



Title	光学的流体計測に関する基礎的研究
Author(s)	中谷, 登
Citation	大阪大学, 1970, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/24591">https://hdl.handle.net/11094/24591</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

# 光学的流体計測に関する 基礎的研究

昭和 44 年 12 月

中 谷 登

## 目 次

緒 論 .....	1
第1編 流動複屈折法による流体計測 .....	5
第1章 緒 言 .....	5
第2章 試 料 .....	9
2-1 水溶性試料 .....	9
2-2 試料の調製 .....	14
第3章 水溶性試料の粘度の測定 .....	16
3-1 粘度測定原理および方法 .....	16
3-2 粘度計の設計 .....	20
3-3 粘度測定装置 .....	22
3-3-1 粘 度 計 .....	22
3-3-2 加圧装置およびマノメータ .....	23
3-3-3 恒温槽 .....	24
3-4 粘度測定結果および考察 .....	24
3-4-1 粘度と速度勾配の関係 .....	24
3-4-2 粘度と溶液濃度との関係 .....	27
3-4-3 粘度と温度の関係 .....	28
3-4-4 粘度に対する添加物の影響 .....	29
3-4-5 粘度と重合度およびケン化度の関係 .....	30
3-4-6 粘度測定の運動エネルギー 補正項のための密度測定 .....	31
3-4-7 流体計測のモデル材料としてみた粘度 .....	31

第4章 流動複屈折の測定	33
4-1 流動複屈折の理論	34
4-2 流動複屈折の測定法	38
4-3 流動複屈折実験装置	40
4-3-1 速度勾配の与え方	40
4-3-2 流動複屈折光学系	43
4-3-3 恒温装置	44
4-4 各種高分子水溶液の流動複屈折の測定	44
4-4-1 各種高分子水溶液の速度勾配に対する流動複屈折および消光角の測定	45
4-4-2 各種高分子水溶液の応力光係数	49
4-4-3 PVAの重合度、ケン化度に対する流動複屈折および消光角と速度勾配の関係	53
4-5 分光的方法によるモデル材料の開発	61
4-5-1 コンゴーレッド(CR)添加効果	63
4-5-2 ミリングイエロー(MY)添加効果	65
4-5-3 PVA濃度変化に対するPVA-CR水溶液の流動複屈折および消光角の変化	66
4-5-4 PVA重合度変化に対するPVA-CR水溶液の流動複屈折および消光角の変化	68
4-5-5 コンゴーレッド添加量変化に対するPVA-CR水溶液の流動複屈折および消光角の変化	69
4-5-6 PVA-CR水溶液の流動複屈折の波長分散	70
4-5-7 PVA-CR水溶液の温度変化に対する流動複屈折、消光角の変化	72

4 - 5 - 8 PVA-CR 水溶液の時間経過に対する 流动複屈折および消光角の变化	73
4 - 6 Poiseulle flow における負の消光角	75
4 - 7 ポーラーダイヤグラム	78
4 - 7 - 1 ポーラーダイヤグラムの物理的意味	78
4 - 7 - 2 ポーラーダイヤグラム表示結果	80
第5章 流動複屈折緩和時間の測定	83
5 - 1 流動複屈折緩和時間測定装置	83
5 - 2 流動複屈折緩和時間の測定結果および考察	87
第6章 流体計測への応用	91
6 - 1 2次元流速分布測定法	92
6 - 2 流動複屈折および消光角の光電測光法	93
6 - 3 2次元流速分布測定例	95
6 - 4 流れの可視化例	100
第7章 総括	102
 第2編 流動2色性法による流体計測	107
第1章 緒言	107
第2章 流動2色性の理論	109
2 - 1 2色性の理論	109
2 - 1 - 1 流動2色性の原理	111
2 - 1 - 2 流動2色性による流体計測	113
2 - 2 流動2色性の測定方法	114
2 - 2 - 1 従来の流動2色性測定装置	115

2 - 2 - 2 本研究における流動 2 色性測定方法	115
第3章 実験装置および実験方法	118
3 - 1 流動 2 色性測定装置	118
3 - 1 - 1 流動 2 色性測定装置の光学系	121
3 - 1 - 2 流動セルおよび加圧装置	123
3 - 1 - 3 流動セル送り装置	126
第4章 試              料	131
4 - 1 ポリビニルアルコール (PVA)	131
4 - 2 コンゴーレッド (CR)	132
4 - 3 溶液の調製	133
4 - 4 溶液の粘性	133
4 - 5 溶液の光に対する透過率および 2 色性スペクトル	135
第5章 実験結果および考察	136
5 - 1 流動 2 色性測定方法についての吟味	136
5 - 2 流動 2 色性に対する CR 濃度, PVA 濃度, PVA 重合度による影響と考察	139
5 - 2 - 1 流動 2 色性に対する CR 濃度の影響	139
5 - 2 - 2 流動 2 色性に対する PVA 濃度の影響	142
5 - 2 - 3 流動 2 色性に対する重合度の影響	145
5 - 3 流動 2 色性測定感度	146
5 - 4 2 次元流速分布の測定	148
第6章 総              括	153
第3編 再回折シュリーレン法による流体計測	156

第1章 緒 言 .....	156
第2章 再回折シュリーレン法の理論 .....	159
2-1 再回折シュリーレン法の測定原理 .....	160
2-2 各種の空間周波数フィルタによる測定原理 .....	167
2-2-1 sharp cut off amplitude filter .....	167
2-2-2 sharp cut off amplitude filter scanning .....	171
2-2-3 grid sharp cut off amplitude filter .....	174
2-2-5 sine amplitude filter .....	181
2-3 各種空間周波数フィルタの特性結果 .....	184
2-4 測定限界および考察 .....	186
第3章 空気式純流体素子の流体計測への応用 .....	193
3-1 純流体素子について .....	193
3-1-1 付着噴流解析 .....	194
3-1-2 側壁付着形素子の設計 .....	198
3-2 実験装置 .....	199
3-2-1 再回折シュリーレン実験装置 .....	199
3-2-2 空気供給装置 .....	201
3-2-3 純流体素子の製作 .....	201
3-3 再回折シュリーレン法による付着噴流の静圧分布の定量 .....	203
3-3-1 sharp cut off amplitude filter scanning 法 .....	203

3 - 3 - 2 linear amplitude filter .....	210
3 - 4 流れの可視化 .....	212
3 - 4 - 1 付着噴流解析 .....	212
3 - 4 - 2 側壁付着形素子の設計例 .....	213
第4章 高分子溶液の流体計測 .....	216
4 - 1 流動高分子水溶液の主屈折率 および消光角の測定法 .....	216
4 - 2 実験結果および考察 .....	218
第5章 銳敏色シュリーレン法 .....	222
5 - 1 銳敏色シュリーレン法 .....	222
5 - 2 純流体素子の流れ模様の観察 .....	225
第6章 総括 .....	227
結言 .....	229
謝辞 .....	230
参考文献 .....	231
論文目録 .....	238

## 緒論

光学的流体計測の基礎的研究として流動複屈折法、流動2色性法、および再回折シュリーレン法に関する研究である。

流体の圧力分布および流速分布等の定量的値が測定ができると同時に、流体の流れをなんらかの方法で可視化することができると、流体の運動現象を理解するために大いに役立つであろう。このような測定法は現在その発展途上にある純流体素子の研究において、素子内の流れの状態の可視化または定量的測定において、またレオロジーの分野で分子構造と流動変形状態を明らかにすることなど応用用途は大きい。

従来行われている光学的流体計測としては、液体における複屈折現象を利用する流動複屈折法、流体の密度変化を利用するシャドウグラフ法、シュリーレン法、干渉法、レーザー光を用いてドップラー効果を利用する方法等があるが、多くの問題点が残されている。

著者はこのような問題点を解決し、流れの可視化および定量的測定ができる方法として、第1編で流動複屈折法、第2編で流動2色性法、第3編で再回折シュリーレン法について研究を行なった。

観測目的によって適切な方法を選ばなければならないが、以上の各々の特色は次のようになる。

複屈折と2色性は光学的異方性について、前者は屈折率の異方性、後者は吸収の異方性に関するものである。複屈折は吸収帯を少しづれた所から広領域に存在すると考えられ、光学的厚みの変化に対する干渉縞の強度変化は  $\sin e$  の2乗で変化し、モデル実験を行う場合光学的厚みを大きくとり実験を行うことができる。

2色性は吸収帯において測定が容易で、これをはずれると一般には存在しない。測定に際しては  $1/4$  波長板、検光子はいらず偏光板 1 枚だけ必要で、簡便である。試料の光学的厚み変化に対して、2色性変化による透過強度は、Lambert-Beer Law にしたがって指数関数的に変化し、特に狭い管内の流体計測には有利である。流動複屈折法、流動2色性法は液体を対象とする方法であるが、再回折シュリーレンについては圧縮性の気体ばかりでなく、流動複屈折を示す液体では非圧縮性流体であるにかゝわらず、光学的位相変化が生じるので適用できる。また干渉法に比し、光学的位相変化の凹凸を簡便に判別できる利点がある。次に各編の概要を示す。

第1編 流動複屈折については、類似の現象として固体を対象とする光弾性法とちがって、液体ではマクロブラウン運動のため適当な流動複屈折感度の高い材料がなく、実験は困難であった。その複屈折が何に対応しているかについて十分な吟味がなされていないため、定性的で定量的段階にいたっていなかつた。

このような問題点を解決するため、高分子溶液の分子構造に対する流動変形状態と流動複屈折の関係を明らかにし、分子設計の立場から水溶性でニュートニアソニアンである高感度流動複屈折材料の開発を行なった。

途中ポリビニルアルコールについて高ケン化度で、重合度 500 程度において高配向性を示し、負の消光角という新しい現象を発見したので、これについて分子レオロジー的考察を加えた。

高配向性物質に異方性の大きい材料を結合させ高感度の材料を得る方法について述べる。この場合異方性の大きい材料として可視域で顕著な 2 色性を示す吸収帯があると、屈折率に異常分散を示し、吸収域をはずれた所で大きな複屈折

を示すという予測のもとに高感度流体材料の開発を行なった。また速度勾配に対する粘度変化の測定によってニュートン性について吟味し、速度勾配変化に対する流動複屈折の応答性をみるための緩和時間の測定をおこなった。以上のようにして得られた高感度材料を使って、2次元流速分布を定量的に精度よく測定でき、流れの可視化を簡便に行なうことができることを示した。

第2編 流動2色性を用いて新しい流体計測を行なう方法とその装置および流動2色性材料の研究である。吸収率橰円の主軸の大きさと方向を求め流体計測に応用する原理、これに基づいて試作した scanning 形流動2色性装置についてのべる。流動2色性材料については第1編と関連して分光的に顕著な吸収帯のある所で大きな吸収の異方性を示す染料を高配向性物質に結合させ、高感度の材料を得た結果についてのべる。あわせてその材料について分子構造的に流動変形状態を考察する。以上のようにして得た材料を用いて2次元流速分布の測定をおこなった。

