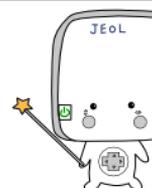


SEMの原理と応用

～データの質を上げる観察方法～

2022.11.25

日本電子株式会社



はじめに

走査電子顕微鏡（SEM : Scanning Electron Microscopy）

表面形態や組成などの観察、分析する装置

様々な分野で業種を問わず多くのユーザーに広く使われている。
近年ではSEMの性能と操作性が飛躍的に向上したことから、
初心者でも簡単に結果を得ることができるようになってきた。

SEMの原理、とりわけSEM像形成までの原理を知った上で装置を使う。
⇒試料、測定目的に応じて条件選択を行えるようになる。

今回はSEMで電子線の発生から像形成までの基礎を中心に、その原理と
各種観察条件設定例などから、データの質を上げる測定方法を紹介する。

本日の内容

第1章 SEMの原理

SEM構成

SEMで得られる情報 二次電子/反射電子

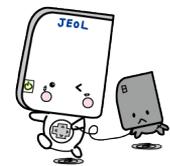
装置のハード面で性能を決める要素 電子銃/対物レンズ

装置の設定条件で性能を決める要素 加速電圧/照射電流/WD

装置コンディション 軸調整/OLAP

第2章 SEMの応用 ~データの質を上げる測定方法~

絶縁物の測定方法 低真空/低加速電圧/導電処理



Solutions for Innovation JEOL

本日の内容

第1章 SEMの原理

SEM構成

SEMで得られる情報 二次電子/反射電子

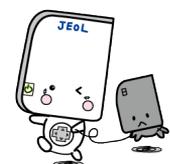
装置のハード面で性能を決める要素 電子銃/対物レンズ

装置の設定条件で性能を決める要素 加速電圧/照射電流/WD

装置コンディション 軸調整/OLAP

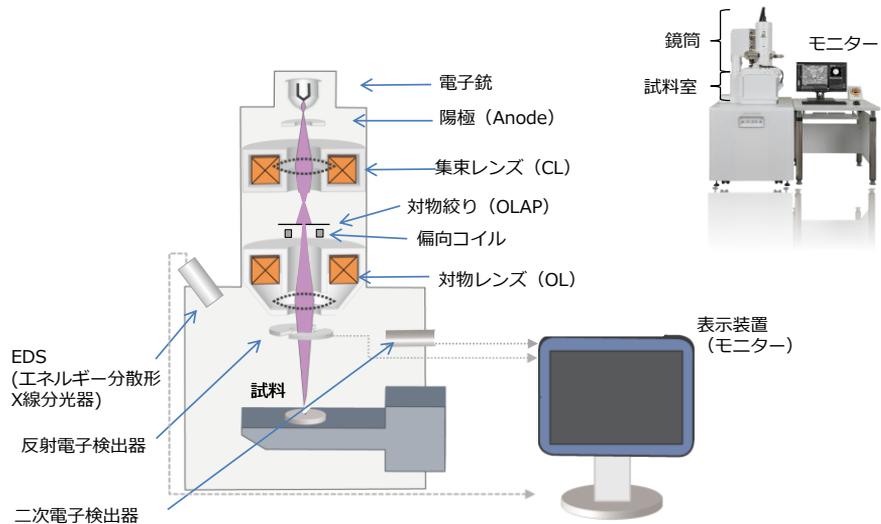
第2章 SEMの応用 ~データの質を上げる測定方法~

絶縁物の測定方法 低真空/低加速電圧/導電処理



Solutions for Innovation JEOL

SEM構成



5

Solutions for Innovation JEOL

本日の内容

第1章 SEMの原理

SEM構成

SEMで得られる情報 二次電子/反射電子

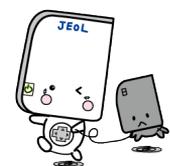
装置のハード面で性能を決める要素 電子銃/対物レンズ

装置の設定条件で性能を決める要素 加速電圧/照射電流/WD

装置コンディション 軸調整/OLAP

第2章 SEMの応用 ~データの質を上げる測定方法~

絶縁物の測定方法 低真空/低加速電圧/導電処理

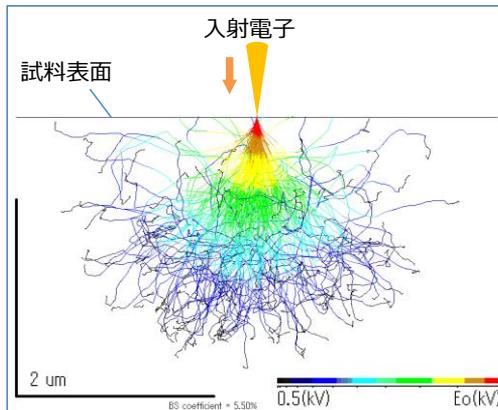


6

Solutions for Innovation JEOL

試料内部への入射電子の散乱

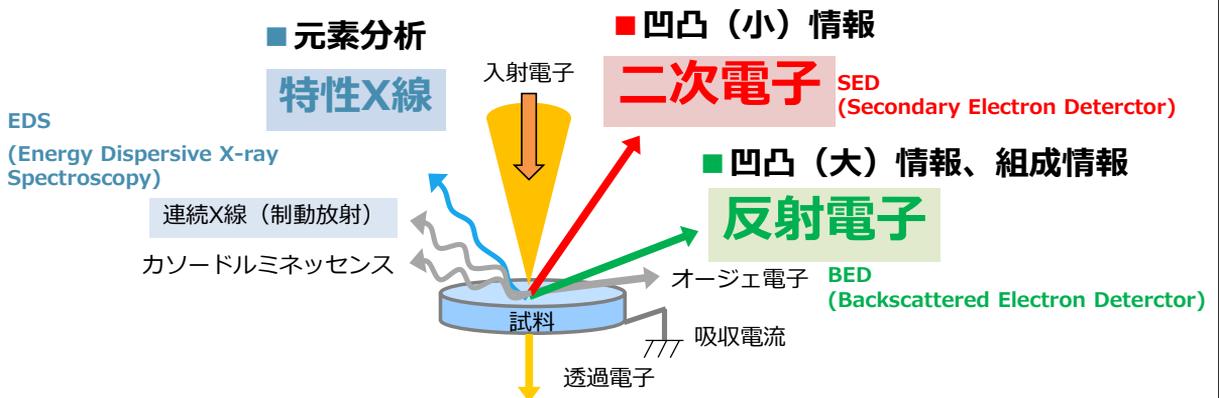
試料内部で入射電子は「散乱」しながら、徐々にエネルギーを失い、試料中にとどまる、もしくは試料ステージに流れる



モンテカルロ法によるシミュレーション
試料：炭素 入射電圧：15 kV

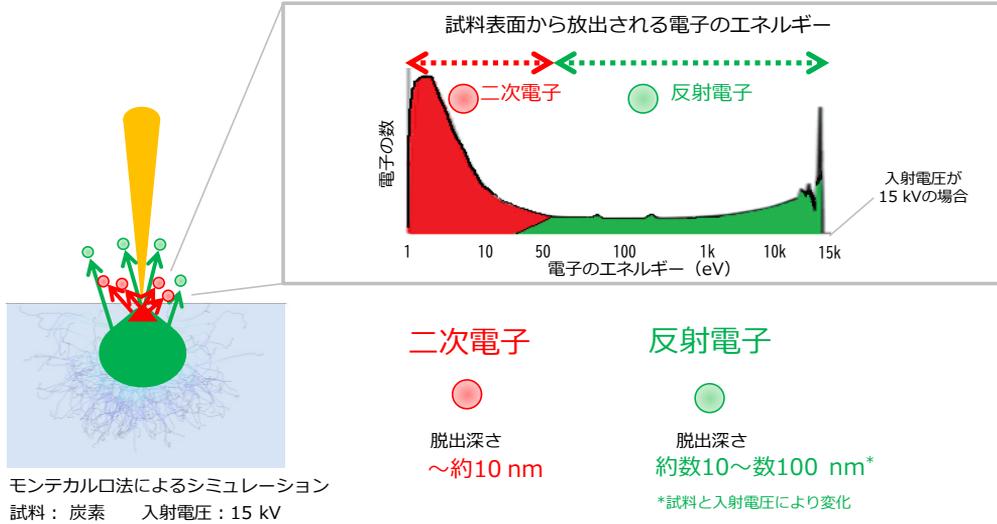
散乱の過程で
・二次電子
・反射電子
・特性X線
などが発生する

電子線照射によって試料から発生する信号



これらの信号により試料表面の形状や構成元素を知ることができる

試料から放出される電子



11

Solutions for Innovation JEOL

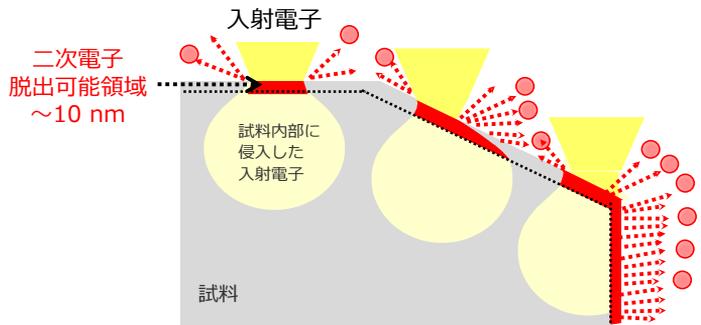
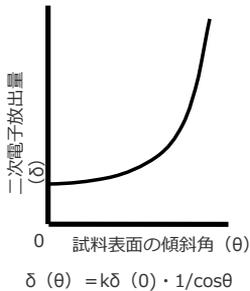
二次電子から得られる表面凹凸情報

