

無磁場STEMによる磁性材料・ デバイス解析

東京大学大学院工学系研究科総合研究機構

柴田直哉

ナノテクにおける電子顕微鏡の重要性

環境・エネルギー

社会基盤

情報

電子顕微鏡は「原子・分子の世界」を
拡大して、そのまま観察できる！



バイオ

電子顕微鏡とは

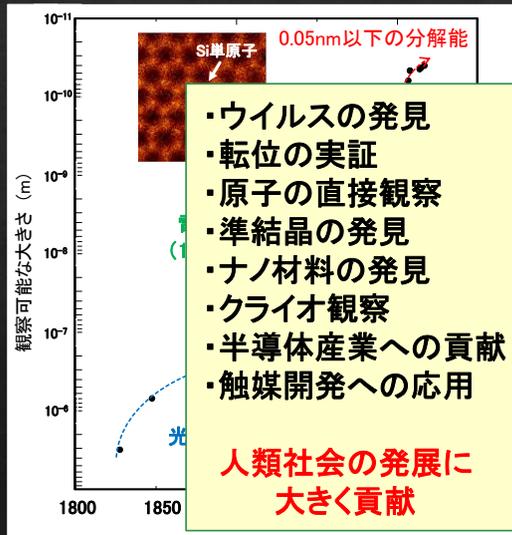
顕微鏡

→用いる波の波長より小さなものは見えない！



光の波長: 400~800nm
電子の波長: 0.0025nm

顕微鏡分解能の変遷



日本における電子顕微鏡開発

1939年

日本学術振興会(文部省)

第37小委員会発足

- 委員長 瀬藤 象二(東京帝大)
委員 浅尾 莊一郎(東京電気)
委員 加藤 信義(京都帝大)
委員 笠井 完(電気試験所)
委員 菅田 栄治(大阪帝大)
委員 鈴木 重夫(電気試験所)
委員 多田 潔(横河電機)
委員 谷 安正(東京帝大)
委員 山下 英男(東京帝大)
委員 清水 武雄(理研)

日本の電子顕微鏡開発

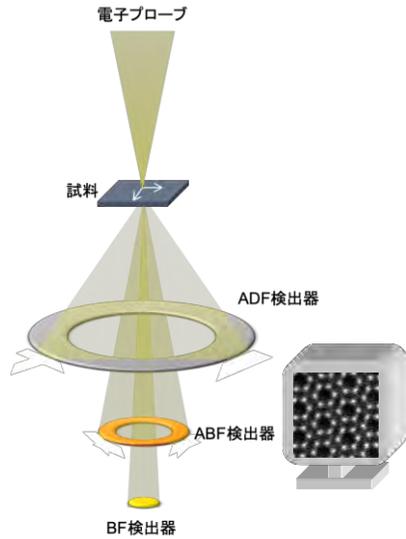
産学官連携からスタートし、
世界有数の電子顕微鏡
メーカーが複数誕生し、世
界の研究分野で活躍



日本のお家芸

走査透過型電子顕微鏡法 (STEM)

STEM法の概要



STEM法の特徴

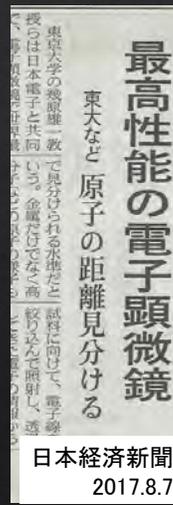
1. 0.1nm 以下の分解能
2. 像解釈が容易
(原子直接像)
3. 重元素観察 (ADF法)
4. 軽元素観察 (ABF法)
5. 同時組成・状態分析
(EELS、EDS)

ナノ領域の原子構造
直接決定が可能

最先端電子顕微鏡の性能



世界最高空間分解能の達成 (2014, 2017)



水素原子の半径 ~0.053nm

電子顕微鏡で何がわかるか

材料界面の元素添加メカニズムの解明

Science (2006)
Nature Mater. (2009)
1万倍

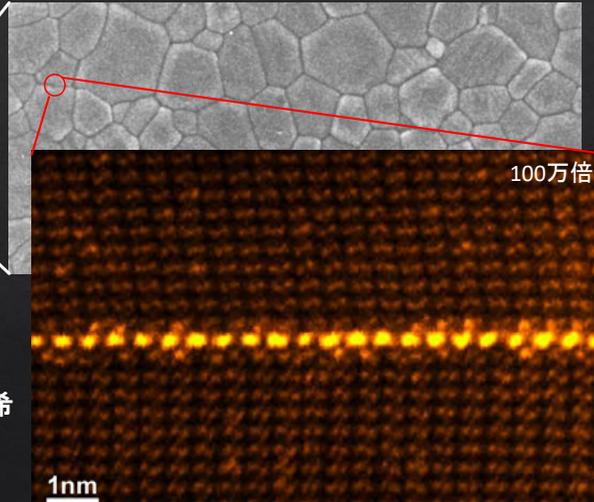


10mm

セラミックス



材料を強化するために希
土類元素を微量に添加
(経験的)



