

分子の薄膜化技術

有機 EL, 有機トランジスタ, 有機太陽電池などの
有機薄膜デバイス作製技術に向けて

八瀬 清志

編著

石田 謙司	石田 敬雄
久保野敦史	島田 敏宏
谷垣 宣孝	中村 雅一
星野 聡孝	山本 雅人
吉田 郵司	吉本 則之

共著

コロナ社

担 当 一 覧

- 八瀬 清志：1章, 6.1節, 6.2.1～6.2.3項, 6.2.5～6.2.6項, 6.3.1項, 7.1節
石田 謙司：5.1節, 5.2.1項〔1〕～〔2〕, 5.2.2～5.2.4項, 6.4.2項
石田 敬雄：6.2.4項, 7.8節
久保野敦史：2.2～2.3節, 3章（本文）, 6.3.2項, 7.5節, 7.6.10項, 7.9.2項,
 コーヒーブレイク（7章）
島田 敏宏：4.4.2～4.4.3項, 5.5節, 6.3.4～6.3.5項, 7.2～7.3節, 7.9.1項,
 7.9.3項, コーヒーブレイク（3, 4章）
谷垣 宣孝：6.3.3項
中村 雅一：4.1節, 4.4.1項, 5.3.1項, 7.7節
星野 聡孝：4.2～4.3節
山本 雅人：5.2.1項〔3〕～〔4〕, 7.6.1～7.6.9項
吉田 郵司：5.4節, 6.4.1項, 6.4.3項
吉本 則之：2.1節, 5.3.2項, 7.4節
-

ま え が き

昨今、有機 EL テレビや有機太陽電池などの有機薄膜デバイスを銘打った製品が市場に出まわってきている。1980 年代に始まるその研究開発においては、日本の研究者・技術者が世界的にもリードし、かつ世界初の製品化も日本企業が担ってきた。しかし、ここ 10 数年の日本産業の構造変化により、その生産拠点がアジア、特に韓国や台湾および中国に移っている。いわゆる大画面テレビやパソコン、携帯電話などの電子機器は、日本製ではなくなってきている。

一方、電子機器の主体であるシリコンに代表される無機系の半導体材料・薄膜デバイスは、第二次世界大戦後の日本の復興を支えてきたことも事実である。その背景には、固体物理や材料科学、電子工学に関し、大学・大学院での基礎から応用までの教育、あるいは民間企業における基礎研究所での探索研究から事業部での開発研究において、物理や電子技術から微細加工プロセスについて人材育成を含めて精力的に行われてきた。

産業を支える教育や人材育成に不可欠なものは、それを学問とするための理論体系であり、そのための教科書であることはいうまでもない。これまでに有機薄膜デバイスに関する総合的な成書が出版されているが、それらの多くは薄膜の作製技術や構造よりも物性や機能を重視したものであり、ハンドブック的な活用を念頭に置いたさまざまな有機物質の物性に関する情報の寄せ集めの域を出ていない。一方、金属や無機物に関しては、このような物性や機能に加え作製技術、特に真空蒸着やプラズマ利用製膜技術、フォトリソグラフィなどの微細加工技術を中心とした薄膜形成過程に関する教科書が古くから出版されており、実用的のみならず教育的な配慮もなされている。これに対して有機分子の薄膜構造と形成過程については、金属や無機物と多くの点で本質的に異なっているにもかかわらず、まとまった教科書が出版されておらず、教育や研究、

さらには実用化に向けた障害になっていることは否めない。強いてあげるとすれば、「真空中で分子を並べる—有機蒸着膜—」（稲岡紀子生，八瀬清志）（共立出版，1989）という先駆的な書籍が出版されてはいるものの，その後の有機ELや有機トランジスタへの展開に関して触れられておらず，すでに絶版となっていることもあり，当該分野の研究者から新たな教科書を求める声が高まっている。また，有機薄膜デバイスの高性能化においては，配向・配列制御が必須であるにもかかわらず，その指針も明らかではないのが実情であり，この点について理論と実験の観点から記述されているものは国内外とも見当たらない。

本書は，2004年ごろから応用物理学会有機分子・バイオエレクトロニクス分科会（M&BE）に所属する新進気鋭の若手研究者を中心に，上述の「分子薄膜技術」に関する製本を上程しようと議論してきた結果である。その当時は，ポスドク，助教であった者が，いまや大学などの研究・教育機関において指導的立場に変わってきている（出版の遅れは，いつに私の責任である）。

各人が得意とする薄膜作製法およびその素過程と成長機構の分子形状依存性，各種有機薄膜デバイスの応用について5～20ページの記述を行い，全体でストーリー性をもたせるようにした。そのため，大学の理工学系学部における専門の講義，および大学院のゼミのための資料，そして企業で当該分野に新たに参入した研究者の参考書として活用できるものと思う。かつ，本書の対象としている分野は日本が高いポテンシャルを示していることから，21世紀の日本の産業のさらなる発展の起点となることを祈念する。当該分野は進展が早く，新たな原理やデバイス応用が生まれる可能性が高い。そのため，読者からの忌憚のないご意見を賜れば幸甚である。

