

ナノ空間材料ブック

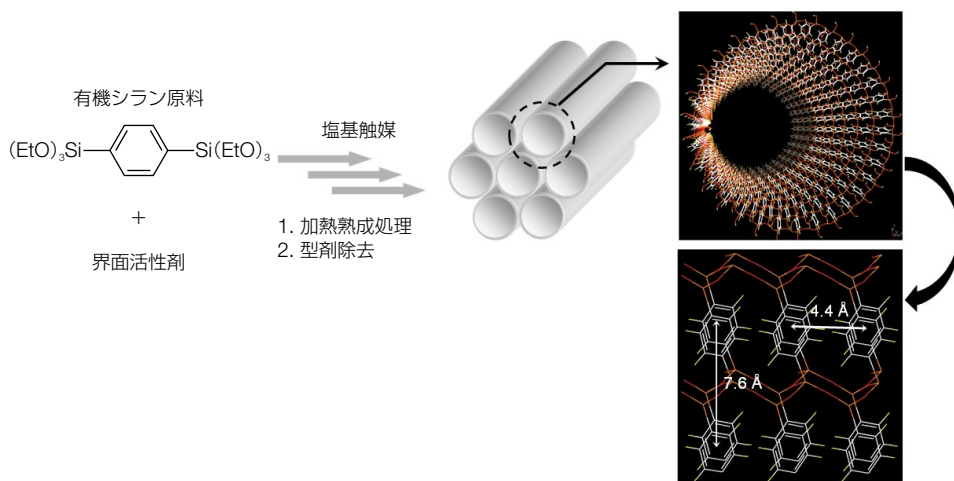
ナノ多孔性材料、ナノ層状物質等が切り開く新たな応用展開

Nanospace Materials Handbook

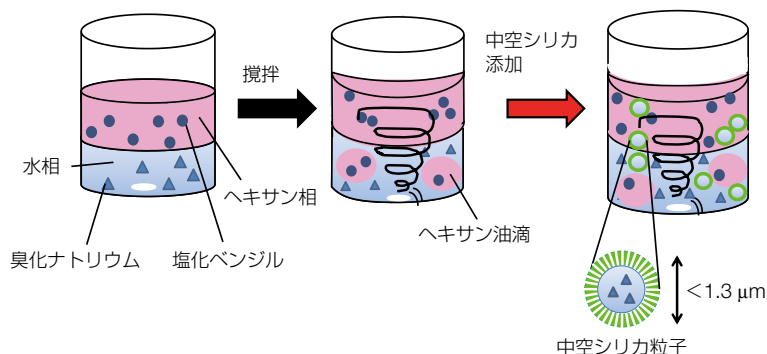
監修 | 有賀 克彦

編集委員 | 徐 強
木村 辰雄
窪田 好浩
山内 悠輔

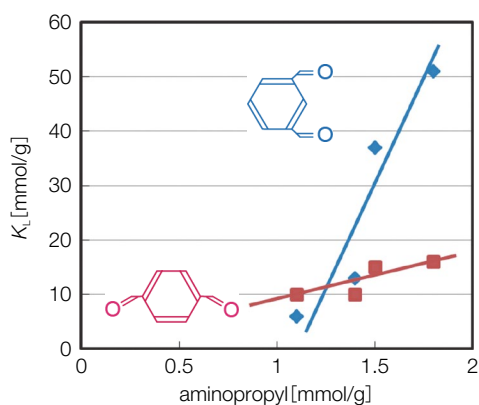




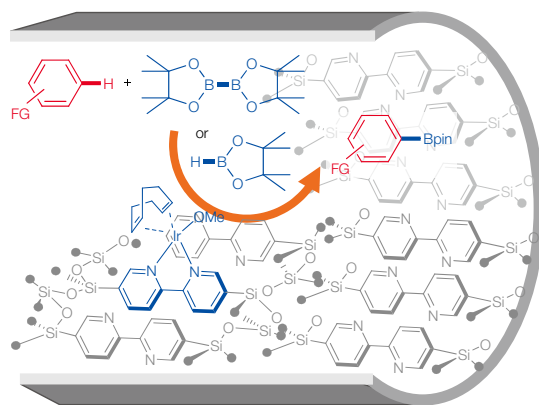
[1.3] 図 8 架橋型有機シラン化合物を用いた Ph-HMM の合成と細孔内部の有機基配列構造 (p.38)



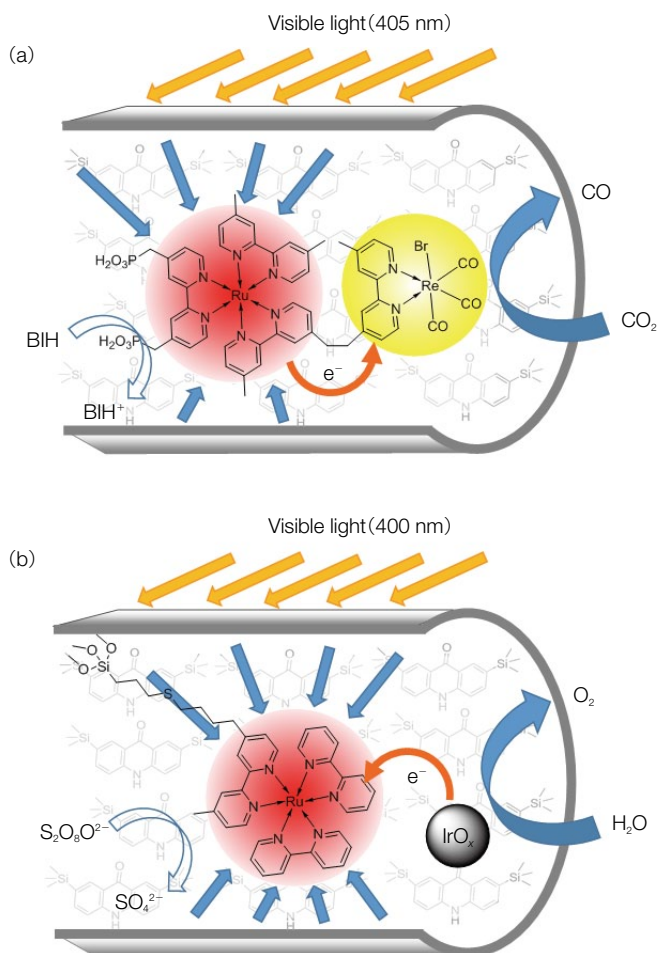
[1.7] 図 4 臭化ナトリウムと塩化ベンジルの二相系反応に中空メソポーラスシリカを添加したときの模式図 (p.73)



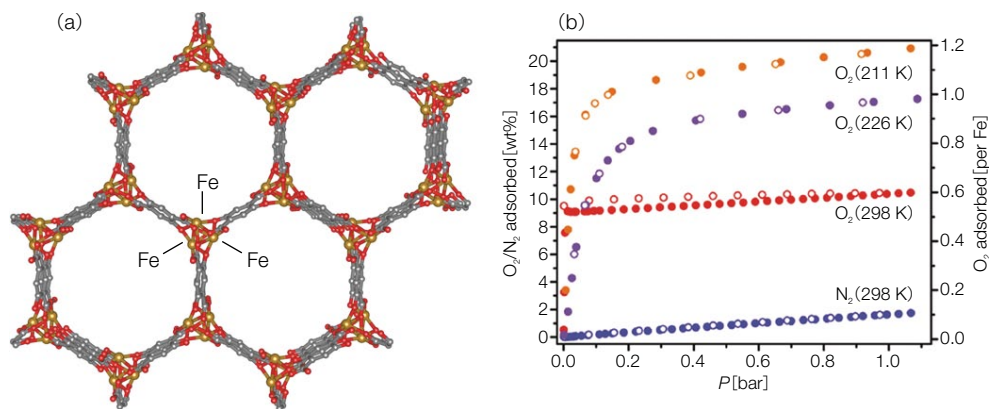
[1.9] 図 2 *m*-, *p*-ベンゼンジアルデヒドの AP/SBA-15 への吸着における Langmuir 定数 (AP 密度の関数として) (p.87)



[1.10] 図 5 BPy-PMO の細孔表面にイリジウム錯体を固定化した Ir-BPy-PMO による C-H ホウ素化反応 (p.100)

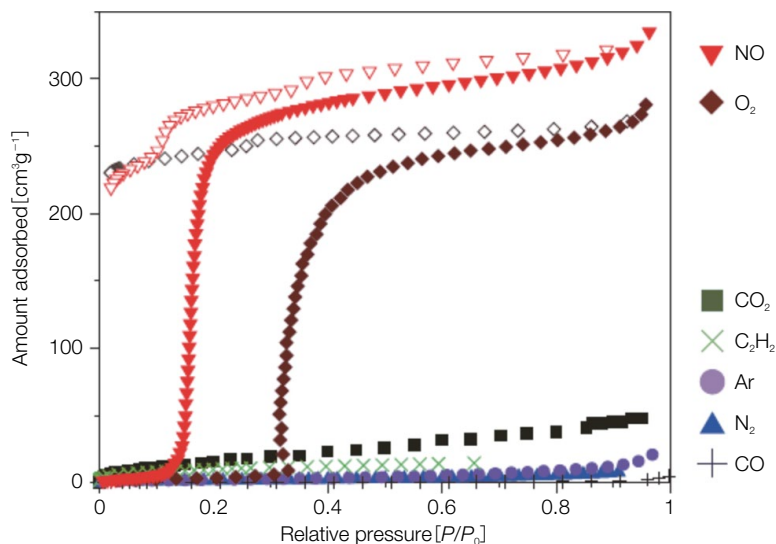


[1.10] 図 8 可視光吸収型 Acd-PMO の光捕集機能を利用した (a) CO_2 還元反応と (b) 水の酸化反応の模式図 (p.102)



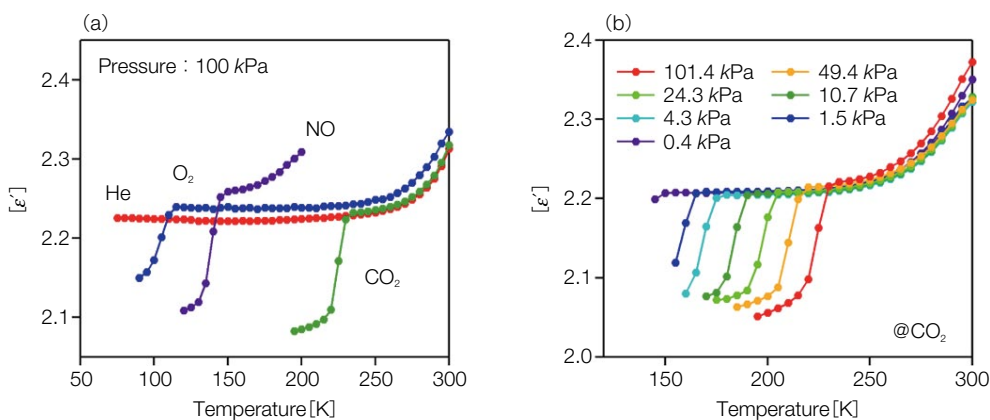
[2.4] 図 3 $[\text{Fe}_2(\text{dobdc})]$ (MOF-74 or CPO-27) の結晶構造 (黄色原子が Fe^{II} イオン) (a) と O_2 と N_2 についての吸着等温線測定結果 (b) (p.167)

(文献 3) より引用)



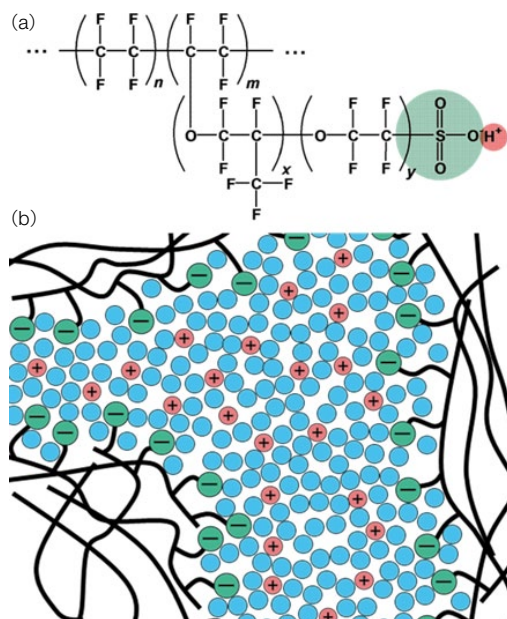
[2.4] 図 6 [Zn(TCNQ)(bpy)] における各種ガスの吸着等温線測定結果 (p.169)

測定温度は以下の通り。NO : 121 K, O₂ : 77 K, CO₂ : 193 K, C₂H₂ : 193 K, Ar : 87 K, N₂ : 77 K, CO : 77 K (文献 10) より引用)

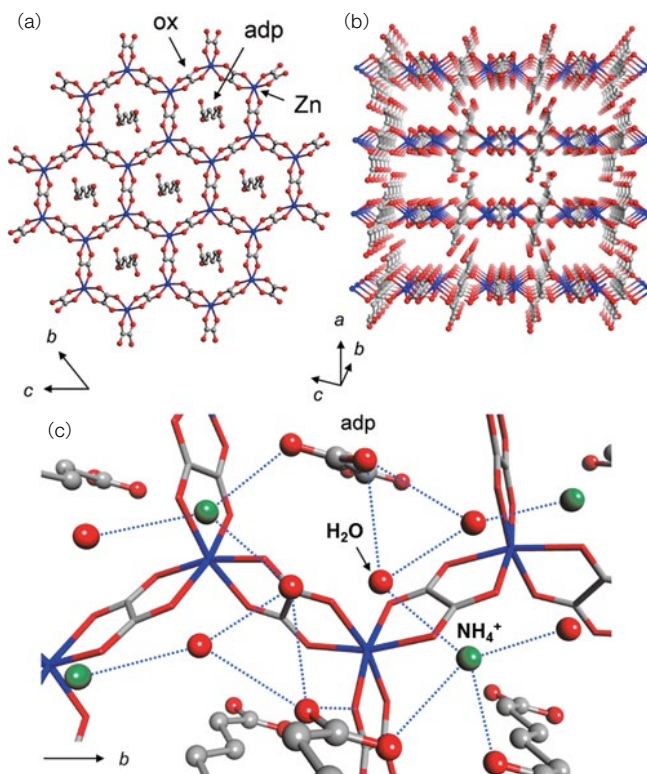


[2.4] 図 10 ペレット形成した [Ru₂(4-Cl-2-OMePhCO₂)₄(phz)] 一次元鎖化合物における誘電率実部 (ε') の温度依存性 (p.173)

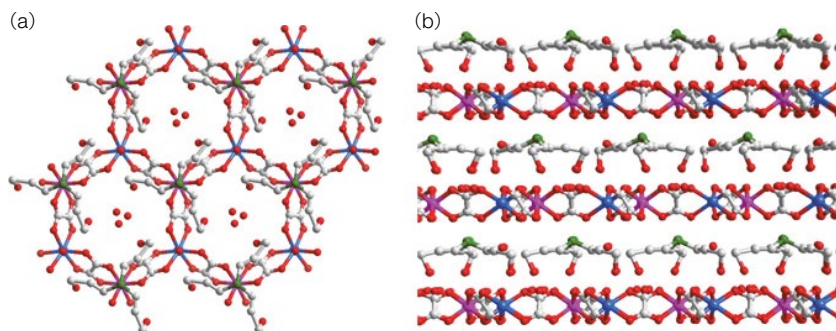
圧力一定 (100 kPa) でガスの種類を変えた場合 (a) と CO₂ 雰囲気下でガス圧を変化させた場合 (b) (交流電場 : 0.1 kHz)



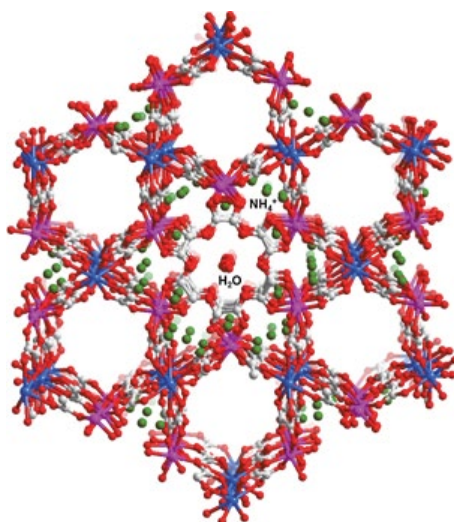
[2.5] 図2 (a) Nafion® の化学式, (b) 水和構造の概念図⁷⁾ (p.177)



