

81.17
381

f

化学技術者のための移動速度論

早稲田大学教授・工学博士 城塚 正
早稲田大学教授・工学博士 平田 彰 共著
東京農工大学助教授・工学博士 村上昭彦

1978-10.24 社

著 者 略 歴

城 塚 正

昭和19年 早稲田大学理工学部
応用化学科卒，米国留学

昭和35年 工学博士

現 在 早稲田大学理工学部教授

平 田 彰

昭和33年 早稲田大学理工学部
応用化学科卒

昭和38年 工学博士（早稲田大学）

現 在 早稲田大学理工学部
教授

村 上 昭 彦

昭和36年 早稲田大学理工学部
応用化学科卒

昭和43年 工学博士（早稲田大学）

現 在 東京農工大学工学部
助教授

化学技術者のための 移動速度論

© 城塚 正・平田 彰 1966
村上昭彦

昭和41年 5 月 31 日 第1版第1刷発行

昭和52年 7 月 30 日 第1版第8刷発行

OHM・OHM・OHM・OHM
著者承認
検印省略
OHM・OHM・OHM・OHM

著 者

しう づか たけし
ひら た 正
むら 田 彰
むら 上 彦
あき 昭

発 行

株式会社 オ ー ム 社

郵便番号 101

東京都千代田区神田錦町3ノ1

代表者 三 井 正 光

発 売 所

株式会社 オ ー ム 社 書 店

101 東京都千代田区神田錦町3ノ1 (振替東京 6-20018)

604 京都市中京区河原町通り四条上ル (振替京都 31080)

530 大阪市北区堂島・毎日大阪会館 (振替大阪 10884)

印刷 日東紙工 製本 司巧社

落丁・乱丁本はお取替えいたします

は し が き

化学装置や反応装置の設計については、「化学工学」や「反応工学」の主要な目的として追求され、実用的な意味では大体完成されたものと思われる。しかし学問体系としての「化学工学」、「反応工学」はその歴史が浅く、実用への成果を急ぐあまりに経験的表式や数値をつなぎ合わせて構成されている部分が多い。このためこれらを学んだものが、ややもすると設計はできてもこの学問分野における真の意味の創造性に欠けることが指摘されている。この欠陥の原因は、従来のこの分野での装置設計法が各種の装置内で起こっている過程の解析から導出されたものでないことによると考えられる。これに反してもし、過程の解析から設計が行なわれれば、新しい過程を含んだ現象へ適応した新しい設計もでき、全く新形式の装置の提案さえ可能となり、創造性は一段と強化されるわけである。

本書はこの考え方によって重要な意義をもつ、装置内で起こる諸現象の解析に必要な基礎的な知識とその応用としての解析例を主な内容として盛り込んだものである。すなわち、装置内の諸現象は、基本的には与えられた装置内の条件下における運動量移動、熱移動、物質移動、化学反応による変化過程およびこれらの過程の組合せ現象に大別され、この諸現象の解析が主なる対象となるのである。

また化学工学関係の研究報文、たとえば、本邦の「化学工学」誌や欧米の A. I. Ch. E. Journal, Ind. and Eng. Chemistry, Chem. Eng. Science などに掲載される報文数は毎年急速に増加し、その内容も上述の装置内現象の解析に関するものの割合が著しく大となっている。これらの報文を読みこなし、応用するためにも前記のような基礎知識を必要とするであろう。

この分野については、本書の第1章で述べてあるとおり、すでにウィスコンシン大学の Bird 教授らの“Transport Phenomena”の名著などがあるが、あえて本書を書名「移動速度論」としてまとめた意味は、この分野の急速な進展に対応して内容を補強し、化学技術者として必要な反応を伴う諸問題、装置内混合、特に各種の系の物質移動の実験事実を含むやや詳細な内容などを新設、増補

した点である。しかし、この増強のため、内容が難解となることは極力さけたつもりであり、使用する数学も常微分方程式、偏微分方程式および数値解析の初歩的知識の範囲にとどめた。