第3編 シュリーレン法についてはその歴史が古く実用用途が広いにかかわらず、その空間周波数フィルタの方法の検討が十分なされていないため、定性的段階にとまっていた。またその精度、測定領域については十分な吟味がなされていなかった。

本研究では再回折光学系において Fraunhofer diffraction plane 上に各種の空間周波数フィルターを試み、光学的位相変化を精密に広領域に測定する方法について、その特色をまとめ定量誤差、測定限界、感度について考察を加えた。また考案した色収差を利用した鋭敏色シュリーレン法についてのべ、微少な位相変化を鋭敏に検知できることを示す。応用として空気式純流体素子等の流れの静圧分布を定量的に測定でき、流れの可視化を簡便に行え、また素子の設計、付着噴流の定量的解析ができるることを示す。非圧縮性流体であって

も、流動複屈折を示す液体についてはこの方法を適用できることを示す。

## 第1編 流動複屈折法による流体計測

### 第1章 緒 言

本研究では主として複屈折を観測手段として高分子の流動変形状態の基礎的研究をおこない、これを元にして流動複屈折を流体計測へ応用するため、新しい材料開発の一分野である分子設計の立場にたって高感度の流動複屈折モデル材料を開発することを目的とする。

高分子の分子構造と流動における変形との関係を基礎的に明らかにすることは、分子レオロジー的研究に役立つばかりでなく高分子の成形加工における分子の配向性に指針を与え、また高感度のモデル材料が得られることは、純流体素子等で問題になっている狭い管内の流れを簡便に可視化または定量的な精密な測定を可能にする。

光弾性の理論と実験は Frocht<sup>(3)</sup> 等により行われた。液体においても類似の現象があることは、物理化学の分野で早く知られており、J. C. Maxwell<sup>(4)</sup> により 1873 年報告され、streaming birefringence, stream double refraction または flow double refraction と呼ばれた。flow double refraction の研究は主として分子の大きさや形を測定することを目的として現在もなお盛んに行われている。分子の光学的性質と溶液の光学的性質との間の関係の理論は完成されたように思われていたが、最近実験的な面から疑いが持たれはじめ、この疑問は解決されていない。結局流動複屈折で溶液の複屈折量を調べて、それから溶質分子の光学的性質を推論することは、今のところ定量的になされていないし、分子レオロジーの立場から高分子の構造と流動変形との関係について未だ十分研究がなされていない。

速度勾配と複屈折との強さには一定の関係があり、複屈折性を測定することにより流れの解析を行うことができる。このかうな流れの解析法は 1923 年、<sup>(9)</sup> Humphry により示され、2 次元流の解析について理論的には 1952 年 Rosenberg<sup>(10)</sup>、<sup>(11)～(13)</sup> 実験的には 1954 年 F. N. Peeble 等によって試みられた。F. N. Peeble 等の用いた試料 Milling Yellow の過飽和水溶液は不安定で凝集しやすく、非ニュートン性という問題がある。他方 2 重円筒の間隙に流体を満たし、内筒または外筒のみを回転させる装置を用いて乱流発生点の測定を Jerrard<sup>(14)</sup> が行ない、また乱流発生後の解析の試みを Wayland<sup>(15)</sup> が行なっている。

これ等の結果より層流域での流速分布の測定には流動複屈折法は有力な手段であり、また乱流域でも物質の選択によっては平均流速の推定が可能であることが示唆されている。このような有用性にかゝわらず、光弾性応力解析法にくらべて、その技術的普及が遅れているのは、流動複屈折材料として取り扱い易い、ニュートニアンで水溶性の高感度の材料に関する系統的な研究が十分に行われていなかつたので、実験が困難であるためと考えられる。このような研究によって正確な流体計測が可能となる。

本研究では高感度の流動複屈折材料を開発する場合には、水溶性高分子自身について、複屈折性の大きな材料の開発、また高配向性物質と顕著な異方性を有する物質を結合させることによって流動複屈折感度を増加させることができるという予測のもとに材料の開発を行なった。そのため分子構造的な立場から水溶性高分子の主鎖の種類、長さ、側鎖に対する流体力学的な性質と光学的な異方性との関連性について分子レオロジー的に検討を行なった。その結果流体材料として使用できるものを吟味した。<sup>(16)</sup> また顕著な異方性物質としては、分光的立場から可視域で顕著な 2 色性を示す吸収帯がある物質では屈折率に異常分散を示し、吸収域を少しつぶれた部分では大きな複屈折を示すという

考えにたって選択し、適當な高感度の波長を選定するため流動複屈折の波長分散の測定を行なった。<sup>(17)</sup>

流動複屈折材料に要求される条件は、過度的現象に追随するため、速度勾配に光学現象が十分追随することである。緩和時間の測定については、その重要性にかゝわらず、実験技術の困難さから十分な測定は行われていなかった。<sup>(18),(19)</sup> こゝではパルス形の緩和時間測定装置を試作し、2, 3の高分子溶液について測定した。

次に各章の概要を示す。

第2章では使用した分子構造の異なる、すなわち主鎖、側鎖、重合度の異なる水溶性試料、また分光的方法によるモデル材料作製に用いた添加剤等についてとその水溶液の調製についてのべる。

第3章では流体のモデル実験を行う際にレイノルズ数の吟味に必要で、また流動変形状態を推定するために必要な速度勾配に対する粘度を測定する装置、各試料についての測定結果を示しニュートン性の吟味を行う。粘度の分子構造との関連性、粘度と濃度の関係、粘度と温度の関係、粘度に対する添加物の影響、等について測定し考察する。

第4章では流動複屈折の理論について流動複屈折の意味についてのべ、使用した Couette 形流動複屈折装置とその測定法についてのべる。各種高分子溶液の流動複屈折測定結果を分子レオロジー的に考察する。特に途中発見されたポリビニルアルコール(高ケン化度、低重合度)水溶液の負の消光角と分子配向性について考察する。各種高分子水溶液の流動複屈折感度として一義的意味をもつ応力光係数を定義し、それぞれ比較して流体材料としての適用を考える。<sup>(43)</sup>

分光的な高感度モデル材料を得る方法についてのべ、得られた材料について測定結果を示す。負の消光角は Couette flow ばかりでなく Poiseuille

flowにおいても起り装置的問題ではないことを示す。ポーラーダイヤグラムを使用して分子レオロジー的考察を行い、得られた高感度流体材料の流動複屈折は速度勾配に対応し流体材料として適していることを示す。

第5章では本研究で試作した流動複屈折緩和時間測定装置とその測定結果についてのべる。

第6章 流動複屈折法による2次元流速分布を測定する方法についてのべ、開発した高感度流体材料を用いて精度よく定量でき、流れの可視化を行えることを示す。

## 第2章 試 料

### 2-1 水溶性試料

本研究においては次のような条件を満足する試料の開発を主たる目的としている。

(1)取扱いが容易である。(2)流動複屈折感度が高い。(3)ニュートニアンである。等

(1)の条件で最も重要なことは試料が水溶性であることで、これは試料の調製にあたっても、また実験後の装置の洗滌にも非常に便利である。腐蝕対策、パッキングが容易に行なえる。

(2)の条件を満たすためには、試料そのものが単独で分極率の異方性が高く、流動複屈折感度が高いか、単独では分極率の異方性は小さいが、高配向性物質で、これに分極率の異方性の高い物質を結合させることにより、流動複屈折感度の高いものが得られる。

(3)モデル実験としてレイノルズ数を吟味する場合粘性係数が一定であることが必要である。現在のところ分子構造と流動変形状態の関係についての分子レオロジー的な研究がなく、ニュートン性であるかどうかについては実験によって吟味するしか方法がない。

本研究では水溶性試料のうち(1), (2), (3)の条件を満たす試料の選択を系統的に行なうため、分子レオロジー的に分子構造と流動変形状態の関係を明らかにする。このため主鎖の異なるビニル系およびセルロース系の水溶性試料について主鎖の長さ、側鎖の種類を変えたものを用いた。使用した水溶性試料について次に示す。

#### (a) ポリビニルアルコール( PVA )

ポリ酢酸ビニルをケン化することにより作製した。ポリ酢酸ビニルを 5%

メタノール溶液とし、これと NaOH の 25 % 水溶液とをポリ酢酸ビニル 1 mol に対し、NaOH 0.2 mol の割合で混合し、ガラス棒で混合する。この反応は常温で進行しポリビニルアルコールの白色沈殿が得られる。次に得られたポリビニルアルコールをメタノールで 4 回洗浄し、その後 100 °C の炉の中で 4 時間乾燥する。なおケン化度の調整は反応温度、時間によって行った。ケン化度、重合度の測定法は JISK6726 に規定された方法にもとづいておこなった。分子構造について主鎖の長さ、側鎖を変えるため、各種の重合度、ケン化度をもった試料をそろえた。その試料を Table 2-1 に示す。

Table 2-1 ポリビニルアルコールの重合度およびケン化度

試料番号	103	105	108	117	124	205	217	224
重合度	300	540	800	1725	2400	550	1700	2400
ケン化度	98.8%	98.8%	98.8%	98.8%	98.8%	88.8%	88.8%	88.8%

ここで示した重合度は粘度平均重合度である。ケン化度は Fig 2-2 に示すポリビニルアルコール、ポリ酢酸ビニル (PVA, PVAc と以後略す) の構造式における OH 基の  $\text{OCOCH}_3$  基に対する百分率を示す。表中試料番号の 100 の位はケン化度の指標であり、試料番号 10 の位、1 の位は重合度の指標である。

PVA の性質として、その水溶液を放置しておくとゲル化が進行する。この現象は 20 °C 以下になると顕著になる。<sup>(16)~(18)</sup> ゲル化の進行速度は溶解条件によって異なり一般に溶解時間が長ければ長い程、また溶解温度が高い程その速度が遅くなるといわれている。<sup>(22)</sup> このゲル化の機構は分子間水素結合によるものと考えられている。

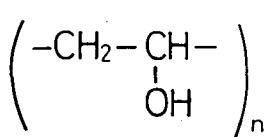


Fig. 2-1 ポリビニアルコール  
(PVA)の分子構造式

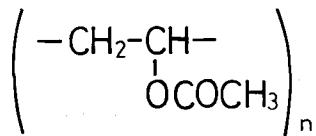


Fig. 2-2 ポリビニルアセテート  
(PVAC)の分子構造式

(b) ポリビニルピロリドン (PVP)

