

# 革新的電子ビームを利用した機能性ナノ材料解析手法の開発

## Development of Nano-Characterization Methods Using Innovative Electron Beams

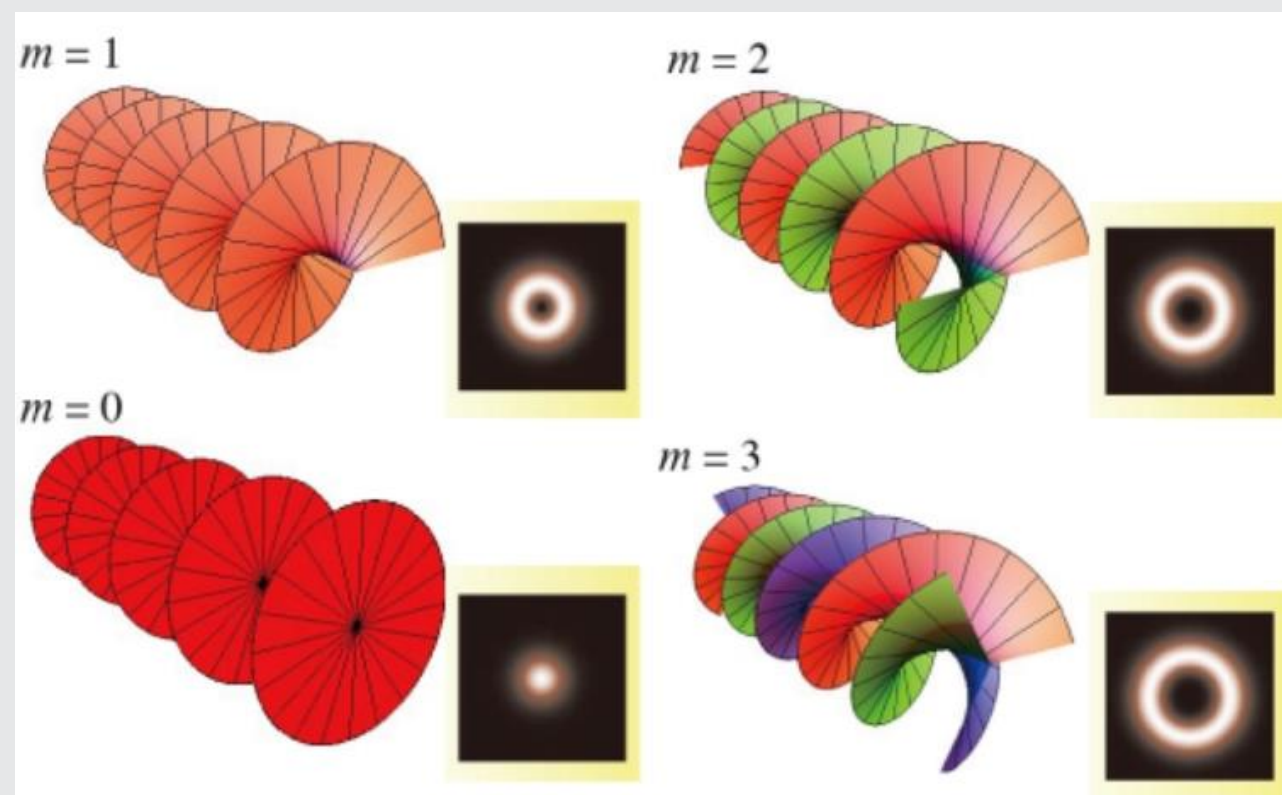
齋藤研究室, 齋藤晃, 石田高史

Advanced Measurement Technology Center, Saitoh Laboratory

本研究グループでは、電子ビームを扱った研究を行っています。電子は可視光に比べて波長が短く( $\lambda \sim 10^{-12} \text{m}$ )、電子ビームを用いた電子顕微鏡は光学顕微鏡では見ることの難しい、ナノメートルスケールのものを見ることができます。また、電子顕微鏡は「拡大して見る」だけではなく元素分析や電子構造の解析、結晶構造の解析をすることもできます。これまでに、半導体、磁性体、強相関電子系、準結晶、金属微粒子など多様な物質の解析や電子顕微鏡に応用する革新的な電子ビームの生成、新しい電子顕微鏡の開発に関する研究を行ってきました。最近では、電子らせん波のイメージングへの応用、半導体パワーデバイスの欠陥解析や電池材料のオペランド観察など実用材料の精緻な評価も行っています。

