

分散 塗布 乾燥について、基礎理論を丁寧に解説。様々な要因が複雑に影響するため、今まで経験知ですすめられることが特に多かった湿式プロセスについて、実務 応用分野における分散 塗布 乾燥の各单位操作同士の関係を横断的な視点から詳述する。現場の研究者 技術者の困難や悩みに応える、手がかりとなる実務書！

# 分散塗布乾燥の基礎と応用

## プロセスの理解からものづくりの革新へ

### Dispersion, Coating & Drying Process Fundamentals and Application

### Product Innovation through Process Understanding

#### 監修

山口 由岐夫 東京大学 大学院工学系研究科 化学システム工学専攻  
教授 工学博士

#### 編集委員 (50音順・敬称略)

大嶋 寛 大阪市立大学 大学院工学研究科 化学生物系専攻 教授  
工学博士

神谷 秀博 東京農工大学 大学院工学研究院 応用化学部門 教授  
工学博士

辻 佳子 東京大学 環境安全研究センター 准教授 博士(工学)

淵上 修三 ミネソタ大学 化学工学・材料科学科 フェロー

山村 方人 九州工業大学 大学院工学研究院 物質工学研究系  
教授 博士(工学)

#### 執筆 44名

- ◆ 発行 2014年3月10日
- ◆ 体裁 B5判 二段組上製本  
600頁
- ◆ 価格 本体48,000円(+税)  
国内送料弊社負担  
ISBN978-4-924728-70-7 C 3050
- ◆ 発行 テクノシステム

<http://www.techno-s.co.jp/>

「発刊にあたって」(本文より抜粋) 日本は「ものづくり」が得意である。その理由は「ものづくり」における技術と感性がほどよくバランスしているからであろう。「ものづくり」技術とは、材料の評価技術、材料を製品に変換するプロセス技術、製品の評価技術など一連の製品製造技術である。「ものづくり」の製造プロセスは、製品に応じて、様々な微粒子や粉体やポリマーなどを扱うことに特徴がある。

製品(プロダクト)のイノベーションは、社会に新しい価値を提供し続けるために必要だ。このプロダクト・イノベーションを、マテリアル・イノベーションとプロセス・イノベーションの掛け算と考えると、両者の役割が明確になる。大学は主としてマテリアル・イノベーションを担い、企業はプロセス・イノベーションを得意とする。プロダクトの機能は複数の性能に分解され、これらの性能をバランスよく実現するために、「ものづくり」のプロセスを深く理解しておくことが必要である。プロセスの理解により、プロセス・イノベーションを実現し、プロダクト・イノベーションを起こすことが可能になる。

「ものづくり」プロセスにはドライプロセスとウエットプロセスの二つがある。電子製品以外は主にウエットプロセスが用いられている。日本が「ものづくり」において優位性を保つのは部材である。その部材の大半はウエットプロセスにより製造されている。ウエットプロセスはドライプロセスに比べはるかに複雑で、多様な装置や操作から成り立っている。逆に、この「ものづくり」の複雑さが、日本の「ものづくり」を強くしているといえる。

ウエットプロセスの難しさには、製品に至る操作が長くて複雑なこと、原料の性状が重要であること、装置に依存すること、操作手順に依存すること、などが挙げられる。特に、様々な材料の分散や混合のプロセス技術が必要である。さらに、フィルムや薄膜などの形態を製作するために、塗布や乾燥のプロセスも必要である。多くの材料をいくつもの工程を経て最終製品に仕上げるためには、多くの技術の組み合わせや技術のつなぎが必要である。また、定量化が難しい技術を支援する感性も必要となる。

「ものづくり」においては経験が必要であり、大学で学べる理論も限定的なため、人材育成や技術の伝承が難しい。このような状況下では、少し立ち止まって、自分の頭でものを考えることが必要だ。その際、本書は先生であり、仲間でもあり、常に寄り添ってくれるものと確信する。なぜなら、プロセスの本質を理解することに努めているからである。分散・塗布・乾燥をできる限り深く説明し、基礎から応用に至る広範な領域を網羅している。以上の実現のために、産学が連携して本書を執筆した。

日本の「ものづくり」における、プロセス・イノベーションを実現するために、本書が役に立つことを期待したい。

平成 26 年 3 月 監修 山口 由岐夫

#### 《申込方法》

◎下記の申込書にご記入の上、FAXをお送り下さい。また試読をご希望の方は試読希望欄にレ印をお付け下さい。

「分散 塗布 乾燥の基礎と応用」(2759) 申込書		<input type="checkbox"/> 申し込み	冊	<input type="checkbox"/> 試読希望	年	月	日
住所 〒				TEL			
会社 団体名				FAX			
所属				役職名			
(フリガナ) 氏名(カネム)				E-mail			



株式会社テクノシステム

〒101-0054 東京都千代田区神田錦町3-16五十嵐ビル TEL. 03-3293-3105(代)

