

目 次

基礎編 プローブ顕微鏡を使う前に	1
------------------	---

I. プローブ顕微鏡を使うために知っておきたいこと

第 1 章 回路を理解するための基礎

1.1 制御の基礎	3
1.1.1 線形な回路の解析 ラプラス変換	3
1.1.2 伝達関数	4
1.1.3 周波数応答関数	8
1.1.4 フィードバック回路	10
1.1.5 フィードバック回路の設計	12
1.2 エレクトロニクス	17
1.2.1 SPM 制御回路の概要	18
1.2.2 アナログ回路	19
A. オペアンプ	19
B. オペアンプを用いた回路	21
C. 雑音について	33
D. 電源について	38
1.2.3 アナログ-デジタル (A/D) 変換	39
A. 標本化	39
B. 量子化雑音	40
C. A/D 変換回路	40
文 献	41

第 2 章 信号を取り出すための基礎

2.1 信号測定の基礎	42
2.1.1 電位の測定	42
2.1.2 電流を測る	46
2.1.3 周波数の計測	47
A. カウンター方式	47

B. ヘテロダイン方式	48
2.1.4 光の検出	49
2.2 雑音の基礎	52
2.2.1 $1/f$ 雑音とショット雑音	52
2.2.2 ランダムテレグラフ雑音	54
2.2.3 雑音を防ぐには	55
2.3 微小信号・ロックイン計測	57
文 献	59

第 3 章 振動を扱うための基礎

3.1 振動の運動方程式	61
3.2 カンチレバーにおける共振曲線	64
文 献	65

基礎編 プローブ顕微鏡を使う前に 67

II. プローブ顕微鏡の基礎

第 1 章 プローブ顕微鏡の仕組み

1.1 プローブ顕微鏡の動作原理	69
1.2 探針（または試料）位置の制御	70
1.2.1 ピエゾ素子と微動機構	70
1.2.2 粗動機構	72
1.3 除振について	75
1.3.1 プローブ顕微鏡と除振	75
1.3.2 パッシブ除振とアクティブ除振について	77
文 献	79

第 2 章 プローブ顕微鏡のファミリー

2.1 各種プローブで得られる情報と分解能	80
2.1.1 STM	80
2.1.2 AFM	82
2.1.3 種々の力計測による SPM	84
A. ケルビンプローブフォース顕微鏡	84
B. 摩擦力顕微鏡	86
C. 磁気力顕微鏡	86

D. その他の磁気検出法	87
2.1.4 その他の SPM	88
2.2 同じプローブでも 測定方法による違い	88
2.2.1 STM: 高さ一定モードと電流一定モード	88
2.2.2 AFM: 接触モードと非接触モード	90
文 献	94

第 3 章 スペクトル測定 of 原理と留意点

3.1 トンネル分光	95
3.1.1 トンネル分光法	95
3.1.2 非弾性トンネル分光法	100
3.1.3 スピン計測	106
A. スピン偏極 STS	107
B. スピンフリップ IETS	109
C. ラーマー歳差検出	109
3.2 力の分光	112
3.2.1 原子間相互作用	112
A. 非接触法による力の測定	113
B. 共有結合力	116
C. ファン・デル・ワールス力	117
D. 静電気力	121
3.2.2 分子間相互作用 動的力分光測定まで	123
A. AFM 力学測定	124
B. 動力学的分光法	126
C. DFS による実際の測定例	128
D. DFS 測定を行ううえで留意すべきこと	130
文 献	131

第 4 章 周辺技術

4.1 真空の作り方と測り方	134
4.1.1 SPM と真空システム	134
4.1.2 必要な知識	135
A. 気体分子速度	135
B. 平均自由行程	136
C. 単位面積に入射する分子数	136
4.2 温度可変観察	137
4.2.1 加熱・冷却観察の基礎技術	137

4.2.2	高温観察	138
	A. STM による高温観察	139
	B. AFM による高温観察	141
4.2.3	冷却 SPM	141
4.3	薬品を扱うために	145
4.3.1	安全衛生管理	146
4.3.2	実験設備・器具	146
4.3.3	有機溶媒	147
4.3.4	酸・アルカリ	148
4.4	その他の技術	149
4.4.1	真空蒸着法	150
4.4.2	分子線エピタキシー	151
文 献		153

実践編	プローブ顕微鏡の使い方	155
------------	--------------------	-----

第 1 章 探針の作製と評価

1.1	はじめに	157
1.2	探針の種類	158
1.3	アーティファクト	159
1.4	探針先端の評価	161
1.5	カーボンナノチューブ探針	161
文 献		164

第 2 章 試料の作り方・扱い方

2.1	金属酸化物試料の扱い	165
2.1.1	結晶の入手	165
2.1.2	大気中での清浄化	165
2.1.3	真空中での清浄化	166
2.2	平坦な金属基板の作製	167
2.2.1	はじめに	167
2.2.2	球状単結晶の作製法	168
2.2.3	単結晶清浄表面の露出法	169
2.3	有機分子試料測定のために	170
2.3.1	はじめに	170
2.3.2	低分子の試料調製	170

