

令和 6 年 5 月 15 日現在

機関番号：22303

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K05036

研究課題名（和文）応力発光体を用いた累積外力による損傷評価システムの開発

研究課題名（英文）Development of damage evaluation system under the cumulative disturbances using mechanoluminescence material

研究代表者

宮川 睦巳（Miyagawa, Mutsumi）

前橋工科大学・工学部・准教授

研究者番号：90469578

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：近年、大規模化している災害に対し、被災後短時間で健全性を把握することは都市機能を維持するうえで急務な課題となっている。しかしながら、構造物ごとに累積外力の程度を災害直後に一挙に把握することは困難であり、受けた累積外力の程度を迅速・簡易に測定し、構造物に加わるエネルギーと損傷の関係性を即時に評価できることが重要である。

本研究では、応力発光体（ML技術）を用いて応力発光を観察しており、モニタリング技術により累積外力による損傷の程度を迅速に評価できるシステムの作成とCNN技術による損傷度評価の提案を行っている。これらの技術を組合せながらレジリエンス強化に資する健全性評価法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

構造物ごとの累積外力の程度を災害直後に一挙に把握することは現状で容易ではない。それは面的に膨大な数が敷設されているコンクリート構造物に作用した累積外力の程度を短期間に一挙に測定する技術は確立されておらず、構造物に加わるエネルギーと損傷の関係は明確になっていないためである。

ML技術を用いることで、破壊発光を広域で捉えることができ、発光箇所を特定し、その発光強度の情報を蓄積することで構造物に加わるエネルギーと損傷の関係性を明らかにすることが可能である。本研究では、ML技術による破壊発光から損傷度の推定手法を提案しており、また、CNN技術による損傷度検知と損傷度評価を行った。

研究成果の概要（英文）：In recent years, it has become an urgent issue to assess the health of structures in a short period of time after a disaster in order to maintain urban functions in the face of increasingly large-scale disasters. However, it is difficult to determine the degree of accumulated external force for each structure at once immediately after a disaster, and it is important to be able to measure the degree of accumulated external force quickly and simply, and to evaluate the relationship between the energy applied to the structure and damage immediately.

In this study, we observed stress luminescence using a Mechanoluminescence(ML), and we propose a system that can quickly evaluate the degree of damage caused by cumulative external forces using monitoring technology and damage assessment using CNN technology. By combining these technologies, we have proposed a method of integrity evaluation that contributes to enhancing resilience.

研究分野：構造力学

キーワード：応力発光体 破壊発光 累積外力 損傷度評価 CNN技術 輝度値ヒストグラム コンクリート一軸圧縮試験 コンクリート曲げ試験

1. 研究開始当初の背景

近年では、高度経済成長期以降に建てられたインフラ設備の劣化と損傷による老朽化問題が着目されている。さらに地球温暖化の影響による大型台風が発生や局所的に発生するゲリラ豪雨による自然災害の増加によって異常な外力に曝され、現況構造物が同時多発的に深刻な損傷を負う機会が増えている。インフラ設備のレジリエンスを強化するうえでもっとも重要なことは、災害直後に被災構造物の健全性を短時間に把握する技術を確認することである。しかしながら、構造物ごとの累積外力の程度を災害直後に一挙に把握することは現状で容易ではない。なぜならば、面的に膨大な数が敷設されているコンクリート構造物に作用した累積外力の程度を短期間に一挙に測定する技術は確立されておらず、構造物に加わるエネルギーと損傷の関係は、現段階で明確になっていない。

そこで本研究では、応力発光体（以降、ML (MechanoLuminescence) と称す）の中でも欠陥制御型ユーロピウム賦活アルミン酸ストロンチウム $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}$ (SAOE) 粉体に着目する。この応力発光スペクトルは 520 nm 付近、発光色は可視光で緑色、最大輝度が約 10 cd/m^2 得られる。これは、およそ蛍の光よりやや強い発光となる。ML 発光による輝度分布はひずみエネルギー分布と相関関係があることが既往の研究⁽¹⁾で確認されており、この発光を破壊に至る主要なパラメータとして考えることができる。つまり、破壊発光を広域で捉えることができれば、発光箇所を特定し、その発光強度を蓄積することで、構造物に加わるエネルギーと損傷の関係性を明らかにできると考える。なお、ML の発光強度はひずみおよびひずみ速度に比例し、繰り返し蓄光と発光を繰り返すことができ、自然界に存在する安定元素であるため人体に無害である。