二次電子はエネルギーが低いため、
試料のごく浅い領域から放出する



入射電子と試料のなす角度によっ
て発生量が変わる

試料表面の傾斜角と二次電子放出量の関係



入射電子に対し、試料表面の傾斜角が大きくなると
二次電子放出量も多くなり、画像中では明るく表示される
→エッジ効果

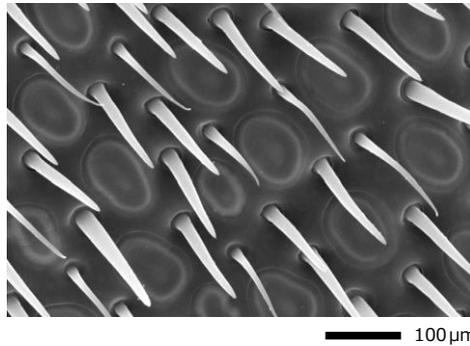
12

Solutions for Innovation JEOL

二次電子から得られる表面凹凸情報

試料：ハチの触覚
入射電圧：15 kV

■二次電子像



表面の微細な凹凸構造がコントラストに現れる

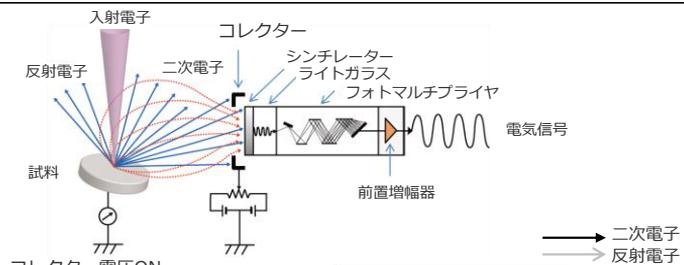
13

Solutions for Innovation JEOL

二次電子検出器を使った見え方の応用

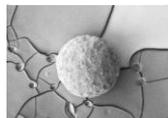
二次電子検出器(E-T検出器)の構成

…検出器先端に高い電圧を印加してエネルギーの低い二次電子を集める構造



コレクター-on (無影効果)

コレクターに印加するプラス電圧により、低いエネルギーの二次電子がすべて検出器に集められる



コレクター電圧OFF

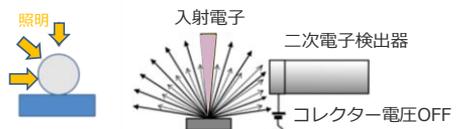
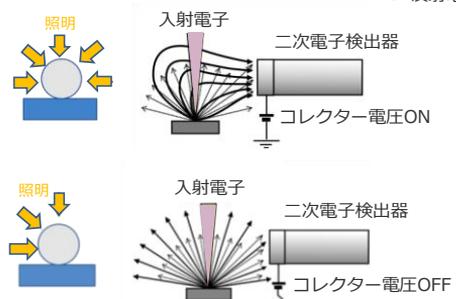
コレクター-off (陰影効果)

コレクターの印加電圧をoffにすると、二次電子も入るが、検出器に入る電子の大半は直進してきた反射電子となる



加速電圧：3kV
倍率：x50

500μm



14

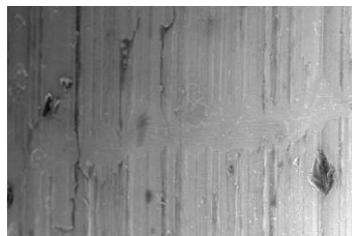
Solutions for Innovation JEOL

二次電子検出器を使った見え方の応用

二次電子検出器を使ったコレクター電圧ON/OFFによる効果

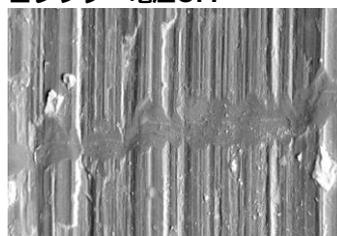
試料：金属上の加工痕
加速電圧：15kV

コレクター電圧ON



浅い溝は観察しにくい

コレクター電圧OFF



浅い溝が良好に観察できている

コレクター電圧OFFを使うと
金属破面の起点、フィルムのゆるい/大きい凹凸観察に効果あり

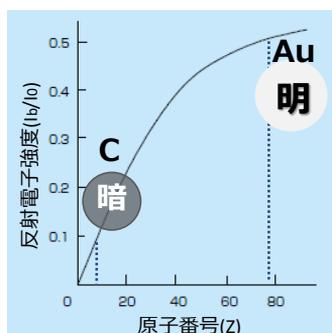
15

Solutions for Innovation JEOL

反射電子から得られる組成・凹凸情報

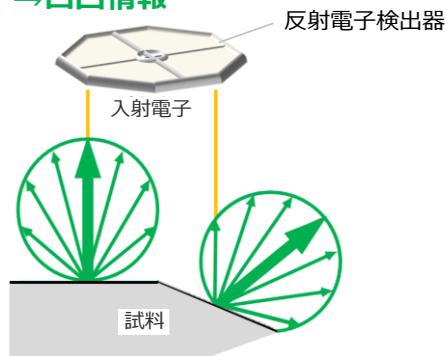
- ・ 試料の元素組成が異なると発生信号量が変わる
⇒ 組成情報

平均原子番号と反射電子放出量の関係



平均原子番号が大きい元素ほど
画像中では明るく表示される

- ・ 入射電子と試料の角度が異なると検出される信号量が変わる
⇒ 凹凸情報



試料と検出器側の角度によって
信号強度が異なり
凹凸によるコントラストが表示される

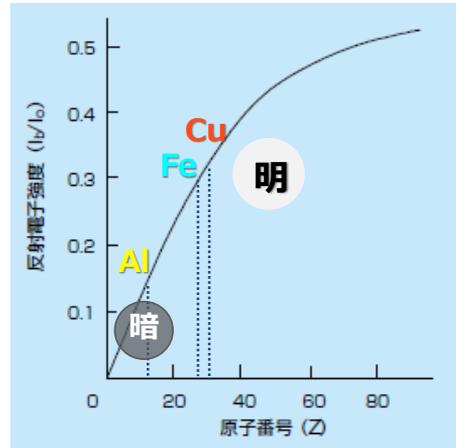
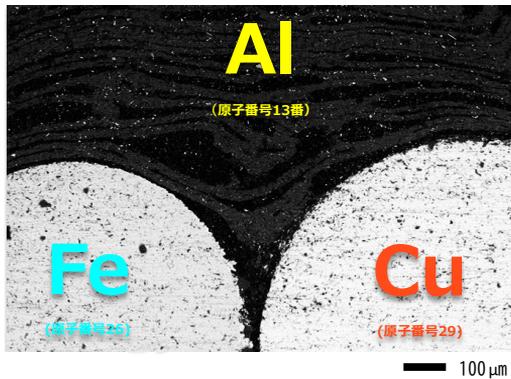
16

Solutions for Innovation JEOL

反射電子から得られる組成情報

試料：電子基板断面
入射電圧：15 kV

■ 反射電子像



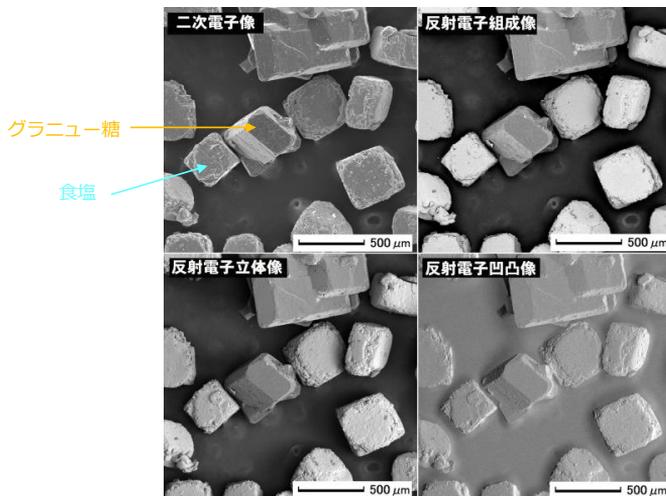
試料の元素組成差がコントラストに現れる

17

Solutions for Innovation JEOL

二次電子、反射電子の見え方

試料；グラニュー糖（C、O）と食塩（Na、Cl）の混合物
二次電子像と3種類の反射電子像を比較



二次電子像 (SE像)

⇒グラニュー糖と食塩の表面形態が明瞭に出ている

反射電子組成像 (Compo像)

⇒重元素主体の食塩が軽元素主体のグラニュー糖より明るい。材料の識別が可能

反射電子凹凸像 (Topo像)

⇒一方向からの照明による凹凸の画像となっている

反射電子立体像 (Shadow像)

⇒組成と凹凸の合成像

(一般的に低真空雰囲気での形状観察に使用)