2020年10月

八瀬 清志

目 次

1. 有機薄膜概論

1.1 有機分子の構造	1
1.2 分子の間に働く力	3
1.3 有機薄膜デバイス	7
引用・参考文献	10

2. 有機結晶学入門

2.1 有機結晶	11
2.2 高分子結晶	15
2.3 液 晶	17
引用・参考文献	21

3. 有機薄膜成長の基礎

3.1 有機薄膜の形成過程	22
3.2 薄膜成長素過程	24
3.3 現象論的な取扱いと確率論的な取扱い	27
3.3.1 2種類の取扱い	27
3.3.2 連続体モデル	28
3.3.3 現象論的な取扱い	28
3.3.4 確率論的な取扱い	32
3.4 分子の異方性が及ぼす影響	34
3.4.1 原子・分子の形状と異方性	34
3.4.2 分子の異方性・配向とクラスターの形状	35
3.4.3 現象論的な取扱い	36

3.4.4 確率論的な取扱い	42
3.5 非晶質薄膜の成長機構	52
3.5.1 等方的な薄膜形成	52
3.5.2 異方的な薄膜形成	52
コーヒーブレイク アモルファス薄膜中の分子配向	54
引用・参考文献	56

4. エピタキシャル成長

4.1 エピタキシーとは	59
4.1.1 エピタキシー	59
4.1.2 ミスフィット	61
4.1.3 分子-基板間相互作用とエピタキシーの種類	61
4.2 界面相互作用のモデル	64
4.2.1 1次元界面モデル	64
4.2.2 2次元界面モデル	68
4.3 格子整合とミスフィット	70
4.3.1 有機エピタキシーにおける格子整合性	70
4.3.2 有機エピタキシーにおけるミスフィット	73
4.3.3 有機エピタキシーにおける分子の異方性の影響	74
4.4 さまざまなエピタキシー現象	75
4.4.1 エピタキシーにおける基板表面粗さの影響	75
4.4.2 グラフォエピタキシー	80
4.4.3 分子と基板が強い結合を作る場合のエピタキシー	83
コーヒーブレイク コンピューターシミュレーション	85
引用・参考文献	87

5. 有機薄膜各論

5.1 分子形状による分類	90
5.2 1次元鎖状分子	92
5.2.1 長鎖 n -アルカン	92
5.2.2 長鎖パーフルオロ n -アルカン	104
5.2.3 フッ化ビニリデン (VDF) オリゴマー	108
5.2.4 直鎖有機シラン	110

5.3 平面状分子	114
5.3.1 フタロシアニン	114
5.3.2 その他の平面状分子	128
5.4 球状分子（フラーレン）	138
5.5 複雑形状をもつ分子の薄膜結晶成長	144
引用・参考文献	147

6. 有機薄膜の作製法

6.1 さまざまな作製法	155
6.2 ウェットプロセス	157
6.2.1 スピコート法およびバーコート法	157
6.2.2 電解重合法	159
6.2.3 ラングミュア-プロジェクト（LB）法	160
6.2.4 化学吸着法および自己組織化法	165
6.2.5 交互吸着法	170
6.2.6 印刷法	171
6.3 ドライプロセス	177
6.3.1 真空蒸着法・分子線蒸着法	177
6.3.2 蒸着重合	184
6.3.3 摩擦転写法	187
6.3.4 スプレー法	195
6.3.5 その他	197
6.4 薄膜処理法	199
6.4.1 ラビング法（機械的処理）	199
6.4.2 ポーリング法（電氣的処理）	201
6.4.3 ソルベントアニール法（溶媒処理）	202
引用・参考文献	203

7. 有機薄膜の構造・分子配向の観測法

7.1 電子顕微鏡	213
7.1.1 電子線エネルギー損失分光	214
7.1.2 EELS パターンの検出法	216
7.1.3 電子分光結像法	216

7.2	電子線回折	219
7.3	電子分光	220
7.3.1	エネルギー準位測定の手法	220
7.3.2	電気化学的方法	221
7.3.3	光電子放出電流分光 (PYS) 法	225
7.3.4	光電子分光	226
7.3.5	逆光電子分光	230
7.3.6	高分解能電子エネルギー損失分光	230
7.4	X 線回折	231
7.5	光学顕微鏡	238
7.6	分光的手法	240
7.6.1	電磁波と分子の相互作用	240
7.6.2	赤外分光法	240
7.6.3	赤外吸収スペクトルの実際の測定	241
7.6.4	ラマン分光法	242
7.6.5	表面プラズモン共鳴	243
7.6.6	強い電場と非線形分極	243
7.6.7	和周波発生 (SFG) 分光法	244
7.6.8	第2次高調波発生 (SHG) 分光法	245
7.6.9	エリプソメトリー法	245
7.6.10	偏光蛍光法	245
7.7	原子間力顕微鏡	246
7.7.1	原子間力顕微鏡の原理	246
7.7.2	AFM による有機結晶の構造解析	251
7.8	機械的手法 (トライボロジー)	255
7.9	その他の手法	259
7.9.1	蒸気圧測定	259
7.9.2	昇温脱離法	262
7.9.3	接触角	262
	コーヒーブレイク その場観察	264
	引用・参考文献	265
	索引	272

