

応力発光材料を用いた地盤内のリアルタイムな  
作用力分布可視化技術の開発とその応用

近藤 明彦  
高野 大樹  
小濱 英司  
Richard J. Bathurst

2020.2

## 応力発光材料を用いた地盤内のリアルタイムな 作用力分布可視化技術の開発とその応用

近藤 明彦\*・高野 大樹\*\*・小濱 英司\*\*\*・Richard J. Bathurst\*\*\*\*

### 要 旨

港湾空港施設の設計において、厳しい外力条件に対して合理的な設計を行うには、対象とする構造物とその地盤材料の変形・破壊モードを詳細に把握することが重要である。地盤材料の変形・破壊挙動の検討においては、そのメカニズム解明に向けた土質試験、模型実験や数値解析が実施されている。特に、模型実験は数値解析の妥当性確認の観点からも重要であり、各種センサーによる計測や撮影した画像の解析などが広く行われている。近年では、ひずみ場の検討として X 線 CT スキャンによる三次元データとその画像解析を用いた地盤内の粒子単位の変位やひずみの局所化過程が盛んに検討されている。一方、応力場の検討は、土圧計や間隙水圧計による点の計測が多く、光弾性体や X 線回折による方法は偏光器やシンクロトロンなど高価な設備に加え、粒子形状、材料やトモグラフィに伴う計測間隔の制限などにより、計測水準に差があるのが現状である。

そこで、本研究では、応力発光材料に着目することで、地盤材料の変形・破壊過程における粒子単位の作用力の分布をリアルタイムに可視化する技術の開発を行った。本稿では、応力発光現象の概要と応力発光粒子の作成について述べるとともに、キャリブレーションと二次元断面の小型供試体における換算した作用力の検証を行った結果を報告する。また、その応用として、杭模型貫入時における地盤内の変形・破壊プロセスを可視化した結果を報告する。

**キーワード**：粒状体，応力発光，可視化，応力鎖，杭貫入

---

\* 耐震構造研究グループ 研究官  
\*\* 地盤改良研究グループ 主任研究官  
\*\*\* 耐震構造研究グループ長  
\*\*\*\* 客員フェロー, Royal Military College of Canada 教授  
〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所港湾空港技術研究所  
電話：046-844-5058 Fax：046-844-0255 E-mail：kondoh-a@p.mpat.go.jp

## **Development of Visualization Method of Inter-particle Force Distribution by Using Mechanoluminescent-coated Particle and Its Application**

**Akihiko KONDO\***

**Daiki TAKANO\*\***

**Eiji KOHAMA\*\*\***

**Richard J. BATHURST\*\*\*\***

### **Synopsis**

In designing port and airport facilities, it is important to investigate the deformation and failure modes of the target structure and its ground in order to make a rational design under severe external conditions. In the study of deformation - failure behavior of geo-materials, laboratory tests, model experiments and numerical simulation have been carried out to reveal the mechanism. In particular, model experiments are important from the viewpoint of validation of numerical simulation results. The model test results have been investigated through the measurements by various sensors and image analysis. Recently, three-dimensional data of strain field have obtained by X-ray CT scan, the displacement of each particle and its strain distribution using image analysis have been actively investigated. On the other hand, stress fields have often been measured by earth pressure gauges or pore water pressure gauges as a point measurement. The photo-elasticity material and X-ray diffraction methods enables to investigate for two or three dimensional measurements, but these method needs an expensive equipment such as polarizers and synchrotrons, and limitation in particle shapes or measurement interval due to tomographic scan. Currently, there is a difference in measurement level.

The authors focused on the mechanoluminescence material for visualizing the inter-particle contact force and its transition of soil particles as a solution of the problems mentioned above. The mechanoluminescence material is force induced luminance material. In this study, we reported the introduction of the mechanoluminescence phenomenon, application for granular material through the coating, calibration and its validation in 2D assemblies. Moreover, an application of pile penetration process as a typical geotechnical problem was also reported.

**Key Words:** Granular material, Mechanoluminescence, Visualization, Force chains, Pile penetration,

---

\* Researcher, Earthquake and Structural Dynamics Group  
\*\* Senior Researcher, Ground improvement Group  
\*\*\* Head of Earthquake and Structural Dynamics Group  
\*\*\*\* Visiting Research Fellow, Professor and Research Director, Royal Military College of Canada  
3-1-1, Nagase, Yokosuka, Kanagawa 239-0826, Japan Port and Airport Research Institute  
Phone : +81-46-844-5058 Fax : +81-46-844-0839 E-mail : kondoh-a@p.mpat.go.jp

## 目 次

要 旨 .....	3
1. まえがき .....	7
2. 応力発光粒子の概要 .....	7
2.1 応力発光材料 .....	7
2.2 応力発光粒子の作成 .....	8
3. 応力発光粒子のキャリブレーション .....	9
3.1 実験概要 .....	9
3.2 キャリブレーション結果と考察 .....	10
3.3 まとめ .....	12
4. 二次元断面における粒状体への適用と検証 .....	13
4.1 実験概要 .....	13
4.2 実験結果と考察 .....	13
4.3 まとめ .....	15
5. 変形・破壊メカニズム検討への応用：杭貫入時における可視化 .....	16
5.1 実験概要 .....	16
5.2 実験結果と考察 .....	16
5.3 まとめ .....	18
6. 結論 .....	19
謝辞 .....	19
参考文献 .....	19

## 1. まえがき

港湾空港施設の合理的な設計を行うためには、高精度な外力条件と地盤の調査に加えて、構造物とその地盤の変形・破壊モードを考慮することが重要である。特に、地盤材料の変形・破壊モードの検討においては、地盤材料が離散的な粒子で構成される粒状体であり、粒子間における滑りや回転というミクロスケールの現象が、マクロな変形・破壊挙動に強い非線形性をもたらすため、マルチスケールな観点から大変形や破壊に至るプロセスを観察することが重要である<sup>例(1),2)</sup>。粒子単位の再現による数値解析では、このプロセスをひずみ場と応力場から詳細に検討できるため非常に有用であるが、解析結果は適用したモデルの解であるため、妥当性検証の観点から模型実験による詳細な検討が必要である。

模型実験において、ひずみ場と応力場から変形・破壊メカニズムを検討するために、様々なセンサや画像解析手法が用いられている。ひずみ場の計測では、点の計測としてレーザー変位計やひずみゲージの利用、面の計測として連続撮影した画像の相関からひずみ分布を算出するデジタル画像相関法などが広く用いられている。近年では、X線CTスキャン技術により、3次元空間的に地盤材料の変位を粒子単位で高精度に捉え、ひずみの局所化過程などが盛んに検討されている。一方で、応力場の計測技術については、土圧計や間隙水圧計による点の計測が主流であり、計測水準に隔たりがあるのが現状である。これらの計測では、計測機器の受圧面が土粒子より大きい場合平均的な値となり、観測対象よりも大きい計測機器自体の存在による計測値への影響も懸念される。近年では、光弾性体<sup>3)5)</sup>やX線回折<sup>6)8)</sup>を用いた応力の測定がなされているが、偏光器やシンクロトロンなど高価な設備が必要であり、材料や粒子形状に限られることや、トモグラフィに伴う計測間隔の制限により動的な問題に適用出来ないといった課題がある。

そこで、本研究では力学的作用に応じて発光する応力発光材料に着目して、地盤材料の粒子単位の作用力分布の可視化による変形・破壊メカニズムを検討する方法の開発を行った。応力発光現象は、材料によって可視光線を含む様々な波長の発光をするため一般的なカメラで安価に計測することが可能であり、発光強度は力学的作用に対して連続的に変化することから動的な問題においてもリアルタイムな計測が可能である。本稿では、応力発光材料によって、土粒子としてのガラスビーズ自体を外力作用に応じて発光する応力発光粒子とすることで粒子単位の作用力分布の可視化を行った。本報告では、得られ

た発光強度から作用力を換算するために、様々な作用力条件でキャリブレーションを実施し、地盤材料への応用として二次元断面における載荷実験で作用力分布の検証した結果を報告する。また、応力発光粒子を用いた変形・破壊モードの可視化例として、相対密度を変化させた地盤材料に杭模型を貫入させた際の作用力分布を検討した結果を示している。

## 2. 応力発光粒子の概要

### 2.1 応力発光材料

応力発光材料は、力学的な作用に応じて発光する現象を示す材料であり、約400年前のF.Baconによる砂糖での発光が初報告とされる。これまでに、様々な応力発光材料が発見されており、その種類も、弾性領域の作用で発光するElasticoluminescence、塑性領域の作用で発光するPlasticoluminescence、破砕によって発光するFractoluminescenceに分類<sup>9)</sup>されている。本研究では、Elasticoluminescenceに分類される応力発光材料として、産業技術総合研究所の徐らの開発した弾性領域の応力増分に比例した発光強度を示す材料<sup>10),11)</sup>を用いている。この材料は、ユーロピウムを発光中心としてドーブした欠陥制御型アルミン酸ストロンチウム(SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>:Eu, SAOE)であり、結晶構造を高度制御した母材となる無機結晶の骨格中に発光中心となる元素を固溶した代表的な材料である。このSAOEは青色から紫外線の波長の光によって励起され、力学的作用によって波長520nmを中心とした緑色の発光を示す。その他の材料として、橙色の発光を示すマンガンを発光中心としてドーブした硫化亜鉛ZnS:Mnや赤色の発光を示すブラセオジウムを発光中心としてドーブしたチタン酸バリウム・カルシウム(Ba,Ca)TiO<sub>3</sub>:Prなどが知られており、紫外線領域から赤外線領域までの様々な波長の発光を示す材料を選択することが出来る。