ML に関する研究では、化学的見知からの研究や均質等方性の鋼材を対象とした応力解析に関する研究⁽¹⁾はあるが、実社会に活かされる不均質異方性な岩盤やコンクリート構造物に適用された例⁽²⁾は少ない。以上より、実コンクリート構造物に加わる累積外力の程度を迅速・簡易に測定し、エネルギーと損傷の関係性を明らかにする。さらに、リアルタイムに遠隔から把握するシステムを構築し、膨大な数が敷設されている実コンクリート構造物のレジリエンス強化に資する健全性評価法を提案することに新たな学術性がある。この技術をき裂補修箇所に適用することで、構造物の機能が損なわれていないか健全性を評価する手段としても期待できる。

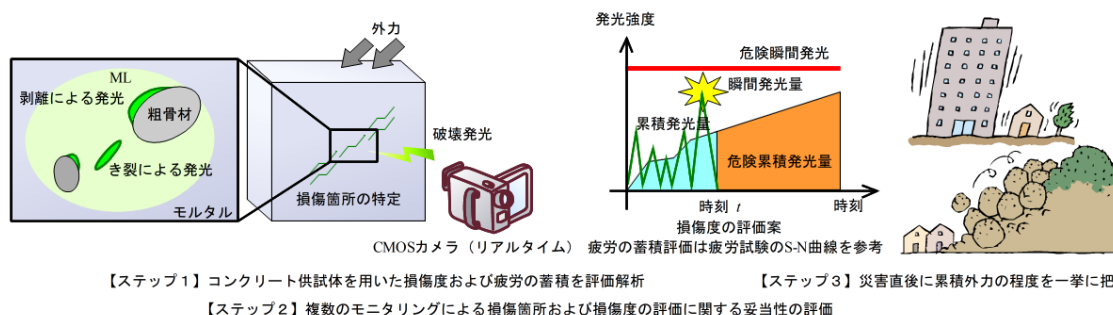


図1 非破壊構造物健全性評価システムの研究計画と研究概略

2. 研究の目的

ML については特許が公開⁽³⁾されたこともあり、本研究で用いられる SAOE 以外にも各社から様々な ML が開発されている。一般的に、ML は高ひずみ (500~1000 μst) にて強く発光することが知られているが、常に定量的な発光強度が得られるわけではない。このため、本報告書の前半では、ひずみ速度と発光強度との関係、輝度分布と応力分布について考察する。後半では、得られた ML の特性から実構造物を視野に入れたコンクリート供試体の破壊実験を実施する。図1に示すように画像解析と CNN (Convolutional Neural Network) 技術を用いることで本研究の目的である構造物の累積外力の推定および健全性について評価手法を提案する。これによりインフラ設備の長寿命化や LCC (Life Cycle Cost) 抑制に貢献ができると考える。

3. 研究の方法

3.1 応力発光のひずみ速度依存実験

現在、さまざまな ML が開発されており、どの製品も概ね 500 μst で視認でき、1000 μst で強い発光が得られている。しかし、わずかな実験条件の違いにより得られる応力発光の強さ、残光の性質が変わってくる。またひずみ速度依存性に関する検討が乏しいことから、一定ひずみ載荷時に至るまでの最適ひずみ速度を探索する。

3.2 引張試験における欠陥形状の応力可視化実験

切り欠きや複数円孔を有する薄板に ML を塗布し、引張試験における応力集中部の発光を捉えることで応力分布の可視化について検討する。さらに応力が複雑に交差する状態 (組合せ応力状態) での輝度分布について、弾性論および有限要素法 (FEM) 解析 (ANSYS) を用いて最大主応力と Von Mises 応力との比較を行う。