本書の内容は多岐にわたるため、全体の不統一、各部分の解析例の脱落などに陥らぬように留意したつもりであるが、限られた紙数でもあり意に満たぬ点も多いので、特に読者の御叱正をお願いしたい次第である。また内容は解析例を多く採用したため、学会誌などに掲載された数多くの報文などを引用したので、これらの原著者に対し深い敬意と感謝を表わしたい。

最後に本書の執筆に際して、多くの助力を受けた早稲田大学大学院博士課程学生、佐野正道、修士課程学生戸上貴司、松下賢庸、小池信夫の諸君に感謝したい。

昭和 41 年 4 月

著 者 ら し る す

目 次

1. 総 論

1・1 基礎工学の誕生	1
1・2 基礎化学工学の誕生	3
1・3 移動速度論の発展	4
1・4 移動現象機構	7
1・5 運動量移動理論の概観	12
1・6 熱移動理論の概観	14
1・7 物質移動理論の概観	16

2. 基礎方程式の導出

2・1 物質収支式—I (連続方程式).....	21
2・2 運動量収支式 (運動方程式).....	23
2・3 エネルギー収支式 (エネルギー方程式).....	28
2・4 物質収支式—II (拡散方程式).....	34
2・5 方程式の簡易化	40

3. 層流中の定常現象の解析法

3・1 層流中の速度分布	43
3・2 層流中の強制対流伝熱と自然対流伝熱	48
3・3 層流中の濃度分布 (一方向分布).....	52
3・4 2次元流の取扱い	54
3・5 2次元伝熱の取扱い	62
3・6 2次元物質移動の取扱い	64

[解析例]

1) 流下液膜中の速度分布.....	43
2) 円管内流.....	44
3) 同心二重円筒中の流れ.....	45
4) 同心直立二重円筒.....	46
5) 固体回転をしている液の自由表面.....	47
6) 強制対流伝熱.....	48
7) 自然対流伝熱.....	50
8) 静止気体中の一方拡散.....	52
9) 無限円柱表面からの拡散.....	53
10) ポテンシャル関数の利用.....	57
11) 円柱のまわりの流れ.....	57
12) 流れの中におかれた平行2平板付近の流れ.....	58

13) 特に重要な応用をもつ半径 R の球のまわりの クリープ流れの速度分布	60
14) 円管内強性対流伝熱	62
15) 2次元熱伝導	63
16) 流下液膜への物質移動	64

4. 非定常現象の解析法

4・1 非定常基礎微分方程式	68
4・2 層流域における非定常流動の解析	68
4・3 非定常熱移動現象の解析	78
4・4 非定常拡散現象の解析	84

[解析例]

1) Stokes の第1問題	69
2) Couette 流れの生成	70
3) 調和振動をする平板付近の流動 (Stokes の第2問題)	73
4) 円管内の非定常流動	74
5) 2枚の水平平板間の非定常流動	76
6) 直立同心二重円筒の非定常接線方向流れ	77
7) 半無限固体中の非定常熱伝導	78
8) 有限厚さの平板中の非定常熱伝導	79
9) 材質の異なる平板を張った半無限固体	80
10) 固体球中の非定常熱伝導	81
11) 完全混合状態の流体に浸された固体球中の非定常熱伝導	82
12) 溶媒 B が半無限拡がりの場合の非定常拡散	84
13) 境界外が常に一樣濃度なときの境界内非定常拡散	86
14) 両端が無限拡がりの場合の等モル相互拡散	87
15) 両端が有限の場合の等モル相互拡散	87
16) 界面を通しての非定常拡散	88
17) 蒸発における非定常拡散	89

5. 層流境界層理論とその応用

5・1 境界層理論	94
5・2 層流速度境界層の解析とその応用	103
5・3 層流温度境界層の解析とその応用	115
5・4 層流濃度境界層の解析とその応用	124
5・5 非定常層流境界層の解析	132

[解析例]

1) Blasius による厳密解 (級数解)	104
2) 平板上の境界層の近似解法	109
3) 種々の流れに関する解析	111
4) 流れに直角な円柱のまわりの流れ	114
5) 摩擦熱が無視できる場合	117
6) 断熱壁の場合	118
7) 摩擦熱が無視できる場合の近似解法	121
8) 単一球よりの物質移動	126
9) 平行平板よりの物質移動の近似解法	128
10) 摂動法による解析	129
11) 2次元流および軸対称流の非定常境界層	135
12) 2次元流の場合の解析	135

