

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：35302

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24360352

研究課題名(和文)惑星探査ロボットの走行性能評価のためのPEPTによる紛体三次元解析

研究課題名(英文) Three-Dimensional Analyses of Powder with PEPT for Evaluation of Motion Performance of Planetary Rover

研究代表者

桑木 賢也 (KUWAGI, Kenya)

岡山理科大学・工学部・教授

研究者番号：80302917

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,400,000円

研究成果の概要(和文)：月や火星などの天体は非常に細かい砂礫で構成された表面を持つため、ローバーの効率的な移動のためにはローバーと砂礫との力学(テラメカニクス)が重要となる。本研究では粉体解析に用いられるPEPT(Positron Emission Particle Tracking)を導入することでこれまで不可能であった砂礫粒子の3次元運動の可視化を行った。一軸の車輪装置を製作し、イギリス・パーミンガム大学で集中的に実験を行った。スリップ率、舵角を変え、様々な条件での車輪下の砂礫粒子の運動軌跡を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：Planetary rovers may have to move on soft terrain. The movement of sand or soil particles under the wheels or tracks greatly affects the robot's ability to maneuver. There is a simple but difficult problem with measuring particle movement. Only 2D visualization techniques that take a surface picture of the ground or use transparent boards are available. A nuclear 3D imaging technique called positron emission particle tracking (PEPT) was adopted in this study. PEPT detects pairs of gamma rays emitted by a positron-emitting radionuclide of a tracer particle. We proposed a 3D dynamic imaging technique for describing the movement of sand under a rotating wheel using PEPT, and we examined the trajectory of sand particles for slippage ratios from -25% to 50%. The obtained results are novel and significant because there was previously no method available to observe the 3D trajectory of a sand particle under a wheel.

研究分野：工学

キーワード：宇宙利用・探査 紛体工学 混相流 ロボティクス 可視化 テラメカニクス

1. 研究開始当初の背景

月や火星、小惑星などの表面を探索する小型ローバーに関する研究が広く行われている。その目的は様々であるが、このような天体の表面の多くは非常に細かい砂礫で覆われており、車輪や履帯または脚による移動機構を持つローバーが走行不能になる可能性が高い。従って、効率的に移動するためには砂礫とローバーがどのような力学(テラメカニクス)に支配されるのか明らかにする必要がある。

【従来研究】

従来研究では砂礫と車輪の相互作用によって特徴づけられる牽引力が重要となることが知られている。この牽引力は、砂礫と車輪との間に生じる剪断応力分布によってモデル化する方法、砂粒子間の相互作用をモデル化し、粒子そのものの運動を数値的に解析する離散要素法や有限要素法を組合せる FE-DEM 手法[1]がある。前者は、剪断応力分布モデルを与えることで解析的に、後者は、粒子運動の計算から数値的に牽引力が得られる。これらのモデルの妥当性を検証する方法としては、車輪やクローラを砂礫上で走行させ、走行後の轍を観察する静的手法[2]、もしくは、透明板に挟み込まれ格子状に色分けされた砂礫の平面運動を観察する準動的的手法[3]がある。しかしながら、砂礫の各粒子を動的かつ三次元的に観察することは困難で、実際に走行中(もしくはそれと同等)の砂礫の運動を可視化する試みはこれまでなされてこなかった。

【砂礫運動可視化の重要性】

砂上を走行する場合、推進力を得るために車輪や履帯にラグもしくはグラウザと呼ばれる板などの突起が取り付けられる。ラグは砂を掻く(剪断する)ことで牽引力を増加させる。従って、走行時、車輪が地盤に対して滑りながら回転するため、砂礫地盤内の剪断面付近で砂礫がどのような運動をしているのか可視化することは、車両の牽引力がどのようなメカニズムで発生しているのか詳細に明らかにすることにつながる。さらに、これまで極めて限定的にしか観察できなかった粒子の三次元的かつ動的挙動を把握することは、DEM 解析などの妥当性を検証するための重要な知見を与える。

2. 研究の目的

月や火星などの天体は非常に細かい砂礫で構成された表面を持つため、効率的な移動のためにはローバーと砂礫との力学(テラメカニクス)に関する研究が重要となる。本研究では、粉体解析に用いられる PEPT を導入することでこれまで不可能であった砂礫粒子運動の可視化を実現し、DEM 解析を併用することで車輪や履帯と砂礫地盤との相互作用の三次元的かつ動的な解析手法の確立を目指した。

