

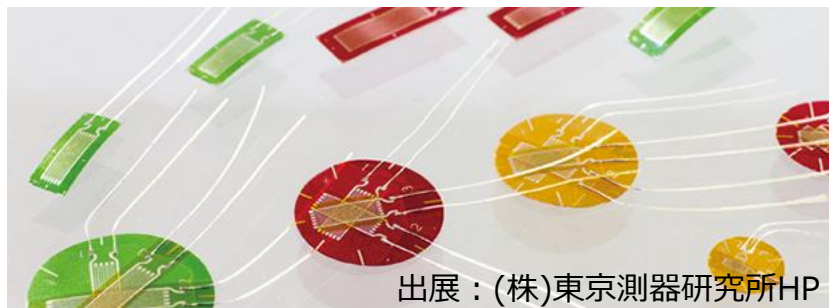
応力発光による ひずみ分布可視化技術

国立研究開発法人産業技術総合研究所
エレクトロニクス・製造領域 センシングシステム研究センター

主任研究員 藤尾 侑輝

従来技術とその問題点

ひずみ計測・ひずみ分布計測

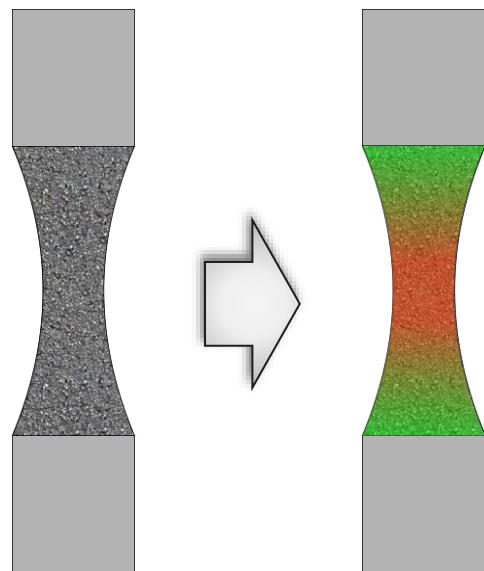


ひずみゲージ

- 高感度・高精度（値）計測の利点
- 多点計測による作業効率低下
- 測定点の精度・乱雑な配線

ランダム模様形成

画像解析

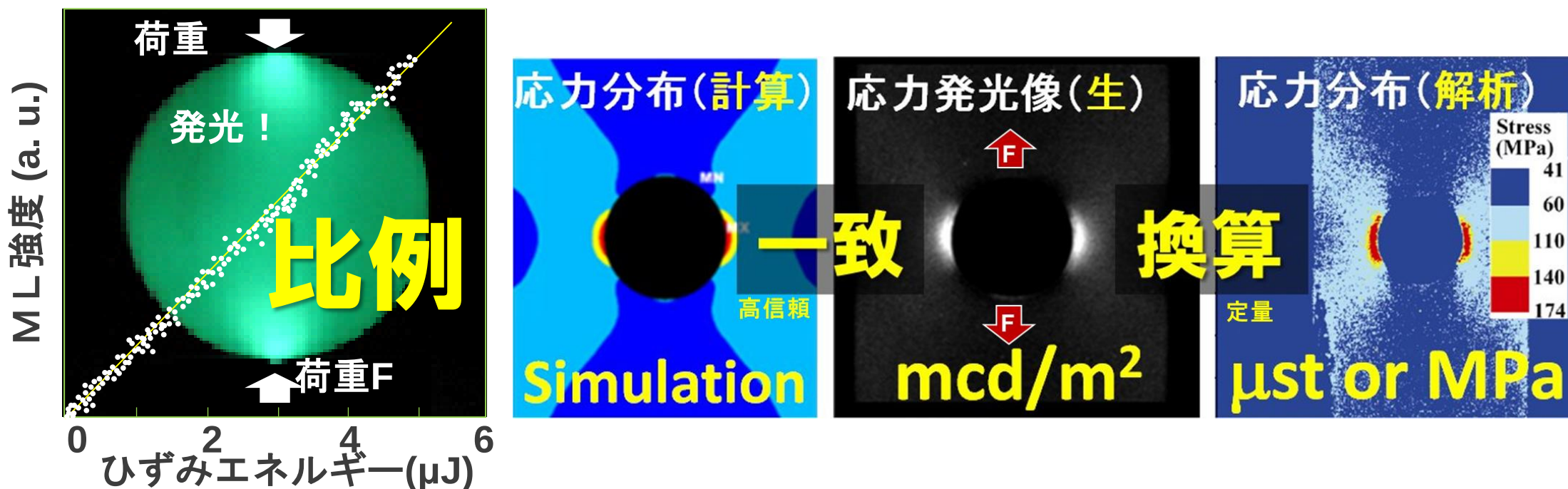


画像相関法（Digital Image Correlation）

- ひずみ分布計測の利点
- 3次元変形への対応
- 複雑な装置/解析による精度低下

シームレス かつ 高空間分解能でひずみ分布を計測できないか

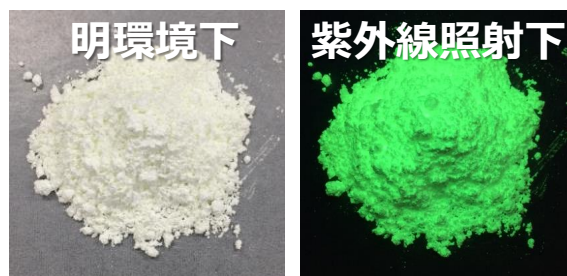
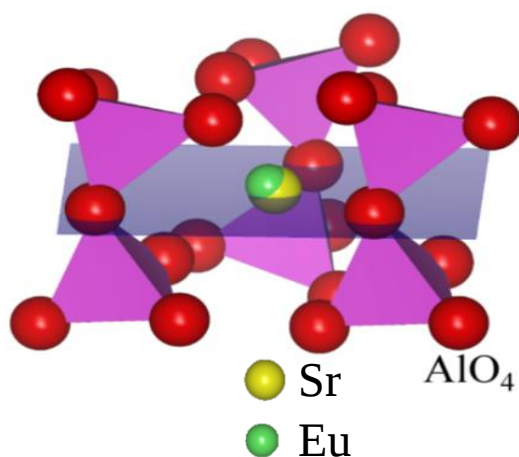
【新技術提案】 応力発光 による ひずみ分布計測



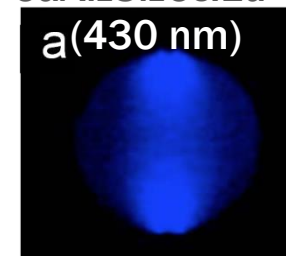
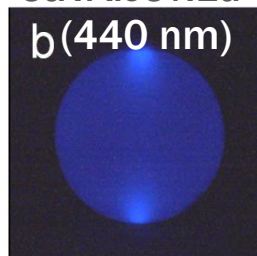
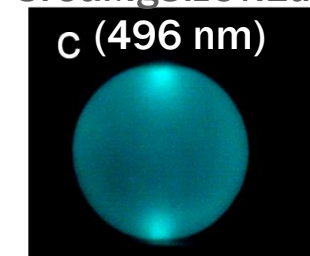
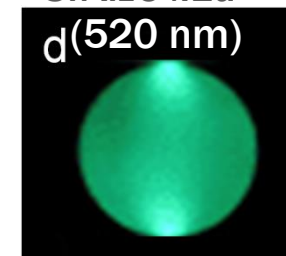
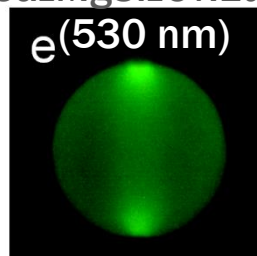
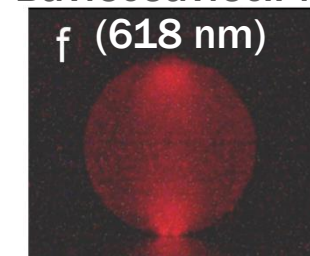
【新技術の特長】

- ① 応力発光強度はひずみ値に比例 (光強度分布 = ひずみ分布)
- ② 産総研開発の力・ひずみの変化に対して発光する無機材料粉末
- ③ 材料の塗料化・塗膜化によりさまざまな構造物へ適用可能

【特長②】 材料開発による センサ特性の多様化

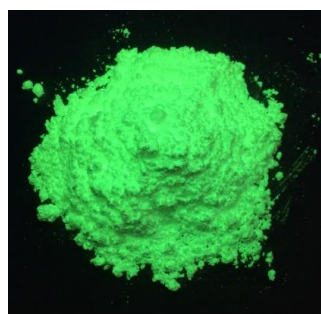
構造制御型 $\alpha\text{-SrAl}_2\text{O}_4\text{:Eu}^{2+}$ 