13) 振幅が直径より著しく小さい場合の近似解法	138
--------------------------	-----

6. 乱流中の移動現象の解析法とその応用

6.1 乱流に関する基礎理論	140
6.2 円管内の乱流における解析とその応用	148
6.3 平板上の乱流境界層における運動量移動	156
6.4 乱流中における熱および物質移動	162

[解析例]

1) ナビエ-ストークス方程式よりレイノルズ応力の誘導	142
2) von Kármán の相似則の仮説による対数速度分布式	152
3) 指数法則による $v^*(=v_x/v_*)$ 対 $y^*(=y/y_*)$ の表示	152
4) 平滑管, 粗面管の両者に使用しうる速度分布式	154
5) 粗面管の抵抗係数	155
6) 層流境界層が存在する場合の摩擦係数	159
7) 超音速流中における熱および物質移動の解析	167

7. 非ニュートン流体中の移動現象

7.1 非ニュートン流動	173
7.2 非ニュートン流動の運動量移動	179
7.3 非ニュートン流動の熱および物質移動現象	189

[解析例]

1) ビンガム流体の接線方向の円環流れ	182
2) 指数法則流体の層流円管流動における熱移動	189
3) エリス流体の円管内熱移動	191
4) 指数法則流体の層流円管流動における粘性加熱	195
5) 指数法則流体の層流円管流動中の物質移動	197
6) 平板における運動量および熱移動現象	198

8. 化学反応を伴う移動現象の解析法

8.1 静止系における反応を伴う物質移動の解析	201
8.2 流動系における反応を伴う運動量, 物質移動の解析	212
8.3 反応係数による各理論の比較	226

[解析例]

1) 1次不可逆反応の解析 (定常条件)	203
2) 瞬間2次不可逆反応の解析 (定常条件)	203
3) 瞬間1次可逆反応の解析 (定常条件)	204
4) 1次不可逆反応の解析 (非定常条件, 浸透説)	205
5) 瞬間2次不可逆反応の解析 (非定常条件, 浸透説)	206
6) 瞬間1次可逆反応の解析 (非定常条件, 浸透説)	207
7) 1次不可逆反応の解析 (非定常条件, 表面更新説)	208
8) 瞬間2次不可逆反応の解析 (非定常条件, 表面更新説)	208
9) 瞬間1次可逆反応の解析 (非定常条件, 表面更新説)	209
10) 球状触媒の有効係数	209
11) その他の形状の触媒の有効係数	211
12) 瞬間不可逆反応の解析 (境界層理論)	213
13) 瞬間1次可逆反応の解析 (境界層理論)	214

14) 1次不可逆反応の解析 (平板上の境界層理論).....	216
15) 1次不可逆反応の解析 (よどみ点近傍の境界層理論).....	217
16) 瞬間2次不可逆反応の解析 (平板上の境界層理論).....	218
17) n 次不可逆反応の解析 (平板上の境界層理論).....	219
18) 1次可逆表面反応の解析 (境界層理論).....	221
19) 瞬間不可逆反応の解析 (境界層理論).....	222
20) 瞬間1次可逆反応の解析 (境界層理論).....	224
21) 1次不可逆反応の解析 (境界層理論).....	225

9. 固体-流体間物質移動

9・1 各種模型よりの物質移動	232
9・2 超音速流中における物質移動	247
[解析例]	
1) 有効温度法による近似解析	249

10. 流体-流体間物質移動

10・1 物質移動に関する諸理論	255
10・2 気液接触系の物質移動	261
10・3 液々接触系の物質移動	271
[解析例]	
1) 単一球面を流下する液膜内への物質移動	268
2) 液滴生成時の物質移動	272
3) 滴内流動がなく物質移動が分子拡散による場合	275
4) 滴内循環流を考慮した場合	275
5) 界面抵抗の存在するときの界面を通しての非定常拡散	281

