

# 目次

## [ I 理論 ]

### 第1章 グラフェンの特異な物理 青木秀夫

1	はじめに.....	3	5	グラフェンの特異なランダウ準位と量子ホール効果.....	16
2	グラフェンの試料.....	5	5.1	グラフェンのランダウ準位.....	17
3	グラフェンの構造とバンド構造— massless Dirac 粒子.....	6	5.2	グラフェンの量子ホール効果.....	19
4	グラフェンのさまざまな異常物性.....	10	5.3	グラフェンの量子ホール効果のトポロジカルな見方.....	21
4.1	電気抵抗—Zitterbewegung.....	10	6	グラフェンの端状態—平坦バンド.....	24
4.2	量子ホール効果.....	11	7	いくつかの話題.....	25
4.2.1	クラインのパラドックス.....	12	7.1	多層グラフェン.....	25
4.2.2	光学物性.....	13	7.2	Dirac cone.....	27
4.2.3	スピン・ホール効果.....	15	7.3	$N=0$ ランダウ準位の分裂—多体効果の可能性.....	27
4.2.4	負の屈折率.....	15	8	おわりに.....	30
4.2.5	多体ギャップを持った状態.....	16			
4.2.6	超伝導.....	16			

### 第2章 グラフェンのエッジ状態の起源 初貝安弘

1	エッジ状態とは.....	33	3.1	ジグザグ境界とアームチェア—境界.....	39
1.1	エネルギーバンドと束縛状態.....	34	3.2	ベリー位相とカイラル対称性, ゼロモードエッジ状態.....	40
1.2	エッジ状態とバルク・エッジ対応.....	34	3.3	磁場下のグラフェンの2種類のエッジ状態.....	42
2	グラフェンとディラック電子.....	36	3.4	カイラル対称性の破れと境界磁化.....	43
2.1	ゼロギャップ半導体.....	36			
2.2	グラフェンとベリー位相.....	37			
3	グラフェンのエッジ状態バルク・エッジ対応.....	39			

### 第3章 ドープしたグラフェンの電子状態・触媒活性

池田隆司, S. F. Huang, M. Boero, 寺倉清之

1 はじめに.....46	3.2.1 ベーサル面の場合 .....52
2 グラフェンの電子状態.....48	3.2.2 アームチエアエッジの場合 .....52
2.1 ジグザグエッジ状態 .....48	3.2.3 ジグザグエッジの場合 .....53
2.2 窒素置換の効果 .....49	3.3 酸素分子還元過程 .....55
3 カーボンアロイの触媒活性.....50	3.3.1 エンドオン構造の場合 .....56
3.1 第一原理分子動力学に基づいた化学反応のシミュレーション法 .....51	3.3.2 サイドオン構造の場合 .....56
3.2 酸素分子吸着過程 .....52	3.4 触媒サイクル .....57
	4 おわりに.....58

### 第4章 酸化グラフェンとコンポジット材料の電子状態

中村 淳

1 はじめに.....60	3 グラフェンの unzipping .....63
2 酸化プロセスによるグラフェンの精製と酸化グラフェン .....61	4 ナノスケール折紙 (ORIGAMI) .....65
	5 グラフェン誘導体の物性制御.....70

## 〔Ⅱ グラフェンの物性, 評価〕

### 第5章 グラフェンの作製, 膜厚の評価, 観察

宮崎久生, 日浦英文, 塚越一仁

1 グラフェンの作製方法と評価法の背景...79	3 さらに新たなグラフェン観察法.....85
2 簡単簡易グラフェン判定法.....83	4 おわりに.....88

### 第6章 グラフェンの超伝導近接効果

神田晶申

1 はじめに.....90	3.1 素子構造 .....93
2 単層グラフェンにおける相対論的ジョセフソン効果: 理論的側面 .....91	3.2 ゼロバイアス抵抗の温度依存 .....93
3 グラフェンでできたジョセフソン接合の伝導特性の実験 .....93	3.3 電流電圧特性 .....94
	3.4 超伝導臨界電流の温度依存性 .....96
	4 おわりに.....99