FAX. 03-3293-3874 E-Mail. info@techno-s.co.jp

執筆者一覧（50音順・敬称略）

足立 泰久	筑波大学 生命環境系 教授 農学博士
綾部 守久	旭化成株式会社 生産技術本部 生産技術センター 加工技術部 主席技師 技術士(機械・総合技術監理部門)
市村 拓野	三菱樹脂株式会社 産業フィルム開発センター 開発グループ チームリーダー 修士(工学)
稲澤 晋	東京農工大学 大学院工学研究院 応用化学部門 准教授 博士(工学)
井口 英昭	東京大学 大学院工学系研究科 化学システム工学専攻 学術支援専門職員
伊與田 浩志	大阪市立大学 大学院工学研究科 機械物理系専攻 准教授 博士(工学)
院去 貢	寿工業株式会社 化工機事業部 技師長 博士(工学)
植田 浩平	新日鐵住金株式会社 技術開発本部 君津技術研究部 主幹研究員 博士(工学)
梅津 信二郎	東海大学 工学部 機械工学科 講師 博士(工学)
江前 敏晴	筑波大学 生命環境科学研究科 国際地縁技術開発科学専攻 教授 博士(農学)
榎本 信太郎	東芝ライテック株式会社 技術本部 研究開発センター 主査
大嶋 寛	大阪市立大学 大学院工学研究科 化学生物系専攻 教授 工学博士
大坪 泰文	千葉大学 大学院工学研究科 建築・都市科学専攻 教授 工学博士
片桐 良伸	富士フィルム株式会社 R&D統括本部 生産技術センター 主席研究員
金井 洋	日鉄住金鋼板株式会社 執行役員 博士(工学)
神谷 秀博	東京農工大学 大学院工学研究院 応用化学部門 教授 工学博士
川上 宏典	出光興産株式会社 電子材料部 電子材料開発センター 主任
瓦家 正英	東京大学 先端科学技術研究センター 環境・エネルギー分野 客員研究員 博士(学術)
岸田 昌浩	九州大学 大学院工学研究院 化学工学部門 教授 博士(工学)
久保 耕司	帝人デュポンフィルム株式会社 フィルム技術研究所 フィルム研究室 室長 帝人グループ技術主幹
久保田 徳昭	岩手大学 名誉教授 工学博士
小池 修	東京大学 大学院工学系研究科 化学システム工学専攻 助教 博士(理学)
菰田 悦之	神戸大学 大学院工学研究科 応用化学専攻 准教授 博士(工学)
瀧 健太郎	山形大学 大学院理工学研究科 機械システム工学専攻 准教授 博士(工学)
立元 雄治	静岡大学 大学院工学研究科 化学バイオ工学専攻 准教授 博士(工学)
田中 諭	長岡技術科学大学 工学部 物質・材料系 准教授 博士(工学)
辻 佳子	東京大学 環境安全研究センター 准教授 博士(工学)
辻井 薫	元 北海道大学 電子科学研究所 教授 理学博士
鳥越 実	株式会社三菱化学科学技術研究センター 生産技術研究所 精密加工グループ 修士(工学)
西尾 太寿	リントック株式会社 技術統括本部 研究所 プロセス開発室 主任 修士(工学)
平沢 泉	早稲田大学 理工学術院 応用化学専攻 教授 工学博士
藤田 昌大	城西大学 理学部 数学科 教授 博士(工学)
淵上 修三	ミネソタ大学 化学工学・材料科学科 フェロー
松井 真二	兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所 教授
松根 英樹	九州大学 大学院工学研究院 化学工学部門 助教 博士(工学)
宮原 稔	京都大学 大学院工学研究科 化学工学専攻 教授 博士(工学)
宮本 公明	富士フィルム株式会社 R&D統括本部 先端コア技術研究所 嘱託 上席化学工学技士
安原 賢	MPM数値解析センター株式会社 取締役センター長
山口 由岐夫	東京大学 大学院工学系研究科 化学システム工学専攻 教授 工学博士
山村 方人	九州工業大学 大学院工学研究院 物質工学研究系 教授 博士(工学)
吉川 宣弘	株式会社村田製作所 技術・事業開発本部 マテリアル技術センター 化学材料開発部開発1課 課長 工学修士
吉田 重信	三菱樹脂株式会社 産業フィルム開発センター センター長 理工学修士
若林 淳美	一般財団法人工業所有権協力センター 化学部門 金属電気化学グループ 主席部員
渡邊 哲	京都大学 大学院工学研究科 化学工学専攻 助教 博士(工学)

## 序章

塗布膜の性能設計のための  
分散・塗布・乾燥のプロセス制御の  
重要性 (山口 由岐夫)

1. プロダクト・イノベーション
2. これまでの塗布技術
3. これからの塗布技術
4. 本書の目的

## 第 I 編 基礎編

### 第 1 章 分散

#### 第 1 節 分散の基礎

##### 第 1 項 粒子の基礎的特性 (神谷 秀博)

1. 分散・塗布で扱うナノ粒子、  
付着性微粒子
2. 粒子の幾何学的特性
  - 2.1 粒子径の定義
  - 2.2 粒子形状の定義
  - 2.3 粒度分布、統計学的な扱い
  - 2.4 比表面積
3. 粒子の運動特性
  - 3.1 ブラウン運動
  - 3.2 慣性運動、Stokes 則

##### 第 2 項 粒子間相互作用 (神谷 秀博)

1. 粒子溶媒間相互作用の基礎
2. van der Waals 力
3. 界面電気二重層による静電的な  
相互作用
4. 高分子等の吸着による立体障害  
効果と架橋効果

##### 第 3 項 粒子溶媒間相互作用 (神谷 秀博)

1. 粒子材質、溶媒種の選択
2. 粒子と溶媒の濡れ性、親和性
3. 溶媒分子吸着による斥力

##### 第 4 項 粒子濃度、表面間距離と凝集 機構 (神谷 秀博)

##### 第 5 項 粒子分散法とその機構

(神谷 秀博)

1. DLVO 理論に基づく分散法
2. 非 DLVO 的作用による粒子分散  
・凝集制御

##### 第 6 項 界面活性剤、分散剤の基礎的 作用機構、吸着機構 (神谷 秀博)

#### 第 2 節 調液/送液

##### 第 1 項 分散剤の実際とその役割

(瓦家 正英)

1. 分散剤の歴史
2. 分散剤の種類
  - 2.1 界面活性剤
  - 2.2 高分子型分散剤
3. 微粒子(顔料)、分散媒

##### 第 2 項 ナノ分散の特徴 (瓦家 正英)

1. ナノ分散の重要性
2. ナノ粒子の基本的性質(比表面積)  
と合成方法
3. 溶媒湿潤速度

##### 4. カーボンブラック表面特性と分散性

#### 第 3 項 物理的分散方式の特徴

(院去 貢)

1. 物理的な分散方式
2. 物理的な分散方式のナノ分散へ  
の適用
  - 2.1 微小ビーズ対応ミルによる  
ナノ分散
  - 2.2 超音波分散機によるナノ分散
3. 最適な分散方式