※高真空で用いられる二次電子検出器は低真空雰囲気では使用できない。低真空雰囲気での二次電子像を観察したい場合は別途低真空用二次電子検出器が必要

加速電圧：15kV

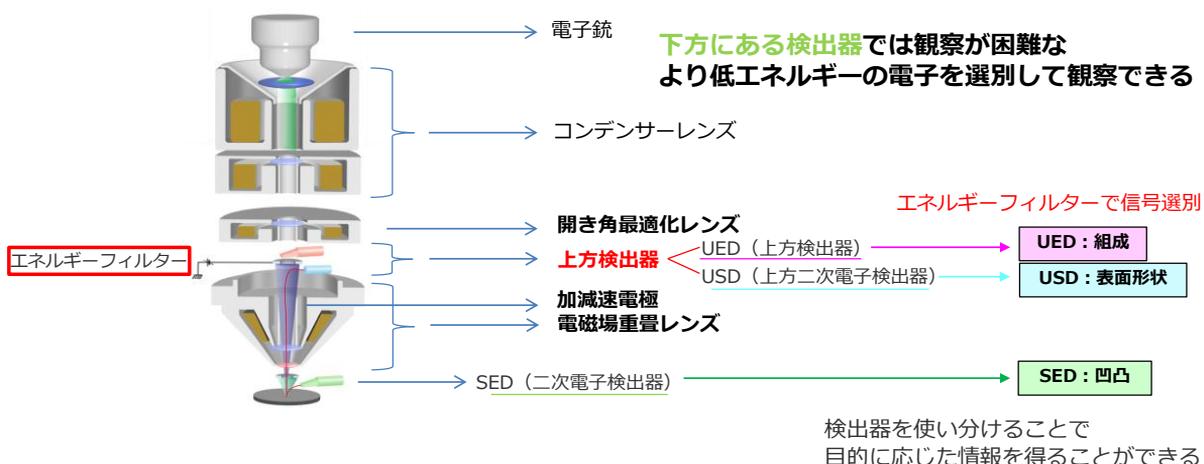
倍率：x80

18

Solutions for Innovation JEOL

電磁場重畳レンズ搭載SEMに採用している上方検出器

対物レンズの上に検出器を配置



19

Solutions for Innovation JEOL

本日の内容

第1章 SEMの原理

SEM構成

SEMで得られる情報 二次電子/反射電子

装置のハード面で性能を決める要素 電子銃/対物レンズ

装置の設定条件で性能を決める要素 加速電圧/照射電流/WD

装置コンディション 軸調整/OLAP

第2章 SEMの応用 ~データの質を上げる測定方法~

絶縁物の測定方法 低真空/低加速電圧/導電処理

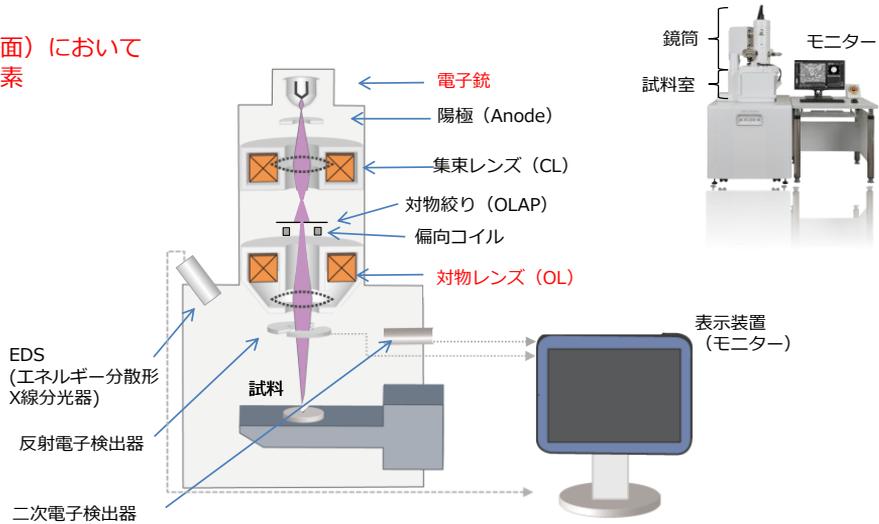


20

Solutions for Innovation JEOL

装置のハード面で性能を決める要素

装置側（ハード面）において
性能を決める要素

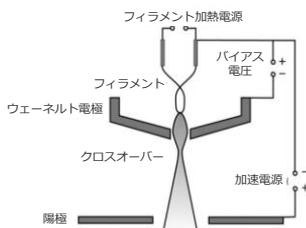


21

Solutions for Innovation JEOL

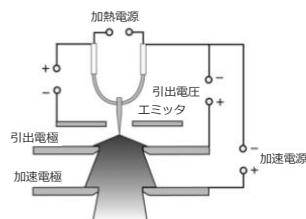
電子銃の種類

熱電子銃



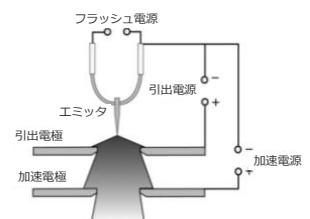
- ・ユーザーメンテナンス可
- ・プローブ径：太
- ・大照射電流が得られるので分析に向いている