### 第7章 グラフェンの光電子分光

菅原克明, 佐藤宇史, 高橋 隆

1 はじめに .....102	4 グラフェンの角度分解光電子分光 .....104
2 光電子分光 .....102	5 エッジ局在状態 .....107
3 グラフェンの電子構造 .....103	6 今後の展望 .....109

### 第8章 STM/STS によるグラフェン端の電子状態解析

福井賢一, 小林陽介, 榎 敏明

1 背景 .....111	4 水素終端したグラフェン端に生じるエッジ状態 .....116
2 STM/STS の測定原理.....114	5 今後期待される研究展開 .....120
3 解析に適した試料の調製 .....115	

### 第9章 単層グラフェンの輸送現象

八木隆多

1 ゼロ磁場の伝導 .....123	ス振動.....127
1.1 伝導度のゲート電圧依存性.....123	2.2 量子ホール効果.....128
1.2 電子ホールバドル.....124	2.3 最小伝導度点付近における磁気抵抗.....129
1.3 移動度の向上の試み.....126	3 電子コヒーレンス効果 .....130
1.4 ガスセンサーとしての応用.....126	3.1 AB 効果 .....130
2 磁場中伝導 .....127	3.2 弱局在.....131
2.1 グラフェンのシュブニコフドハー	

### 第10章 ニッケル単結晶基板上グラフェンのスピン偏極

山内 泰, 圓谷志郎

1 はじめに .....133	(SPMDS) .....136
2 単層グラフェンの成膜 .....134	4 グラフェンの電子状態とスピン偏極 .....138
3 スピン偏極準安定脱励起分光法	5 おわりに .....141

〔Ⅲ 新しい作製法〕

第 11 章 SiC 上のグラフェン成長と電気特性 永瀬雅夫

1 はじめに ……………147	3.3 各種の顕微鏡法による SiC 上グラ フェン像……………151
2 SiC 上グラフェンの特徴 ……………147	4 局所導電率計測 ……………152
3 層数同定技術 ……………149	4.1 集積化ナノプローブ……………152
3.1 各種の SiC 上グラフェンの膜厚計 測方法……………149	4.2 ナノグラフェンの導電率像……………153
3.2 低エネルギー電子顕微鏡による層 数同定技術……………149	4.3 2層グラフェンの局所導電率……………155
	5 集積デバイス実現にむけて ……………156

第 12 章 シリコン基板上のグラフェン薄膜成長 末光眞希

1 グラフェンデバイスの展望と課題 ……159	3.3 Si 基板上 SiC 薄膜成長条件の最適化 ……………163
2 グラフェン形成とグラフェン・オン・ シリコン (GOS) 技術 ……………160	4 Si 基板上 SiC 薄膜の上のグラフェン 形成とそのラマン評価 ……………164
3 有機シランガスソース MBE 法による Si 基板上 SiC ヘテロエピ成長 ……………161	4.1 グラフェンのラマン散乱分光によ る評価……………164
3.1 低温化バッファ層形成技術……………161	4.2 Si 基板上グラフェンのラマン評価 ……………166
3.2 赤外干渉法を用いた Si 基板上 SiC 薄膜成長リアルタイム・モニタリ ング技術……………163	5 おわりに ……………167

第 13 章 グラフェンの化学的作製法と有機半導体素子電極への応用

上野啓司

1 はじめに ……………169	化・単層剥離の手順……………171
2 グラファイト単結晶の化学的単層剥離 と薄膜作製 ……………171	2.2 酸化グラフェン薄膜の塗布形成……………172
2.1 酸化グラファイト形成による単層 剥離……………171	2.3 酸化グラフェン薄膜の還元……………173
2.1.1 グラファイト単結晶粉末の酸	2.4 酸化処理を行わないグラファイト 単層剥離手法……………174
	3 塗布形成したグラフェン薄膜の電極応用

……………175	6 グラフェン電極を用いた塗布型有機 FET ……………179
4 グラフェン薄膜の導電性評価 ……………176	7 おわりに ……………180
5 グラフェン透明電極を用いた有機薄膜 太陽電池 ……………177	