### 電子らせん波のイメージングへの応用

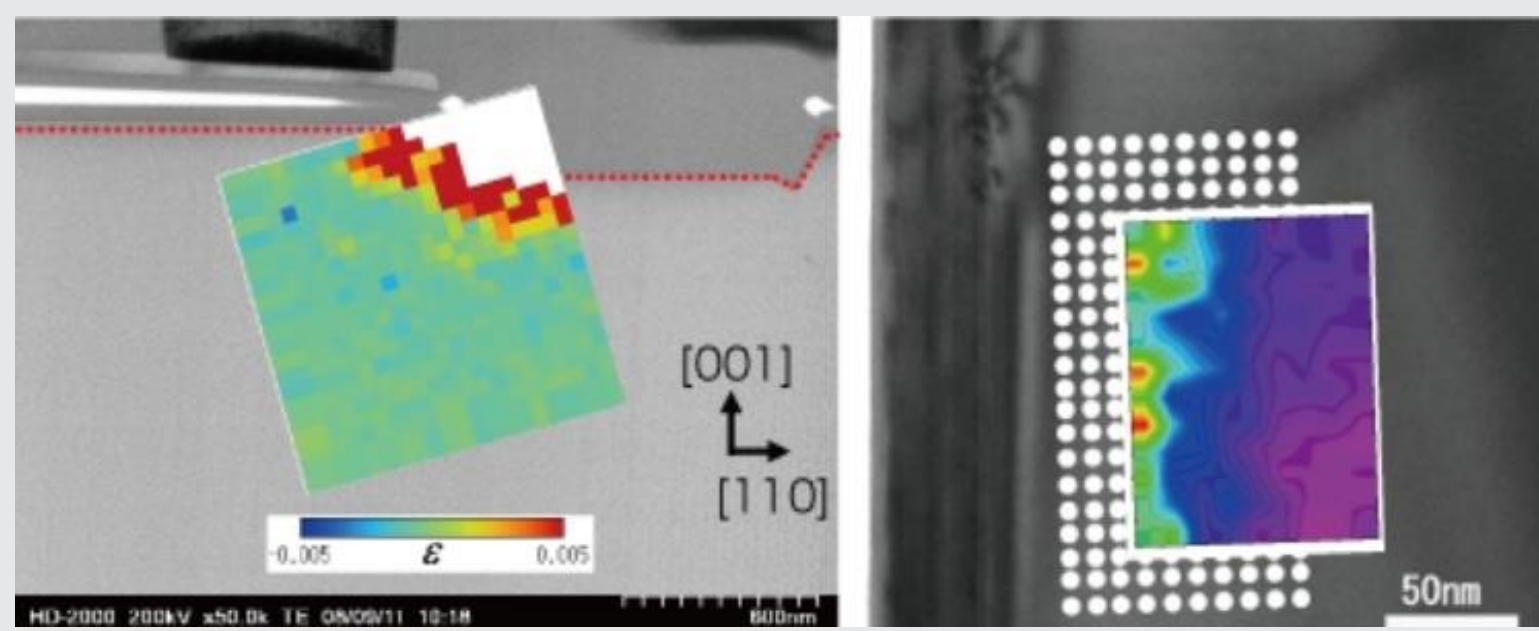
電子らせん波はらせん状の波面をもつ電子波です。軌道角運動量をもつことから、磁気イメージングやナノマニピュレーションなどの応用が期待されています。電子らせん波の物理的性質を明らかにし、電子顕微鏡の新しいイメージング法への応用を研究しています。



