



# 目 次

## 1. CNT の 作 製

1.1 熱 分 解 法.....	1	1.3.1 レーザー蒸発法とナノカーボン類の生成.....	49
1.1.1 热 CVD.....	1	1.3.2 加熱炉レーザー蒸発法装置.....	50
1.1.2 プラズマ CVD.....	28	1.3.3 レーザー蒸発法における初期過程.....	50
1.2 アーク放電法.....	40	1.3.4 チューブの成長と直径制御.....	51
1.2.1 不活性ガスおよび水素ガス中アーク.....	40	1.4 その他の作製法.....	52
1.2.2 大気中アーク.....	43	1.4.1 SiC の表面分解.....	52
1.2.3 高温パルスアーク.....	46	1.4.2 プラズマフレーム加熱.....	55
1.3 レーザー蒸発法.....	49		

## 2. CNT の 精 製

2.1 SWCNT.....	58	2.1.2 金属と半導体 SWCNT の分離.....	60
2.1.1 触媒金属の除去と SWCNT の精製.....	58	2.2 MWCNT.....	67

## 3. CNT の構造と成長機構

3.1 SWCNT.....	70	3.3.4 バンブー型 CNT とカップ積層型 CNT.....	82
3.1.1 SWCNT の構造.....	70	3.4 CNT 成長の TEM その場観察.....	87
3.1.2 SWCNT の成長モデル.....	71	3.4.1 はじめに.....	87
3.2 MWCNT.....	72	3.4.2 ETEM 観察.....	87
3.2.1 MWCNT の構造.....	73	3.4.3 CNT 成長初期過程の ETEM その場観察.....	87
3.2.2 DWCNT.....	73	3.4.4 CNT 成長中のナノ粒子触媒の構造.....	88
3.2.3 MWCNT の成長モデル.....	73	3.4.5 CNT 成長方向の変化.....	89
3.3 特殊な CNT と関連物質.....	75	3.4.6 まとめ.....	89
3.3.1 ナノホーン.....	75	3.5 ナノカーボンの原子分解能 TEM 観察.....	90
3.3.2 カーボンマイクロコイルの特性と応用.....	77	3.5.1 DWCNT の光学異性体の決定.....	90
3.3.3 カーボンナノコイル.....	80	3.5.2 グラフェンの端の観察.....	91

## 4. CNT の電子構造と輸送特性

4.1 グラフェン, CNT の電子構造.....	94	4.2.3 特殊時間反転対称性とその破れ.....	101
4.1.1 ハチの巣格子とカイラルベクトル.....	94	4.2.4 曲率と格子ひずみの効果.....	102
4.1.2 電子状態.....	95	4.2.5 格子振動と電子格子相互作用.....	103
4.1.3 ニュートリノ描像.....	97	4.2.6 トポロジカル欠陥.....	105
4.2 グラフェン, CNT の電気伝導特性.....	99	4.2.7 MWCNT.....	107
4.2.1 後方散乱の消失と理想コンダクタンス.....	99	4.2.8 まとめ.....	109
4.2.2 完全伝導チャネル.....	100		

## 5. CNT の電気的性質

5.1 SWCNT の電子準位.....	111
5.2 CNT の電気伝導.....	114
5.2.1 はじめに.....	114
5.2.2 弱結合領域の伝導.....	114
5.2.3 強結合、中間結合領域における電気伝導.....	118
5.2.4 半導体 CNT の単電子伝導.....	119
5.2.5 まとめ.....	120
5.3 磁場応答.....	121
5.4 ナノ炭素の磁気状態.....	123

## 6. CNT の機械的性質および熱的性質

6.1 CNT の機械的性質.....	128
6.1.1 はじめに.....	128
6.1.2 CNT の振動による解析.....	128
6.1.3 静的な横方向からのたわみによる解析.....	129
6.1.4 オイラーの座屈荷重による解析.....	131
6.1.5 引張破断強度.....	132
6.1.6 まとめ.....	132
6.2 CNT 摩擦の作製と特性.....	132
6.2.1 はじめに.....	132
6.2.2 CNT の機械的性質.....	132
6.2.3 ブラシ状 CNT からの摩擦.....	133
6.2.4 合成反応領域からの直接摩擦.....	135
6.2.5 CNT 摩擦の特性.....	135
6.2.6 まとめ.....	136
6.3 CNT の熱的性質.....	137
6.3.1 热容量.....	137
6.3.2 热伝導.....	138
6.3.3 热膨胀.....	141

