

目 次

第1章 歴史と現状	1
1.1 医療用 X 線トモグラフィーの歴史	1
1.1.1 黎明期	1
1.1.2 1970 年代以降の状況	2
1.2 医療用以外の X 線トモグラフィーの歴史と現状	3
1.2.1 シンクロトロン放射光を用いた X 線マイクロトモグラフィー	6
1.2.2 産業用 X 線 CT スキャナーを用いた X 線トモグラフィー	7
1.2.3 要素技術の発展	10
第2章 X 線イメージングの基礎	15
2.1 吸収コントラスト	16
2.1.1 吸収係数とコントラスト	16
2.1.2 様々な X 線の吸収過程	20
2.2 位相コントラスト	30
2.2.1 X 線の屈折	30
2.2.2 X 線の位相シフト	33
第3章 3D 画像再構成	43
3.1 投影データ	43
3.1.1 基本的な計測方式	43
3.1.2 投影データ	46
3.2 画像再構成の基礎	48
3.2.1 ラドン変換とラドン空間	48
3.2.2 投影定理	50
3.3 画像再構成法	53
3.3.1 代数的再構成法	53
3.3.2 フィルター補正逆投影法	59
3.3.3 畳み込み逆投影法	73
3.3.4 コーンビーム再構成法	76

iv 目 次

3.3.5	特殊な画像再構成	84
3.4	画像再構成の実際	90
第4章	ハードウェア	97
4.1	X線源	97
4.1.1	X線の発生	97
4.1.2	X線管球	103
4.1.3	小型電子加速器	120
4.1.4	放射性同位体	122
4.1.5	シンクロトロン放射光	124
4.2	フィルター	149
4.3	位置決めステージ	150
4.3.1	試料回転ステージ	152
4.3.2	その他の位置決めステージ	154
4.4	検出器	156
4.4.1	検出器の特性評価	157
4.4.2	各種検出器	163
4.4.3	シンチレータ	194
4.4.4	カメラとシンチレータとのカップリング	207
4.4.5	フォトンカウンティング計測	212
4.5	その場観察用デバイス	217
4.5.1	変形・破壊挙動の in-situ 観察	217
4.5.2	生体の in-vivo 観察	219
第5章	応用イメージング技法	225
5.1	結像型 X線トモグラフィー	225
5.1.1	フレネルゾーンプレートを用いた結像光学系	227
5.1.2	ミラーを用いた結像光学系	236
5.1.3	複合屈折レンズ	240
5.1.4	多層膜ラウエレンズ	243
5.2	位相コントラストトモグラフィー	244
5.2.1	X線の伝播に基づく方法	244
5.2.2	ツェルニケ位相差顕微鏡	248
5.2.3	干渉計を利用した方法	251
5.2.4	X線ホログラフィー	255
5.3	高速トモグラフィー	257
5.3.1	シンクロトロン放射光施設	258

5.3.2	産業用 X 線 CT スキャナー	260
5.3.3	X 線源以外の技術要素	260
5.4	元素濃度のトモグラフィー	261
5.4.1	吸収端差分イメージング	261
5.4.2	XANES トモグラフィー	264
5.4.3	蛍光 X 線トモグラフィー	265
5.5	多結晶トモグラフィー	266
5.5.1	液体金属修飾法	267
5.5.2	回折コントラストトモグラフィー	268
5.5.3	3D - XRD	270
5.5.4	X 線回折援用結晶粒界追跡 (DAGT)	271
5.6	その他のトモグラフィー	274
第 6 章	X 線 CT スキャナーと応用例	281
6.1	汎用産業用 X 線 CT スキャナー	282
6.2	高エネルギー産業用 X 線 CT スキャナー	292
6.3	高分解能産業用 X 線 CT スキャナー	295
6.4	高機能産業用 X 線 CT スキャナー	296
6.5	インライン検査用装置	298
6.6	シンクロトロン放射光を用いた X 線トモグラフィー	303
6.6.1	投影型 X 線トモグラフィー	303
6.6.2	結像型 X 線トモグラフィー	305
6.6.3	位相コントラストトモグラフィー	307
6.6.4	高速トモグラフィー	309
6.6.5	元素濃度のトモグラフィー	310
6.6.6	多結晶組織のトモグラフィー	311
6.7	装置・条件の選定	314
6.7.1	装置選定	314
6.7.2	3D イメージングの実際	317
6.7.3	試料サイズと X 線エネルギーの選定	317
第 7 章	3D 画像の基礎	321
7.1	3D 画像の構造	322
7.2	3D 画像の吟味	327
7.3	ノイズ	328
7.3.1	標準偏差	328
7.3.2	ノイズパワースペクトル	330

vi 目 次

7.4	コントラスト	334
7.4.1	基本的考え方	334
7.4.2	定量評価	335
7.5	空間分解能	336
7.5.1	基礎的事項	336
7.5.2	空間分解能の評価	344
7.5.3	空間分解能の計測	348
7.6	アーティファクト	355
7.6.1	X線と物体の相互作用によるアーティファクト	355
7.6.2	装置に起因するアーティファクト	359
7.6.3	撮像条件に起因するアーティファクト	363
7.6.4	再構成に起因するアーティファクト	365
第8章	3D画像処理と3D画像解析	369
8.1	フィルタリング	369
8.1.1	平滑化フィルター	370
8.1.2	エッジ検出・強調フィルター	374
8.1.3	周波数フィルター	377
8.2	セグメンテーション	379
8.2.1	閾値を用いた単純なセグメンテーション	380
8.2.2	エッジ検出フィルターの利用	383
8.2.3	領域成長法	384
8.2.4	ウォータージェット法	385
8.2.5	機械学習を利用したセグメンテーション	387
8.3	各種画像処理	388
8.3.1	膨張・縮退処理	388
8.3.2	膨張・縮退処理画像の差分	390
8.3.3	細線化処理	390
8.3.4	空間分割	391
8.4	3D描画	392
8.4.1	仮想断面表示	392
8.4.2	サーフェスレンダリング	393
8.4.3	ボリュームレンダリング	394
8.5	幾何学的定量解析	397
8.6	3Dイメージベースシミュレーション	401
8.7	3D表現	405
8.8	効果的なプレゼンテーション	406

第9章 4D画像解析	409
9.1 位置合わせ	410
9.1.1 アフィン変換	410
9.1.2 各種位置合わせ手法	411
9.2 粒子追跡	413
9.2.1 2フレーム間の粒子追跡	415
9.2.2 階層的追跡法	422
9.2.3 3D歪みマッピング	424
9.2.4 局所破壊抵抗マッピング	427
9.3 リバース4D材料エンジニアリング	429
第10章 寸法・形状計測	435
10.1 装置技術	436
10.2 計測精度	438
10.2.1 標準化	438
10.2.2 計測精度の不確かさ	439
10.3 リバースエンジニアリング	441
索 引	445