- 目視可能な最高発光強度
- 粒子径・粒子形状制御
- 材料制御技術の蓄積

 $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8\text{:Eu}^{2+}$  $\text{CaYAl}_3\text{O}_7\text{:Eu}^{2+}$  $\text{SrCaMgSi}_2\text{O}_7\text{:Eu}^{2+}$  $\text{SrAl}_2\text{O}_4\text{:Eu}^{2+}$  $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7\text{:Eu}^{2+}$  $\text{BaTiO}_3\text{CaTiO}_3\text{:Pr}^{3+}$ 

- ひずみ分布計測は 無機材料粒子一粒の応力発光により実現
- 弾性変形域の微弱な力・ひずみに対して繰り返し発光
- 材料により、発光強度・色・センサ閾値・空間分解能を制御

【特長③】 材料の塗料化/塗膜化による応用の多様化



応力発光体



塗料化



自動車・モビリティ



橋梁・高速道路



製造インフラ・水素インフラ



風車・再エネ

- 応力発光粉末を最適な樹脂/バインダとハイブリッド化
- 既存の塗装/塗膜化技術により計測対象物へ適用可能

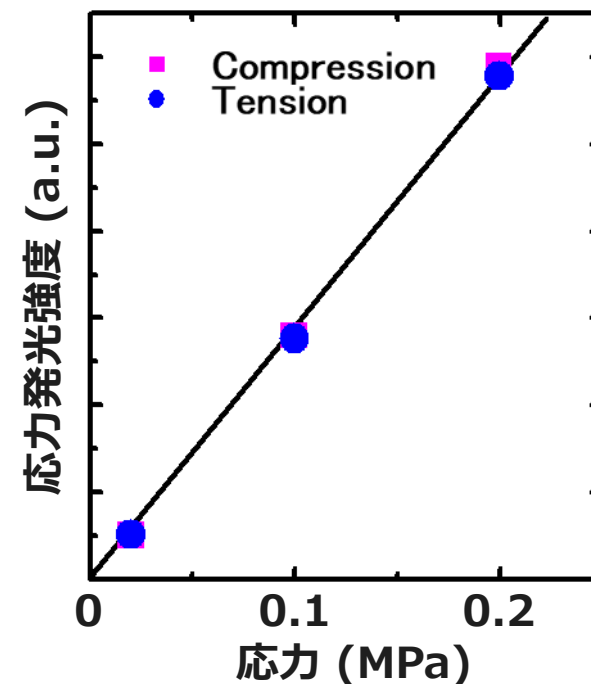
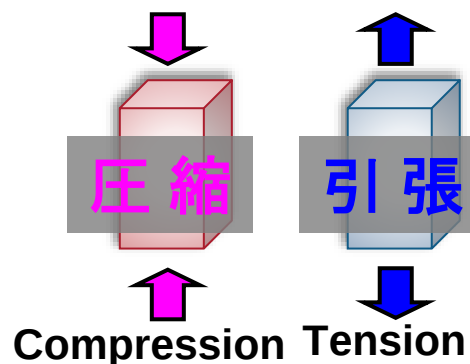
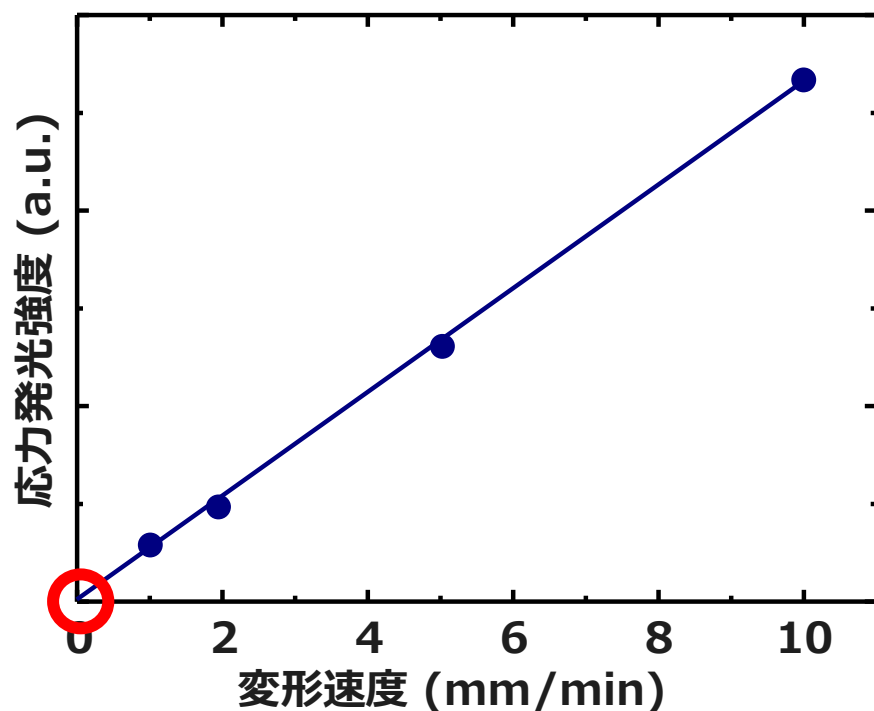
他のひずみ計測技術との比較（ベンチマーク）