100万倍

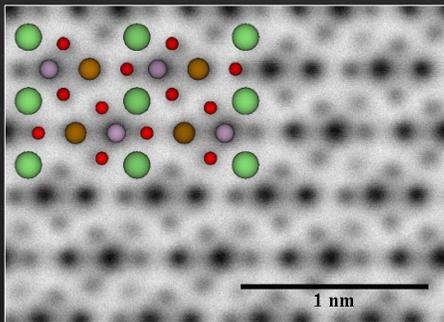
1nm

添加した元素は結晶の界面で糊のような働きをして、材料を強くする！

リチウム原子も見える

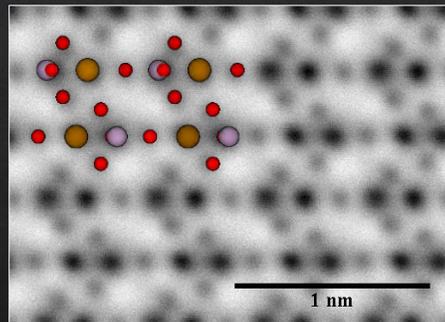
リチウムイオン電池中のリチウム原子観察

● Li ● Fe ● P ● O



充電前

1 nm



充電後

1 nm

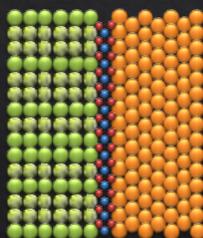
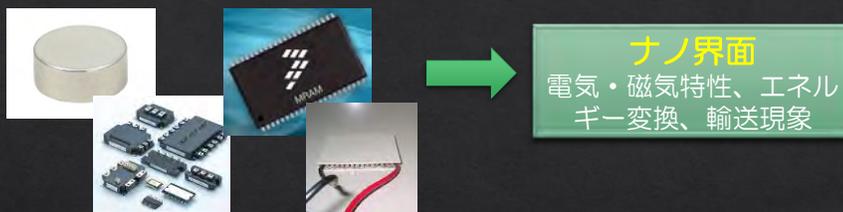
高容量リチウムイオン電池開発に活用