11. 装置内の速度過程と混合拡散現象

11・1 混合拡散の表現	286
11・2 混合拡散の測定法および評価法	289
11・3 混合モデル	294
11・4 均一系の速度過程と混合拡散	301
11・5 異相系の速度過程と混合拡散	304
11・6 微視的混合と巨視的混合	314
[解析例]	
1) 完全混合槽における周波数応答	291
2) 十字流接触段上の流体混合と段効率	309
3) 液々系異相間反応	313

参 考 書	320
演習問題	323
付 録 ベクトル・テンソル・誤差関数・物性表	331
索 引	341

II

総

論

移動速度論の意義と移動現象機構

本書をひもとかれる読者は、まず移動速度論の全工学分野における位置づけやその意義をはっきり把握して勉強される必要があるだろう。そのためには移動速度論の歴史的な発生、発展の経過を知ることが重要である。本章ではまずこの経過とその内容の概観を述べることにしよう。

1・1 基礎工学の誕生

基礎科学 (basic science) としての純正科学 (pure science) の急速な発展とともに、各工業分野の開発も最近はきわめて急である。この状況に対応して純正科学の知識を応用まで進めるため、基本法則および通有の原則に基づいた論理的思考によって、工学的解析、設計に関する諸問題を解決する必要が強く要求されてきた。このような全工学分野 (機械・電気その他) の研究開発、設計などの具体的諸作業の論理的基礎、すべての分野にまたがる基本法則とこれに基づく論理的開発手法が、基礎工学 (engineering science) である。華麗な各工業分野の拡大をながめてみると、各分野は従来の工学の諸分野の範囲内にそれぞれおさまるような単純な内容からはみ出した発展が行なわれ、そこに過去における工学の分化に対応した研究者・技術者とは別に総合的工学を身につけた研究者・技術者の要求が生まれてくるのである。しかしながら、過去に分化した工学諸分野の内容はそれらの発展とともに豊富であり、工学的な教育において、すべての工学

分野の諸知識を修得することは困難である。このような背景のもとに、基礎工学が既存技術者の再教育および一般の工学教育の分野に誕生したのである。このような発生過程から考えると、基礎工学は新しい科学的知識、特に初期においては基礎科学的知識と考えられた研究分野も、応用に移しうる程度成熟したものは基礎工学としてすばやく移し、その一部としなければならない。

米国においては、1955年に工学教育評価委員会 (The Committee on Evaluation of Engineering Education) の最終的な報告において、基礎工学の教育面における重要性が強調された。これによって同年米国工学教育協会 (American Society for Engineering Education) に基礎工学に関する特別研究委員会が設置され、この体系化と内容の充実のために、1956年に次のような研究班 (Task Groups) が設けられ、具体的な諸作業が活潑に行なわれたのである。

- 1) 固体力学 (静力学・動力学・材料力学) (mechanics of solid)
- 2) 流体力学 (mechanics of fluid)
- 3) 熱力学 (thermodynamics)
- 4) 移動および速度論 (熱・物質・運動量移動) (transfer and rate processes)
- 5) 電気磁気学 (場・回路およびエレクトロニクス) (electrical sciences)
- 6) 材料学 (性質と原子構造あるいは集会的構造との関係) (nature and properties of materials)
- 7) 工学的解析および設計

前述したように基礎工学の内容は固定したものではなく時代や見解によって変化することはもちろんであるが、この研究班が基礎工学の内容の大分類と考えてよいと思う。これらのうち4) 移動および速度論以外の内容は読者におかれても多分推測できると思うが、この分野の最近の考え方は “Recent Advances in the Engineering Science” McGraw-Hill Book Co. Inc., N.Y. (1958) に詳しく記述されているので参考とされたい。

さて、工学一般にこのような思想が生まれてきたのであるが、化学工学 (chemical engineering) の分野においても、基礎化学工学 (chemical engineering science) という学問体系または教育方法論が発展するのも当然のことである。以下これについて述べよう。

1・2 基礎化学工学の誕生

初期において化学工学は、ガス吸収・蒸留・機械分離などのような物理的な単位操作が主体をしめたが、やがて化学反応プロセスの工学的開発を目的とした反応工学が、反応速度論の発展とともに取り入れられるようになった。粉体工学、レオロジー工学、プロセス制御工学なども同様にして化学工学に組み入れられた分野である。このように化学工学の応用範囲が拡大し内容が豊富になるにつれ、その体系、領域の不統一、教育方法の不完全、非能率性が明らかとなるに至った。そこで当然広義の化学工学の再編成新体系化が望まれることになった。

