

新講座・レオロジー

日本レオロジー学会 編

「講座・レオロジー」の改訂にあたって

「講座・レオロジー」の初版が刊行されてから20年以上が経過した。この間、本来の目的である“レオロジー講座”のテキストとしてだけでなく、いくつかの大学では授業の教科書・参考書としても使用されてきた。当初の予想を超えた数が出版され、現在でもなお需要があるのは喜ばしいことではあるが、初版出版後20年以上経過したことから内容を全面的に見直し改訂することにした。“レオロジー講座”のテキストが本書であるという立場は変わることがないので、本書の改訂は“レオロジー講座”の見直し・再編に密接に関係している。本会主催の講座・講習会については、この20年の間で大きく変貌した。多彩な講座・講習会が生まれ、好評を得てずっと続いている。このような状況下では、“レオロジー講座”の立ち位置も以前とは変わらざるを得なくなった。

今回の改訂では、旧版の構成と内容を全面的に見直すこととした。旧版のレオロジーの入門書という立場は踏襲するものの、専門書への橋渡しという役割も担えるようにするためである。これらの改訂により数式が格段に増えてしまったが、本書が取り扱う内容に関する限り改訂で大きな差異が生じたということはない。数式のところは少し時間をかけて手を動かせば理解できるようになっているはずである。本書（改訂版）の書名は「新講座・レオロジー」とすることにした。旧版の書名に「新」を加えただけにすることで、旧版からの継続性を明示したつもりである。旧版と同様、用語等については執筆者の意向を尊重することにしたので、すべての章で完全に統一されている訳ではない。このため、少し戸惑われるかもしれないがご容赦願いたい。今回の改訂でも、従来からの“高分子”色をほとんど薄めることができず、依然として本書は“高分子レオロジー”のテキストになっている。このことについてもご寛容をお願いする次第である。

2014年10月

著者一同

執筆

井上 正志 (第4章)	大阪大学大学院理学研究科
尾崎 邦宏 (第0章)	元京都大学化学研究所
四方 俊幸 (第6章)	東京農工大学大学院農学研究院
高橋 雅興 (第1章, 第7章)	元京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科
瀧川 敏算 (第2章)	京都大学大学院工学研究科
田中 敬二 (第5章)	九州大学大学院工学研究院
升田利史郎 (第0章)	元京都大学大学院工学研究科
渡辺 宏 (第3章, 付録)	京都大学化学研究所

初版の序

十年以上前、日本レオロジー学会主催“レオロジー講座”の開設を企画したとき、果たして魅力ある行事として定着するであろうかと心配したが、幸いにも産業界のニーズともマッチして、講座も本年で12回を数え、テキストとして本書を刊行する運びとなったことは講座の開設に関わった一人として誠に喜ばしい限りである。

本書の執筆を担当された方々は何れもわが国に於けるこの分野のオーソリティーであり、平明でかつ密度の高い本書の内容は、レオロジーを本格的に勉強したい方々は言うまでもなく、直面する問題の解決のために急いでマスターしなければならない方々の入門書としても十分お役に立つと確信している。ただ、本書は高分子物質のレオロジーが中心であり、表題の割にそのウェイトが大き過ぎる懸念がある。それはニーズの大きさの反映でもあり、また、我々のレオロジー学会の現状の反映でもあるように思う。

もとよりレオロジーは物理学、化学、生物学など理工学、農学・医学など様々な分野と関係があり、高分子物質はもとより金属、有機・無機材料、生体物質などあらゆる物質を対象にする。また、意識するとしないとにかかわらずあらゆる産業の分野で広く応用されている。恐らく十年後にはそれらの新しい内容を取り入れた改訂が必要になり、また、可能になるであろう。それにもかかわらず本書がレオロジー全般の基礎を理解し、様々な問題を応用する上で役立つものと確信しているし、またそうあって欲しいものと念願している。

1992年11月

日本レオロジー学会会長
小 高 忠 男

目 次

第0章 レオロジーとは.....	1
0.1 はじめに	
0.2 レオロジーという科学	
0.3 レオロジーの発展	
0.4 レオロジーの領域	
0.5 レオロジーの研究の手始め	
0.5.1 レオロジーの特徴と対策	
0.5.2 レオロジー以前の基礎知識のメリット・・・応用と現象論	
0.5.3 レオロジー以前の基礎知識のメリット・・・物性とミクロの理論	
第1章 レオロジー序論.....	11
1.1 はじめに	
1.2 変形と流動	
1.2.1 応力とひずみ	
1.2.2 変形の様式とひずみ	
1.2.3 流動とひずみ速度	
1.3 弾性・粘性・塑性	
1.3.1 フック（理想）弾性体	
1.3.2 非フック（非線形）弾性体	
1.3.3 ニュートン（純粘性）流体	
1.3.4 ビンガム（理想）塑性体	
1.3.5 非ニュートン流体	
1.4 粘弾性	
1.4.1 応力緩和	
1.4.2 クリープ	
1.4.3 粘弾性固体と粘弾性液体	
1.4.4 動的粘弾性	
1.4.5 マクスウェル要素とフォークト要素が示す粘弾性	
1.4.6 一般化マクスウェル模型と一般化フォークト模型	
1.4.7 緩和スペクトルと遅延スペクトル	
1.4.8 粘弾性固体や粘弾性液体への拡張	
1.5 測定法	
1.5.1 概要	
1.5.2 回転型レオメーター	
1.5.3 非ニュートンの補正	
1.5.4 円錐円盤・平行円板形による測定のノウハウ	
1.5.5 円錐円盤と平行円板形による測定時のトラブルと対処法	