電子らせん波の等位相面の模式図と動径強度分布  
 $m$ はトポロジカル数を表す

### 電子回折による格子歪みナノスケールマッピング

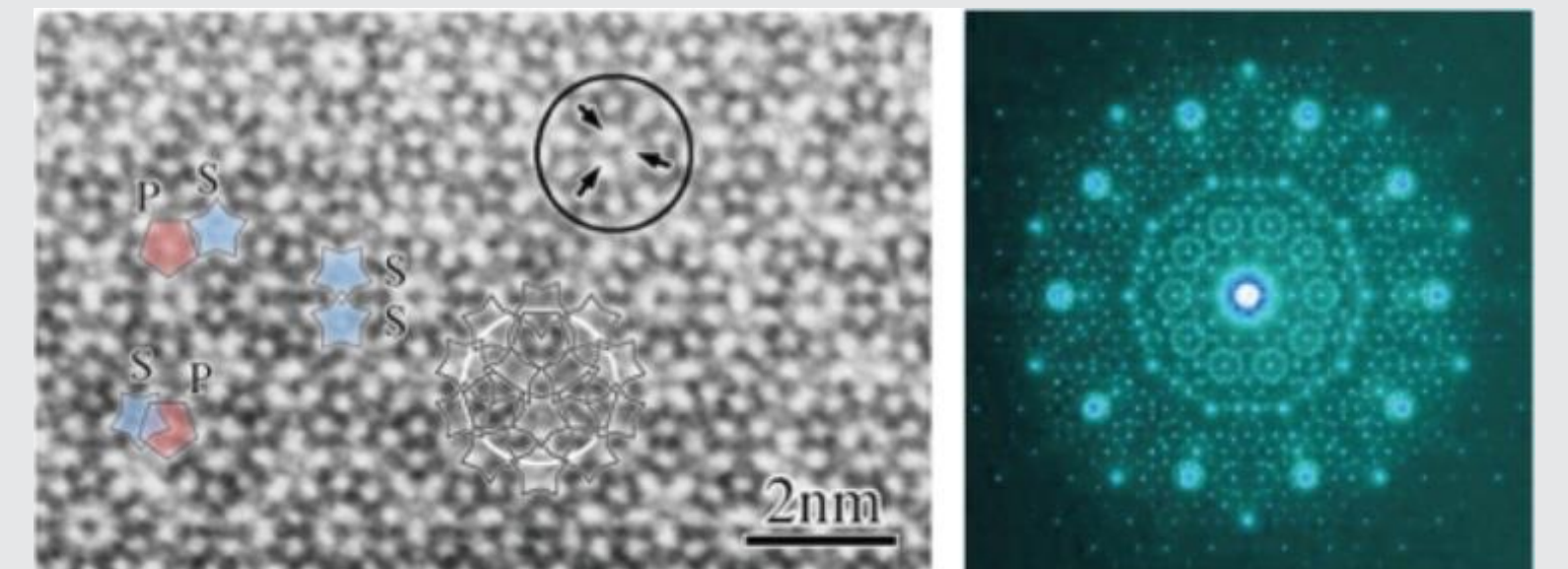
結晶中の歪みや格子欠陥は、その電子物性および機械特性に影響を与えます。現在の半導体の微細化により、その評価法にも高い空間分解能が要求されます。収束電子回折をもちいてナノメートル領域の格子歪み分布および格子欠陥のキャラクタリゼーションを行う手法の開発を行っています。



