員

研究者番号：60509719

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：変形する沢山の物体をシミュレーションするには、物体間の衝突や粘弾性変形を同時に計算するための高い技術が求められる。本研究では、有限要素法(FEM)よりも簡単に粘弾性体の挙動を計算するQuadruple Discrete Element Method(QDEM)を開発した。まず、QDEMの計算精度を調べるために片持ち梁の振動解析を行い、振動の周波数と振幅がFEMの結果と良く一致したことから、QDEMの高い計算精度を確認することができた。最後に、バラストと枕木を解析するQDEMをレールの振動を解析するFEMと連成して、バラスト軌道の衝撃応答解析を行い、バラスト挙動の三次元的な分布を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Simulation of a large number of deformable bodies is often difficult because complex high-level modeling is required to address both multi-body contact and viscoelastic deformation. In this study, a quadruple discrete element method (QDEM) was developed for dynamic analysis of viscoelastic materials using a simpler algorithm compared to the standard finite element method (FEM). First, the fundamental performance of QDEM was investigated for viscoelastic analysis. The amplitude and frequency of cantilever elastic vibration were nearly equal to those obtained by the standard FEM. Therefore, the high accuracy of QDEM in the fundamental analysis of infinitesimal viscoelastic deformations was verified. Finally, the sleeper and ballast motion modeled using QDEM was coupled with the rail motion modeled using FEM. The traffic impact response of a ballast particle and a sleeper was analyzed. The three-dimensional spatial distribution of ballast particle displacement was clearly revealed.

研究分野：計算工学

キーワード：バラスト軌道 離散要素法 シミュレーション 並列計算 粘弾性 軌道沈下 有限要素法 DEM

1. 研究開始当初の背景

バラスト軌道（バラスト（碎石や砂利）層で枕木を支持する道床）は、衝撃荷重を効率良く消散させて走行列車の低振動化・低騒音化に役立てられており、列車の乗り心地を快適にする重要な役割をしている。また道床の排水性が良く建設コストも低いことから、バラスト軌道は古くから広く使用されてきた。その一方で、列車走行時に受ける衝撃荷重によってバラストは割れたり摩耗し易いため、バラスト軌道の変形や沈下が生じ易い問題がある。すなわち、バラスト軌道はメンテナンスを頻繁に行う必要があり、バラストを新しく入れ替えて道床を作り直すための保守管理コストが高くなる。そのため、バラスト軌道の最適設計は列車の乗り心地を向上させるだけでなく、走行安全性の向上や保守管理コストの低減において非常に重要な課題である。

バラスト軌道の最適設計とは、衝撃荷重を効率良く消散させると同時に、枕木の変位を可能な限り抑えることが可能な高強度で安定なバラスト道床の構造を見つけることである。現状は、走行する列車の速度や路線に合わせて実験を繰り返し、最適と思われるバラストのサイズや材料、道床の構造を経験的に選定しているが、コストも時間も掛かり容易ではない。また、バラストの高周波振動や摩耗・破壊、衝撃荷重の伝播経路がバラスト軌道の沈下に影響していると予想されているが、その詳しいメカニズムは未だ良くわかっていない。そのため、バラスト軌道が沈下する原理を明らかにし、理論的に最適な道床構造を決定することが求められている。そこで、バラストや枕木の高周波振動や応力の伝播過程といった、実験では困難な微視的な解析を可能にする数値計算手法を開発して、バラスト軌道の沈下メカニズムを明らかにする必要がある。

これまで行われてきたバラスト軌道に対する数値計算としては、主に以下の3つが挙げられる。

- ①バラスト層を連続体として扱う解析
 - ②個々のバラストを有限要素法で解析
 - ③個々のバラストを離散要素法で解析
- ①はバラスト層の弾性変形しか扱えず、バラストの移動やバラスト間の摩擦滑りによるバラスト軌道の沈下が扱えないことが大きな問題である。②も結局バラスト同士は接触点がバネで繋がれており、バラストが自由に動くことはできず摩擦滑りなどの大きな変位は扱えない。③はバラスト間の衝突力や摩擦力に基づいて個々のバラスト挙動を解析できるが、バラストを剛体とし扱っているためにバラスト内部の応力や高周波な振動モードを再現できない。