ショットキー電子銃



- ・ユーザーメンテナンス不可
- ・プローブ径：細
- ・安定かつ大照射電流が得られるため分析に向いている

冷陰極電界放出電子銃

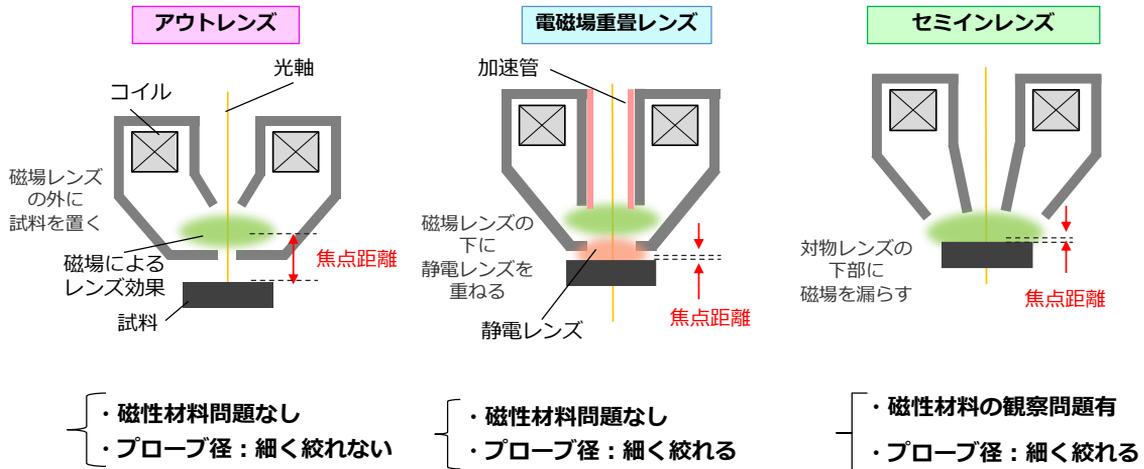


- ・ユーザーメンテナンス不可
- ・プローブ径：細
- ・大照射電流を得られないので観察に特化している

22

Solutions for Innovation JEOL

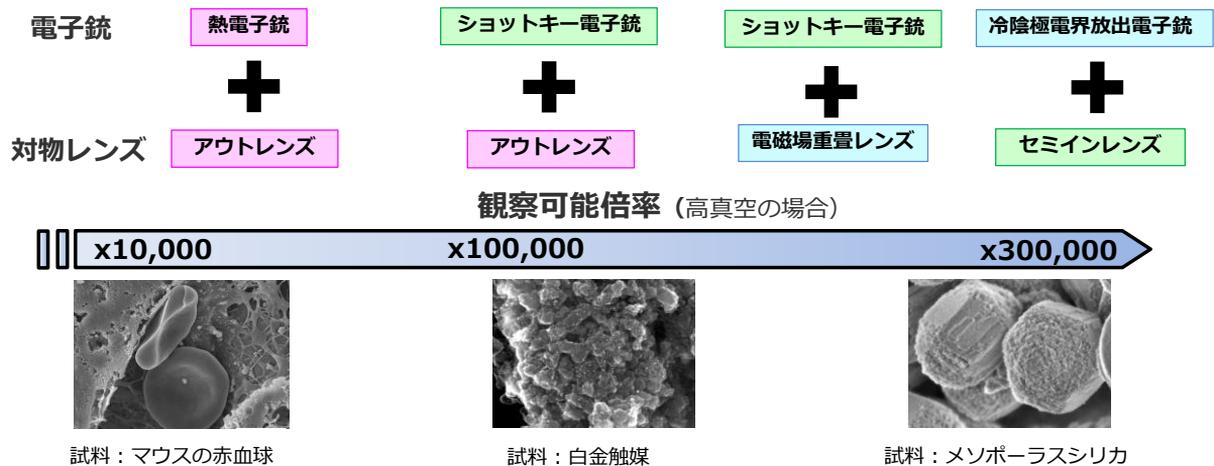
対物レンズの種類



23

Solutions for Innovation JEOL

電子銃と対物レンズの組み合わせで観察可能倍率は決まる！



試料の観察倍率、構造物のサイズ、得たい情報から装置のハードを決めることは重要

24

Solutions for Innovation JEOL

本日の内容

第1章 SEMの原理

SEM構成

SEMで得られる情報 二次電子/反射電子

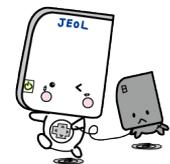
装置のハード面で性能を決める要素 電子銃/対物レンズ

装置の設定条件で性能を決める要素 加速電圧/照射電流/WD

装置コンディション 軸調整/OLAP

第2章 SEMの応用 ~データの質を上げる測定方法~

絶縁物の測定方法 低真空/低加速電圧/導電処理

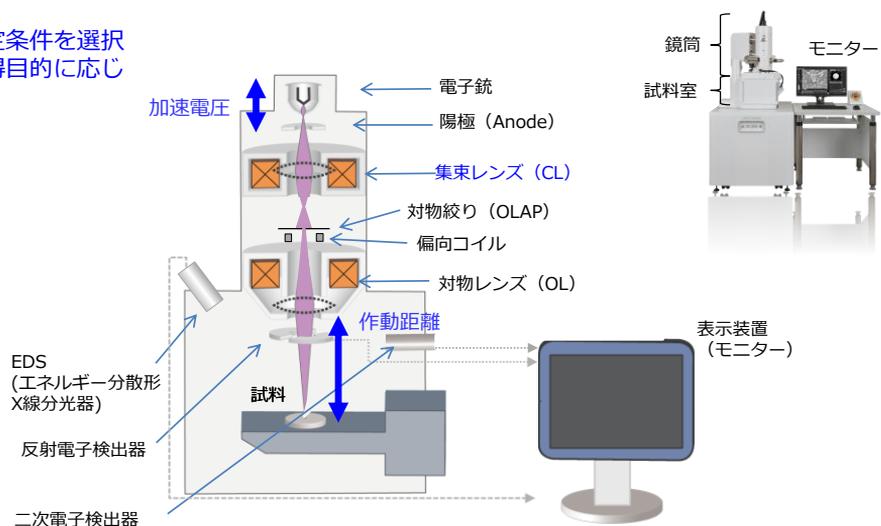


25

Solutions for Innovation JEOL

装置の設定条件で性能を決める要素

オペレータ自らが測定条件を選択
できるため、画像取得目的に応じ
て変更できる



26

Solutions for Innovation JEOL

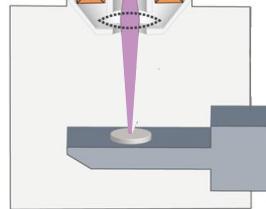
加速電圧（入射電圧）

電子銃の陰極と陽極の間にかけられた電圧

電子銃から放出された電子を一定の電圧印加により加速する
⇒試料に入射する電子のエネルギー



SEMの場合(通常) : 100V~30kV



加速電圧の効果

効果	加速電圧	低	高
プローブ径		太	細
深さ情報		浅	深
エッジ効果		小	大
ダメージ		小	大

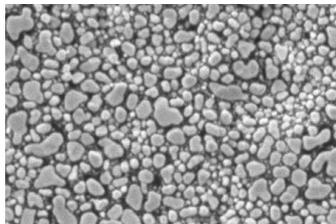
27

Solutions for Innovation JEOL

加速電圧～プローブ径～

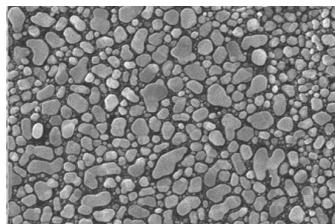
高加速電圧 : 輝度大/回折限界小/色収差小 ⇒ **プローブ径が細くなる**

低加速電圧 (5kV)



500nm

高加速電圧 (20kV)



