

徐 超男

(独)産業技術総合研究所
生産計測技術研究センター・チーム長

応力発光体を用いた安全管理ネットワークシステムの創出

§ 1. 研究実施の概要

本研究は、構造物全体の応力履歴・異常を独自の応力発光デバイスによって包括的に監視し、重大事故につながる破壊や劣化を早期に予知・検出する新安全管理ネットワークシステムを創出することを目的としている。具体的には、「リアルタイム応力異常検出システム」、「応力履歴記録システム」の創出を行い、これらを「ネットワークの接続・統合」によって包括的な安全管理システムとし、実構造物での「実証試験」へと繋げていくものである。

これまでに、応力発光塗膜センサの発光特性データベースの構築、応力異常検出システムの構築に最適化した光センシング方式の開発、微小亀裂発生検出システムの構築、光記録システムの検証と最適化についての具体的な技術開発を行い、「リアルタイム応力異常検出システム」および「応力履歴記録システム」の創出を行った。また、ネットワークシステムのノードの設計・試作し、応力発光による亀裂進展の検出に成功した。さらに、研究加速のため、実構造物の安全状態を検出するリアルタイム応力異常検出システムの適用化、これを補完するものとして応力履歴記録システムの最適化、並びに、これらのシステムの二次元的なセンシングエリアをネットワークによって連結・統合することにより対象物全体を包括的にモニタリングするシステムの構築の研究と同時に、実構造物での実証試験を平行して行っている。前記の各システムの適用化を図りながら、実構造物・実現場環境での実稼動を実現した。センサ・システムの有用性が実証されている。

§ 2. 研究実施体制

(1)「AIST」グループ

- ① 研究分担グループ長: 徐 超男(独立行政法人 産業技術総合研究所、チーム長)

② 研究項目

応力発光体を用いた安全管理ネットワークシステム

リアルタイム応力異常検出システム

- ・ 各種条件下における発光特性のデータベース化
- ・ センサノードの性能評価および課題抽出
- ・ 異常検出システムの構築と最適化

応力履歴記録システム

- ・ 応力履歴の検出試験
- ・ 単一型応力記録センサの開発

ネットワークの接続・統合

- ・ ネットワークノードの試作・改良
- ・ 各システムとのインターフェイス要素技術開発
- ・ ネットワークシステムの構築と駆動

実構造物での実証実験と最適化

- ・ 実証試験のためのセンサ作製とシステム適用
- ・ 実構造物での実証試験

(2)「KYUDAI」グループ

① 研究分担グループ長: 汪 文学(九州大学、准教授)

② 研究項目

本年度は主に次の研究項目を実施する。AIST グループとの連密な連携研究により、応力発光塗膜センサからの発光特性と負荷の周波数、歪速度依存性、相当応力との関係を整理し、応力異常検出システムのためのデータベースを構築する。次に、き裂やノッチを有する複雑な形状を有する試験片の応力分布の数値解析および応力発光塗膜センサによる実験を行い、応力発光センサだけの情報から、構造物の損傷を診断する方法を開発する。

(3)「LP」グループ

① 研究分担グループ長: 辻 卓則(株式会社ロジカルプロダクト、代表取締役社長)

② 研究項目

通信ネットワークの開発

- ・ 有線センサノードの実システムへの接続
- ・ 無線センサノードの組み込みソフト開発と実システムへの接続

(4)「TAISEI」グループ

① 研究分担グループ長: 篠川 俊夫(大成基礎設計株式会社、グループ長)

② 研究項目

実構造物での実証試験と最適化

§ 3. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(4-1)に対応する)

(1)リアルタイム応力異常検出システム

本システム開発では、応力発光塗膜センサからの発光を、有線あるいは無線のセンサノードにより計測し、構造物の異常をリアルタイムに検出することを目指している。センサノードの開発およびコンクリート橋梁構造物における実証試験の結果に関する報告は後のセクションで述べるので、ここでは、各種条件下における応力発光特性についてのデータベース構築の進捗について述べる。