3. 研究の方法

本研究は、軟弱地盤における装輪および装軌車両のテラメカニクスのために、PEPT による砂礫粒子の運動解析と DEM 解析を合わせることで新しい運動性能評価手法を構築することを目的としている。これを実現するために、まず、一輪運動試験装置を構築し、PEPT による車輪下砂礫粒子の運動解析手法の確立をおこなう。

3.1 PEPT の測定原理

PEPT とは医療診断機器 PET(Positron Emission Tomography, ポジトロン断層法)を粉体解析に適用した手法である。一般に PET は中性子が照射された特定物質が身体のどこに集積するかを見る手法であるのに対して、PEPT は放射性同位体となった粒子をトレーサとして、その運動を時々刻々追跡し粉体挙動の解析を行う手法である。

PEPT の原理を Fig.1 に示す。中性子を照射され放射性同位体となった原子は陽電子を放出し、その陽電子は近傍の原子の電子と対消滅する。その際、対の光子(ガンマ線)をそれぞれ 180° 反対方向に放出する。これを対に設置した検出器で検出し、粒子の位置を特定するものである。

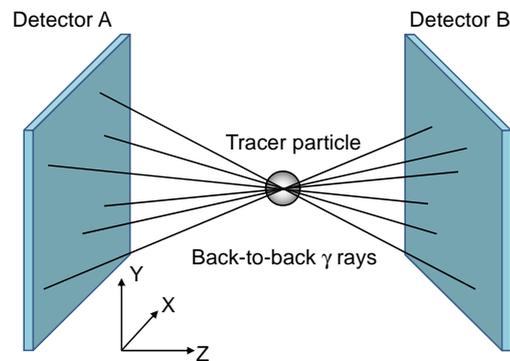


Fig.1 Measurement principle of PEPT.

3.2 PEPT の測定原理

テストベッドを測定装置にセットした様子を Photo 1 に示す。測定装置には ADAC 社

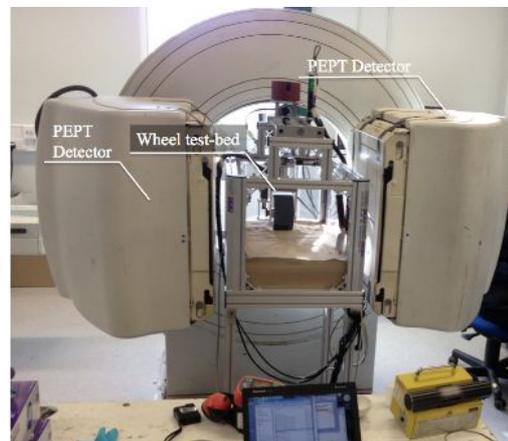


Photo 1 Experimental set-up

製 Forte (デュアルヘッドガンマカメラ)を用いた。テストベッドを Fig.2 に示す。ベッドはガンマ線検出器の高さと幅に合わせた仕様とした。

実験に用いた車輪を Photo 2 に示す。車輪は径 150mm, 幅 80mm, 砂槽: 幅 400×奥行 700×深さ 400, 砂の高さ: 160 mm である。

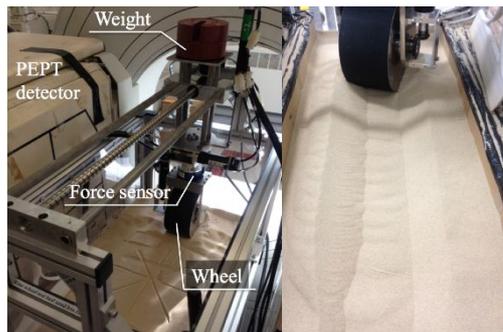


Photo 2 Single wheel testbed

3.3 実験手順

実験は以下の手順で行った。

- (1) 砂をできる限り一様に耕す(ベーン剪断試験により確認)
- (2) 所定の初期位置にトレーサ粒子を配置
- (3) ホイールのすべり率, すべり角を与え実験を行い, PEPT によってトレーサ位置を計測