500nm

太 **プローブ径** 細

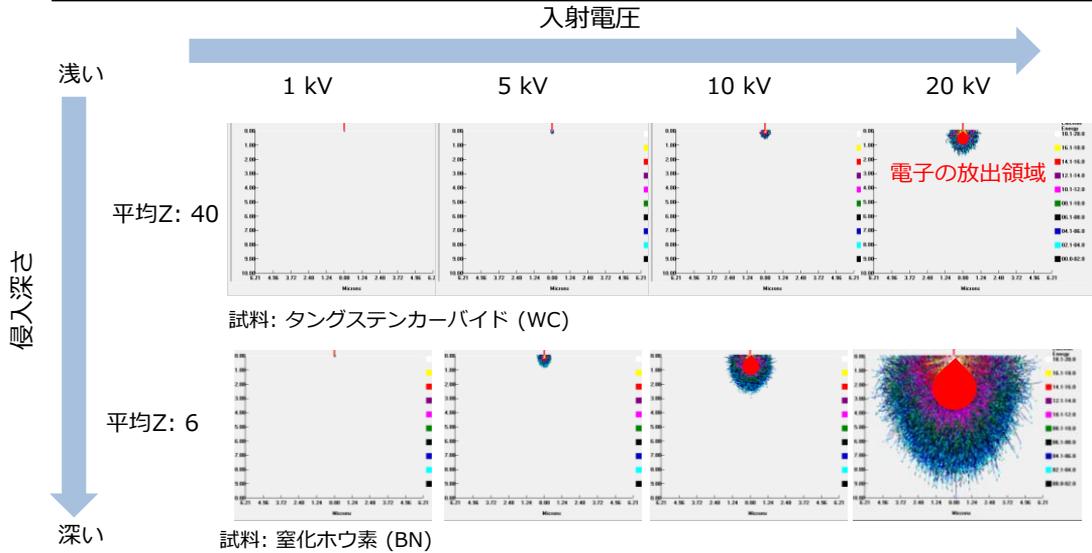
試料 : グラファイト上の金蒸着粒子

28

Solutions for Innovation JEOL

加速電圧～電子線の脱出深さ～

装置: JSM-IT800SHL
 試料バイアス: -5 kV
 使用ソフト: Electron Flight Simulator LV

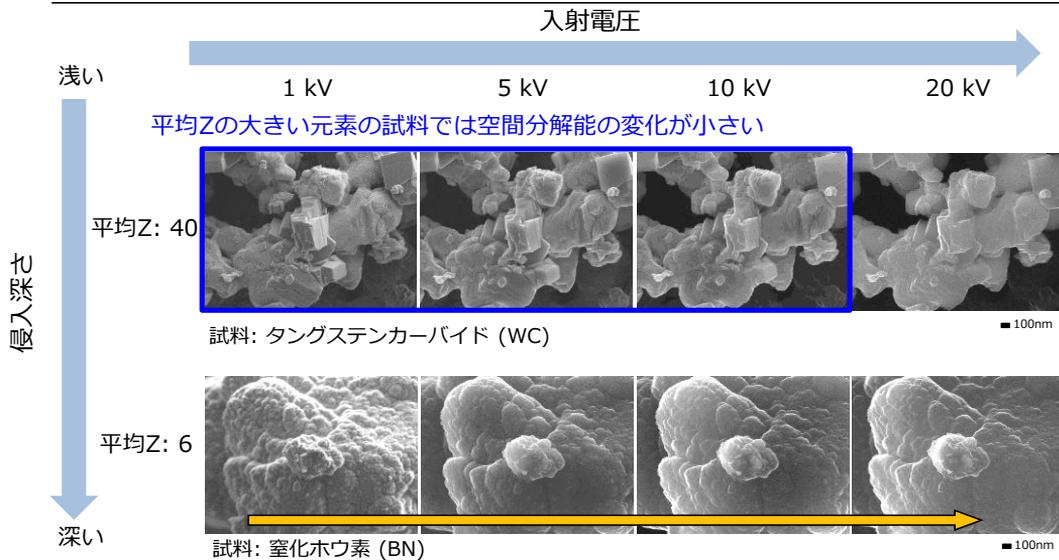


29

Solutions for Innovation JEOL

加速電圧～電子線の脱出深さ～

装置: JSM-IT800SHL
 試料バイアス: -5 kV
 使用ソフト: Electron Flight Simulator LV



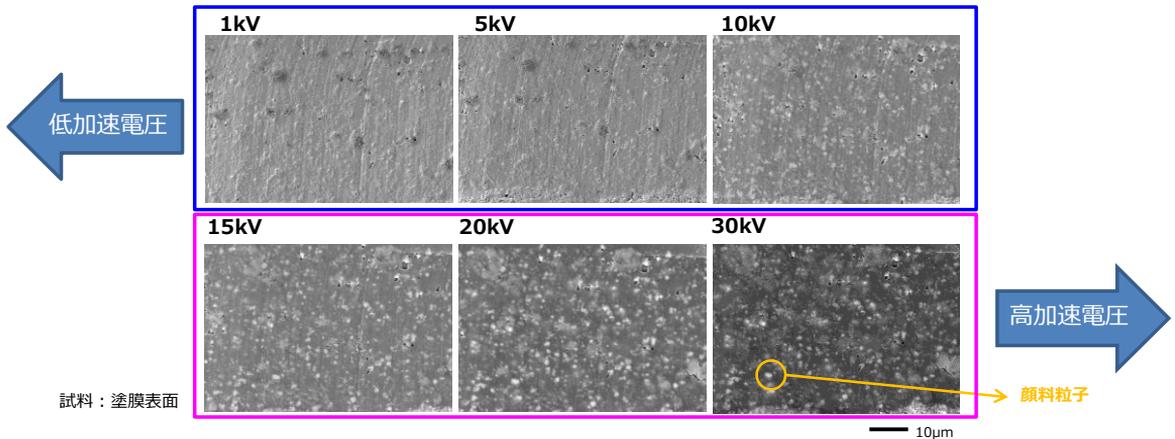
30

Solutions for Innovation JEOL

加速電圧～電子線の脱出深さ～

加速電圧の効果 表面情報と内部情報

低加速電圧では試料の表面情報（塗膜の表面形態）が確認できる



高加速電圧では試料の内部情報（顔料の分布）が確認できる

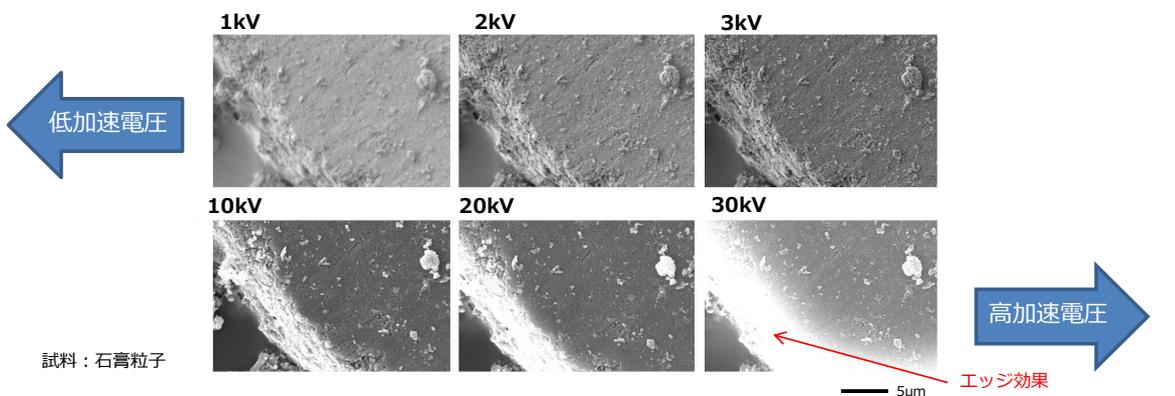
31

Solutions for Innovation JEOL

加速電圧～電子線の脱出深さ～

加速電圧の効果 エッジ効果

低加速電圧では電子線のもぐりこみが浅いので、試料の表面もエッジも良好に観察できる

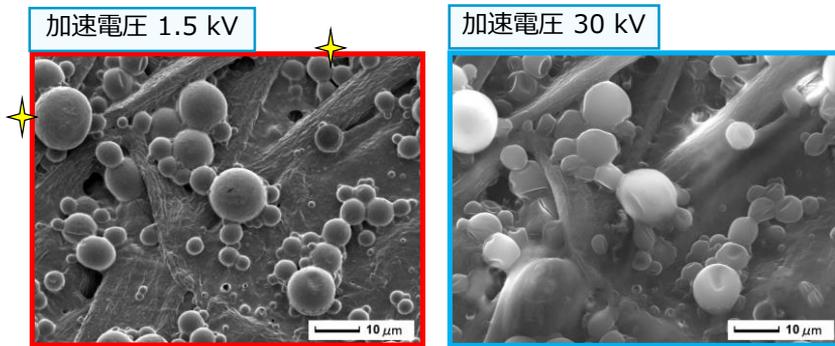


高加速電圧では電子線のもぐりこみが大きく、また、二次電子の傾斜角度による信号強度増大で、二次電子放出量が多くなり、試料のエッジ部分の輝度が高く白飛びしている

32

Solutions for Innovation JEOL

加速電圧～試料ダメージ（特にソフトマテリアルの場合）～



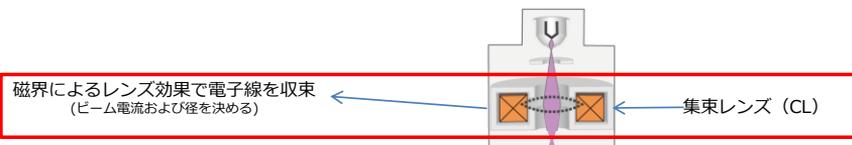
試料：カーボン複写紙 二次電子像 倍率 x1,500



33

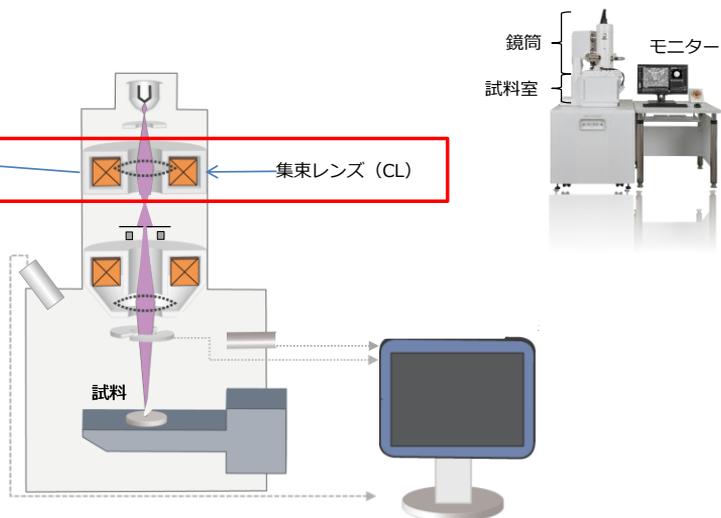
Solutions for Innovation JEOL

照射電流



照射電流の効果

照射電流	小	大
効果		
プローブ径	細	太
ダメージ	小	大

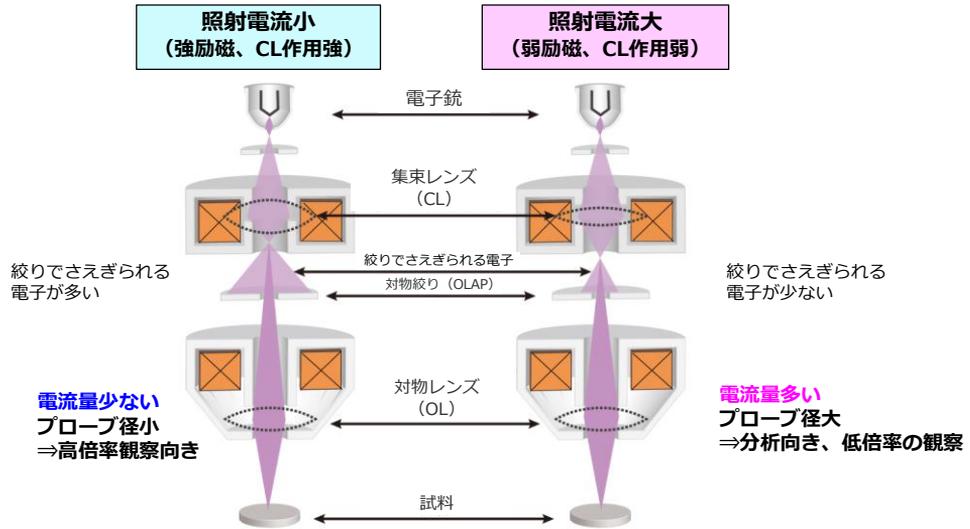