1 有機薄膜概論

1.1 有機分子の構造

18世紀のラボアジェに始まる有機合成化学の進歩はめざましく、近年になって加速度的に新しく登録される有機分子の数が増している。毎年10万に及ぶ新規化合物が合成され、すでに登録された化合物としては1,000万に及ぶといわれている。しかし、その分子の基本構造といえば、炭素(C)と水素(H)および酸素(O)である。また、炭素自体の結合も、**共有結合**に基づく sp^3 混成軌道である**一重結合**(C-C)、 sp^2 結合による**二重結合**(C=C)および**三重結合**(C≡C)に代表される(図1.1)。

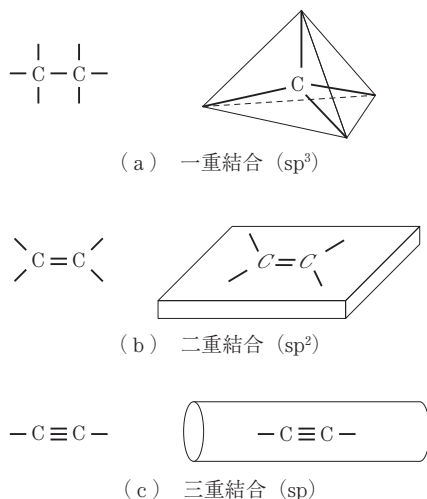


図 1.1 炭素の化学結合

2 1. 有機薄膜概論

この基本的化学結合をもとに、水素や酸素との結合を含めて複雑・多様な分子骨格を形成している。本書で取り扱う代表的な有機分子の構造を図 1.2 に示す。いずれも、物理化学的性質、特に電子・光機能に優れた化合物であり、多くの研究者が注目しているものである^{1)-3)†}。

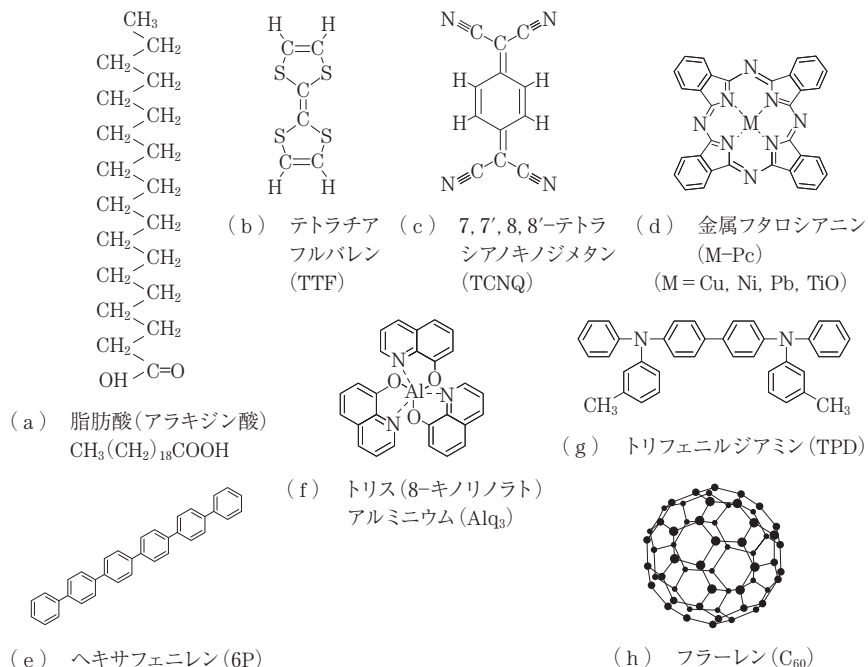


図 1.2 機能性有機分子の構造

分子の形状という点から考えると、共有結合の空間的な異方性および方向性により分類される。図 1.2(a)に示すような直線分子 (1 次元) は、単に一直線に C-C 結合が伸びた鎖のような構造をとるだけではなく、二重結合や三重結合を含め、高分子鎖間での相互作用を含めて、新しい構造を有するものが得られている。図 1.2(b)~(g)に示すような構造が平面分子 (2 次元) である。図 1.2(h)に示すのは球状分子 (3 次元) として炭素のみからなるフラーレンであ

† 肩付き番号は章末の引用・参考文献を示す。

り、この発見を契機として急速な研究が展開されている。このような分子構造の異方性は、分子間に働く力にも異方性を生じることになる。

有機分子の性質が、それを構成している化学結合に局在した電子軌道の性質 (**LUMO** (lowest unoccupied molecular orbital) および **HOMO** (highest occupied molecular orbital)) (図 1.3) に依存しており、分子内で閉じた軌道が、外場としての電場・磁場の影響を受けて擾乱されることによる。さらに、分子が集合体を形成した場合、1.2 節で述べるような凝集状態に応じて、分子間相互作用により電子状態に変化を生じる。この点、無機化合物や金属では、原子の集団としての振る舞いにより、特別な場合を除いて、物性物理学で議論されているような基底状態と伝導帯として一括して議論できることから比べると、多少複雑になっている。