本研究では、このSAOEを応力発光材料として選択している。この応力発光材料は粉末状であるため、利用にあたっては堺化学工業株式会社が製造する二液性エポキシ樹脂と混合させた塗料を用いている。塗料であることによって、観察対象の表面に塗布することで、応力状態を発光で表す材料にすることが可能となる。これは、力学的な作用によって、観察対象の母材の変形と共に表面に塗装されているエポキシ樹脂が変形することで、混合されているSAOEにも力が伝わって発光するためである。既往研究における応用例として、コンクリート等の微小亀裂の検出<sup>12-14)</sup>や固体の応力分布計測<sup>10)11)15)16)</sup>がある。

## 2.2 応力発光粒子の作成<sup>17)</sup>

本研究では、地盤材料の粒子単位の作用力を観察するために、土粒子と同程度の密度を有する球形ガラスビーズを用いて、その表面に応力発光材料を塗布することで作成した。塗装に用いた球形ガラスビーズは直径3.0mm、密度2.5 g/cm<sup>3</sup>である。塗装にあたっては、医薬品、農薬や肥料等の造粒製品への塗装方法<sup>18) 19)</sup>を参考に、整粒機（ダルトン社製マルメライザーQ400）に塗装対象のガラスビーズを入れて流動させながら、ガラスビーズの重量比25%の応力発光塗料を少量ずつ滴下させて塗装する。塗料の乾燥に伴って粒子同士が接着してしまうため、これを軽減するためにブロッキング防止剤としてホワイトカーボンをガラスビーズの重量比で0.5%を混合している。塗装においては、各塗装につき10回重ね塗りすることで、均一性が向上するよう配慮した。塗装後は、塗膜の発光強度を増加させるために、135度のオーブンに1時間半晒すことでエポキシのキュアリングを行っている。

塗装された粒子の状態を確認するために、走査型電子顕微鏡（JEOL社製JSM-IT300）を用いた塗装前後の粒子表面の観察と、X線CTスキャン装置（Comscantecno社製ScanXmate-D200RSS900）により、塗膜断面を観察した。図-2.1 (a)には塗装前のガラスビーズ、図-2.1 (b)には塗装後の応力発光粒子、図-2.1 (c)には応力発光粒子の表面を拡大した画像を示す。図より、塗装前のガラスビーズの表面に凹凸は少なく、形も真球に近いことが確認できる。塗装を行った発光粒子は、表面全体に塗装されていることが確認でき、図-2.1 (c)の拡大図からは、発光粒子の表面に重ね塗りによる層が確認できる。また、図-2.2に、同走査型電子顕微鏡を用いたエネルギー分散型X線分光法による分析による塗装表面の元素分析として、検討対象の塗装面におけるストロンチウムとアルミニウムの分布を示す。図より、応力発光材料のストロンチウムとアルミニウムは均一に分布していることから、塗膜における均一な応力発光材料の分布が確認できる。

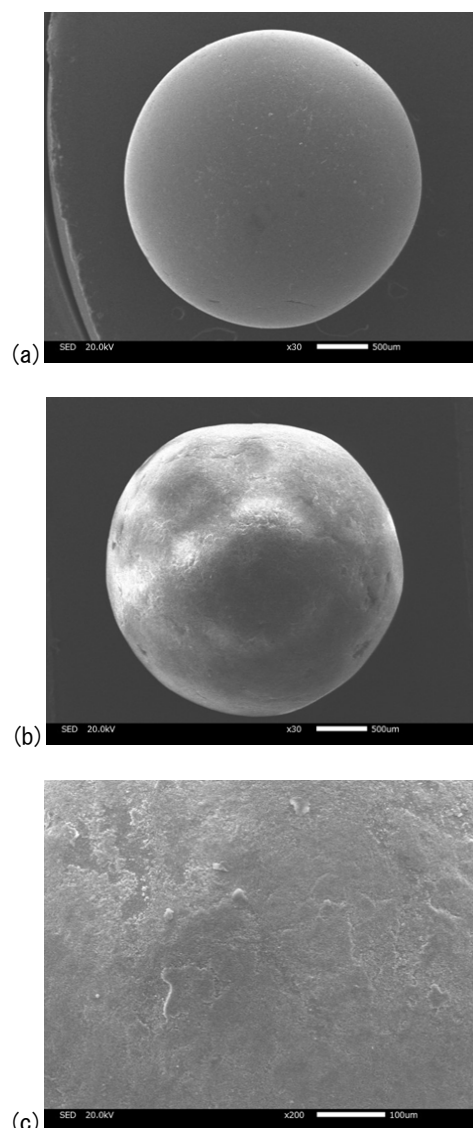


図-2.1 SEMによる塗装前後のガラスビーズ

(a) 塗装前, (b) 塗装後, (c) 塗装後の200倍拡大画像

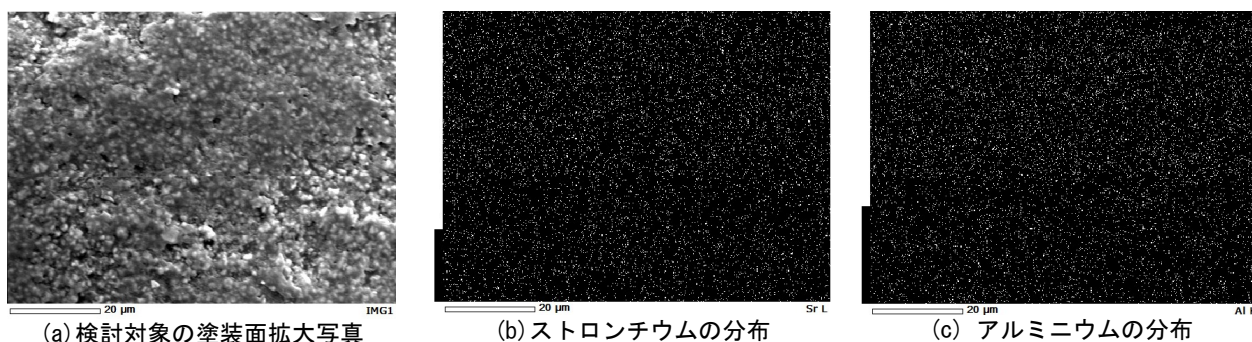


図-2.2 エネルギー分散型X線分光法による分析（EDS分析）による塗装面における元素分析

図-2.3に、X線CTスキャンによる応力発光粒子の断面画像を示す。図中の黒い部分が間隙、グレーの部分がガラスビーズ、白い部分が塗膜である。図より、塗膜は各粒子の表面全体にほぼ一定の厚さで塗装されているといえる。画像解析ソフトウェアパッケージImageJ<sup>20)</sup>を用いて膜厚を測定したところ、平均膜厚は69.67 $\mu\text{m}$ 、塗膜厚の標準誤差は1.033 $\mu\text{m}$ であった。この検討は、既往の研究において塗膜厚の増加とともに発光強度が増加する傾向が指摘されているためである<sup>21)</sup>。

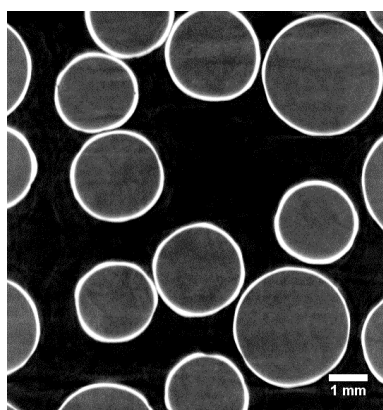


図-2.3 X線CTスキャンによる応力発光粒子の断面図

### 3. 応力発光粒子のキャリブレーション<sup>17)</sup>

#### 3.1 実験概要

応力発光粒子の発光特性を図-3.1に示す実験装置を用いてキャリブレーションを行った。供試体は、高さ30mm、幅3.3mm角の空洞を持つアクリル製の角パイプ内に、応力発光粒子を鉛直に3個設置することで作成した。この応力発光粒子の上下には、直径3.0mmのステンレス丸棒を設置し、これを載荷板で押すことで粒子に載荷される。載荷は、万能試験機（島津製作所製Micro Autograph MST-I Type HR）を用いて、載荷速度を $2 \times 10^{-5} \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ から $0.5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ で変化させて実施した。

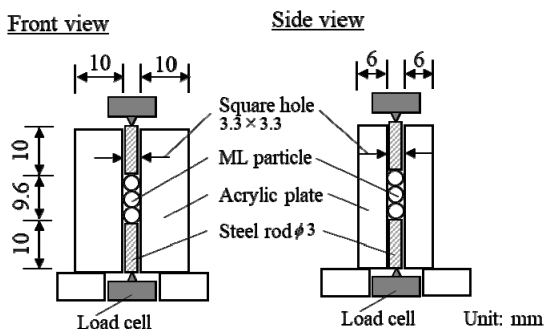


図-3.1 応力発光粒子のキャリブレーション装置

応力発光粒子の励起は、紫外線LED（CCS社製LDL-205X12UV2-365）を用いて行った。この紫外線LEDは、波長365nmを中心とした紫外線を照射し、設置した100mmの距離で $3.75 \text{ mW/cm}^2$ の照射強度を有している。紫外線照射タイミングは $1\mu\text{s}$ 単位のプログラム制御が可能なコントローラーを用いて設定している。

撮影条件として、市販の高感度カメラ（SONY社製カメラ $\alpha 7\text{sII}$ とマクロレンズSEL50M28）を供試体から260mmの位置に設置した。撮影条件として、ISO感度25600、解像度 $1920 \times 1080$ ピクセル、RGB各8ビットスケール、1秒あたり120枚の撮影を行った。なお、撮影はリモートで手動トリガーとなっている。また、撮影にあたり環境光による発光強度への影響を防ぐため、供試体を暗室に設置して撮影を行っている。