3.3 画像解析によるコンクリートの損傷度評価

ML を塗布したコンクリート供試体のき裂の発生と成長によって発生する破壊発光を観察する。これは部材に過大なひずみエネルギーが加わることでき裂が発生、成長する小規模降伏条件下による J 積分の考えを導入することで、損傷部と損傷度の推定の可能性について探る。ML を塗布したコンクリート (モルタル) 供試体を用いて図 4 の一軸圧縮試験および図 5 の 4 点曲げ試験を行い、荷重初期から最終的な破壊に至るまでの間に発生するき裂とその成長による破壊発光を CMOS カメラにてモニタリングを行う。得られた破壊発光の画像解析は ImageJ を行い、連続的な経過観察では時系列での輝度を取得するため、本研究室で開発した MLAnalyzer (開発ソフト: LabVIEW2020) を用いる。これにより、実験手法の提案と瞬間破壊発光エネルギーおよび累積破壊発光エネルギーの算出方法と損傷度の評価方法に関する提案を行う。

3.4 CNN 技術を用いたコンクリートの損傷度評価

CNN 技術による損傷部と損傷度の推定の可能性について探る。一軸圧縮試験では破壊発光を捉えた画像から破壊状態を 4 段階 (Damage 0 (無損傷状態) から Damage 3 (破壊状態)) に分けてアノテーションを行い AI による判定を行う。また、4 点曲げ試験では曲げひび割れとせん断ひび割れについて AI による損傷評価を行い、今後の CNN 技術の展望について述べる。

4. 研究成果

4.1 応力発光のひずみ速度依存実験

(1)概要 本実験では一定のひずみ量 $800 \mu\text{m}$ に至るまでの最大輝度に着目し、最適なひずみ速度の検討を行う。ML を重量比 50 Wt% で混合したエポキシ樹脂試験片を製作し、ひずみ速度を変化させながら圧縮試験を行う。CMOS カメラのキャリブレーション方法としては、通常照明下で撮影した数枚のモノクロ画像を PC に取り込み輝度値を得る。その後、輝度計 (LS-110) を用いて同じモノクロ画像を読み取ったときの輝度値と PC での輝度値を一致させることでキャリブレーションを行う。ここでの実験では試験器を暗幕で覆い、最大発光を示す計測位置のひずみ速度を 5%/min, 7.5%/min, 10%/min, 12.5%/min, 15%/min と変化させる。

(2)結果と考察 図 2 では、時刻ごとの試験力と発光輝度を表す。これより荷重載荷後に遅れて発光し、ひずみ速度は上がるほど発光強度は上がるが 15%/min では減少する。これは慣性力の影響で SAOE 結晶がエポキシ樹脂内の変形に追いついていないためと考えられる。このことから、エポキシ樹脂と混合した ML 塗料は 10%/min ~ 12.5%/min が最適であると考えられる。

4.2 引張試験における欠陥形状の応力可視化実験

(1)概要 ここでは組合せ応力状態を確認するため 3 円孔を有する試験片 (A5052P (板厚 $t=2\text{mm}$)) の引張試験を行う。撮影画像から輝度分布を取得し、最大主応力および Von Mises 応力分布の比較を図 3(b)(b') の弾性論⁽⁴⁾および(c)(c') の FEM 解析にて比較する。

(2)実験結果と考察 既往の研究より、輝度分布はひずみエネルギー分布、最大主応力分布と相関関係があることが徐ら研究⁽¹⁾で報告されているが、図 3 の赤丸で囲まれた領域の輝度に着目すると、Von Mises 応力の方が最大主応力より大きくなることから、発光現象は Von Mises 応力 (せん断ひずみエネルギー説) 分布の方が輝度分布を示す特性があると考えられる。具体的な応力場の推定は弾性論もしくは FEM 解析を行いながら、2 点間での輝度値と応力勾配から推定することが可能とは考えるが、実際的には困難と考えられる。

