

「先進的統合センシング技術」  
平成 18 年度採択研究代表者

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、トンネルやプラントなどの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、トンネルなどの構造物での「実証試験」へと繋げていくものである。

今年度は、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。

今後、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開発、これを補完するものとして応力履歴記録システムの開発、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を進め、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の創出と実証試験を行う。

## 2. 研究実施内容

### (1)リアルタイム応力異常検出システム

今年度は、応力発光塗膜センサの発光特性データベースの構築を進めると共に、応力発光塗膜センサによる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を行ない、微小亀裂発生検出に特化したシステムの構築と実証試験を行なった。

単純応力(引張、圧縮、せん断)条件における応力発光特性のデータベース化を進めている。一例として、同一歪み量までの単純引張/圧縮条件での発光強度の歪み速度依存性について、幅広い歪み速度条件で、応力発光強度は歪み速度のべき乗に比例するという関係があることを

見出した(図1)。

また、構造物の安全管理に際して非常に重要な、亀裂が存在する場合についても、種々の条件での発光挙動を調べた。疲労により亀裂を生じさせた試験片に応力発光塗膜センサを塗布することにより、肉眼では確認の困難な亀裂の発生箇所およびその大きさを、応力発光画像から可視化することが可能であることを確認した。亀裂存在時は亀裂の先端部に応力集中があり、最も強く発光する。異なる長さの亀裂を持つ試験片からの発光強度を調べた結果、遠方応力と亀裂の長さから算出される、亀裂の関与する破壊現象を支配するパラメータである応力拡大係数と、亀裂先端の応力発光強度が単一の曲線で記述される対応関係にあることを見出した(図2)。

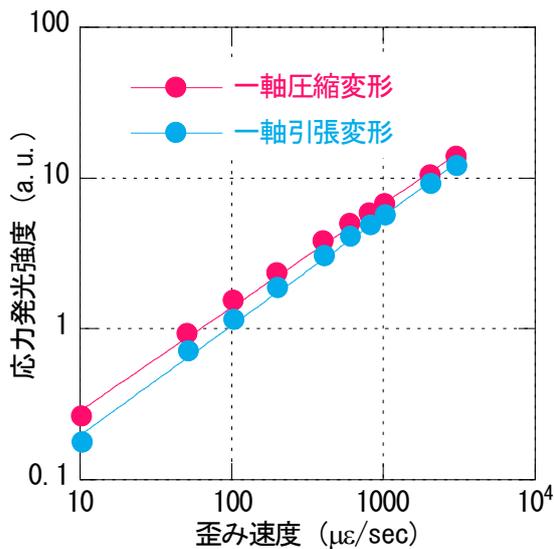


図1. 応力発光強度の歪み速度依存性

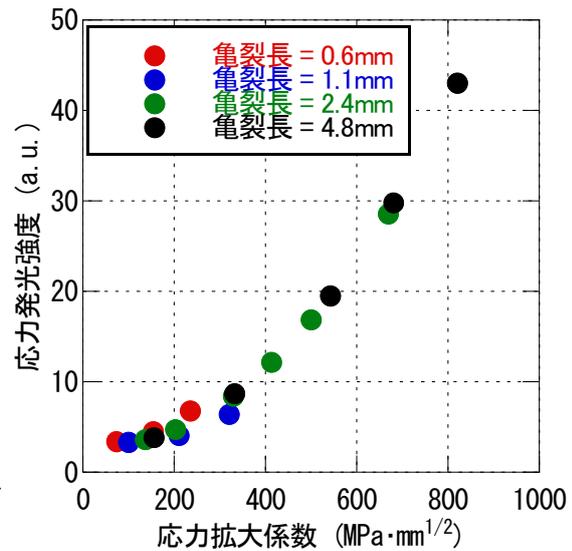


図2. 亀裂先端の応力発光強度と応力拡大係数の関係

また、汎用 CCD カメラを受光素子に用いた有線センサノードを開発し、高価な画像計測機器を用いなくても、亀裂先端での応力発光の検出が可能であることを実証した。詳細は(3)ネットワークの接続・統合の項で述べる。