比較項目	ひずみゲージ	X線応力測定	サンプリングモアレ	応力発光	
原理・方法	金属抵抗変化	X線照射時の回折角移動量	モアレ縞の位相変化	応力発光粒子のひずみによる発光強度	シームレス
①計測範囲 →面計測 (mサイズ)	× 点計測	△ 面計測 (nm～mm)	◎ 面計測 (μm～km)	◎ 面計測 (μm～km)	大面積計測
②検出感度 →0.01%	◎ 0.001%	○ 0.01% (角度分散法)	× 0.02% (理論上限界値)	○ 0.01% (高感度化可能)	定量測定
③計測対象 →凹凸3次元	◎ あらゆる形状	× 平面・表面のみ	× 平面 滑らかな曲面	○ 3次元構造 (裏面不可)	複雑形状
④リアルタイム 高速計測 →1秒以内	◎ 動的変形 に対応	× 静的変形のみ	△ 破壊現象は不可 解析時間が必要	◎ 動的変形に対応	高速計測
⑤環境適応性 →照明下で他 と同時計測	○ 電気配線の 干渉	× X線遮蔽ボックス 中での測定	△ 一定の照明環境 下のみ	△ 暗環境のみ ★ASTEP技術課題	

計測技術としての注意点

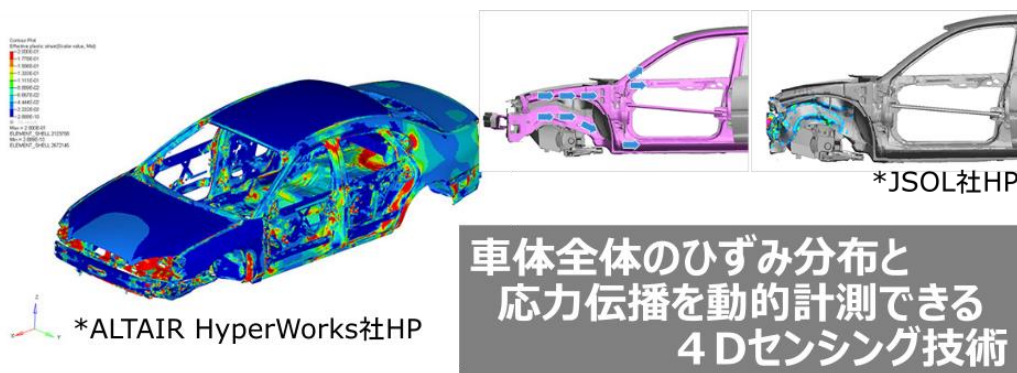
応力発光強度 vs. 応力変化速度

*C.N. Xu "Coatings" Encyclopedia of Smart Materials, 1 190 (2002)