これに関して実際の単位操作を例示して少し詳細に述べてみよう。化学工学の単位操作に重要な蒸留・ガス吸収・抽出・熱交換などの諸操作は、これらが装置内で起こっている現象を細くながめてみると、気-液、液-液、固-液の界面の物質移動や熱移動が基本的なパターンであって、この意味ではこれらの諸操作は「異相界面を通しての定常系の物質移動または熱移動操作」として統一されるべき性質のものである。この内容にはさらに、吸着・イオン交換・調湿その他の諸操作も含みうるのである。さらに異相界面における運動量移動も含めれば、ほとんどの化学工学における単位操作が包含されてしまうのである。ここでこのカテゴリーすなわち「異相界面を通しての定常系の物質・熱・運動量移動」に関する基礎的な理論体系が完成すればいかなる操作でも同一原理に基づき、その操作特性も設計法も解明され、ただ詳細設計についてのみその操作独自の構造を定めればよいわけである。

以上は定常系として考えたが、さらに「定常および非定常系の諸移動操作」とすれば装置の過渡状態の特性（動特性）も明らかとなり、プロセス制御についても理論的基礎を与えることになる。以上の考察から「異相界面を通しての定常および非定常系の運動量・エネルギー・物質移動速度」が化学工学のほとんどの単位操作に共通の基礎理論として特に重視され、これのより高度の理論の開発が大切であることは明らかである。また教育面においても個別的に単位操作の設計法を教授するよりも上記の点に重点を置くようにすれば、全般の理論の把握が合理的、能率的になることは論をまたないのである。

以上の考え方を中心にし、広義の化学工学全般における共通の基礎理論としてさらに何を採り上げるべきかが問題であるが、これが基礎化学工学の内容となるのである。Kirkbride は著書「“Chemical Engineering Fundamentals” (1947)」中で単位操作や単位反応は化学工学の真の基礎ではなく、これらは次のような五つの基礎原理の応用面にすぎないとしている。その基礎原理とは、(1) 物質収支、(2) エネルギー収支、(3) 平衡論、(4) 物質およびエネルギーの移動速度、(5) 経済収支である。また、Elgin [Elgin, J. C.: Chem. Eng. Progress, 52, 8-J (1956)] もほぼ同一の内容を基礎化学工学と考えている。

すでに前に述べたとおり、一般の基礎工学の内容として考えられた諸内容を参照すれば、結論的に現在の段階において基礎化学工学の最も重要な内容は次の3点に集約されるのである。

- i) 平 衡 論: 熱力学に基礎を置き、特にエネルギー収支、熱収支、気-液平衡、液-液平衡、固-液平衡、吸着平衡、化学平衡などを含む。
- ii) 移動および速度論: 運動量、エネルギー(熱)、物質移動速度に関する統一理論体系で、これが移動速度論* (transport phenomena) である。
- iii) 反応速度論: American Society for Engineering Education の案としては、移動および速度論として ii) に含めようとする試みがなされているが、現在の理論的發展過程では無理なようである。

一応前述の内容を基礎化学工学の重点と考えると i) と iii) は従来の化学工学の工学教育では普通その基礎として採用されているものであり、ii) 移動および速度論がとりもなおさず本書の内容である。

1・3 移動速度論 (transport phenomena) の発展

前述の一般の基礎工学としての移動および速度論 (transfer and rate process) の学問領域としては、主に物体のエンタルピー (または内部エネルギー) やその組織内に起こる変化の時間的速度 (rate) を取扱うものであり、このうち熱移動論 (heat transfer process) はエンタルピーの変化速度を扱い、物質移動論 (mass transfer process) は混合物内の着目成分が物理的に移動した時の