A. 基板の選択	170
B. 分子導入法	172
C. 大気中、溶液中における低分子の自己組織的配列形成	173
2.3.3 生体分子，巨大単一分子の試料調製	175
2.4 自己組織化膜の作り方	178
2.4.1 はじめに	178
2.4.2 気相吸着と液相吸着，化学吸着と物理吸着	178
2.4.3 物理吸着系自己組織化膜	179
2.4.4 化学吸着系自己組織化単分子膜 (SAM)	183
2.4.5 有機シリコン誘導体とアルカンチオール の SAM	184
2.4.6 バイオインターフェースとしての SAM	186
2.5 バイオ試料の扱い	187
2.5.1 はじめに	187
2.5.2 マイカ基板	187
2.5.3 基板表面の処理	188
2.5.4 生体分子の固定	190
2.5.5 生細胞	190
2.5.6 バイオ試料測定	191
2.5.7 おわりに	192
文献	192

第3章 信号の取り方

3.1 測定に必要なパラメータ	195
3.1.1 はじめに	195
3.1.2 制御用信号	195
3.1.3 バイアス電圧	196
3.2 測定条件と参照信号値の選択	196
3.2.1 走査速度とフィードバックの設定	196
A. フィードバックの参照信号値	196
B. フィードバックの種類	197
C. フィードバックのゲインとカットオフ周波数	197
D. 走査速度	198
3.2.2 タッピングモードの使い方	201
3.2.3 非接触モードの使い方	204
A. カンチレバーの自励発振の実現	204
B. 周波数復調	206
C. 探針-試料相互作用の検出・走査	206
3.3 変調測定：変調の種類と得られるデータ	208
3.3.1 はじめに	208

3.3.2	電圧変調による STS 測定	208
3.3.3	プローブ位置の変調	212
	A. LBH 測定	212
	B. アトムトラッキング法	215
3.4	外部同期を使うとできること	216
文 献	. . . . .	217

第 4 章 データ解析の方法

4.1	はじめに	219
4.2	SPM データの歪み	219
	4.2.1 熱ドリフト	220
	4.2.2 傾き補正	223
	4.2.3 ピエゾ素子の特性	225
	4.2.4 測定系の時定数	230
	4.2.5 形状信号が AC 接続されていることによる歪み	234
	4.2.6 探針形状による影響	235
4.3	雑音の低減	237
	4.3.1 ローパスフィルタ	237
	4.3.2 中央値フィルタ	241
4.4	明るさ軸の調整	242
	4.4.1 グレースケール	243
	4.4.2 カラースケール	244
	4.4.3 ヒストグラムの平坦化	245
	4.4.4 周期的なカラースケール	247
	4.4.5 フィルタの利用	247
	4.4.6 測定中の画像表示	250
4.5	物理量を引き出すために	251
	4.5.1 面積測定	251
	4.5.2 ラフネス測定	253
	4.5.3 周期の抽出 (フーリエ変換)	255
	4.5.4 周期の抽出 (自己相関関数)	257
4.6	その他の解析手法	259
	4.6.1 ラインプロファイル	259
	4.6.2 画像の重ね合わせ	260
	4.6.3 データ解析専用ソフトウェアを用いた高度な解析	260
文 献	. . . . .	264

第 5 章 SPM の理論シミュレーション法とその応用

5.1	はじめに	265
5.2	STM シミュレーション法の原理	266
5.3	非接触 AFM シミュレーション法の原理	267
5.3.1	単振動系の標準理論	267
5.4	液中 AFM 法の原理	268
5.4.1	液中におけるカンチレバー振動	268
5.4.2	水を媒介する探針と試料の間の力	269
5.5	タンパク質 AFM シミュレーション	270
5.6	探針の設計と解析	271
5.7	おわりに	272
文 献		273

発展編	よりレベルの高い使い方をするための先端技術	275
-----	-----------------------	-----

第 1 章 溶液中の計測

1.1	電気化学 STM	277
1.1.1	はじめに	277
1.1.2	電気化学 STM の原理	277
1.2	溶液環境における AFM 測定	279
1.2.1	はじめに	279
1.2.2	溶液中でのダイナミックモード AFM 動作の問題点	280
A.	カンチレバー振動の Q 値の低下	280
B.	電気二重層力	280
1.2.3	液中動作 FM-AFM における信号雑音比の改善	281
A.	FM-AFM における周波数雑音	281
B.	小振幅モード	282
1.2.4	FM-AFM による液中高分解能観察と水和構造計測	283
1.2.5	おわりに	286
文 献		287

第 2 章 生体材料計測

2.1	生体材料のプロープ顕微鏡計測でわかること	288
2.1.1	はじめに	288
2.1.2	イメージングツールとしての AFM	288

2.1.3	AFM のイメージング以外の利用法	290
2.1.4	AFM 以外の SPM の利用法	290
2.1.5	おわりに	292
2.2	AFM ・ 高速測定	292
2.2.1	はじめに	292
2.2.2	フィードバック帯域	292
2.2.3	高速化の技術	294
	A. カンチレバー関連	294
	B. スキャナー	295
	C. アクティブダンピング	296
	D. ダイナミック PID 制御	298
	E. 励振効率のドリフト補償	299
	F. 高速位相コントラストイメージング	299
2.2.4	おわりに	300
文 献	. . . . .	301