34

Solutions for Innovation JEOL

照射電流は集束レンズ（CL）で調整

CLの効果：電子線の照射電流、プローブ径を決める

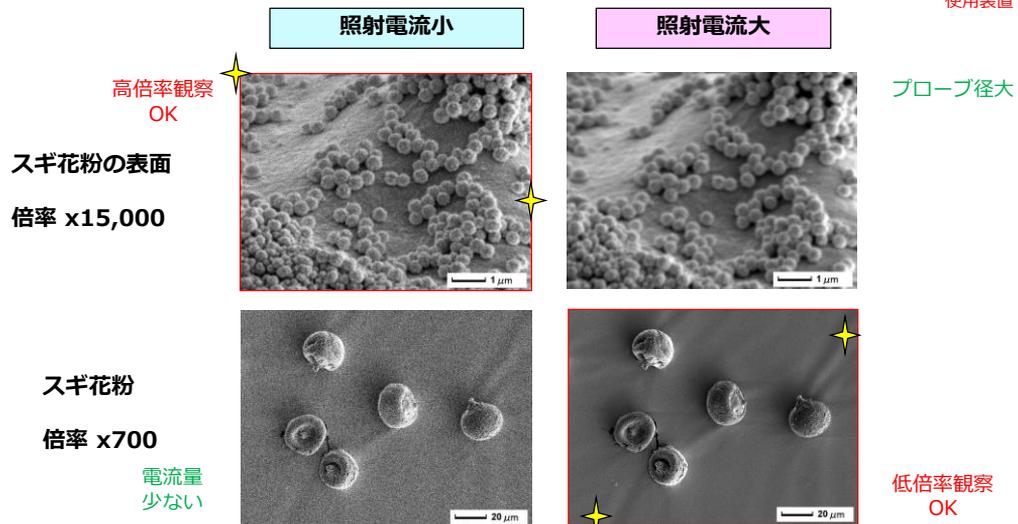


35

Solutions for Innovation JEOL

照射電流～プローブ径～

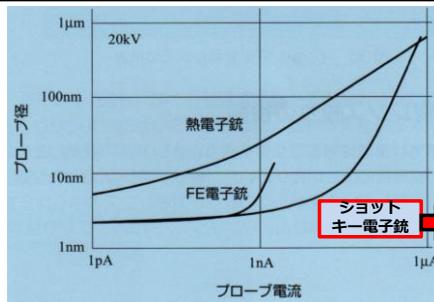
試料：スギ花粉 加速電圧 5kV
使用装置：熱電子銃SEM



36

Solutions for Innovation JEOL

照射電流～電子銃ごとの違い～



プローブ径と照射電流の関係

ショットキー電子銃は照射電流を上げててもプローブ径を維持できる

高倍率でもSEM観察と元素分析で測定条件を変えなくても測定できる

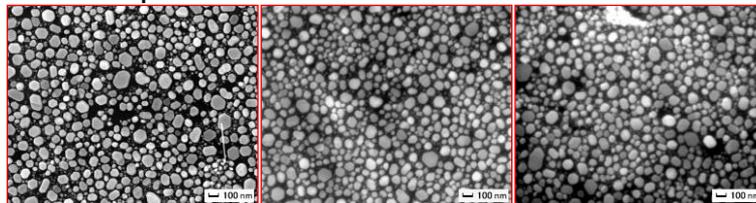
照射電流値

50pA

5nA

200nA

ショットキー電子銃の事例

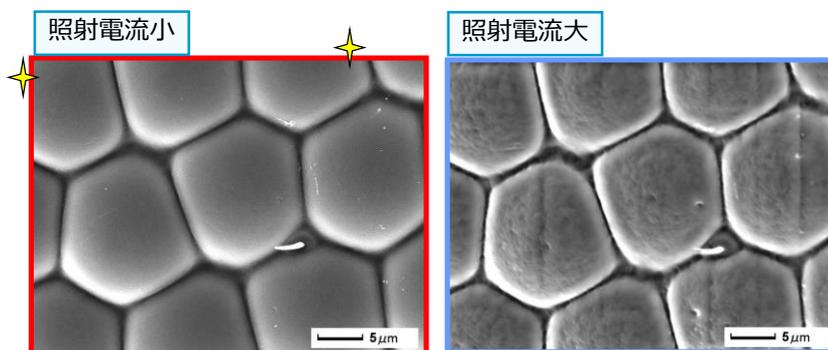


SEM条件：加速電圧15kV、観察倍率x50000 試料：金粒子

Solutions for Innovation JEOL

37

照射電流～試料ダメージ（特にソフトマテリアルの場合）～



試料：蟻の複眼 加速電圧 10kV 二次電子像 倍率 x3,000
使用装置：熱電子銃SEM

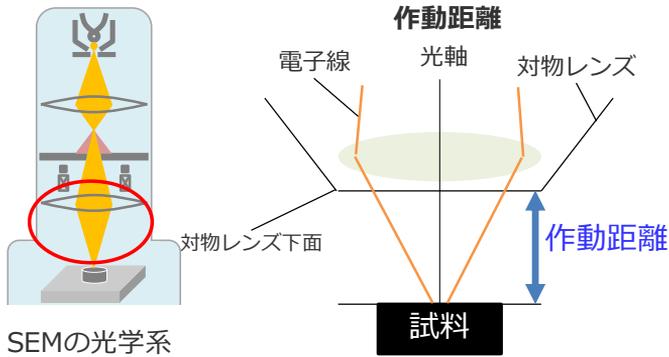


Solutions for Innovation JEOL

38

作動距離

対物レンズ下面から試料までの距離 (作動距離)



SEMの光学系

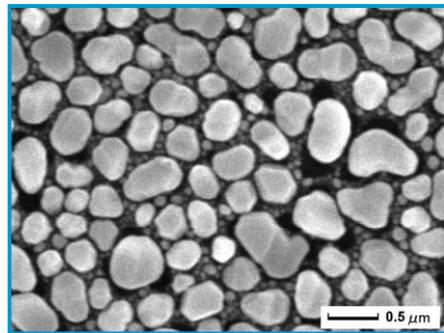
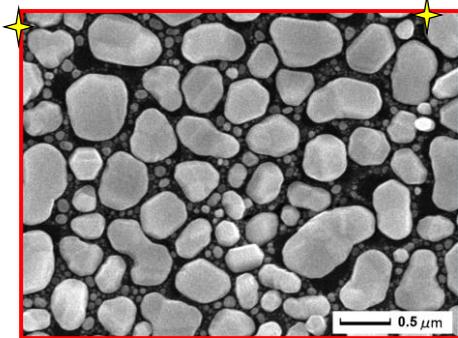
作動距離の効果

作動距離 効果	短	長
プローブ径	細	太
焦点深度	浅	深

作動距離が短いとプローブ径を細く絞れる

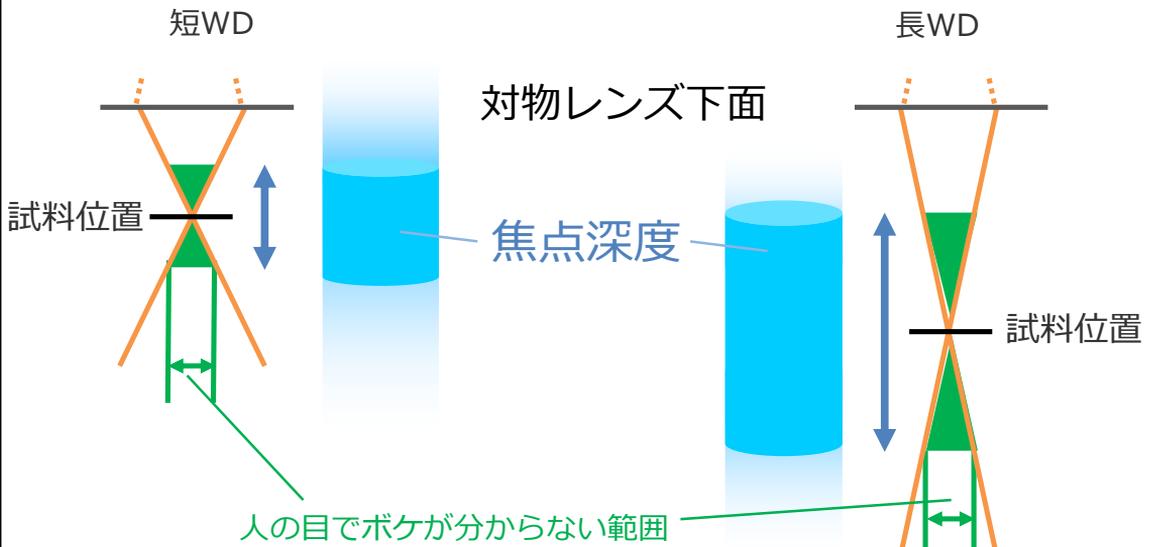
作動距離～プローブ径～

試料: 金粒子 二次電子信号 倍率 x50,000



6mm 短 作動距離 長 47mm
細 プローブ径 太

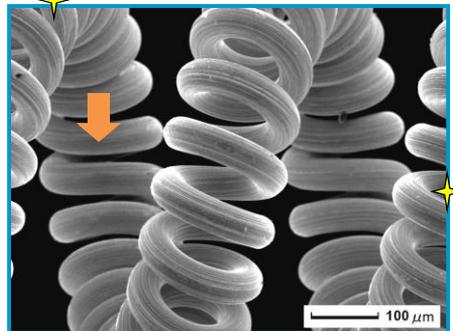
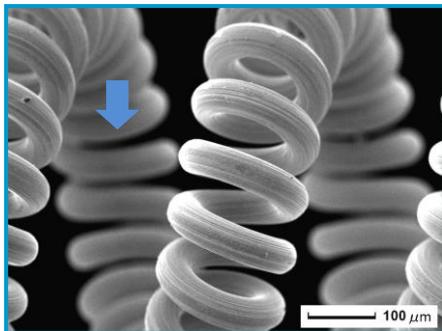
作動距離～焦点深度～



