

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 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

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名 (研究機関名・職名は研究参加期間終了時点):

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 研究チーム長)

主たる共同研究者

汪 文学 (九州大学応用力学研究所 准教授)

辻 卓則 ((株) ロジカルプロダクト 代表取締役社長) (平成 20 年 4 月～)

田中 崇和 ((株) ロジカルプロダクト 代表取締役会長) (平成 19 年 4 月～平成 20 年 3 月)

篠川 俊夫 (大成基礎設計株式会社 グループ長) (平成 21 年 4 月～)

3. 研究実施概要

本研究では、構造物全体の応力状態を、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した。具体的には、産総研の応力発光技術グループ(AIST グループ)に加え、構造物の異常診断、応力解析の専門家(KYUDAI グループ)、センサネットワークの開発メーカー(LP グループ)、およびトンネル等の構造物安全検査の企業(TAISEI グループ)と研究チームを構成し、世界に先駆けて、【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】の開発を行い、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を創出した。さらに、研究チームに加えて、ユーザー企業、学会・行政・試験団体等の協同により、研究成果のセンサシステムの実現場への実証試験および最適化を行った。

本研究において、広範な社会的なニーズの強い要請に応えるために、どこにでも適用可能な、【応力発光塗膜】センサの開発を行い、高耐久性のスケラブル応力発光センサを初めて実現した。次に構造物の異常・劣化の早期診断を可能とするため、負荷状態を反映した応力発光検出に適した、光センシングデバイスの開発を行い、高性能な【有線イメージノード】と、【無線光検出ノード】の試作に成功した。また応力発光信号から構造物の診断を行うために必要な、診断【データベース】を構築し、加えて、システム化に必要なインタフェースの最適化を行い、事故予防・保守管理に資する、【リアルタイム応力異常検出システム】を創出した。更に、これを補完する「応力履歴記録システム」の創出と最適化、並びにこれらのシステムの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、全関心領域の包括的な【ネットワーク安全管理システム】を実現した。

実証試験では、実環境での長期間モニタリングのため、100 万回以上の試験や耐水性・耐久性のある応力発光塗膜センサの実証とともに、異常検出システム、応力履歴記録システム、それらを統合するネットワークシステムを実構造物に適用した。また、各種診断データベースを累積したことにより、モニタリングした応力発光の信号から、構造物の応力レベルや損傷診断が可能になった。更には研究加速のため、システムの適用化の研究と同時に、実構造物での実証試験を平行して行い、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働を実現した。試験では、供用中の橋梁での安全性評価や高圧タンクの検査に適用するなど、実世界での実用構造物への安全管理のサービス化を検証した。具体的には、供用中の橋梁の遠隔モニタリングの実証試験を長期間行い、システムの最適化を行った。また、建物、高圧タンク、工場設備等の実構造物での安全管理等の実証試験を加えて20件以上行った。

これらの実証試験を通して、(1)既存構造物の超高寿命化に必要な異常検出や健全性評価、破壊予知に必要な危険レベル診断、マイクロクラックの発生検出、および亀裂進展のモニタリング、(2)新規製造構造物の軽量化と安全化の両立に必要な応力分布の可視化などに成功している。これらのことにより、既存構造物、新規の構造物(製品)を問わず、構造物の健全度を評価し、適切なメンテナンス或いは、最適な設計・生産を行うことが可能となるため、構造物全体の安全化に貢献することができる。社会における実装面に関しては、本成果は

目視できないマイクロ亀裂の検出から、巨大な橋梁の毀損部位の診断、パイプラインの健全性・寿命評価など広く適用できることを実証できたことから、技術提供希望相談 200 社以上を受けており、社会から関心の高さが示されている。

