

# 目 次

材料学シリーズ刊行にあたって  
「電子線ナノイメージング」によせて

はじめに.....j

## 第 I 部 ナノの世界と透過電子顕微鏡法

<b>第 1 章 ナノの世界を見る</b> .....	<b>2</b>
§ 1.1 ナノの世界とは	2
§ 1.2 ナノサイエンスの研究とイメージングの必要性	4
§ 1.3 イメージングの基本モード	6
§ 1.4 ナノイメージングになぜ電子線が必要か?	8
§ 1.5 ナノサイズの原子を見る 3つの方法	10
参考文献	12
演習問題	13
<b>第 2 章 透過電子顕微鏡の構造と結像</b> .....	<b>14</b>
§ 2.1 透過電子顕微鏡の構造	14
§ 2.2 電子レンズの構造	18
§ 2.3 透過電子顕微鏡の結像のしくみ	21
§ 2.3.1 3次元の波動の記述のしかた	21
§ 2.3.2 電子を使った顕微鏡でなぜ光学顕微鏡同様の結像ができるのか	24
§ 2.3.3 電子顕微鏡でなぜ像が拡大できて原子が見えるのか	27
§ 2.3.4 像と回折図形の関係	30
参考文献	33
演習問題	33

<b>第3章 透過電子顕微鏡の分解能と像コントラスト</b> .....	<b>34</b>	§ 6.1.2 対物レンズの不完全性効果の取り入れ方	74
§ 3.1 分解能の簡単な見積もり	34	§ 6.1.3 レンズの不完全性を使って像コントラストをつける	75
§ 3.2 分解能への他の収差の影響	38	§ 6.1.4 逆空間表示からの考察	77
§ 3.3 レーリーの分解能式の導出法	40	§ 6.1.5 開き角のある入射波や加速電圧の揺らぎの分解能への影響	78
§ 3.4 透過電子顕微鏡像のコントラスト	43	§ 6.1.6 弱い振幅物体に関するコントラスト伝達関数	80
§ 3.5 明視野像	43	§ 6.1.7 非弾性散乱波の高分解能 TEM 像への影響	82
§ 3.6 暗視野像	47	§ 6.2 高分解能像のシミュレーション	83
参考文献	48	§ 6.2.1 なぜ像シミュレーションが必要か	83
演習問題	48	§ 6.2.2 像シミュレーションの原理と方法	84
<b>第4章 高分解能 TEM 観察法とは何か</b> .....	<b>49</b>	§ 6.2.3 スーパーセル法とは何か	86
§ 4.1 なぜ1個の原子が見えるか一位相コントラスト法の魔術—	49	§ 6.3 透過電子顕微鏡の結像における干渉性	89
§ 4.2 原子集合体や微結晶のコントラスト	54	§ 6.3.1 透過電子顕微鏡の結像と入射波の干渉性	89
§ 4.3 微結晶の回折コントラスト	56	§ 6.3.2 干渉縞のコントラストと干渉性の定義	91
§ 4.4 非晶質膜の高分解能像	57	§ 6.3.3 時間干渉性と空間干渉性	92
§ 4.5 高分解能電子顕微鏡の結像の要点	57	参考文献	96
参考文献	60	演習問題	97
演習問題	60	<b>第7章 先進透過電子顕微鏡法</b> .....	<b>98</b>
<b>第5章 結晶格子像と結晶構造像</b> .....	<b>61</b>	§ 7.1 エネルギーフィルター透過電子顕微鏡法	98
§ 5.1 2波の干渉の復習	61	§ 7.1.1 電子エネルギー損失分光法の基礎	98
§ 5.2 2波干渉格子像	62	§ 7.1.2 実際のエネルギーフィルター透過電子顕微鏡	100
§ 5.3 3波干渉格子像とフーリエ像	65	§ 7.1.3 元素分布像とは何か	101
§ 5.4 構造像とは何か	68	§ 7.1.4 エネルギーフィルター像の分解能	
§ 5.5 結晶構造像の理論式	70	—原子レベルのエネルギーフィルター像は可能か—	102
参考文献	71	§ 7.2 電子線ホログラフィー	104
演習問題	71	§ 7.2.1 ホログラフィーとは何か	104
<b>第6章 高分解能電子顕微鏡像の結像理論と像シミュレーション</b> .....	<b>72</b>	§ 7.2.2 電子線ホログラフィーの装置	106
§ 6.1 透過電子顕微鏡の線形結像理論	72	§ 7.2.3 電子線ホログラフィーで何を見るか?	107
§ 6.1.1 試料による位相変調の記述	72	§ 7.3 電子線トモグラフィー法—ナノの世界が3次的に見える—	111
		§ 7.3.1 3次元観察の原理	111
		§ 7.3.2 電子顕微鏡法への適用	114