41

作動距離～焦点深度～

試料：電球フィラメント 二次電子信号 倍率 x150

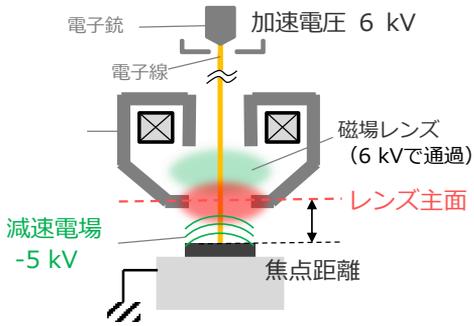


42

減速法（ショットキー電子銃の場合）

試料バイアス（減速法）：電子線を試料への照射直前で減速させる方法

例) -5 kV 減速した場合



【試料バイアスの効果】

高い加速電圧で加速された電子が対物レンズを通過

↓
減速電場が付加的なレンズとして働き、
レンズ主面と試料との距離（焦点距離）が近づく

↓
低入射電圧でも収差が小さくなる

$$6 \text{ kV} - 5 \text{ kV} \Rightarrow 1 \text{ kV}$$

加速電圧 減速電場 入射電圧

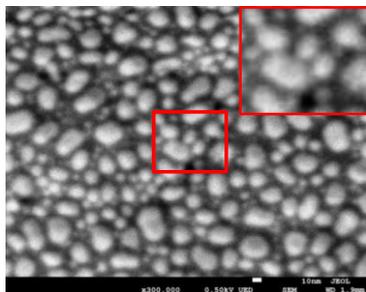
※減速電場は装置によって調整幅あり

43

Solutions for Innovation JEOL

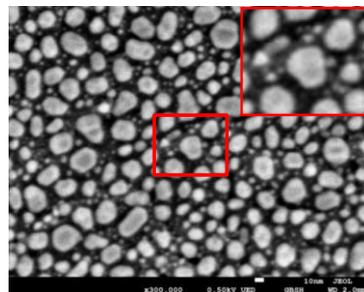
減速法（ショットキー電子銃の場合）

通常モード



0.5 kV
(試料バイアス 0 kV) 30万倍

減速法



0.5 kV
(試料バイアス -5 kV) 30万倍

試料：カーボン上の金蒸着粒子

44

Solutions for Innovation JEOL

本日の内容

第1章 SEMの原理

SEM構成

SEMで得られる情報 二次電子/反射電子

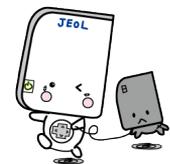
装置のハード面で性能を決める要素 電子銃/対物レンズ

装置の設定条件で性能を決める要素 加速電圧/照射電流/WD

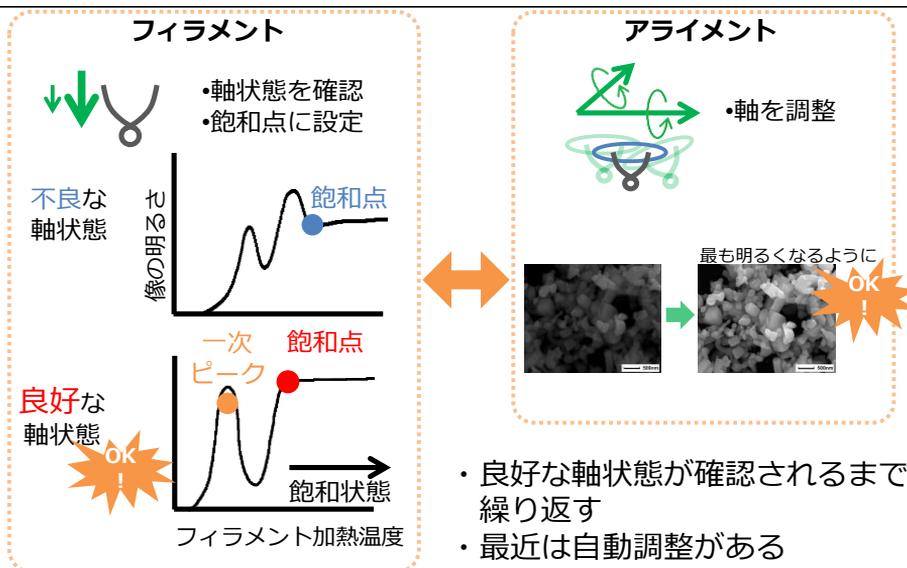
装置コンディション 軸調整/OLAP

第2章 SEMの応用 ~データの質を上げる測定方法~

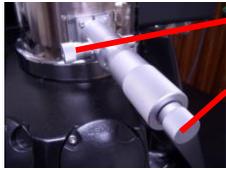
絶縁物の測定方法 低真空/低加速電圧/導電処理



フィラメント調整 (タングステン電子銃の場合)

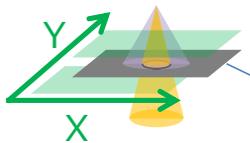


対物絞り（タングステン電子銃の場合）



X方向
調整つまみ

Y方向
調整つまみ

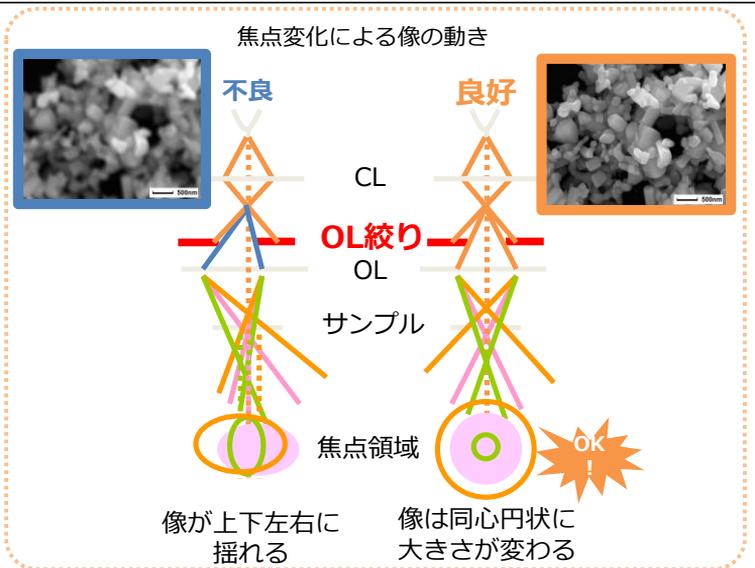


約数十μmの
穴のある薄板

W-SEMの場合

- ・高倍率（数千～1万倍）の像を出す
- ・“OLウォブラ”をon
- ・像が動かかなくなるようにOL絞りのつまみを調節する

47



本日の内容

第1章 SEMの原理

SEM構成

SEMで得られる情報 二次電子/反射電子

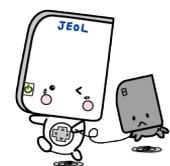
装置のハード面で性能を決める要素 電子銃/対物レンズ

装置の設定条件で性能を決める要素 加速電圧/照射電流/WD

装置コンディション 軸調整/OLAP

第2章 SEMの応用 ～データの質を上げる測定方法～

絶縁物の測定方法 低真空/低加速電圧/導電処理

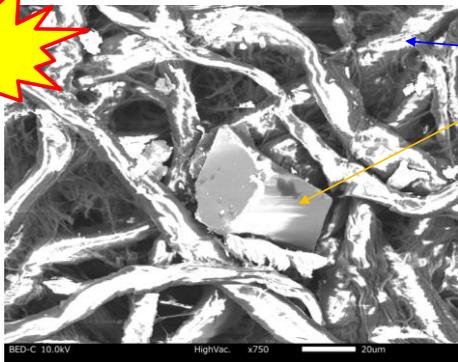


48

Solutions for Innovation JEOL

絶縁物（非導電性）試料の測定

高真空モード

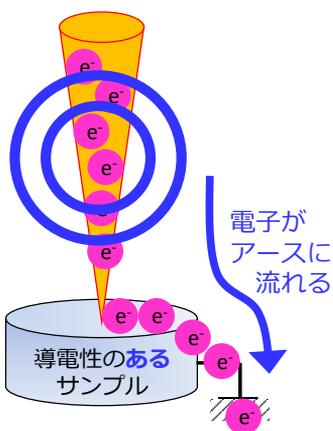


繊維: 非導電性試料
金属粉: 導電性試料

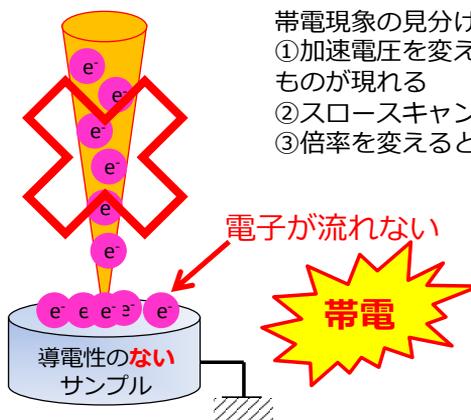
帯電とは?
試料表面に電子が溜まり
試料構造に由来しない
異常なコントラストが発生する