#### 4. 事後評価結果

##### 4-1. 研究の達成状況及び得られた研究成果(論文・口頭発表等の外部発表、特許の取得状況等を含む)

論文誌での発表88件、受賞11件、国内外の特許出願が合計32件出されている。応力発光材料による安全・安心センシングという分野においては、世界をリードする成果を挙げており、研究面における成果目標は十分に達したといえる。特に、以下3つの面における達成状況が評価に値することにより、十分当初の研究目標に達したといえる。1点目は、長期モニタリングに利用可能な、独自の応力発光塗膜センサ最適化および特性データベースの構築を行なった点である。具体的には、応力発光特性試験装置を用いて、構造物を構築する一般的な金属系材料のモデルとしてステンレス系材料を試験基板として用い、世界初の構造物の異常を検出する応力発光塗膜センサを作成して、種々の条件での応力発光特性の比較・評価を行なった。特に、繰り返しひずみや耐環境性の評価、応力条件に対する応答性のデータベース化、構造物の安全性に重要な影響を及ぼす亀裂部位での発光特性について、重点的に検討を行なった。応力発光塗膜センサの応答性データベースの向上に関しては、全自動リアルタイム応力発光定量化システムを完成し、発光計測だけでなく、自動的にデータ蓄積とグラフ化が可能となり、省力的なデータベースを構築することが可能になった。このシステムにより、各種歪み・歪み速度の広範囲な応力発光の定量的な評価が可能となった。応力発光材料や樹脂組成、塗膜構造についても種々検討を行ない、応力発光塗膜センサからの発光の応力/ひずみ感度を調整する手法を確立した。その中で、最も感度が高く、様々な光計測機器での発光特性評価を行なうことの出来る塗膜センサについて、構造物リアルタイムモニタリングに用いることを念頭に、必要な様々なデータの取得および蓄積を行ってきた。

応力発光塗膜センサの耐久性については、代表的な構造部材であるステンレス系基板を用い、弾性限界の80%に相当するひずみ量(1600 マイクロひずみ)を100万回繰り返して加えた後も、応力発光特性の低下が見られない、耐久性に優れた塗膜組成を見出した。また、耐水性(浸水1週間)、耐温水性(60℃水1週間)についても確認することができ、現場での実用に供しうる耐久性を有していることを示した。更に、耐久性のある応力発光塗膜センサを用いて、各種ひずみ量、周波数(あるいはひずみ速度)に対する応答性のデータの取得を進めてきた。特に、複雑な応力条件下において、発光強度の分布が、延性金属材料の降伏条件として用いられるミーゼス応力の分布と比較的良好一致を示していることを実証し、金属構造部材の破損に繋がる応力の異常な集中を発光強度から検出できる可能性を示した。これを踏まえ、応力異常検出の基礎となる応答性データベース構築の条件を定め、データ蓄積を行なっている。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、肉眼では確認が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。これらの研究における、国内外における特許出願は十分に多くの知的財産を形成しており、学術分野においても学術賞表彰を始め、論文数も非常に多い。招待講演、学会誌の数においても十分評価することが出来る。

2点目は、予測ができない不良や亀裂の発生や、その形状・進展を、光ディテクターを用いて可視化する遠隔モニタリングシステムを実現し、構造物の安全管理システムを構築した点である。具体的には、開発した応力発光塗膜センサ、応力発光を計測する有線/無線のセンサノード、リアルタイムに記録・異常診断するソフトを統合し、リアルタイム応力異常検出システムを構築した。開発したシステムは、モニタリングの制御と異常診断が可能ハードとソフトウェアで構成されている。ソフトウェアは、光計測センサノードの制御を行ない、計測した応力画像を取り込みながら応力発光画像を処理し、構造物の安全基準として設定した閾値を超える異常画像を自

動診断・保存する機能を有する。同システムにおいては、健全な金属部材を疲労させた時に疲労亀裂の発生・進展をモニタリングし、システム制御、光計測、異常診断、異常画像保存などの機能が的確に作動することが確認された。また、リアルタイムのモニタリングと同時に、発光画像による疲労亀裂の発生・進展の自動診断に成功した。

また、実構造物への適用に応じて、集光インタフェースを最適化することにより、開発した無線通信応力異常検出システムの検出感度を大幅に向上させた。最適化した集光インタフェースを着装することにより、開発したセンサノードの応力発光検出値が十数倍までにアップした。微弱発光及び微小面積発光の検出感度を向上させ、当初開発した無線通信応力異常検出システムで検出が困難であった微小局部応力異常の検出に成功した。さらに、作業性を改善するため、照明条件を選定し、応力発光強度に影響しない照明機能を付加したリアルタイム応力異常検出システムを実現し、リアルタイム応力異常検出システムの最適化をも実現している。この特定の照明を使用することにより、応力発光を計測しながら、実験の全体的な様子の確認もできるようになった。この改善により、安全確認、計測操作などが容易となり、リアルタイム応力異常検出システムの計測環境を大幅に改善した。同システムの実現により、損傷の度合いや危険レベルを同時に診断することができ、外観から見ることのできない構造物の異常の包括的な見える化を実現した。学術面においても、招待講演、論文投稿等が多数生み出されている。