実験手順は、下記の3ステップで実施した。1) 紫外線LEDで応力発光粒子を60秒間励起する。2) 60秒間待機する。3) 供試体に所定の載荷速度で載荷を実施する。ここで、60秒間の待機は、励起による応力発光粒子の燐光強度が経過時間とともに低下し、載荷による発光が十分観察できるまでの時間として試行錯誤により設定したものである。また、載荷時の発光強度は、待機時間の増加によって低下するため、一定とする必要がある。

載荷条件として、載荷速度は $0.50, 0.167, 0.0833, 0.050, 0.0167 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ で実施した。

また、応力発光粒子の発光挙動の検討にあたり、画像解析方法などを示すために、基本的な載荷時の力学的挙動と発光時の撮影画像について例を用いて示す。まず、図-3.2に応力発光粒子の力学的応答として、作用力と変位の関係を示す。図より、若干の設置荷重による差は見られるが、三次元弾性球におけるヘルツ理論の冪指数 $2/3$ と一致していることが確認できる<sup>22)</sup>。なお、この載荷実験により、塗膜の硬さをガラスビーズと塗膜を直列配置した合成ばねとみなした測定値により、ばね定数が $4380 \text{ N/mm}$ と求められた。

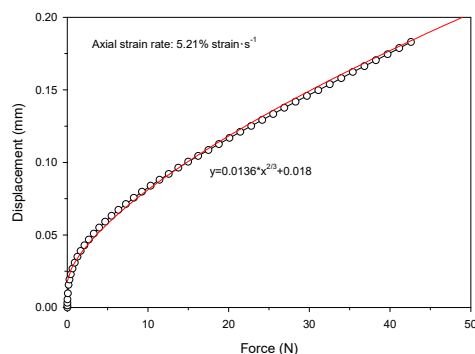
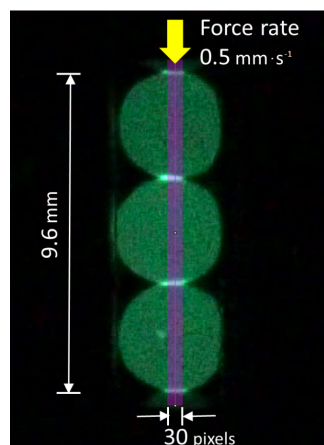
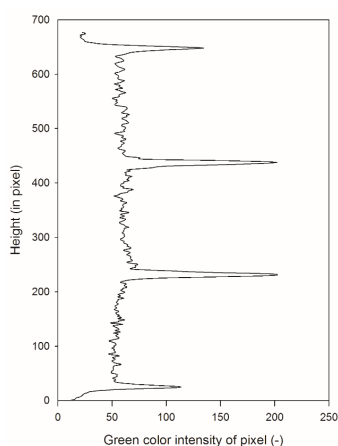


図-3.2 応力発光粒子の変位—作用力関係



(a) 載荷時の発光例



(b) 中央線の発光輝度分布

図-3.3 キャリブレーション試験時の発光

図-3.3 (a)に3個の応力発光粒子に $0.5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ で載荷した際の撮影画像を示す。図より、載荷によって、粒子全体と粒子間接点で発光がみられ、特に、粒子間の接点では粒子全体の発光より明るい発光が確認できる。本検討では、この発光強度差を用いて粒子全体と粒子間接点でキャリブレーションを行った。図-3.3 (b)には、粒子の中心線から30ピクセルの幅における緑色の発光強度値の鉛直分布を示している。粒子全体の平均した発光強度は65から75である。これに対して、粒子間接点の発光強度は、載荷板（ステンレス丸棒）と応力発光粒子の接点で120から140、応力発光粒子間の接点で190から200と、応力発光粒子間の接点の発光強度は、載荷板との間より2倍程度となっている。これは、粒子の膜厚が応力発光粒子間では2倍となっているため、同じ作用力増分が与えられた際に、ひずみ速度（応力増分）も比例して2倍となるため、発光輝度が塗膜のひずみ速度（応力増分）に比例する応力発光材料の特性により、発光強度も2倍程度になったと考えられる。

次に、この撮影画像をもとに粒子全体と粒子間接点の発光強度の経時変化を画像解析により検討する方法を下記4ステップで示す。1) 接点を含む粒子位置に対応する全ピクセルの発光強度を抽出する。この時、粒子と背景の境界においては、粒子の発光強度の最低値と背景の発光強度の最高値による閾値をもとに分類する。2) 接点を含む粒子全体の平均発光強度を算出する。3) 得られた平均発光強度より高い発光強度のピクセルを接点に対応するピクセルに分類する。4) 接点に分類されたピクセルを除いた平均発光強度以下のピクセルについて、再度、粒子全体の平均発光強度を算出する。

この平均発光強度を、粒子の平均ピクセル輝度 (average pixel luminance of particle, 以下APL) としてキャリブレーションで用いることとした。また、粒子間接点に対応するピクセルの発光強度の指標については、接点に対応するピクセルが少ない場合や255で発光強度が飽和した場合でも算定することができるようにピクセル輝度の合計を指標として用いている。なお、この合計値は簡単のために255で除して正規化しており、キャリブレーションで用いる粒子間接点の指標としては、粒子間接点の正規化ピクセル輝度合計値 (sum of normalized pixel luminance at contact point, 以下CPL) を用いることとした。以上の方法によって、載荷過程における粒子とその接点における発光強度をそれぞれ求めてキャリブレーションを行う。

### 3.2 キャリブレーション結果と考察

#### (1) 粒子全体の発光挙動に関するキャリブレーション

図-3.4にキャリブレーション代表ケースとして、載荷速度 $0.5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ （軸ひずみ速度 $5.21\% \text{ strain}\cdot\text{s}^{-1}$ ）の結果を示す。図-3.4 (a)に作用力の経時変化を、図-3.4 (b)に作用力増分と粒子の平均ピクセル発光値の経時変化を示す。図-3.4 (c)には、作用力増分とAPL関係とその回帰直線を示している。回帰直線の決定係数からも作用力増分とAPLには十分な精度の関係があると判断できる。

ここで、作用力増分のAPLに対する勾配（回帰直線の勾配）は、図-3.5に示されるように軸ひずみ速度に対して変化する。図の縦軸は、図-3.4 (c)に示される作用力増分のAPLに対する勾配であり、横軸の軸ひずみ速度は供試体の粒子3個の高さと載荷速度から求められている。また、図中のレンジバーは、5種類の載荷速度で各3回行った載荷実験における最大と最小の勾配を示している。これらの点について、指数関数で近似曲線を得ており、この曲線を用いて次章の実験条件における校正係数を算出する。また、このような傾向は、試験片に塗装した既報においても報告されている<sup>14)23)</sup>。



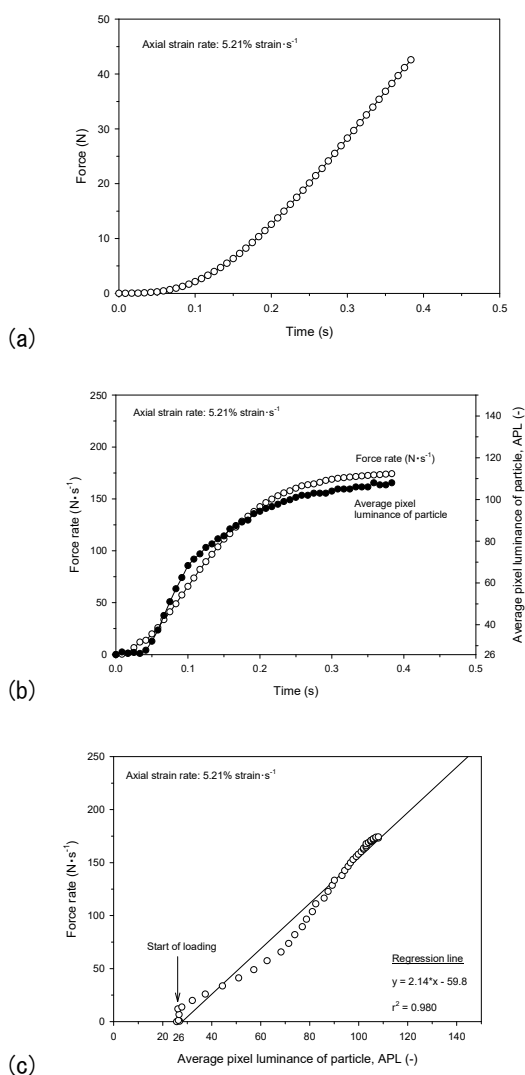


図-3.4 応力発光粒子への载荷による粒子の発光挙動の代表例：(a)作用力の経時変化，(b)作用力増分と粒子の平均ピクセル輝度の経時変化，(c)作用力増分と粒子の平均ピクセル輝度関係とその回帰直線

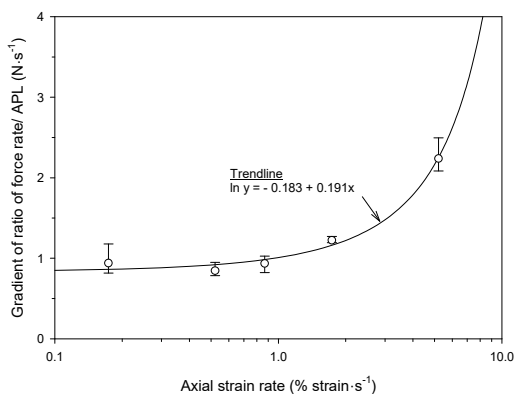


図-3.5 粒子の平均ピクセル輝度に対する作用力増分の勾配と軸ひずみ速度関係

(2) 粒子間接点の発光挙動に関するキャリブレーション

前項の粒子の平均ピクセル強度 (APL) に関するキャリブレーションと同一の载荷実験における，粒子間接点の正規化ピクセル輝度合計値 (CPL) のキャリブレーション結果を示す．図-3.6 (a)に作用力増分と粒子間接点における発光指標の経時変化を示す．また，同図中には，中央の粒子と上方の粒子との接点，下方の粒子との接点の経時変化が図示されている．図-3.5 (b)には，作用力増分とCPL関係とその回帰直線を示している．CPLと同様に，回帰直線の決定係数からも作用力増分と中央粒子との2つの接点におけるCPLには十分な精度の比例関係があると判断できる．