4.3 画像解析によるコンクリートの損傷度評価

(1)概要 図 4 に示すように試験体表面に ML を塗布したモルタル供試体を用いて一軸圧縮試験を行い、無損傷状態から最終的な破壊に至るまでの破壊発光をモニタリ

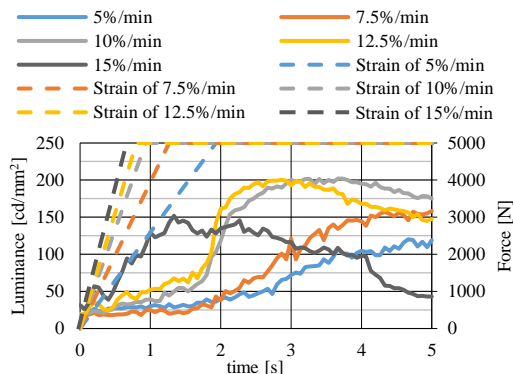


図 2 ひずみ速度依存実験結果

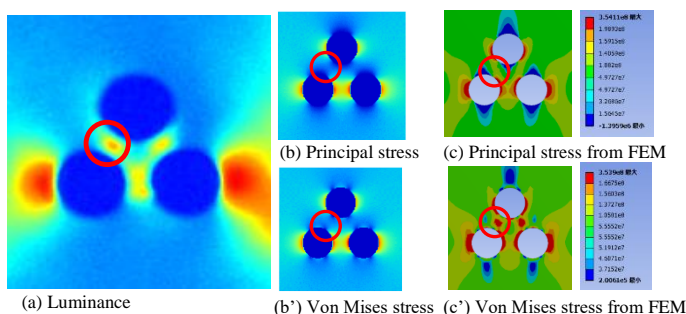


図 3 3 円孔を有する試験片の輝度分布, 最大主応力, Von Mises 応力分布

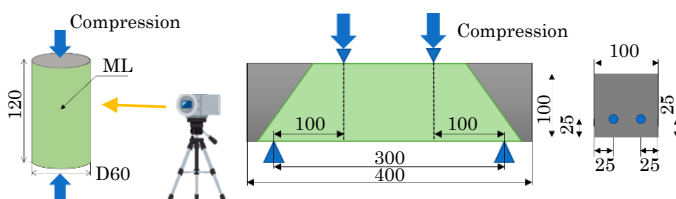


図 4 一軸圧縮試験概略図 図 5 4 点曲げ試験概略図

ングする。これにより、累積外力による損傷度と破壊発光を広範囲にとらえることが可能であるか検討を行う。本研究で使用する円柱供試体は水セメント比50%で製作された直径60mm、高さ120mmとし、粗骨材を含まない普通ポルトランドセメントを使用したモルタル供試体である。発光現象をより明確化するために試験機を暗幕で覆い簡易的な暗室として試験の様子を3方向からCMOSカメラで撮影する。試験速度は荷重制御により10.0 kN/minで載荷している。

(2) 損傷度の評価方法 荷重を受けるコンクリートの破壊プロセスとして、圧縮強度 f_c に対してひび割れの発生条件から4段階に区分する。圧縮強度の0~30%では載荷以前にコンクリート中にあったひび割れはほとんど変化せず弾性的挙動を示すため、無損傷状態としてStage 0とする。続いて30%~50%ではひび割れ先端の応力集中によって付着ひび割れが広がり始め、50%~75%において、骨材近くのひび割れが相互につながりモルタル内のひび割れを形成し始める。同時に、他の箇所の付着ひび割れがゆっくりと成長し続ける。この領域ではMLの特性上微細な変化を捉えることが難しいことを考え、30%~75%を損傷の初期段階および成長状態としてStage 1とする。75%以上では、最も大きなひび割れはその限界長さに達して、ひび割れの伝播速度は最大となる。ここではき裂の成長から破壊状態を示しておりStage 3とする。最後に、最大耐力100%以降では、ひずみの増加とともに応力が減少する。ひずみ軟化(Strain - Softening)となり、巨視的なひび割れがでて、事実上の破壊の状態であるためStage 3とする。図6、7にStage 1およびStage 3の撮影画像と輝度値ヒストグラムを示しており、Stage 3では高い輝度値に分布していることが分かる。