これらの問題点を踏まえると、個々のバラストの弾性変形を扱うと同時にバラスト同士の接触問題を扱える数値計算手法が、バラスト軌道の沈下メカニズム解明には必要で

ある。また、バラスト自体を弾性体として扱う計算手法は一般的に計算負荷が非常に高くなるため、多数のバラストからなる道床に対する解析を実現するためには計算の大規模高速化も求められる。この様な課題を克服するための新しい数値計算手法の開発及びバラスト軌道沈下メカニズムの解明に対して、研究代表者らが培ってきた離散要素法などの粒子法に対する並列計算アルゴリズムの開発経験やその特許技術、さらには粒子法を土木工学や化学工学などの様々な工学分野に応用してきた経験を有効に役立てることができる。

2. 研究の目的

バラスト軌道における列車走行の低振動化及び安全性の確保には、バラスト道床の施工を適切に行う必要がある。しかし、列車の繰り返し走行によってバラスト軌道が沈下する原因は未だ詳しく解っておらず、バラスト軌道の施工は経験的知見に頼っている部分が多い。また最近では、数値計算も試みられているが、バラスト軌道沈下を再現する計算手法は見当たらない。そこで本研究では、個々のバラストの弾性変形とバラスト間の衝突や摩擦を考慮した新しい数値計算手法を開発することを目的とした。そして、個々のバラストを伝播する応力と変位の関係を詳細に数値解析し、バラスト軌道の沈下メカニズムを明らかにすることを目指した。

3. 研究の方法

本研究では、バラストや枕木の高周波振動に伴う沈下挙動を解析するために、粘弾性体に対する新しい数値計算手法を開発した。本計算手法では、個々のバラストと枕木の弾性変形と粘性減衰を陽解法で解き、バラストや枕木の高周波振動を再現した。また、バラスト間の摩擦相互作用は離散要素法を用いて計算した。つぎに、バラストと枕木に加速度計を埋め込み衝撃荷重を加えた時の振動を実験で測定し、計算結果と比較して本計算手法の妥当性を検証した。妥当性が確認された後、実規模での軌道沈下挙動を再現するために計算プログラムの並列化を行い、枕木数十本程度を含む領域を扱えるようにした。そして、バラストや枕木の挙動が軌道の沈下に及ぼす影響を詳しく調べた。

まずバラスト軌道の振動や沈下挙動をシミュレーションするために、粘弾性体の変形解析に対する新しい数値計算手法として Quadruple Discrete Element Method (QDEM) を開発し、その妥当性を検証した。図1に計算手法の概要を示す。本手法は粘弾性体の構成方程式を粒子法ベースで解法する。まず、物体を四面体要素で分割し、各四面体要素を構成する頂点に所定の大きさの球形粒子（頂点粒子）を配置する。異なる物体の頂点粒子間の接触力を離散要素法で計算することで物体同士の相互作用を考慮できる。各四面体

要素に働く応力は、その四面体要素を構成する4つの頂点粒子座標と速度のみを用いて求められる。そして各四面体要素に働く応力を頂点粒子に振り分け、ニュートンの運動方程式に従って各頂点粒子を動かすことで、物体の変形を陽解法によって解くことができる。

- ◆ 物体内部の応力
 - 変形に対するフック弾性応力E
 - $dx = FdX$ $E = \lambda \text{tr}(\epsilon)I + 2\mu\epsilon$
 - $\epsilon = (FF^T - I)/2$
 - 歪み速度に対する粘性応力V
 - $dv = Ldx$ $V = \eta(L + L^T)$
 - ◆ 物体表面間の相互作用
 - 摩擦を考慮したVoigtモデル
 - 離散要素法で計算
 - 表面粒子を介した相互作用
 - ◆ 頂点の移動
 - 四面体要素の応力を頂点に分配
 - 運動方程式に従って頂点を移動
- ・ F: 変形勾配テンソル L: 速度勾配テンソル
 ・ 四面体要素の任意頂点粒子から他の頂点粒子に対する
 dx : 変形前の相対位置ベクトル dX : 現形状の相対位置ベクトル dv : 相対速度ベクトル