3点目は、開発したセンサ・システムが、橋や建物、設備などの実構造物の損傷評価を可能としている点の実証され、安全管理に有用であることを示された点である。具体的には 応力発光による亀裂の発生予知・分布・進展・変位量を可視化でき、応力発光からひび割れの危険度の評価に成功した。実構造物の選定は、200 件以上の連携要望の技術相談に対し、社会ニーズの高く、かつ本研究成果の威力を生かせるものを選定した。特に、道路橋梁、建物、配管、生産設備、製品の安全管理について、チーム内の各グループの協同研究だけでなく、外部ユーザと共同連携して実証試験を加速させた。実施した橋梁数 3 本(東京、大阪、福岡)、建物3棟(佐賀)、コンクリート構造体(神奈川)、配管系は溶接配管、直管系、高温系(東海村)、高圧容器は鋼製容器と複合容器の2種類(福岡)、および生産設備や製品検査を加え、20件以上の実証試験を行った。まず、福岡県の朝倉県土整備事務所管内の橋梁(築 50 年、朝日橋)において実験を行った。その結果、目視では亀裂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。このことは、“見えない危険な応力集中を見抜く!”という応力発光体を用いた安全管理システムの最大の特徴が、実現現場レベルにおいても有効であることを明確に示唆している。次に、実橋梁を用いた損傷検査実証試験を実施した。本実証試験では、検査会社等の要請を受け、鳥飼大橋(大阪)に対して共同で行った。橋桁金属部及びコンクリート床版に応力発光センサを塗布し、発生した亀裂の可視化及びその探傷を行った。その結果、橋梁の橋桁金属部において、応力発光センサを用いた面計測により、亀裂探傷のみならず金属腐食部の応力分布を可視化計測することができ、ひずみゲージに代わる新たな面計測法であることが実証された。更には、砂潮橋(東京)を2010年と2011年に渡って、センサを連続設置したまま、開発したシステムによる長期間遠隔モニタリング(九州からの遠隔制御)を実施した。本実験により、橋梁のコンクリート床版における亀裂を応力発光センサにより可視化することができ、長期耐久性について野外実験でも6カ月以上の耐久試験の実績を積み上げている。建物に関しては、ニーズ調査の中で多くの回答が得られた近接施工、劣化、亀裂進展に関して、適応試験を行った。その結果、工事現場で発生するレベルの変位や歪み、劣化、亀裂進展に対する検知システムとして2年間以上の実環境計測に有効であることを初めて実証した。

#### 4-2. 研究成果の科学技術や社会へのインパクト、戦略目標への貢献

応力発光体自体は、本プロジェクトの提案時に既に成果が上がっているものであったため、研究開始当時は、応力発光の基盤技術からスタートし、応用技術を多数調査した。その結果、多くの分野で興味をもたれており、今後の社会への貢献は十分に期待できる。しかし、実運用面における安全管理システムの有効性という観点からは、更なる検討を期待する。特に材料の大量生産の面にまだ課題が残っている。今後は外部との共同研究を通じて、適用環境の拡充等、より多くの応用面における課題解決が期待される。

#### 4-3. 総合的評価

本研究では、応力発光というユニークな研究からスタートして、これを社会に実装することを主眼にした研究を開発してきた。応力発光体を活用した構造物の応力分布の可視化に世界に先駆けて成功し、社会から多くの関心を集め、応用システムまで手がけて実証研究を根気よく行った点は十分評価できる。材料研究者という立場にもかかわらず、社会実装に必要なシステムの研究を遂行した点も高く評価できる。今後は、社会の安全・安心を守る新たなスケーラブルセンシング技術として、その社会実装が実現できるよう強く期待する。