図-3.7に軸ひずみ速度に対する作用力増分のCPLに対する勾配を示している．また，同様にこの勾配に対して軸ひずみ速度に対する近似曲線を得ており，粒子間接点に関する校正係数を得ることができる．また，粒子と壁面境界との接点においては，塗膜厚さが半分となるため，この勾配についても半分の値とすることが必要である．

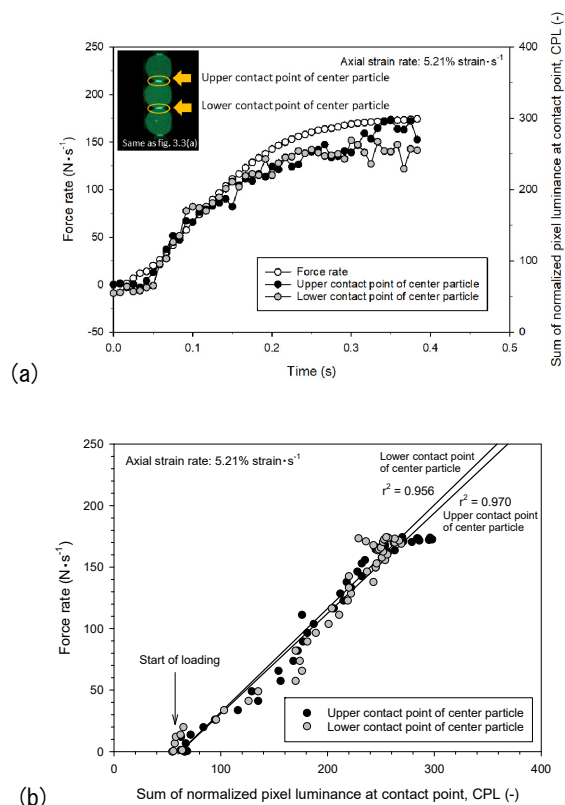


図-3.6 応力発光粒子への载荷による粒子間接点の発光挙動の代表例：(a)作用力増分と粒子間接点の正規化ピクセル輝度合計の経時変化，(b)作用力増分と正規化ピクセル輝度合計値の関係とその回帰直線

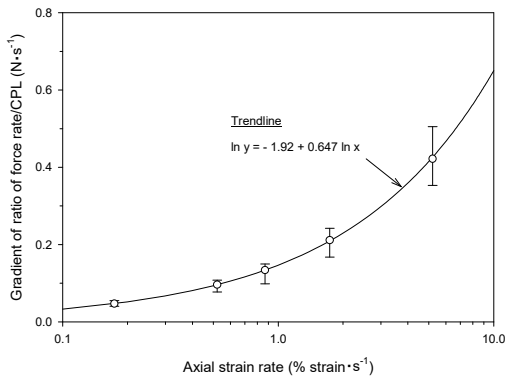


図-3.7 接点の正規化ピクセル輝度合計値に対する作用力増分の勾配と軸ひずみ速度関係

(3) 粒子全体の発光挙動と粒子間接点の発光挙動に関するキャリブレーション

本項では、粒子全体の発光挙動としての粒子の平均ピクセル輝度と粒子間接点の正規化ピクセル輝度合計値について検討を行う。図-3.8に代表的な挙動として、軸ひずみ速度 $5.21\% \text{strain} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $1.74\% \text{strain} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $0.870\% \text{strain} \cdot \text{s}^{-1}$ におけるAPLと中央の粒子と上方の粒子との接点におけるCPLの関係とその回帰直線を示している。いずれの軸ひずみ速度においても、回帰直線の決定係数からAPLとCPLには十分な精度の比例関係があると判断できる。

図-3.9に軸ひずみ速度に対するAPLとCPLの勾配を示している。また、同様にこの勾配に対して軸ひずみ速度に対する近似曲線を得ており、APLとCPLに関する校正係数も得ることができる。ただ、図-3.5の粒子の平均ピクセル輝度に対する作用力増分の勾配と、図-3.7に示す接点の正規化ピクセル輝度合計値に対する作用力増分の勾配の関係と比較して校正の精度は劣るといえる。

### 3.3 まとめ

作成した応力発光粒子に様々な作用力増分で载荷を行うことで発光挙動を撮影した。得られた画像の解析により、作用力増分に対する粒子全体の発光と粒子間接点の発光において高い相関関係が得られた。粒子全体の発光については、粒子の平均ピクセル輝度 (APL)、粒子間接点については、正規化したピクセル輝度の合計 (CPL) の指標に対して勾配 (校正係数) を得ることが出来た。また、この校正係数は軸ひずみ速度に対して変化するため、近似曲線を算出することで、任意の軸ひずみ速度に対して校正係数を算出できることを示した。

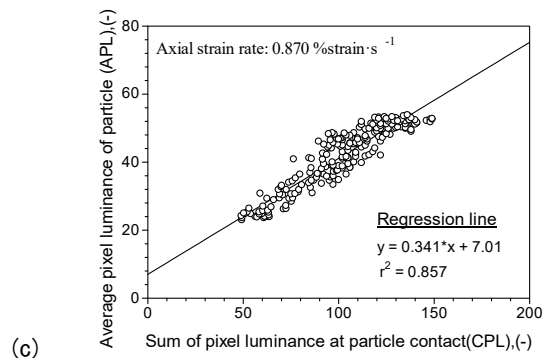
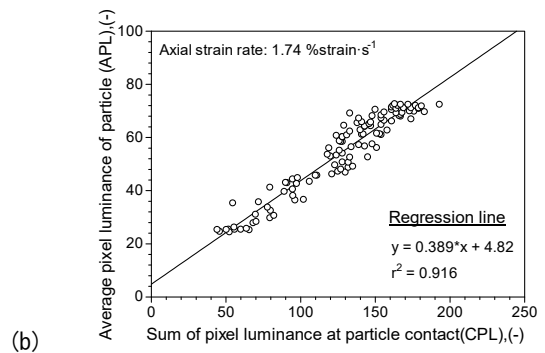
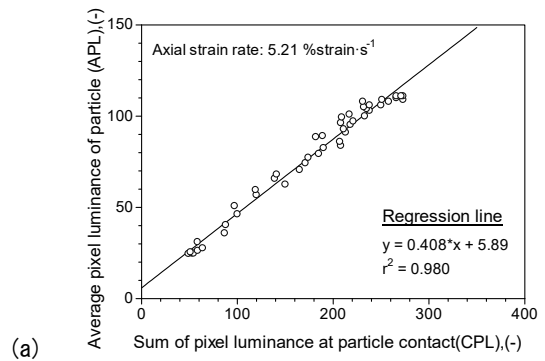


図-3.8 粒子全体と粒子接点の発光強度指標の関係  
(a) 軸ひずみ速度  $5.21\% \text{strain} \cdot \text{s}^{-1}$ , (b) 軸ひずみ速度  $1.74\% \text{strain} \cdot \text{s}^{-1}$ , (c) 軸ひずみ速度  $0.870\% \text{strain} \cdot \text{s}^{-1}$

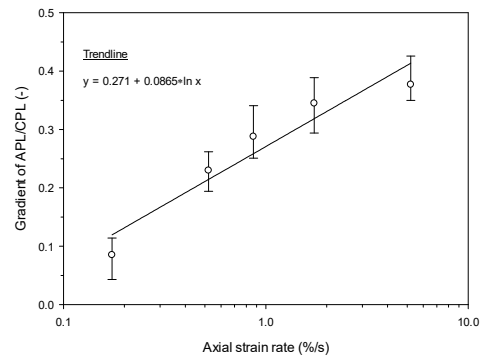


図-3.9 粒子全体と接点の発光強度指標の勾配に対する軸ひずみ速度関係

#### 4. 粒状体への適用と検証<sup>17)</sup>

##### 4.1 実験概要

図-4.1に示す二軸载荷装置を用いて、二次元断面における応力発光粒子の集合体に対して作用力分布の可視化を行い、実際に载荷した荷重との比較検証を行う。

二軸载荷装置は、アクリル製で幅30mm、高さ27.3mm、奥行き3.3mmの長方形の空間を持っており、側面は厚さ10mmのアクリル板で固定されている。载荷板は、楔形の断面を持っており、二軸载荷装置の上端より供試体に载荷する。载荷装置の下部には、2個のロードセルの上にアルミ板を設置することで、応力発光粒子が流出しないように固定している。応力発光粒子は、二軸载荷装置の長方形の空間に90個の粒子を二次元の最密充填となるよう規則的に配置した。

载荷条件として、载荷速度は $0.5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、軸ひずみ速度 $1.83\% \text{ strain}\cdot\text{s}^{-1}$ で载荷を行った。図-3.5より粒子全体の発光に関する校正係数は $1.18 \text{ N}\cdot\text{s}^{-1}$ となる。また、図-3.7より粒子間接点の発光に関する校正係数は $0.216 \text{ N}\cdot\text{s}^{-1}$ となる。