4. 研究成果

4.1 ホイール位置の決定

PEPT による可視化実験の際には通常トレーサ粒子は一つのみ用いる。これはデータの分離が難しいことと, トレーサ粒子の軌跡が交錯した場合, 追跡が難しくなるといったためである。しかし, トレーサ粒子がお互い離れていて, 交錯しない場合は複数粒子を用いた例も存在する[4]。今回, トレーサ粒子位置とともにホイールの位置変化を知る必要があったため, 車軸にトレーサ粒子を付け, 2つのトレーサ粒子を用いて実験を行った。実験結果を鉛直断面に関して見たものを Fig.2 に示す。実験条件はスリップ率 50%, 舵角 0°, 車輪の速度 7.3mm/s, 角速度 0.2rad/s である。図から車輪が近づくとその全部の砂が盛り上がり, その後, 車輪に巻き込まれて後方に移動し, 車輪が通過して静止している様子が分かる。

4.2 滑り角を伴う車輪下における砂粒の軌跡

同一条件, ここでは滑り角 20 度, 滑り率 25%でトレーサ粒子の初期位置を変えて行った実験結果を Fig.3 に示す。この図から, 正面から見て砂粒はいったん車輪表面によって左前方に押し出され, その後, 車輪に巻き込まれることで右後方に移動していることがわかる。車輪の影響は表面で左右±100 mm,

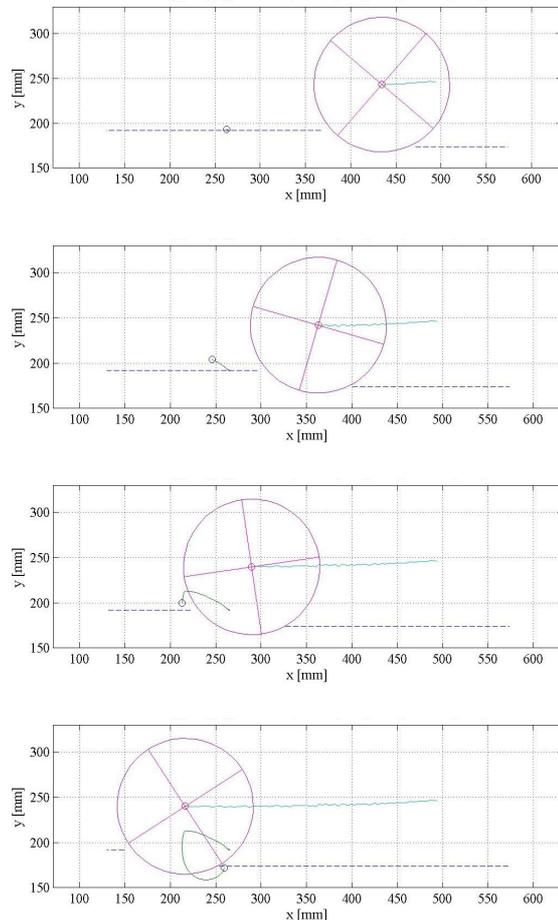


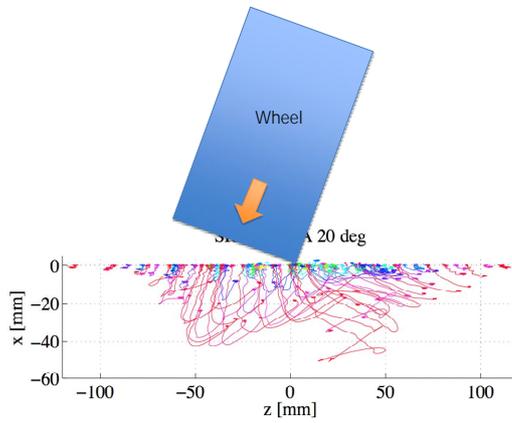
Fig.2 Movement of both tracer particle and wheel

車輪中心付近で深さ方向に 70 mm 程度まで及んでいることが確認できる。車輪表面と側面の境界である角は $z = 10$ mm 付近を x 軸に平衡に移動する。したがって, xz 平面の軌跡を見るとこの付近を境界に右側 $z > 10$ では車輪側面で粒子が右前方に押し出され, 左側 $z < 10$ で車輪表面によって左前方に押し出される zy 平面を見ると車輪の回転にあわせて粒子全体が左から右に円弧状の軌跡を描いていることがわかる。