第 14 章 ナノグラフェンの低温成長と物性解析

徳本洋志, 清水哲夫, 安藤 淳

1 はじめに ……………182	造解析 ……………186
2 グラフェンの作製法の概観 ……………182	4.1 電子顕微鏡による構造解析……………186
2.1 HOPG 層の機械的剥離法……………182	4.2 ラマン散乱解析……………188
2.2 エピタキシャル法……………183	4.3 AFM による構造・物性解析 ……………188
2.3 CVD 法 ……………183	4.4 電気抵抗評価……………189
3 炭化物への無電解 Ni メッキによるグ ラフェン成長 ……………184	4.4.1 ナノギャップデバイスによる 電気抵抗測定……………189
3.1 炭化物への無電解 Ni メッキの基本 的手順……………184	4.4.2 分散液滴下ナノグラフェン シートの電気抵抗測定……………190
3.2 グラフェンサイズの増大法……………185	5 おわりに ……………193
4 無電解 Ni メッキ成長グラフェンの構	

第 15 章 カーボンナノウォールの成長と電子放出

堀 勝, 平松美根男

1 はじめに ……………195	4.1 カーボンナノウォールからの電子 放出……………204
2 カーボンナノウォールの成長 ……………196	4.2 超臨界 CO <sub>2</sub> 堆積法を用いた白金ナ ノ粒子の担持……………205
2.1 ラジカル制御プラズマ CVD 法によ るカーボンナノウォールの形成……………197	4.3 窒素プラズマ処理……………207
2.2 電子ビーム励起プラズマを用いた カーボンナノウォールの形成……………201	5 カーボンナノウォールの電子デバイス 応用に向けて ……………208
3 カーボンナノウォールの物性 ……………202	
4 電子放出素子への応用 ……………204	

## 第 16 章 CVD 法によるナノグラフェンの成長と電子状態

斉木幸一朗

1 はじめに	210	5 ナノグラフェン端の原子構造	216
2 ナノグラフェンの成長	212	6 ナノグラフェン端の電子状態	218
3 ナノグラフェンの原子構造	213	7 ナノグラフェン電子状態の分光学的検討	
4 ナノグラフェンのエピタキシャル方位			219
	214	8 おわりに	220

## 第 17 章 超高温基板を用いた新規カーボン薄膜蒸着成長とラマン分光による評価

島田敏宏, 野口卓也, 半澤明範, 長谷川哲也

1 はじめに	223	5 ラマン分光による評価	229
2 超高温基板加熱蒸着装置の開発	224	5.1 グラファイトとグラフェンのラマンスペクトル	229
3 超高温酸化基板への有機半導体分子を原料とした CVD	225	5.2 乱れた炭素固体のラマンスペクトル	231
4 パルスレーザー蒸着で作製したアモルファス炭素の超高温アニールの効果	228	6 おわりに	233

### [IV デバイスへの展開]

## 第 18 章 グラフェンの超高周波光・電子デバイス応用

尾辻泰一

1 はじめに	237	6 グラフェンによる新原理テラヘルツレーザーの可能性	247
2 量産型グラフェン結晶成長技術の重要性	238	6.1 光学励起に対するキャリア緩和過程	247
3 グラフェンチャネル FET の基本動作特性	239	6.2 グラフェンにおける負性導電率	248
4 GOS による FET	242	6.3 フェムト秒レーザー励起によるテラヘルツ放射分光実験	249
5 グラフェンによるプラズモニクデバイスの可能性	246	7 おわりに	251

## 第 19 章 グラフェンのスピndeデバイス

白石誠司

1 はじめに—スピントロニクスとは—	253	4 グラフェンへのスピン注入とスピンの創出	257
2 なぜ分子を用いるのか?	254	5 おわりに	261
3 分子スピントロニクスにおける様々な問題—なぜグラフェンなのか—	255		

## 第 20 章 LSI 配線技術への応用

二瓶瑞久

1 はじめに	264	成：熱 CVD 法	269
2 カーボン配線の優位性	265	4 横配線応用へ向けた課題	270
3 配線応用へ向けた多層グラフェン成長技術	267	4.1 高伝導性のための品質向上	270
3.1 基板上へのグラフェン形成方法	267	4.2 多層グラフェン/金属電極オーミックコンタクト	270
3.2 触媒金属を用いないグラフェン形成：光電子制御プラズマ CVD 法	267	5 カーボン・アクティブ配線の可能性	271
3.3 触媒金属を用いるグラフェン形成		6 おわりに	272