原子は見えるようになった

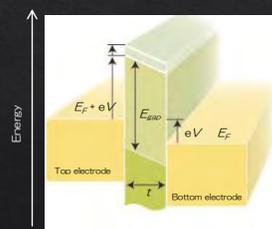
電子顕微鏡の目指す先は？

新材料・デバイス開発に待望されるナノ計測

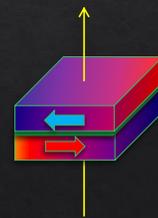
カーボンニュートラル：環境・創エネ材料、省エネデバイス



原子レベル構造



局所ポテンシャル、電磁気構造

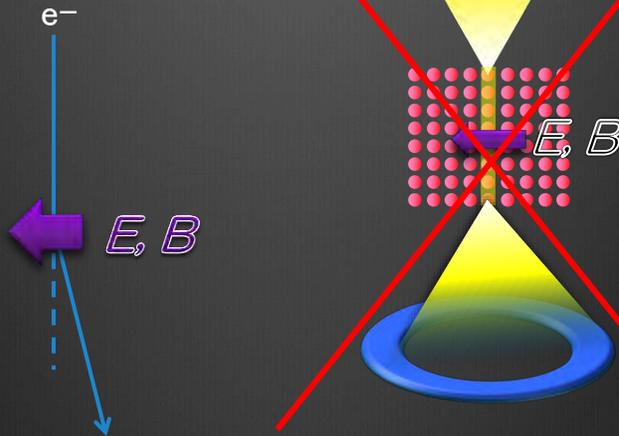


電子顕微鏡の更なる進化が不可欠

電子線と電場・磁場との相互作用

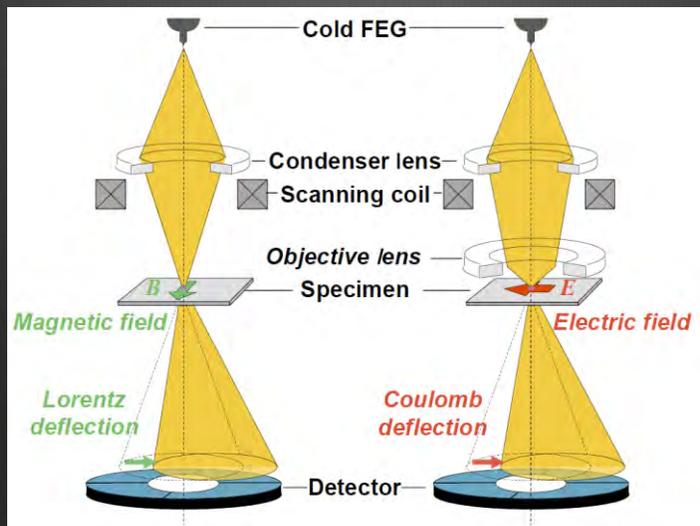
Coulomb, Lorentz force

$$F = -e (E + v \times B)$$



環状一括検出器では、微小な電子線シフトの計測は不可能

分割検出器を用いた微分位相コントラスト(DPC)法



電場・磁場の観察が可能！

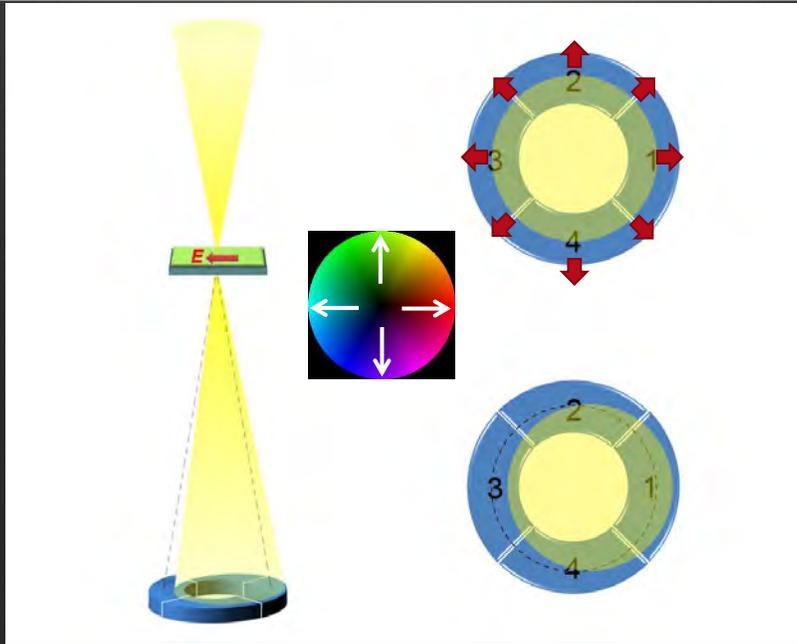
N.H. Dekkers and H. DeLang, Optik (1974)

H. Rose, Optik (1973/74)

Ultramicroscopy (1977)

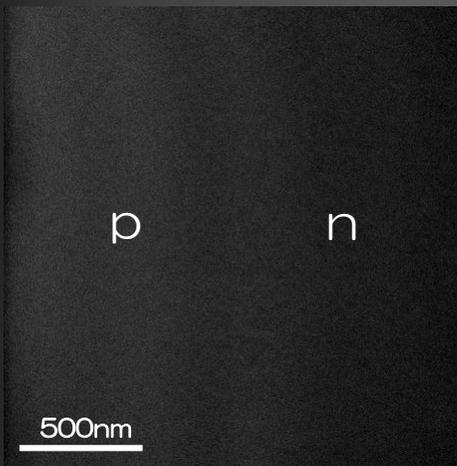
J.N. Chapman, J. Phys. D: Appl. Phys., (1984) etc.

電磁場ベクトルのカラー表示



半導体中のpn接合観察

従来手法



DPC法



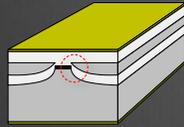
局所電場としてpn接合界面の可視化に成功

In collaboration with Furukawa Electric

N. Shibata *et al.*, *Sci. Rep.* (2015)

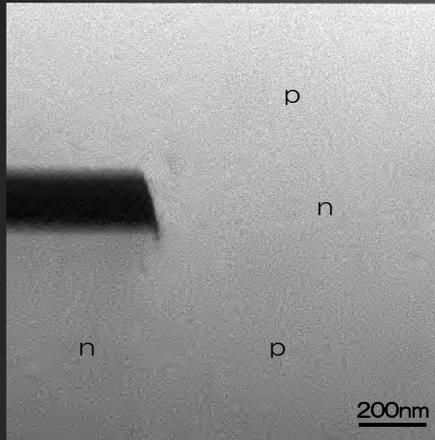
H. Brown *et al.*, *Ultramicroscopy* (2017)