## (2) 応力履歴記録システム

19年度までに選定した記録材料システム群を用いて、積算的な応力発光記録に関する実証試験を行い、積算記録データとリアルタイム検出データの関連付けを行った。具体的には、光記録材料としては、現時点で最高感度を持つ銀塩写真材料系を用いた(図1)。

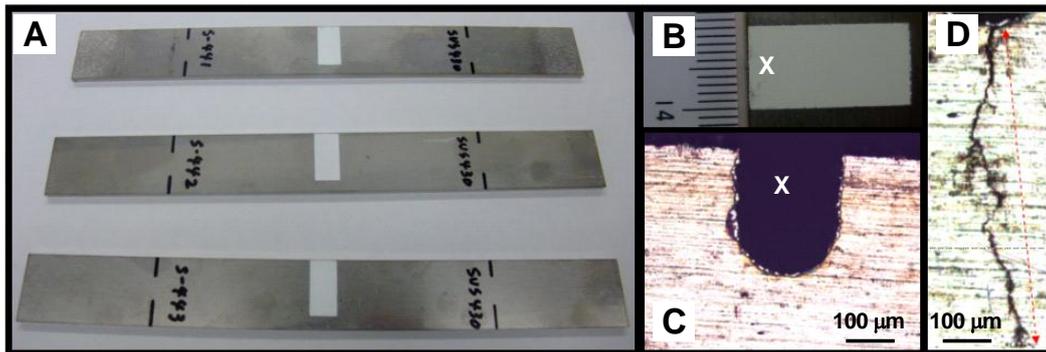


図1 実証試験に用いた応力塗膜センサを塗布した(A) サンプルの写真、  
 (B) 応力発光塗膜部分の写真(X付近に切欠)、(C) 切欠部(X部)の顕微鏡写真(100倍)、  
 (D) 亀裂部の顕微鏡写真(100倍)

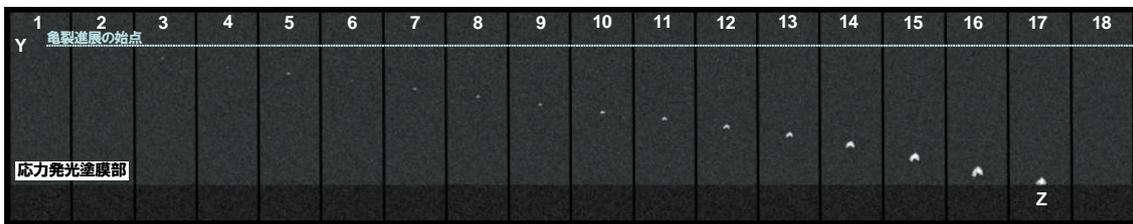


図2 亀裂進展に伴う発光をCCDカメラで撮影した写真。発光点が下に移動し、  
 亀裂が始点Yから塗膜の縁Z点まで進展している様子が示されている。(18後、破断)

応力発光塗膜センサを塗布した切欠き入りの試験片(図1A-C)に対して連続的に引っ張り応力を印加した際の発光を、銀塩光記録材料を用いて積算的に記録した。更に、これは別に、本試験をCCDカメラで同時に撮影したところ、リアルタイム応力検出システムの結果と同様に、引っ張り応力の連続的な印加に伴って、亀裂先端が発光すること、更にはその亀裂が進展していくことが示された(図2)。

更に、その亀裂の顕微鏡観察を行ったところ、亀裂先端は幅10~20 $\mu$ mであった(図1D)。この進展具合を銀塩フィルムで撮影した像を、図3に示す。これには、亀裂の進展に沿う位置に一筋の光記録跡(緑の線)、並びに筋の周辺一帯に微かに明るくなった記録部分が観測された。この像は、リアルタイム検出システムで検出してきた結果の積算となっている。このことから、「応力履歴記録システム」はリアルタイム検出システムと同様の亀裂への応力集中を記録できることを明らかにし、中間のマイルストーンである「100 $\mu$ レベルの亀裂検出」を達成できた。ただ、この記録材料は、既に製品であるため、計測対象物への適用・使用し易さ・記録効率の点から理想的なシステムと考える単一応力記録センサにすることは難しく、新たに作製する