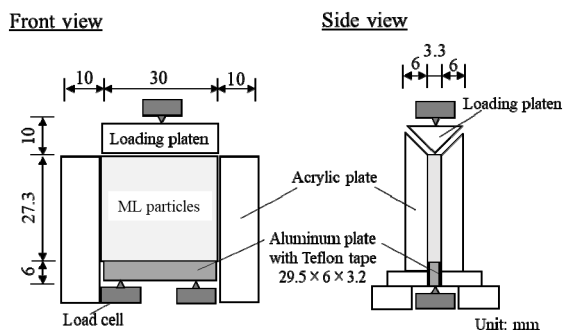


図-4.1 二軸载荷実験概略図

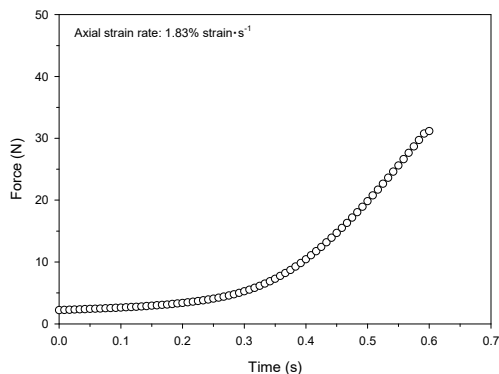


図-4.2 二軸载荷実験における作用力の経時変化

##### 4.2 実験結果と考察

図-4.2に载荷時のロードセルの計測値と変位の関係を示す。図中には2.2Nの設置時の設置荷重が含まれているが、以降の発光強度の作用力への換算では除いている。

図-4.3に载荷時の撮影画像を示す。粒子全体の発光と接点における発光をみると、载荷過程の進行に伴って発光強度が増加するとともに、光弾性体を用いた実験と同様に<sup>4)</sup>力の作用する粒子が連なる応力鎖の発生が確認できる。

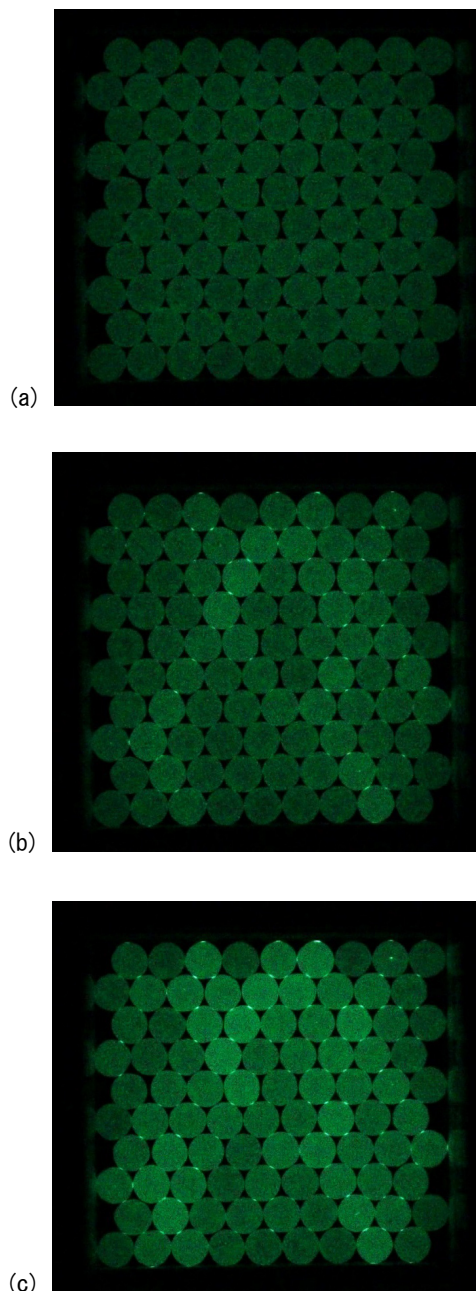


図-4.3 二軸载荷実験時の発光の経時変化：(a) 2.2N (0 s)，(b) 10.4N (0.4 s)，(c) 31.2 N (0.6 s)

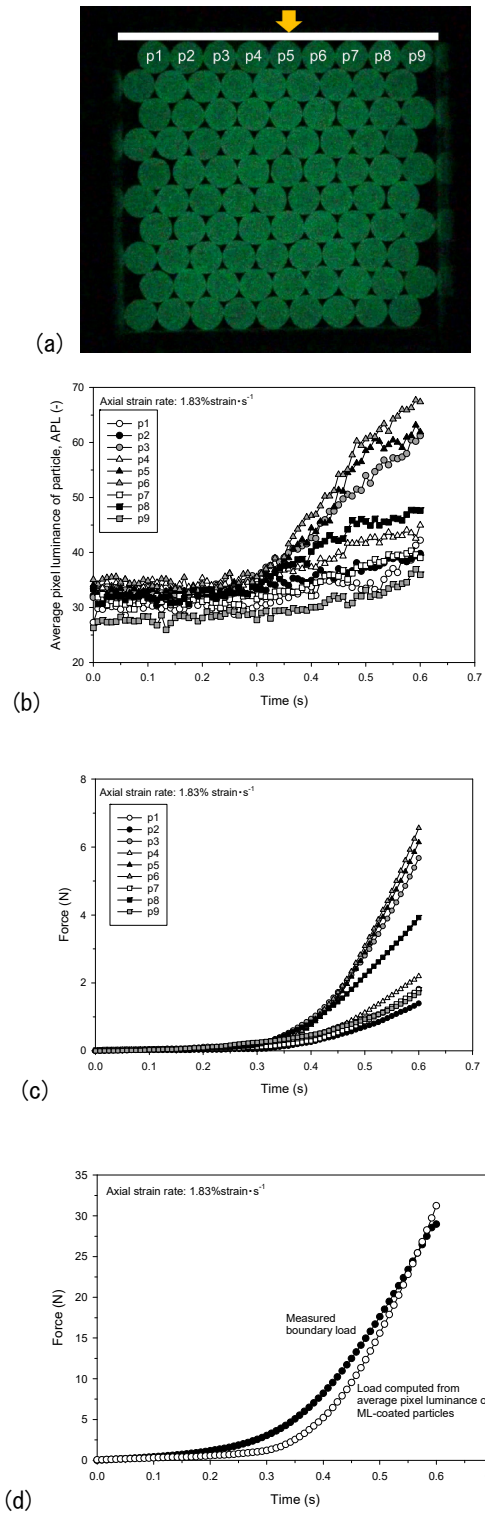


図-4.4 二軸載荷実験による粒子全体の発光の検証：  
 (a) 検討対象粒子, (b) 各粒子の平均ピクセル輝度の経時変化, (c) 各粒子の換算作用力の時間積分, (d) 載荷重と粒子全体の発光から換算した作用力の合計値

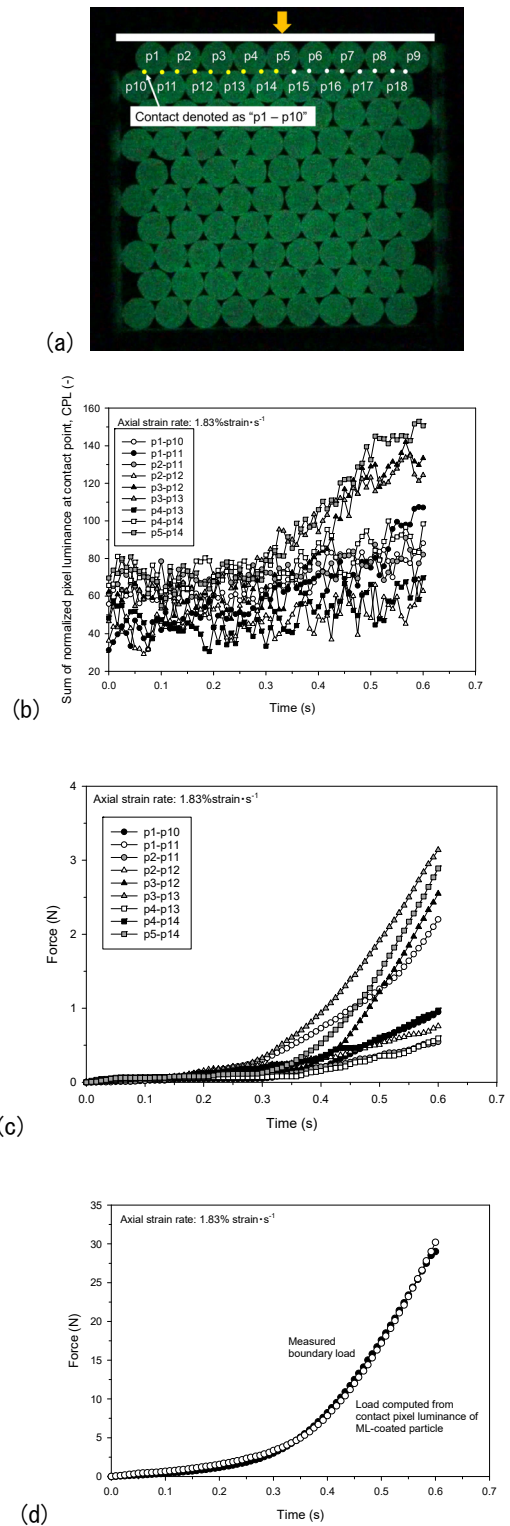


図-4.5 二軸載荷実験による粒子間接点の発光の検証：  
 (a) 検討対象接点, (b) 各接点の正規化ピクセル輝度合計値の経時変化, (c) 各接点の換算作用力の時間積分, (d) 載荷重と接点の発光から換算した作用力の合計値

図-4.4に本載荷条件における粒子の平均発光強度に関する検証結果を示す。図-4.4(a)に検証対象とした粒子の説明として、載荷板に接触しているp1からp9の9個の粒子を示す。図-4.4(b)に、この9個の粒子における平均ピクセル発光値 (APL) の経時変化を示す。図より、APLは9個の粒子で同程度ではなく、p3,p5,p6の3つの粒子に集中して高くなっていることがわかる。図-4.4(c)に、APLに校正係数を乗じて時間積分した経時変化を示す。図-4.4(d)には、9個の粒子について換算した作用力の合計と、載荷板に設置したロードセルでの測定値を示している。図より、粒子全体の発光から換算した作用力と作用力の間には定量的な一致がみられる。