電子回折を用いた格子歪みのマッピング例

### 準結晶の構造解析

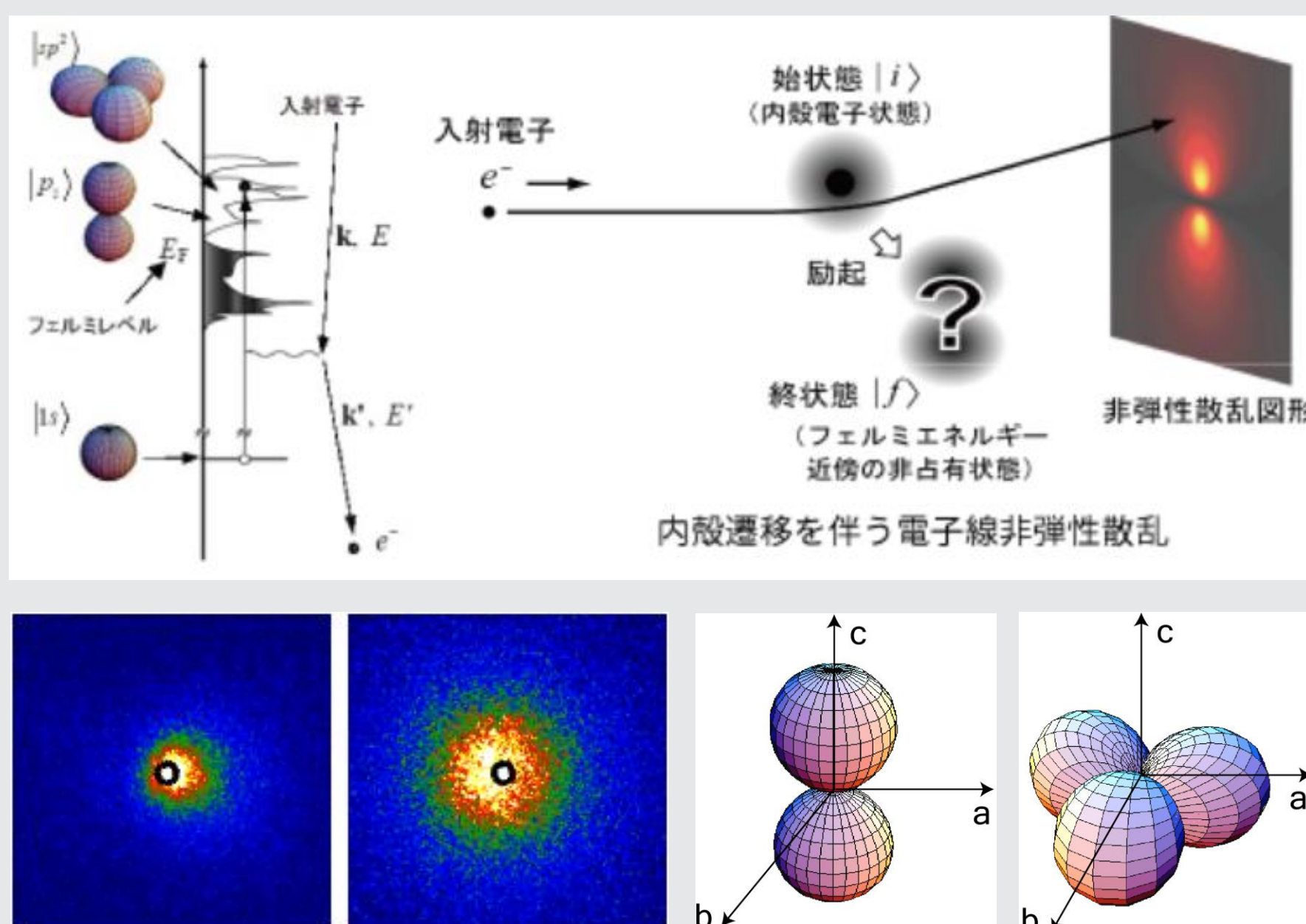
準結晶は、結晶のような周期性がなくアモルファスのように無秩序でもない特異な構造秩序をもちます。この準結晶の構造を明らかにするために、収束電子回折、高分解能走査透過電子顕微鏡(STEM)、電子チャンネルリング法など種々の電子顕微鏡に高次元結晶学を駆使した解析を行っています。