(4) 4点曲げ試験結果 図8では供試体下縁部に引張荷重が作用したことで、曲げひび割れによる破壊発光を確認できる。無筋のコンクリート供試体であれば、曲げひび割れが発生した時点で供試体が破壊し試験終了となるが、引張面に鉄筋が入っているため供試体は完全破壊していない。その後、供試体中央から枝のように左右に発光が確認でき、曲げ引張および微細なき裂の成長と結合による破壊発光が観察できる。最後に図9では最終的な破壊状態であるため、支持点(下治具)から載荷点(上治具)にかけて斜め方向にせん断破壊が確認できる。

(5) 圧縮荷重と破壊発光エネルギーの解析 破壊発光エネルギー E_i は破壊発光部分の面積 P_{ij} と輝度値 G_j の積に比例するものとして算出している。圧縮荷重が増加することで、き裂の発生と進展を破壊発光として捉えることができる。Stageが進むにつれて脆性破壊を瞬間破壊発光エネルギー比 $e_i = (E_i - E_0) / E_0$ (残光: E_0)として得られることができる。また、この瞬間破壊発光エネルギー比の差分($e_i - e_{i-1}$)を取っていくことで累積破壊発光エネルギー比 Σe_i を算出することができる。図10は縦軸に累積破壊発光エネルギー比 Σe_i と標準誤差をとり、横軸を圧縮強度の比 F/F_{max} [%]としたときの一軸圧縮試験および4点曲げ試験によるグラフである。 F/F_{max} が100の時に最大荷重が作用しており、その後は圧縮強度が低下するが、ここではそのままの推移を観察したいため、100よりも大きな値、すなわち101, 102, ...の時の載荷荷重の値は F/F_{max} がそれぞれ99, 98, ...相当としている。Stage 0からStage 3の領域を示すと、やはりStageが大きくなる