図-4.5に本載荷条件における粒子間接点の発光強度に関する検証結果を示す。図-4.5(a)に検証対象とした粒子間接点の説明として、一段目と二段目の粒子の間に位置する接点を対象としている。図-4.5(b)に、左側半分の粒子間接点について、正規化したピクセル輝度の合計(CPL)の経時変化を示す。同様に、図-4.5(c)に、CPLに校正係数を乗じて時間積分した作用力の経時変化を示す。図-4.5(d)には、図-4.4(d)と同様に換算した作用力の合計と、載荷板に設置したロードセルでの測定値を示している。図より、粒子間接点の発光から換算した作用力と載荷重の間には定量的な一致がみられる。

図-4.6に全ての粒子とその接点の発光について、校正係数を用いて換算した作用力分布図の経時変化を示す。粒子への作用力については、0 Nから12 Nの範囲で粒子の緑色の輝度と対応しており、粒子間接点では0 Nから6 Nの範囲で対応する粒子の中心を結ぶ直線の太さでその大きさを示している。これらの作用力の値については、釣り合い式を満足することを確認している。このような作用力の不均一な伝達は、粒子径や設置時の微小な差によって発生していると考えられるが、本手法には、そのような点も可視化できているといえる。なお、粒子間のせん断力については、本手法で可視化することはできないが、法線方向の作用力に対して非常に小さく無視できると考えられる。

### 4.3 まとめ

作成した応力発光粒子の粒状体への適用として、二軸載荷実験を行い、粒子全体の発光と粒子間接点の発光について載荷重との比較により検証を行った。粒子全体の発光と粒子間接点の発光のそれぞれにおいて、校正係数を用いて換算した作用力と載荷重の間に定量的な一致を確認することができた。また、粒子全体とその接点における作用力分布の経時変化を示した。

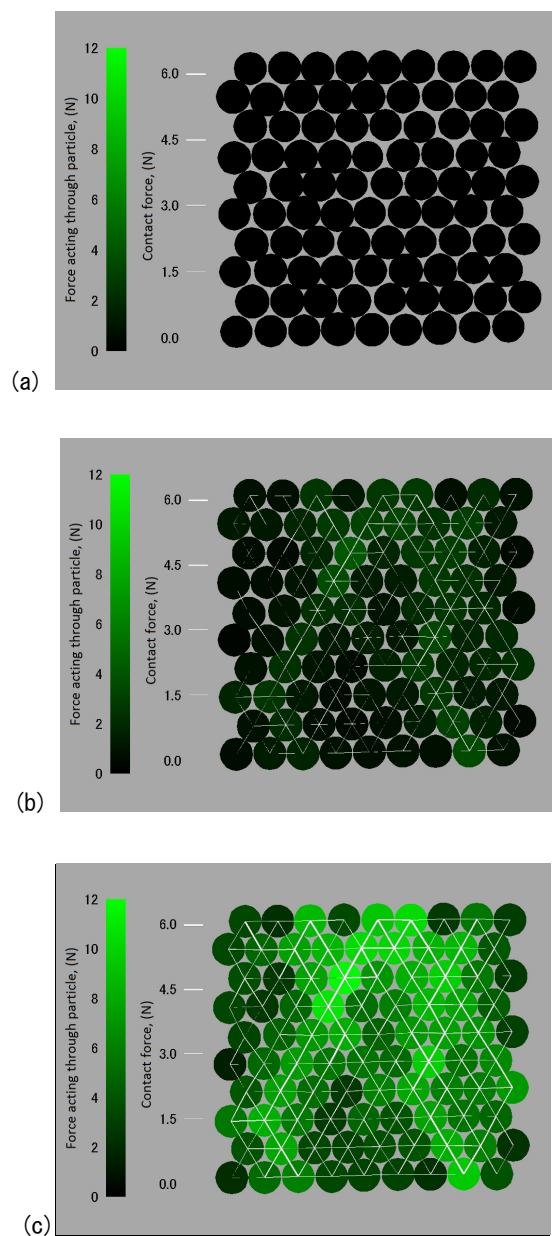


図-4.6 二軸載荷実験における応力発光粒子の発光から換算した作用力分布の経時変化：(a) 2.2N (0 s), (b) 10.4N (0.4 s), (c) 31.2 N(0.6 s)

## 5. 変形・破壊メカニズム検討への応用：杭貫入時における可視化

### 5.1 実験概要

地盤材料の変形・破壊メカニズム検討への応力発光粒子の応用として、これまでに多くの検討がなされてきた杭貫入時の地盤内の挙動を対象に検討する(例えば24)-27)。図-5.1に載荷実験の概要図を示す。供試体は、幅200mm、高さ120mm、奥行100mmの領域に応力発光粒子を所定の相対密度で作成し、幅30mmの閉端杭模型を80mm貫入させて杭の先端抵抗と模型地盤中の発光の様子を観察した。

杭模型は幅30mm、奥行99mm、高さ200mmの亚克力製の直方体で、側面にボールローラーによるガイドを設けることで垂直に貫入される。貫入時の載荷は、点接触の先端を持つロードセルを介して行われ、この計測値を載荷重としている。また、本実験は載荷時の発光が環境光の影響を受けないように、暗室の中で実施している。

応力発光粒子には、直径1.4mmから1.7mmのガラスビーズに2.2節で示した方法で作成した粒子を用いている。供試体は、深さ12mmごとに突き固めて全10層で作成した。本検討では、相対密度を90%と65%のケースを実施した。

貫入時の発光挙動は、アルミ製土槽に設けられたガラス窓からカメラで撮影した。前面には、励起用の紫外線LED (CCS社製 LDL-205X12UV2-365) と撮影用カメラ (SONY製α7sIIとSEL35F14Z) を設置して応力発光現象を捉える。撮影条件は、供試体から880mmの位置より、解像度1920×1080pixels, 撮影フレームレート120fps, ISO感度25600で撮影を行った。

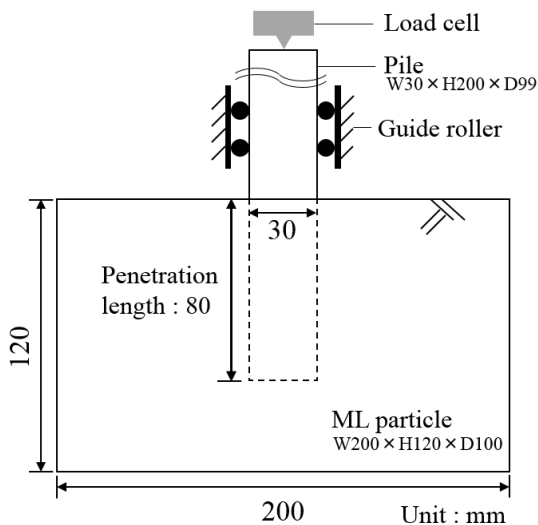


図-5.1 杭模型貫入実験概略図

実験の手順としては、キャリブレーションの条件と同様に、発光粒子をUVライトで60秒間励起させ、燐光が収まるまでの60秒間待機した後に、載荷速度20mm/sで載荷した。

### 5.2 実験結果と考察

図-5.2に、相対密度が90%と65%における貫入時の載荷重と貫入量の関係を示す。貫入量の増加に従って載荷重が増加し、相対密度の高い地盤ほど発揮される貫入抵抗が大きいことが確認できる。

図-5.3に、相対密度90%の供試体における貫入量0mm, 20mm, 40mm, 60mm, 75mmでの発光の様子を示す。ここで載荷終了時の80mmではなく75mmとしたのは、載荷開始と終了時の3mm程度で貫入速度の低下が見られたためである。図より、発光が見られる範囲は杭模型下端部に集中しており、貫入量の増加に伴って発光強度とその範囲が大きくなっている。また、発光範囲内の発光強度は一定ではなく、図-5.3(c)では左側に強い発光強度を示す粒子が連なっていることから応力鎖が可視化出来ていると考えられる。

図-5.4に、相対密度65%の供試体における貫入量0mm, 20mm, 40mm, 60mm, 75mmでの発光の様子を示す。図より、相対密度90%と同様に、発光が見られる範囲は杭模型下端部に集中しており、貫入量の増加に伴って発光強度とその範囲が大きくなっている。また、同じ貫入量における発光挙動に着目して比較すると、相対密度65%における強い発光の範囲は狭く、発光強度も低いことが確認できる。