準結晶の高分解能STEM像と電子回折図形

### 非弾性散乱電子による電子軌道解析

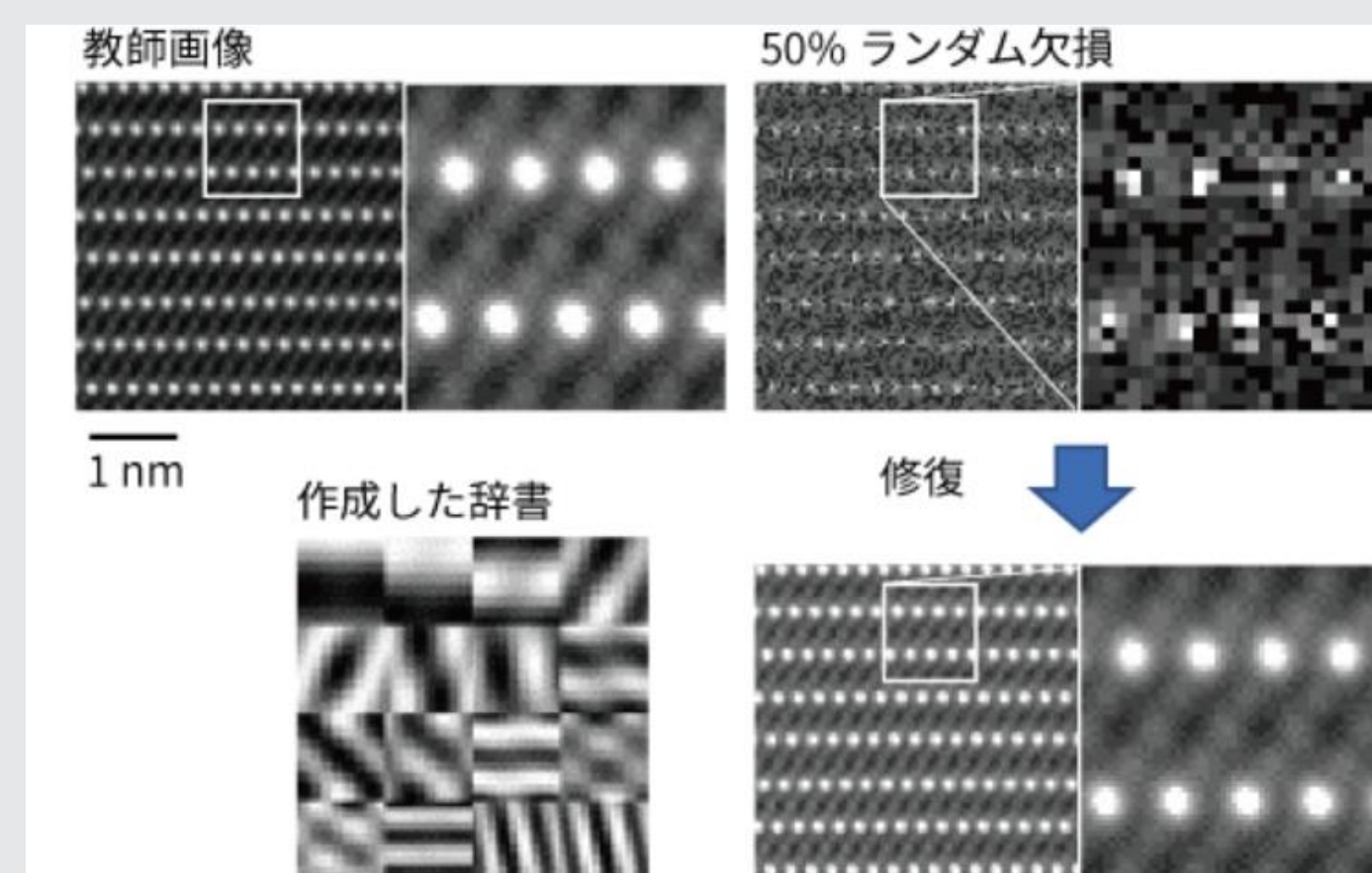
内殻励起をともなう電子非弾性散乱では、始状態と終状態の電子構造の異方性を反映して、散乱強度の角度分布に異方性が表れます。これを利用して、非弾性散乱の強度分布の異方性を定量的に評価し、フェルミレベル近傍の非占有状態の電子軌道の異方性を解析しています。