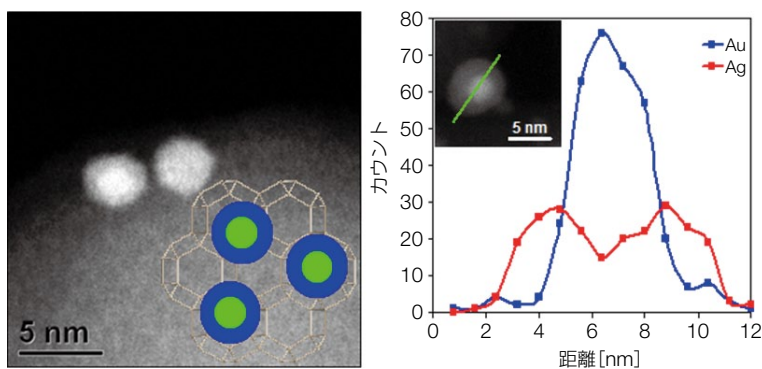
[2.5] 図6 $(\text{NH}_4)_2(\text{adp})[\text{Zn}_2(\text{ox})_3] \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ の (a) 蜂の巣状シュウ酸架橋骨格, (b) 層状構造, (c) 層間部分の水素結合ネットワーク¹²⁾ (p.180)



[2.5] 図 7 $[\text{NH}(\text{rol})_3][\text{M}^{\text{II}}\text{Cr}^{\text{III}}(\text{ox})_3] \cdot n\text{H}_2\text{O}$ の (a) 蜂の巣状シュウ酸架橋骨格, (b) 層状構造¹⁶⁾ (p.180)

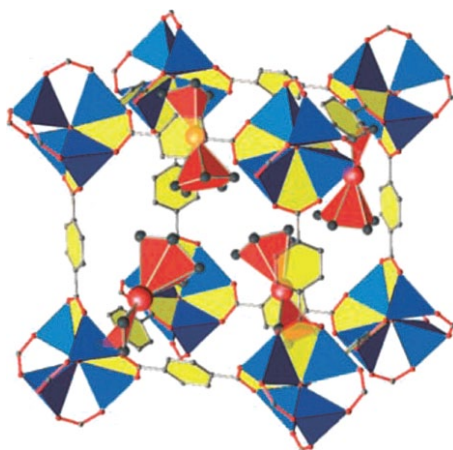


[2.5] 図 8 $(\text{NH}_4)_4[\text{MnCr}_2(\text{ox})_6] \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ の一次元細孔構造および水分子の配置²⁰⁾ (p.181)

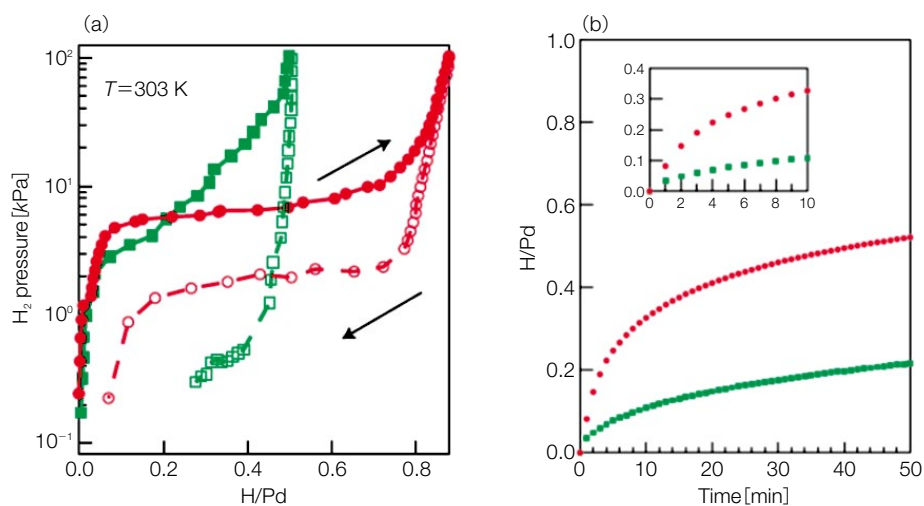


[2.6] 図 2 コア・シェル Au@Ag ナノ粒子@ZIF-8 複合体¹⁰⁾ (p.188)

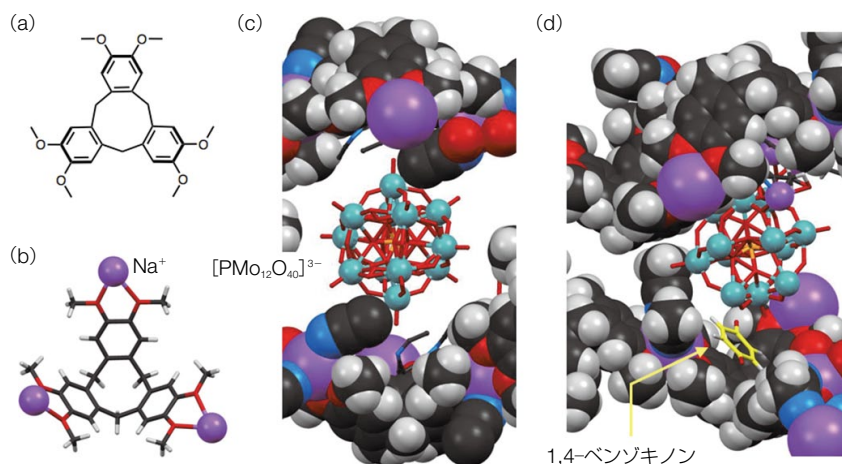
(左)HAADF-STEM 像, (右)EDS ラインスキャン



[2.6] 図 6 MOF-5 のケージの中に導入された 4 つの $(\eta^3\text{-C}_3\text{H}_5)\text{Pd}(\eta^5\text{-C}_5\text{H}_5)^{14)}$ (p.191)

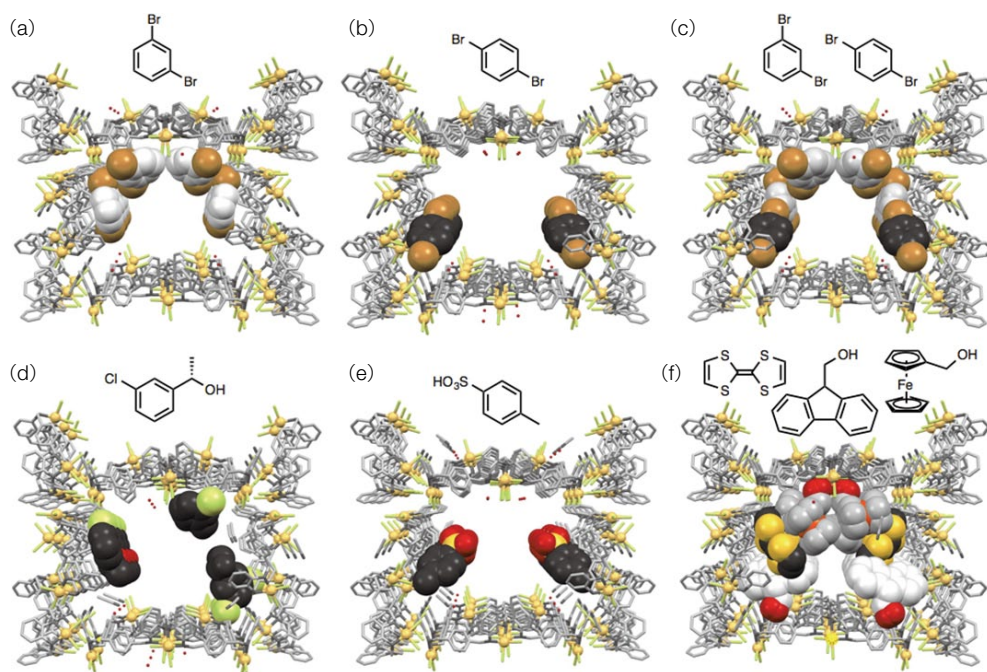


[2.6] 図 10 Pd ナノキューブ(緑)および Pd@HKUST-1 (赤) の (a) 圧力-組成等温線と (b) 水素吸蔵速度特性²³⁾ (p.194)



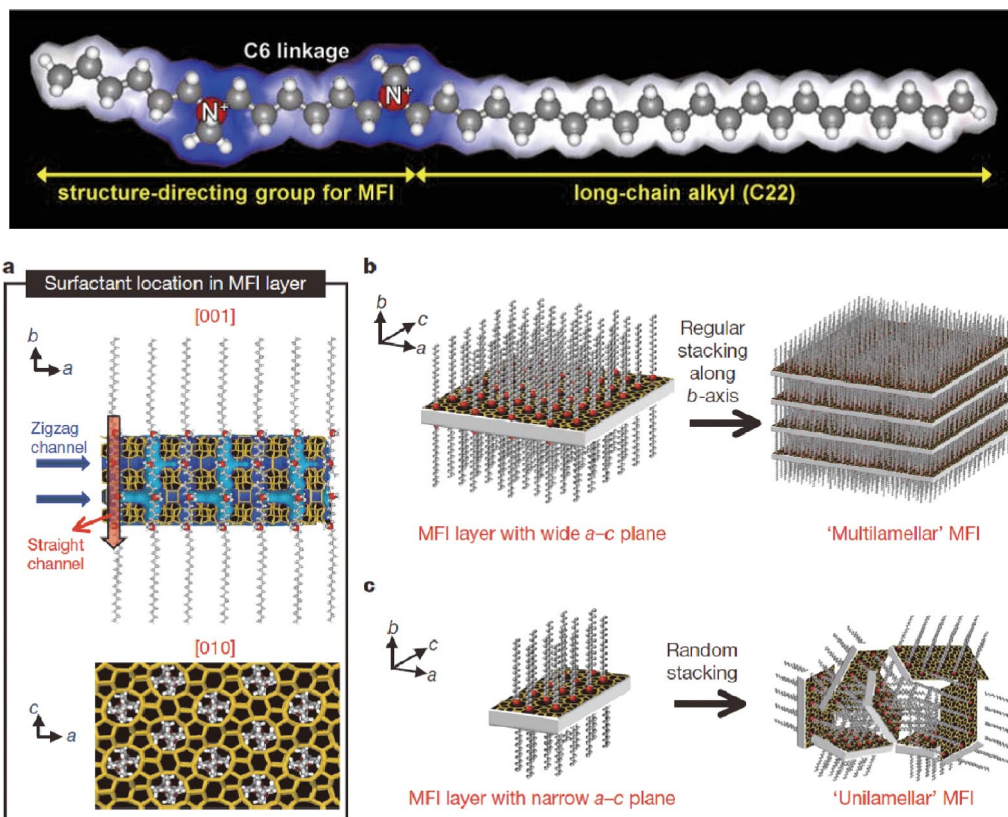
[2.8] 図4 シクロトリペラトリレン (CTV) と $\text{Na}_3\text{PMo}_{12}\text{O}_{40} \cdot n\text{H}_2\text{O}$ からなる配位高分子 CTV-POM²⁶⁾ (p.210)

(a) CTV の化学構造式 (b) 配位高分子中における CTV とナトリウムイオンからなる錯体 (c) 配位高分子 CTV-POM の結晶構造の一部 (d) 1,4-ベンゾキノン(5) が取り込まれた配位高分子 $\text{Na}_3 \cdot (\text{CTV})_2 \cdot (\text{PMo}_{12}\text{O}_{40}) \cdot (5)$ の結晶構造の一部

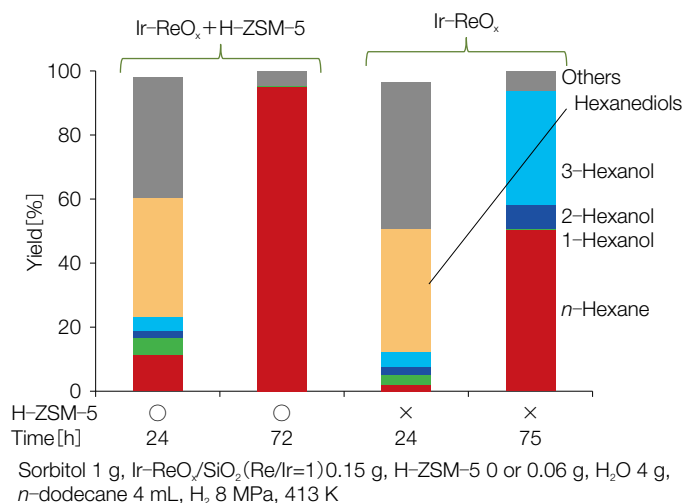


[2.8] 図6 MMF 細孔での各種ゲスト分子の配列構造^{29)~31)} (p.213)

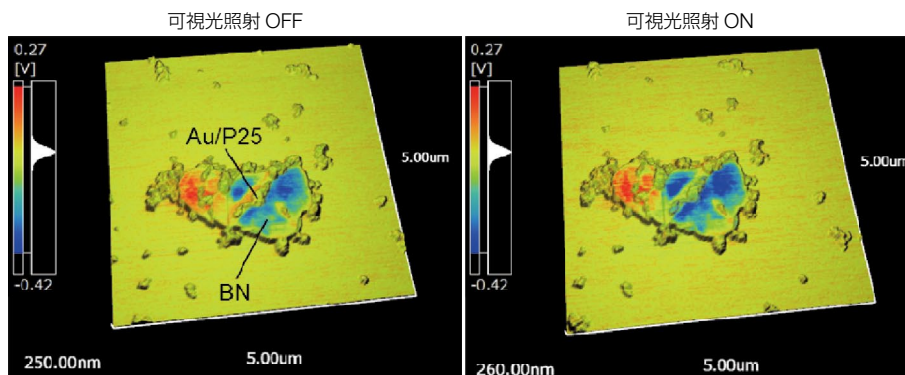
(a) *m*-ジブロモベンゼン (b) *p*-ジブロモベンゼン (c) *m*-ジブロモベンゼンと *p*-ジブロモベンゼン (d) (1*S*)-1-(3-クロロフェニル)エタノール (e) *p*-トルエンスルホン酸 (f) TTF とヒドロキシメチルフェロセン(7), 9-フルオレニルメタノール(8)



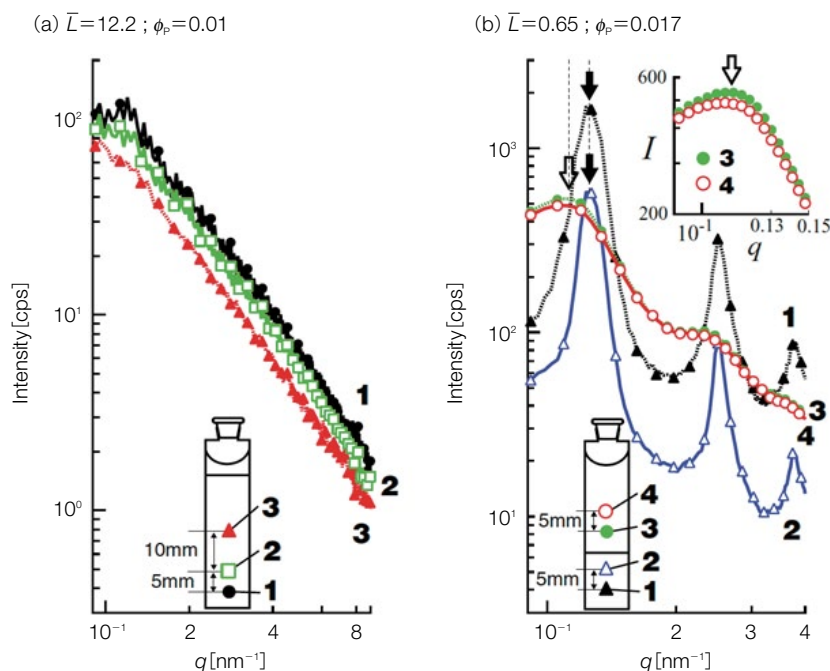
[3.6] 図 2 Gemini タイプ界面活性剤を用いる層状 MFI ゼオライトの合成 (p.271)



[3.7] 図 7 Ir-ReO_x+H-ZSM-5 および Ir-ReO_x を用いたソルビトールの水素化分解反応結果 (p.285)