§ 7.3.3 実際の装置	115
§ 7.3.4 現在の電子線トモグラフィーの問題点	116
§ 7.4 収差補正 TEM—0.05 nm の分解能を目指して—	118
参考文献	123
演習問題	123

## 第II部 原子直視を可能とする走査透過電子顕微鏡法

<b>第8章 走査透過電子顕微鏡法とは何か</b>	<b>126</b>
§ 8.1 走査透過電子顕微鏡法の特徴	126
§ 8.2 ナノ電子プローブの生成の基礎	128
§ 8.3 結像原理と開発の歴史	131
§ 8.4 実際の走査透過電子顕微鏡	133
参考文献	135
演習問題	135
<b>第9章 走査透過電子顕微鏡の結像</b>	<b>136</b>
§ 9.1 走査透過電子顕微鏡像と透過電子顕微鏡像の相反定理	136
§ 9.2 走査透過電子顕微鏡の結像モード	138
参考文献	140
演習問題	140
<b>第10章 走査透過電子顕微鏡法の応用例</b>	<b>141</b>
§ 10.1 明視野像と暗視野像	141
§ 10.2 原子番号(Z)コントラスト像と元素像	142
§ 10.3 原子コラムの暗視野像	144
§ 10.4 明視野走査透過電子顕微鏡法のリバイバル	148
§ 10.5 超高電圧走査透過電子顕微鏡	149
§ 10.6 走査透過電子顕微鏡を使った3次元観察	150
§ 10.6.1 非晶質試料の像コントラスト	150

§ 10.6.2 結晶性試料の3次元走査透過電子顕微鏡像	151
§ 10.6.3 電子エネルギー損失信号およびX線放出信号を用いた3次元像	151
§ 10.6.4 トポグラフィーかトモグラフィーか	152
§ 10.7 ナノ電子回折図形	152
参考文献	155

<b>第11章 走査透過電子顕微鏡の結像理論</b>	<b>156</b>
§ 11.1 基本的な考え方	156
§ 11.2 プローブ形成の理論	157
§ 11.3 結晶中でのプローブの回折のマルチスライス法計算	158
§ 11.4 ベーテ法による計算	165
参考文献	169
<b>第12章 走査透過電子顕微鏡法の今後の発展</b>	<b>170</b>
参考文献	171
<b>第13章 まとめとして</b>	
—ナノ構造観察からナノ物性研究およびナノ加工研究へ—	172

## 補遺

補遺 A フーリエ変換入門—イメージングの数学的基礎—	176
補遺 B 凸レンズによる結像作用—凸レンズは位相変調器—	182
補遺 C 電子顕微鏡のレンズ伝達関数—位相コントラストを理解する鍵—	187
補遺 D 1個の原子による電子の散乱—電子顕微鏡で原子が見える基礎過程—	193
補遺 E 電子回折法と収束電子回折法—格子像形成の基礎—	197
補遺 F 非線形項も取り入れた結像理論入門—最前線理解のために—	204
補遺 G 画像処理法について—画像を見やすくするために—	205
補遺 H 高分解能像観察時の電子線照射損傷について	
—生物、有機物の観察のために—	211

補遺 I	ベータ法の動力的電子回折理論—結晶回折の基本的理論—	214
補遺 J	コラム近似法とハウイ-ウェラン法の動力的回折理論 —格子欠陥観察の理論—	218
補遺 K	ファンダイク法の動力的回折理論 —原子コラムイメージングの基礎—	222
補遺 L	電子顕微鏡結像についての相対論補正効果 —超高圧電子顕微鏡法の基礎理論—	225
補遺 M	電子顕微鏡を用いた元素分析—電子プローブを用いた分析—	228
補遺 N	カウリーによる TEM/STEM 結像の形式理論	230
おわりに		233
総索引		235
欧字先頭語索引		245