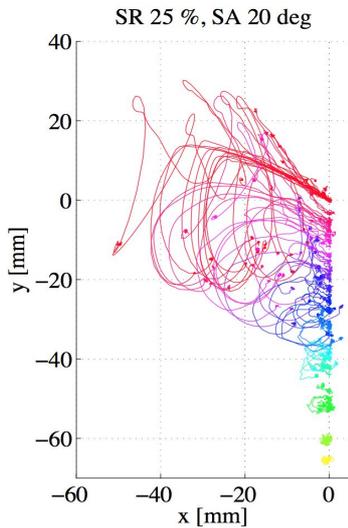
4.3 粒子軌跡の再現性の検討

次に軌跡の再現性について述べる。砂槽内に配置できるトレーサ粒子は1つだけである。したがって軌跡は同じ滑り率, 滑り角などの条件下で初期位置を変化させた複数回実験を行い, 全ての軌跡を重ね合わせて砂粒全体の3次元挙動を図示することになる。そのため, 同じ初期位置における軌跡は同じパターンを描くこと, つまり, 再現性を仮定していることになる。この再現性が成り立つかどうか実験により検証することが重要である。

Fig.4に滑り率50%, 滑り角0°の場合において, 車輪中央の砂表面を初期位置とする軌跡を示している。図から砂表面にある粒子の軌跡に大きなばらつきが見られる。



(a) Top view



(b) Side view

Fig.3 Slippage ratio: 25%,
Slippage angle: 20 deg.

砂表面の粒子は車輪の接近に伴って前方に押し出され、やがて回転によって車輪に巻き込まれる形で砂の内部に埋没する。砂表面においては上部に存在する砂がほとんどないため、車輪の回転にそって下方に巻き込む砂の流れがきわめて弱く、巻き込まれる地点が車輪と砂のわずかな位置関係などの相違によって大きく変動するため、軌跡にばらつきが発生するものと考えられる。これは、流動層の実験に置いてみられた渦と渦の境界における流れの局所的な不安定性に類似した傾向である。

4.4 ラグランジュ型からオイラー型へのデータ変換

本研究では PEPT 測定により得られた粒子軌跡から速度場を求め、そのデータからせん断応力を推算することを目指している。

まず、粒子軌跡(ラグランジュ型データ)から速度ベクトル図(オイラー型データ)を得ようとするとき、粒子軌跡が解析領域全体にわ

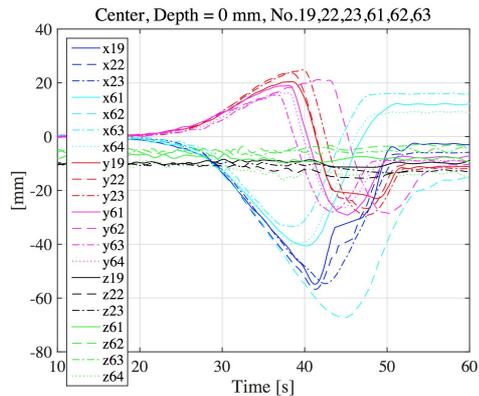
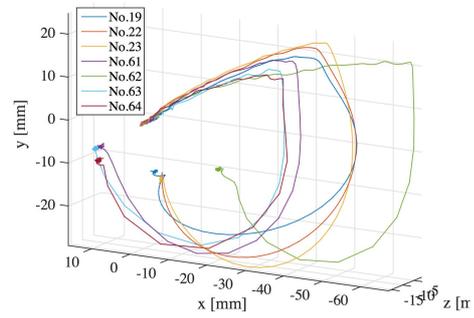


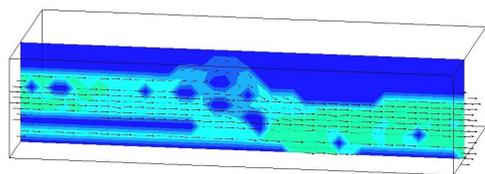
Fig. 4 Repeatability
(Center on Surface , SR50%)

たって存在するように長時間測定するか、多数のトレーサ粒子を用いる。しかし、PEPTでは複数の粒子の信号を分離することが難しく、3つのトレーサ粒子を用いた例[4]はあるが、一般には1つのトレーサ粒子で測定を行う。実験上の制約から速度ベクトル図を得るのに十分な軌跡データを得ることが難しい場合も考えられる。このような場合、限られたラグランジュ型データからオイラー型データを得る必要性が生じる。