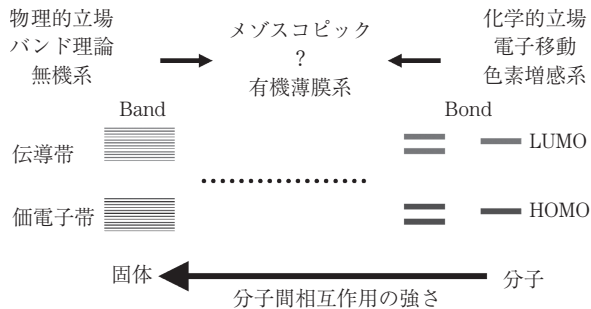


図 1.3 固体結晶のエネルギー単位 (バンド) と孤立分子の分子軌道 (ボンド)

1.2 分子の間に働く力

分子間に働く力または結合としては以下のものが知られている。静電的な相互作用による水素結合や、電荷移動によるものや、ファンデルワールス力による弱い結合などが知られている。これらの結合の多様性と異方性が分子固体および薄膜の物理化学的性質に大きく影響している。

また、共有結合で結びつけられた分子内の結合に比較して、分子間のそれが

弱いとはいえ、分子の凝集には大きな効果をもたらしている。図 1.4 に示すように、実際の結晶においては、パラフィンや脂肪酸などの直線分子はたがいに平行に並んだラメラ構造（分子層）を形成し、またフタロシアニンなどの平面分子は分子面を重ねるように積み重なった分子カラムを形成している。

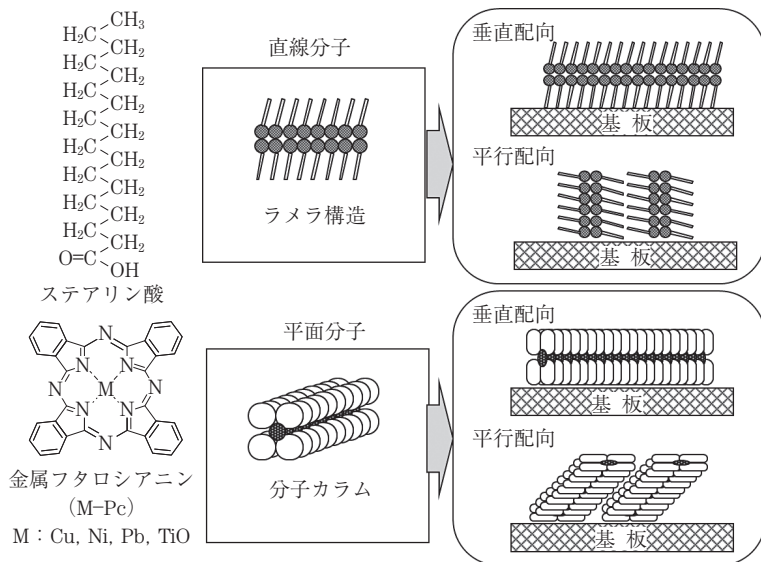


図 1.4 分子形状と凝集構造

さらに、薄膜としての構造を考えると、基板としての無機固体表面との相互作用が重要であるとともに、薄膜表面そのものが示す得意な性質がある。

さて、有機分子のもつ機能をシリコンや化合物半導体と比較したものを表 1.1 に示す。これらの電気的・光学的な機能を有効に発揮させるため、または既存の半導体を中心とした電子・光デバイスに組み込み、置換していくためには、2次元に分子が配列・配向した構造、すなわち「薄膜」が効率的であると考えられる。

個々の有機分子の機能を最大限に発揮させ、集合体としての機能を発現させるためには、幾何学的に異なる形状を有する分子を、その個性に従って配列・配向させることが必要になってくる。また、既存の機能性材料の大半を占める

表 1.1 無機，化合物半導体および有機半導体の比較

	シリコン	化合物半導体	有機半導体
受光	○	○	○
発光	△	◎	○
移動度	○	◎	△
高速性	○	◎	△
高出力	○	◎	×
耐熱性	◎	◎	×
柔軟性	×	×	◎
耐衝撃性	△	△	◎
耐久性	◎	○	×
3次元集積	○	△	◎
加工性	○	△	◎
大面積	△	×	◎
製造エネルギー	△	×	◎

無機・金属材料との融合を考えると，無機材料表面にいかにも有機分子を並べることが重要である。そのための工夫がいま始まっている。

図 1.2 に示した種々の機能性有機分子は，直線，平面，そして球状の形状を有している。これらの凝集形態は，その形状を反映して，たがいのより強く（または，より弱く）相互作用するように，自己凝集によりユニークな形態を示す。

これらの機能性有機分子の間に働く力は，基本的にはファンデルワールス力である。たがいの接触断面積を大きくするように分子が凝集するため，直線分子 (linear molecules) および平面分子 (planar molecules) においては，それぞれの分子軸，または平面を平行にした配向・配列をとる (図 1.5)。ここで，直線分子 (図 1.5(a)) においては，基板表面に分子が平行な場合は，針状 (矩形) の結晶になり，垂直また斜立している場合には，平板状の結晶となる。一方，平面分子 (図 1.5(b)) においては，分子間の π 電子相互作用が強く，分子カラムを形成する。平面分子にとって基板表面に垂直 (または，斜立) した

索 引

【あ】	
アイソタクティック	16
アタクティック	16
圧焦電性	186
アプリケーター	158
アモルファス薄膜	54
アラキシン酸	160
【い】	
イオン化蒸着法	199
イオン化ポテンシャル	224
異性体	16
位相差顕微鏡	239
位相像	250
一軸配向	200
一重結合	1
移動度	52
異方性	23
インキュベーションタイム	93
インクジェット法	172
印刷法	171
引 力	246
【う】	
ウェットプロセス	155
運動エネルギー	227
【え】	
液 晶	17
液晶ガラス	20
液晶配向層	200
液体薄膜	198
エッジの強調された像	239
エピタキシー	59