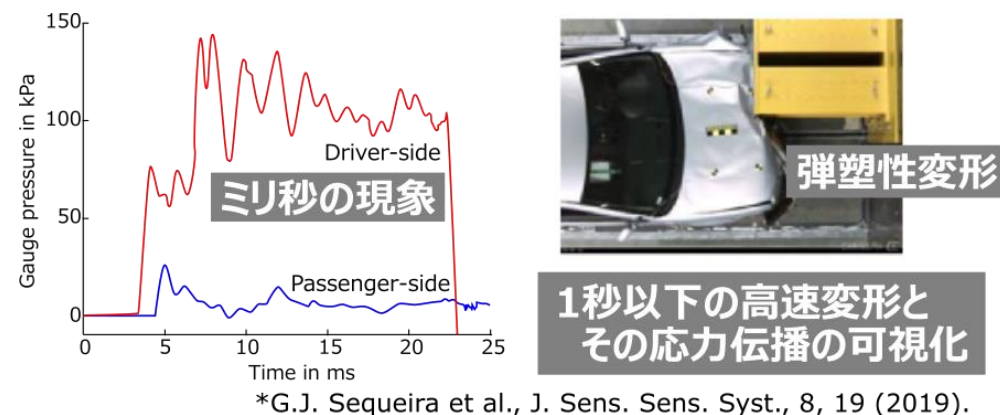


- 動的変形に対して定量的発光を示す
- 残留応力（変化なし）・静的応力に対する計測は困難
- 力の方向の識別不可（ミーゼス応力）

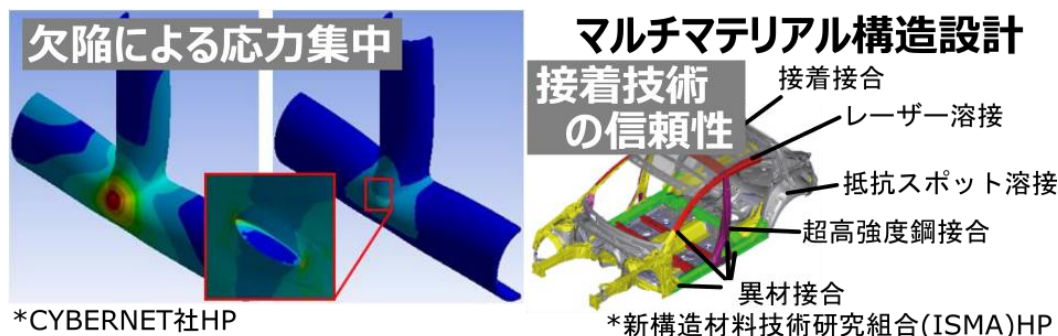
① 全体のひずみ分布計測



② 高速現象・非線形解析



③ 応力集中(不良)の可視化



CAE計算 (理想状態)では予測できない
材料不良や工程不良 (現実状態)を検出

④ CAEモデルの検証・精度向上



上記以外にも 実際に『変形・動きが見えること』の展開に期待

これまでの適用事例

※当日は適用の一例(動画)をご紹介します

健全性モニタリングSHM



CFRP破壊過程の可視化



Bright Image

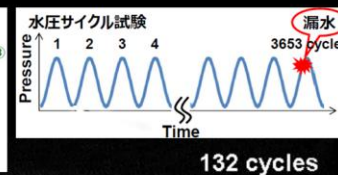
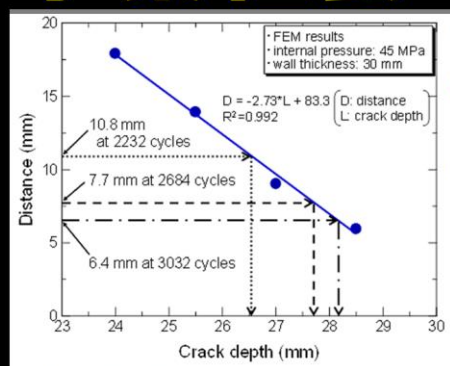


ML image

(strain distribution)