* 輸送現象論ともいうが、本書では移動速度論とよぶ。

組成変化速度を扱い、化学反応速度論 (chemical kinetics) も化学反応による組成変化速度と考えれば統一的に扱うことも可能であろう。層流・乱流流体中における熱および物質移動の過程では、流体内部および流体と壁間の剪断力に関連してくるのであって、流体力学の一部の運動量移動 (momentum transfer) もこの速度論に含めて統一するのである。

American Society for Engineering Education ではこの分野の内容の最低線として次に示すような事項をあげている。

(1) 速度方程式 (rate equation) とポテンシャル (potential) および抵抗係数 (resistance) の関連概念

i) 非平衡表示 (熱力学第 2 法則に基づく) ポテンシャルこう配 (gradient) とポテンシャル差 (difference)

ii) ポテンシャルこう配による移動特性

分子運動的移動: 熱伝導率・拡散係数・粘度

対 流 的 移 動: 熱伝達係数・物質移動係数・流体摩擦係数・化学反応
速度定数

輻 射 的 移 動: 熱輻射

(2) 原理の拡大展開法

i) 回路法, 多重抵抗法 (multiple resistances)

ii) 相似理論

iii) 数値解析, 図式解法, 弛緩計算法 (relaxation method), 流線とポテンシャル線解析 (flow and potential lines)

iv) ポテンシャル差の図式表示 平衡曲線 (equilibrium lines), 操作線 (operation lines)

v) 次元解析法 (dimensional analysis)

上述の内容では、化学工学の新体系化の基礎としてはまだ十分ではなく、従来やや無批判的に使用される傾向があった実験式、次元解析結果の無次元化式、単純模型 (model) からの理論式は、境界層理論・乱流理論・レオロジー理論などにより再検討を加え、化学工学のための移動速度論として新しく体系化しなければならない。

このような思想が織り込まれた著書としては、J.M. Coulson & J.P. Richardson “Chemical Engineering” Pergamon Press, London (1954) の上下2巻のうちの第1巻と、R.C.L. Basworth 著 “Transport Processes in Applied Chemistry” John Wiley & Sons, Inc., N.Y. (1956) が初めであり、最近になって、米国の Wisconsin 大学化学工学科における大学院のテキストとして作られた “Notes on Transport Phenomena” (1958) が大幅に書き改められた。R.B. Bird, W.E. Stewart, E.N. Lightfoot の共著による “Transport Phenomena” John Wiley & Sons, Inc. N.Y. (1960) が本格的な著書として現われるに至ったのである。このほか最近刊の著書としては、J.E. Myers 著 “Momentum, Heat and Mass Transfer” McGraw-Hill (1962) があり、本質的には差異がないが機械工学分野でまとめられた。この分野の著書には E.R.G. Eckert 著の “Introduction to the Transfer of Heat and Mass” McGraw-Hill (1950) をはじめとして W.M. Rohsenow, H.Y. Choe 共著の “Heat, Mass and Momentum Transfer” Prentice-Hall (1961) および泉亮太郎、篠崎平馬共著 “熱および物質移動” 朝倉書店 (1964) が見られるのである。

以上の各著書の内容は、従来の流動・伝熱・拡散として盛り込まれた内容と基本的には変わらないが、これを統一し新体系に編成しなおした結果、化学工学で取扱う諸現象を、より正確に、より本質的に理解することができるようになった。また、現象の数学的解析およびその厳密解の結果は、一層広い応用面の開発を期待できよう。これらを教育内容に盛り込むことにより、現在この方面の最先端に行く諸研究、たとえば、境界層・乱流・レオロジー・反応系拡散諸理論などの理解と将来の開発に対する基礎的思考力を与えることができるであろう。このような理由で、米国においては “A.I. Ch. E. Journal” 誌上などにもこの分野の多くの研究が発表されつつあり、最近 “International Journal of Heat and Mass Transfer” 誌が新しく発行され、英国においては “Chemical Engineering Science” 誌がすでに出版されており、この種の研究が続々発表されているのである。

