第66回日本内科学会講演会 (1969年)

シンポジウム

内科学におけるレオロジーの導入*

司 会 千葉大学教授 斎 藤 十 六

(1) レオロジーの展望

東京都立大学物理学科教授

岡 小 天

SYMPOSIUM ON INTRODUCTION OF RHEOLOGY
INTO INTERNAL MEDICINE

Moderator

Soroku SAITOH, M.D.

Professor of Chiba University, Chiba

A REVIEW OF RHEOLOGY

Syoten OKA

Professor of Department of Physics, Tokyo Metropolitan University

レオロジーとはどんな学問か、その導入はなぜ内科学に必要かということを、次の諸項目に分けて平易に解説する。

1. レオロジーの誕生

弾性力学では、ひずみ $\propto$ 応力というHookeの法則に基づいている。この法則の成り立つ物体は理想弾性体である。

一方流体力学では、ひずみ速度 $\propto$ 応力というNewtonの粘性法則に基づいている。この法則の成り立つ液体はニュートン液体と呼ばれる。

Binghamはペイント、粘土、アスファルトなど

* 本シンポジウムは1969年4月1日 仙台市
宮城県民会館大ホールにて行なわれた。

の流動がニュートンの粘性法則にしたがわないことから、一般に物質の変形、流動にかんする科学の必要性を力説し、この科学をrheologyと命名した(1929)。そしてThe Society of Rheology(1929)が創立した。rheo-というのはギリシヤ語の“流れる”からきたものである。例えばHeraclitus (B. C. 500) は $\pi\alpha\nu\tau\alpha \rho\epsilon\iota$ (万物流転) なる名句を残している。

2. レオロジーの特徴

1) レオロジーは物体の運動というよりは物質の力学的特性に重点をおく。物質の力学的特性は、理想弾性体においてはHookeの法則、ニュートン液体においてはNewtonの粘性法則で表わさ

れ、これらはひずみと応力あるいはひずみ速度と応力との関係として表わされている。一般にひずみ、ひずみ速度、応力、応力の時間微分などの間の関係を物質方程式 (constitutive equation) という。これをレオロジー方程式 (rheological equation) ということもある。

2) レオロジーは物性論的、分子論的色彩が強い。

3) レオロジーは対象とする物質の多様性、個性に興味の重点をおく。

4) レオロジーは複雑な物性を扱うので、実験的研究が先行する。

5) レオロジーは工業からの必要性が動機となつて発展した。窯業、パン工業、ゴム工業、さらに線維工業、プラスチック工業、ペイント工業、土木工業などとくにレオロジーと密接な関係にある。

6) レオロジーは実験的な面のほかに、理論的な面も備えている。現象論、分子論の両面で数学的理論が展開されている。

3. レオロジーの関連分野

1) 工業と密接な関係にあることは前述の通りである。

2) 物理学、物性論と関係の深いこともいうまでもない。

3) コロイド化学、化学、高分子化学、化学工学とも縁が深い。

4) 生物学、医学、薬学、農学とも深い関係がある。錠剤の製造、土壌の力学的性質は薬学、農学と関係する。

5) 生物学、医学に関連するレオロジーは生物レオロジー (biorheology) と呼ばれる。その中でとくに血液、血管にかんするレオロジーは最近急速に発展しつつある分野で、ヘモレオロジー (hemorheology) と呼ばれる。

6) レオロジーにかんする心理学の分野をサイコロロジー (psychorheology) という。物体の硬さ、軟らかさなどの感覚は、心理学の分野に属する。

4. レオロジーで取り扱われる問題

1) 一般に物体の変形を取り扱うのがレオロジーである。流動は変形が時間的に連続的に起こる場合であるから、広義の変形は流動も含む。

2) ひずみと応力との関係 (一般にはそれらの時間微分も含む) が物質方程式である。それぞれのひずみに対する応力をプロットした曲線が応力-ひずみ曲線である。物質の種類によつては明瞭な降伏値が認められる。

3) 弾性、粘性、塑性

粘性は液体の特徴であるが、固体もある意味で粘性を示す。これを固体粘性という。

4) 粘弾性

クリープ、応力緩和、遅延弾性 (弾性余効)、弾性ヒステレシス、曳糸性などはいずれも粘弾性に属する。粘弾性では独立変数としての時間と温度が対等の関係にある。

5) 動的粘弾性

ひずみ、または応力が正弦的に変化する場合の粘弾性を動的粘弾性という。この場合には動的弾性率 E' 、動的損失率 E'' 、 $\tan \delta = E''/E'$ 、動的コンプライアンス J' 、損失コンプライアンス J'' 、 $\tan \delta = J''/J'$ などの量が問題になる。静的粘弾性のときの時間と温度との関係に対応して、この場合には振動数と温度との関係が問題になる。

6) 一般に粘弾性では遅延時間や緩和時間の分布を問題にする。これが遅延スペクトルあるいは緩和スペクトルである。

7) 一般にコロイド溶液、分散系、高分子融液の示す粘性はニュートンの粘性法則にしたがわず、いわゆる非ニュートン粘性である。また降伏値を示すこともあり、この場合には塑性流動といっている。