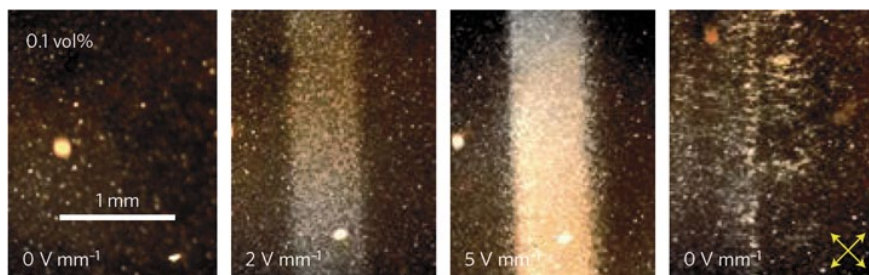


[4.8] 図 8 Au/P25 と BN をエタノール中で混合，乾燥させた試料の可視光照射前後でのケルビンフォースプローブ顕微鏡像 (p.383)



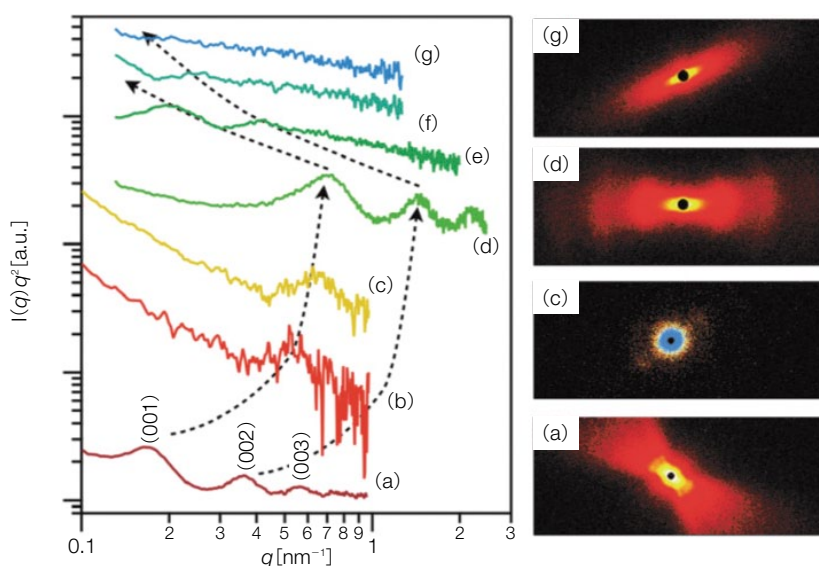
[4.9] 図 6 ナノシートの平均粒径 ($\bar{L}$) と体積分率 (ϕ_p) が異なるニオブ酸ナノシート液晶の小角 X 線散乱プロファイル⁽³⁰⁾ (p.390)

(a) $\bar{L}=12.2$ nm, $\phi_p=0.01$, ネマティック相, (b) $\bar{L}=0.65$ nm, $\phi_p=0.017$, ラメラ相。1～4 は, それぞれの散乱プロファイルを得た試料の位置 (容器底からの高さ) を示す。試料 (b) はラメラ相と等方相とが混在しており, 測定点 1, 2 ではラメラ相, 3, 4 では等方相を, それぞれ測定している。アメリカ物理学会より許可を得て引用。



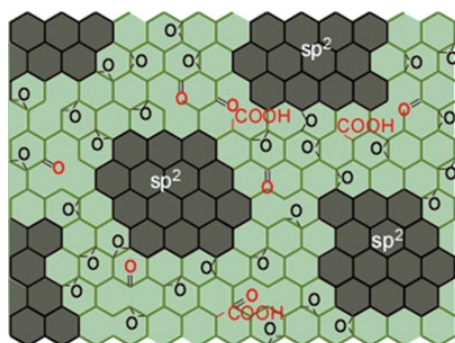
[4.9] 図 10 酸化グラフェンナノシート液晶への電場印加にともなう偏光顕微鏡像の変化³⁶⁾ (p.393)

(左→右)電場印加によってナノシートが配向して複屈折を生じ、電界強度の増加に伴って複屈折も大きくなるが、電場を切ると消失する。Nature Publishing Group より許可を得て引用。

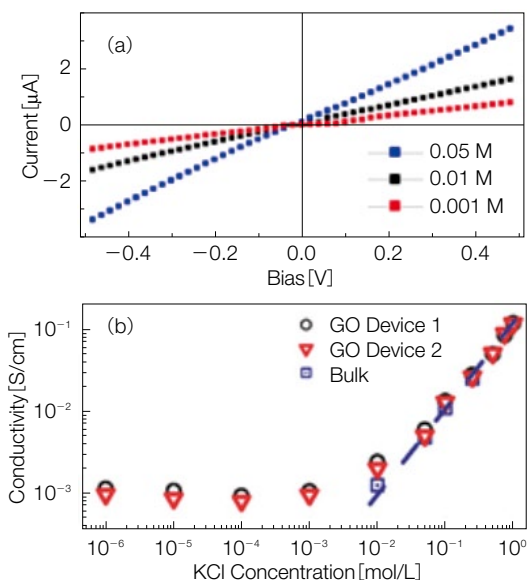


[4.9] 図 14 フルオロヘクトライト/pNIPAm ゲルの合成過程での SAXS パターン (p.396)

(a)は重合前、(b)(c)はそれぞれ重合開始後1分および10分後、(d)は重合終了時に測定した。さらに得られたゲルを水中で(e)15分、(f)30分、(g)60分膨潤し測定した。文献 40)の図をもとに作成。

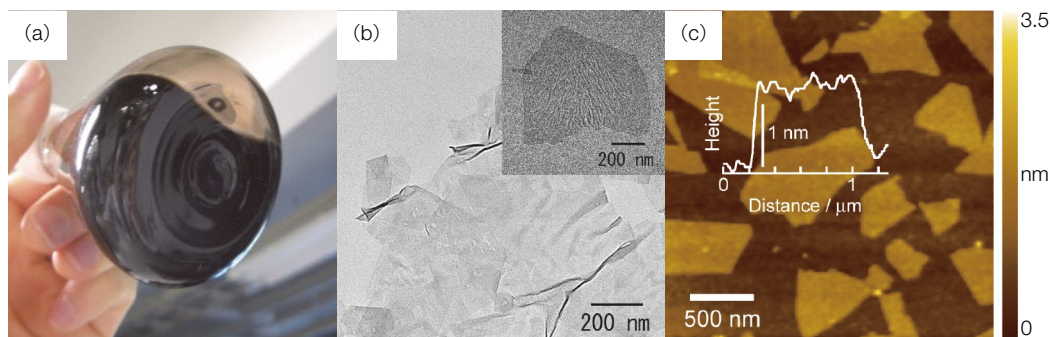


[4.11] 図 3 中の sp^3 マトリックス中の sp^2 ナノドメイン (p.412)



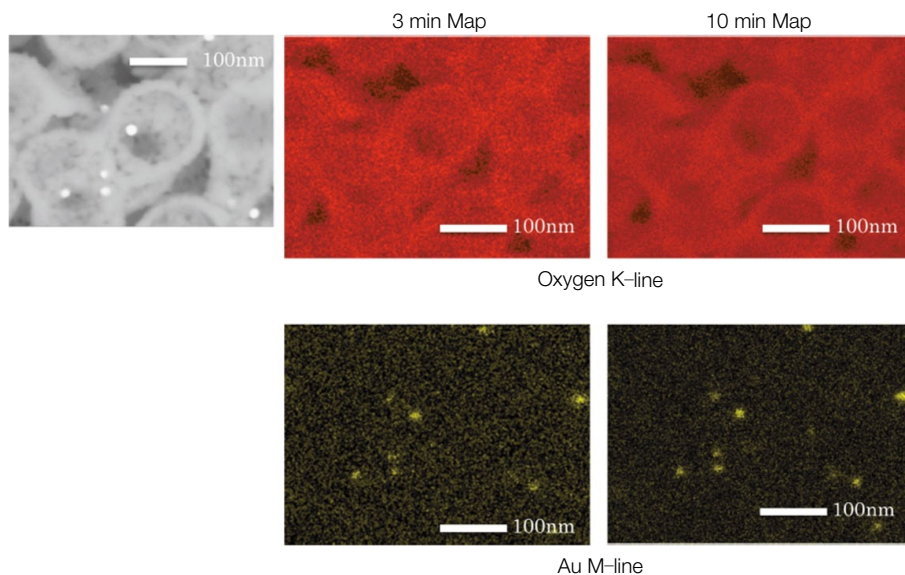
[4.11] 図 6 酸化グラフェン膜中での KCl のイオン伝導¹⁶⁾ (p.415)

(a) 各 KCl 濃度条件で測定された I-V プロット, (b) 水溶液中の塩濃度に対する酸化グラフェン膜中とバルク水溶液中でのイオン伝導度 (Reprinted with permission from 16), Copyright 2012 American chemical society)



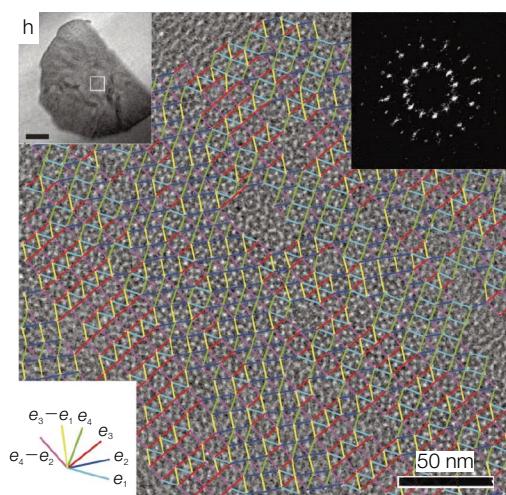
[4.12] 図 1 酸化ルテニウムナノシートの (a) コロイド溶液の写真, (b) TEM 像, (c) AFM 像 (p.423)

(Adapted and reprinted with permission from Reference 1)

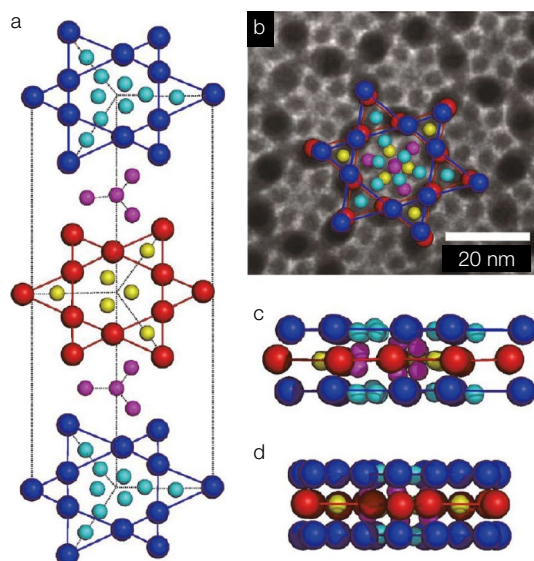


[5.1] 図7 ヨークシェル材(Au@Carbon)のBSE像とEDSマッピング像(OK α 線, AuM α 線) (p.437)

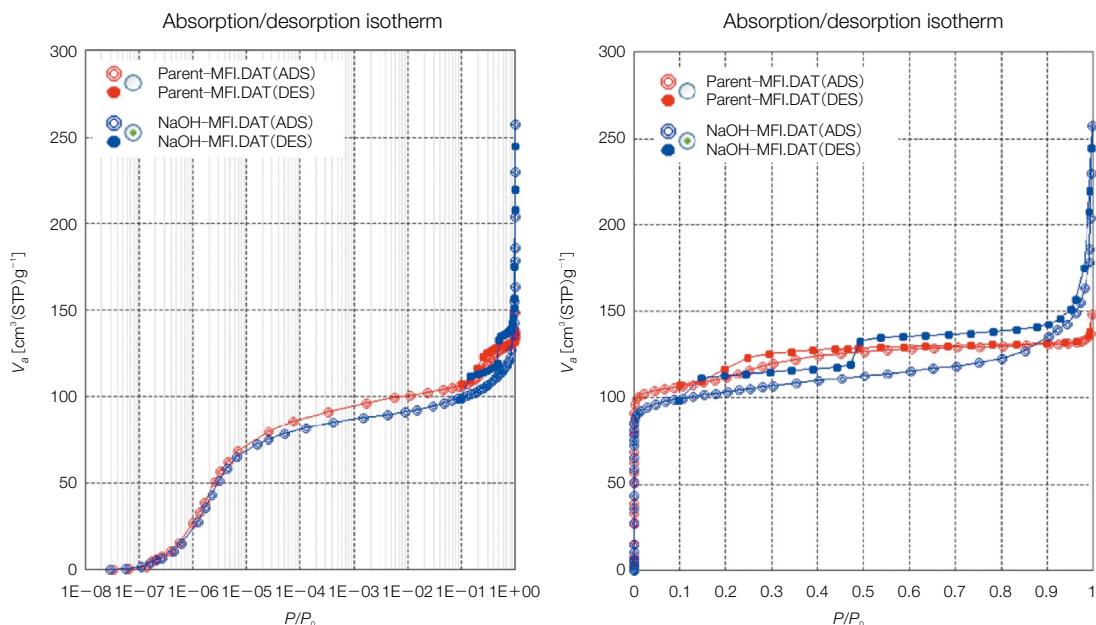
検出面積 150 mm² の EDS 検出器を 2 台利用。入射電圧 = 4 kV, ビーム電流 = 220 pA, マッピング時間 = 3, 10 分。試料バイアス = -5 kV。測定には, JSM-7800F prime を用いた。図は許可を得た上で転載(文献6), copyright 2014 AIP publishing LLC)。



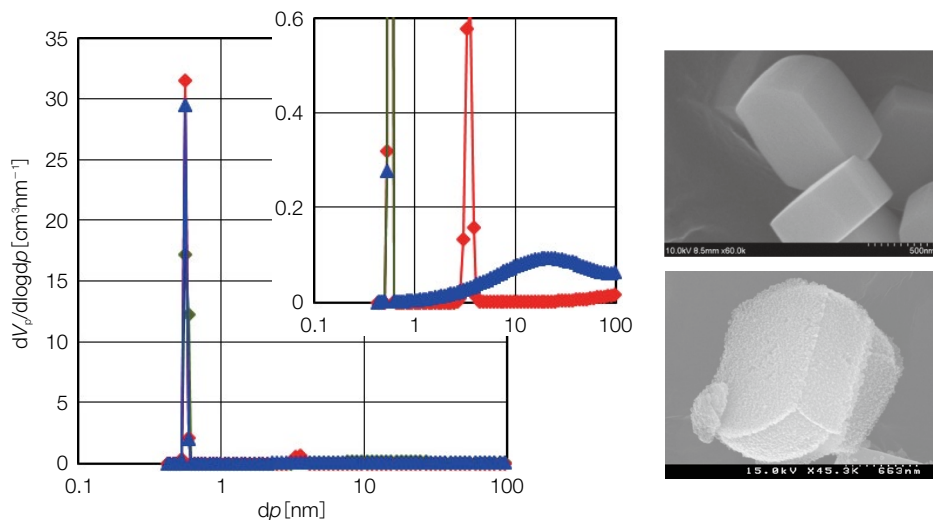
[5.2] 図2 十二回対称性を持つケージ型シリカメソ多孔体のTEM像とフーリエ回折図形⁽¹⁰⁾ (p.443)



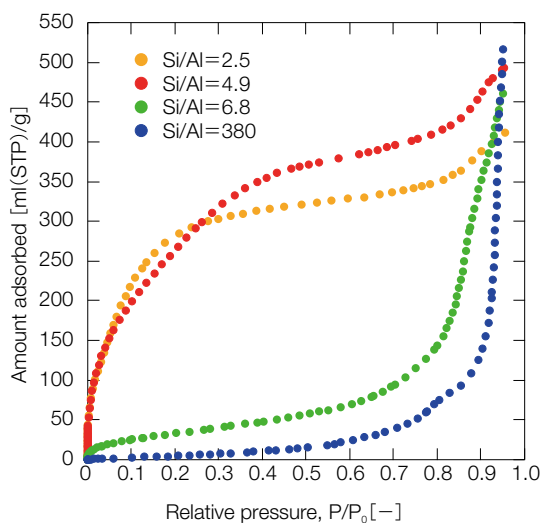
[5.2] 図7 A₆B₁₉ 構造を持つ二元系ナノコロイド結晶の構造モデル(a, c, d)とTEM像(b)⁽²⁷⁾ (p.448)



[5.5] 図 14 MFI 型ゼオライトの N_2 (77.4 K) 吸着等温線(左: 相対圧(対数) 右: 相対圧(線形)) (p.484)
(赤: Silicalite-1, 青: アルカリ処理 silicalite-1)