分子構造式は Fig. 2-3 に示すもので、使用した試料は高分子化学研究所で Table 2-2 に示すものを用いた。

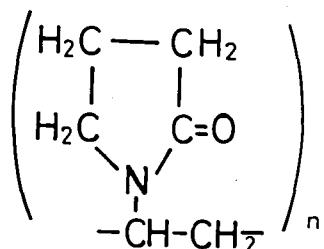


Fig. 2-3 ポリビニルピロリドン (PVP) の分子構造式

Table 2-2 ポリビニルピロリドンの重合度

試料番号	K15	K30	K90
重合度	100	360	3300

重合度は粘度平均重合度を示す。

(c) ナトリウムカルボキシメチルセルロース (Na-CMC)

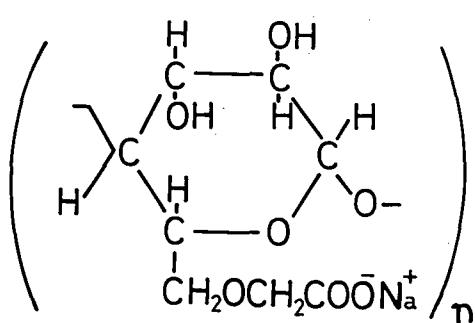


Fig. 2-4 ナトリウムカルボキシメチルセルロース (Na-CMC) の分子構造式

ナトリウムカルボキシメチルセルロースは Fig. 2-4 に示された構造を持ち、カルボキシメチル基がセルロースとエーテル結合をし、Na 塩となっている。Na-CMC は化学構造上水溶液中では  $\text{COO}^-$  基による電気的な作用に加えて水酸基 OH による水素結

合によっても分子間相互作用は大きいとされている。<sup>(23),(24)</sup> 本研究では、Table 2-3 に示す第1工業製薬株製の試料を用いた。重合度は粘度平均重合度を示す。エーテル化度は無水グルコース単位当り存在するカルボキシルメチル基の個数を示す。

Table 2-3 ナトリウムカルボキシ・メチルセルロースの  
重合度およびエーテル化度

試料番号	APH	APMH	APM	8	1	2
重合度	1100	810	510	320	320	330
エーテル化度	0.608	0.610	0.608	1.37	0.8	0.6

(d) ハイドロキシエチルセルロース(HEC)

これは Na-CMC と同じようにセルロースの誘導体であるが、Na-CMC が電解質であるのに対して、これは非電解質高分子である。分子構造式を Fig. 2-4 に示す富士化学(株)製の試料を用いた。重合度は粘度平均重合度を示す。

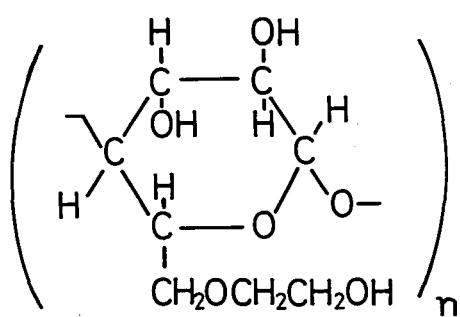


Table 2-4 ハイドロキシエチル  
セルロースの重合度および  
エーテル化度

試料番号	AL-15	BG-15	BG-20
重合度	170	450	280
エーテル化度	1.5	1.5	2.0

Fig. 2-5 ハイドロキシエチルセルロース(HEC)の分子構造式

エーテル化度は無水グルコース単位当たりに存在するハイドロキシエチル基の数を示す。

(e) オスマスN

オスモスNは精製ベントナイトのことで粘土の中に50~80%程含まれている鉱物質である。分子式は $(OH)_4 Si_3 (Al_{13.34} Mg_{66}) O_{20} Na_{66}$ で表わされPVA, CMCなどのように屈曲性をもっておらず、剛体粒子と呼ばれる種類に属する。この様な鉱物質では溶解にある程度限界がある。用いた試料は白石工業(株)製である。

(f) コンゴーレッド(CR)

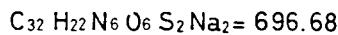
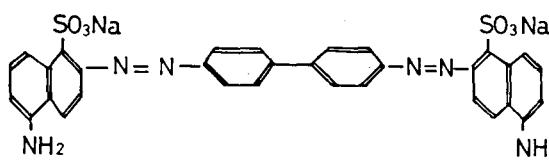


Fig. 2-6 コンゴーレッド(CR)の分子構造式および分子式

コンゴーレッド(CR)の分子構造式および分子式をFig. 2-6 に示す。アゾ基(-N=N-)が発色団でアミノ基(-NH<sub>2</sub>)が染着性

を与える助色団である。用いた試料はキシダ化学(株)製でFig. 2-7 の透過率、吸収率を示す。546 m $\mu$ 付近の可視域において顕著な吸収帯を有し、また第2編4-2のFig. 4-3に示すように顕著な2色性を示すの(25)で、Cauchyの分散の考え

からも複屈折の分散も大き

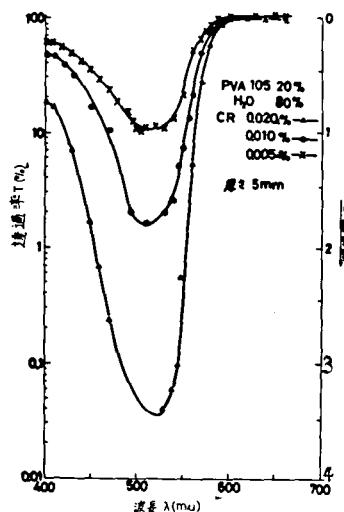


Fig. 2-7 コンゴーレッドの透過率および吸収率、測定温度25°C

く吸収域を少しつぶれた所で大きな複屈折性を示すと考えられる。

このような大きな複屈折性が予想される物質と、高配向性物質と結合させることによって流動複屈折度の高いモデル材料が得られるのではないかという予想のもとに添加剤として採用した。

(g) ミリングイエロー (MY)

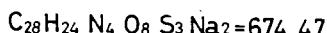
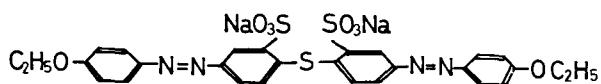


Fig. 2-8 ミリングイエロー (MY)  
の分子構造式および分子式

ミリングイエロー (MY) も CR と同じく高配向性物質と結合させることによって流動複屈折度を増大させる目的で添加剤として採用した。ミリングイエローの分子構造式、および分子式を Fig. 2-8 に示し、透過率および吸収率を Fig. 2-9 に示す。

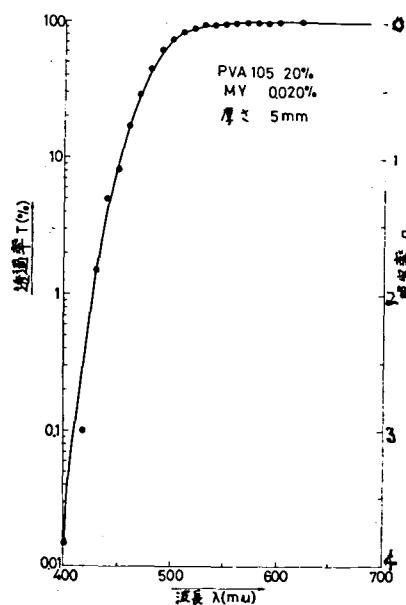


Fig. 2-9 ミリングイエローの  
透過率および吸収率、測定温度 25 °C

## 2 - 2 試料の調製

本研究では溶解条件の相違による物性の変化をできるだけさけるために、条件を次のように一定にした。

先ず PVA 水溶液の調製について述べる。試料容器にメスシリンドーで測定

した蒸留水を入れ、その後天秤で測定した一定量の PVA を入れて 60 分間 95 °C の熱湯の中で 10 分間の 1 回に割合で攪拌しながら溶解させる。その後 30 °C の恒温槽で 1 晩保温して翌日測定するようにした。また CR, MYなどの添加物を入れる時は PVA と水をまぜる前にまず添加物を水によく溶かし、添加物がポリビニルアルコールに一様に結合するようにした。

PVP, Na-CMC, HEC, オスマス N については溶解条件を一定にした。  
25 °C の蒸留水をモーターで攪拌しながら材料を少しずつ入れ、30 分間攪拌しつづけた。その後 30 °C で 1 晩保温してから実験を行った。

## 第3章 水溶性試料の粘度の測定

本研究では粘度測定は流動複屈折測定と共に、高分子溶液の流動状態を研究する際の1つの手段として重要である。また流体計測という立場からも、モデル材料の相似性を吟味するためにレイノルズ数に関連して必要である。特にそのニュートン性、非ニュートン性をみるために速度勾配に対する粘度変化の測定は重要である。そして得られた結果に対して、分子構造と粘度の関係について考察する。

### 3-1 粘度の測定原理および方法

粘度の採用にあたっては以下のようなことを考慮した。

- (1) 構造と操作が簡単であること
- (2) 測定できる粘度範囲が広いこと
- (3) 試料が少量ですむこと
- (4) 測定温度をできるだけ広い範囲で変えられること
- (5) 剪断力あるいは剪断速度を広い範囲で変えられること

今測定しようとする高分子溶液、コロイド分散液のような場合には非ニュートン流体である場合が多いので、(5)の条件が重要になる。非ニュートン流体の粘度測定法としては細管粘度計や回転粘度計などがある。一般に細管粘度計は $10^{-2} \sim 10^8$  poise、回転粘度計では $10^{-2} \sim 10^{12}$  poise の範囲で測定が可能である。しかし精度は細管粘度計がよく本研究においては細管粘度計を使用した。

使用した粘度の定義について述べる。

粘度は粘性に関するニュートンの法則から

$$\eta = F / AG \quad (3-1)$$

で定義される。ただし  $F$  は粘性による力,  $A$  は流速の異なる 2 つの層の接する面積,  $G$  は速度勾配を表わしている。

次に溶液の粘度を  $\eta$ , 溶媒のそれを  $\eta_0$  とするとき

$$\eta_{\text{rel}} = \eta / \eta_0 \quad (3-2)$$

なる式で相対粘度を定義し, 使用することがある。また溶液の粘度に溶媒の粘度に対する増加率を考え

$$\eta_{\text{sp}} = \frac{\eta - \eta_0}{\eta_0} = \eta_{\text{rel}} - 1 \quad (3-3)$$