## 7. CNT の物質設計と第一原理計算

7.1 CNT, ナノカーボンの構造安定性と物質設計.....	144
7.1.1 はじめに.....	144
7.1.2 第一原理電子構造計算手法によるエネルギー論.....	145
7.1.3 CNT における詳細構造.....	145
7.1.4 CNT とグラフェンを用いた物質設計.....	146
7.1.5 今後の展望.....	147
7.2 強度設計.....	147
7.2.1 はじめに.....	147
7.2.2 強度を知るための計算手法.....	148
7.2.3 グラフェンの劈開による端形成.....	148
7.2.4 グラフェン端の反応性と融合による新奇構造形成.....	149
7.2.5 CNT バンドルの融合.....	150
7.2.6 グラフィティックネットワークに形成される欠陥構造.....	152
7.3 時間発展計算.....	153
7.3.1 はじめに.....	153
7.3.2 計算手法.....	153
7.3.3 計算結果.....	154
7.3.4 CNT の光応答.....	155
7.3.5 まとめ.....	156
7.4 CNT 大規模複合構造体の理論.....	157
7.4.1 はじめに.....	157
7.4.2 ピーポッドのエネルギー論.....	157
7.4.3 ピーポッドの電子構造.....	158
7.4.4 CNT への分子挿入.....	159
7.4.5 ダイヤモンドナノワイヤー.....	160
7.4.6 まとめ.....	162

## 8. CNT の光学的性質

8.1 CNT の光学遷移.....	163
8.1.1 エネルギーバンド.....	163
8.1.2 バンド間許容遷移.....	164
8.1.3 励起子.....	165
8.1.4 励起子発光の磁場による増強効果.....	165
8.1.5 垂直な偏光の準暗励起子状態.....	166
8.2 CNT の光吸収と発光.....	167
8.2.1 CNT の発光の観測.....	167

8.2.2 CNT の光吸収の観測.....	167	8.4.3 G+とG-モードの分離.....	172
8.2.3 光吸収・発光の選択則.....	167	8.4.4 金属CNTのフォノンソフト化.....	172
8.2.4 カッティングラインの概念.....	167	8.4.5 CNTの二重共鳴ラマンモード.....	172
8.2.5 CNTの励起子.....	168	<b>8.5 ラマン散乱スペクトル.....</b>	172
8.2.6 CNTの励起子の分類と相互作用.....	168	8.5.1 ラマン散乱.....	172
8.2.7 エレクトロルミネセンス.....	169	8.5.2 SWCNTのラマン散乱スペクトル.....	173
<b>8.3 グラファイトの格子振動.....</b>	169	8.5.3 共鳴ラマン散乱効果と片浦プロット.....	174
8.3.1 結晶中の格子振動の構造.....	169	8.5.4 ラマンスペクトルの環境依存性.....	175
8.3.2 グラフェンの振動モード.....	169	<b>8.6 非線形光学効果.....</b>	176
8.3.3 グラフェンのフォノン分散関係.....	170	8.6.1 非線形分極と光学定数.....	176
8.3.4 グラファイトのフォノンの観測と計算.....	170	8.6.2 SWCNTバンドルの非線形光学応答.....	177
<b>8.4 CNTの格子振動.....</b>	171	8.6.3 孤立SWCNTの非線形光学効果.....	177
8.4.1 ツイストモード.....	171	8.6.4 SWCNTの光通信技術への応用.....	179
8.4.2 ラジアルブリージングモード.....	171		

## 9. CNTの可溶化、機能化

<b>9.1 物理的可溶化および化学的可溶化.....</b>	181	9.2.1 バイオアプリケーション.....	185
9.1.1 物理修飾による可溶化.....	181	9.2.2 エネルギーデバイス.....	186
9.1.2 化学的可溶化.....	183	9.2.3 光熱変換デバイス.....	187
<b>9.2 機能化.....</b>	185		

## 10. 内包型CNT

<b>10.1 ピーポッド.....</b>	191	10.4.1 はじめに.....	202
10.1.1 内包CNT.....	191	10.4.2 合成法と内包の確認.....	202
10.1.2 ピーポッドの高収率合成法.....	191	10.4.3 有機分子内包によるSWCNT物性の変化.....	203
10.1.3 ピーポッド生成のメカニズム.....	192	10.4.4 SWCNTをテンプレートとした 1次元ナノ構造創製.....	203
10.1.4 フラーレンピーポッドの構造.....	192	<b>10.5 微小径ナノワイヤー内包CNT.....</b>	203
10.1.5 ピーポッドの電子物性.....	193	10.5.1 はじめに.....	203
10.1.6 ピーポッドの電子デバイス応用.....	194	10.5.2 ナノテンプレート反応を利用した ナノワイヤーの合成法.....	204
10.1.7 ピーポッド内の新しい化学反応.....	195	10.5.3 直接ナノフィーリング法.....	206
10.1.8 ピーポッドとナノの反応場.....	195	<b>10.6 金属ナノワイヤー内包CNT.....</b>	208
<b>10.2 水内包SWCNT.....</b>	196		
<b>10.3 酸素など気体分子内包SWCNT.....</b>	199		
<b>10.4 有機分子内包SWCNT.....</b>	202		