図1 数値計算手法の概要

つぎに、本計算手法の妥当性を検証するために、枕木やバラストの振動特性について、実験結果や解析解および理論解との比較を行った。一方、有限要素法 (FEM) でも同様であるが、粘弾性体の減衰を左右する粘性パラメータは理論的に決定することが困難なため、振動の減衰モードが実験と合うように試行錯誤して適切にフィッティングした。また、実験と同様のバラスト配置を数値計算上で作製することは難しいため、実験結果と計算結果が完全に一致すること自体が不自然である。そのため、研究協力者や専門的知識を有する研究者と相談し、結果にある程度の一致が見られればバラスト軌道の沈下を解析する上で支障は無いと判断することにした。

一方、計算の高速化と大規模化については、グラフィックスプロセッサ (GPU) を用いた計算の並列化を行うことによって実現した。そして、数十本程度の枕木を含むバラスト軌道に対して大規模計算を行い、バラストや枕木の振動がバラスト軌道の沈下に与える影響を調べた。

4. 研究成果

(1) 精度検証

片持ち梁試験によって、本研究で開発した QDEM の精度を検証した。精度検証に用いるコンクリート棒の寸法を図2に示す。250mm × 220mm × 2400mm の、ほぼ枕木と同じサイズのコンクリート棒を解析対象とした。片方の端節点を x, y, z 方向全てにおいて動かないように固定し、もう片方の端点全てに入力荷重として合計 200 kN を加えた。なお、急に 200N を加えると、コンクリート棒が振動し、限られた計算時間内に定常状態に収束しない可能性が有る。そのため、計算開始から1秒間で 200N になるように、徐々に荷重を時間に対して線形で増加させて与えることとした。そして、1秒間静的な状態にして定常状態における変位および応力を調べた。その後、荷重を一気に開放し、動的な解析を行うことで梁の振動に対する振幅および周波数について FEM および解析解との比較を行

った。比較対象とする FEM の計算では、一次要素を用いて計算を行い、QDEM と FEM では同じメッシュ要素を用いた。

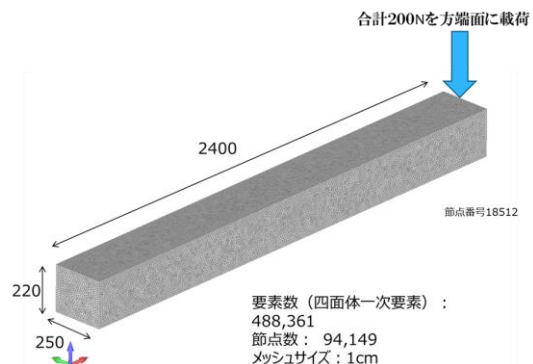


図2 コンクリート梁の形状

図3に梁に荷重を加えて静的状態に至る過程における梁の変位を示す。ここで荷重を加えている端面のほぼ中央に位置する節点の変位を表している。四面体要素数は 488,361、節点数は 94,149 である。QDEM は FEM の結果を非常に良く再現していることが確認できた。FEM によって得られた定常状態における変位は 91.93975 μm であり、QDEM では 91.94045 μm であったため、その差は僅か 0.0008% であった。一方、解析解は 92.32156 μm であり、本手法により得た結果との差は 0.4% であった。

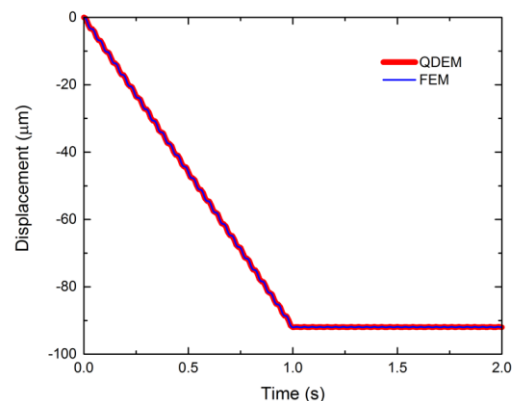


図3 静的条件における梁の変位

つぎに 2.0 秒におけるミーゼス応力を以下の式から求め、QDEM および FEM におけるミーゼス応力分布を、それぞれ図4 (a) と (b) に示す。QDEM と FEM でほぼ完全に応力分布が一致していることが確認できた。また、各要素におけるミーゼス応力の FEM と本手法における差は平均で 0.04% であり、最大でも 0.12% であった。