#### 第 4 項 ビーズミル方式 (院去 貢)

1. 微小ビーズ対応ミル誕生までの  
歴史
2. 微小ビーズ対応ミルの機構
3. 微小ビーズ対応ミルにおける  
微粒化メカニズム
4. 微粒化実施例

##### 4.1 分散操作

##### 4.1.1 分散(1) 微粒酸化チタン MT 100-AQ の分散

- ①実験目的
- ②実験内容
- ③実験結果

##### 4.1.2 分散(2) 微粒酸化チタン MT 100-AQ の 0.008 mm ビーズによる分散

- ①実験目的
- ②実験内容
- ③実験結果

##### 4.1.3 分散(3) 柔らかい超微粒子 酸化チタン: 粒子間付着 力が小さく粒子強度が 低い材料の分散

- ①実験目的
- ②実験内容
- ③実験結果

##### 4.1.4 分散(4) モノマーへの ナノ粒子の分散

- ①実験目的
- ②実験内容
- ③実験結果

##### 4.1.5 分散(5) フュムドシリカ の分散

- ①実験目的
- ②実験内容
- ③実験結果

##### 4.2 粉碎操作

##### 4.2.1 粉碎(1) 柔らかい材料の 粉碎: 有機顔料の粉碎

- ①実験目的
- ②実験内容
- ③実験結果

##### 4.2.2 粉碎(2) 硬い材料の粉碎: ゼオライトの粉碎

- ①実験目的
- ②実験内容
- ③実験結果

##### 5. 分散実施例一覧

#### 第 5 項 送液技術 (淵上 修三)

1. 送液プロセス設計
2. 溶存空気量の制御
3. 送液系機器の選択における注意点
  - 3.1 送液ポンプと流量モニター
  - 3.2 ろ過器と異物検出モニター

##### 3.3 脱泡と気泡検出モニター

##### 3.4 インライン直前添加混合器

#### 第 3 節 分散性評価

##### 第 1 項 粒子径分布の測定

(神谷 秀博)

1. 粒子の慣性運動を利用した測定  
法、沈降法
2. 粒子の光学的特性を利用した方  
法(レーザー回折散乱法など)
  - (1) 回折法
  - (2) 静的散乱法、動的散乱法

##### 第 2 項 ゼータ電位の測定 (神谷 秀博)

##### 第 3 項 粒子の界面特性、分子構造

(神谷 秀博)

1. 比表面積の測定法
2. その他の表面構造・特性評価法

##### 第 4 項 粒子間ポテンシャル、相互作用

(神谷 秀博)

#### 第 4 節 粒子の表面修飾

##### 第 1 項 有機化合物を用いる表面修飾技術

(松根 英樹, 岸田 昌浩)

1. 無機ナノ粒子の表面修飾
2. ナノ粒子表面からの高分子の生長
3. 交互積層法による表面修飾

##### 第 2 項 無機化合物を用いる表面修飾技術

(松根 英樹, 岸田 昌浩)

1. シランカップリング剤による表面  
修飾
  - 1.1 カップリング剤による表面  
処理法
  - 1.2 シランカップリング剤による  
分散性向上事例
2. その他のカップリング剤による  
表面修飾
3. カップリング剤を用いない表面修飾
  - 3.1 ヘテロ凝集を利用した表面修飾
  - 3.2 無機物によるコーティング
  - 3.3 コア-シェル型構造

#### 第 5 節 コロイド動力学

##### 第 1 項 粒子混相系のモデル化

(藤田 昌大)

1. 粒子混相系のモデル化の課題
2. 様々なメソスケール・モデル
3. メソスケール・モデルの比較

##### 第 2 項 コロイド粒子の拡散現象

(足立 泰久)

1. コロイド粒子のブラウン運動
2. 拡散方程式
  - 2.1 フィックの法則
  - 2.2 フィックの法則の直感的  
イメージ
  - 2.3 微小要素の物質収支
3. ストークス-アインシュタインの式
  - 3.1 沈降平衡の二つの解釈
  - 3.2 拡散フラックスと沈降フラッ  
クスの釣り合い
  - 3.3 沈降平衡時の力の釣り合い
4. ボルツマン分布
  - 4.1 沈降平衡を記述する濃度分布則

- 4.2 沈降平衡
- 5. アインシュタインの関係式
- 5.1 ランダムフライトモデル
- 5.2 粒子移動を連続量として捉えた場合の拡散方程式の導出
- 5.3 ランジュバン方程式

### 第3項 サスペンションの動力学, レオロジー (神谷 秀博)

- 1. 流体のレオロジー特性の基礎
- 2. 粒子分散系のレオロジー挙動の特徴
- 3. 粒子分散系の流動挙動への影響因子, 粒子濃度, 粒子間作用

### 第4項 粒子系のゲル化 (山口 由岐夫)

- 1. 粒子系の3次元網目構造形成
- 2. ポリマー添加によるゲル化
- 3. せん断誘起によるゲル化
- 4. 粒子系ゲル化の利用

### 第6節 混練・ペースト作製 (田中 諭)

- 1. 構成材料
  - 2. 混練・ペースト作製法
    - 2.1 セラミック専用押出杯土
    - 2.2 積層コンデンサー電極用ペースト
    - 2.3 電池電極用ペースト
  - 3. 混練機
    - 3.1 ロールミル
    - 3.2 ニーダー
    - 3.3 ビーズミル
    - 3.4 高速回転せん断型ミル(ホモミキサー)
    - 3.5 自転・公転式ミキサー
- おわりに

## 第2章 塗布

### 第1節 塗布の基礎

#### 第1項 塗布薄膜 (淵上 修三)

- 1. 塗布薄膜の高速安定生産に向けた塗布工程の制御
- 2. 塗布技術の応用分野の広がり
- 3. 塗布工程と方式
- 4. これからの塗布技術

#### 第2項 気相および液相における薄膜構造形成 (辻 佳子)

- 1. 薄膜形成過程
  - 2. 気相成長による薄膜形成
  - 3. 液相成長による薄膜形成
- まとめ

### 第2節 塗布材料物性

#### 第1項 表面/界面と塗布液物性およびその測定評価法 (辻井 薫)

- 1. 表面(界面)張力
  - 1.1 表面(界面)張力の起源
  - 1.2 表面(界面)張力の測定法
    - 1.2.1 液体の表面張力の測定
    - 1.2.2 固体の表面張力の測定
  - 1.3 界面活性と界面活性物質
- 2. 濡れ