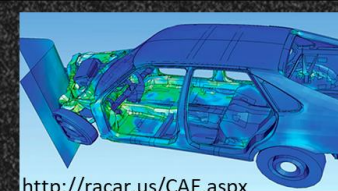


水素社会の予兆診断



Patent: : WO 2017/006900, 2017/1/12

正面衝突試験の応力伝播解析

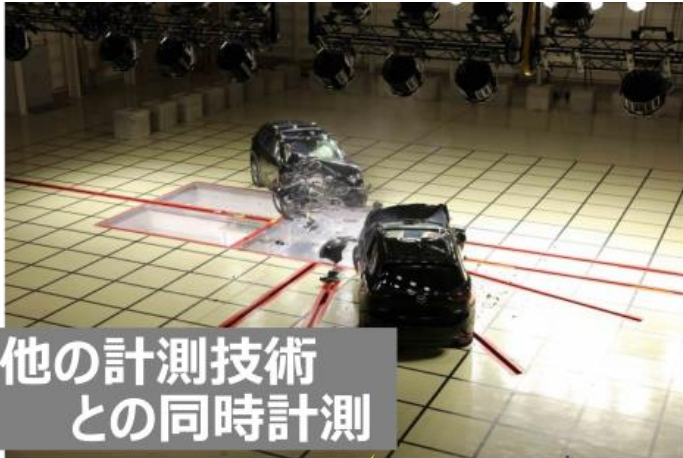


<http://racar.us/CAE.aspx>

正面衝突試験: 950 kg の車両を、55 km/hで正面から衝突させる試験。
※本試験では、精工車体モデルを用い、10-40 km/hで正面からインパクトを衝突させた。

暗闇に制限された計測環境からの脱却

明環境下での計測(他の計測と同時使用)

他の計測技術
との同時計測

*マツダ公式ブログ, 2018.12.18.