さらに、荷重を開放した時の動的状態における検証を行った。図5に 2.0 秒で荷重を開放した後の梁の変位を示す。梁は弾性的に振動し、その振動挙動は FEM と QDEM で良く一致していることが確認できた。ここで、振動

の周波数は約 27Hz であり、これは解析解 (26.9Hz) とともに非常に良く一致している。

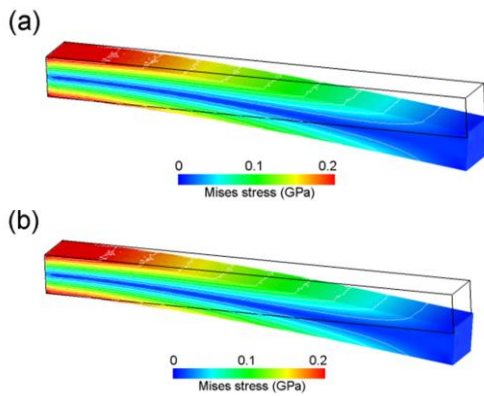


図4 ミーゼス応力分布の比較

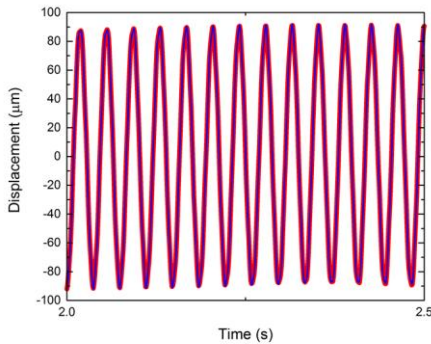


図5 動的条件における梁の変位

最後に、計算速度については、QDEM は GPU (Nvidia Co., Geforce GTX Titan) を 1 枚使用して計算し、FEM は 16 台の CPU (Intel Co., Core i7-5960X) を用いて計算している。本手法は 2 日、FEM は 1 日で計算しているが、Time Step はそれぞれ 10^{-7} と 3×10^{-5} であり、1 Step 当りの計算速度は本手法の方が FEM よりも 300 倍程度高速であることがわかった。FEM では陰解法を用いているため、巨大なマトリックス計算が必要となり、メモリコストが膨大で、実際に CPU が稼働している時間は全体の 3-4% 程度である。

(2) バラスト軌道の衝撃応答解析

計算に用いるバラスト軌道では、枕木は一般的なコンクリート製の PC3 号枕木を用いた。計算領域は枕木 1 本分とし、線路方向には周期境界条件を課した。まず、レール下の面に存在する枕木要素にレールからの衝撃荷重を入力値として与える。ここで与える衝撃荷重は、実際の列車走行試験から得られた実測値を用いた。図 6 に入力荷重と、バラスト軌道の沈下量を示す。最初はバラスト層が密に詰まっていないために大きく沈下するが、その後列車が通過する度に徐々に沈下する様子を再現できた。

さらに、図 7 には、入力荷重と本手法およ

び実験によって得られた列車通過時における枕木の振動周波数特性を示す。ここで振動加速度の測定箇所は、線路脇近くの枕木上である。100Hz、200Hz、320Hz 付近に顕著なピークが見られ、本手法によって実験結果を再現することができている。100Hz のピークは枕木の剛体振動モードであり、200Hz は枕木の一次の曲げ振動モードとして知られている。さらに、枕木の振動とバラスト層の弾性振動の共振によって、320Hz 付近にピークが現れている¹⁾。