比粘度を定義する。最後に濃度による粘度の増加を考慮しないでもよいように

$$\eta_{\text{red}} = \eta_{\text{sp}} / C \quad (3-4)$$

なる還元粘度を用いる。

次に細管粘度計の原理について述べる。

Fig. 3-1 のような系において任意の場所における流速  $v$  は Hagen-Poiseuille の法則によって次式で与えられる。

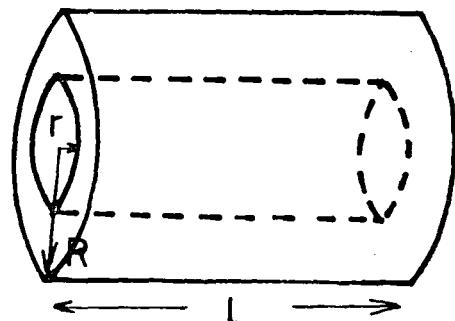


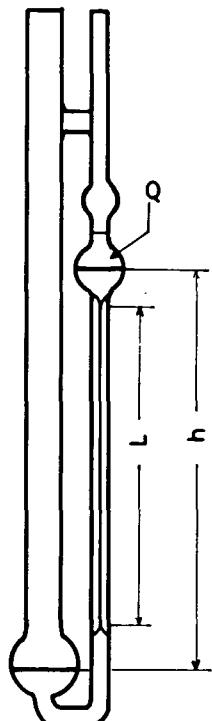
Fig. 3-1

$$v = \frac{P_1 - P_2}{4\eta L} (R_2 - r_2) \quad (3-5)$$

ただし  $P_1, P_2$  は管端における圧力,  $\eta$  は流体の粘度,  $L$  は細管の長さ,  $R$  は管の半径,  $r$  は中心からの距離を表わしている。式(3-5)より管内の単位時間当りの流量は次式で与えられる。

$$q = \int_0^R v 2\pi r dr = \frac{\pi(P_1 - P_2) R^4}{8\eta L} \quad (3-6)$$

Fig. 3-2 に Geist-Cannon の粘度計の略図を表わした。Fig. 3-2において  $Q$  は測定球の容積,  $L$  は細管の長さ,  $h$  は液中の平均高さのことである。今液の流下時間を  $t$  とすると次式が成立する。



上式から  $L, Q, P_1 - P_2, R$  がわかっているとき  $t$  を測定することにより  $\eta$  が求まる。

次に非ニュートン粘性流体の粘度測定法について述べる。

$$\varphi_a = 1/\eta_a \quad (3-8)$$

( $\varphi_a$ ; みかけの流動度,  $\eta_a$ ; みかけの粘度) とすると一般に非ニュートン流体の流動函数は次のような形にかける。

Fig. 3-2 Geist-Cannon  
の粘度計の略図

$$G/S = \varphi_a (1 + \Delta \tau) \quad (3-9)$$

$\Delta \tau$  は装置および試料によって決まる非ニュートン補正で、この値が実測され

ればよい。細管中の層流において中心から半径  $r$  の所のずれの応力  $\tau$  は、長さ  $L$  の細管の両端に加えられた圧力を  $P$  とすれば

$$\tau = rP/2L \quad (3-10)$$

で与えられる。他方速度勾配  $G$  を  $\tau$  の関数として、一般に次のようにかく。

$$-dv/dr = G(\tau) \quad (3-11)$$

単位時間の流量  $Q = v/t$  は

$$Q = 2\pi \int_0^R vr dr \quad (3-12)$$

$r = R$  のとき、 $v = 0$  として式(3-10), (3-11)を用いると

$$Q = \frac{8\pi L^3}{P^3} \int_0^{\tau_R} \tau^2 G(\tau) d\tau \quad (3-13)$$

$$\text{ただし } \tau_R = \frac{P R}{2 L} \quad (3-14)$$

他方みかけの流動度  $\varphi_a$  は

$$\varphi_a = 8LQ/\pi PR^4 \quad (3-15)$$

で与えられる。この式に(3-13)を代入すると

$$\varphi_a = \frac{4}{\tau_R} \int_0^{\tau_R} \tau^2 G(\tau) d\tau \quad (3-16)$$

$\tau_R$  で微分して整理すると

$$\frac{G(\tau)}{\tau_R} = \varphi_a + \frac{1}{4} \frac{d\varphi_a}{d \ln \tau_R} \quad (3-17)$$

$$= \varphi_a \left( 1 + \frac{1}{4} \frac{d \log \varphi_a}{d \log \tau_R} \right) \quad (3-17)'$$

式(3-9)と比較して  $\Delta\tau$  はつぎのようになる。

$$\Delta\tau = \frac{1}{4} \frac{d \log \varphi_a}{d \log \tau_R} \quad (3-18)$$

すなわち  $\varphi_a$ ,  $\tau_R$  を求め  $\log \varphi_a - \log \tau_R$  の勾配を求ることにより、補正項  $\Delta\tau$  が求められる。以上の方で非ニュートン流体の場合も粘度が正確に求められる。

### 3-2 粘度計の設計

本研究では Geist-Cannon 形細管粘度計を数種類用意して加圧により速度勾配を変えられるようにした。粘度計の設計にあたり注意すべき点は、流下時間がだいたい都合のよい長さをもち、運動エネルギーの補正ができるだけ小さく、かつ取扱いやすい寸法でなければならない。また測定誤差に影響をおよぼすものとしては、流量粘度計の傾き、温度、流下時間の長さ、表面張力、付着液の影響があり十分注意する必要がある。

さて粘度計の設計にあたっては、次の点にめやすをおいた。

粘 度  $\eta$  : 10 cP ~ 1000 cP

速度勾配  $G$  : 0 ~ 2000 sec<sup>-1</sup>

圧 力 : 0 ~ 1 Kg/cm<sup>2</sup>

いま測定に必要な粘度計の細管半径を求めるのに、次のような概算を試みた。

$\eta = 100$  cP,  $P = 1$  Kg/cm<sup>2</sup>, 流下時間  $t = 60$  sec, 細管長さ  $L = 15$  cm,

測定球の容積  $Q = 5$  ccであるとき、細管半径は Hagen-Poiseulle の法則よ

り、式(3-7)から

$$R^4 = \frac{8LQ\eta}{\pi P t} = \frac{8 \times 15 \times 5 \times 1}{3.14 \times 1000 \times 980 \times 60} = 3.18 \times 10^{-8}$$

$$R = 0.042 \text{ cm}$$

この時速度勾配 G は、次式で与えられる。

$$G = \frac{RP}{2L\eta} \quad (3-19)$$

$$= \frac{0.042 \times 1000 \times 980}{2 \times 15 \times 1} = 1400$$

またこの時のレイノルズ数 Re は次式で求められる。

$$Re = \frac{2\rho Q}{\pi\eta R t} \quad (3-20)$$

$$= \frac{2 \times 1 \times 5}{3.14 \times 1 \times 0.042 \times 60} = 1.26 < 100 \quad (\rho \approx 1 \text{ と仮定した})$$

通常 Re が約 2400 以下であれば流れは層流であるが、実際の粘度計では運動エネルギーの補正を小さくする意味で  $Re < 100$  にする。

運動エネルギー補正項について次に述べる。細管を通して流体を流すとき、流出する流体が相当な速度を持つ。したがって運動エネルギーを有する場合には圧力差 P のなす仕事は、その全部が粘性抵抗のために費やされるのではなくて、その一部は運動エネルギーに変換される。このような場合には、式(3-7)の P と実際に観測される  $P_a$  との間には、次式の関係がある。

$$P = P_a - m \rho v_{av}^2 = P_a - \frac{m \rho q^2}{\pi^2 R^4} \quad (3-21)$$

ここで  $v_{av}$  は 細管中を流れる流体の平均流速、m は運動エネルギー補正係数である。この関係を式(3-7)に代入して整理すると、

$$\eta = \frac{\pi R^4 P_a t}{8 Q L} - \frac{m \rho Q}{8 \pi L t} \quad (3-22)$$

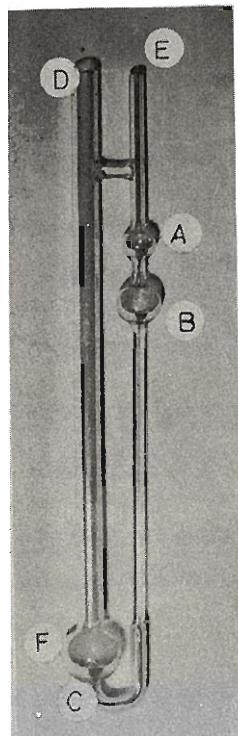
ここで第2項が運動エネルギーの補正項といわれるものである。今の場合 $\rho \approx 1$ ,  $m = 1$ として補正項を用いた。

### 3-3 粘度測定装置

#### 3-3-1 粘 度 計

採用した粘度計の寸法を Table 3-1 に示す。

Table 3-1 粘度計の寸法



NO	1	2	3	4
R (mm)	0.762	0.509	0.378	0.328
L (cm)	14.8	14.9	14.8	15.0
h (cm)	18.0	18.5	18.3	18.0
K·E·C *	0.0135/t	0.0133/t	0.0135/t	0.0132/t

K·E·C ; 運動エネルギー補正項

Fig. 3-3 に示す粘度計に試料液体の適量を容器から直接下球 F に入れる。これをサーモスタットによって温度平衡に達した恒温槽の中で D 側から加圧して液面を標線 A より少し上まで上げる。つぎに E 側から加圧装置を用いて液を押し下げ液面から標線 A から標線

Fig. 3-3 Geist-B に下がるまでの時間 t を測定する。この時の圧力 P Cannon の粘度計

と  $t$  を式(3-14), (3-15)に代入して  $\tau_R$ ,  $\varphi_a$  を求め 3-2 節で述べた方法により粘度が求まる。

### 3-3-2 加圧装置およびマノメーター

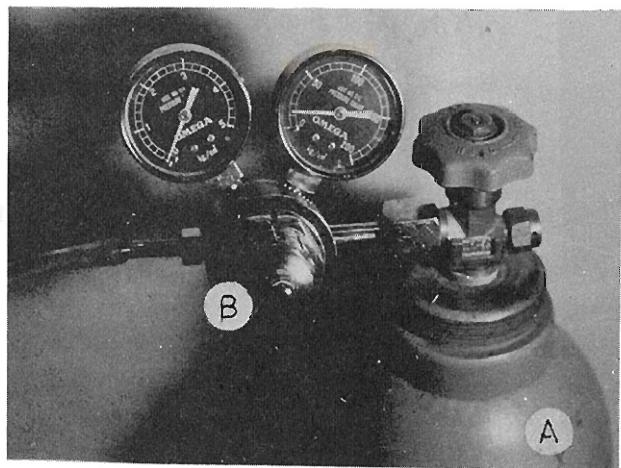


Fig. 3-4 窒素ボンベ

加圧は 0 から  $1 \times 10^5$  dyne/cm<sup>2</sup> までは水で行い、圧力の測定には水柱マノメーターを使用した。また  $1 \times 10^5$  dyne/cm<sup>2</sup> 以上の加圧には窒素ボンベ A を利用し、圧力測定は水銀マノメーターを使用した。圧力の微少な調整は、レギュレーター B で行なった。