エピタキシャル成長	59
エレクトロスプレー法	196
円盤状	18
【お】	
凹版印刷	172
オージェ電子分光	220
オーダーパラメーター	19
オフセット印刷	172
オペランド測定	265
オリゴチオフェン	200
折りたたみ鎖結晶	15
【か】	
回折現象	265
界面エネルギー	263
カイラル (キラル) スメク	19
ティック相	19
化学気相成長	184
化学吸着	25
化学吸着法	165
化学結合	61, 215
化学結合力	246
化学ポテンシャル	29
角度分解光電子分光	228
確率論	27
ガスクロマトグラフィ	261
活性化エネルギー	33, 96
活性化過程	31
価電子帯	226
ガラス状態	20
ガラス転移温度	201
乾 式	155
干 渉	239
完全二軸配向	245
官能基	34

【き】	
擬エピタキシー	63
幾何異性体	16
気相成長	22
気体分子運動論	25
基板温度	34
逆空間	15
逆光電子分光	230
逆ミセル	161
吸 着	25
キュリー温度	201
凝集相	24
凝集体	24
共蒸着法	198
共焦点顕微鏡	239
共振周波数	248
協同運動	20
共有結合	1
強誘電性	108, 186
強誘電性液晶	19
極 性	18
極点図測定	142
均一核形成	31
銀・塩化銀電極	224
近接相互作用	246
【く】	
空間群	11, 15
クーロン相互作用	61
屈折率	20
クラスター	24
グラビア印刷	172
グラフォエピタキシー	80
クリスタリット	15
グループ (溝) 形成	200

【け】

蛍光	245
結合エネルギー	227
結合方向	214
結晶	15
結晶化度	17
結晶系	11
結晶子	15
結晶性	52
結晶多形	17, 60
結晶粒界	52
検光子	239
原子間力顕微鏡	246
現象論	27

【こ】

光学顕微鏡	238
光学遅延板	239
交互吸着法	170
格子整合	140
高次のオーダーパラメーター	20
剛体棒	35
剛直性	18
高電界を印加	201
光電子分光	226
光電子放出電流分光(PYS)法	225
高分解能電子エネルギー	
損失分光	230
高分子化	184
光路長	239
ゴーシュ形	98
極低温 TEM	214
コレステリック相	19
コロナ放電	202
コロナ・ポーリング法	201
コンタクトモード	247
コントラスト	239
コンフォメーション	17

【さ】

サーモトロピック液晶	18
サイクリックボルタンメ リー	222
再蒸発	198
作用極	221
酸化還元電位	220
三重結合	1
参照極	221
参照電極	221
散乱	239

【し】

ジアミン	185
シェア量	239
紫外光電子分光	228
ジカルボン酸クロリド	185
自己組織化膜	83, 165
仕事関数	224
四重極質量分析計	182, 262, 265
ジスチリルオリゴ チオフェン	234
湿式	155
自発的に交互累積	186
試謬法的	15
シミュレーション	22
斜入射 X 線回折	141
重合度	17
重縮合	187
柔軟性	18
重付加	187
出現時間	93
昇温脱離法	262
昇華	25
昇華エンタルピー	259
蒸気圧測定	259
晶族	11
状態密度	226
蒸着重合	184
焦点	239

蒸発	25
消滅則	15
シリコンオイル	198
真空準位	221
真空蒸着法	177, 259
シンクロトロン放射光	231
シンジオタクティック	16
親水	155
真性エピタキシー	63

【す】

水晶振動子	52
水晶振動子マイクロ バランス	260, 265
水素終端シリコン表面	75
水面上単分子膜	104
スクリーン印刷	172
ステップバンチング	81
スピコート法	157
スプレージェット法	195
スメクティック相	19
すれすれ入射 X 線回折	232

【せ】

整合構造	68
静電気力	246
赤外高感度反射測定法	241
積層欠陥	139
斥力	246
接眼レンズ	238
接触角	32, 263
遷移モーメント	245
選択成長	198
選択的な付着性	186
全反射	264
全反射吸収測定	242
占有体積	29