[5.5] 図 15 GCMC 法による細孔分布(左) (赤: シリカライト, 青: アルカリ処理) ならびに SEM 画像(右) (p.484)
(SEM 画像は上: シリカライト, 下: アルカリ処理)



[5.6] 図 3 USY ゼオライトへの水蒸気吸着等温線 (298.15 K) (p.490)

==== 発刊にあたって =====

静寂なひと時，物体と物体の間の空虚な世界…日本人はそこに，調和を見出し，粹を感じ，時にむなしい影を感じ取る。何もないそこに大きな意味がある。これが，日本人の心の真髄である。

さて，科学・技術ではどうだろうか？ 何もない空間に絶縁性などの限られた機能は見出しうるであろう。しかし，根本的には何もない，そこにはたいした機能はない。けれどもである。その空間がナノレベルになると極めて多彩な機能が忽然と現れるのである。ナノという制限された大きさでは，原子や分子，あるいはその集合体が，運動性，異方性，配向性，相互作用などさまざまな摂動を受け，広い世界では見られない新しい機能を生み出す。

ナノ空間の科学・技術は，日本人が世界の中でも稀有に持つ和の心に通じるものである。微細加工技術は器用な日本人にはお手の物だ…そんなうわべの優位さだけではない，何もない「間」の中に意味を感じ取る日本人は，このナノ空間科学を真に追及できる遺伝子を持っているのかもしれない。ナノ空間材料の科学は，日本人の特性を十分に生かしたニッポン再生の鍵となりうるのである。

本書では，日本人の若手を中心とした精鋭たちと，心の通じる外国の友人達を交えて，最新技術と未来の可能性をまとめた。書いてある事実のみならず，その行間という「間」に潜んでいる重要な可能性にも注意を払いながら，本書をご覧いただければ幸いである。

2016 年 1 月

編集委員を代表して
有賀 克彦

執筆者一覧

監修者

有賀 克彦 国立研究開発法人物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点
MANA 主任研究者

編集委員

徐 強 国立研究開発法人産業技術総合研究所 エネルギー・環境領域電池技術研究部門
上級主任研究員
神戸大学 大学院工学研究科 客員教授
木村 辰雄 国立研究開発法人産業技術総合研究所 材料・化学領域無機機能材料研究部門
主任研究員
窪田 好浩 横浜国立大学 大学院工学研究院 教授
山内 悠輔 国立研究開発法人物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点
MANA 独立研究者

執筆者 (執筆順)

有賀 克彦 国立研究開発法人物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点
MANA 主任研究者
山内 悠輔 国立研究開発法人物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点
MANA 独立研究者
木村 辰雄 国立研究開発法人産業技術総合研究所 材料・化学領域無機機能材料研究部門
主任研究員
松本 明彦 豊橋技術科学大学 大学院工学研究科 教授
中島 清隆 北海道大学 触媒科学研究所 准教授
福岡 淳 北海道大学 触媒科学研究所 教授
森 浩亮 大阪大学 大学院工学研究科 准教授
山下 弘巳 大阪大学 大学院工学研究科 教授
原 賢二 東京工科大学 工学部 准教授
犬丸 啓 広島大学 大学院工学研究院 教授
片桐 清文 広島大学 大学院工学研究院 准教授
岡本 昌樹 東京工業大学 大学院理工学研究科 准教授
呉 嘉文 国立台湾大学 工学部 准教授
北海道大学 大学院工学研究院 特任准教授
白井 宏明 北海道大学 大学院工学研究院
米澤 徹 北海道大学 大学院工学研究院 教授
吉武 英昭 横浜国立大学 大学院工学研究院 教授
前川 佳史 株式会社豊田中央研究所 稲垣特別研究室 副研究員
稲垣 伸二 株式会社豊田中央研究所 稲垣特別研究室 シニアフェロー
野村 淳子 東京工業大学 資源化学研究所 准教授

田中 俊輔	関西大学 環境都市工学部 准教授
西山 憲和	大阪大学 大学院基礎工学研究科 教授
堀毛 悟史	京都大学 大学院工学研究科 助教
古川 修平	京都大学 物質－細胞統合システム拠点 准教授
北川 進	京都大学 物質－細胞統合システム拠点 拠点長/教授
田中 耕一	関西大学 化学生命工学部 教授
高坂 亘	東北大学 金属材料研究所 助教
宮坂 等	東北大学 金属材料研究所 教授
貞清 正彰	九州大学 カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所 助教
北川 宏	京都大学 大学院理学研究科 教授
徐 強	国立研究開発法人産業技術総合研究所 エネルギー・環境領域電池技術研究部門 上級主任研究員
	神戸大学 大学院工学研究科 客員教授
猪熊 泰英	東京大学 大学院工学系研究科 講師
藤田 誠	東京大学 大学院工学系研究科 教授
塩谷 光彦	東京大学 大学院理学系研究科 教授
田代 省平	東京大学 大学院理学系研究科 准教授
窪田 好浩	横浜国立大学 大学院工学研究院 教授
稲垣 怜史	横浜国立大学 大学院工学研究院 准教授
津野地 直	広島大学 大学院工学研究院 助教
佐野 庸治	広島大学 大学院工学研究院 教授
脇原 徹	東京大学 大学院工学系研究科 准教授
吉岡 真人	東京工業大学 資源化学研究所 博士研究員
横井 俊之	東京工業大学 資源化学研究所 助教
呉 鵬	華東師範大学 化学与分子工程学院 教授
徐 楽	華東師範大学 化学与分子工程学院 博士
富重 圭一	東北大学 大学院工学研究科 教授
矢部 智宏	早稲田大学 大学院先進理工学研究科
斎藤 晃	早稲田大学 大学院先進理工学研究科
小河 脩平	早稲田大学 理工学術院先進理工学部 助教
関根 泰	早稲田大学 理工学術院先進理工学部 教授
西原 洋知	東北大学 多元物質科学研究所 准教授
京谷 隆	東北大学 多元物質科学研究所 教授

Watcharop CHAKITTISILP

	東京大学 大学院工学系研究科 助教
小池 夏萌	東京大学 大学院工学系研究科
黒田 義之	早稲田大学 高等研究所 助教
内田さやか	東京大学 大学院総合文化研究科 准教授
笹井 亮	島根大学 大学院総合理工学研究科 准教授
富永 亮	山口大学 大学院医学系研究科
鈴木 康孝	山口大学 大学院医学系研究科 助教
川俣 純	山口大学 大学院医学系研究科 教授
伊田進太郎	九州大学 大学院工学研究院 准教授

井出 裕介	国立研究開発法人物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトゥクス研究拠点 MANA 研究者
中戸 晃之	九州工業大学 大学院工学研究院 教授
宮元 展義	福岡工業大学 工学部 准教授
佐々木高義	国立研究開発法人物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトゥクス研究拠点 フェロー
長田 実	国立研究開発法人物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトゥクス研究拠点 MANA 准主任研究者
谷口 貴章	国立研究開発法人物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトゥクス研究拠点 MANA 研究者
速水 真也	熊本大学 大学院自然科学研究科 教授
松本 泰道	熊本大学 理事/副学長
望月 大	信州大学 環境・エネルギー材料科学研究所 准教授
杉本 渉	信州大学 繊維学部 教授
作田 裕介	日本電子株式会社 Scanning 系事業部門
朝比奈俊輔	日本電子株式会社 Scanning 系事業部門 主務
須賀 三雄	日本電子株式会社 Scanning 系事業部門 主幹
阪本 康弘	国立研究開発法人科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業さきがけ研究者 大阪大学 大学院理学研究科 招へい准教授
吉田 要	一般財団法人ファインセラミックスセンター ナノ構造研究所 上級研究員
佐々木優吉	一般財団法人ファインセラミックスセンター ナノ構造研究所 所長補佐/主席研究員
池田 卓史	国立研究開発法人産業技術総合研究所 材料・化学領域化学プロセス研究部門 主任研究員
吉田 将之	マイクロトラック・ベル株式会社 営業部営業推進課 課長
遠藤 明	国立研究開発法人産業技術総合研究所 材料・化学領域化学プロセス研究部門 研究グループ長

目 次

序 論 ナノ空間に何が期待できるか

有賀 克彦, 山内 悠輔

1. ナノというのはどのくらいすごいのか.....3
2. ナノ空間で起こること.....4
3. ナノ空間科学・ナノ空間材料への期待.....4

第 1 章 メソ多孔体類

1 節 総 論

木村 辰雄

1. はじめに.....9
2. 界面活性剤を利用したメソ多孔体の合成.....10
3. メソ多孔体の構造分析.....12
4. メソ多孔体の形態制御.....15
5. メソポーラスシリカを利用した主な応用研究.....17
6. おわりに.....19

2 節 吸着現象とメソ多孔体の利用技術

松本 明彦

1. はじめに.....24
2. 吸着と多孔体.....24
3. 物理吸着と化学吸着.....25
4. 固体-吸着質間の相互作用.....26
 - 4.1 非特異的相互作用および反発相互作用.....27
 - 4.2 特異的相互作用.....28
5. メソ多孔体の吸着等温線.....29
6. まとめ.....31

3 節 メソ多孔性酸塩基触媒

中島 清隆, 福岡 淳

1. はじめに.....33
2. 表面修飾によるシリカ表面への有機官能基の導入法.....33
3. メソポーラス固体酸触媒.....34
 - 3.1 メソポーラスシリカへのスルホ基導入.....34
 - 3.2 アルキルスルホ基を導入したメソポーラスシリカの合成.....34
 - 3.3 ベンゼンスルホ基を導入したメソポーラスシリカ.....36

3.4 化学修飾によるメソポーラス有機シリカへのベンゼンスルホ基の導入	37
4. メソポーラス固体塩基触媒	40
4.1 界面活性剤を含むメソポーラスシリカ前駆物質の固体塩基性質	40
4.2 アミンを固定したメソポーラスシリカの合成	40
5. おわりに	43

4 節 異種ユニット導入と触媒作用

森 浩亮, 山下 弘巳

1. はじめに	45
2. シングルサイト光触媒の特異な反応性	45
3. ナノ多孔性材料と複合化した TiO_2 光触媒	47
4. メソ細孔を利用した金属ナノ粒子・ナノロッド触媒の合成	47
5. コアシェル型 $\text{Pd}/\text{SiO}_2/\text{@Ti}$ 含有メソポーラスシリカ触媒	48
6. メソポーラスシリカ細孔内に構築した Ir 錯体	49
7. メソポーラスシリカ細孔内に構築した Pt 錯体	51
8. シングルサイト光触媒を組み込んだメソポーラスシリカ薄膜	52
9. おわりに	53

5 節 規則性メソ多孔体を活用した担持金属触媒

原 賢二

1. 担持金属触媒における規則性メソ多孔体の利用	55
1.1 担持金属触媒	55
1.2 担持金属触媒における担体の表面積の効果	55
1.3 規則性メソ多孔体上の担持金属触媒	56
2. 規則性メソ多孔体を活用した担持金属触媒による反応例	56
2.1 メソポーラスシリカ担持白金触媒による PROX 反応	56
2.2 メソポーラスシリカ担持白金触媒によるエチレンの酸化的除去反応	57
2.3 メソ細孔材料に担持した金属触媒による CO 選択メタン化反応	58
2.4 メソ細孔材料に担持した金属触媒による FT 合成反応	58
3. 規則性メソ多孔体を活用した担持金属触媒の今後の展望	59

6 節 粒子(触媒成分)との複合化

犬丸 啓, 片桐 清文

1. はじめに	61
2. 酸化チタン粒子をメソポーラスシリカに埋め込んだ新規な複合体の合成と構造	61
3. 酸化チタン粒子-メソポーラスシリカ複合体の分子選択的光触媒機能	64
4. SrTiO_3 ナノキューブを用いたメソポーラスシリカ複合体	66
5. おわりに	68

7 節 中空や鈴型に構造を制御したメソポーラスシリカ

岡本 昌樹

1. 緒 言	70
2. 中空メソポーラスシリカ	71

2.1 中空メソポーラスシリカの合成	71
2.2 薬物徐放容器としての利用	72
2.3 ミクロ反応容器としての利用	73
3. 鈴型メソポーラスシリカ	75
3.1 鈴型メソポーラスシリカの合成	75
3.2 ミクロ反応容器としての利用	75
4. まとめ	76

8 節 メソポーラスシリカナノ粒子の構造制御と DDS 応用

呉 嘉文, 白井 宏明, 米澤 徹

1. 緒言	78
2. 粒径に影響を与えるパラメータ	79
3. MSN の分散	81
4. MSN を用いたナノ粒子	82
5. 今後の展開	84

9 節 有機分子や無機イオンの吸着におけるナノ空間構造の効果

吉武 英昭

1. はじめに	86
2. 吸着サイトの高密度化による効果	86
2.1 有機分子吸着選択性の発現	86
2.2 非晶質表面での吸着相の形成と相転移	87
3. 表面官能基間距離 (分布) の測定	88
4. ナノ細孔内部の表面曲率の効果	91
4.1 分子インプリント法による芳香族位置異性体の吸着選択性の向上	91
4.2 グラフト法による遷移金属錯体シランの固定	93
5. まとめ	94

10 節 メソポーラス有機シリカの機能設計

前川 佳史, 稲垣 伸二

1. はじめに	96
2. メソポーラス有機シリカの分類と構造	96
2.1 表面修飾型と骨格導入型	96
2.2 構造	96
3. PMO の高機能化	98
3.1 有機シラン原料の機能設計	98
3.2 骨格有機基の化学修飾	98
4. PMO の応用	99
4.1 金属錯体の固定化担体	99
4.2 固体有機分子触媒	100
4.3 光捕集アンテナ機能	100
4.4 固体分子系光触媒	101

4.5 多色発光材料	102
4.6 光電変換素子	102
5. 今後の展望	103

11 節 非シリカ系酸化物，結晶と応用

野村 淳子

1. 非シリカ系酸化物	106
1.1 はじめに	106
1.2 遷移金属酸化物メソ多孔体の合成	106
2. 結晶と応用	109
2.1 はじめに	109
2.2 メソ多孔構造を維持した結晶化手法	109
2.3 結晶化前後での物性変化と触媒反応特性の変化	113
3. 今後の展望	115

12 節 有機鋳型法によるメソポーラスカーボンの合成

田中 俊輔，西山 憲和

1. はじめに	116
2. メソポーラスカーボンの合成	117
3. メソポーラスカーボンの細孔構造制御	119
4. メソポーラスカーボンの形態制御	121
5. メソポーラスカーボンの EDLC 特性	123
6. おわりに	124

第2章 金属錯体系 (MOF 類)

1 節 総 論

堀毛 悟史

1. はじめに	129
2. MOF の特徴	129
2.1 細孔構造，細孔表面積	129
2.2 熱安定性	130
2.3 化学安定性	130
2.4 代表的な MOF と最近の注目すべき多孔性材料	130
3. MOF の合成	132
3.1 バルク試料	132
3.2 固溶化，階層化，ナノ粒子化	133
3.3 欠 陥	134
4. 化学機能	134
4.1 ガス吸着，分離，放出	134
4.2 不均一触媒能	135
4.3 高分子合成	135

5. 物理機能	136
5.1 電子伝導	136
5.2 イオン伝導	137
5.3 その他	138
6. 材料特性	138
6.1 力学特性	138
6.2 相転移	138
7. おわりに	139

2 節 MOF のメゾスケール・マクロスケール構造化

古川 修平, 北川 進

1. はじめに	142
2. マクロ構造体の合成戦略	143
2.1 マクロ構造テンプレート (ハードテンプレート)	143
2.2 分子テンプレート (ソフトテンプレート)	144
2.3 蒸発やゲル化による反応の空間的拘束法	144
2.4 固液界面における反応 (犠牲反応)	145
2.5 液液界面における反応	145
2.6 トップダウンプロセッシング	145
3. ゼロ次元構造体	145
3.1 ハードテンプレートによるコンボジット材料創製	145
3.2 界面を利用したマイクロファブリケーションによる中空構造体創製	146
4. 一次元構造体	147
4.1 エレクトロスピニング法による PCP/MOF ファイバー合成	147
4.2 電場によるナノ結晶の一次元集積化	148
5. 二次元構造体	148
5.1 ハードテンプレート	149
5.2 蒸発法によるパターンニング	149
5.3 犠牲テンプレートによる膜化	150
5.4 PCP/MOF 結晶の集積化	150
5.5 PCP/MOF 結晶の剥離	150
6. 三次元構造体	150
6.1 ソフトテンプレートによる階層的空間材料創製	151
6.2 犠牲テンプレート法 (配位レプリケーション法) による階層的空間材料創製	151
7. おわりに	152