第2章 高分子網目系のレオロジー.....35

2.1 はじめに

2.2 一本の高分子鎖の性質

2.3 モデル高分子網目の力学的性質

2.3.1 応力テンソルと変形勾配テンソル

2.3.2 高分子網目に対する応力の表式

2.3.3 アフィン変形

2.3.4 主軸と弾性エネルギー

2.3.5 実在網目系と膨潤網目系

2.4 現象論的なゴムの弾性理論：超弾性体の理論

2.4.1 応力テンソルと変形テンソル

2.4.2 ひずみエネルギー関数

2.4.3 構成方程式：応力とひずみの間の関係式

2.4.4 具体的な計算例：一軸伸長変形での応力とひずみの関係

後注

補遺 ゴルーゲル転移のレオロジー

第3章 高分子液体のレオロジー.....59

3.1 はじめに

3.2 レオロジーの基礎量：応力とひずみ

3.3 高分子液体の応力と緩和の起源

3.3.1 長時間域の応力表式

3.3.2 応力と緩和の分子論的イメージ

3.4 線形粘弾性の現象論

3.4.1 緩和剛性率

3.4.2 線形応答の一般的表記

3.4.3 ゼロずり粘度

3.4.4 貯蔵剛性率と損失剛性率

3.4.5 貯蔵剛性率と損失剛性率の角周波数依存性に反映される緩和の特徴

3.4.6 動的な粘弾性量に関する追補

3.4.7 終端緩和域を特徴づける粘弾性量とそのグラフィカルな決定法

3.4.8 力学模型

3.5 粘弾性緩和に対する温度の効果

3.5.1 温度 - 時間換算則

3.5.2 強度換算因子 b_T

3.5.3 移動因子 (時間換算因子) a_T

3.6 高分子液体の線形粘弾性の特徴

3.6.1 直鎖と星形分岐鎖の特徴

文献

3.6.2 直鎖と星形鎖の平衡運動の分子モデル

3.7 高分子液体の非線形粘弾性の特徴

3.7.1 大変形応力緩和

3.7.2 非ニュートンずり流動

3.7.3 非線形一軸伸長流動

3.8 終わりに

文献

第4章 高分子固体のレオロジー.....91

4.1 はじめに

4.2 測定方法

4.2.1 変形様式

4.2.2 線形粘弾性の測定方法

4.2.3 線形粘弾性の測定例と解析方法

4.2.4 非線形粘弾性

4.3 ガラス転移

4.3.1 弾性率の温度依存性

4.3.2 ガラス転移温度

4.4 無定形高分子のレオロジー

4.4.1 ガラス転移領域の粘弾性

4.5 流動光学

4.5.1 ゴム状物質の複屈折

4.5.2 ガラス状高分子の複屈折

4.6 高分子ガラスのレオロジー

4.7 ガラス状高分子の非線形粘弾性

4.7.1 大変形応力緩和

4.7.2 定ひずみ速度伸長実験

4.8 高分子ブレンドの粘弾性と相溶性

4.8.1 不均一ブレンド

4.8.2 相溶性ブレンド

4.9 結晶性高分子

4.9.1 結晶性高分子の線形粘弾性

4.9.2 結晶性高分子の非線形レオロジー

4.10 固体粘弾性特性と他の物性との関係

4.10.1 耐衝撃性

4.10.2 疲労特性

4.10.3 その他の物性

文献

第5章 表面のレオロジー.....125

5.1 はじめに

- 5.2 走査フォース顕微鏡測定
 - 5.3 表面弾性率の二次元マッピング
 - 5.4 表面ガラス転移温度
 - 5.5 表面ガラス転移温度におよぼす末端基の効果
 - 5.6 表面 α_a 緩和過程の活性化エネルギー
 - 5.7 表面ガラス転移温度におよぼす立体規則性の効果
 - 5.8 表面ガラス転移温度測定の実用例
 - 5.9 超薄膜の分子運動特性
 - 5.10 固体界面における高分子のガラス転移温度
 - 5.11 液体界面における力学物性と分子鎖熱運動性
 - 5.12 おわりに
- 文献

第6章 分散系のレオロジー.....149

- 6.1 はじめに
 - 6.2 粒子間相互作用
 - 6.2.1 斥力ポテンシャル
 - 6.2.2 引力ポテンシャル
 - 6.2.3 枯渇効果
 - 6.2.4 DLVO 理論
 - 6.3 レオロジー特性
 - 6.3.1 理想懸濁液の動的粘弾性挙動
 - 6.3.2 理想懸濁液の定常流挙動
 - 6.3.3 斥力的粒子間相互作用が働く懸濁液のレオロジー
 - 6.3.4 引力的粒子間相互作用が働く懸濁液のレオロジー
 - 6.3.5 構造変化とレオロジー特性
 - 6.3.6 ミセル水溶液のレオロジー
- 文献

第7章 応力とひずみの三次元表示と構成方程式.....171

- 7.1 はじめに
- 7.2 粘性流体の構成方程式
 - 7.2.1 ニュートン流体（線形粘弾性流体）
 - 7.2.2 非線形粘性流体
 - 7.2.3 非ニュートン流体の工学的モデル
- 7.3 弾性体の構成方程式
 - 7.3.1 変形勾配テンソル
 - 7.3.2 ひずみテンソル
 - 7.3.3 ひずみエネルギー関数
 - 7.3.4 応力楕円体とひずみ楕円体

7.3.5 弾性体の応力とひずみの関係

7.4 粘弾性体の構成方程式

7.4.1 三次元線形マクスウェル要素

7.4.2 三次元線形一般化マクスウェル模型

7.4.3 Phan Thien-Tanner(PTT)モデル

7.4.4 Leonov モデル

7.4.5 Giesekus, Larson モデル

7.4.6 BKZ モデル

付録 A 一般的な応力表式.....195

索引.....199