第 3 章 高分子の弾性計測

3.1	はじめに	303
3.2	ヘルツ接触	304
3.3	JKR 接触	306
3.4	おわりに	308
文 献	. . . . .	309

第 4 章 デバイス特性評価への応用

4.1	はじめに	310
4.2	不純物分布の観察	310
4.3	半導体試料内の電位分布の観察	314
4.4	電流フローの観測	317
4.5	おわりに	318
文 献	. . . . .	319

第 5 章 化学反応を観る

5.1	はじめに	320
5.2	STM を用いた実験方法	320

5.3	おわりに	323
	文 献	324

第 6 章 相転移を観る

6.1	はじめに	326
6.2	低温測定	326
	6.2.1 低温 STM 装置	326
	6.2.2 高温超伝導体の電子相分離	328
	6.2.3 磁束量子の可視化	330
6.3	おわりに	331
	文 献	332

第 7 章 スピンを測る

7.1	はじめに	333
7.2	SP-STM でスピンを見るための実験技術	333
7.3	交換相互作用力顕微鏡	336
7.4	おわりに	339
	文 献	339

第 8 章 微細加工と SPM

8.1	はじめに	340
8.2	SPM による加工法	340
	8.2.1 機械的加工法 (除去加工)	340
	8.2.2 電圧印加法 (付着加工・除去加工)	341
	8.2.3 陽極酸化法 (改変・除去加工)	341
	8.2.4 電界・電流による自己組織化単分子膜 (SAM) へのリソグラフィ フィー (改変・除去加工・付着加工)	341
	8.2.5 SPM による原子レベルのマニピュレーション (除去加工・付 着加工)	341
	8.2.6 SPM による面や穴の加工 (除去加工)	342
	8.2.7 SPM への振動印加方法	342
8.3	SPM 用カンチレバーに関連した加工法	343
	8.3.1 両持ち梁の加工	343
	8.3.2 微小ディスク型振動子, 微小キャピティ, 微小平行バネの実現	344
	8.3.3 ナノピンセット, 刃付き AFM カンチレバー	346

8.3.4	グラフェン振動子	346
8.3.5	高周波カンチレバー	346
8.3.6	純金属カンチレバー	346
8.3.7	カンチレバーの修飾	347
8.4	おわりに	347
文 献	. . . . .	348

第 9 章 ステップインモード計測

9.1	はじめに	350
9.2	AFM 計測の課題	350
9.3	動作原理	352
9.4	測定例	354
9.5	おわりに	356
文 献	. . . . .	356

第 10 章 非接触 AFM の展開

10.1	はじめに	357
10.2	探針-試料間の相互作用の解析の試み	358
10.3	印加電圧に依存する相互作用力の考察	361
10.4	おわりに	361
文 献	. . . . .	362

第 11 章 光技術との融合

11.1	NSOM の展開	364
11.1.1	はじめに	364
11.1.2	NSOM のプローブ形態	364
11.1.3	NSOM の測定モード	365
11.1.4	NSOM の基本性能	366
11.1.5	NSOM と分光手法との組合せ	367
11.1.6	特殊環境にて動作する NSOM	368
11.2	STM 発光分光	370
11.2.1	はじめに	370
11.2.2	STM 発光の励起機構	371
11.2.3	STM 発光計測系	375

11.2.4	STM 発光計測から決定される物性	376
	A. 発光強度	376
	B. 発光スペクトル	376
	C. 偏光特性	377
11.2.5	おわりに	378
11.3	光 STM	378
11.3.1	はじめに	378
11.3.2	光変調トンネル分光法とその応用	379
	A. 探針誘起バンド湾曲と表面光起電力	379
	B. 光変調トンネル分光法による表面起電力の計測	380
	C. 局所ポテンシャルとキャリアの可視化	381
11.3.3	時間分解 STM	382
	A. SPPX-STM の原理と測定法	383
	B. 応用例	385
11.3.4	おわりに	385
文 献		386

第 12 章 走査型アトムプローブ

12.1	はじめに	389
12.2	原理と構造	390
12.3	分析例	392
12.4	他の分析器との比較	393
12.5	おわりに	394
文 献		395

第 13 章 マルチプローブ計測

13.1	はじめに	396
13.2	4 探針 STM 装置の概要	398
13.3	4 探針 STM での技術的課題	403
13.4	温度可変 4 探針 STM 装置	408
13.5	おわりに	410
文 献		410

第 14 章 原子・分子操作

14.1	はじめに	412
14.2	固体電解質探針と原子スイッチ	412
14.3	STM 誘起連鎖重合反応	415
14.4	おわりに	416
文 献	. . . . .	416
索 引		419