8) とくに血液の場合には、赤血球が rouleaux を形成することがある。また赤血球が凝集して sludge を形成したり、血液が凝固することもある。このような血液の状態の変化はレオロジーの性質に重大な変化を生ずる。

9) 分散系の場合にはチクソトロピー、ダイラ

タンシーのような異常現象のみられることがよくある。

10) Poynting効果やWeissenberg効果はいわゆる法線応力効果である。Barus効果も法線応力効果で説明する考がある。

11) レオロジーで取り扱われる問題としては、以上のほかに、破壊、接着、潤滑がある。

5. 生物とレオロジー

生物レオロジーは大別すると、生物体内におけるレオロジーと、生体構成物質（タンパク、核酸など）のレオロジーとになる。くわしくは後の文献を参照されたい。

6. レオロジーの歴史的発展

- 1) 応力緩和 Maxwell(1868)
- 2) ケルビン模型 Kelvin(1875)
- 3) 重ね合わせの原理 Boltzmann(1876)
- 4) ダイラタンシー Reynolds(1885)
- 5) フォークト模型 Voigt(1890)
- 6) ビンガム塑性 Bingham(1919)
- 7) チクソトロピー Freundlich(1923)
- 8) 構造粘性 Wo. Ostwald(1925)
- 9) Fahreaus-Lindqvist効果
Fahreaus, Lindqvist (1931)
- 10) シグマ効果 Scott Blair (1940)
- 11) ワイセンベルグ効果 Weissenberg (1947)

7. 国の内外におけるレオロジーの活動状況 学会、雑誌

- 1) 日本
レオロジー討論会
“材料”特集号
- 2) イギリス
British Society of Rheology
Rheology Abstracts
- 3) アメリカ
American Rheological Society
Transaction of the Society of Rheology
- 4) オランダ
Netherlands Rheological Society
- 5) ドイツ

Deutsche Rheologische Gesellschaft
Deutsche Rheologen Vereinigung
Rheologica Acta

- 6) フランス
La Commission Nationale Francaise de
Rheologie
Groupe Francaise d'Etudes de Rheologie
- 7) 国際雑誌
BIORHEOLOGY... An International
Journal A.L. Copley, [G.W. Scott Blair
(chief editor) Pergamon Press

国際会議, Proceedings

- 1) International Congress on Rheology
Scheveningen, Oxford, Bad Oeynhausen,
Providence, Kyoto
- 2) International Society of Hemorheology
Reykjavik, Heidelberg

8. レオロジーと内科学

- 1) 血液、血管
血液の非ニュートン粘性、降伏値、シグマ現象、血漿層の分離、赤血球の粘弾性、rouleaux形成、凝集、血栓形成、血液凝固、赤沈、血液循環、脈波、乱流、微小循環、毛細血管内の血流、血管の粘弾性、血管壁の張力

- 2) リンパ液
- 3) 関節液の曳糸性
- 4) 脳脊髄液
- 5) 咳痰の粘弾性
- 6) 子宮分泌液の粘弾性
牛の人工授精
- 7) 心臓、膀胱、肺、筋肉、コラーゲン、骨
- 8) 前眼房水の対流
水晶体の粘弾性
晶子液の曳糸性
- 9) 疾患、老化
構造、組成の変化
レオロジー的性質の変化

9. レオロジーの入門的参考書

- 1) 中川, 神戸「レオロジーとは何か」みすず

- 書房, 1956
- 2) 岡「高分子の粘弾性」岩波, 1955
 - 3) 森「レオロジー」共立出版, 1957
 - 4) 小野木「レオロジー要論」槇書店, 1957
 - 5) 井本「レオロジー入門」高分子化学刊行会, 1958
 - 6) 中川, 神戸「レオロジー」みすず書房, 1959
 - 7) 中川「レオロジー」岩波, 1960
 - 8) 後藤, 平井, 花井「レオロジーとその応用」共立出版, 1962
 - 9) 井本「概説レオロジー」上, 下, 東京化学同人, 1963
 - 10) 山本「レオロジー」槇書店, 1964
- 生物とレオロジーの参考書, 文献
- 1) 岡「血液のレオロジー (I) ~ (VI)」高分子16, 1967
 - 2) 岡「生物流体物理」日本物理学会誌 23 : 823, 1968
 - 3) 岡「血液の流体物理」日本物理学会誌 23 : 837, 1968
 - 4) A. Frey-Wyssling(ed.): Deformation and Flow in Biological Systems. Amsterdam,
 - 5) A.L. Copley, G. Stainsby (ed.): Flow 1952. Properties of Blood and Other Biological Systems. Pergamon Press, 1960.
 - 6) A.L. Copley (ed.): Symposium on Bio-rheology. Intersci. Publ., 1965.
 - 7) R.L. Whitmore: Rheology of the Circulation. Pergamon Press, 1968.
 - 8) A.L. Copley (ed.): Hemorheology—Proceedings of the First International Conferenc, The University of Iceland, Reykjavik, 10th~16th July 1966. Pergamon Press, 1968.