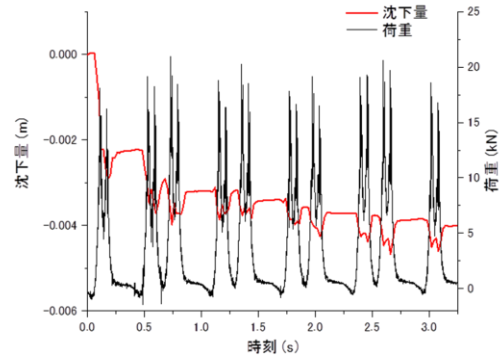


図6 バラスト軌道の沈下量と入力荷重

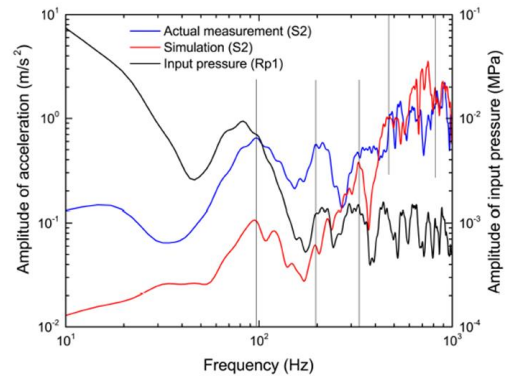


図7 入力荷重と枕木の周波数特性

つぎに、GPU (Nvidia 製、Tesla P100) を 4 台搭載した計算機を 2 台使用し、合計 8 台の GPU を用いて並列計算を行うことにより、24 本分の枕木領域を解析可能にした。なお、バラスト軌道の初期配置モデルは、上記の方法で枕木 1 本分の計算を行い、ある程度締固められたバラスト軌道を軌道軸方向に複製して 24 本枕木初期配置モデルを作成した。大規模計算によって得られたバラスト軌道の変位分布を図 8 に示す。なお、左右のレールで荷重が多少異なるため、枕木の変位も左右で異なる結果となった。また本計算モデルにおいて、5 台の車両を通過させるのに要した計算時間は、概ね 2 日程度であった。したがって、24 本分の枕木モデルが正常に計算可能であることが確認できた。

本大規模計算によって得られた、枕木下 10cm における水平断面内のバラスト層変位

分布を図9に示す。枕木の丁度中央付近を境にして、バラスト層のx方向の変位が逆転していることが分かる。また、枕木と枕木間に位置するバラスト層では、列車の進行方向と逆向きにバラストが動いていることが確認できる。これらの結果から、図10に示す様に、枕木は車輪の通過前後で反対向きに回転し、その結果、枕木直下のバラスト層は枕木中央部分を境に反対向きの方に動いていることが考えられる。さらに列車の加速方向に対して反対向きにレールが引っ張られることによって、レールと連結されている枕木も引っ張られ、結果として枕木と枕木間のバラストは列車の加速方向と反対向きに動くことが分かった。