図3 銀塩写真材料を用いた100 $\mu$ クラックへの応力積算記録(積算時間:500s)。最初Y点にあった亀裂先端が、応力印加によりZまで進展していく様子が記録されている。

「応力履歴記録システム」で同様の事が可能かどうか、が今後の課題として残る。

### (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設計し、応力発光による亀裂進展の検出に成功した。また、ネットワークノードと応力発光素子のインターフェイスとなる光検出素子について、効率的な応力発光の検出を目指した集光系の設計・試作を行った。さらに ZigBee を用いた無線ネットワークノードについて設計・試作を行った。

有線系ネットワークノードは画像処理装置と CCD カメラ装置から構成され、後者には応力発光をより効果的に検出するため青色 LED を用いた励起機構を組み込んである。これによって応力発光塗膜を形成したステンレス試験片の亀裂進展を、応力発光画像として捕捉し、ネットワークを介して転送することに成功した。ただし、橋梁などでの実証試験現場では、CCD 素子の S/N 比不足が懸念されるため、撮像系を中心とした改良を実施する予定である。集光系についてはミラーを用いた光り閉じ込め型のものを設計・試作し、集光率の向上を達成したが、期待されたほどの向上率に達しておらず、改善が必要である。無線ネットワークノードでは、電力の制約から処理能力が限られるため、これに接続する光検出素子を最大 9 素子程度で設計を行い、試作を行った。



図1: 有線センサノード

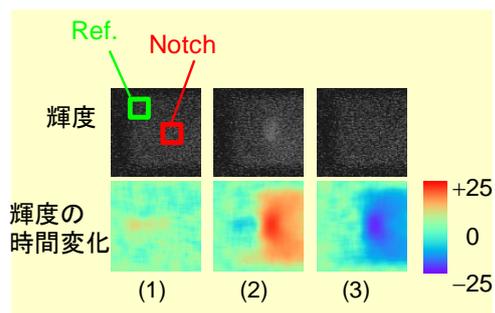


図2: 亀裂進展時の応力発光画像

## 3. 研究実施体制

### (1) 「(独)産業技術総合研究所」グループ

① 研究分担グループ長: 徐 超男( 産業技術総合研究所 チーム長)

#### ② 研究項目

##### ①リアルタイム応力異常検出システム

- ・発光特性データベース
- ・塗膜センサの耐久性・耐候性向上
- ・光センシング方式の開発
- ・亀裂検出システムの構築と実証試験

##### ②応力履歴記録システム

- ・応力履歴の検出試験
- ・検出限界(範囲)と記録の線形性評価

- ・単一型応力記録センサの開発
- ③構造物全体の監視/診断ネットワークのシステムの構築
  - ・ネットワークノードの試作・改良
  - ・ノード駆動のための要素技術開発
  - ・ネットワークシステムの構築と駆動

(2)「国立大学法人 九州大学」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

本年度は次の研究項目を実施する。AIST グループとの連密な共同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、応力成分、歪エネルギーとの関係を整理し、必要に応じて追加試験を行い、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。複雑な形状を有する対象物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計測を行い、塗膜センサ設置個所および塗膜センサ設置個所から離れた箇所の損傷の検出を研究し、複数の塗膜センサの情報から、損傷の場所と大きさを診断する方法を開発する。

(3)「(株)ロジカルプロダクト」グループ

①研究分担グループ長:辻 卓則((株)ロジカルプロダクト 代表取締役社長)

②研究項目

①通信ネットワークの開発

応力発光の捕捉および情報伝達を目的とした CCD カメラ付き有線センサノードのハードウェアに、ファームウェアを組み込み、TCP/IP ベースの有線系ネットワークへの接続を行った。その中で抽出した次の問題点の改良を行った。

(ラインのずれの修正、CCD カメラの改良(ATW(オートホワイトバランス)/AWC(オートホワイトバランス調整)、BLC(逆光補正)の ON/OFF、AGC(オートゲインコントロール)の ON/OFF、自動電子シャッターの修整、フレームのタイミング調整)