衝突試験の計測技術

- ・高速度カメラ(破壊現象)
- ・三次元測定装置(形状測定)
- ・加速度計 他 電気計測



*(独)自動車事故対策機構

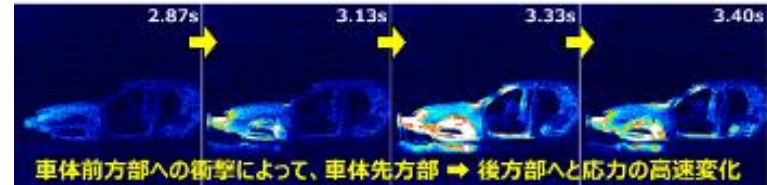
実用化時の課題

- 現場での暗環境は実現できない
- 迷光による光強度測定の精度
- 高S/N比計測の実現

1/10車体モデル(3Dプリンタ製)を用いた応力発光4Dセンシング技術



応力発光塗装車体モデルのフルラップ前面衝突試験



車体前方部への衝撃によって、車体先方部 → 後方部へと応力の高速変化

実際の衝突試験



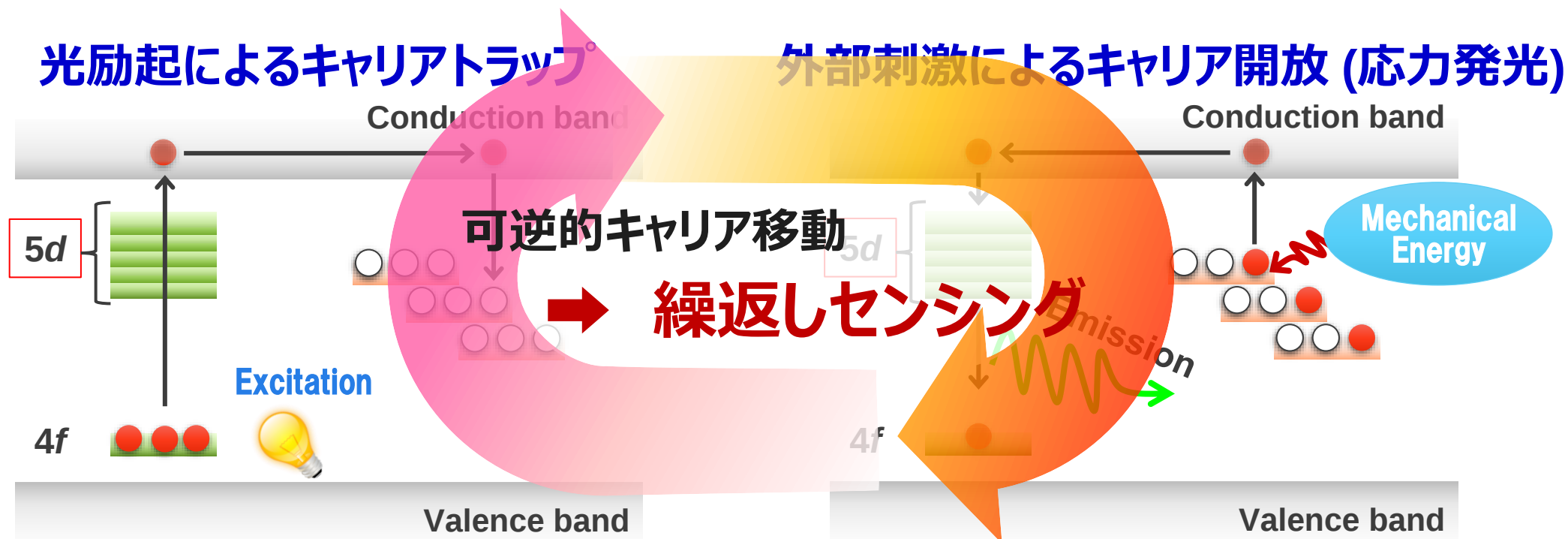
自動車事故対策機構HPより

可視光から多波長化へ

*JST ASTEP産学共同(育成型)事業の研究課題

- 明環境下でマルチデータ収集
- 実機衝突による変形・現象解析
- 10,000 Hzの高速時空間計測

応力発光体の発光メカニズム



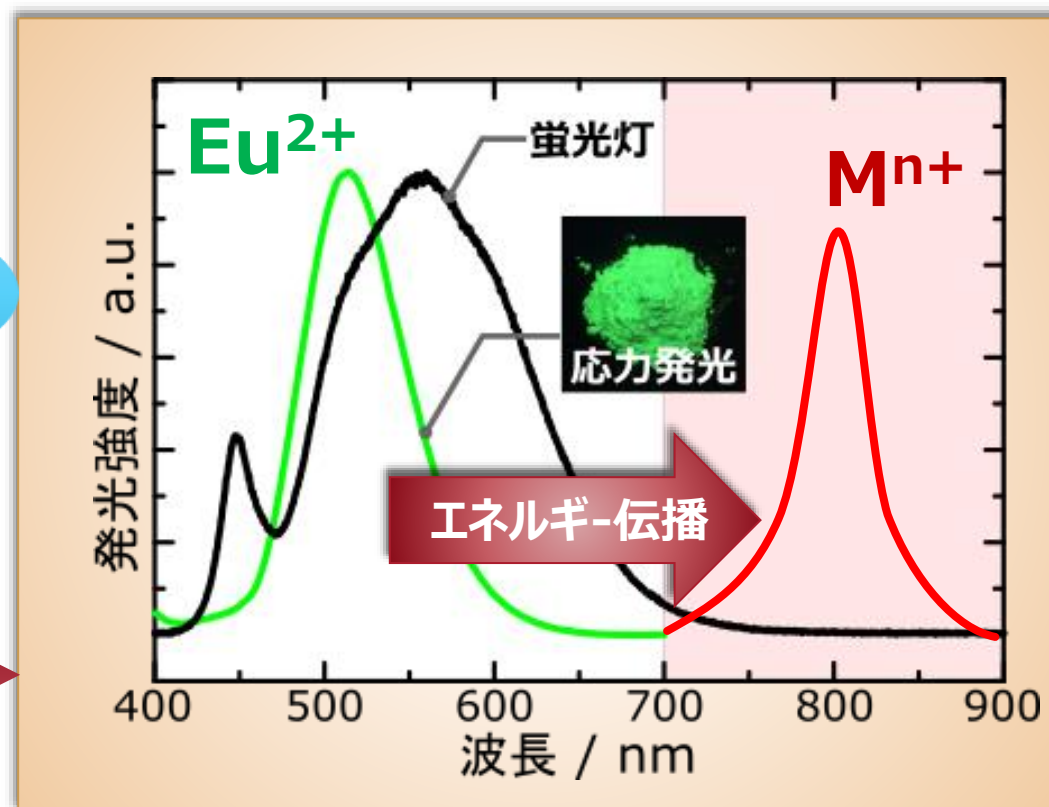
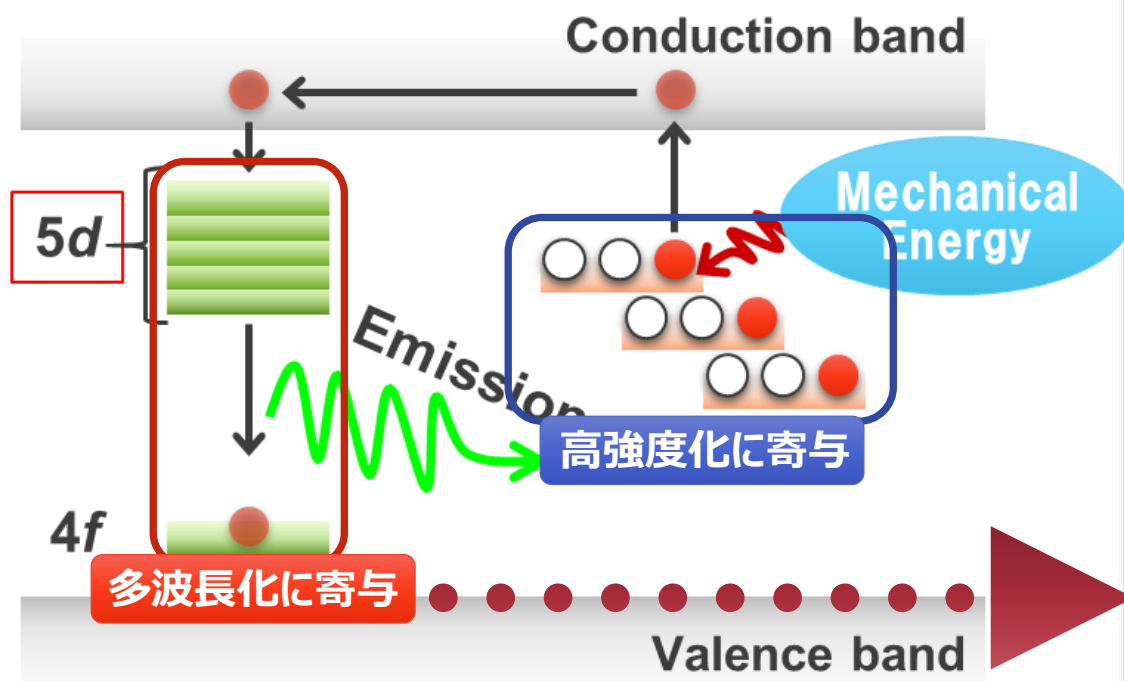
光励起による初期化