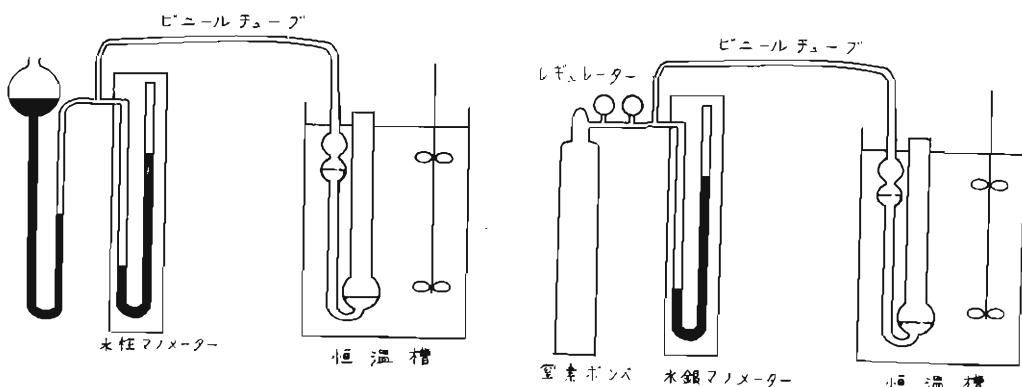


Fig. 3-5 水柱による加圧

Fig. 3-6 窒素ガスによる加圧

### 3 - 3 - 3 恒温槽

Fig. 3-7に使用した恒温槽の全景を示した。ヤマト科学(株)サーモレギュレーターAによって設定温度との差を知り、オンオフの信号をリレーに送る。この信号を受けてヒーターの電源Bがオン、オフするようになっている。

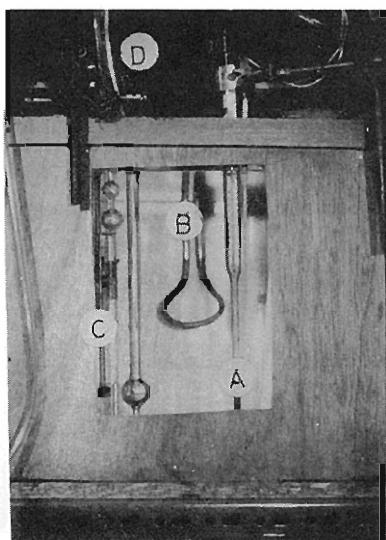


Fig. 3-7 恒温槽

なお、粘度計の背後にある攪拌機はモーターDによって動かされ、恒温槽中の温度むらが生じないようにになっている。この装置によって $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 内で温度調節をおこなうことができる。

### 3 - 4 粘度測定結果および考察

#### 3 - 4 - 1 粘度と速度勾配の関係

通常の低分子溶液では、ずれ応力 $\tau$ と速度勾配Gとの間には Newton の法則が成立するが、多くのコロイド分散系や高分子溶液では、粘度 $\eta$ はGの関数になり、Gが増加するにつれ $\eta$ は減少し、非ニュートン流動を示す。この現象が生じる原因是希薄溶液の場合、溶液中の高分子が流れの方向に引き伸ばされたりあるいは配向するために、流れに対する抵抗が減少するためである。濃厚溶液の場合は、たとえば鎖のからみ合いのような2次的構造がつくられていて、

速度勾配が大きくなるとその刺激のためにその構造が壊されてゆき、粘性抵抗が減少するためと考えられている。

各種高分子溶液の粘度を速度勾配に対して測定した結果を Fig. 3-8～Fig. 3-11 に示す。

a. ポリビニルアルコール (PVA)

Fig. 3-8 にみられるように、重合度が低いほど粘度の減少率は小さく、ほどニュートニアである。

b. ポリビニルピロリドン (PVP)

Fig. 3-9 のように、PVP は顕著な非ニュートン流動を示す。PVP は PVA と同じビニルポリマーの一種であるが Fig. 2-3 に示したように側鎖に rigid なものがついており、これが立体障害を与えていため、flexibility が小さくなり構造粘性が大きく現われたものと思われる。

c. ナトリウムカルボキシメチルセルロース (Na-CMC)

Fig. 3-10 のように、Na-CMC は非常に顕著な非ニュートン流動を示し、粘度も PVA, PVP, HEC に比べて非常に高く、高分子電解質の特徴がはっきり現われている。特に同じセルロースの誘導体である HEC と比べてみると、側鎖が  $\text{CH}_2\text{OCH}_2\text{COO}^-\text{Na}^+$  になるか、 $\text{CH}_2\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$  になるかの違いでこのように性質が非常に異なってくるのは興味深い。また Na-CMC は化学構造上、水溶液では  $-\text{COO}^-$  基による電気的な作用に加えて、水酸基  $\text{OH}$  による水素結合によっても、分子相互に作用し合っているといわれている。

d. ハイドロキシエチルセルロース (HEC)

Fig. 3-11 に示したように、HEC は低重合では 1% 濃度でニュートン

流動することがわかるが、高重合度のものでは速度勾配の小さなところでは非ニュートン流動を示すようである。

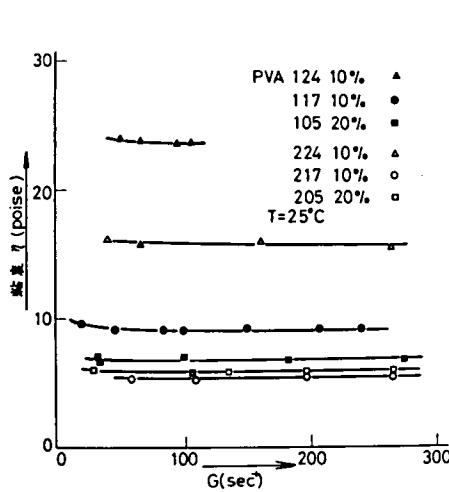


Fig. 3-8 ポリビニアルコール  
水溶液の速度勾配と粘度の  
関係

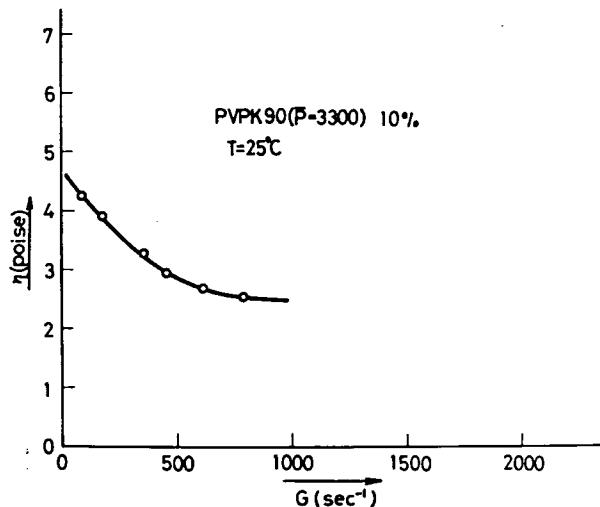


Fig. 3-9 ポリビニルピロドン  
水溶液の速度勾配と粘度の関  
係

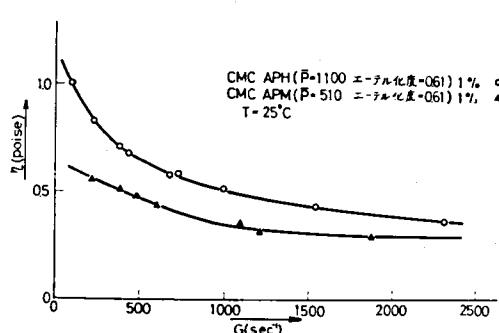


Fig. 3-10 ナトリウムカルボキシメチル  
セルロース水溶液の速度勾配と粘  
度の関係

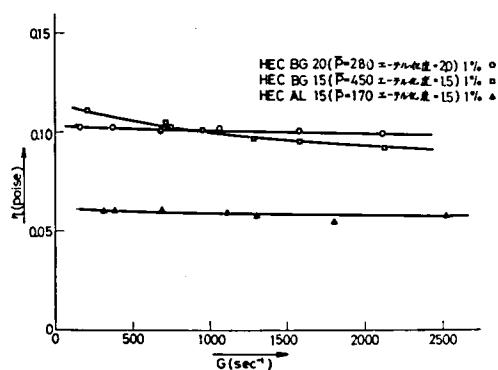


Fig. 3-11 ハイドロキシエチルセル  
ロース水溶液の速度勾配と  
粘度の関係

### 3 - 4 - 2 粘度と溶液濃度の関係

後節 3 - 4 - 4 の Fig. 3-17 に示すように重合度 540, ケン化度 98.8 % の PVA 105 水溶液の PVA 濃度を変えて、速度勾配と粘度の関係をみると濃度が高くなると少し構造粘性が現われてくるようである。

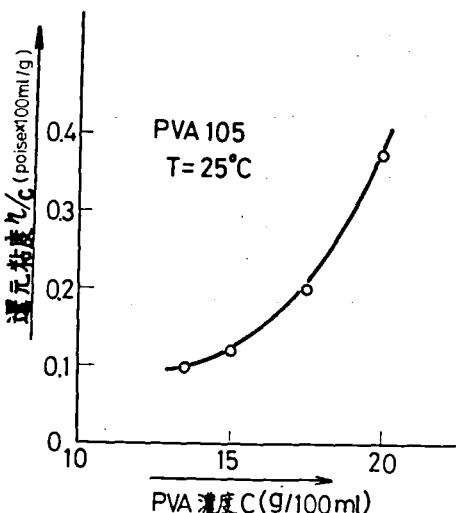


Fig. 3-12 PVA 濃度と還元粘度の関係

3-1で定義した還元粘度と濃度Cの関係を Fig. 3-12 に示す。還元粘度は単位濃度あたりの粘度の増加率をあらわすものであるから  $\eta_r$  がCの一次関数であれば、Fig. 3-12 は横軸に平行な直線になるはずである。したがって Fig. 3-12 から濃度が増加するにつれて溶質分子の分子間相互作用が著しく増加していることがわかった。

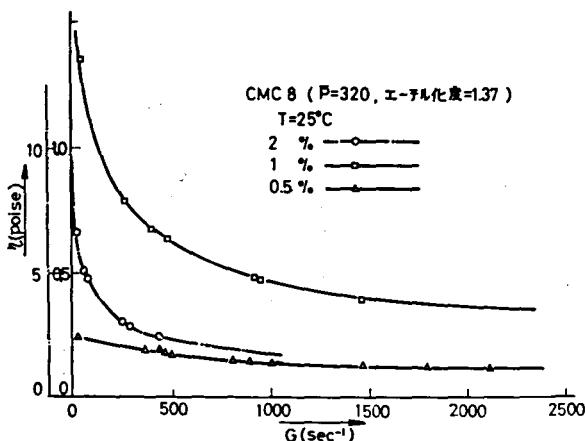


Fig. 3-13 Na-CMC 水溶液の Na-CMC の濃度変化に対する速度勾配と粘度の関係

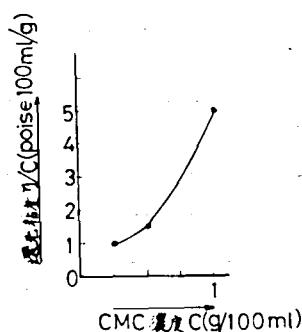


Fig. 3-14 Na-CMC 濃度と還元粘度の関係

Na-CMCについて、平均重合度320、エーテル化度1.37のCMC 8の濃度変化に対する速度勾配と粘度の関係をFig. 3-13に示す。PVAに比べ濃度が高くなるほど構造粘性がより強く現われている。Fig. 3-14の濃度と還元粘度の関係においてわかるように、分子間相互作用が1~2%水溶液ではやくも現われている。このことはNa-CMCが電解質溶液であり、OH基の分子間力よりも電気的クーロン力が強く働いているからである。このことはFig. 3-10とFig. 3-10とFig. 3-13を比較するとき、 $\bar{P} = 320$ の方がCMC APM ( $\bar{P} = 510$ )よりも重合度が低いので粘度が低いはずであるのにそうなっていないことからもわかる。つまり前者の方がエーテル化度が大きい、すなわち解離度(23)が大きいのでクーロン力が強く働き、分子間相互作用が大きくなるから粘度が高くなるわけである。