半導体中のpn接合観察

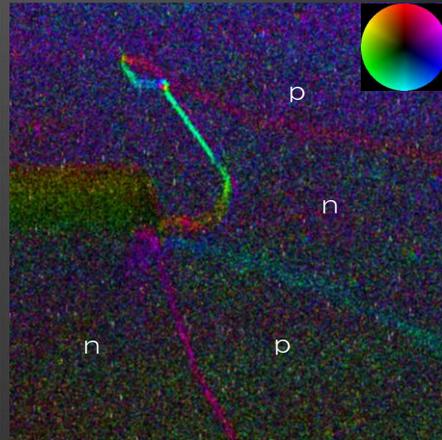


InP系のレーザーデバイス

sample courtesy: Dr. Hirokazu Sasaki
Furukawa electric Co. Ltd.



従来手法

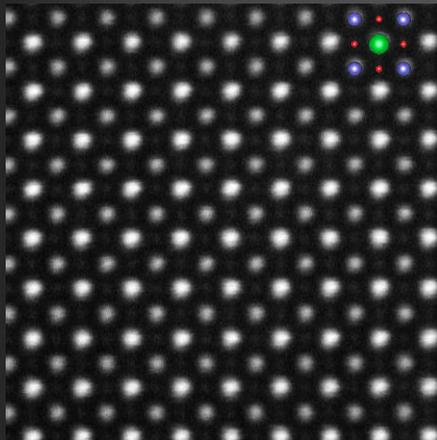


DPC法

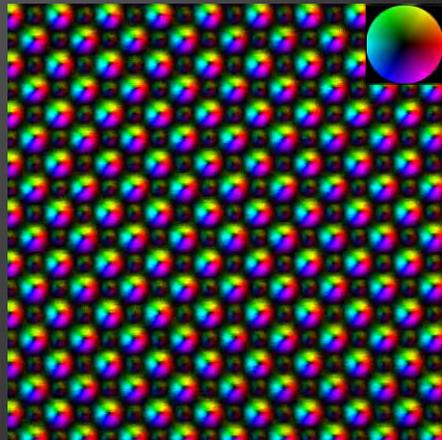
電場として原子を見てみると……

SrTiO_3 [001]

通常の観察



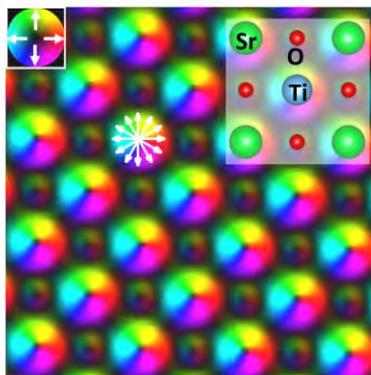
電場観察



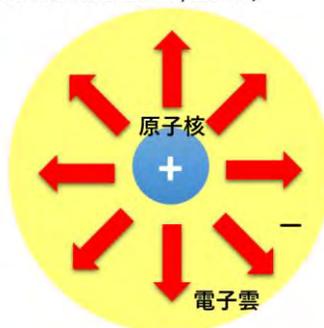
結合観察の可能性

原子内部の電場観察に世界で初めて成功

(*Nature Phys.* 2012, *Nature Comm.* 2017, 2018)



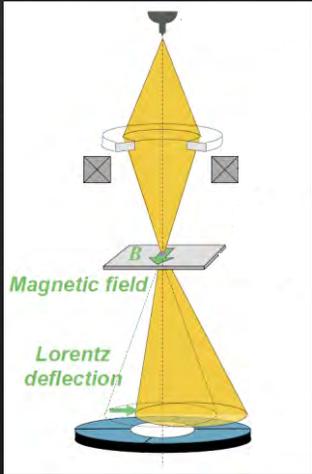
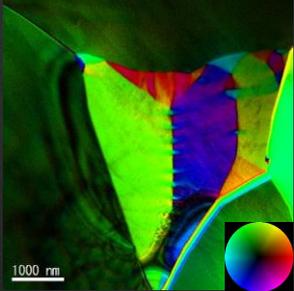
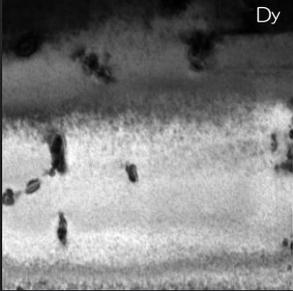
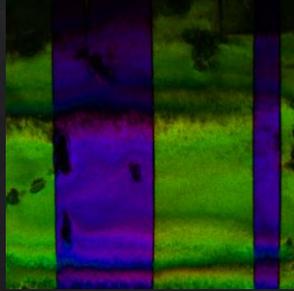
原子を電場として観察