帯電の原理

入射電子



入射電子



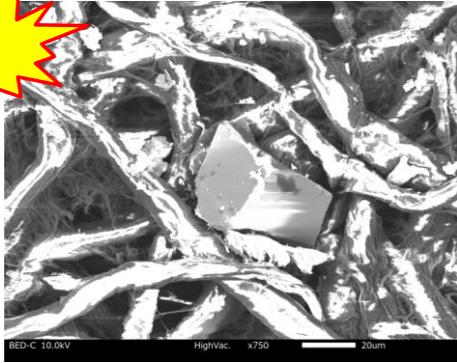
帯電現象の見分け方

- ① 加速電圧を変えると試料の構造物以外のものが現れる
- ② スロースキャンを続けると輝度が変わる
- ③ 倍率を変えると輝度が変わる

低真空モード

試料: 金属粉が混入したろ紙
入射電圧: 10 kV

高真空モード



低真空モード

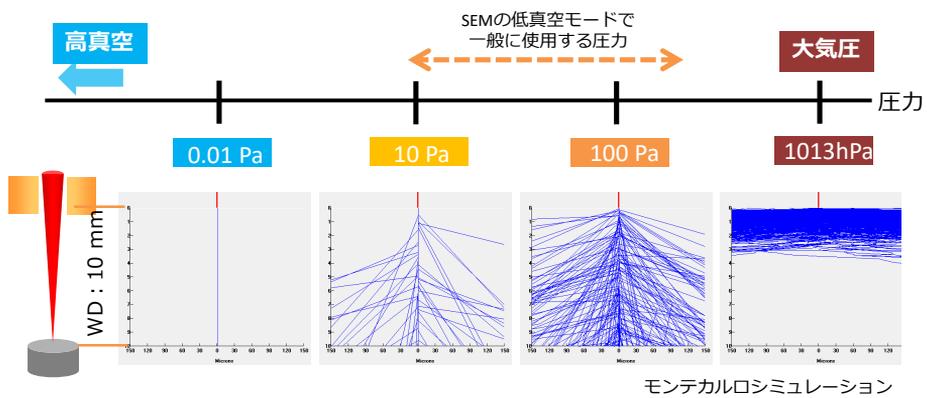


★ポイント

- ・コーティングなしで非導電性試料の観察/分析ができる
- ・他装置による分析も可能

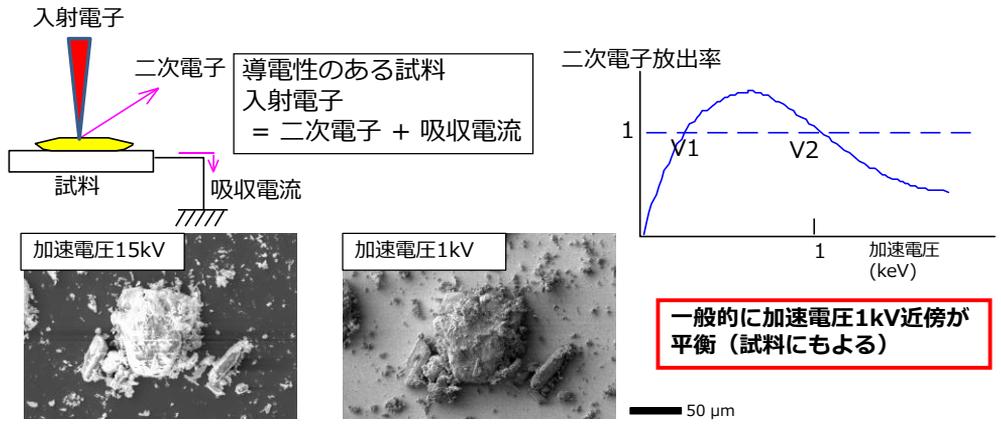
繊維と金属粉の判別ができています

低真空モードの注意点



真空度が悪いほど電子線の散乱が多くなる
⇒高倍率観察が難しい

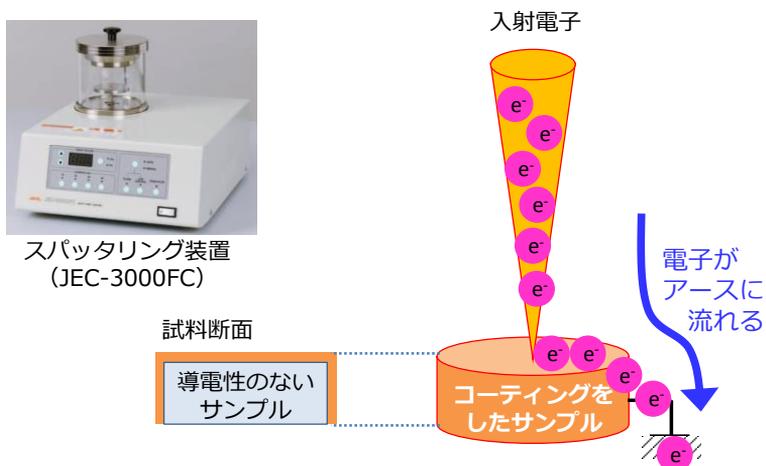
低加速電圧法



導電性のない試料は吸収電流が0
入射電子量 > 二次電子量
⇒ 帯電する

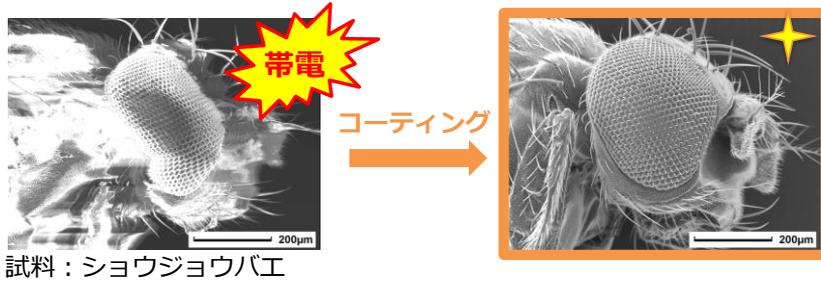
加速電圧を下げることで
入射電子量 = 二次電子量
⇒ **チャージバランスがとれる**
(ただし、高倍率観察に限界がある)

導電処理



試料表面に金属などをコーティングし、
導電性を持たせることで帯電を回避する

導電処理



57

Solutions for Innovation JEOL

導電処理の注意点

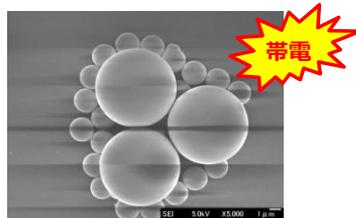
試料回転傾斜なし

試料回転傾斜あり

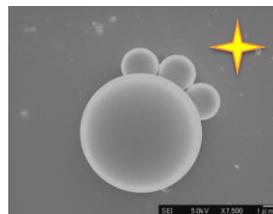
↓ ◀… コーティング剤 …▶ ↓



- ・接地面にコーティングできず、導電性がない



- ・試料ステージを回転傾斜
- ・接地面周辺にもコーティング粒子が付着



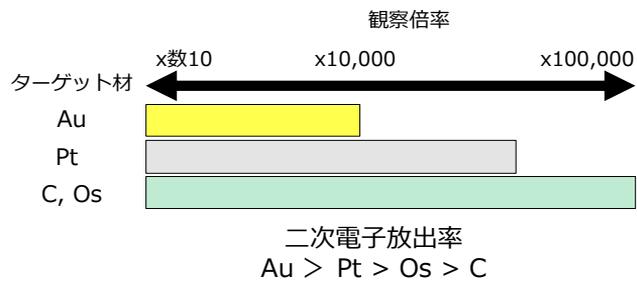
58

Solutions for Innovation JEOL

導電処理材の選択

二次電子像の観察… Au, Pt, Os
 反射電子像の観察・分析… C

【観察倍率による推奨ターゲットの目安】

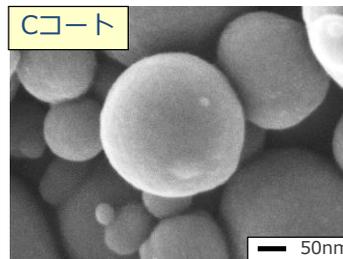
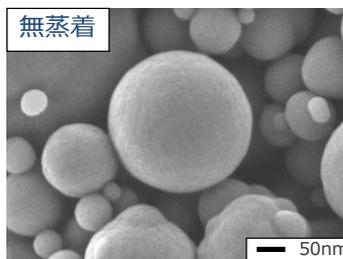


59

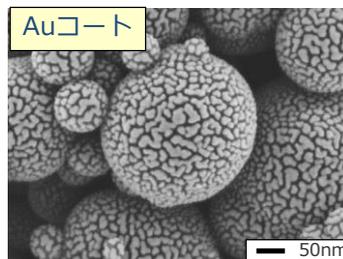
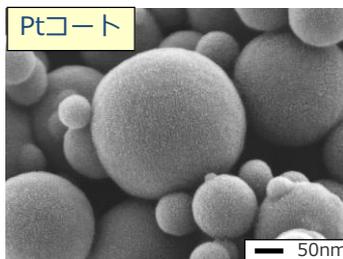
Solutions for Innovation JEOL

導電処理材の選択の注意点

観察倍率に合わせた
 導電材と厚みをセッ
 トすることが重要！



試料：カーボンブラック
 入射電圧：1.5kV



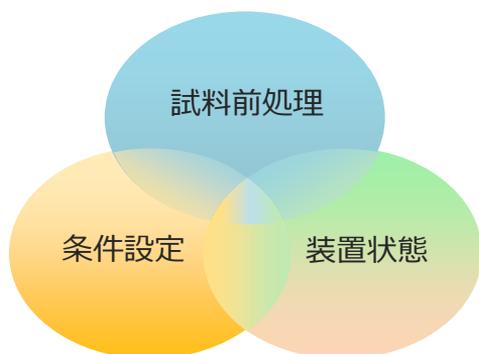
導電材による
 アーティファク
 ト有

60

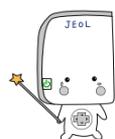
Solutions for Innovation JEOL

まとめ

SEM/EDSを使いこなすためのポイント



3つのファクターが揃うことが重要！



61

試料や観察目的、前処理方法によって測定方法は多種多様あるが、試料によってSEM条件が概ね決まっているものもあるため、条件を変えずにそのままデータ取得するというユーザーは多い。

SEM条件を振ってみる、変えてみることは、新しい知見が得られる可能性もあるため、是非トライしていただきたい。

本内容でユーザーのSEM操作スキル向上の一端が担えれば幸いである。

Solutions for Innovation JEOL

大学連携研究設備ネットワーク様 主催
令和4年度 SEM（走査形電子顕微鏡）中級講習会



SEMの原理と応用 ～データの質を上げる観察方法～

御清聴ありがとうございました



日本電子株式会社