昨年度に引き続き、各種負荷、環境、測定条件における応力発光塗膜センサからの応答データの蓄積を行なっている^{9),14)}。応力発光強度の温度依存性については、常温付近では応力発光強度に大きな変化はないが、50℃以上では、温度の上昇に伴い、応力発光強度が低下することを見出した。従って、高温環境での用途に用いる場合には温度に対する補正が必要であることが確認された。また、有線センサノードには青色 LED を用いた励起機構を組み込んであり、所定の条件で繰り返し応力発光塗膜センサの励起を行なうことができる。これにより、汎用 CCD カメラモジュールで観測可能な高い応力発光強度を実現している。これらのデータを利用することにより、観測された応力発光強度が、どのようなひずみ・ひずみ速度に対応するものであるかを定量化することが可能となる。また、リアルタイムに亀裂の危険性を応力発光強度から定量評価するツールを開発した。各種の亀裂において、亀裂先端の応力発光強度と破壊現象を支配するパラメータである応力拡大係数が単一の曲線に対応することを発見した¹⁵⁾。

(2)応力履歴記録システムの開発

「応力履歴記録システムの開発」では、応力発光を積算的に記録するシステムを構築することで、リアルタイム応力検出システムの検出インターバル間の情報を補完すると共に、長期の応力履歴に関する情報を記録することが目的である。

本年度は、【履歴記録システムの構築と最適化】として、カメラ等機材を使用しない応力履歴記録システムへの最適化(応力発光塗膜センサと銀塩系感光フィルムにより構成)を行った。橋梁での野外実証試験に投入した結果、応力発光塗膜センサ下部にある亀裂からの発光記録に成功し、本開発の記録システムが、実現現場レベルにおける応力集中履歴の発見に対して有効であることを見出した。また、ネットワークカメラとの記録量の検量線により、亀裂部分(応力集中部)での記録が出来ることが、明らかになった。

更に、応力記録システムの最大の特徴である、長期の積算記録に関して、意義を検討した。具体的には、建物のひび割れ上に応力発光塗膜センサを塗布し、24 時間連続して計測が可能な CCD カメラにより発光の積算記録を行った。その結果、特に建物には応力印加や振動を与えていないにも関わらず、周辺の気温変化等に応じた建物の歪(亀裂の開口)に応じて、ひび割れに沿った発光を観測することに成功した。このことは、実現現場レベルでの僅かで遅い振動や変位に

伴う微弱な発光といった、リアルタイム応力検出システムには不向きで困難な情報に関して、積算記録システムが補完的な役割を果たすことを実証した、特筆すべき成果である。

今後は、履歴システムの特徴である長期間撮影に特化した最適化を推し進める。具体的には、検出条件・塗膜センサ発光特性の解明、システムの高感度化（単一粒子応力センサ）、実証実験を予定している。

(3) ネットワークの接続・統合

「ネットワークの接続・統合」については、応力発光体によって光として検出された構造体の各種異常を、電気的な信号に変換、ネットワークを用いて伝達し、全体の情報を統合することを目的とする。本年度は、有線 LAN で接続するネットワークノードの改良およびシステム構築を行い、橋梁での実証実験において亀裂の観測に成功した。また、発光パターンによる異常検出ソフトウェア開発を行った。さらに ZigBee を用いた無線ネットワークノードについて試作を行い、実証実験での信号伝送および応力発光検出に成功した。

有線系ネットワークノードは、ギガビットネットワークインターフェイスを有する CCD カメラモジュールと青色 LED を用いた励起機構から構成される。PoE 技術を取り入れることにより、信号線と電力線を1本のケーブルにまとめ、配線作業の簡易化を図っている。橋梁での実証実験では2台のノードをノートPCで制御し、50cm×1m のエリアの応力発光の検出に成功した。さらに、HLACを用いた異常診断ソフトウェアを開発し、観測画像データを事後的に処理して高精度に異常を検出することが可能であることを示した。今後、これを用いたリアルタイム処理によって、その場での異常診断の性能向上を目指し、伝達情報帯域に制約が存在する遠隔モニタリングへの適用を目指す。

無線センサノードについては、センサノードとPCとの間で無線通信実験を行い、センサノードで検出した情報が、PC側に伝達されていることが確認できた。また、応力発光素子の発光を捕らえたデータと加速度が変化しているデータが同期していることが確認できた。今後は、フォトダイオードセンサのセンシングエリア拡大と遠隔化を目指すとともに、無線センサノードをネットワークに組み込み、ネットワークを通してデータを収集するためのソフト開発、実証試験を実施する予定である。