【そ】

双極子	201
双極子配向	186
走査型トンネル顕微鏡	246

- | | | | | | |
|-------------|---------|-------------------|---------|--------------------------|----------|
| 走査型プローブ顕微鏡 | 246 | 電解重合法 | 159 | 配向制御 | 60 |
| 走査透過型電子顕微鏡 | 216 | 電気化学 | 220 | 白色 X 線 | 264 |
| 相変化 | 19 | 電気感受率 | 244 | 薄膜相 | 232 |
| 素過程 | 22 | 電気双極子-電気双極子 | | 撥水性 | 264 |
| 速度式 | 33 | 相互作用 | 61 | 撥油性 | 264 |
| 速度論 | 27 | 電気双極子モーメント | 240 | バルク相 | 232 |
| 疎水 | 155 | 点群 | 11 | 反強誘電性液晶 | 19 |
| その場観察 | 26, 264 | 電子親和力 | 224 | 反射高速電子線回折 | 219 |
| ソフトリソグラフィ | 174 | 電子線エネルギー損失 | | 反転対称性 | 244, 245 |
| ソルベントアニール法 | 202 | スペクトル | 213 | 反応速度論 | 262 |
| | | 電子線損傷 | 213 | | |
| 【た】 | | 電子分光結像法 | 216 | 【ひ】 | |
| 第一原理分子動力学 | 86 | 伝導帯 | 227 | 非晶 | 15 |
| 対極 | 221 | | | 非晶質 | 52 |
| 第2次高調波発生 | 245 | 【と】 | | 非晶配向 | 16 |
| 第2次高調波発生活性 | 186 | 透過型電子顕微鏡 | 213 | ひずみエピタキシー | 63 |
| 対物レンズ | 238 | 透過電子線回折 | 219 | 非整合構造 | 70 |
| ダイレクタ | 20 | 銅ワタロシアニン | 114 | 非線形光学 | 20 |
| 高さ方向の情報 | 239 | 等方相 | 19 | 非線形分極 | 244 |
| タクティシティ | 16 | ドーピング | 195 | 非弾性散乱電子 | 214 |
| 多形制御 | 60 | 凸版印刷 | 172 | 微分干渉顕微鏡 | 239 |
| タッピングモード | 248 | ド・プロイ波長 | 144 | 微分像 | 239 |
| 単位格子 | 11 | ドライプロセス | 155 | 標準水素電極 | 223 |
| 単位胞 | 11 | トライボロジー | 255 | 表面圧(π)-面積(A)曲線 | 162 |
| 単結晶 | 15 | トランス形 | 98 | 表面エネルギー | 263 |
| 弾性散乱電子 | 214 | | | 表面拡散 | 25 |
| 単分子膜 | 161 | 【な行】 | | 表面固化 | 97, 101 |
| | | 二重結合 | 1 | 表面自由エネルギー | 29, 105 |
| 【ち】 | | 熱処理温度 | 34 | 表面増強ラマン散乱 | 243 |
| 逐次重合 | 187 | 熱適応 | 25 | 表面プラズモン | 243 |
| 秩序 | 17 | 熱天秤法 | 180 | ピンホール | 52, 239 |
| 超音速分子線 | 197 | 熱力学 | 27 | | |
| 超格子 | 199 | 熱力学的臨界核 | 31 | 【ふ】 | |
| 長鎖分子 | 34 | ネマティック相 | 19 | ファンデルワールス | |
| 直線分子 | 4 | ノズル | 196 | エピタキシー | 64 |
| | | 【は】 | | ファンデルワールス | |
| 【て】 | | バーコート法 | 158 | 相互作用 | 61 |
| 低速電子線 | 219 | パーフルオロ- n -アルカン | 104 | ファンデルワールス力 | 246 |
| 低速電子線回折 | 219 | | | フーリエ変換赤外分光 | |
| テトラテトラコンタン | 98 | 配向 | 61, 186 | 光度計 | 241 |
| 電位窓 | 223 | 配向主軸 | 19 | フェニレンオリゴマー | 134 |
| 電界効果型トランジスタ | 7 | | | フェルミエネルギー | 227 |

フェロセン電極	224	ベンタセン	13, 91	有機薄膜トランジスタ	7
フォルディング	15	ベンタセン薄膜	232	有機-有機ヘテロ	
不均一核形成	31			エピタキシー	142
複屈折	20	【ほ】		誘電異方性	20
複屈折性	16, 54, 239	放射光 X 線	264	誘電率	20
副格子	13	棒 状	18	誘導時間	93
フタロシアニン	90	ホウ素ドーブダイヤモンド		揺らぎ	30
付着係数	48	電極	223	溶液成長	22
物理気相成長	184	飽和カロメル電極	223	溶媒和	22
物理吸着	25	飽和蒸気圧	261		
物理モデル	23	ポーリング法	201	【ら】	
不溶不融	185	ポテンシオスタット	222	ラジカル重合	187
フラーレン	90, 138	ホモエピタキシャル	51	ラビング法	200
ブラヴェ格子	11	ポリ (3-アルキルチオ		ラマン効果	242
プラズモン	214	フェン)	191	ラマン散乱	20
フリーデル振動	84	ポリ (9,9'-ジオクチル		ラメラ	15
プリズム	239	フルオレン)	192	ラメラ結晶	252
分極率	244	ポリアミド	185	ラメラ構造	4
分光法	265	ポリジメチルシラン	111	ラングミュア-プロジェクト	
分子カラム	4	ポリテトラフルオロ		ト (LB) 法	164
分子振動	240	エチレン	187	ランダム配向	245
分子線エピタキシー	28, 182	ポリフッ化ビニリデン	108		
分子線強度	182	ボルツマン分布	43	【り】	
分子線蒸着法	177, 259			リアルタイム	231
分子動力学	85	【ま行】		リオトロピック液晶	18
分子配向	34	マイクロコンタクトブリ		律速段階	51
分子配列	17	ト (μ CP) 法	173	立体規則性	16
分子力学	85	マイクロチャネルプレート		流 束	25
分子力場	85		220	流動性	17
分子量	17, 186	摩擦転写法	83, 187	流動配向	53
分子量分布	17	摩擦力顕微鏡	256	両親媒性	155
		ミスフィット	61	臨界核形成エネルギー	31
【へ】		ミセル	161	臨界ミスフィット	68
平均吸着エネルギー	65	溝形成	200		
平面分子	4	面心立方格子	139	【る, れ, ろ】	
ペリレン	133	面内配向	54	ルジャンドル多項式	20
偏光依存性	245	モワレ	71	ルブレン	144
偏光蛍光	20			励起光	245
偏光顕微鏡	238	【や行】		レーザー加熱蒸着法	199
偏光子	238, 239	有機エピタキシー	60	レターデーション	239
偏光発光	21	有機電界発光	7	連鎖重合	187
偏光方向	245	有機薄膜太陽電池	7	連続体	28