3 節 ホモキラル多孔性金属有機構造体

田中 耕一

1. はじめに	154
2. ホモキラル金属有機構造体を用いた不斉触媒反応	154
2.1 触媒活性な配位不飽和金属サイトを含むホモキラル MOF の合成と不斉触媒反応	154
2.2 ホモキラル MOF の合成後修飾による触媒活性なホモキラル MOF の合成と不斉触媒反応	156

2.3 キラルな金属錯体をビルディングブロックに用いるホモキラル MOF の合成と 不斉触媒反応	157
2.4 キラルテンプレートをを用いるホモキラル MOF の合成と不斉触媒反応	158
2.5 有機触媒サイトを持つホモキラル MOF の合成と不斉触媒反応	158
3. ホモキラル金属有機構造体によるエナンチオ選択的ゲスト吸着	158
4. ホモキラル金属有機構造体をキラル固定相に用いた HPLC による光学異性体分離	160

4 節 酸化還元活性 MOF —選択的ガス吸着と物性制御—

高坂 亘, 宮坂 等

1. 緒 言	164
2. 配位不飽和な金属サイトを利用したガス吸着選択性の発現	165
2.1 格子中への配位不飽和金属サイトの導入	165
2.2 配位不飽和金属サイトでの電荷移動による小分子安定化	166
2.3 配位と同期した構造変化に基づく選択的 CO 吸着	167
3. 酸化還元活性な構築素子からなる PCP/MOF の設計とガス吸着制御	168
3.1 酸化還元活性構築素子を用いる	168
3.2 TCNQ を構築素子に用いた集積体における選択的 O ₂ , NO 吸着	169
3.3 水車型 Ru 二核 (II, II) 錯体を構築素子とする集積体の選択的 NO 吸着	170
4. ガス吸着を摂動とするホスト骨格の物性制御	172
4.1 物性制御を目指した多孔性格子の設計	172
4.2 ゲートオープン型吸着に同期した誘電応答	172
4.3 NO 雰囲気下における交流電気伝導度の増大	173
5. 結 語	174

5 節 プロトン伝導性配位高分子

貞清 正彰, 北川 宏

1. はじめに	176
1.1 プロトン伝導体とプロトン伝導機構	176
1.2 プロトン伝導度の測定	177
2. プロトン伝導性配位高分子	177
2.1 プロトン伝導性配位高分子の設計	178
2.2 シュウ酸架橋配位高分子のプロトン伝導性	179
2.3 さまざまな酸性基の導入とプロトン伝導性	181
2.4 配位子欠損の導入による高プロトン伝導性	183
3. 非水型プロトン伝導性配位高分子	184

6 節 金属ナノ粒子@配位高分子複合体

徐 強

1. はじめに	187
2. 金属ナノ粒子@MOF 複合体の合成	187
2.1 液相浸潤法	187
2.2 気相浸潤法	190
2.3 鋳型合成法	191

3. 金属ナノ粒子@MOF 複合体の応用	192
3.1 水素貯蔵への応用	192
3.2 不均一系触媒への応用	193
3.3 センシングへの応用	196
4. おわりに	196

7 節 結晶スポンジ法

猪熊 泰英, 藤田 誠

1. はじめに	198
2. 単結晶 X 線構造解析と細孔性錯体	198
3. 結晶スポンジ法の原理：細孔性結晶中のホスト-ゲスト化学	199
4. 結晶スポンジ法を用いた微量化合物の構造解析	201
5. 結晶スポンジ法の応用	203
5.1 LC-SCD 法	203
5.2 絶対立体配置の決定	203
5.3 合成化学における生成物の構造決定	205
6. 将来展望	205

8 節 環状化合物からなる多孔性物質

塩谷 光彦, 田代 省平

1. 序	207
2. 環状ホスト化合物からなる多孔性配位高分子	208
3. 環状金属錯体からなる多孔性分子結晶	211
4. おわりに	215

第3章 ゼオライト類

1 節 総 論

窪田 好浩

1. はじめに	219
2. ゼオライトの骨格タイプコード	221
3. ゼオライトの細孔径	222

2 節 SDA を用いた新しいゼオライトの合成

稲垣 怜史, 窪田 好浩

1. ゼオライト骨格と SDA とのホスト-ゲストケミストリー	226
2. SDA とシリケート種との疎水性相互作用	226
3. 大孔径ゼオライト合成のための SDA	229
4. 小細孔ゼオライト合成のための SDA	231
5. 最近のトピック	233

3 節 ゼオライト水熱転換法

津野地 直, 佐野 庸治

1. はじめに	236
2. FAU-*BEA ゼオライト水熱転換	237
3. ゼオライト水熱転換における OSDA の影響	238
4. 出発ゼオライトの結晶構造の影響	239
5. 種結晶存在下でのゼオライト水熱転換	240
6. OSDA フリーでのゼオライト水熱転換	240
7. OSDA/種結晶フリーでのゼオライト合成	242
8. ゼオライト水熱転換過程	243
9. おわりに	244

4 節 粉碎・再結晶化法によるゼオライト微細粒子の調製

脇原 徹

1. 要 旨	246
2. 緒 言	246
3. 粉碎・再結晶化法	247
4. 粉碎・再結晶化法を行うための必要条件	248
5. 粉碎・再結晶化法の具体例	250
6. 粉碎・再結晶化法の新展開	252
6.1 高速再結晶化法の開発	252
6.2 組成・耐久性制御の可能性	252
7. まとめ	253

5 節 金属ユニット導入ゼオライトと触媒

吉岡 真人, 横井 俊之

1. はじめに	255
2. 金属ユニット導入ゼオライトの合成	255
2.1 水熱合成法	255
2.2 フッ化物法	256
2.3 ドライゲルコンバージョン法 (DGC 法)	256
2.4 ポスト合成法	256
3. 金属ユニット導入ゼオライトの構造解析	257
3.1 NMR による分析	257
3.2 IR および UV-vis による分析	258
3.3 XRD による分析	258
4. 注目されている金属ユニット導入ゼオライト	258
4.1 Ti ユニット導入 MFI 型ゼオライト	258
4.2 Ti ユニット導入 MWW 型, IEZ-MWW 型ゼオライト	260
4.3 Ti ユニット導入 MSE 型ゼオライト	262
4.4 Al あるいは Ga ユニット導入 CHA 型ゼオライト	263
4.5 Al ユニット導入 CON 型ゼオライト	263
4.6 Sn ユニット導入*BEA 型ゼオライト	264

5. おわりに	265
---------	-----

6 節 層状ゼオライトの創製と構造修飾

呉 鵬, 徐 楽

1. はじめに	268
2. 層状ゼオライトの合成	269
2.1 通常水熱合成	269
2.2 特殊鑄型剤による新規合成	270
2.3 ゲルマノシリケートの加水分解による層状ゼオライトのポスト合成	271
3. 層状ゼオライトの後処理による構造修飾	272
3.1 層状ゼオライトの層間膨張	272
3.2 層状ゼオライトの層間剥離とピラー	273
3.3 層状ゼオライトの部分的な層間剥離	274
3.4 層状ゼオライトの層間拡張	274
3.5 層状ゼオライトの後処理によるほかのトポロジーへの転換	275
4. おわりに	275

7 節 バイオマス

富重 圭一

1. バイオマス資源とバイオマスリファイナリにおける基礎化学品について	278
2. バイオマスリファイナリ関連の反応について：石油資源との比較	280
3. ゼオライトを用いたバイオマス関連基質の触媒反応例	281
3.1 糖類の合成や変換に関するもの	281
3.2 バイオオイルに関するもの	282
3.3 炭素-酸素結合の水素化分解反応に関するもの	283

8 節 メタン転換・C1 化学におけるゼオライト

矢部 智宏, 斎藤 晃, 小河 脩平, 関根 泰

1. はじめに	288
2. MTG・MTO・DTO	288
3. Fischer-Tropsch 合成 (FTS)	291
4. MTB	293
5. おわりに	294

9 節 ゼオライト鑄型炭素の合成, 特徴, 応用

西原 洋知, 京谷 隆

1. はじめに	296
1.1 鑄型炭素化法	296
1.2 鑄型炭素化法の歴史	297
2. ZTC の合成	299
2.1 ゼオライトの選択	299
2.2 ゼオライトへの炭素の充填	300

3. ZTC の特徴	303
3.1 分子構造	303
3.2 規則性メソポーラスカーボン (OMC) との比較	304
3.3 機械的な柔軟性	305
4. ZTC の応用	305
4.1 水素貯蔵	305
4.2 電気二重層キャパシタ	307
5. おわりに	308

第 4 章 その他のナノ空間材料

1 節 多孔性有機シリカハイブリッド材料

Watcharop CHAIKITTISILP, 小池 夏萌

1. はじめに	313
2. ミクロ孔を持つ有機シリカ多孔体	313
3. メソ孔を持つ有機シリカ多孔体	316
4. 多孔質有機シリカナノ粒子	320
5. 有機シリカ多孔体の応用	322
5.1 ドラッグデリバリー	323
5.2 触 媒	323
5.3 低誘電率材料	323
6. おわりに	324

2 節 コロイド鑄型, マクロポーラス多孔体

黒田 義之

1. はじめに	325
2. コロイド鑄型法による特異なナノ空間材料の調製	326
2.1 形態制御されたナノ粒子を合成するための反応場	326
2.2 コロイド結晶の劈開による二次元鑄型	327
2.3 非対称構造の形成	328
3. コロイド鑄型法で得られるナノ空間材料の応用例	329
3.1 ゼオライトナノ粒子およびゼオライト分離膜	329
3.2 蓄電デバイス用電極	331
4. おわりに	332

3 節 イオン結晶の階層的構築

内田 さやか

1. 分子性イオン結晶の特長	334
2. ポリオキソメタレートアニオンを構成ブロックとしたイオン結晶	335
3. イオン結晶の階層的構築	337
4. 今後の展望	341

4 節 カーボン材料 (ゼオライト転写以外)

有賀 克彦

1. はじめに：炭素で規則性ナノ空間をつくる	342
2. デザインされたカーボンナノ空間材料	343
3. 積層化されたカーボンナノ空間	346
4. 階層構造を持つカーボンナノ空間	348
5. 超分子的につくられた多孔性ナノカーボン材料	350
6. まとめ	351

5 節 層状物質を利用した検知センサーの開発

笹井 亮

1. はじめに	352
2. ガス中の特定物質を検知可能なセンサーの開発	353
3. 溶液中での検知センサー	357
4. おわりに	359

6 節 非線形光学材料としての無機ナノシートおよびその関連物質

富永 亮, 鈴木 康孝, 川俣 純

1. 非線形分極と非線形光学効果	361
2. 非線形光学効果とナノシート	362
3. 半導体ナノシートを利用した多重量子井戸構造の構築とその非線形光学特性	363
4. グラフェンナノシートの光制限素子としての利用	363
5. 波長変換能を有する無機ナノシート-有機化合物ハイブリッド材料	363
6. 二光子吸収特性に優れた無機ナノシート-有機化合物ハイブリッド材料	364
7. おわりに	365

7 節 層状化合物・ナノシート光触媒

伊田 進太郎

1. はじめに	367
2. ナノシート光触媒	367
2.1 Rh-ドーブ $\text{Ca}_2\text{Nb}_3\text{O}_{10}$ ナノシート光触媒	368
2.2 N-ドーブ $\text{AE}_2\text{M}_5\text{O}_{10}$ (AE: Ca, Sr, Ba, M: Nb, Ta) ナノシート光触媒	369
2.3 Tb^{3+} -ドーブ $\text{Ca}_2\text{Ta}_3\text{O}_{10}$ ナノシート光触媒	369
2.4 p 型半導体ナノシート膜の作製と光電気化学的水素生成	370
3. ナノシート pn 接合	370
4. 光触媒反応中心の直接観察	374

8 節 層状物質—光触媒反応促進剤—

井出 裕介

1. はじめに	378
2. 生成物の分子認識	378
3. 副生物の分子認識	380

4. 電荷分離	381
5. その他	383
6. おわりに	385

9 節 ナノシート液晶と異方性ゲル

中戸 晃之, 宮元 展義

1. はじめに	386
2. ナノシート液晶の基本的特徴	386
3. ナノシート液晶が形成する空間構造	388
3.1 液晶相の構造—ネマティック相とラメラ相	388
3.2 ラメラ相の階層構造	389
4. ナノシート液晶の配向制御による異方性空間	390
4.1 外場印加による液晶の配向制御	390
4.2 電場配向	391
4.3 電場印加の制御によるマルチスケール空間の構築	393
5. ナノシート液晶—高分子複合化による異方性ゲル	395
6. おわりに	399

10 節 ナノシートでつくる新しい空間材料

佐々木 高義, 長田 実

1. はじめに	402
2. 酸化物ナノシートの合成	402
3. ナノシートの集積化によるナノ構造ならびに空間構造の構築	404
4. ナノシートの誘電機能	407
5. ナノシートの積木細工で新しい電子デバイス	409
6. おわりに	410

11 節 酸化グラフェン

谷口 貴章, 速水 真也, 松本 泰道

1. はじめに	411
2. 酸化グラフェン	411
2.1 酸化グラフェンの構造	411
2.2 酸化グラフェンの合成法	413
2.3 酸化グラフェンの還元法	414
3. ナノ空間材料としての酸化グラフェン	414
3.1 グラファイト層間化合物	414
3.2 酸化グラフェン層間でのイオン伝導	415
4. GO を固体電解質とした電気化学デバイス	418
4.1 GO を固体電解質とした燃料電池 (GOFC)	418
4.2 GO を固体電解質とした鉛蓄電池 (GOLB)	419
4.3 GO を用いたスーパーキャパシタ	420
5. おわりに	420

12節 ナノシートを利用した電気化学応用

望月 大, 杉本 渉

1. はじめに	422
2. 電極材料としてのナノシート	422
3. ナノシートを使用した電極作製方法	423
4. 電気化学デバイスへの応用	424
4.1 スーパーキャパシタ応用	424
4.2 燃料電池電極触媒応用	425
4.3 光電気化学応用	427
5. まとめ	429

第5章 分 析

1節 最新型 FE-SEM による超高分解能観察と分析

作田 裕介, 朝比奈 俊輔, 須賀 三雄

1. はじめに	433
2. 最新の HRSEM 関連技術	433
2.1 低電圧 HRSEM	433
2.2 エネルギーフィルタ	433
2.3 クロスセクションポリッシャー	434
2.4 特性 X 線分析	434
3. ナノ空間材料の観察例	435
3.1 メソポーラス LTA	435
3.2 メタルオーガニックフレームワークの細孔観察	435
3.3 ヨークシェル材の材料別形態観察	436
3.4 クロスセクションポリッシャー (CP) による断面形成	437
3.5 ヨークシェル材の組成分析	437
3.6 軟 X 線分光器 (SXES) による結合状態分析	438
4. まとめ	438

2節 透過電子顕微鏡法を用いたメソスケール構造解析

阪本 康弘

1. はじめに	440
2. 透過電子顕微鏡法を用いた微細構造解析	441
2.1 シリカメソ多孔体と微細構造解析	441
2.2 二元系ナノコロイド結晶の微細構造解析	443
3. 電子線結晶学を用いた三次元構造解析	444
3.1 結晶としてのシリカメソ多孔体	444
3.2 シリカメソ多孔体と電子線結晶学	444
3.3 新奇規則性多孔質材料の三次元細孔構造	445
4. 電子線トモグラフィを用いた三次元構造解析	446

4.1 メソ構造材料と電子線トモグラフィ	446
4.2 メソ構造材料の三次元構造解析例	446
5. 球面収差補正走査透過電子顕微鏡法を用いた元素マッピング	448
6. おわりに	449

3 節 電子顕微鏡法によるナノ空間材料の解析

吉田 要, 佐々木 優吉

1. はじめに	451
1.1 ゼオライト観察における電子線照射損傷	451
1.2 収差補正技術	451
1.3 HRTEM 法と STEM 法の結像原理	452
2. ゼオライト骨格の高分解能観察	456
2.1 AC-STEM 法による骨格構造観察	456
2.2 AC-HRTEM 法による骨格構造観察	457
3. 細孔内カウンターカチオンの直接観察	458
3.1 AC-STEM 法によるカチオン観察	458
3.2 AC-HRTEM 法によるカチオン観察	459
4. まとめ	460