1・4 移動現象機構

1・4・1 移動現象

分子拡散のような質量が輸送される過程（熱伝導は分子の運動エネルギーの輸送，粘性は運動量の輸送過程である）は，系が平衡状態を獲得しようとする過渡プロセスであり，これを移動現象という．たとえば，温度分布が均一でない固体内においてはエネルギーが移動し，ついには一様温度分布となる．このようにして温度差（温度こう配）のため移動するエネルギーは熱とよばれるが，これは負の温度こう配の方向へ移動するベクトル量である．分子拡散も同様に負の濃度こう配の方向に質量が移動する現象であり，熱と全く同じ解析手法が適用される．さらに運動量移動でもこれと相似的機構による場合が考えられるので，これら三者を別々に扱うかわりに，移動プロセスという一層高い立場から統一的に追求していくことが望ましいことは明らかである．

移動現象はすべて系の性質の変化速度と結びついている．たとえば，粘性流体の流れにおいては，内部接線応力（粘性力）が系の運動量の変化速度と関係をもち，熱伝導は系の内部エネルギーの変化速度と関連している．また，分子拡散は注目成分の移動による混合物の組成の変化速度に関係している．

以上はすべて静止系に関して述べたが，流れている流体中の熱移動・物質移動など流動系の移動現象についてはどうであろうか．この場合には移動プロセスは分子運動による項と対流による項の和として表現される．対流の機構はエネルギーおよび運動量を持っている物質が一つの場所より他の場所へと実際に物理的に運動することにより，エネルギー・運動量および物質が移動するものである．

1・4・2 基礎速度式

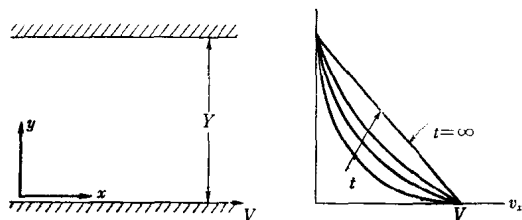
ここでは移動現象の機構について細かく立ち入ることをせず，現象論の立場から経験的に得られた移動速度式について説明を加えることにする．一般に伝熱・拡散のような移動現象においては次のような比例関係が成り立つことが知られている．移動量を流束（flux）すなわち，単位面積当たり，単位時間に移動する量で表わし，これを J_i (i という成分に対応した流束) とする．また，温度こう配・濃度こう配のような推進力（force）を X_i で表わすと，両者の間には次式で示

される関係がある。

$$J_i = L_{ii} X_i \quad (1 \cdot 1)$$

ただし、 L_{ii} は force X_i の J_i に対する比例係数である。

〔1〕 ニュートンの粘性法則 第1・1図に示したような平行な板の間に流体が満たされている場合を考えよう。上部の板は静止して、下部の板が速度



第1・1図 平行板間流体の速度分布

V_0 で動かされたとする。

もし板の間隔が十分短かければ、流体の運動は層流となるはずである。いま流体を非常に薄い板に平行な層に分割すると仮定すれば、

上部の固定した板に接した

層はやはり静止しており、下部の板に接した層は速度 V_0 を持つことは実験的に明らかである。流体内部の摩擦のためおのおのの層はすぐ上の層に対し前方へ引っぱろうとする力を及ぼす。定常状態を仮定すると運動を維持するためには下部の板に力 F を加える必要があり、固定板の表面積 A に対し、応力は $\tau_{yx} = F/A$ で与えられるから、定常状態において次式が成立する。ただし、 Y は2枚の板の間の距離である。

$$\tau_{yx} = \mu V_0 / Y \quad (1 \cdot 2)$$

あるいはさらに一般的に非定常状態においては

$$\tau_{yx} = -\mu (\partial v_x / \partial y) \quad (1 \cdot 3)$$

ここで τ_{yx} の添字のうち y は応力の働く平面が y 軸に垂直であることを示し、 x は応力の方向が x 軸方向であることを表わす。また v_x は速度の x 軸成分を示す。これがニュートンの法則である。

τ_{yx} の次元は〔力/面積〕すなわち〔運動量/時間・面積〕であり x 方向の運動量がこれと直角な y 方向へ移動する速度（運動量流束）を表わしている。また式中の負号は移動がポテンシャルの減少する方向へ起こることを示している。この係数 μ は粘度 (viscosity) または粘性係数 (viscosity coefficient) であり、また μ を密度 ρ で割った値を動粘度 ν (kinematic viscosity) といいしばしば使