- 2.1 平らな表面の濡れ(Youngの式)
- 2.2 凹凸表面の濡れ
  - 2.2.1 Wenzelの取り扱い
  - 2.2.2 Cassie-Baxterの取り扱い
- 3. 塗布液表面の動的挙動
  - 3.1 マランゴニ(Marangoni)効果
  - 3.2 表面粘弾性

### 第2項 塗布液粘弾性とその測定評価法 (大坪 泰文)

- 1. 非ニュートン流動とチクソトロピー
- 2. 回転型レオメーターによる粘度測定
- 3. 回転型レオメーターによるチクソトロピー挙動の測定
- 4. 毛細管型粘度計による粘度測定
- 5. 動的粘弾性(貯蔵弾性率と損失弾性率)
- 6. 動的粘弾性関数の角周波数依存性曲線

### 第3項 塗布液の複合物性 (大坪 泰文, 淵上 修三)

- 1. 伸長流動と破壊 (大坪 泰文)
- 2. バルクのレオロジーと表面張力 (大坪 泰文)
- 3. 塗布プロセス応答解析 (淵上 修三)
  - 3.1 実験的手法
  - 3.2 コンピュータシミュレーション手法

### 第3節 塗布方式と特徴

#### 第1項 塗布方式の分類 (片桐 良伸)

- 1. 前計量方式と後計量方式
- 2. 連続塗布と不連続塗布
- 3. 単層塗布と多層塗布

#### 第2項 塗布方式1(後計量塗布) ロール塗布 (植田 浩平, 金井 洋)

- 1. ロールコーターの概要とその特徴
- 2. 塗液の計量(膜厚の制御)
- 3. ロールコーターの塗布操作限界

#### 第3項 塗布方式2(前計量塗布) スライド塗布 (片桐 良伸)

- 1. 基礎知識
  - 2. 塗布液物性
  - 3. 流れの特徴
  - 4. 塗布可能領域(コーティングウィンドウ)
    - 垂れ
    - 空気同伴
    - リビング
    - 液切れ
  - 5. 外乱に対する安定性
  - 6. ダイ内部構造の設計
  - 7. スロット出口構造
  - 8. スライド面上多層流れの安定性
  - 9. 非定常部の問題
- おわりに

#### 第4項 塗布方式3(前計量塗布) カーテン塗布 (片桐 良伸)

- 1. 基礎知識
- 2. 塗布液物性

- 3. 流れの特徴
  - 4. 塗布可能領域(コーティングウィンドウ)
    - (1) カーテン膜形成限界
    - (2) ヒール
    - (3) 膜引かれ
    - (4) 空気同伴
  - 5. 外乱に対する応答性
  - 6. ティーポット現象
  - 7. エッジガイドに沿う流れ
  - 8. 付帯装置
- おわりに

### 第5項 塗布方式4(前計量塗布) スロットダイ塗布 (片桐 良伸)

- 1. スロットダイ塗布の概略
  - 2. 流れの解析
  - 3. 塗布可能領域(コーティングウィンドウ)
  - 4. 外乱に対する安定性
  - 5. ダイ内部構造の設計
  - 6. パターン塗布への適用
- おわりに

### 第6項 塗布方式5 インクジェット塗布 (梅津 信二郎)

- 1. インクジェット塗布対象
- 2. インクジェット方式分類
- 3. 各インクジェット方式の噴射ウィンドウ
- 4. EIJ法による薄膜塗布
- 5. インクジェット塗布方法~液滴重畳なしケース
  - 5.1 PIJ法による薄膜塗布
  - 5.2 液滴の着弾位置制御について

### 第7項 塗布方式6 スピン塗布 (鳥越 実)

- 1. スピン塗布の特徴と支配方程式
- 2. 流動による膜厚の減少速度
- 3. 乾燥による膜厚の減少速度

### 第8項 塗布方式7 パターン塗布 (宮本 公明)

### 第4節 表面の性状

#### 第1項 界面に働く力 (藤田 昌大)

- 1. 固液界面に働く流体力
- 2. 固液界面に働くDLVO力
- 3. 固液界面に働く非DLVO力
- 4. 気液界面に働く流体力

#### 第2項 粒子の濡れ性 (山口 由岐夫)

- 1. 粒子濃度が希薄な場合
- 2. 粒子濃度が濃厚な場合
- 3. 粒子膜の界面張力

#### 第3項 メニスカスの形状と毛管力 (藤田 昌大)

- 1. 接触角
- 2. メニスカスの形状
- 3. 毛管力

### 第5節 塗布流動

#### 第1項 潤滑流 (宮本 公明)

## 第2項 自由表面流とプロファイル方程式 (宮本 公明)

## 第3項 動的接触角 (宮本 公明)

## 第4項 流体力学的安定性 (宮本 公明)

- (1) 基礎式
- (2) 境界条件
  - ①速度条件
  - ②法線応力バランス
  - ③せん断応力バランス
  - ④界面速度連続
  - ⑤キネマチック条件
- (3) 正弦振動仮定
- (4) 境界条件の正弦波表現
  - ①速度条件
  - ②法線応力バランス
  - ③せん断応力バランス
  - ④界面速度連続
  - ⑤キネマチック条件
- (5) 一般解
- (6) 境界条件
  - ①固体壁条件
  - ②無限遠条件
  - ③界面せん断応力バランス
  - ④界面速度連続条件
  - ⑤法線応力バランス