4 節 ゼオライトの X 線結晶構造解析

池田 卓史

1. はじめに	461
2. 粉末回折法による構造解析	461
3. リートベルト解析の進展	462
4. 非経験的構造解析	463
5. 固体 NMR と粉末 X 線回折の組み合わせによる構造決定	465
6. HR-TEM と PXRD のコンビネーション解析	467
7. 電子線回折トモグラフィーと PXRD のコンビネーション解析	470
8. おわりに	473

5 節 ガス吸着によるポーラス材料のキャラクタリゼーション

吉田 将之

1. はじめに	476
2. 次世代型吸着等温線測定装置 — BELSORPmax —	476
3. GCMC 法	477
4. 活性炭素繊維の極低圧 N_2 吸着等温線測定による GCMC 法ならびに α_s 法による細孔構造評価	480
5. メソポーラスゼオライトの N_2 (77.4 K), Ar (87.3 K) の極低圧吸着等温線によるキャラクタリゼーション	483
5.1 メソポーラス MFI 型ゼオライト	483
5.2 メソポーラス FAU 型ゼオライト	485
6. おわりに	485

6 節 蒸気吸着

遠藤 明

1. はじめに	487
2. 蒸気吸着等温線の測定	487
2.1 定容法における留意点	487
2.2 重量法における吸着等温線の測定と留意点	488
3. 水蒸気吸着	489
3.1 ゼオライトへの水蒸気吸着	489
3.2 メソポーラスシリカへの水蒸気吸着	491
4. その他の蒸気吸着	492
4.1 VOC 吸着	492
4.2 低級アルコールの吸着	492
4.3 その他の蒸気の吸着	493
5. おわりに	493



序 論

ナノ空間に 何が期待できるか

1 ナノというのはどのくらいすごいのか

本書では、ナノ空間に関する最先端科学技術の粋を集積している。そこでこの序論では、ざっくり簡単にナノ、ナノ空間、ナノ空間材料について概観してみたい。さて、ナノとは何か、言うまでもなく10億分の1のことである。ただ、目に見えないものはいくら小さくてもその小ささには実感はわからない。そこで、10億分の1という倍率を大きな地球で考えてみる(図1)。例えば、地球の直径は12,742 kmつまりおよそ 10^4 km (10^7 m)である。この10億分の1 (10^{-9})の大きさは、 10^{-2} m すなわち1 cmである。人間の大きさが1 m オーダーだとすると1 nmの物体を研究するというのは、地球大の人間が地球上のコインを扱うのと同じである。サイズを10倍ずつ大きくして考えてみると、地球のもっと外から地上のゴルフカップの中にボールを入れるのと等しい芸当を成し遂げるのがナノ空間の科学・技術と言える。宇宙空間からのホールインワンを狙うのが、ナノテクノロジーあるいはナノ空間の科学と言えるのである。

このようなナノに関わる科学技術は、われわれの身の回りの常識から考えるととんでもなく高度な技術であることは確かである。ナノテクノロジーを推進することが現代科学の発展に大きく寄与することは疑いようもないが、ある機能を非常に小さな構造やナノマシンとも呼ばれるような超微細機械で達成すると、情報や機能の超高密度の集積がなされ手に持てるようなデバイス構造の中にとてつもない量の情報が蓄積されることになる。アメリカ大統領のビル・クリントンが、米国の国家ナノテクノロジーイ

ニシアティブ (NNI) での演説の際に述べた「国会図書館の情報を角砂糖の大きさのメモリに収容する」というのは、このナノテクノロジーの方向性を強く示している。

ナノテクノロジーは、さまざまなものを極限的に小さくして利便性を得るということにとどまらない。機械を小さくするとどんないいことがあるか？それは、ナノテクノロジーには及ばないものの機械を小さくしてきた各種のマイクロテクノロジー技術(100万分の1技術)の成果に見ることができる。例えば、微細加工技術によって、固定電話はより高度の機能を持ち、手で持ち運ぶことができる携帯電話やスマホに進化した。固定電話の時代には、相手に連絡をつけようとする、電話ボックスを探し相手の家に電話をする。ただし、相手はそのとき家にいるとは限らない。今考えると、大変不確実なことがのんびりとまかり通っていた。スマホを持ち運べる今の時代は、好きなときに相手に確実にメッセージを伝えられる。この生活様式の大きな変化は、機械のもとへ人間が出向くかということと、人間とともに機械が持ち運ばれるかということの差である。これを可能にしたのが、微細加工技術によってデバイスを小型化し、人間とのサイズ逆転をはかったという技術革新である。この効果の及ぶ範囲は、便利になったという表向きの変革にはとどまらない。人間が機械のもとに出向くのではなく、人間の行動に機械が付随するということは、機械の利用に人間の行動が制限されないということである。つまり、必要な機械を使うために人は特定の場所に集まらなくて良いことになり、人口集中や交通渋滞などの問題が解決されえる。また、小さな機械が、少ない資源か

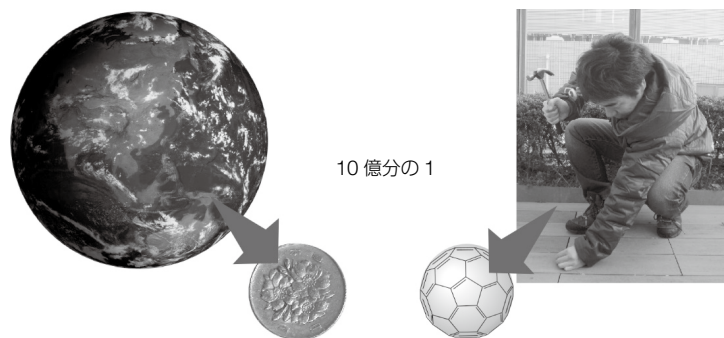


図1 10億分の1の大きさとは？

序 論

ら効率よく作製できることになれば、エネルギー枯渇、環境汚染などを解決する大きな手段ともなるはずである。われわれが、現代社会で抱える多くの問題が解決されることになる。

さて、これまで達成されてきたマイクロサイズのテクノロジーの微細化をさらに進めてナノテクノロジーとすれば、さらに期待される恩恵は大きい。しかしながら、ナノはマイクロの延長ではなく、ナノサイズの空間にはまだ解き明かされていない秘密が隠されているのである。

2 ナノ空間で起こること

サイズごとに起こる現象や構造作製について非常にラフに考えたい。われわれの日常世界の構造作製、例えば家の建築と、マイクロファブリケーションによる微細加工は基本的な原理は変わらない、設計図があって、それを達成する技術があれば目的の機能構造をつくることができる。非常に決定論的な世界である。一方、原子や分子のように極限的に小さな世界ではどうだろうか？ いくつかの原子がつながって分子になる、分子と分子が反応して新しい分子ができる、あるいは特定の比の陽イオンと陰イオンが集まって塩ができる。これも、決定論的な世界である。その中間の、ナノサイズやもうちょっと大きなメソサイズでの構造形成はどうであろうか？ 実は、これは完全に決定論的ではないのである。設計図どおりには、事がうまく進まないというのが現実である。ナノサイズの構造体では構成要素の個性が強く現れる、熱揺らぎの影響を受ける、不確定的な要素が機能に現れる、半導体などの物質では構造をナノサイズにしていくと量子サイズ効果のような新しい現象が現れ始めるなど、ほかのサイズでは見られない側面が全体の行動を決めていくのである。したがって、マクロサイズからマイクロサイズに構造を小さくしていった技法の延長にナノ加工技術は必ずしもない。もっと、さまざまな要因を加味してバランスさせ、ハーモニーを持たせるがごとく機能構造体を形づくっていくことが必要である。ナノテクノロジーは、決してマイクロテクノロジーの延長にはない。例えば、新たなパラダイム「ナノアーキテクトニクス (ナノ建築学)」を提唱すべきであると、青野らは主張している¹⁾²⁾。

これと同様な考え方が閉鎖空間においても当てめられる。分子やナノ物質よりもかなり大きいマクロスコピックやマイクロスコピックな空間においては、空間が構成要素に与える影響は微小であり、構成要素の性質がそのまま現れる単なる物質を閉じ込めた空間の科学に過ぎない。空間サイズが、構成要素の大きさに近くなるナノ空間では、ナノ空間内表面と包含物質の相互作用が顕著になり、また、内包された物質間の相互作用も強調され配向性が顕著になり、運動性が著しく制限される。機能物質は、制限された空間に閉じ込められると、われわれが普段接している大きな物質 (バルクの物質) には見られないような未知の性質が発揮されることが極めて多い。ナノ空間に取り込まれたナノ物質や分子は特定の配向のみが可能になり、情報や電子・光の伝わり方、相互作用や化学反応性が劇的に変わるのである。その一方で、このようなナノ空間内では、外部環境からの外乱を排除することができ、外部の環境では打ち消されてしまっている特性が守られて発現することもありえる。しかもこのような独特な機能は、ナノメートルスケールに特有の不確かさや特異効果に伴って現れる。ナノ空間に閉じ込められた機能物質には、外界や大きな塊では見出せないような新物性・特異機能が発現される可能性が非常に高いのである。

3 ナノ空間科学・ナノ空間材料への期待

ナノ空間を舞台とした科学とそれを用いた機能材料の開発の詳細は、本書の各項にゆだねるとして、ここではそれらに対する期待をざっとまとめてみたい (図 2)。ゼオライトのような天然に存在するナノ多孔性材料、各種メソポーラス物質などの鋳型合成によってつくられるナノ空間材料、多孔性配位高分子 (Porous Coordination Polymers あるいは Metal-Organic Frameworks) など金属配位や超分子集合によって形成されるナノ空間材料は、サイズおよび配向の面で高い規則性を持っている³⁾⁴⁾。そのナノ空間に取り込まれるさまざまな物質はバルクとは全く異なる物性を示し、低次元の集合体を形成することによって異方性の高い新規特性を示す可能性が高い。また、これらのナノ空間ではサイズや形状による物質選択取り込みが可能であり、物質の分離や高度濃

縮も期待される。二酸化炭素などの高濃度捕捉は地球温暖化対策などの重要環境課題への解決策を与えてくれるに違いない。ナノ空間の内表面を化学修飾すれば、取り込まれた物質との密な相互作用や特定配向による特異反応などの促進が期待され触媒機能への展開、または異方性のきわめて高い材料の合成場としての利用も考えられる。つまり、ナノ空間は精密なナノサイズの反応容器として働くのである。

構造の精密さはやや劣るかもしれないが、高分子や超分子によって柔軟性に富むソフトなナノ空間物質の開発も可能である。そのようなナノ空間物質は、薬物を貯蔵して必要なときに放出するようなドラッグデリバリーシステムへの応用が期待できる。ソフトなナノ空間物質ではなくとも、前者の固いナノ空間物質の一つであるメソポーラス物質とソフト分子からなるゲート機能をハイブリッドさせれば、刺激に応じて薬物や遺伝子が細胞に供給されるようなシステムを構築することができる。

もっと単純にもっといい加減に考えてみると、バルクの素材をナノ空間材料に変換するということは、重さあたりの比表面積を格段に上げることである。この事実には、素材の特異性などは全く含まれず、ありとあらゆる物質に適用できる利点である。つまり、ナノ空間物質の技術を開発することは、ありとあらゆる物質の表面積を格段に増大させる技術の開発でもある。例えば、メソポーラスシリカなどは耳かき一杯でテニスコート一面分の表面積を持つ物質と言われる。さまざまな相互作用や特異反応は物質の表面で他物質と接触することによって起こる。したがって、表面積を大きくすることはありとあらゆる機能の増進につながることになる。物質貯蔵、触媒反応の増進などは言うにおよばず、それらを巧みに利用した電極素材などの開発もなされる。それらの機能は、燃料電池や太陽電池のための素材から、環境浄化材料まで、社会適用性が高い分野に応用されると期待できるのである。

ナノテクノロジーとは、宇宙からホールインワン

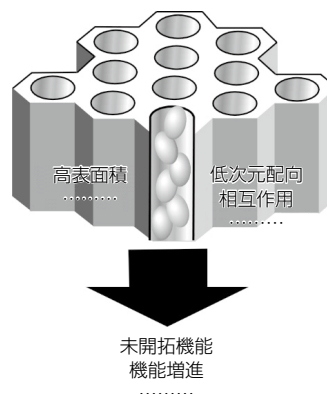


図2 ナノ空間材料に期待される機能

を決めるような高度な技術であるという話からはじめたが、本書の各項で示されるように、ナノ空間材料は分子の自己組織化などの過程を巧みに利用することによって非常に簡単な操作（混ぜて、ろ過して、焼くだけのよう）で作製され得るのである。その機能は、高度なナノ科学から表面積の増大という汎用性の高い特性を利用した応用用途の高いものまで広く展開しえるのである。ナノ空間材料に多くの未来を期待しない理由は見つからない。

■引用・参考文献■

- 1) K. Ariga, Q. Ji, W. Nakanishi, J. P. Hill and M. Aono : *Mater. Horiz.*, **2**, 406 (2015).
- 2) M. Aono and K. Ariga : *Adv. Mater.*, in press.
- 3) K. Ariga, A. Vinu, Y. Yamauchi, Q. Ji and J. P. Hill : *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **85**, 1 (2012).
- 4) V. Malgras, Q. Ji, Y. Kamachi, T. Mori, F.-K. Shieh, K. C.-W. Wu, K. Ariga and Y. Yamauchi : *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, in press. DOI : 10.1246/bcsj.20150143.

〈有賀 克彦, 山内 悠輔〉

この先をご覧いただくには、パスワードが必要です。

制限つきPDFで全ページをご覧いただけます。
(制限内容：閲覧期間の設定、コピーやプリントの禁止など)

- ・ PDFの閲覧

「パスワード」と「専用のビューア」（無料）が必要です。
費用は一切かかりません。

※WindowsのPCでのみご覧いただけます。予めご了承ください。

- ・ パスワード ※電子試読ページよりお申込みください

<https://www.nts-book.com/ntsの電子試読>

ページ下部にお申込みフォームがあります。

右のQRコードからも
電子試読ページにアクセス
いただけます。



- ・ ビューアのダウンロード

PDFは、株式会社スカイコムの SkyPDF Viewer（無償のPDFビューア）をダウンロードしてご覧いただけます。

※Adobe Acrobat Readerなど他のPDF閲覧アプリケーションではご覧になれません。

SkyPDF Viewer 無償ダウンロード：

<https://www.skycom.jp/free/>

索引

事項別

英数・アルファベット順

3DOM	326
AFSMTM	477
AI カチオン	485
AI 陽極酸化被膜	297
Arrhenius プロット	173
Automated electron Diffraction Tomography (ADT)	470
BET 法	485
BJH 法	118
BTEX	210
C = C	411
C - C	411
C - H	411
C - H ホウ素化反応	99
C1 化学	288
Cab-O-sil M7D	91
CC-Swing	481
CCP 構造	443
CD-MOF-1	209
CD-MOF-2	210
CD-MOF-3	210
CH- π 相互作用	213
charge flipping 法	463
Clausius-Clapeyron の関係式	172
Condensation swing (C スイング)	481
Corey-Pauling-Koltun (CPK) モデル	223
CTV-POM	210
D-グルコース	209
Diels-Alder 反応	39, 157
DME	291
dual space method	464
"Edible" MOF	210
EDS マッピング像	437
EELS 法	440
EMT	300
FAU 型	483

FAU 型ゼオライト	237
FFC プロセス	220
Filling swing (F スイング)	481
Gauge Cell 法	479
GCMC 法	476
Grid Search 法	466
h-BN	381
HAAD 法	448
HCP 構造	443
Higuchi 拡散モデル	73
HK 法	479
HOMO/LUMO エネルギー準位	174
HPLC	210
HR-TEM/STEM	467
HRTEM 法	453
HRSEM	433
Hummers 法	411
INNES 法	479
Integral Adsorption Equation	479
Kelvin 式	31
Kelvin 半径	31
kernel	479
Lagrangian multiplier 法	477
Layer-By-Layer (LBL) 法	423
LB 法	372
LC-SCD (Liquid Chromatography-Single Crystal Diffraction) 法	203
Le Bail 法	463
LEIS 法	374
Lennard-Jones ポテンシャル	27
Lentzen の最適値	458
Li イオン電池	116
local isotherm	479
LTA 型	250
MCM-41	91
metal organic framework (MOF)	198, 207, 220, 380
MFI 型	483
MFI 型ゼオライト	243
MOF-1001	208
monoclinic (P21/n.1.1.)	483