図1 有線センサノード

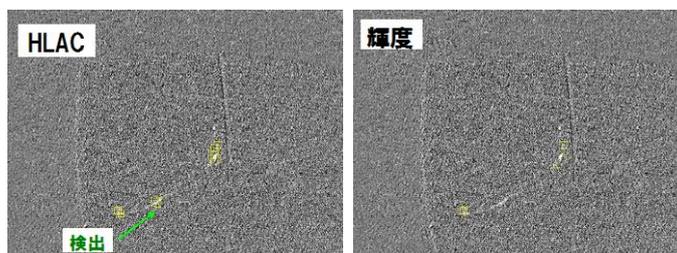


図2 HLAC による応力発光パターン検出例

(4) 実構造物での実証試験と最適化

実構造物(橋梁)での実証試験については、ユーザーニーズの高い橋梁の健全性評価を行った。築 50 年で(昭和 34 年施工)、しかも交通量の多い橋サイトを選定し、本研究で開発されたセンサ・システムの有用性・有効性・信頼性の検証を行った。

概算の結果最も応力集中が予想される橋脚中央部(図 3B, C)に大面積の応力発光塗膜センサ(図 3D)を敷設し、リアルタイム計測用 CCD カメラシステムによる発光検知、積算記録システム(銀塩系感光材料、カメラ未使用)による積算情報記録、無線ネットワークによる危険情報の転送に関して検討を行った。

特筆すべき結果として、目視ではひび割れが確認できなかった場所でも応力発光を確認し、亀裂の進展に繋がる応力集中を見抜くことに成功した。塗膜センサ敷設部分前の入念な清掃と検証により、橋梁には 45cm のひび割れが確認できたが、特にひび割れ先端までの 10cm 程度は、目視では見落とす程度の極めて細い亀裂であった(図 3E)。それにも関わらず、亀裂に沿った部分で再現性の良い応力発光を観測することに成功した。更に、目視では全くひび割れが確認できなかったひび割れ先端より先の部分(橋梁では下方向)、即ち、今後ひび割れが進展すると予想される領域に対しても、再現性の良い応力発光を検知することに成功した(図 3F)。

更に、本安全管理ネットワークシステム実証では、輝度 $17\text{mcd}/\text{m}^2$ 以上の応力発光を仮想的な応力異常として抽出し、有線・無線のネットワークシステムを使用して危険信号を発信することに成功した(図 3G)。

配管系での実証試験では、本年度、深さの異なる内部欠陥(切欠き)を導入した配管の表面に応力発光センサを塗布し(図 4)、内圧を負荷した場合の応力発光と内部欠陥との関連性について調査した。はじめに、欠陥箇所への応力集中により、配管表面の応力発光強度に分布が生じることを明らかにし(図 5)、発光強度分布からの欠陥箇所の特定が可能であることを確認した。また、欠陥の深さが深くなるにつれ、欠陥周辺の応力発光強度が大きくなることを明らかにし、発光強度からの欠陥の危険レベル(深さ)の推定が可能であることを示した。さらに応力発光強度から求めた周方向ひずみ分布はひずみゲージによる測定結果や数値解析結果と一致することを示し(図 6)、発光強度の定量評価が可能であることを確認した。以上のように本試験では、配管内の欠陥を定量的に可視化することに成功し、危険レベルの推定および危険予知に対して有用な手段であることを示した。