## 11. CNTの応用

<b>11.1 複合材料.....</b>	212	11.2.3 光源への応用.....	225
11.1.1 セラミックスとナノカーボンの複合体.....	212	11.2.4 電界放出ディスプレイへの応用.....	226
11.1.2 樹脂との複合材料.....	216	11.2.5 電子顕微鏡用電子源.....	227
<b>11.2 電界放出電子源.....</b>	221	11.2.6 小型X線源用電子源.....	227
11.2.1 CNTエミッターの種類と作製.....	221	11.2.7 その他の電子源.....	228
11.2.2 CNTエミッターの評価.....	223	<b>11.3 電池電極材料.....</b>	229

11.3.1 リチウムイオン二次電池	229	11.6.2 CNT 探針	267
11.3.2 燃料電池	232	11.6.3 CNT ピンセット	267
11.3.3 電気二重層キャパシター	235	11.6.4 質量計測用 CNT 振動子	268
<b>11.4 エレクトロニクス</b>	<b>240</b>	11.6.5 ラジオ受信機	269
11.4.1 CNT 電界効果トランジスター	240	11.6.6 CNT モーター	270
11.4.2 配線応用	245	11.6.7 まとめ	271
11.4.3 透明電極	248	<b>11.7 ガスの吸着と貯蔵</b>	<b>272</b>
11.4.4 バイオセンサー	250	11.7.1 CNT の細孔構造	272
11.4.5 ガスセンサー	253	11.7.2 CNT への水素吸着	274
11.4.6 スピンデバイス	256	11.7.3 CNT のバンドル構造制御	275
<b>11.5 フォトニクス</b>	<b>261</b>	<b>11.8 触媒の担持</b>	<b>276</b>
11.5.1 はじめに	261	<b>11.9 ドラッグデリバリーシステム</b>	<b>279</b>
11.5.2 CNT の光学特性と光デバイス化	261	<b>11.10 医療応用</b>	<b>282</b>
11.5.3 CNT を用いたモード同期 光ファイバーレーザー	263	11.10.1 はじめに	282
11.5.4 CNT を用いた光非線形機能デバイス	265	11.10.2 がん治療への応用	282
11.5.5 今後の展望	266	11.10.3 再生医療への応用	283
<b>11.6 MEMS, NEMS</b>	<b>267</b>	11.10.4 生体材料	283
11.6.1 はじめに	267	11.10.5 CNT の骨組織への影響	284
		11.10.6 まとめ	288

## 12. グラフェンと薄層グラファイト

<b>12.1 グラフェンの作製</b>	<b>290</b>	12.2.3 スピン輸送	317
12.1.1 剥離グラフェンの作り方と判定方法	290	12.2.4 グラフェンの物理	321
12.1.2 固体上のグラフェン成長技術	297	<b>12.3 グラフェンの化学</b>	<b>326</b>
12.1.3 大面積グラファイト膜の作製と応用	304	12.3.1 はじめに	326
12.1.4 大面積グラフェンの低温成長	308	12.3.2 化学修飾の目的	327
<b>12.2 グラフェンの物理</b>	<b>311</b>	12.3.3 グラフェンの反応性	327
12.2.1 グラフェンの電子構造	311	12.3.4 グラフェンの化学修飾プロセス	329
12.2.2 電子輸送	315	12.3.5 応用と展望	330

## 13. CNT の生体影響とリスク

<b>13.1 CNT の安全性</b>	<b>332</b>	13.1.6 まとめ	339
13.1.1 はじめに	332	<b>13.2 ナノカーボンの安全性</b>	<b>341</b>
13.1.2 アメリカ合衆国における CNT 安全性評価	332	13.2.1 はじめに	341
13.1.3 欧州および日本における CNT 安全性評価	334	13.2.2 CNT の安全性評価	342
13.1.4 CNT 安全性評価法	335	13.2.3 フラーレンの安全性評価	345
13.1.5 CNT の安全性評価	337		

<b>索引</b>	<b>350</b>
-----------	------------