連続膜	24	【わ】	和周波発生	244
六方稠密格子	139		和周波	244

【A~E】		【L】		【T】	
AFM	246	LB 膜	104	sine-Gordon 方程式	66
Alq ₃	144	LEED	219	SPM	246
ARPES	228	LUMO	3, 221	STEM	216
ATR	242			STM	246
BEDT-TTF	129			Stranski-Krastanov (SK) 型	26
C ₆₀	90	【M】			
CV	222	MBE	28	TDS	262
CVD	184	MCP	220	TED	219
ex situ	26, 264			TPD	262
		【N】		TTF-TCNQ	132
【F】		Nishiyama-Wasserman (NW)			
flat-on 配向	100	方位	70	【U~Z】	
FM 検出法	251	n-アルカン	90	UPS	228
Frank van der Merwe (FM) 型	26	n 型半導体材料	139	VDP	184
FTIR	241			Volmer-Weber (VW) 型	26
		【O~R】		XPS	228
【H】		operand 測定	265	X 線光電子分光	228
HOMO	3, 221	PFO	192	Zismann プロット	263
HREELS	230	point-on-line coincidence	73		
		PTFE	187	【その他】	
【I】		PVD	184	2 次電子	228
in situ	26, 264	PYS 法	225	2 次電子カットオフ	227
IR-RAS	241	QCM	260, 265	2 次のオーダーパラメーター	19
		QMS	262	2 次のモーメント	245
【K】		RHEED	219	4 次のモーメント	245
Knudsen cell	260	RHEED 振動	220	6-12 型 Lennard-Jones (LJ)	
Knudsen effusion 法	260			ポテンシャル	106
Kurdjumov-Sachs (KS)		【S】		α 型結晶	201
方位	70	SAM	83, 165	β 型結晶	201
		SCE	223	π - π 相互作用	61
		SHE	223		
		SHG 活性	186		

—編著者・著者略歴—

八瀬 清志 (やせ きよし)

- 1978年 大阪大学理学部高分子
学科卒業
- 1980年 大阪大学大学院理学研
究科博士前期課程修了
(無機及び物理化学専
攻)
- 1983年 京都大学大学院理学研究科博士後期課
程単位取得退学(化学専攻)
- 1984年 広島大学助手
- 1986年 博士(理学)(京都大学)
- 1991年 広島大学助教授
- 1992年 工業技術院繊維高分子材料研究所主任研究員
- 1993年 工業技術院物質工学工業技術研究所主任研究員
- 2001年 産業技術総合研究所光技術研究部門研究副部門長
- 2010年 産業技術総合研究所ナノシステム研究部門研究部門長
- 2012年 産業技術総合研究所計測・計量標準分野副研究統括
- 2020年 先端素材高速開発技術研究組合専務理事補佐
現在に至る



石田 謙司 (いしだ けんじ)

- 1991年 山口大学理学部物理学
科卒業
- 1993年 九州大学大学院工学研
究科博士課程前期課程
修了(応用物理学専攻)
- 1995年 九州大学大学院工学研
究科博士課程後期課程修了(応用物理
学専攻), 博士(工学)
- 1995年 日本学術振興会特別研究員 PD
- 1998年 京都大学助手
- 2002年 京都大学講師
- 2006年 神戸大学准教授
- 2014年 神戸大学教授
現在に至る



石田 敬雄 (いしだ たかお)

- 1989年 大阪大学基礎工学部合
成化学科卒業
- 1991年 大阪大学大学院基礎工
学研究科博士前期(修
士)課程修了(化学系
専攻)
- 1995年 大阪大学大学院基礎工学研究科博士後
期課程修了(化学系専攻), 博士(工学)
- 1995年 理化学研究所フロンティア研究システム研究員
- 1996年 アトムテクノロジー研究体研究員
- 2000年 工業技術院機械技術研究所研究員
- 2001年 産業技術総合研究所機械システム研究部門研究員
- 2010年 産業技術総合研究所ナノシステム研究
部門研究グループ長
- 2020年 産業技術総合研究所ゼロエミッション
国際共同研究センター総括研究主幹
現在に至る



久保野 敦史 (くほの あつし)

- 1987年 東京工業大学工学部有
機材料工学科卒業
- 1989年 東京工業大学大学院理
工学研究科修士課程修
了(有機材料工学専攻)
- 1991年 東京工業大学大学院理
工学研究科博士後期課程退学(有機材
料工学専攻)
- 1991年 東京工業大学技官
- 1993年 博士(工学)(東京工業大学)
- 1994年 京都工芸繊維大学助手
- 2004年 静岡大学助教授
- 2007年 静岡大学准教授
- 2010年 静岡大学教授
現在に至る