無線センサノードについては、電池駆動を前提とした小型省電力の無線系のセンサノードの設計・試作を行った。回路設計、パターンアンテナ設計等を行い、試作機で基本的な通信が行えることを確認した。応力発光の補足は高感度フォトランジスタで実現し、無線通信方式には ZigBee を採用した。

今後は、カメラ感度を上げた有線センサノードの開発ならびに、無線センサノードをネットワークに組み込むためのソフト開発を実施する予定である。

#### 4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表 (原著論文)

(国内:発行済み)

1. 徐超男, “応力発光体を用いたセンシング-「見えない」危険を可視化する技術”, CERAMICS JAPAN3月号, Vol.44 No.2, 154-160, 2009.3

(国際:発行済み)

1. X. Fu, H. Yamada, K. Nishikubo, H. Zhang, C.N. Xu, "Preparation and characterization of fiber-textured SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>: Eu films grown using a homo-buffer layer", *Journal of Crystal Growth*, Vol.310 No.11, 2885-2889, 2008.5
2. H. Zhang, H. Yamada, N. Terasaki, C.N. Xu, "Blue light emission from stress-activated CaYA13O7: Eu", *Journal of the Electrochemical Society*, Vol.155 (5), J128-J131, 2008.5
3. X. Fu, H. Yamada, C.N. Xu, "Triboluminescence properties of highly orientated SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>: Eu films on inconel 600 substrate", *Electrochemical and Solid State Letters*, Vol.11 No.5, J27-J30, 2008.5
4. L. Zhang, N. Bu, H. Yamada, C.N. Xu, "Multifunctional performance of europium-doped feldspar ceramics", *Advanced Materials Research*, Vol.47-50, 209-211, 2008.5
5. N. M. Rao, D.R. Reddy, B.K. Reddy, C.N. Xu, "Intense red mechanoluminescence from (ZnS)<sub>1-x</sub>(MnTe)<sub>x</sub>", *Physics Letters A*, Vol.372 4122-4126, 2008.5
6. C.S. Li, C.N. Xu, L. Zhang, H. Yamada, Y. Imai, "Dynamic visualization of stress distribution on metal surface by mechanoluminescence image", *Journal of JSEM*, Vol.8, 79-82, 2008.7
7. H. Yamada, K. Nishikubo, C.N. Xu, "Determination of Eu sites in highly europium-doped strontium aluminate phosphor using synchrotron X-ray powder diffraction analysis", *Journal of the Electrochemical Society*, Vol.155 No.7, F139-F144, 2008.7
8. C.S. Li, C.N. Xu, Y. Imai, W.X. Wang, L. Zhang, H. Yamada, "Real-time monitoring of dynamic stress concentration by mechanoluminescent sensing film", *Applied Mechanics and Materials* Vol.13-14, 247-250, 2008.7
9. X. Fu, H. Yamada, C.N. Xu, "Fabrication of triboluminescent film on inconel 600 substrate by RF magnetron sputtering method", *Key Engineering Materials*, Vol.388, pp.153-156, 2008.8
10. T. Torii, Y. Adachi, H. Yamada, Y. Imai, C.N. Xu, "Enhancement of mechanoluminescence from ZnS: Mn, Te by wet process", *Key Engineering Materials*, Vol.388, pp.301-304, 2008.8
11. L. Zhang, C.S. Li, H. Yamada, C.N. Xu, "A novel blue-violet emitting mechanoluminescent material with calcium aluminosilicate", *Key Engineering Materials*, Vol.388, pp.277-280, 2008.8
12. C.S. Li, C.N. Xu, L. Zhang, H. Yamada, Y. Imai, W.X. Wang, "Dynamic visualization of stress distribution by mechanoluminescence image", *Key Engineering Materials*, Vol.388, pp.265-268, 2008.8
13. H. Zhang, H. Yamada, N. Terasaki, C.N. Xu, "New mechanoluminescent materials with various colors", *Key Engineering Materials*, Vol.388, pp.305-308, 2008.8
14. C.S. Li, C.N. Xu, L. Zhang, H. Yamada, Y. Imai, "Dynamic visualization of stress distribution on metal by mechanoluminescence images", *Journal of Visualization*, Vol.11 No.4, 329-335, 2008.11