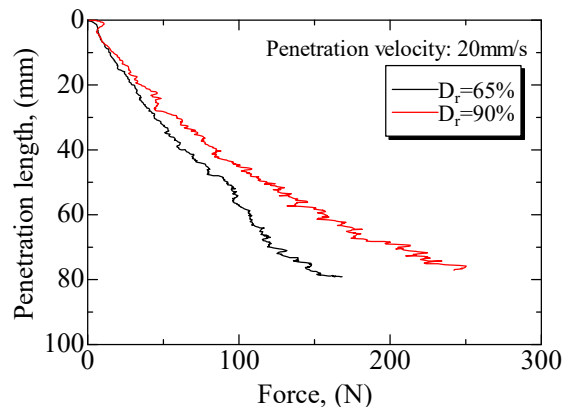


図-5.2 相対密度の異なる地盤への貫入における載荷重と貫入量関係

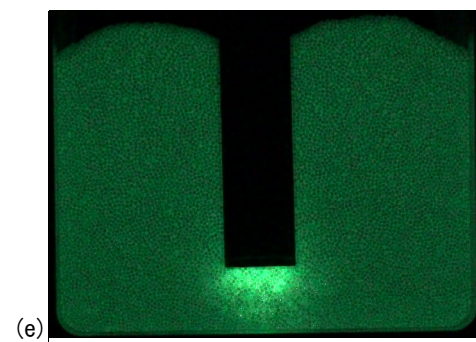
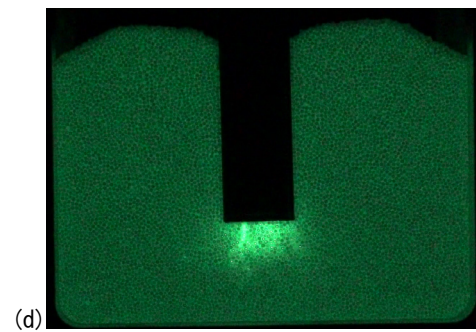
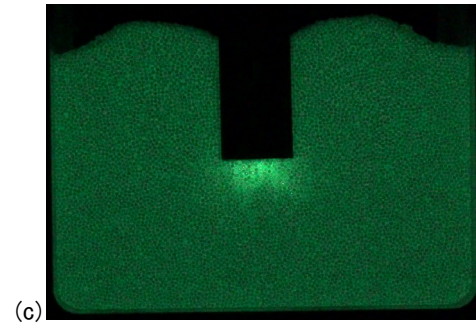
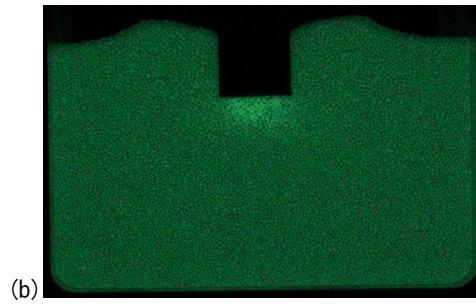
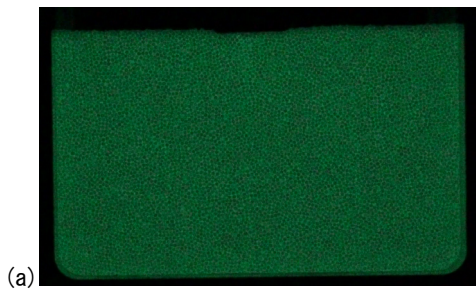


図-5.3 杭模型貫入過程の発光（相対密度 90%）：  
(a) 0mm, (b) 20mm, (c) 40mm, (d) 60mm, (e) 75mm

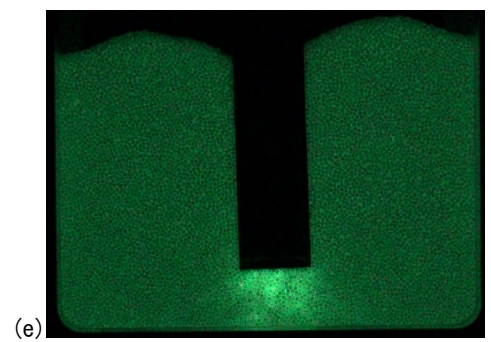
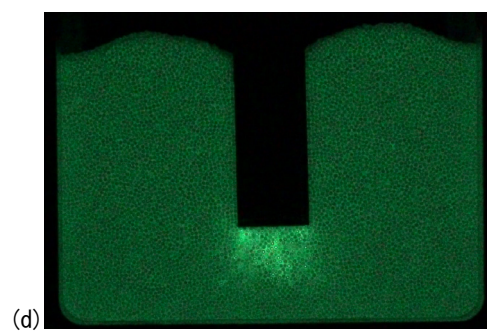
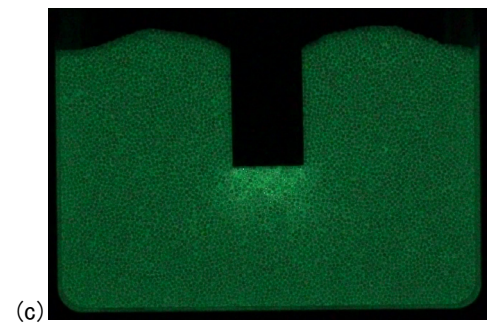
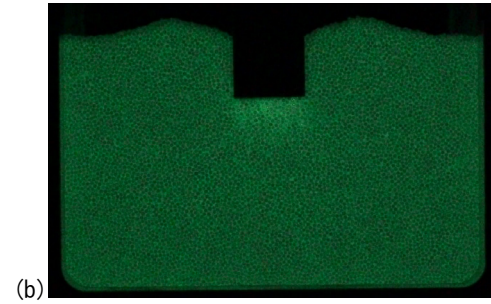
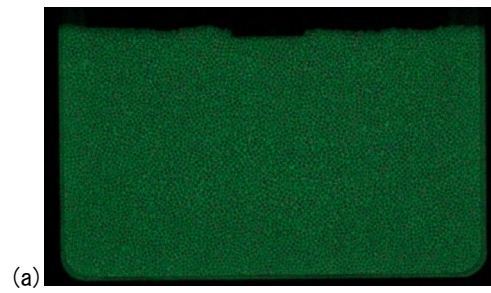


図-5.4 杭模型貫入過程の発光（相対密度 65%）：  
(a) 0mm, (b) 20mm, (c) 40mm, (d) 60mm, (e) 75mm

定量的な比較のために、図-5.5に、杭模型下端から40mmまでの範囲における発光強度分布を貫入量20mmごとに示す。この発光強度は杭模型の幅30mm(200 pixels)における水平方向の値を平均した値としている。なお、貫入量75mmの分布について、杭下端から25mm以深の位置では土槽底面となるため発光強度は無くなっている。図より、発光強度分布の形状は杭下端から5mm程度の位置で最大値を取り、深さ方向に単調に減少する。また、発光強度の増加範囲は、およそ杭下端から30mm程度の領域といえる。貫入量ごとに比較すると、発光強度分布の形状は変わらず全体的に発光強度が増加している。これは、貫入量の増加に伴い地盤中の拘束圧が増加するためであり、载荷重が増加する傾向と一致している。相対密度の比較では、発光強度の増加範囲は30mmと同程度であるが、杭下端から15mmの範囲で発光強度に顕著な差がみられる。

次に観察された発光と载荷重の関係について検討を行う。まず、発光強度については、図-5.5での検討をもとに図-5.6(a)に示す杭下端15mmの範囲の平均発光強度を0.1s間隔で算出した。载荷重は、平均発光強度を算出した時点と対応するロードセル計測値とし、その増分は0.1s間の先端抵抗力の平均値における増分とした。

図-5.6(b)には、この载荷重と平均発光強度の関係を示しており、高い相関が確認できる。また、相対密度についても横軸の切片や増分について同程度の関係が確認できる。図-5.6(c)には载荷重増分と平均発光強度の関係を示している。発光強度の増加に従って载荷重増分が増加する傾向はみられるが、相関はみられない。ここで、载荷重の増分を検討したのは、発光粒子のキャリブレーションにおいて、発光強度と相関関係が確認されたのは作用力増分のためである。しかし、相関がみられなかった理由として、本検討で計測した先端抵抗とその増分は、供試体の底面に作用する平均された値であり、発光として観察された供試体側面における作用力の増分との間に差があるためと考えられる。

### 5.3 まとめ

本検討により、杭の貫入問題において粒子単位の作用力の推移を連続的に可視化できることを示した。杭下端に作用力の増分が集中して、貫入過程の進行に伴う拘束圧の増加とともに発光強度が増加すること、相対密度による発揮される強度の差も発光強度の差として可視化できることを示した。

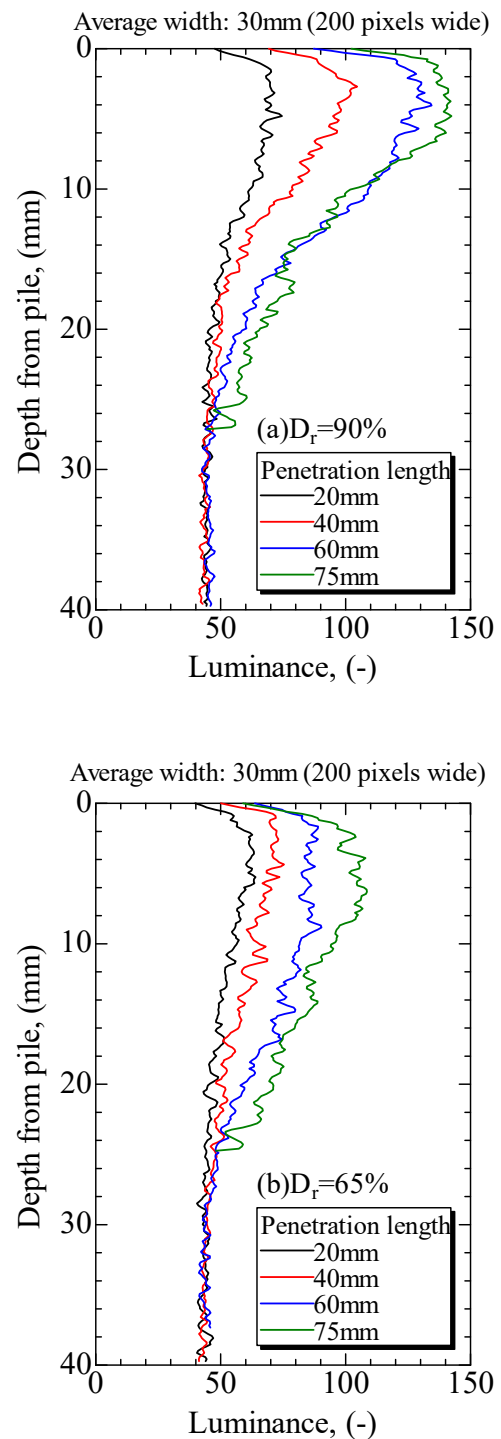
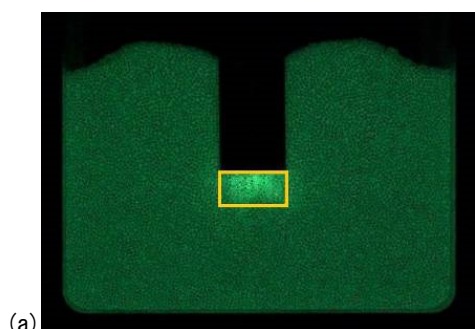
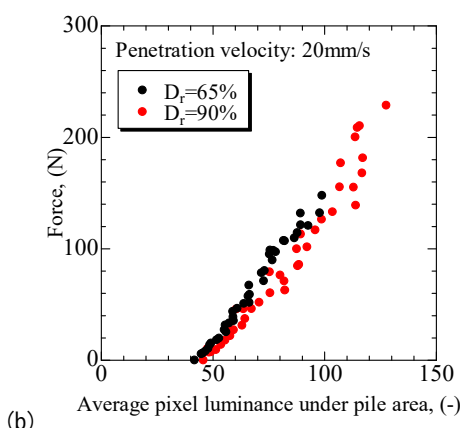