島田 敏宏 (しまだ としひろ)

- 1988年 東京大学理学部化学科
卒業
- 1990年 東京大学大学院理学系
研究科修士課程修了
(化学専攻)
- 1993年 東京大学大学院理学系
研究科博士課程修了(化学専攻), 博
士(理学)
- 1993年 東京大学助手
- 1999年 東京大学講師
- 2001年 東京大学助教授
- 2007年 東京大学准教授
- 2010年 北海道大学教授
現在に至る



谷垣 宣孝 (たにがき のぶたか)

- 1985年 大阪大学理学部高分子
学科卒業
- 1987年 大阪大学大学院理学研
究科博士前期課程修了
(高分子学専攻)
- 1990年 大阪大学大学院理学研
究科博士後期課程単位取得退学(高分子学専攻)
- 1990年 工業技術院繊維高分子材料研究所研究員
博士(理学)(大阪大学)
- 2001年 産業技術総合研究所光技術研究部門研
究グループ長
- 2015年 産業技術総合研究所関西センター産学
官連携推進室総括主幹
- 2020年 産業技術総合研究所関西センター産学
官連携推進室室長
現在に至る



中村 雅一 (なかむら まさかず)

- 1988年 大阪大学基礎工学部電気工学科卒業
1990年 大阪大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了(物理系専攻)
1990年 東レリサーチセンター勤務
1994年-1997年 アトムテクノロジー研究体研究員
1997年 博士(工学)(大阪大学)
2001年 千葉大学准教授
2011年 奈良先端科学技術大学院大学教授
現在に至る



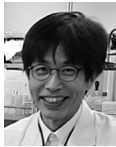
星野 聡孝 (ほしの あきたか)

- 1989年 京都大学理学部卒業
1991年 京都大学大学院理学研究科修士課程修了(化学専攻)
1994年 京都大学大学院理学研究科博士後期課程単位取得退学(化学専攻)
1994年 京都大学文部技官
1995年 京都大学助手
1997年 博士(理学)(京都大学)
2005年 大阪府立大学助教授
2008年 大阪府立大学教授
2020年 大阪府立大学学長補佐
現在に至る



山本 雅人 (やまもと まさと)

- 1991年 早稲田大学理工学部化学科卒業
1993年 早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了(化学専攻)
1995年 早稲田大学助手
1996年 早稲田大学大学院理工学研究科博士後期課程修了(化学専攻), 博士(理学)
1996年 日本学術振興会特別研究員(COE, 名古屋大学)
1998年 名古屋大学研究員
1999年 昭和大学専任講師
2007年 昭和大学准教授
現在に至る



吉田 郵司 (よしだ ゆうじ)

- 1989年 九州大学理学部物理学科卒業
1991年 九州大学大学院工学研究科修士課程修了(応用物理学専攻)
1994年 九州大学大学院工学研究科博士課程修了(応用物理学専攻), 博士(工学)
1995年 工業技術院物質工学工業技術研究所研究員
2001年 産業技術総合研究所光技術研究部門主任研究員
2008年 産業技術総合研究所太陽光発電研究センター研究チーム長
2014年 産業技術総合研究所環境・エネルギー分野研究企画室長
2016年 産業技術総合研究所太陽光発電研究センター副研究センター長
2020年 産業技術総合研究所ゼロエミッション国際共同研究センター副研究センター長
現在に至る



吉本 則之 (よしもとの りゆき)

- 1985年 広島大学生物生産学部卒業
1988年 広島大学大学院生物圏科学研究科博士前期課程修了(生物生産工学専攻)
1991年 広島大学大学院生物圏科学研究科博士後期課程修了(生物生産工学専攻), 学術博士
1991年 新技術事業団 ERATO 研究員
1993年 岩手大学講師
2000年 岩手大学助教授
2007年 岩手大学准教授
2010年 岩手大学教授
現在に至る



分子の薄膜化技術

—有機 EL, 有機トランジスタ, 有機太陽電池などの有機薄膜デバイス作製技術に向けて—

Thin Film Technology of Molecules

— For Organic Thin-Film Devices Fabrication; Organic EL, Organic Thin-Film-Transistor,

Organic Photovoltaic Cell —

© Kiyoshi Yase et al. 2020

2020年12月3日 初版第1刷発行



検印省略

編著者	八瀬清志
著者	石田謙司
	石田敬雄
	久保野敦史
	島田敏宏
	谷垣宣孝
	中村雅一
	星野聡孝
	山本雅人
	吉田郵司
	吉本則之
発行者	株式会社 コロナ社
	代表者 牛来真也
印刷所	美研プリンティング株式会社
製本所	有限会社 愛千製本所

112-0011 東京都文京区千石4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)

ホームページ <https://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-00938-5 C3055 Printed in Japan

(新宅)



©COPY <出版者著作権管理機構 委託出版物>

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつど事前に、出版者著作権管理機構（電話 03-5244-5088, FAX 03-5244-5089, e-mail: info@jcopy.or.jp）の許諾を得てください。

本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めていません。落丁・乱丁はお取替えいたします。