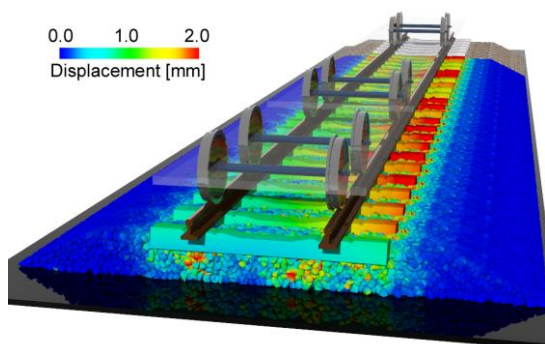


図8 枕木24本モデルによる変位分布

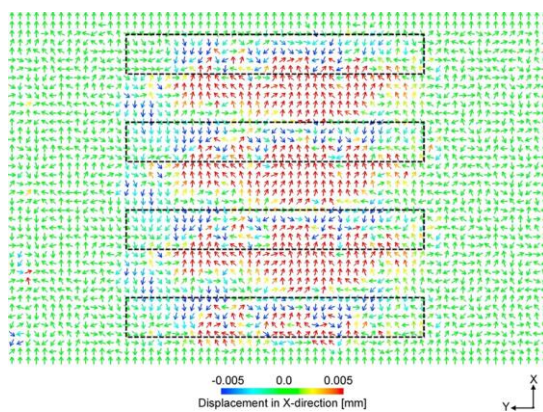


図9 バラスト層水平断面内の変位分布

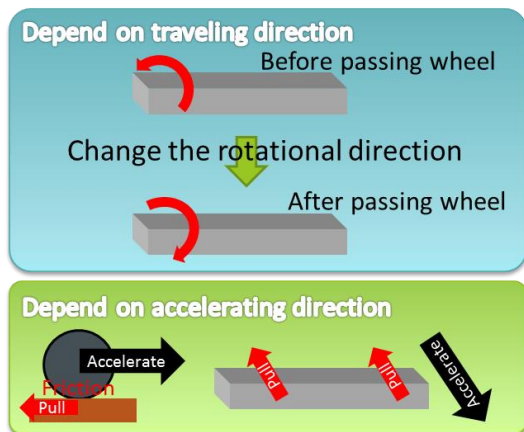


図10 列車走行方向と枕木挙動の関係

以上より、本研究で開発した新しい粘弾性体の数値解析手法によって、これまでの数値計算では再現できなかった高周波に振動する個々のバラスト挙動とその振動特性がバラスト軌道の沈下挙動に及ぼす影響を検討できるようになった。さらに、本計算手法に独自の高速化手法を適用したことで、これまでに類を見ない大規模計算が可能になり、未だ誰も数値計算で解析したことが無い様な線路方向に対する3次元的なバラスト軌道の沈下挙動を再現できるようになった。今後、本計算手法を用いることでバラスト軌道の沈下メカニズムが明らかになり、振動の吸収性が高く沈下し難いバラスト軌道を施工するために必要な有益な知見が得られる。この成果は、バラスト軌道の保守管理コストの低減につながると共に、列車の騒音や乗り心地、安全性の改善にも役立つために社会的にも有益な役割を果たす。またバラスト軌道の解析だけでなく、開発した計算手法は落石災害や石垣施工、地盤掘削などの様々な分野に広く応用が利くため、今後の発展性も期待できる。

<参考文献>

1) Aikawa, A. Vertical Natural Modes of Gravel Aggregate in Ballasted Railway Track. In Proceedings of the International Conference on Particle-Based Methods, Fundamentals and Applications, Barcelona, Spain, 28-30 September 2015.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① Daisuke Nishiura, Hirotaka Sakai, Akira Aikawa, Satori Tsuzuki, Hide Sakaguchi. Novel discrete element modeling coupled with finite element method for investigating ballasted railway track dynamics. Computer and Geotechnics, 査読有, Vol. 96, 40-54, 2018, doi:10.1016/j.compgeo.2017.10.011
- ② Daisuke Nishiura, Hide Sakaguchi, Akira Aikawa. Development of Viscoelastic Multi-Body Simulation and Impact Response Analysis of a Ballasted Railway Track under Cyclic Loading, Materials, 査読有, Vol. 10, Paper No. 615, 2017, doi:10.3390/ma10060615
- ③ Akira Aikawa, Masakazu Takagaki, Hirotaka Sakai, Masae Hayashi, Daisuke Nishiura, Hide Sakaguchi. Construction of Large-Scale Ballasted Track Analytical Model by QDEM, RTRI Report, 査読有, Vol. 30, No. 2, 23-28, 2016
- ④ 西浦 泰介, 阪口 秀. スイスの鉄道を水の流れから守る, Blue Earth, 査読無,

[学会発表] (計 12 件)