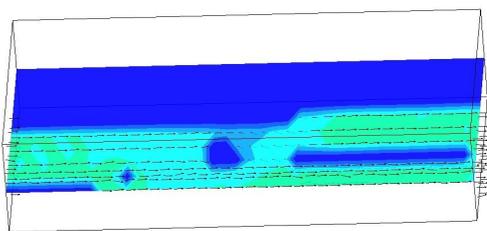
本研究では車輪下の砂の運動の PEPT による測定データから、まず車輪からの相対座標系へ変換した。これは PEPT により得られた車輪下の砂のトレーサ粒子の軌跡が、車輪の位置に依存した流跡線で、非定常的なデータであるためである。このままでは車輪位置に応じて解析しなくてはならず、使えるデータも限られてくる。そこで座標系として車輪の中心を基準としたものを用い、車輪に対する砂の相対座標によるデータに変換する。このとき、車輪の位置も同時に測定することが必要になるが、本実験では、4.1で述べたように車軸にトレーサ粒子を貼り付け、砂の中のトレーサ粒子とともに2個を用いて両者の位置を同時に測定した。両者の位置関係から得られた相対座標系のデータは定常問題として考えることができる。その後、オイラー型データである速度ベクトル図を求めた。

車輪から見た相対座標系の粒子軌跡のデータを元にオイラー的な速度ベクトル図を求めた。トレーサ粒子の初期位置に応じて、

深さ方向(y)を 10cm 刻み, 車輪軸方向(z)を 20cm 刻み, 進行方向(x)を 20cm 刻みとするメッシュに分割し, その中の軌跡から速度を求め, それを平均した値をそのメッシュの速度ベクトルとした. 結果を Fig.5 に示す.



(a) Vertical section (Z=330mm)



(b) Horizontal section (Y=35mm)

Fig.5 Velocity vectors of particles
(SR: -25%, SA:0°)

図中の色は各メッシュの速度の大きさを表している. (a)の鉛直面の上部, (b)の水平面の奥側(図の上部)は粒子が存在しないため, 速度0の青色で表示されている. しかし, 粒子が存在するところは, 車輪が動いているため相対速度は0とはならない. つまり青色の空隙が見られるところはトレーサ粒子が存在しない領域とみることができる. 例えば図中に丸い空隙と線上の空隙が見られるが, この部分はデータが欠損していることを意味しており, この部分をどう扱うかを検討しなくてはならない.

<引用文献>

- [1] Takatsu, Y., Nakashima, H., Shinone, H., Matsukawa, H. and Kasetani, T., Proceedings of the 16th International Conference of the ISTVS – Turin November 25-28, pp. 150-155 (2008).
- [2] Koizumi, T., Tsujiuchi, N. and Mori, S., Proceedings of the 16th International Conference of the ISTVS – Turin November 25-28, pp. 221-227 (2008).
- [3] 城崎博美, 北野昌則, 農業機械学会誌, Vol. 41, pp. 391-396 (1979).
- [4] Parker, D. J., Leadbeater, T. W., Fan, X., Hausard, M. N., Ingram, A., & Yang, Z., Measurement Science and Technology, Vol. 19, 094004 (2008)

5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者に

は下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

Tetsuya Kinugasa, Kenya Kuwagi, Thomas W. Leadbeater, Joseph Gargiuli, David J. Parker, Jonathan P. K. Seville, Koji Yoshida, Hisanori Amano, Three-dimensional dynamic imaging of sand particles under wheel via gamma-ray camera system, Journal of Terramechanics, 査読有り, Vol. 62, 2015, pp.5-17
doi:10.1016/j.jterra.2015.06.004

〔学会発表〕(計12件)

岡 雄大, 濱口 航貴, 衣笠 哲也, 桑木 賢也, 吉田 浩治, 転動する車輪下における砂粒軌跡の再現性について, 日本機械学会中国四国支部第54期総会・講演会, 2016年3月9日, 松山市

桑木賢也, 小金篤人, 衣笠哲也, 馬渡佳秀, T. W. Leadbeater, J. Gargiuli, D. J. Parker, J. P. K. Seville, PEPTを用いた振動流動層内の粒子運動の可視化, 第21回流動化・粒子プロセッシングシンポジウム, 2015年12月10日, 北九州市

Tetsuya Kinugasa, Kenya Kuwagi, Thomas W. Leadbeater, Joseph Gargiuli, David J. Parker, Jonathan P. K. Seville, Koji Yoshida, and Hisanori Amano, Validation of 3-D Visualization Technique for Sand Particle Movement via Positron Emission Particle Tracking, 13TH European Conference of the of the International Society for Terrain Vehicle Systems, International Society for Terrain Vehicle Systems, 2015年10月21-23日, Rome