MRI	84
Nafion®	176
Nb ドープ TiO ₂	327
NLDFT 法	477
Nyquist 図	177
o-キノジメタン	39
Onsager 理論	387
orthorhombic (Pnma)	483
OSDA フリー	240
P25	382
P5A-MOF-1	209
PCP	198
Pd (II) -Pd (II) 相互作用	211
PEO-PPO-PEO ブロックコポリマー	321
Pluronic®F127	117
pNIPAm	395
pn 接合	370
p-n 接合界面	103
Porous Coordination Polymer: PCP	207
Precession Electron Diffraction (PED) 法	473
QCM センサー	349
Reservoir モデル	73
Rotation Electron Diffraction (RED)	472
SBA-15	91
Scherzer 条件	454
SDA 分子	232
Si/Al 比	247
Si-C 結合の開裂	98
SNU-200	208
sp ²	412
sp ³	412
SPE 法	481
SrTiO ₃	66
steam-assisted crystallization, SAC	329
Steel 10-4-3	478
STEM 法	440, 452
TCP 構造	441
TEM 法	440, 451
three-dimensionally ordered macroporous, 3DOM	326
TiO ₂	378
t 法	485
Valatile Rrganic Compound : VOC	353
van der Waals 半径	223
Volatile Organic Compounds	492

X 線回折	12, 97, 207
X 線吸収微細構造	45
X 線散乱	134
Y 型ゼオライト	485
Zn4O クラスタ	208
α-CD	209
α _s 法	480
β-CD	209
β 型ゼオライト	299
γ-CD	209
π-π*準位間	412
π-π 作用	271
π-π スタッキング	232
π-π 相互作用	210, 334, 348, 418
π 共役系	418
π 共役系有機基	98
π スタック	97

五十音順

あ

アジリジン	41
アミノ酸系界面活性剤	10
アミン	40
アモルファス前駆体	110
アルカリエッチング処理	484
アルカリ金属イオン	210, 339
アルキルアミン	10
アルキルシラン化剤	61
アルキルトリエチルアンモニウム界面活性剤	10
アルキルトリメチルアンモニウム (CnTMA) 界面活性剤	10
アルミノフォスフェート (AlPO ₄)	219
安定な液晶相挙動	387
アンテナ型光触媒	101
アンモニアボラン	193
イオン液体	347
イオン拡散抵抗	123
イオン結合	334
イオン交換	81, 339
イオン交換性層状化合物	355
イオン伝導	137, 337
鋳型合成法	187
異性化反応	281
位相コントラスト伝達関数 (PCTF)	454

位置異性体の選択吸着	86	解離吸着	306, 375
一重項酸素	50	カウンターカチオン	458
一酸化炭素	56	化学還元	414
移動度	176	化学気相蒸着 (CVD) 法	300
異方性	386	化学吸着	25
異方性ゲル	386	化学水素発生	193
イメージングプローブ	83	可逆的な体積変化	396
陰イオン性界面活性剤	10	架橋型有機シラン化合物	37
印加	148	架橋配位子	170
インクジェットプリント	16	拡散	19
ウルトラキャパシタ	424	拡散制限	273
ウルトラマイクロポア	481	核生成	143
上澄み溶液	249	拡張 CS モード	455
永久双極子モーメント	28	過酸化水素を酸化剤とした液相酸化反応	258
映進面	211	可視光応答化	380
液晶	386	可視光吸収性	101
液晶相	386	加水分解	34, 130, 271
液相浸潤法	187	加水分解・重縮合	96
液相転移点	479	加水分解速度	35
エステル化	36	ガス吸着	211, 334
エチレン	289	ガス遮断性	418
エナンチオ選択性	156	ガソリン	59
エナンチオマー分離	160	型剤	268
エネルギーフィルタ	433	カチオン界面活性剤	79
エネルギー密度	124	活性化エネルギー	177
エポキシ基	411	活性炭素繊維	480
エレクトロスプレーイオン化質量分析	244	過渡的プロセス	215
塩基性質	40	カルボキシル基	411
オートクレーブ	256	カルボニル基	411
オキシラン	42	カルボラン類	210
オストワルト成長	251	環境低負荷	99
重みつき逆投影法	446	還元	411
オルトケイ酸エチル	61	還元手法	414
オレイン酸	66	環状ホスト化合物	207
オレフィン	288	気液界面	479
		機械的強度	395
		擬キャパシタ	424
		疑似キャパシタンス	414
		基準 α_s カーブ	480
		基準容積	476
		キシリトール	279
		キシロース	279
		犠牲試薬	101
		キセロゲル	37
		気相浸潤法	187

か

カーボンナノケージ	344
カーボンナノチューブ	116
階層構造	349, 389
開放セル法	479
界面活性剤	9, 72, 96, 133, 269
界面活性剤分子	272
界面活性剤ミセル	117
界面積	73

規則性マクロポーラスカーボン	297	金属分散度	476
規則性ミクロポーラスカーボン	297	金属有機骨格体 (MOF)	164
規則性メソポーラスカーボン	297	金属リン酸	388
キノン/ハイドロキノン	308	空乏層	372
キノン基	308	クヌーセン拡散	122
揮発性有機化合物	492	クネバナーゲル縮合反応	40
逆相関	91	クラック	202
キャパシタ	407	グラファイト	411
キャパシタ特性	420	グラファイト層間化合物	414
吸収	24	グラフェン	116, 347, 388, 411, 422
球状ミセル	10	グラフェンの比表面積	304
吸脱着	142	グラフト法	93
吸着	18, 24	グラントポテンシャル	477
吸着剤	86	グリセリン	279
吸着質	24, 487	クリック反応	428
吸着選択性	87	クロスセクションポリッシャー	434
吸着等温線	29, 476, 487	クロロ基	41
吸着熱	25	ケージ型シリカメソ多孔体	441
吸着媒	24	ゲート型吸着	164
吸着平衡定数	86	ゲートキーパー	82
吸着ポテンシャル理論	479	形状選択性	17
求電子置換反応	39, 98	軽油	59
球面収差	448	ゲスト	219
球面収差補正器	467	ゲスト包接	199
球面収差補正技術	452	欠陥サイト	257
共結晶化	211	結晶化挙動	255
凝集	81	結晶核	256
共縮合法	33	結晶格子定数	146
共焦点顕微鏡	148	結晶構造	268
協奏現象	167	結晶構造因子	444
強誘電体	407	結晶子	259
共連続構造	331, 441	結晶スポンジ法	198
極小曲面	443	結晶性	251
極低圧領域	480	結晶性多孔体	255
キラル	213	結晶成長速度	256
キラル MOF カラム	160	結晶単位胞	270
キレート効果	207	結晶面	66
キレート配位子	99	ケルビンフォースプローブ顕微鏡	373, 383
金	327	ゲルマノシリケート	231
均一な触媒環境	99	原子間力顕微鏡	369
金属錯体触媒	99	コア-シェル構造	70
金属酸化物ナノシート	423	コア・シェル粒子	404
金属種の凝集	100	光学異性体	160
金属ナノ粒子	343	光学活性	213
金属微粒子	284	光学的性質	397

高角度散乱暗視野 (HAADF : high-angle annular dark-field) 法	448
高角度散乱暗視野 (High-Angle Annular Dark Field : HAADF) -STEM 法	453
鉱化剤	256
高感度検知	357
光合成	100
交互吸着法	347, 404
交互積層体	423
交互積層法	326
格子酸素	40
格子定数	258
格子定数解析	257
光子密度	100
合成化学	205
構造規則性	12
構造規定剤	9, 236, 256
構造修飾	269, 272
構造精密化法	462
構造補強	110
構造ゆらぎ	441
高速液体クロマトグラフィー (HPLC)	203
高速合成	252
光熱応答	396
高分解能透過電子顕微鏡 (HRTEM) 法	453
高密度活性点	94
高誘電体	407
交流インピーダンス法	177
交流電気伝導度の温度依存性	173
交流電場	148
コーティング	16
固体-流体相互作用ポテンシャル	478
固体核磁気共鳴法	461
固体高分子形燃料電池	422
固体酸	176
骨格形成助剤	96
骨格構造	232
骨格密度	237
コハク酸	279
コバルト	59
固溶化	133
コロイド	386
コロイド結晶	297, 325
コロイド状メソポーラスシリカ	328
コンボジットビルディングユニット	242

さ

サーマルトランスピレーション	476
再結晶化	248
細孔	142, 275, 334
細孔-流体間相互ポテンシャル	478
細孔径	96, 280
細孔径分布	492
細孔構造	255
細孔内ポテンシャル場	479
細孔閉塞	263
細孔壁	96
細孔容積	96, 492
細孔容量	14, 24
最大エントロピー法	463
最低励起三重項状態	50
再分散	81
錯形成反応	143
錯体化学	129
錯体シラン	94
ザクロ型構造	332
サポナイト	384
酸塩基触媒	33
酸化還元	339
酸化還元電位	170
酸化グラフェン	388, 411
酸化グラフェン還元体	411
酸化剤	35
酸化鉄ナノ粒子	69
酸化物ナノシート	402
酸化ルテニウムナノシート	424
酸強度	36
三次元結晶構造	269
三次元細孔構造	440
三次元未知構造解析	448
酸触媒	214
酸量	485
ジアミン	90
シェールガス革命	220
四塩化炭素	493
ジオール類	280
色素	396
色素吸着	396
色素の除去	345
シグモイド型カーブ	229
シクロデキストリン	82

自己集合能	9	シロキサン骨格	38
自己組織化	5, 325, 404	人工強誘電体	409
自己組織化膜	149	人工光合成	104
自己保持膜	15	人工光合成システム	19
四重極子	28	人工酵素	104
ジスルフィド種	35	親水性	12
磁性	414	親水性/疎水性	489
事前組織化	207	スーパーキャパシタ	422
実空間法	464	スーパーマイクロポア	481
湿度依存性	417	水酸化ニッケル	370
シナジー効果	167	水晶発振子	347
磁場による配向制御	391	水素	56
四面体最密充填 (TCP : tetrahedrally close-packed)		水素化	281
構造	441	水素化分解反応	283
弱位相物体近似 (Weak Phase Object Approximation ; WPOA)	453	水素吸脱着等温線	307
重縮合	34	水素結合	176, 207, 334
収着	24	水熱合成	15, 132, 229, 236, 268
充填パラメータ	441	水熱合成法	66
重量法	487	水溶性チタン錯体	66
縮合	79	鈴型構造	75
縮合速度	79	鈴型メソポーラスシリカ	75
準周期構造	442	スピルオーバー	306
小角散乱	389	スピンスピン結合	88
死容積	476	スメクタイト	383
死容積連続測定法 (AFSMTM)	477	スルトン化合物	36
情報限界 g_{max}	455	スルホ基	34
初期湿潤法	188	スルホキシド	157
触媒	55	スルホン化	39
触媒活性	414	スルホン酸	213
触媒活性点	269, 273, 284	スルホン酸基	177
触媒作用	268	ゼオライト	57, 219, 236, 246, 268, 489
触媒担体	33	ゼオライト鋳型炭素	296
植物油	278	ゼオライト水熱転換法	236
助触媒	374	ゼオライトナノシート	19
徐放剤	72	ゼオライト膜	330
シラノール基	79	積層セラミックコンデンサ	408
シラノラート	79	積分吸着等温式	479
シランカップリング剤	96	石油精製	275
シリカオパール	297	石油代替資源	278
シリカナノ粒子	327	絶縁体	403
シリカメソ多孔体	440	絶対立体配置	203
シリコアルミノフォスフェート (SAPO)	219	セルロース	279
シリル化層間拡張	269	ゼロ CS モード	455
ジルコニア	58	遷移金属錯体シラン	93
		遷移金属酸化物	106

遷移双極子モーメント	362
前駆体	144
センサー	352
剪断による配向制御	390
層間拡張	274
層間距離	273
層間細孔	261
層間剥離	269, 273
層構造	260
相互貫入	130
走査(型)電子顕微鏡	14, 433
走査透過電子顕微鏡(Scanning Transmission Electron Microscope ; STEM) 法	440, 452
像シミュレーション	458
層状化合物	367, 402
層状ケイ酸塩	10, 230, 270
層状シリケート	466
層状ゼオライト	268
相転移濃度	387
速度論の光学分割	156
束縛エネルギー	362
疎水性	12
疎水性相互作用	228
ゾル-ゲル反応	15
ソルビトール	279

た

耐久性	253
第四級アンモニウム化合物	226
第四級ホスホニウム化合物	233
多孔性金属錯体	142
多孔性配位高分子(PCP)	4, 164
多重散乱	473
多層膜	406
脱アルミニウム	490
脱水縮合反応	259
脱水反応	281
多点相互作用	200
種結晶	240, 264
多分子層吸着	14
単位格子容積	258
単結晶 X 線構造解析	198
単結晶構造解析	131
担持	55
弾性率	396

炭素材料	342
炭素析出	283
担体	55
チオール基	35
チタン酸ストロンチウムナノキューブ粒子	61
窒化处理	42
窒素吸着等温線	14
窒素の四級化	229
中空構造	70, 145
中空シェル	402
中空ゼオライト	70
中空メソポーラスシリカ	70
中空粒子	326
超音波処理	274
超高電圧電子顕微鏡	452
超伝導体	414
超分子	17
超分子型錯体	101
直接合成	260
直接シリル化反応	98
直接法	463
直線型構築素子	170
低エネルギーイオン散乱(LEIS) 法	374
低磁場シフト	37
ディスオーダー	199
底面間隔	389
定容法	487
定容量法	476
電解液	124
電界効果トランジスタ	409
電荷移動	123
電荷移動錯体	211
電荷移動相互作用	164
電荷担体	176
添加物	378
電荷分離	374
電荷補償	263
電気泳動	424
電気化学インピーダンス法	123
電気化学還元	414
電気二重層キャパシタ	116, 307
電気二重層容量	414
電極触媒	425
電子移動	101
電子顕微鏡法	440

電子線回折 (ED)	12, 470
電子線結晶学	440
電子線損傷	451
電子線トモグラフィ	440
電子伝導	136
電場-永久双極子相互作用	28
電場勾配-四重極子相互作用	28
電場-誘起双極子相互作用	28
電場による配向制御	391
糖アルコール	279
透過 (型) 電子顕微鏡 (TEM : transmission electron microscopy) 法	9, 39, 97, 440, 451
同型置換	255
動的分子径	161
等方相	386
等網状キラル MOF	156
動力学的効果	473
等量微分吸着熱	476
糖類	278
特異的相互作用	26
特殊反応場	17
特性 X 線検出器	435
閉じ込め効果	194
トポクテック変換	370
トポロジー	270, 289
ドメインの成長制御	393
ドラッグデリバリー	346
ドラッグデリバリーシステム	18
トリグリセリド	279
トリブロックコポリマー	117

な

ナノアーキテクトニクス	4
ナノカーボン	351
ナノカーボン材料	420
ナノキューブ	66
ナノ空間	3
ナノ建築学	4
ナノシート	352, 367, 386, 402
ナノシート液晶	386
ナノシート液晶の配向制御	390
ナノシート分布の粗密	389
ナノチャネル	211
ナノテクノロジー	3
ナノ薄膜	402

ナノ複合体	402
ナノプレート	327
ナノ粒子	45, 78
ナノ流体効果	415
ナフィオン	416
軟 X 線分光器	435
ニオブ・チタン酸	388
ニオブ酸ナノシート液晶	386
二元機能触媒	275
二元系ナノコロイド結晶	443
二酸化炭素	56, 334
二次元構造	271
二次元物質	402
二次元ポリマー	87
二次電子	434
二相系反応	73
二対数関数	134
ニッケル	58
乳酸	279
熱還元	414
熱力学的積分法	479
ネマティック相	388
粘弾性	397
粘土鉱物	388
燃料電池	56, 176
ノニルフェノール	64

は

ハードテンプレート	83, 325
配位結合	142
配位高分子	177
配位受容体	170
配位状態解析	257
配位不飽和金属サイト	154, 165
バイオイメーキング	78
配向性	92
配向制御	80
ハイブリッドメソ多孔体	19
破過曲線	493
薄膜	15
薄膜コンデンサ素子	407
剥離	272, 402
パターンニング	16
白金	56
発酵	278