## 第5項 塗布膜厚 (宮本 公明)

## 第6節 塗布流動数値シミュレーション 第1項 塗布流動解析の特徴 (安原 賢)

1. 一般的な流体解析の進歩
2. 汎用流体解析に対する塗布流動解析の特殊性
3. 塗布流動解析の歴史
4. 塗布流動解析の活用方法
5. 塗布解析知見に基づく最適設計
6. 塗布流動解析の最新コンピュータ環境
  - 6.1 塗布解析の計算時間ベンチマーク
  - 6.2 CPUの種類
  - 6.3 負荷分散並列計算の効果
    - 6.3.1 負荷分散並列計算の一例
    - 6.3.2 分散効率に影響を及ぼす因子
      - (1) 解析モデル規模
      - (2) 解析ソフトの種類
      - (3) 領域分散のアルゴリズム
      - (4) 計算ノード間の接続速度
      - (5) 通信プロトコルの速度
    - 6.3.3 塗布解析としての現実的な計算時間
  - 6.4 計算環境の最新技術
    - 6.4.1 解析ソフトを動かすためのOS環境
    - 6.4.2 仮想化されたOS上での塗布解析
    - 6.4.3 リモート接続環境
    - 6.4.4 GPU上での流体解析

## 第2項 塗布流動の基礎式、解析手法の分類 (安原 賢)

1. 流体解析の基礎式
2. 各種物性値の考慮
  - 2.1 粘度
  - 2.2 表面張力

## 2.3 接触角

3. 数値解析のための離散化手法(FEM, FDM, FVM)
4. ALE法, VOF法 の概念
  - 4.1 ALE法
  - 4.2 VOF法
5. 自由表面流動解析におけるALE法とVOF法の比較
  - 5.1 自由表面表現の違い
  - 5.2 初期形状の必要性, 自由表面変形への追従性
  - 5.3 定常解析と非定常解析
6. VOF法における自由表面の再現精度
  - 6.1 VOF法による自由表面とは
  - 6.2 解析スキームによる精度向上
  - 6.3 メッシュ細分による精度向上
7. 計算時間を抑制しつつ界面精度を向上するための工夫
  - 7.1 非定常計算におけるタイムステップサイズ
  - 7.2 特殊なメッシュ細分方法
    - ①領域指定細分
    - ②スカラー値指定細分(界面検出細分)
8. 塗布流動解析の分類
  - 8.1 ダイ内部の自由表面を含まない流動解析
  - 8.2 塗布ビードの自由表面流動解析
  - 8.3 ダイ内部, 塗布ビードの一体解析

## 第3項 各種解析ソフトによる塗布解析 (安原 賢)

1. 汎用流体解析ソフトの種類
  - 1.1 ALE法の市販ソフト
  - 1.2 VOF法の市販ソフト
  - 1.3 VOF法のオープンソースソフト
2. 実際の解析作業の流れ
  - 2.1 プリ作業
  - 2.2 ソルバーによる実計算
  - 2.3 ポスト処理
3. ALE法とVOF法の自由表面解析精度検証
  - 3.1 スロット塗布解析コーティングウィンドウの検証
    - 3.1.1 スロット塗布解析モデル
    - 3.1.2 解析結果と実験結果の比較
  - 3.2 毛細管モデルの検証
    - 3.2.1 毛細管モデル
    - 3.2.2 解析結果と理論値の比較

## 第4項 解析による塗布故障の予測 (最適設計事例) (安原 賢)

1. 塗布解析で再現される塗布故障の種類
  - 1.1 空気同伴現象
    - 1.1.1 動的接触点と動的接触角
    - 1.1.2 空気同伴臨界速度の存在
    - 1.1.3 臨界速度以下での空気同伴
    - 1.1.4 3次元解析における空気同伴
  - 1.2 段ムラ
  - 1.3 ダイフェイスへの濡れ上がり
  - 1.4 リビング

- 1.4.1 スロット塗布におけるリビング
- 1.4.2 スライドビード塗布におけるリビング
- 1.5 リビュレット
- 1.6 塗布エッジの膜厚不均一
- 1.7 間欠塗布の膜厚不均一
2. 塗布流動解析の限界と拡張
  - 2.1 解析ディメンジョンによる塗布故障再現の限界
  - 2.2 構造解析と流体解析の連成拡張
    - 2.2.1 流体構造連成によるブレード塗布解析
    - 2.2.2 ブレード塗布解析結果
  - 2.3 その他の各種拡張, 今後の塗布解析の展望
    - 2.3.1 基材表面への塗液染み込みの拡張
    - 2.3.2 多層同時塗布への拡張
    - 2.3.3 粒子連成の拡張

## 第3章 乾燥

### 第1節 溶媒乾燥の基礎 (山村 方人)

#### 第1項 乾燥特性と材料物性 (山村 方人)

1. 自己拡散係数(self diffusion coefficient)
  - 1.1 摩擦理論
  - 1.2 自由体積理論
  - 1.3 自己拡散係数の測定
2. 相互拡散係数(mutual diffusion coefficient)
  - 2.1 相互拡散係数の測定
3. 化学ポテンシャルと蒸気圧
4. 物質移動係数・伝熱係数

#### 第2項 恒率乾燥と減率乾燥 (山村 方人)

1. 乾燥期間と律速過程
2. 乾燥特性曲線の測定
  - (a) 残留溶媒量の測定
  - (b) 塗布膜内の熱移動量の測定
  - (c) 蒸発ガス組成の分析
  - (d) 蒸発面近傍の濃度分布の測定

#### 第3項 多成分系の乾燥 (山村 方人)

1. 自己拡散係数
  - 1.1 摩擦理論
  - 1.2 自由体積理論
2. 多成分拡散係数
3. 化学ポテンシャルと蒸気圧

#### 第4項 熱風乾燥シミュレーション (山村 方人)

1. 濃度分布の算出
  - 1.1 支配方程式
  - 1.2 境界・初期条件
  - 1.3 無次元化
  - 1.4 残留溶媒量
  - 1.5 離散化
  - 1.6 格子点の設定
  - 1.7 収束判定
2. 温度分布の算出
  - 2.1 支配方程式
3. 計算例

**第2節 乾燥濃縮過程**

**第1項 濃縮層形成のダイナミクス** (山村 方人)

**第2項 高分子濃縮層の形成** (山村 方人)

**第3項 粒子濃縮層の形成** (山村 方人)

1. 粒子単分散系
2. 粒子混合分散系
  - 2.1 乾燥マップの適用性
  - 2.2 粒子表面電荷の影響
  - 2.3 毛管圧力の影響
3. 粒子-界面活性剤分散系