HECについてもFig. 3-11においてもNa-CMCと同様に重合度が低くてもエーテル化度が大きいと解離度が大きくなり粘度が高くなる。

### 3-4-3 粘度と温度の関係

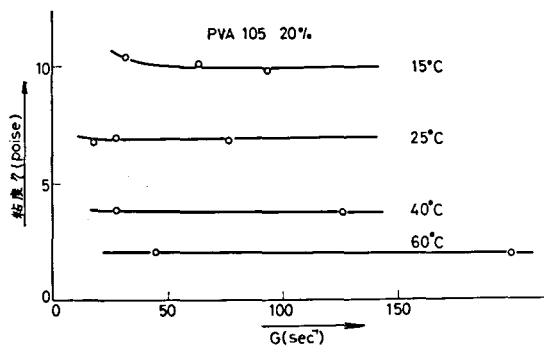


Fig. 3-15 PVA 105 20% 水溶液の温度変化に対する速度勾配と粘度の関係

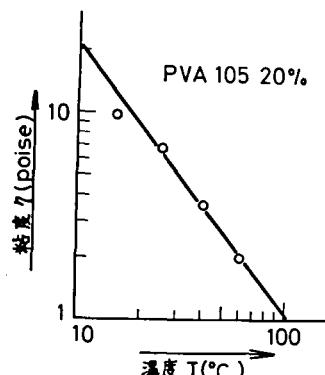


Fig. 3-16 PVA 105 20% 水溶液の粘度と温度の関係

流体の粘度は温度によって大きく変化する。気体の場合は温度が上るにしたがって粘度は上昇するが、液体の場合には粘度は降下する。液体における粘度の関係は Andrade の式(3-23)で表わされる。

$$\eta = A e^{-\frac{B}{KT}} \quad (3-23)$$

ここで A, B, K は定数である。

Fig. 3-15において温度が高くなると構造粘性があらわれるのは、マクロ運動がさかんになり、分子間力が弱まるためと考えられる。Fig. 3-16において粘度と温度の関係は式(3-23)と一致している。温度上昇にともなう粘度の低下は定性的には粒子のマクロプラウン運動がさかんになり、剪断力に対する抵抗力が弱まるためである。

#### 3-4-4 粘度に対する添加物の影響

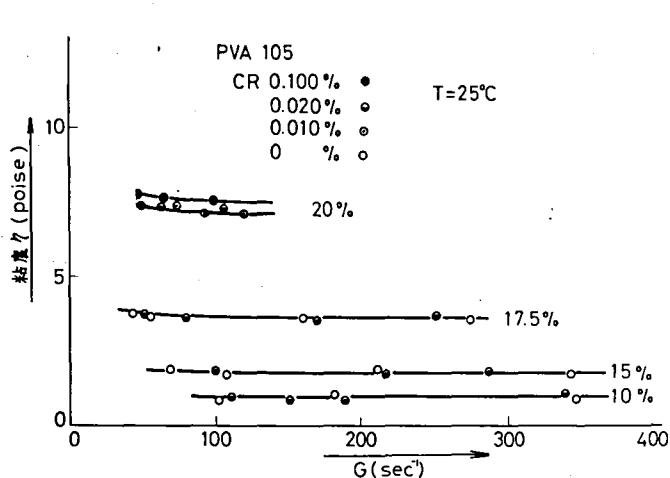


Fig. 3-17 PVA 105 水溶液の粘度と CR 添加量の関係

各濃度の PVA 105 水溶液の Congo Red (CR) を加えたときの粘度の変化を測定した結果を Fig. 3-17 に示す。CR を加えると 0.020 %までは粘度は殆んど変化なく 0.100 %になると少し増加するのは CR の NH<sub>2</sub> 基が PVA の OH 基に van der Waals 結合のような弱い結合をしており、

CR分子は比較的長いため流れに対する抵抗を増加させるためと考えられる。

### 3-4-5 粘度と重合度およびケン化度の関係

高分子溶液においては、粘度と重量平均分子量 $M_w$ との間には、次式で示される関係がある。<sup>(28)</sup>

$$\log \eta = S \log M_w + K(T) \quad (3-24)$$

S；低分子量では1～1.8、臨界分子量以上では3.4

K(T)；温度による定数

高分子溶液においては分子鎖のからみ合いのため著しく粘度が上昇し、分子量が低いときは、 $\eta$ は $M_w$ の1～1.8に比例して増大するにすぎないが、分子量がある臨界値（臨界分子量）をこえる

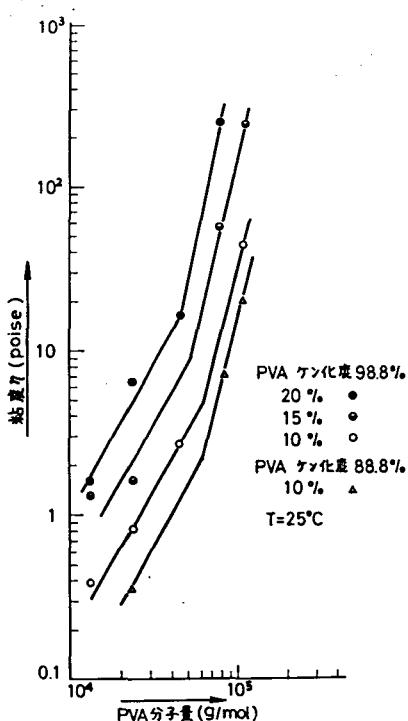


Fig. 3-18 PVAの粘度と分子量及びケン化度の関係

と $\eta$ は $M_w$ の3.4乗に比例して増大する。この臨界分子量 $M_c$ がからみあいによる連続的な構造がつくられる分子量とみなされている。

PVAについて分子量と粘度の関係をFig. 3-18に示す。

分子量1300以下においては1.8乗則、それ以上では3.4乗則が成立している。

Fig. 3-18においてケン化度が低いと粘度が小さい。これは次のように考えられる。よく知られているように、PVAには分子間および分子内結合があるが、

酢酸基のような異種結合を導入すると、これらの水素結合を切断する働きがある<sup>(29)</sup>と考えられている。そのため鎖の剛直部分が少なくなり、flexibilityが増加して流れに対する抵抗が少なくなるためである。

### 3 - 4 - 6 粘度測定の運動エネルギー補正項のための密度測定

粘度を求めるには式(3-14), (3-15)に L, P, Q, なる値を代入し,  $\varphi_a$ ,  $\tau_R$  の関係を使うのであるが、ここで使う P は式(3-21)のように加えた圧力だけではなく、運動エ

ネルギー補正項を含まなければならない。そこで PVA 濃度に対する密度の関係を比重びんを使って求めた結果を Fig. 3-19 に示す。ここで使った PVA は 103, 105, 108, 117, 124, 205, 217,

224 であるが、その密度

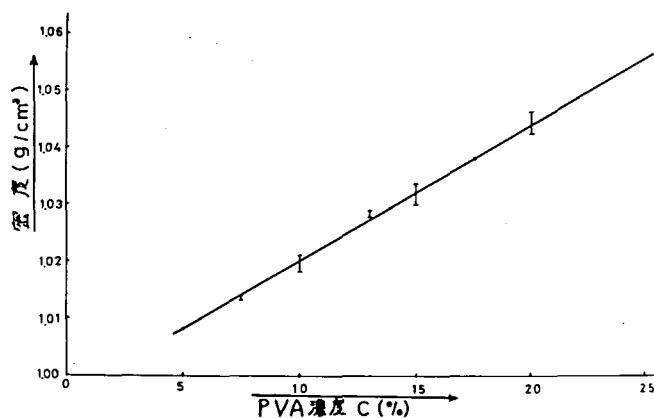


Fig. 3-19 PVA 濃度と密度の関係 (測定温度 25 °C)

は重合度、ケン化度による有意差は小数点 2 術以上では認められなかった。

### 3 - 4 - 7 流体計測のモデル材料としてみた粘度

流体の相似則において問題となるレイノルズ数は、

$$R_e = \frac{\rho u d}{\eta} \quad (3-25)$$

$\rho$  ; 流体の密度  $u$  ; 流体の速度  $d$  ; 管の幅  $\eta$  ; 粘度

であらわされる。流体の相似性においてその  $\eta$  が速度勾配に対して変化する非ニュートン流体では取り扱いが難しくなるので、モデル材料としてニュートン性の材料が要請される。また流量すなわち  $ud$  が一定の場合、 $Re$  を広く変えられるためには  $\eta$  を広く変えられる必要がある。高分子水溶液では濃度変化に対して  $\rho$  はほど一定である。したがって次章でのべる流動複屈折の感度が、 $\eta$  の範囲を決めるわけである。この章の結果では、低速度勾配から高速度勾配まで比較的ニュートン性を示す材料として PVA, HEC がある。また Na-CMC は低速度勾配では非ニュートン性を示すが、高速度勾配でニュートン性を示す。

## 第4章 流動複屈折の測定

各種の水溶性高分子について流動複屈折を測定し、分子構造による流動複屈折および流動変形の変化について明らかにし、高感度の流体モデル材料について検討を加える。従来存在する水溶性高分子については感度に限界があるので、高感度にするためには高分子の分子構造をどのようにしたらよいかという分子設計の立場にたって、上に明らかにされた結果を元にして高感度の流体材料を分光的手法を利用して開発する。