15. N. M. Rao, G. Krishnaiah, S. Sambasivam, K.P. Reddy, D.R. Reddy, B.K. Reddy, C.N. Xu, "Structural, optical and electrical properties of luminescent (ZnS)<sub>1-x</sub>(MnTe)<sub>x</sub> powders", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol.468 360-364, 2009.1
16. W.X. Wang, T. Matsubara, Y. Takao, Y. Imai, C.N. Xu, "Visualization of stress distribution using smart mechanoluminescence sensor", *Materials Science Forum*, Vol.614 169-174, 2009.2

(国際: in Press)

1. N. Terasaki, K. Sakai, T. Koga, C. Li, Y. Imai, H. Yamada, Y. Adachi, K. Nishikubo, C.N. Xu, "Mechanoluminescence studies upon single nanoparticles by AFM-photomeasurement system", *MRS Proceedings*

(国際: accepted)

1. H. Yamada, W.S. Shi, K. Nishikubo, C.N. Xu, "Origin of structural disorder and luminescent quenching in SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>: Eu spherical phosphor particles", *Journal of the Electrochemical Society*
2. H. Yamada, H. Kubozono, H. Kusaba, C.N. Xu, X.G. Zheng, "Crystallographic thermal expansions in the alkali-earth aluminate phosphors with the stuffed tridymite structure", *Journal of Applied Physics*
3. H. Zhang, N. Terasaki, H. Yamada, C.N. Xu, "Blue light emission from stress-activated Sr<sub>2</sub>MgSi<sub>2</sub>O<sub>7</sub>: Eu", *International Journal of Modern Physics B*
4. H. Yamada, C.N. Xu, H. Kubozono, X.G. Zheng, "Visible red emission from Eu doped SrO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> amorphous thin film: fabrication, optical, and luminescent properties", *Journal of the Electrochemical Society*
5. C.S. Li, C.N. Xu, Y. Imai, W.X. Wang, N. Bu, L. Zhang, "Real-time monitoring of dynamic stress concentration by mechanoluminescent sensing film", *Stain*
6. H. Zhang, N. Terasaki, H. Yamada, C.N. Xu, "Development of mechanoluminescent micro-particles CaMgSi<sub>2</sub>O<sub>7</sub>: Eu, Dy and their application in sensors", *Thin Solid Films*
7. N. Terasaki, C.N. Xu, "Mechanoluminescence recording device integrated with photosensitive material and europium-doped SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>", *Japanese Journal of Applied Physics*
8. B.P. Chandra, C.N. Xu, H. Yamada, X.G. Zheng, "Luminescence induced by elastic deformation of ZnS:Mn nanoparticles", *Physical Review B*
9. N. Terasaki, H. Zhang, H. Yamada, Y. Imai, C.N. Xu, "Hybrid material consisting of mechanoluminescent material and TiO<sub>2</sub> photocatalyst", *Thin Solid Films*
10. H. Zhang, C.N. Xu, N. Terasaki, H. Yamada, "Luminescence from CaYAl<sub>3</sub>O<sub>7</sub>: Ce excited by multiple energy sources", *Applied Physics Letters*
11. H. Zhang, N. Terasaki, H. Yamada, C.N. Xu, "Mechanoluminescence of europium-doped SrAMgSi<sub>2</sub>O<sub>7</sub> (A=Ca,Sr,Ba)", *Japanese Journal of Applied Physics*
12. H. Zhang, N. Terasaki, H. Yamada, C.N. Xu, "Detection of stress distribution using

Ca<sub>2</sub>MgSi<sub>2</sub>O<sub>7</sub>:Eu,Dy micro-particles”, Physica E

(2) 特許出願

平成 20 年度 国内特許出願件数 : 10 件 (CREST 研究期間累積件数 : 15 件)