桑木賢也, 衣笠哲也, T. W. Leadbeater, J. Gargiuli, D. J. Parker, J. P. K. Seville, 車輪にかかるせん断力を求めるための砂粒子の軌跡データの変換, 第33回日本ロボット学会学術講演会, 2015年9月4日, 東京都

衣笠哲也, 桑木賢也, T. W. Leadbeater, J. Gargiuli, D. J. Parker, J. P. K. Seville, 吉田浩治, 天野久徳, 滑り角を持つ車輪下における砂粒の3次元軌跡の可視化, 第33回日本ロボット学会学術講演会, 2015年9月4日, 東京都

桑木賢也, 重政 秀道, 藤岡 拓也, 衣笠哲也, PEPT測定により得られた砂の粒子軌跡データからオイラー速度場への変換, 第20回流動化・粒子プロセッシングシンポジウム, 2014年12月12日, 岡山市

衣笠哲也, 桑木賢也, 岡 雄大, 柴圭一,

Thomas W. Leadbeater, Joseph Gargiul, David J. Parker, Jonathan P. K. Seville, 吉田浩治, 天野久徳, PEPT を用いた砂粒の 3 次元運動の可視化と解析, 第 20 回流動化・粒子プロセッシングシンポジウム, 2014 年 12 月 12 日, 岡山市

桑木賢也, 衣笠哲也, Thomas W. Leadbeater, Joseph Gargiul, David J. Parker, Jonathan P. K. Seville, PEPT 測定により得られた砂の粒子軌跡からの車輪にかかるせん断力の推算, 化学工学会第 46 回秋季大会, 2014 年 9 月 17 日, 福岡市

衣笠哲也, 桑木賢也, Thomas W. Leadbeater, Joseph Gargiul, David J. Parker, Jonathan P. K. Seville, 吉田浩治, 天野久徳, 車輪下の砂粒子挙動を 3 次元的可視化する, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 SI2013, 2013 年 12 月 20 日, 神戸市

衣笠哲也, 桑木賢也, Thomas W. Leadbeater, Joseph Gargiul, David J. Parker, Jonathan P. K. Seville, 吉田浩治, 天野久徳, 車輪下における砂粒子の 3 次元軌跡について -PEPT を用いた 3D 動的位相計測-, テラメカニクス研究会, 2013 年 12 月 13-14 日, 石垣市

Tetsuya Kinugasa, Kenya Kuwagi, Thomas W. Leadbeater, Joseph Gargiuli, David J. Parker, Jonathan P. K. Seville, Koji Yoshida, and Hisanori Amano, Three-dimensional imaging for sand under wheels: application of PEPT to terramechanics, Proceedings of the 7th Americas regional conf. of the ISTVS, 2013 年 11 月 6 日, Tampa, Florida, USA

桑木賢也, 衣笠哲也, Thomas W. Leadbeater, Joseph Gargiul, David J. Parker, Jonathan P. K. Seville, PEPT を用いた車輪下の砂の運動の可視化, 混相流シンポジウム 2013, 2013 年 8 月 9 日, 長野市

〔図書〕(計 1 件)

桑木ほか, 粉粒体の構造制御, ハンドリング技術 - プロセス設計・トラブル対策事例集 -, 技術情報協会, pp. 353-357 (総ページ 873), 2013 年 9 月

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 SI2013 優秀講演賞: 衣笠哲

也, 桑木賢也, Thomas W. Leadbeater, Joseph Gargiul, David J. Parker, Jonathan P. K. Seville, 吉田浩治, 天野久徳, 車輪下の砂粒子挙動を 3 次元的可視化する, 2013 年 12 月, 神戸市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

桑木賢也 (KUWAGI, Kenya)
岡山理科大学・工学部・教授
研究者番号: 80302917

(2) 研究分担者

衣笠哲也 (KINUGASA, Tetsuya)
岡山理科大学・工学部・教授
研究者番号: 20321474

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

PARKER, David J.
イギリス・Birmingham 大学
LEADBEATER, Thomas W.
イギリス・Birmingham 大学
GARGIULI, Joseph
イギリス・Birmingham 大学
SEVILLE, Jonathan P. K.
イギリス・Surrey 大学