**第3節 乾燥中の固体析出**

**第1項 溶媒乾燥に伴う溶質・結晶の析出挙動** (伊與田 浩志)

1. 実験の概要
2. 溶質の移動
3. 表面での溶質の析出
4. 温度変化と乾燥特性
5. 溶解度・溶液の移動物性の温度依存性が異なる水溶液
6. まとめと補足

**第2項 高分子電解質共存下における微結晶生成** (平沢 泉)

1. 過飽和溶液からの微結晶生成
2. 微結晶の特性
3. 高分子電解質環境場における微結晶生成
  - 3.1 単分散微結晶を生成する上での課題と戦略
  - 3.2 高分子電解質と反応原料の相互作用
4. 高分子電解質共存下の微結晶生成事例
  - 4.1 酸性条件下かつPEI共存下における硫酸塩微結晶の生成過程
  - 4.2 アルカリ条件下かつPAA共存下における炭酸塩微結晶の生成過程
  - 4.3 PEI存在下における金属微結晶の還元晶析生成過程
5. 高分子電解質環境の積極的活用

**第3項 有機化合物の結晶析出挙動** (大嶋 寛)

1. 過飽和溶液の構造
2. 会合体と結晶核
3. 結晶核形成のメカニズム
  - 3.1 一次核形成
  - 3.2 二次核形成
  - 3.3 一次核形成と二次核形成の類似点
4. 晶析は速度論的理解が重要  
まとめ

**第4項 準安定領域の考え方** (久保田 徳昭)

1. 準安定領域とは
  - 1.1 準安定領域の実験的決定法
  - 1.2 塗布膜乾燥過程における準安定領域

2. 準安定領域-従来の解釈-
  - 2.1 準安定領域はバッチ晶析における安定操作範囲か
  - 2.2 MSZWの冷却速度依存性
  - 2.3 MSZWと核化速度の関係
  - 2.4 準安定領域と古典核化理論との関係-熱力学的説明-
  - 2.5 MSZWに対する熱履歴の影響
  - 2.6 MSZWに対する攪拌速度の影響
  - 2.7 待ち時間との関連
3. 新しい解釈-筆者らの試み-
  - 3.1 核化点の新しい定義
  - 3.2 MSZW「一次核化のみの場合」
  - 3.3 MSZW「二次核化を考慮した場合」
  - 3.4 MSZWに対する冷却速度および検出感度の影響
4. 塗膜乾燥における析出結晶粒子と乾燥速度の関係

**第4節 乾燥硬化方式**

**第1項 乾燥方法** (立元 雄治)

1. 乾燥時の伝熱
  - 1.1 対流伝熱
  - 1.2 伝導伝熱
  - 1.3 放射伝熱(輻射伝熱)
2. 乾燥方式の選定
  - 2.1 噴出流(ノズルジェット)乾燥機
  - 2.2 多円筒(シリンドラー)乾燥機
  - 2.3 赤外線(遠赤外線)乾燥機

**第2項 ハイブリッド乾燥** (立元 雄治)

1. 複数の熱源・方式の併用
  - 1.1 真空乾燥法との併用
    - 1.1.1 真空マイクロ波乾燥法
    - 1.1.2 エアレスドライヤー
  - 1.2 ヒートポンプとの併用
2. 乾燥機の多段化
3. 複数の操作の併用
  - 3.1 ろ過乾燥機
  - 3.2 流動造粒・コーティング噴霧乾燥

**第3項 硬化方法** (瀧 健太郎)

**第4項 UV硬化** (瀧 健太郎)

1. UV硬化反応の分類
2. UV硬化プロセス

**第5項 UV硬化速度の測定方法** (瀧 健太郎)

1. UV硬化速度
  2. real time FT-IR(実時間フーリエ変換赤外分光法)

**第6項 ラジカル系UV硬化反応の反応工学モデル** (瀧 健太郎)

**第7項 UV硬化反応の数値シミュレーション** (瀧 健太郎)

**第5節 乾燥膜の力学特性**

**第1項 膜応力と破壊** (山口 由岐夫)

1. メカニカルクラック
2. 塗布膜の特徴

3. グリフィスクラック

**第2項 乾燥クラック** (山口 由岐夫)

1. 乾燥特性と膜構造
2. キャピラリー力
3. レオロジカルクラックのメカニズム

**第3項 塗布膜の密度** (山口 由岐夫)

1. 濃縮層の形成
2. 濃縮層の透水係数
3. 粒子体積分率とクラック限界

**第4項 粒子体積分率と物性** (山口 由岐夫)

1. 屈折率
2. 電子伝導性
3. 熱伝導性

**第6節 乾燥薄膜の電子物性**

**第1項 乾燥による構造形成の基礎** (辻 佳子)

**第2項 溶液からの固相析出** (辻 佳子)

**第3項 スピコート成膜による薄膜形成** (辻 佳子)

**第4項 薄膜形成ダイナミクス計測** (辻 佳子)

**第7節 乾燥によるコロイド粒子系の自己組織的構造形成**

**第1項 粒子系構造形成の基礎** (山口 由岐夫)

1. 粒子系膜の構造形成の分類
2. ものづくりプロセスにおける自己組織化
3. 乾燥における膜構造の形成
  - 3.1 高分子溶液の場合
  - 3.2 低分子溶液の場合
4. 流動プロセスにおける自己組織化
5. 乾燥プロセスにおける自己組織化

**第2項 液滴乾燥によるパターン構造形成** (渡邊 哲, 宮原 稔)

1. コーヒーリング現象
2. スティックスリップ現象

**第3項 垂直型移流集積法によるストライプ構造形成** (渡邊 哲, 宮原 稔)

1. 垂直型移流集積法(Vertical-Deposition Convective Self-Assembly)
2. ストライプ構造の形成
3. ストライプ構造形成モデル
4. 粒子細線幅の予測