発光量子効率	369	賦活処理	116
パラジウム	69	不均一系触媒	55, 337
反発相互作用	27	複合ゲル	395
反射電子	434	不斉エポキシ化反応	157
半導体ナノシート	362	不斉開環反応	155
非鉛系強誘電体	410	不斉酸化	157
ビーズミル	248	不斉酸化反応	156
ビオチン	82	不斉シアノシリル化反応	158
光エネルギー変換反応	367	物質吸着	346
光還元	414	物質選択分離	346
光酸化還元反応	367	物質の選択吸着	345
光触媒	367, 378, 402	物理吸着	25, 37
光触媒反応	45	フラーレン (C ₆₀)	116, 210, 350
光増感剤	101	フラーレン結晶	350
光第二高調波発生	361	フラクタル構造	389
光電気化学デバイス	427	フルフラール	279
非共有結合	211	プレnstेटド酸	34
非経験的構造解析	462	プローブ分子	37
非結晶	138	プロトン/電子混合伝導体	417
微細加工技術	3	プロトン伝導	214, 334
微細藻類	278	プロトン伝導膜	18
微細粒子	246	プロピレン	289
微小液滴	144	分極率	28
微小角入射 X 線散乱 (GISAXS) 法	121	粉碎・再結晶化法	247
非晶質層	250	分散エネルギー	27
ヒステリシス	492	分散性	79
ヒステリシスループ	478	分散相互作用	26
非線形光学効果	361	分散相互作用ポテンシャル	27
非線形分極	361	分子 (原子) 間相互作用	477
非弾性散乱	448	分子インプリント法	91
非特異的相互作用	26	分子性イオン	334
ヒドラジン	66	分子選択的光触媒機能	64
ヒドロキシ基	411	分子認識性	357
ヒドロゲル	259, 404	分子認識能	207
比表面積	14, 24	分子認識ポケット	211
表面修飾法	33	分子ふるい効果	17
表面密度	89	粉末中性子回折	461
非理想性	476	噴霧乾燥	16
非理想性の補正	488	分離係数	160
微量分析手法	201	平均曲率一定曲面 (CMC : constant mean curvature)	445
貧溶媒	144	平衡過程	199
ファインケミカルズ	275	ヘテロ元素	219
ファンデルワールス力	208	ヘミセルロース	279
フェノール	283	ペロブスカイト	407
フォトリック結晶	445		

ペロブスカイト型ニオブ酸	388
ペロブスカイト構造	66
ボーア半径	362
芳香族スルホン酸	36
放射光 X 線	461
棒状ミセル	10
包摂	142
母液	259
ホール輸送性	102
ホスト-ゲスト化学	199
ホスト-ゲストケミストリー	226
ホスト-ゲスト相互作用	164, 232
ホスト-ゲスト間のクーロン引力	174
ポスト合成法	133
ポストシンセシス法	183
ホスファゼン (phosphazene) 誘導体	233
ホスフィン (PH_3)	233
ポテンシャル緩衝場	479
ホモキラル MOF	154
ポリ (<i>N</i> -イソプロピルアクリルアミド)	395
ポリエチレンイミン	41
ポリオール類	284
ポリオキシエチレン-ポリオキシプロピレン-ポリ オキシエチレントリブロック共重合体	10
ポリオキシエチレンアルキルエーテル	10
ポロシリケート	219

ま

マイクロ孔	477
マイクロ波加熱	48
マイクロベンリソグラフィー	16
マガディアイト	378
膜分離	18
マクロ孔	477
マルチスケールの空間構造	394
ミクロ孔	24, 226
ミクロ構造	269
ミクロ多孔体	24
水の酸化光触媒	101
水分解光触媒	369
ミセル	62
ミラーレス光導波路	18
無機ナノシート-有機化合物ハイブリッド	363
メソゲン	390
メソ孔	24, 477

メソ構造	269
メソ構造体	9
メソ細孔	86, 96
メソ多孔質材料	440
メソ多孔体	9, 24, 220
メソポーラスカーボン	19, 342
メソポーラスカーボンカプセル	348
メソポーラス構造	106
メソポーラスシリカ	9, 61, 78, 96, 297, 326, 489
メソポーラスゼオライト	19
メソポーラスチタニア	17
メソポーラス窒化炭素	343
メソポーラス窒化ホウ素	344
メソポーラス物質	4, 9
メソポーラス有機シリカ (PMO)	316
メタ空間構造	394
メタロシリケート	219
メタン	58
メタン貯蔵	134
メチル化	42
メニスカス	479
毛管凝縮	29, 490
毛管凝縮理論	479
毛細管凝縮	14
木質系バイオマス	278
モレキュラーシーブ	224, 490
モンテカルロ計算	208
モンモリロナイト	297, 384

や

ヤヌス粒子	328
融解	139
有機-無機ハイブリッド	80
有機-無機ハイブリッド多孔体	464
有機アミン	268
有機構造規定剤	246
有機修飾	19
有機触媒	135
有機助剤	10
有機ゼオライト	220
誘起双極子	28
誘起双極子モーメント	28
誘電機能	402
誘電率	407
誘電率の温度依存性測定	172

四級アンモニウム界面活性剤 270

5

ラクトース 82
ラメラ構造 396
ラメラ相 388
ラングミュア・プロジェクト (LB) 法 372, 404
リートベルト法 462
力学特性 138
リグニン 279
リポソーム 82
流体相互作用ポテンシャル Lennard-Jones 12-6
..... 478
量子井戸構造 362
量子効率 101
両媒性有機分子 19
リンカー 99

りん光 50
隣接官能基 90
リンモリブデン酸ナトリウム 210
類縁構造体 261
ルイス塩基 181
ルイス酸 181
ルテニウム 58
励起一重項 50
励起エネルギー 101
励起状態 101
劣化 283
レドックス性 403
レブリン酸 279
六方晶窒化ホウ素 381

わ

ワイドギャップ半導体 403

用途別

英数・アルファベット順

1-オクテンのヒドロホルミル化 74
1-プロパノールによる酢酸のエステル化 76
4-chloro-2-methylbenzoate 171
4級アンモニウムイオン 402
AFT ケージ 231
Al の骨格内分布 257
Anderson-Schulz-Flory (ASF) 則 291
ASF (Anderson-Schulz-Flory) 分布 59
atom-planting 法 257
Baeyer-Villiger 酸化反応 264
Barret-Joyner-Halenda (BJH) 法 447
*BEA 型ゼオライト 237
C1 化学 220
cavity 231
charge density mismatch 233
CHA 型ゼオライト 238
CHA ケージ 232
CO 選択メタン化反応 58

Diamond 曲面 443
diquat 型の第四級アンモニウム化合物 229
double 4-ring (D4R) 230
DTO (DME-To-Olefins) 288
dual-cycle mechanism 289
Fischer-Tropsch 合成 288
Framework Type Code ; FTC 221
FT 合成反応 58
GME ケージ 231
Graphene Oxide Fuel Cell 418
Graphene Oxide Lead Battery 419
Graphene Oxide Super Capacitor 420
Grotthuss 機構 176
Gyroid 曲面 443
Helfrich の自発曲率モデル 445
“hydrocarbon-pool” メカニズム 288
IFW ケージ 232
Meerwein-Ponndorf-Verley and Oppenauer 反応
..... 264
metal-macrocycle framework (MMF) 211
missing wedge 446
MTB (Methane-To-Benzene) 288

MTG (Methanol-To-Gasoline)	288
MTO (Methanol-To-Olefins)	288
MTO 反応	263
NH ₃ を還元剤とする NO _x 選択還元 (NH ₃ -SCR)	232
Ni-水素化物電池	331
Nonlocal Density Functional Theory (NLDFT) 法	447
one-pot 酸化反応	48
paring model	289
pH 応答性	323
pn 接合	370
Polymer Electrolyte Fuel Cell	418
PROX 反応	56
SAC 法	256
side chain methylation scheme	289
structure-directing agent (SDA)	222
TEOS	79
three-dimensionally ordered macroporous, 3DOM	326
TMOS	80
type material	221
USY (Ultra Stable Y)	220
Vehicle 機構	176
VPT 法	256
Yolk-shell 型	323
zeolite-like material	219

五十音順

あ

アップグレーディング	282
アディティブ	220
アニオン性界面活性剤	318
アルカリ活性炭炭素	281
アルキメデスタイリング	442
アルミニウム陽極酸化皮膜	116
アンモニア水によるシリカ分解反応	71
イオン結晶	334
イオン分離膜	416
イオンや分子を検知するためのセンサー	357
鋳型炭素化法	296
異性化反応	330
位相コントラスト伝達関数	444
エアロゲル	313

液相濃度制御還元法	190
液中合成法	79
エチレン	57
エナンチオマー分離	154
エネルギー分散型 X 線分光	449
オールカーボン燃料電池	418
オリゴシロキサン	313
オルガノシラン	80
オルガノシリカ	82
オルトケイ酸テトラエチル	79
オルトケイ酸テトラメチル	80

か

会合乖離	355
回折コントラスト	448
階層型メソポーラス H-ZSM-5	292
階層構造材料	326
界面活性剤	59
解離吸着	306
架橋型有機シラン	96, 313
架橋水酸基	257
拡散	56
拡散反射赤外分光	56
かご型シロキサン化合物	314
ガス吸着	414
カスケード反応	323
ガス状化学物質の濃度基準	353
ガスセンシング	354
カプセル触媒	292
カリックスアレーン	209
カルベニウムカチオン	290
環状金属錯体	208
環状検出器	448
環状多孔性結晶	207
疑似容量	307
キセロゲル	313
規則性メソ多孔体	55
揮発性有機化合物 (Volatile Organic Compounds : VOC)	353
逆水性シフト反応	58
キューカービチュリル	209
吸蔵材料	414
急速熱分解	282
吸着層の構造相転移	88
凝集	55

共縮合	316
曲率弾性エネルギー	445
キラル固定相	160
金属-有機物構造体	207
金属イオン伝導性	411
金属ナノ粒子@MOF 複合体	187
クメン法	378
クラウンエーテル	207
グラフティング	316
クロマトグラフ固定相	297
ケイ酸ナトリウム	80
形状選択性	222, 259
結晶状 PMO	97
結晶スポンジ	198
ゲルマノシリケート	271
コアシェル構造	48
コアシェル触媒	292
合成ガス	58
構造規定剤	226
構造や形状の制御法	76
光電変換素子	102
固体 NMR	59
固体酸触媒	281
固体電解質	416
固体分子系光触媒	101
固体有機分子触媒	100
骨格導入型メソポーラス有機シリカ	96
骨格有機基の化学修飾	98
固定化担体	99
固定床流通反応器	281
コロイド鑄型法	325
コロイド結晶	297
コロイド溶液	404
コンデンサ	407

さ

細孔性錯体結晶	198
再積層	404
シクロデキストリン	209
シクロトリペラトリレン	209
自己組織化	214
質量変化	354
柔軟性	305
重金属イオン類を選択的に検知	357
触媒担体	326

シラノール	272
シラン剤	274
シリル化处理	274
シルセスキオキサン	82
シロキサンオリゴマーユニット	313
シングルサイト光触媒	45
人工強誘電体	409
人工格子の構造構築, 制御	407
迅速結晶化法	256
水車型二核金属錯体ユニット	170
水素貯蔵	305
水素分離膜	418
水和膨潤	402
スーパーキャパシタ	331, 417, 420
スーパーケージ	231
ストーパー法	320
スプレードライブプロセス	79
静電相互作用	355
静電ポテンシャル分布	444
静電容量	408
ゼオライト	116, 316
ゼオライト層状前駆体	260
ゼオライト分離膜	329
遷移状態規制選択性	259
センサーデバイス	352
層間拡張ゼオライト	274
層間膨潤	261
層状複水酸化物	355
疎水的な水和	226
ソフトテンプレート	321
ソルボサーマル反応	158

た

多孔質シリカナノ粒子	320
多孔性金属有機構造体	154
多孔性配位高分子	207
多孔性分子結晶	208
多重双晶	443
多色発光材料	102
多層光記録	361
炭酸ジメチル (DMC) によるシリカの分解反応	70
担持金属触媒	55
チキソトロピー性	383
チタン酸ナノシート	355

チタン酸バリウム	407
中空シリカナノ粒子	321
直接合成型メソポーラス有機シリカ	97
低誘電率材料	323
電界効果トランジスタ	409
電気化学的な応答	354
電極材料	326
電子エネルギー損失分光 (EELS: electron energy-loss spectroscopy) 法	440
電子伝導性	404
デンドリマー	319
同位体トレーサー法	56
導電性薄膜	414
等ポテンシャル面	444
ドラッグデリバリーシステム	5, 323
トランジスタ	407
トランスエステル化反応	279
トリメチルシリル化	82

な

ナノシート	367
ナノ多孔性材料	4
ナノ流体デバイス	416
鉛蓄電池	417
二元機能型触媒	285
二光子吸収	361
二重4員環	314
二溶媒法	189
燃料電池	417
燃料電池自動車	305

は

ハードテンプレート	321
配位多面体 (coordination polyhedra)	441
バイオオイル	282
バイオマスリファイナリ	278
ハイブリッド	5
薄膜型鉛蓄電池	420
剥離処理	261
パッキングパラメーター	317
ハロゲン交換反応	73
非イオン性界面活性剤	321
光触媒	101
光スイッチ	361
光制限素子	361

光捕集アンテナ	100
光誘起超親水性	52
非特異的相互作用	26
ヒドロキシメチルフルフラール	279
表面官能基間距離	88
表面曲率	91
表面修飾型メソポーラス有機シリカ	96
表面積	55
表面増強ラマン分光法	196
ピラー[5] アレン	209
ビルディングブロック	402
ファンデルワールス力	81
フィッシャー・トロプシュ (FT) 合成反応	58
フーリエ回折図形	444
フォトニック結晶	326
不斉触媒	154
フッ化物法	230
ブルロニック F127 (EO ₁₀₆ PO ₇₀ EO ₁₀₆) ブロックコポリマー	321
プロトン伝導	416
プロトン伝導性	411
プロトン伝導体	176
分散相互作用	26
分子鑄型	314
分子間相互作用	199
分子検知センサー	352
噴霧乾燥法	79
分離媒体	326
ヘテロ集積体	407
ベンゼン部分酸化	378
ホモキラル MOF	154
ポリエチレンオキシド-ポリプロピレンオキシド-ポリエチレンオキシド (PEO-PPO-PEO) ブロックコポリマー	321
ポリオキシメタレート	335
ポリマー修飾	319

ま

マイグレーション	262
マイクロ反応容器	73
水の構造化	226
無機鑄型 (ハードテンプレート) 法	117
無溶媒固相研磨法	191
メソ構造	78
メソ細孔	56

メソチャンネル	80
メソポア	78
メソポーラス LTA	435
メソポーラスカーボン	116
メソポーラスシリカ	56, 116, 297, 316
メソポーラスシリカテンプレート	83
メソポーラス遷移金属酸化物	106
メソポーラス有機シリカ	316
メタルオーガニックフレームワーク	435
メタロシリケート	255
メチルホスホン酸基	81
メモリ	407

や

薬物徐放容器	72
有機-無機ハイブリッド	353
有機-無機ハイブリッド材料	313
有機鋳型(ソフトテンプレート)法	117
有機金属化学気相成長法	190

有機ケージ化合物	211
有機シリカ多孔体	313
有機ゼオライト	316
有機リンカー	315
有効酸素含有率	258
ヨークシェル材	436

ら

ラポナイト	355
リチウムイオン電池	331, 414
立方最密充填(CCP: cubic close-packed)構造	443
立方多孔構造	81
流動接触分解(FCC)プロセス	220
量子井戸レーザー	362
レイヤーバイレイヤープロセス	404
レゾルシノール(RF)樹脂	117
六方最密充填(HCP: hexagonal close-packed)構造	443

ナノ空間材料ハンドブック

—ナノ多孔性材料，ナノ層状物質等が切り開く新たな応用展開—

発行日	2016 年 2 月 8 日 初版第一刷発行
監修者	有賀克彦
発行者	吉田 隆
発行所	株式会社 エヌ・ティー・エス 〒102-0091 東京都千代田区北の丸公園 2-1 科学技術館 2 階 TEL：03(5224)5430 http://www.nts-book.co.jp/
印刷・製本	株式会社 双文社印刷

© 2016 有賀克彦，他

落丁・乱丁本はお取り替えいたします。無断複写・転写を禁じます。

本書の内容に関し追加・訂正情報が生じた場合は、(株)エヌ・ティー・エス ホームページにて掲載いたします。

※ホームページを閲覧する環境のない方は当社営業部(03-5224-5430)へお問い合わせください。