また流体材料を得るためばかりでなく、ミクロな流れの可視化という立場から、分子構造的に流動変形状態を明らかにする分子レオロジーに関する研究を行う。

4-1において流動複屈折、消光角の表わす意味について述べ、従来の各種モデルについてふりかえり、分子レオロジー的な研究の必要性についてのべる。4-2では Couette flow における流動複屈折測定法、4-3では Couette 形の流動複屈折実験装置、4-4 各種のビニル系、セルロース系の水溶性高分子溶液の流動複屈折測定結果とその考察についてのべる。4-5 分子設計の立場から高配向性物質に顕著な異方性を有する物質を結合させることにより、高感度の流体材料が得られることを示す。顕著な異方性を有する物質として分光的に Cauchy 分散の考え方を元にして、アニリン系染料コンゴーレッドを用いた。4-6 研究途中発見された負の消光角は Poiseulle flow においても存在することを示す。4-7 ポーラーダイヤグラムを用いて各種高分子溶液について、その流動変形状態を分子レオロジー的に検討する。開発された高感度流体材料においては PVA と CR の複屈折のベクトル合成を観察することになり、粒子の幾何学的主軸と光学的主軸は一致することを示す。

#### 4 - 1 流動複屈折の理論

いま高分子溶液に速度勾配を与えたとすると、溶質粒子は一方では外から加えられた速度勾配の場によって配向しようとする作用と、他方ブラウン運動によって配向に逆らう作用との平衡状態に達し、この粒子の配列によって溶液全体は光学的異方性つまり複屈折を示す。また粒子が球形で速度勾配のない場合には光学的に等方性であっても、ずれの力で変形するようなものであれば、やはり複屈折は起りうる。このような流体力学的な場によってひき起こされる複屈折の測定から、溶質粒子の幾何学的な性質、光学的な性質および屈曲性などを知る。

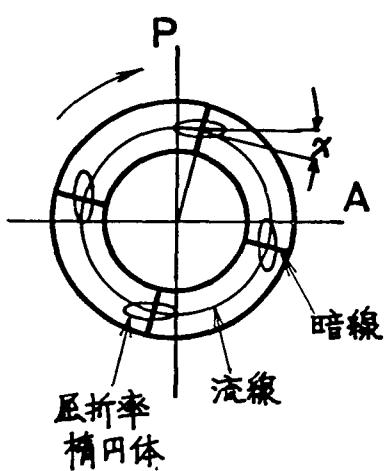


Fig. 4-1 消光角

いま同じ円筒間の間隙に粒子の溶液を入れ、これをクロスニコルの間に置き、一方の円筒（例えは外筒）を回転したとする。この全体をながめてみると視野の中に十字の形に黒い線が現われるが、それ以外の所は明るく光る。Fig. 4-1 では P-P, A-A をそれぞれ偏光子、検光子の振動方向とすると、この黒い十字線が P-P あるいは A-A となす角（ふつうはこのうち小さい方をとる）を  $\chi$  と名付け消光角と呼ぶ。すなわち黒い十字線の所で

はその点における試料の屈折率橋円の主軸方向が P-P, A-A に対して平行または垂直になっていることがわかる。従って  $\chi$  は流線方向と屈折率橋円体の主軸のなす角である。一般に粒子の幾何学的主軸方向と流線のなす角であるといえる。今光の進む方向を Y 方向とすれば我々の観測できる面は X Z 平面である。複屈折を起している溶液は X Z 平面内で互に直角方向に屈折率の極値を示

す方向が存在し、その極値をそれぞれ  $n_x$ ,  $n_z$  とすると、これらの差、すなわち  $\Delta n = n_z - n_x$  を複屈折として観測することになる。 $\Delta n$  は  $n_x$ ,  $n_z$  の値により正になることも負になることもあり得る。このように定義された消光角  $\chi$ 、複屈折度  $\Delta n$  を速度勾配  $G$  をいろいろ変化させて測定する。

流動複屈折と粒子の配向変形についての理論について次のようなものがある。

剛体の粒子について、Peterin, Stuart<sup>(5)</sup> は粒子が均質で、連続的な溶媒の中に溶けていて、粒子の幾何学的主軸方向と光学的主軸方向が一致し、かつ溶液は十分薄くて溶質粒子間の相互作用は無視できるという仮定のもとに理論をたてた。この理論を元にして Sheraga, Edsall<sup>(30)</sup> 等は 1951 年電子計算機により、 $\alpha = \text{速度勾配} / \text{回転拡散係数}$  に対する流動複屈折、消光角、配向関数を橢円体の形状に対して計算している。

また鎖状分子に対しては、溶媒の粒子に対して十分大きな大きさをもつてゐる剛体粒子の場合よりは、はるかに問題は困難である。単に配向するだけなく変形する粒子について上のようないくつかの理論はなりたらない。これ等の困難をさけるため、簡単な理想化されたモデルがいろいろ考えられた。鎖状分子に対する理論の試みは亜鉛モデルを用いた Hermans, Kuhn<sup>(31)</sup> のものがあり、Wisller, Signer<sup>(32)</sup> 等の実験結果と比較された。さらに真珠ひものモデルによる Kramer の理論がある。一方 Cernf<sup>(33)</sup> は小さな速度勾配に対して弾性球モデルに対する理論をたてた。このようにモデル化してつくられた理論はいろいろあるが、その適用範囲を決定するための実験的なよりどころがないのが現状である。実際には分子構造による流動複屈折、消光角、流動変形状態のちがいを明らかにする分子レオロジー的な研究が必要である。

次に速度勾配および剪断応力に対する流動複屈折  $\Delta n$ 、消光角  $\chi$  の関係については、今迄の行われた結果次のように大別される。

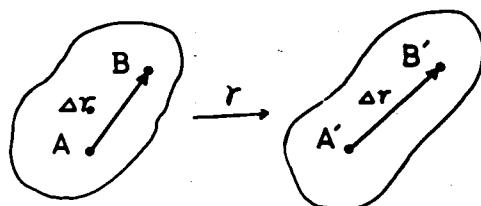
1) 複屈折を表わす屈折率椭円体の光学主軸は principal strain rate の方向と  $45^\circ - \chi$  の角をなし, principal strain rate axis は stream line と  $45^\circ$  の角度を有す。 $\Delta n$  は stream line 方向での速度勾配に対応する。これは主として粒子の配向によるもので、特に剛体粒子についての、  
(30)  
 Sheraga, Edsall 等の計算がこれに属する。

2) 屈折率椭円体の主軸が応力椭円体の主軸と一致し、複屈折 $\Delta n$  は主応力差に比例する。応力椭円体の主軸の方向は streamline と  $\chi$  の方向をなす。  
(29)  
 これは主として粒子の変形によるもので、固体のゴム弾性理論と同じで Lodge の考え方である。

1), 2) については stream line を基準にして議論されているが、これは、 Couette flow の場合にのみ成立することで一般には最大剪断面を基準に取る必要があると著者は考える。

研究途中負の消光角を取るものが発見されたが、光学的主軸と幾可学的主軸が一致する場合には消光角は  $45^\circ \sim 0^\circ$  の間を取ることについて述べる。

いま時点  $t = 0$  で物体中の近接した 2 点 A, B を考えその距離を  $\Delta \vec{r}_0$  とする。また物体の変形のためこれらの物質点は時点  $t$  までに  $A'$ ,  $B'$  に移動したものとし、その距離を  $\Delta \vec{r}$  としよう。Fig. 4-2 にその様子を示す。 $\Delta \vec{r} = \gamma \Delta \vec{r}_0$ ,  $\Delta \vec{r}$  はともに空間に固定するものとする。このとき物体の変形によって定まるテンソル  $\gamma$  によって



$$\Delta \vec{r} = \gamma \Delta \vec{r}_0 \quad (4-1)$$

とかける。この  $\gamma$  を変位テンソルと呼ぶ。  
 変位テンソルはもちろん一般的に非対称

Fig. 4-2 物体の変形

( $\gamma_{ij} \neq \gamma_{ij}$ ,  $i \neq j$ ) である。しかし適当な直交テンソル  $R$  と対称テンソル  $\gamma_s$ ,  $\gamma_s'$  があって

$$\gamma = \gamma_s \cdot R = R \cdot \gamma_s' \quad (4-2)$$

とかける。ところで直交テンソルは物体の単なる回転を表わし、また対称テンソルはその主軸方向への伸縮性を表わす。したがって(4-2)は一般の変形が物体の回転と伸縮に分離できることを表している。

ここで単純すべり変形を考える。単純すべり変形はたとえば物体の各部分を X 方向にその Y 座標に比例した距離だけ移動したときに実現される。この時の変位テンソルは典型的な非対称テンソルでいま移動距離を  $k_y$  とするとき各テンソルは次のようになる。

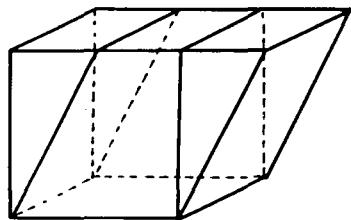


Fig. 4-3 単純すべり変形

$$\gamma = \begin{bmatrix} 0 & k & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-3)$$

$$\gamma_s = \begin{bmatrix} \cos \theta + 2 \frac{\sin^2 \theta}{\cos \theta} & \sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-4)$$

$$\gamma_s' = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta + 2 \frac{\sin^2 \theta}{\cos \theta} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-5)$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-6)$$

$$\text{たゞし } \tan \theta = \frac{k}{2} \quad (4-7)$$

いま  $\gamma_s, \gamma_{s'}$  橢円体の主長軸が、それぞれ X-, Z- 軸となす角を  $\chi$  とする  
と（この角は消光角である）， $2\chi + \theta = \frac{\pi}{2}$  で

$$k = 2 \cot 2\chi \quad (4-8)$$

である。式 (4-8) から k が 0 から無限に大きくなっていくと  $\chi$  は  $45^\circ$  から  
 $0^\circ$  に近づくことがわかる。

## 4-2 流動複屈折測定法

試料の位相差の測定は Sénarmont の compensator 法で行なった。Sénarmont の compensator 法を用いて流動複屈折の測定を行なうまでの理論的裏づけは Hollingthworth 等によってなされている。通常この方法は単色光を用いるが、白色光を用いて鋭敏色を利用する方法 (color change method) も可能であり、単色光を用いる minimum intensity method と比較して精度も同程度期待できるといわれている。こゝでは minimum intensity method を用いたのでこれについて説明する。

偏光子を出た直線偏光は試料を通り橢円偏光になるが、これを Sénarmont の compensator と呼ばれる 4 分の 1 波長板で再び直線偏光にさせ、これを検光子で振動方向が検光子の軸と直角の光をおさえ、透過光の強度が最小になる