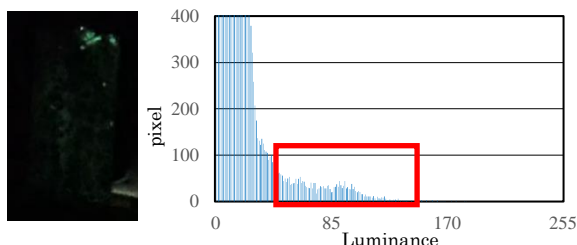


図6 Stage 1における輝度値ヒストグラム

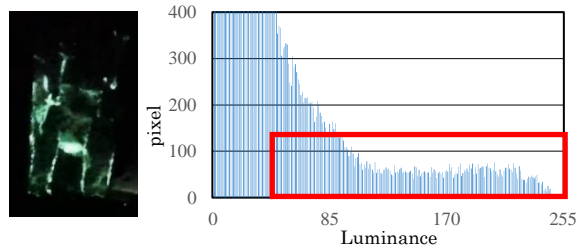


図7 Stage 3における輝度値ヒストグラム

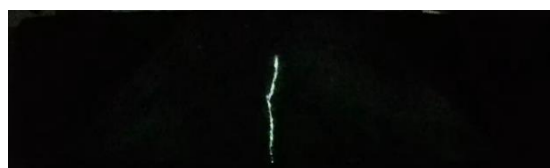


図8 曲げ破壊による破壊発光

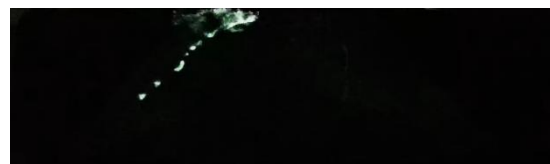


図9 せん断破壊による破壊発光

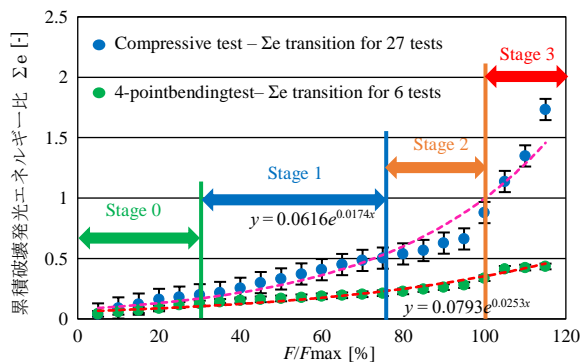


図10 累積発光エネルギー比の推移と標準誤差

につれて累積破壊発光エネルギー Σe の増加率も指数関数的に大きくなっていくことから、増加率や増加率の変動から損傷度を判定できると考えられる。

4.4 CNN 技術を用いたコンクリートの損傷度評価

(1) 概略 MLを塗布した供試体を用いて一軸圧縮試験および4点曲げ試験の結果から CNN 技術を用いて、画像分類、画像検知機能による破壊形態、損傷部位と損傷度を推定するための可能性について探る。

(2) 一軸圧縮試験の CNN 解析 アーキテクチャ SSD, 総データ数 287 枚, テストデータ数 28 枚, エポック数 50, スナップショット間隔 200 パッチサイズ 1, 最適化アルゴリズム adam による物体検知を実施する。ここで Score は物体検知の信頼度を表し, Score が 1 の場合, 100%の信頼度で物体検知に成功していることになる。それぞれの Stage における最大の破壊輝度をそれぞれの Damage レベルとする。このときの Score を比べると, Damage 3 の Score が 0.958 であったのに対し, Damage 1 の Score は 0.765, Damage 2 の Score は 0.886 と Score が低くなっていた。これは Damage 1 の破壊発光が Damage 3 に比べ輝度値が小さいため認識が困難だったと考えられる。対策として, 教師データを増やすことや, より発光性能の高い ML を使用することで, 精度の向上につながると思われる。

(3) 4点曲げ試験の CNN 解析 曲げひび割れとせん断ひび割れの種別を判断する。

Score を比べると, 曲げひび割れの Score が 0.724, 図 11 のせん断ひび割れの Score が 0.981 であった。曲げひび割れに比べてせん断ひび割れの輝度値が大きいため, 精度が高くなったと考えられる。

(4) CNN 解析における今後の展望 画像解析による損傷度評価では, 1 枚の画像の領域を個々に区分けしない限り, 通常 1 画面内での損傷度および累積損傷度を評価することになる。CNN 技術ではそのことは意識せずとも損傷度と損傷部位を特定することが可能である。図 12 は 1 画面内に複数の破壊(き裂の発生)を CNN が検知した画像である。これは一軸圧縮試験の結果であるが, より広範囲を迅速かつ簡易的に評価できる可能性がある。

一方で, CNN 特有の懸念もある。Damage 3, Damage 1 の判定を導き出した結果で決定根拠が不明ということである。AI がどこに注目して判断しているかの根拠としてヒートマップがあるが, Damage 3 では概ね破壊発光を捉えて判断しているが Damage 1 では AI の注目領域が破壊発光からやや離れた領域に着目することがある。これは破壊発光の弱さとその発光形状が曖昧な場合では出力結果のばらつきにもつながっている。今後の CNN 技術における課題は十分な実験データと教師データの正確さをどう適切に収集して精度 (Score) を上げていくかがあげられる。

参考文献

- (1) 徐ら, 応力発光による構造体診断技術, NTS, 2012
- (2) LIU, XU, YOSHIDA, TU, UENO, KAINUMA, Scalable Elasticoluminescent Strain Sensor for Precise Dynamic Stress Imaging and Onsite Infrastructure Diagnosis, Adv. Mater. Technol., Vol.4, Issue 1, 1800336, Jan. 2019.
- (3) 開放特許情報番号 L2014000277
- (4) Miyagawa, M., Shimura, J., Suzuki, T. and Tamiya, T., Analysis of in-plane problems for isotropic elastic medium with many circular holes or rigid inclusions, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol. 7, No. 6, pp. 540-552, 2013