**第4項 網目構造形成** (山口 由岐夫)

**第5項 3次元構造形成** (山村 方人)

1. 粒子充填
2. 導電パスの形成
  - 2.1 パーコレーション閾値
  - 2.2 分子吸着と導電性

**第6項 パターン形成** (山口 由岐夫)

- 第7項 粒子膜構造と複屈折** (稲澤 晋)
1. コロイド粒子膜での複屈折
  2. 粒子膜の構造と複屈折

**第8節 粒子系の自己組織化構造形成シミュレーション**

- 第1項 シミュレーションの基礎** (藤田 昌大)
1. 気液二相流のシミュレーション
  2. 気液相変化のシミュレーション
  3. 流体-固体二相流のシミュレーション
  4. 気液固三相界面のシミュレーション

**第2項 せん断場におけるコロイド粒子系の分散・凝集** (藤田 昌大)

1. せん断場におけるコロイド粒子系の自己組織化
2. コロイド粒子系の自己組織化シミュレーションの方法
3. コロイド粒子系の平行平板間せん断流れのシミュレーション

**第3項 単層系・多層系** (小池 修)

1. 球状粒子系の乾燥シミュレーション：SNAP-Lによる
  - 1.1 単層系の場合
  - 1.2 多層系の場合

**第4項 粒子系網目構造の形成**

(藤田 昌大)

1. 粒子系網目構造の形成メカニズム
2. シミュレーション・モデル
3. シミュレーションによる網目構造形成メカニズムの検証

**第5項 棒状・板状粒子** (小池 修)

1. 流れ場中での配向シミュレーション：SNAP-Fによる
  - 1.1 棒状粒子の場合
  - 1.2 板状粒子の場合
2. 乾燥シミュレーション：SNAP-Lによる
  - 2.1 棒状粒子の場合
  - 2.2 板状粒子の場合

**第6項 バイモダル球状粒子**

(小池 修)

1. 小粒子の大粒子への付着シミュレーション
  - 1.1 流れなしの場合：SNAP-Lによる
  - 1.2 単純せん断場が存在する場合：SNAP-Lによる
2. 乾燥シミュレーション：SNAP-Lによる

## 第4章 欠陥

**第1節 塗布欠陥**

**第1項 リビング** (宮本 公明)

1. スライド塗布におけるリビング発生
2. リビング発生メカニズムの解明

**第2項 空気同伴** (宮本 公明)

1. 空気同伴現象の発生メカニズム

2. 空気同伴の発生条件と対策
3. Miyamoto-Scriven 仮説

**第3項 支持体起因の膜厚ムラ**

(宮本 公明)

1. レベリング流動
2. フィルムプロファイル方程式による数値解析

**第4項 段ムラ** (宮本 公明)

1. 段ムラの発生要因
2. ビード挙動に起因する段ムラ
3. 成層流の界面不安定性に起因する段ムラ

**第5項 ウイーピングとリブレット**

(宮本 公明)

1. ウイーピング
2. リブレット

**第6項 スジムラ** (宮本 公明)

1. 様々なスジムラ
2. スジムラの発生要因

**第2節 乾燥欠陥**

**第1項 スキニング** (西尾 太寿)

1. スキニングとは
  2. 塗膜の乾燥メカニズム
  3. 拡散係数の温度・濃度依存性
  4. スキニングによって生じる欠陥
    - 4.1 ドライヤーバンド
    - 4.2 プリスター
  5. スキニング抑制対策
- まとめ

**第2項 相分離** (久保 耕司)

1. 相分離起因の欠陥
2. 高分子の相溶性と相分離
3. 高分子-高分子-溶剤系における相分離
4. 高分子と混合溶媒における相分離
5. 反応誘起相分離

**第3項 プリスター** (西尾 太寿)

1. プリスターとは
  2. 溶媒の沸騰による気泡形成
    - 2.1 蒸気圧の計算
    - 2.2 溶媒の沸騰を抑制するための乾燥条件
      - 2.2.1 塗膜温度と塗膜沸点の風速依存性
      - 2.2.2 最適乾燥条件の塗布量依存性
      - 2.2.3 最適乾燥条件の初期固形成分依存性
      - 2.2.4 最適乾燥条件の拡散係数依存性
  3. 溶存空気の析出による気泡形成
- まとめ

**第4項 反り** (井口 英昭)

1. 磁気テープの反り
2. 製造工程での反り
3. ユーザーの使用条件での反り

**第5項 クラック** (山口 由岐夫)

1. 粒子膜のクラック

2. ペースト膜のクラック
3. クラック対策

**第6項 膜剥離** (山口 由岐夫)

1. 固体膜と基板との接着力
2. ウエット系の特徴
3. 界面活性剤の影響
4. エマルジョンによる接着力の向上
5. 塗布膜の圧縮力による基板との剥離

**第7項 偏析** (江前 敏晴)

1. 偏析とは
  2. 塗工紙製造の乾燥工程における塗布液成分の偏析
    - 2.1 バインダーマイグレーション
    - 2.2 ラテックスのマイグレーションに与えるデンブンの影響
      - 2.2.1 塗工カラーの組成と塗布
      - 2.2.2 塗工層表面のラテックスおよびデンブンの濃度の測定
  3. 結果および考察
    - 3.1 デンブンの添加量の影響
    - 3.2 バインダーマイグレーション発生メカニズム
- まとめ

**第8項 皺(リンクル)** (山村 方人)

1. 表面硬化モデル
2. 表面未硬化モデル
3. 皺模様の利用

**第9項 溶媒凝縮ムラ** (山村 方人)

1. 表面張力流れによるムラ
2. 塗布膜端部における界面不安定
3. マランゴニ対流によるセル状パターン
4. 相分離
5. breath figureによるハニカム構造
6. 逆 breath figureによる球状構造
7. 規則的窪み構造

**第3節 塗布・乾燥欠陥**

**第1項 ハジキ, ピンホール** (宮本 公明)

**第2項 表面あれ** (山村 方人)

1. マランゴニ応力
2. 表面張力の温度依存性に基づく表面あれ
  - 2.1 初期膜厚ムラの成長
  - 2.2 ノズルからの噴流による凹凸形成
- 2.3 走行基材上の凹凸形成
3. 表面張力の濃度依存性に基づく表面あれ
  - 3.1 クレーター欠陥(Crater defect)
  - 3.2 ノズルからの噴流による凹凸形成
  - 3.3 非等温面上の凹凸形成
  - 3.4 走行基材上の凹凸形成
4. 規則的なセル状の表面あれ
  - 4.1 マランゴニセル
  - 4.2 マランゴニ数