六方晶窒化ホウ素から得られた非弾性散乱図形と電子軌道

### スパースサンプリング原子分解能STEM像の修復・超分解能化

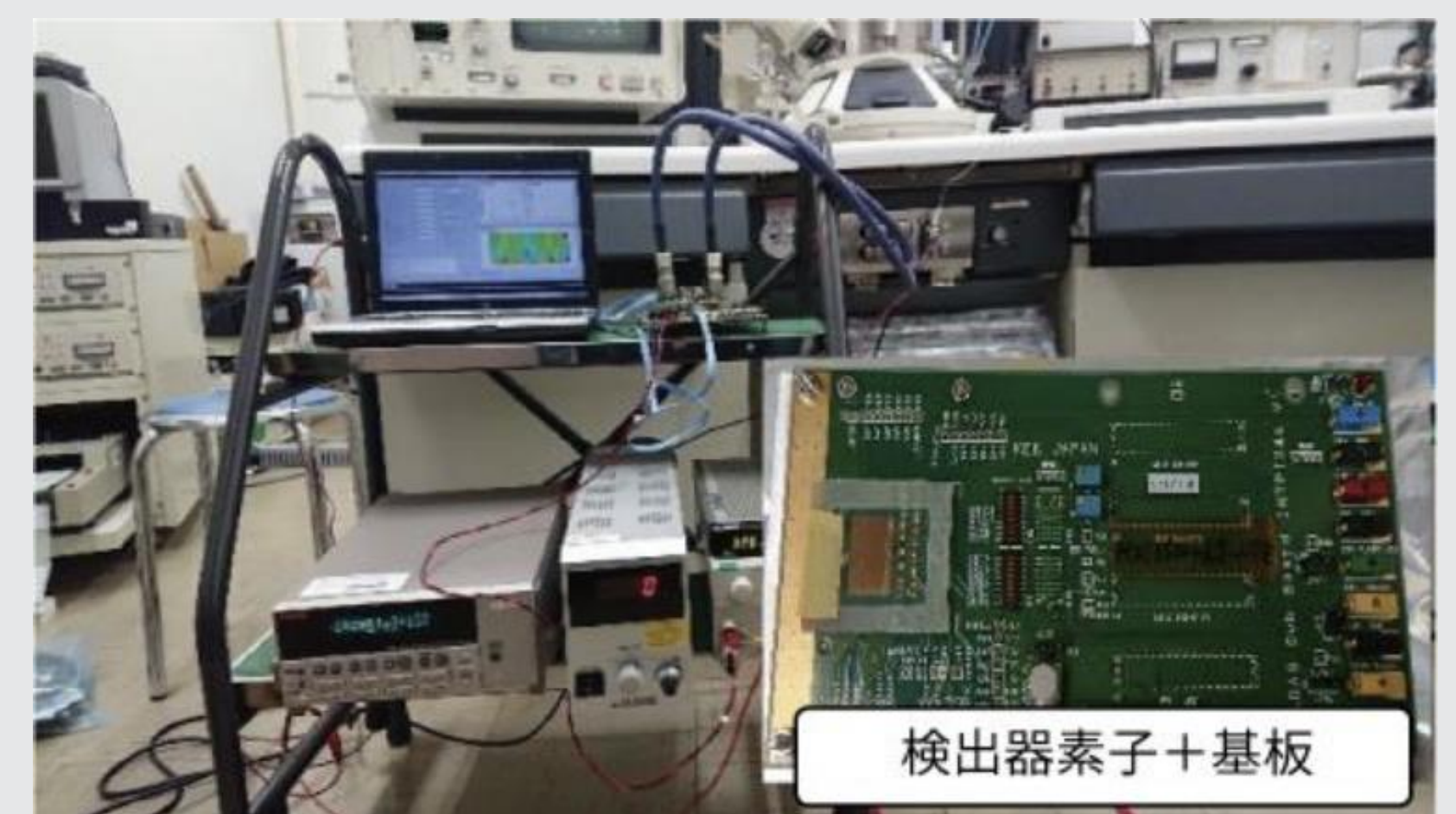
電子線の照射損傷を押さえるため、あるいは撮影時間を短縮して時間分解能を向上させるため、観察領域全体を電子線走査するのではなく、間引いて走査する方法(スパースサンプリング)があります。しかし、画像データの一部分が欠損したり、空間分解能が低下することになります。このようなスパースサンプリングSTEM像に対して、辞書学習やテンソル分解などを適用して、欠落したデータの修復や画像の超分解能化、ノイズ除去を行う手法の開発を進めています。



辞書学習による原子分解能STEM増の修復例

### SOI技術を用いた電子直接検出器の開発

Silicon-On-Insulator (SOI) 技術を用いたダイレクト電子検出器の研究開発を高エネルギー加速器研究機構のグループと共同で行っています。ナノ秒電子線イメージングへの応用を見据えて、センサー開発およびData Acquisition (DAQ) システム構築に取り組んでいます。



SOIピクセル検出器の計測システムの外観  
挿入図はセンサー素子と基板