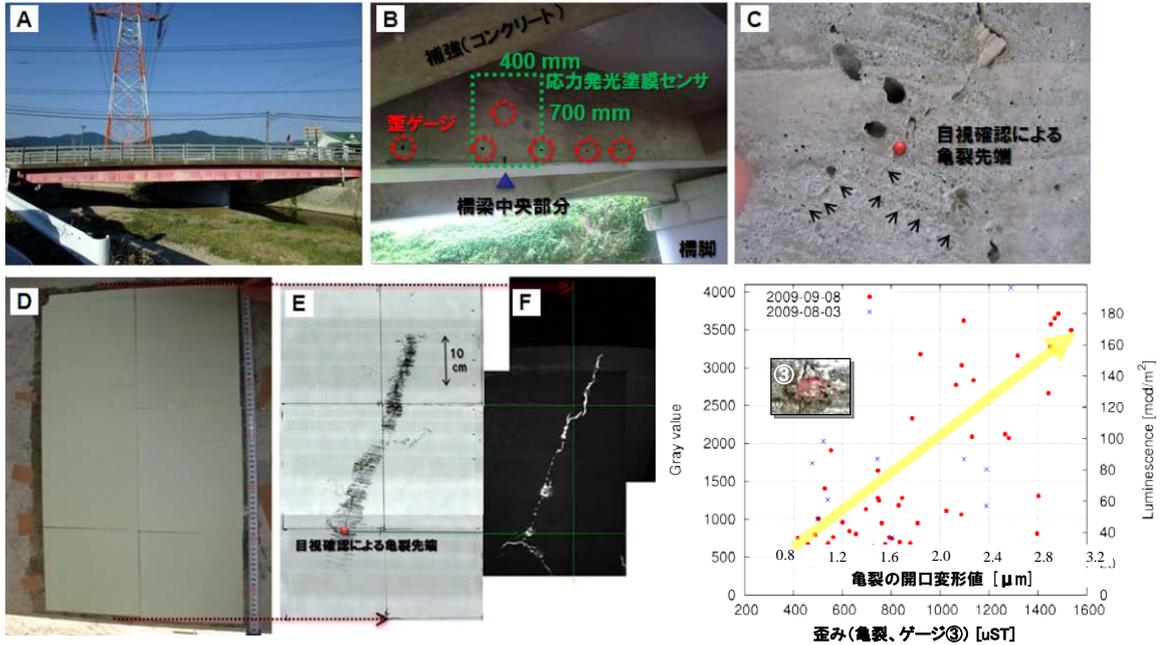


図 3 (A) 実証橋サイトの写真、(B) 応力発光塗膜センサ、歪ゲージ等敷設位置、(C) センサ敷設領域で確認した亀裂先端の写真。図中の赤丸は、Eの赤丸の位置と一致する、Fの応力発光画像と比較すると、矢印の位置への亀裂進展が予想できる。(D) 応力発光塗膜センサの写真、(E) 応力発光塗膜センサ領域にあった亀裂の等倍複写、(F) 応力発光画像、D-Fは比較の為、同倍率にしてある。目視で亀裂が確認できた点より下部に応力発光を確認。(G) 仮想危険レベルの発光輝度 $17\text{mcd}/\text{m}^2$ を超えた応力発光輝度値と、ひび割れを跨いで設置した歪ゲージの値(亀裂の開口変位値を同時示す)との相関。赤: 9月8日の計測結果、青: 8月3日の実証結果についてプロット。

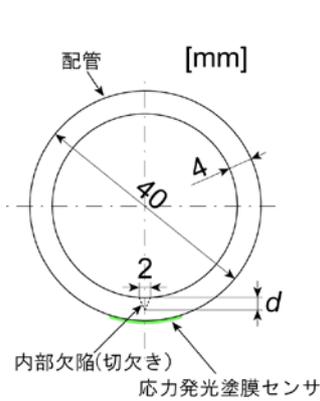


図 4 配管

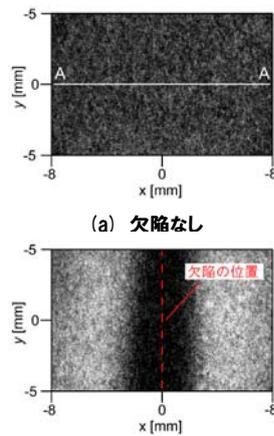


図 5 発光画像

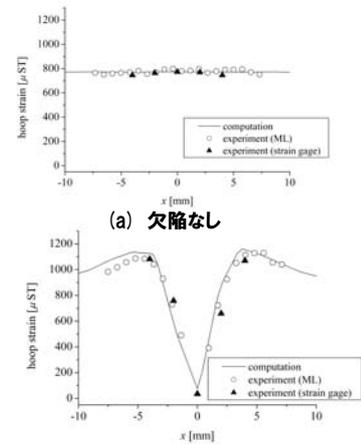


図 6 周方向ひずみ分布(A-A線上)