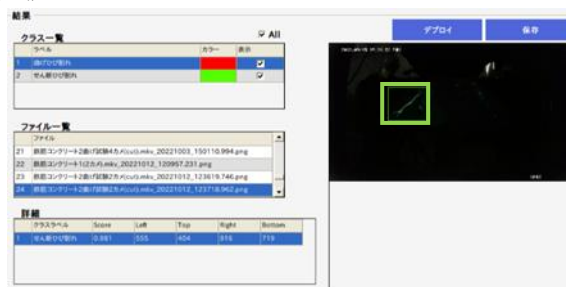


図 11 せん断ひび割れの物体検知の結果 (Score = 0.981)

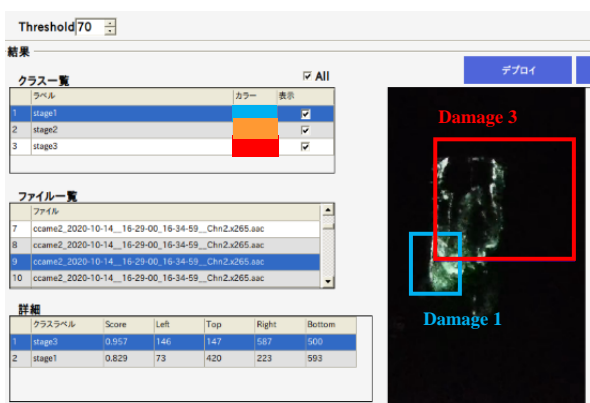


図 12 CNN により複数の破壊を同時に検知

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 MIYAGAWA Mutsumi, SHIMURA Jyo, SASAKI Toru, TANE Takeshi	4. 巻 89
2. 論文標題 Analysis of antiplane problems with singular disturbances for isotropic elastic medium with two elliptical elastic inclusions	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.23-00041	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 TANE Takeshi, SASAKI Toru, MIYAGAWA Mutsumi, KUROSE Masashi, KIMURA Kiyokazu	4. 巻 71
2. 論文標題 Analysis of Anisotropic Elastic Medium with Multiple Elliptical Holes Subjected to Uniform Load of in-Plane and Out-of-Plane Shear at Infinity	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Society of Materials Science, Japan	6. 最初と最後の頁 773 ~ 780
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2472/jsms.71.773	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 宮川睦巳, 志村穰, 佐々木徹, 種健
2. 発表標題 応力発光体を用いた破壊発光の輝度値ヒストグラムを用いた連続的損傷度評価に関する基礎研究
3. 学会等名 日本機械学会年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宮川睦巳, 志村穰, 宮下幸雄, 中村一史
2. 発表標題 応力発光体を用いた累積外力による損傷評価システムに関する基礎研究
3. 学会等名 日本機械学会年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮川睦巳, 志村穰, 宮下幸雄, 中村一史
2. 発表標題 応力発光体を用いた破壊発光の画像解析およびCNN技術による損傷度評価
3. 学会等名 山梨講演会2021[No.210-3]
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮川睦巳
2. 発表標題 応力発光体を用いた累積外力による損傷評価システムの開発
3. 学会等名 第3回応力発光技術分科会招待講演, 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 元吉大介, 宮川睦巳, 中村一史, 宮下幸雄
2. 発表標題 応力発光体を用いた応力解析とレジリエンス強化に関する基礎研究
3. 学会等名 第39回数理科学講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Daisuke MOTOYOSHI, Mutsumi MIYAGAWA, Hitoshi NAKAMURA, Yukio MIYASHITA
2. 発表標題 Basic Study on Stress Analysis and Resilience Enhancement using Mechanoluminescence
3. 学会等名 5th International Conference of Science of Technology Innovation 2020, Nagaoka University of Technology (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岩崎辰紀, 鈴木拓雄, 宮川睦巳, 田宮高信, 杉本聖一
2. 発表標題 応力発光体を用いたコンクリートの曲げ試験における損傷度評価
3. 学会等名 第42回数理学講演会, 東京都立産業技術高等専門学校
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 宮川睦巳, 志村穰, 佐々木徹, 種健
2. 発表標題 応力発光体を用いた破壊発光のモニタリングによる損傷度評価に関する基礎研究
3. 学会等名 2023年電気学会電子・情報・システム部門大会, 北海道科学大学
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------