**第3項 塗布乾燥プロセスウィンドウ** (淵上 修三)

## 第II編 応用編

### 第1章 電池関連

#### 第1節 色素増感太陽電池(DSSC)

(瓦家 正英)

1. 太陽電池の歴史
2. DSSC概要
3. 電極用ペーストと塗布特性
4. TiO<sub>2</sub>ペースト作製手法とセル性能

#### 第2節 リチウムイオン二次電池

(綾部 守久)

1. リチウムイオン二次電池の歴史と間欠塗布方式
  - 1.1 リチウムイオン二次電池(LIB)実用化の歴史
  - 1.2 LIBの構造と求められる塗布方式
2. 間欠塗布方式
  - 2.1 端部形状と膜厚均一性を得るためのポイント
  - 2.2 塗布長精度と制御応答性
  - 2.3 実際の塗布方式
3. ストライプ塗布方式
  - 3.1 ストライプ塗布
  - 3.2 ストライプ塗布における端部厚塗り
4. LIBに必要なその他の要素技術

#### 第3節 燃料電池と塗布乾燥

(菰田 悦之)

1. 固体高分子形燃料電池
2. 触媒膜の内部構造と製造プロセス
3. レオロジーを活用した塗工操作の理解
4. 燃料電池触媒膜スラリーの調製プロセスと発電性能
  - 4.1 分散時間が発電性能に及ぼす影響
  - 4.2 超音波照射が発電性能に及ぼす影響
5. 濃厚系スラリーの塗膜形成プロセスとレオロジーの有用性

### 第2章 ディスプレイ・照明関連

#### 第1節 塗布型低分子有機EL

(川上 宏典)

1. 有機EL素子
2. 真空蒸着法と塗布法
3. 塗布型有機EL材料の塗布に用いられる溶媒
4. 塗布型低分子有機EL材料の検討状況
  - 4.1 蒸着材料で高性能な骨格の塗布型への展開
  - 4.2 混合によるキャリアバランスの調整
  - 4.3 塗布積層化
5. 塗布型低分子EL材料開発の課題
  - 5.1 耐熱性の向上
  - 5.2 溶解性の向上

#### 6. 今後の展開

#### 第2節 塗布型有機EL照明

(榎本 信太郎)

1. 有機EL照明
2. 塗布型有機EL
3. 補助配線を導入したITO付き基板
4. メニスカス塗布
5. 有機ELパネル  
まとめ

#### 第3節 塗布型透明導電膜(辻 佳子)

1. フッ素ドーパド酸化スズ(SnO<sub>2</sub>:F)膜
2. 酸化亜鉛膜
3. Agナノワイヤ
4. カーボンナノチューブ, グラフェン
5. 導電性ポリマー  
まとめ

#### 第4節 ナノ粒子をフィラー成分とする透明帯電防止コーティング

(若林 淳美)

1. 透明帯電防止コーティングとその用途
2. 導電性フィラー濃度と塗膜導電性の関係
3. 導電性フィラー濃度と塗膜透明性の関係

#### 第5節 ディスプレイ用光学フィルム

(片桐 良伸)

1. LCDと光学フィルム
2. 光学フィルムの製膜技術
3. 光学フィルムの塗布技術  
おわりに

### 第3章 エレクトロニクス関連

#### 第1節 プリントド・エレクトロニクス

(松井 真二)

1. 印刷技術
2. コンタクトプリント
3. デバイス応用

#### 第2節 誘電体セラミックス(チップ積層セラミックコンデンサー)

(吉川 宣弘)

1. チップ積層セラミックコンデンサーとは
2. チップ積層セラミックコンデンサーの技術トレンドと重要な技術
3. チップ積層セラミックコンデンサーの製造プロセス
4. グリーンシート特性の制御因子について
  - 4.1 セラミックスラリーの素材料
  - 4.2 セラミックスラリーの調製条件

#### 第3節 ナノインプリント

(松井 真二)

1. 熱ナノインプリント
2. 光ナノインプリント
3. デバイス応用
  - 3.1 ディスプレイ部材

#### 3.2 光学部品

- 3.3 LED, 太陽電池への応用
- 3.4 パターンド・メディア
- 3.5 バイオ応用
- 3.6 半導体応用

### 第4章 機能性フィルム

#### 第1節 ガスバリアフィルム

(吉田 重信)

1. 各種用途のガスバリア要求特性
2. プラスチックフィルムのガスバリア性付与
3. ウエットプロセスによるバリア性付与
  - 3.1 基材とバリア塗工剤
    - (1) PVDC樹脂
    - (2) PVA樹脂
    - (3) エチレン・ビニルアルコール共重合樹脂(EVOH)
    - (4) アクリル酸系樹脂
    - (5) ナノコンポジット系樹脂
    - (6) 有機・無機ハイブリッド
  - 3.2 塗工プロセス
4. ドライプロセスによるバリア性の付与
  - 4.1 各種蒸着手法
  - 4.2 無機薄膜の特徴
5. 有機・無機複合膜によるガスバリア付与

#### 第2節 ゼオライト膜(山口 由岐夫)

1. シリカの合成
2. ゼオライト膜の製造
3. 種晶を用いたゼオライト膜の製造
4. ゼオライト膜の性能

#### 第3節 農業用フィルム(市村 拓野)

1. 各国施設園芸における農業用フィルム利用状況
2. 農業用フィルムの要求性能
  - (1) 光
  - (2) 熱
  - (3) 水
3. 農業用フィルムの高機能化
  - 3.1 塗布防曇耐久フィルム
  - 3.2 光制御フィルム
    - (1) 紫外線カットフィルム
    - (2) 遮熱フィルム
    - (3) 光学多層膜

### 第5章 プレコート鋼板(化粧鋼板)

(植田 浩平, 金井 洋)

1. 概要
2. 製造設備と操業のポイント
3. 欠陥の抑制技術
  - 3.1. ロールコーターによる塗装欠陥
  - 3.2. 焼付け時に発生する欠陥
4. 技術の展望

索引