§ 4. 成果発表等

(4-1) 原著論文発表

●論文詳細情報

1. H. Zhang, N. Terasaki, H. Yamada, C.N. Xu, Mechanoluminescence of europium-doped SrAMgSi₂O₇ (A=Ca, Sr, Ba), Japanese Journal of Applied Physics, Vol.48, 04C109(1)-04C109(4), 2009.04, DOI: 10.1143/JJAP.48.04C109
2. N. Terasaki, C.N. Xu, Mechanoluminescence recording device integrated with photosensitive material and europium-doped SrAl₂O₄, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.2009 No.48, 04C150(1)-04C150(4), 2009.04, DOI: 10.1143/JJAP.48.04C150
3. X. Fu, H. Yamada, C.N. Xu, Property of highly oriented SrAl₂O₄:Eu film on quartz glass substrates and its potential application in stress sensor, Journal of the Electrochemical Society, Vol.156 No.9, J249-J252, 2009.06, DOI: 10.1149/1.3156652
4. L. Zhang, C.N. Xu, H. Yamada, N. Bu, Upgrade Mechanoluminescence by Sr²⁺ Substitution in CaAl₂Si₂O₈:Eu²⁺, Key Engineering Materials, Vol.421-422, 315-318, 2009.06, DOI: 10.4028
5. X. Fu, H. Yamada, C.N. Xu, Triboluminescence of highly oriented SrAl₂O₄:Eu film and its potential role as a stress indicator, Key Engineering Materials, Vol.421-422, 319-322, 2009.10, DOI: 10.4028
6. N. Bu, N. Ueno, C.N. Xu, O. Fukuda, Measurement of weak light emitted from mechanoluminescence materials using Si photodiode and light concentrator, Proceedings of the 8th IEEE Conference on Sensors, 1528-1532, 2009.10
7. N. Terasaki, H. Zhang, H. Yamada, Y. Imai, C.N. Xu, Hybrid material consisting of mechanoluminescent material and TiO₂ photocatalyst, Thin Solid Films, Vol.518 No.2, 473-476, 2009.11, DOI: 10.1016/j.tsf.2009.07.026
8. H. Zhang, N. Terasaki, H. Yamada, C.N. Xu, Development of mechanoluminescent micro-particles CaMgSi₂O₇:Eu, Dy and their application in sensors, Thin Solid Films, Vol.518 No.2, 610-613, 2009.11, DOI: 10.1016/j.tsf.2009.07.124
9. C.S. Li, C.N. Xu, Y. Imai, N. Bu, Full-field measurement of dynamic stress by mechanoluminescence sensing film, Proceedings of SPIE, Vol.7493, 749335-1~749335-7, 2009.12, DOI: 10.1117/12.845577
10. L. Zhang, C.N. Xu, H. Yamada, N. Bu, Enhancement of Mechanoluminescence in CaAl₂Si₂O₈:Eu²⁺ by Partial Sr²⁺ Substitution for Ca²⁺, Journal of The Electrochemical Society, Vol.157 No.3, J50-J53, 2010.01, DOI: 10.1149/1.3274879
11. J.C. Zhang, X.S. Wang, X. Yao, H. Yamada, C.N. Xu, Studies on AC

- Electroluminescence Device Made of BaTiO₃-CaTiO₃:Pr³⁺ Diphase Ceramics, Applied Physics Express, Vol.3 022601(1)-022601(3), 2010.02, DOI: 10.1143/APEX.3.022601
12. H. N. Luitel, T. Watari, T. Torikai, M. Yada, R. Chand, C.N. Xu, K. Nonaka, Highly water resistant surface coating by fluoride on long persistent Sr₄Al₁₄O₂₅:Eu²⁺/Dy³⁺ phosphor, Applied Surface Science, Vol.256 No.8, 2347-2352, DOI: 10.1016/j.apsusc.2009.10.065
 13. B.P. Chandra, C.N. Xu, H. Yamada, X.G. Zheng, Luminescence Induced by Elastic Deformation of ZnS:Mn Nanoparticles, Journal of Luminescence, Vol.130 442-450, 2010.03, DOI: 10.1016/j.jlumin.2009.10.010
 14. C.S. Li, C.N. Xu, Y. Imai, N. Bu, Real-time visualization of the Portevin-Le Chatelier effect with mechanoluminescent sensing film, Strain, in press
 15. Y. Imai, C.N. Xu, W.X. Wang, Evaluation of stress concentration near the crack tip using mechanoluminescent coating, Journal of the Japanese Society for Experimental Mechanics, in press
 16. D. Ono, C.Z. Li, N. Bu, C.N. Xu, Visualization of Internal Defect of a Pipe Using Mechanoluminescent Sensor, Journal of the Japanese Society for Experimental Mechanics, in press
 17. C.Z. Li, C.N. Xu, Y. Adachi, N. Ueno, Real-time detection of axial force for reliable tightening control, Proceeding of SPIE, in press
 18. H. Zhang, N. Terasaki, H. Yamada, C.N. Xu, Detection of Stress distribution using Ca₂MgSi₂O₇:Eu,Dy micro-particles, Physica E, in press

(4-2) 知財出願

- ① 平成 21 年度特許出願件数(国内 3 件)
- ② CREST 研究期間累積件数(国内 18 件)