化学結合の可視化

材料物性の起源、化学反応の根本理解

DPCによる磁場観察

	従来手法	DPC法
		
		

原子の磁場観察は可能か？



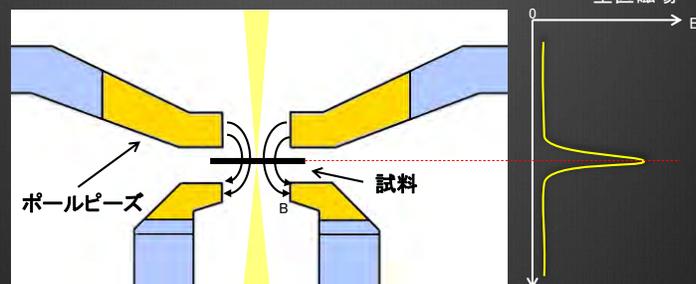
原子スケールの磁場は観察できるか？

→磁石の素は原子磁石

電子顕微鏡の常識ではNO！

電子のためのレンズ → 強磁場

従来の高分解能対物レンズ

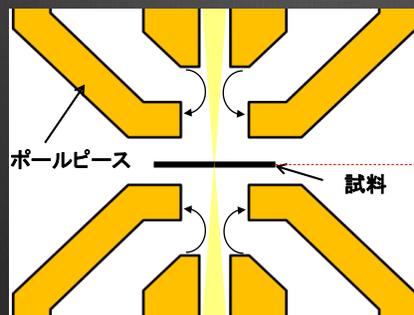


~~原子レベルでの磁場観察~~

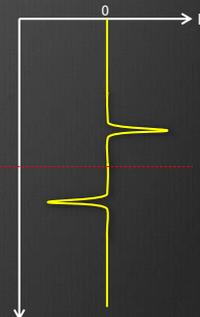
新しいレンズの開発

原子分解能: 短焦点磁界レンズ = 低 C_c , 高縮小率

新規OL



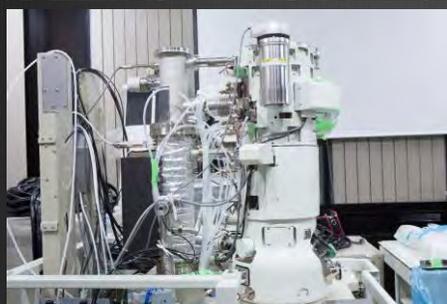
磁場強度



反対称磁界により、試料上磁場をキャンセル!

高分解能と磁場フリーを同時に実現可能

無磁場での原子分解能観察ができる電子顕微鏡開発 (2014-2021)



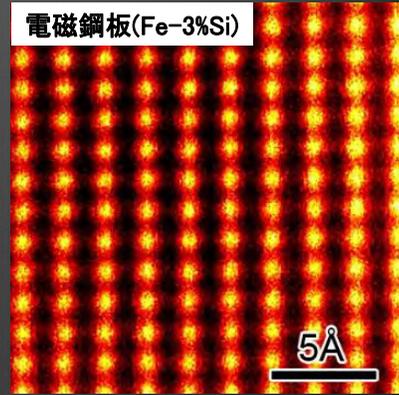
原子分解能磁場フリー電子顕微鏡の実現

磁性材料の原子観察を可能にする新電子顕微鏡

Nature Comm. (2019)



2019. 6. 2. NHKニュース



鉄鋼、磁石、半導体などの研究開発を加速

→ **磁場の超高分解能観察に道を拓く**

まとめ

- ・ 電子顕微鏡では、すべての原子種を直接観察することができる。
- ・ これからは電子の振る舞い＝電磁場を原子スケールで観察できるかが大きなチャレンジ。
→電場・磁場を原子レベルで捉える必要あり
- ・ そのためには、電子顕微鏡をもう一段進化させる必要あり！
→無磁場原子分解能の実現！
- ・ 電子顕微鏡で「直接見る」ことで、今後の脱炭素技術開発に貢献！

Collaborators



T. Seki



T. Matsumoto



G. Sanchez-Santolino



R. Ishikawa



Y. Ikuhara



Y. Kohno



S. Morishita



A. Nakamura



H. Sawada



S.D. Findlay



Y.G. So



H. Sasaki

御清聴ありがとうございました！

Financial supports

JST-SENTAN, JSPS, MEXT