- ① Akira AIKAWA, Daisuke Nishiura, Hide Sakaguchi. Development of the dynamic granular elastic-body analysis for sleeper-ballast structures by Elastic DEM (QDEM), The 15th International Conference of Track & Maintenance (VTM2018), Paris (France), 2018 年 2 月
- ② 西浦 泰介, 粒子法シミュレーションの可視化事例, 第 79 回CG・可視化研究会, 海洋研究開発機構横浜研究所, 2017 年 9 月
- ③ 西浦 泰介, 阪口 秀, 相川 明. 離散要素モデルによる鉄道バラスト軌道の振動解析, 第 30 回計算力学講演会 (CMD2017), 近畿大学東大阪キャンパス, 2017 年 9 月
- ④ Daisuke Nishiura, Mikito Furuichi. Particle simulations with HPC for engineering applications, The 8th International Workshop of Many-core Solutions in Computing Problems in Science, Engineering and Big Data, Guiyang (China), 2017 年 8 月 (招待講演)
- ⑤ Satori Tsuzuki, Daisuke Nishiura, Hide Sakaguchi. Large-Scale Simulations of Viscoelastic Deformable Multi-Body Systems Using Quadruple Discrete Element Method on Supercomputers. The 7th International Conference on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering (COUPLED PROBLEMS 2017), Rhodes Island (Greece), 2017 年 7 月
- ⑥ 都築 怜理, 西浦 泰介, 阪口 秀. Large-scale Simulations of Viscoelastic Multi-body Systems Using Quadruple Discrete Element Method on Supercomputers, 第 22 回計算工学講演会, ソニックシティ, 2017 年 5 月
- ⑦ 西浦 泰介, 阪口 秀, 相川 明, Givani De Cessare. 水流に負けない鉄道軌道構造の設計シミュレータ, JAMSTEC2017, 東京国際フォーラム, 2017 年 3 月
- ⑧ 西浦 泰介. 粒子法に大規模化を求めるのは間違っているだろうか ~億千万の胸騒ぎ~, 第 51 回計算粉体力学研究会, 同志社大学今出川キャンパス, 2016 年 12 月
- ⑨ 西浦 泰介, 都築 怜理. DEMIGLACE/ALLEM ANDE, 粉体工業展 2016, 東京ビックサイト, 2016 年 11 月
- ⑩ 西浦 泰介, 阪口 秀, 相川 明. 鉄道バラスト軌道に対する新しい粘弾性体解析手法の開発. 第 19 回応用力学シンポジウム, 北海道大学, 2016 年 5 月

- ⑪ Daisuke Nishiura, Hide Sakaguchi, Hirotaka Sakai, Akira Aikawa. Discrete element modeling of ballasted railway track, The 3rd International Workshops on Advances in Computational Mechanics, Tokyo (Japan), 2015 年 10 月 (招待講演)
- ⑫ 西浦 泰介, 阪口 秀, 相川 明. Multi-QDEM の Multi-GPU 計算によるバラスト軌道の衝撃応答シミュレーション, 第 20 回計算工学講演会, つくば国際会議場, 2015 年 6 月

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 粒子シミュレーション装置、粒子シミュレーション方法及び粒子シミュレーションプログラム
発明者: 西浦 泰介
権利者: 国立研究開発法人海洋研究開発機構
種類: 特許
番号: 特開 2017-157076
公開年月日: 2017 年 9 月 7 日
国内外の別: 国内

○取得状況 (計 1 件)

名称: 解析装置、解析方法、解析プログラム及び記録媒体
発明者: 阪口 秀、西浦 泰介
権利者: 国立研究開発法人海洋研究開発機構
種類: 特許
番号: 5800145
取得年月日: 2015 年 9 月 4 日
国内外の別: 国内

[その他]

- ① 2017 年 5 月 31 日~6 月 2 日に、さいたま市ソニックシティで開催された、第 22 回計算工学講演会において、グラフィックスアワード優秀賞を受賞。
- ② 2017 年 5 月 31 日~6 月 2 日に、さいたま市ソニックシティで開催された、第 22 回計算工学講演会において、グラフィックスアワード特別賞 (MSC Apex 賞) を受賞。
- ③ 2016 年 5 月 31 日~6 月 2 日に、新潟市朱鷺メッセで開催された、第 21 回計算工学講演会において、グラフィックスアワード最優秀賞を受賞。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西浦 泰介 (NISHIURA, Daisuke)
国立研究開発法人海洋研究開発機構・数理科学・先端技術研究分野・技術研究員
研究者番号: 60509719