図-5.5 貫入量20mmごとの杭模型下端からの発光強度分布の比較：(a)相対密度90%，(b)相対密度65%

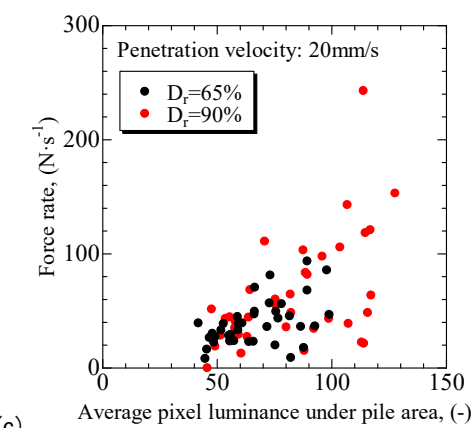




(a)



(b)



(c)

図-5.6 杭下端の平均発光強度と力学的作用関係：  
(a) 平均発光強度算出領域，(b) 先端抵抗力ー平均発光強度関係，(c) 先端抵抗増分ー平均発光強度関係

## 6. 結論

本研究では、応力発光材料を表面に塗布したガラスビーズを用いて、粒子単位の作用力の可視化を可能とすることで地盤の変形・破壊メカニズムの新たな検討方法を開発した。本報告では、応力発光現象の概要とその応用による応力発光粒子の作成について述べるとともに、撮

影した発光強度から作用力に換算するキャリブレーションを行った。また、その応力発光粒子とキャリブレーション結果をもとに、粒状体での検証として二次元断面の小型土槽における載荷実験を行い、粒子全体と接点それぞれにおける発光から換算した作用力が載荷重と定量的に一致することを示した。加えて、地盤材料の変形・破壊メカニズム検討への応用として、模型杭貫入時の地盤内の発光強度を観察することで、拘束圧による影響や相対密度による抵抗の差を可視化できることを示した。

なお、本研究では載荷時の発光挙動を対象として検討を行ったが、実際の境界値問題への適用するためには、せん断や除荷時の発光挙動などを含めた検討が必要と考えられる。今後は、これらの検討をもとに様々な地盤工学的な問題へ展開することで、より詳細に地盤の変形・破壊プロセスを評価する一助となることが期待される。

(2019年11月22日受付)

## 謝辞

この研究で用いた装置の一部は日本学術振興会学術研究助成基金若手研究(B) 17K14725、公益財団法人鹿島学術振興財団研究助成金および日本鉄鋼連盟鋼構造研究・教育助成事業による助成を受けたものであり、深謝の意を表します。本研究の実施にあたり、塗装方法の開発において株式会社テクノパウダルトンの門馬恒見氏、堺化学工業株式会社の森健治氏には、ご助言をいただきました。ここに記して深謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) Bathurst, R.J. and Rothenburg, L., Observations on stress-force-fabric relationships in idealized granular materials. *Mechanics of Materials*, Vol. 9, pp. 65-80, 1990.
- 2) Rothenburg, L. and Bathurst, R.J., Analytical study of induced anisotropy in idealized granular materials. *Geotechnique*, Vol. 39, No. 4, pp. 601-614, 1989.
- 3) Dantu, P., Etude statistique des forces intergranulaires dans un milieu pulvérulent, *Geotechnique*, Vol. 18, No.1, pp.50-55, 1968.
- 4) Drescher, A. and Jong, D.J., Photoelastic verification of a mechanical model for the flow of a granular material. *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 20, No. 5, pp. 337-340, 1972.
- 5) Majmudar, T.S. and Behringer, R.P., Contact force measurements and stress-induced anisotropy in granular materials. *Nature*, Vol. 435, pp. 1079-1082, 2005.

- 6) Hurley, R., Marteau, E., Ravichandran, G. and Andrade, J.E., Extracting inter-particle forces in opaque granular materials: beyond photoelasticity. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 63, 154-166, 2014.
- 7) Hurley, R.C., Hall, S.A., Andrade, J.E. and Wright, J., Quantifying interparticle forces and heterogeneity in 3D granular materials. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 117, p. 098005, 2016.
- 8) Andrade, J.E. and Avila, C.F., Granular element method (GEM): linking inter-particle forces with macroscopic loading. *Granular Matter*, Vol. 14, pp. 51–61, 2012.
- 9) Chandra, B.P. and Rathore, A.S., Classification of Mechanoluminescence. *Crystal Research and Technology*, Vol. 30, No. 7, pp. 885-896, 1995.
- 10) Xu, C. N., Watanabe, T., Akiyama, M., Zheng, X. G., Direct view of stress distribution in solid by mechanoluminescence. *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 74, No. 17, pp. 2414–2416, 1999.
- 11) Xu, C. N., Zheng, X. G., Akiyama, M., Nonaka, K., Watanabe, T., Dynamic visualization of stress distribution by mechanoluminescence image. *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 76, No. 2, pp. 179–181, 2000.
- 12) Kim, W.-J., Lee, J.-M., Kim, J.-S. and Lee, C.J., Measuring high speed crack propagation in concrete fracture test using mechanoluminescent material. *Smart Structures and Systems*, Vol. 10, No.6, pp. 547-555, 2012.
- 13) Terasaki, N. and Xu, C. N., Historical-Log Recording System for Crack Opening and Growth Based on Mechanoluminescent Flexible Sensor. *IEEE Sensors J.*, Vol.13, No.10, pp. 3999-4004, 2013.
- 14) 川端雄一郎, 小野大輔, 李シンシュ, 川崎悦子, 岩波光保, 加藤絵万, 上野直広, 徐超男: 応力発光センサによる暗視野下におけるコンクリートのひび割れ検出に関する基礎的検討, *土木学会論文集E2*, Vol.67, No.3, pp.430-435, 2011.
- 15) Azad, A.I., Rahimi, M.R. and Yun, G.J., Quantitative full-field strain measurements by SAOED (SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>: Eu<sup>2+</sup>, Dy<sup>3+</sup>) mechanoluminescent materials. *Smart Materials and Structures*, Vol. 25, No. 9, 095032 (14pp), 2016.
- 16) Chandra, B.P., Chandra, V.K., Mahobia, S.K., Jha, P., Tiwari, R. and Haldar, B., Real-time mechanoluminescence sensing of the amplitude and duration of impact stress. *Applied Physics Letters*, Vol.102, No.5, pp. 9-16, 2012.
- 17) Kondo A., Takano D., Kohama E. and Bathurst R. J., Visualization and measurement of load transmission in granular assemblies using mechanoluminescent-coated particles, *Granular matter*, Vol.21, No.50, 2019.
- 18) Parikh, D.M., *Handbook of Pharmaceutical Granulation Technology*, Taylor & Francis Group, 2005.
- 19) Foy, C.L. and Pritchard, D.W., *Pesticide Formulation and Adjuvant Technology*, CRC Press, 1996.
- 20) Ferreira, T. and Rasband, W., *ImageJ User Guide*, U.S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, <http://imagej.nih.gov/ij/>, 2012. Accessed 7 Nov. 2019.
- 21) Rahimi, M.R., Distributed stress sensing and non-destructive tests using mechanoluminescence materials. Doctoral dissertation, University of Akron, 2015.
- 22) Deresiewicz, H., *Advances in Applied Mechanics*. Academic Press Inc., New York, 1958.
- 23) Yun, G.J., Rahimi, M.R., Gandomi, A.H., Lim, G.C. and Choi, J.S., Stress sensing performance using mechanoluminescence of SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>:Eu (SAOE) and SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>:Eu, Dy (SAOED) under mechanical loadings. *Smart Mater. Struct.*, Vol. 22, 055006, 2013.
- 24) Allersma, H.G.B. 1987. *Optical Analysis of Stress and Strain in Photoelastic Particle Assemblies*. PhD thesis, Delft University of Technology.
- 25) White, D. J. and Bolton, M. D., “Displacement and strain paths during plane-strain model pile installation in sand,” *Geotechnique*, Vol. 54, No. 6, 2004, pp. 375–397.
- 26) 菊池喜昭, 佐藤宇紘, 森川嘉之: 開端杭貫入時の杭先端周辺地盤の変形挙動の観察, *港湾空港技術研究所資料*, No.1177, 2008
- 27) 佐藤宇紘, 原田剛男, 岩佐直人, 林悟史, 大谷順: スパイラルパイル施工時の回転条件が鉛直支持力に与える影響に関する基礎的検討, *地盤工学ジャーナル*, Vol.10, No.2, 253-265, 2015



古紙配合率70%再生紙を使用しています