➡ 発光の再現性

信号発生（外部刺激の検知）

➡ 発光によるセンシング

応力発光のメカニズムと設計因子



- 応力発光体の多波長化による暗闇環境下からの脱却
➡ これまで適用をあきらめていた分野への展開を拓く
- 応力発光の材料・計測システム・解析法で新規市場開拓

実用化に向けた課題

- ▶ 現在、明環境下でも発光認識可能な応力発光体について開発し、材料試験機を用いた力学試験でのひずみ可視化計測の検証済み。しかし、**実環境（製品開発環境）で現場の制約がある条件下での検証が未解決**である。
- ▶ 今後、更なる応力発光体の高感度化と計測システムの高性能化について実験データを取得し、製品開発環境下に適用していく場合の条件設定を行っていく。
- ▶ 実用化に向けて、材料製造技術の要素抽出（高感度化因子）とひずみ値の定量測定の精度向上できる因子を確立する必要もあり。

企業への期待

◆技術適用先企業との連携

- ▶ ラボレベルの応力発光体、計測システムを用いた試験的な共同研究を希望。
- ▶ 技術適用先企業のニーズ・適用課題を抽出し、産業ニーズに応える計測技術に仕上げる。

◆材料・計測技術メーカーとの連携

- ▶ 材料製造、発光デバイス開発に関する共同研究を希望。
- ▶ 各産業（モビリティ・インフラ・エレクトロニクス・アグリ・バイオ）への計測技術開発を旨とした共同研究を希望。
- ▶ 各シーズ（材料・計測器・画像診断）又はシステムの技術移転を旨とし、共に研究課題を抽出する。

本技術に関する知的財産権

発明の名称： 応力発光材料の製造方法及び同応力発光材料の製造方法にて製造した応力発光材料

出願番号： 特許第6308487号

出願人： 産業技術総合研究所

発明者： 藤尾侑輝、徐超男

発明の名称： 損傷進展度測定方法および損傷進展度測定システム

出願番号： 特許第6729912号

出願人： 産業技術総合研究所

発明者： 藤尾侑輝、徐超男

発明の名称： 破壊可視化用センサおよびそれを用いた破壊可視化システム

出願番号： 特願2017-248960

出願人： 産業技術総合研究所

発明者： 藤尾侑輝、寺崎正

お問い合わせ先

国立研究開発法人 産業技術総合研究所
九州センター 産学官連携推進室 村田 賢彦

技術相談窓口

TEL 0942-81-3606

FAX 0942-81-4089

e-mail q-sangakukan2-ml@aist.go.jp