角度  $\theta$  を求めることにより複屈折度を求める。

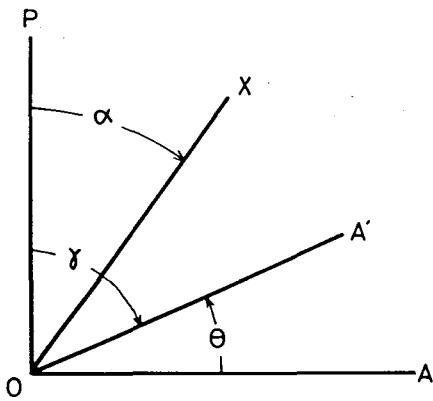


Fig. 4-4 流動複屈折光学系

OP 偏光子の振動方向

OA, OA' 検光子の振動方向

OX 試料の光学主軸

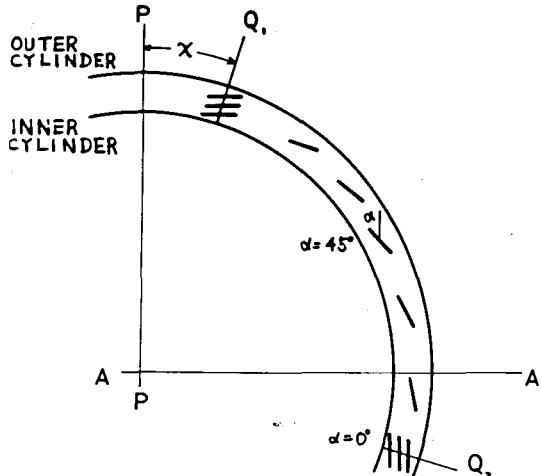


Fig. 4-5 Couette flow

における粒子の配向

ここで Fig. 4-4 のような光学系を考え試料の位相遅れを  $\delta$  とすると、検光子を通ってくる光の比強度は次式で表わすことができる。

$$I = \sin^2 \theta + \sin^2 2\alpha \cos 2\theta \sin^2 \frac{\delta}{2} - \frac{\sin 2\alpha \sin 2\theta \sin \delta}{2} \quad (4-9)$$

$$\left( \frac{\partial I}{\partial \theta} \right)_{\alpha, \delta} = 0$$

なる条件を式(4-9)について考えてみると、

$$\tan 2\theta = \sin 2\alpha \sin \delta / (\cos^2 2\alpha + \sin^2 2\alpha \cos \delta) \quad (4-10)$$

$\alpha = 45^\circ$  の位置で 2 本の暗線が重なるとすると

$$\theta = \frac{\delta}{2} \quad (4-11)$$

したがって検光子の回転角度によって位相遅れを測定できる。よって

$$\Delta n = \frac{\lambda \delta}{\pi t} \quad (4-12)$$

なる式によって複屈折度が $\Delta n$ が求まる。ただし $t$ は試料の厚みを示す。

実際に実験を行う場合についてのべると検光子の回転角度が0のときは、消光角の位置に直交した4本の暗線がみえる。つぎに検光子を回転させると4本の暗線は2本ずつ重なるような運動、すなわち、はさみ運動をし検光子をさらに回転させ4本の暗線が完全に2本にかつその強度が最小となる時の検光子の角度が $\theta$ である。この $\theta$ を式(4-11)に代入して得られた $\delta$ を式(4-12)に代入すると複屈折度 $\Delta n$ が求まる。

### 4-3 実験装置

Fig. 4-6 に流動複屈折装置の全景を示した。上方から恒温槽C、循環ポンプB、検光子A、4分の1波長板Q、偏光子P、モーターM、フィルターF、光源Sが並んでいる。以下速度勾配の与え方、光学系、恒温槽について詳しく説明する。

#### 4-3-1 速度勾配の与え方

溶液に速度勾配をあたえる方法としては毛管を用いる方法と Couette 形、すなわち2つの同心円筒の一方を固定し、他方を回転させ、その間隙の部分に溶液を入れる方法があるが、Couette 形では試料に一様な速度勾配を与えることができる利点がある。本研究においては Couette 形の速度勾配のかけ方をした。いま $R_1$ 、 $R_2$  の内外半径を有する2つの同じ円筒の間に試料溶液をみ

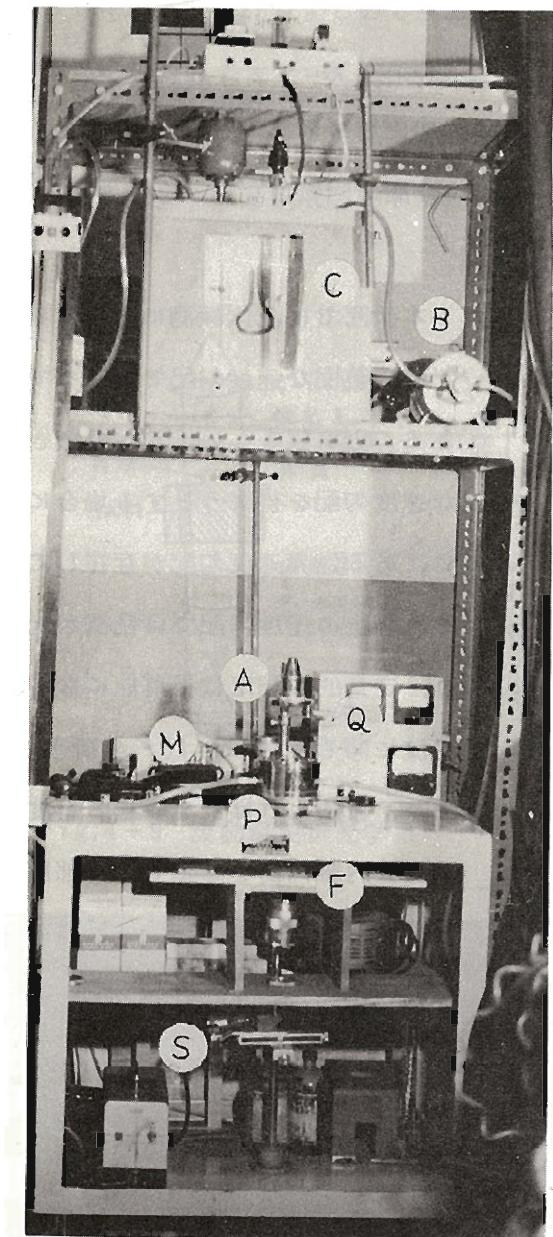


Fig. 4-6 流動複屈折装置の全景

たし一方の円筒を固定し他方を回転したとする。円筒の半径が幅  $d$  に比し十分大きいとすれば、速度勾配  $G$  はその間隙の中ではほぼ一定とみなすことができる。Fig. 4-7 に内筒と外筒の主要寸法を示した。

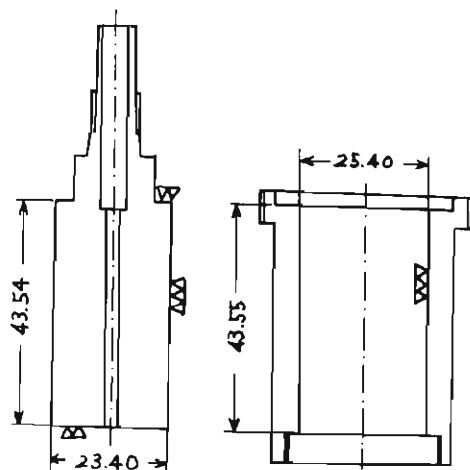


Fig. 4-7 内筒、外筒の主要寸法、単位は  $\text{mm}$

ここで  $d = 1.0 \text{ mm}$ ,  $\bar{R} = 24.4 \text{ mm}$  であるから間隙の中では速度勾配は一定とみなすことができ、その大きさは次式で与えられる。

$$G = \frac{\bar{R} \omega}{d} = \frac{2\pi \bar{R} n}{d \cdot 60} \quad (4-13)$$

$$\text{たゞし} \quad \bar{R} = \frac{R_1 + R_2}{2}$$

$\omega$  ; 回転子の角速度       $R_1$  ; 外部円筒の半径

$R_2$  ; 内部円筒の半径      n ; 1分間の回転数

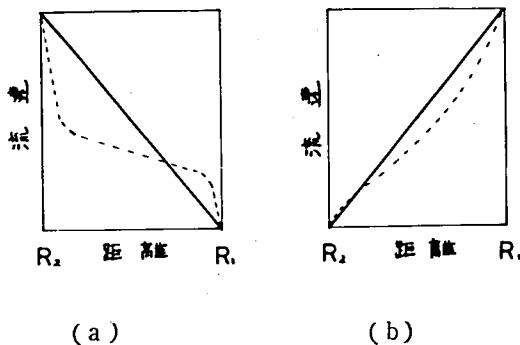


Fig. 4-8 間隙中の速度分布の1例

(a) 内筒を回転した場合

(b) 外筒を回転した場合

—— 層流の場合, - - - 乱流の場合

$R_1$  ; 外筒の半径

$R_2$  ; 内筒の半径

本研究では流体計測に応用するため広範囲な速度勾配で実験をできることが望ましい。こゝで大きな速度勾配を得ようとする場合には、ある臨界速度勾配が存在してそれ以上の速度勾配では乱流が起り、定量的な測定は不可能になる。乱流に関しては Taylor の研究があり、彼によれば乱流の起る速度勾配は内部円筒を固定し、外部円筒を固定したときと、その反対に外部円筒を回転し、内部円筒を回

転した時とではかなり異なる。間隙中の速度分布の1例を Fig. 4-8 に示した。

Fig. 4-8 からもわかるように同じ速度勾配を与えた時に外部円筒を回転させた方が乱流はおこりにくい。その意味で本研究では外部円筒回転形の装置を使用した。

つぎに回転はモーターの回転をウォームギヤーで  $1/10$  に落した方と  $1/200$  に落した方を適宜に使って試料に速度勾配を与えた。また回転数を連続的に変化させるためにスライダックを利用した。一方この回転数から式(4-13)を使

って速度勾配を計算するのでその誤差が問題になるので 40 rpm 以下ではネオジン管を利用してストロボを作り正確かつ迅速な測定を可能にした。

#### 4 - 3 - 2 流動複屈折光学系

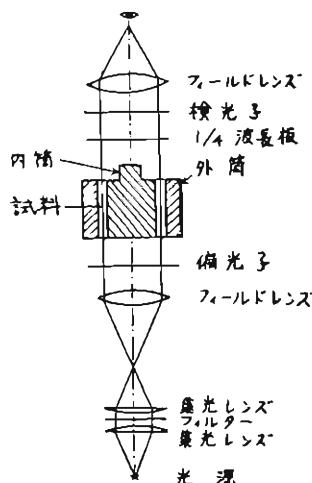


Fig. 4-9 流動複屈折光学系

流動複屈折測定に使用した光学系の略図を Fig. 4-9 に示す。光学系は垂直に配列されており偏光子を通った直線偏光は下のガラス窓、溶液の順に通過する。光源はジルコンランプでほとんど理想的な点光源である。フィルターは複屈折度の波長分散を測定するため 4360 Å, 5460 Å, 5815 Å, 6045 Å, 6260 Å, 6690 Å の 6 種類を用意した。また 1/4 波長板は各種波長で使用するため 5460 Å を基準にして補正用の位相差板を使用した。

実際に使用した装置の主要部を分解して、

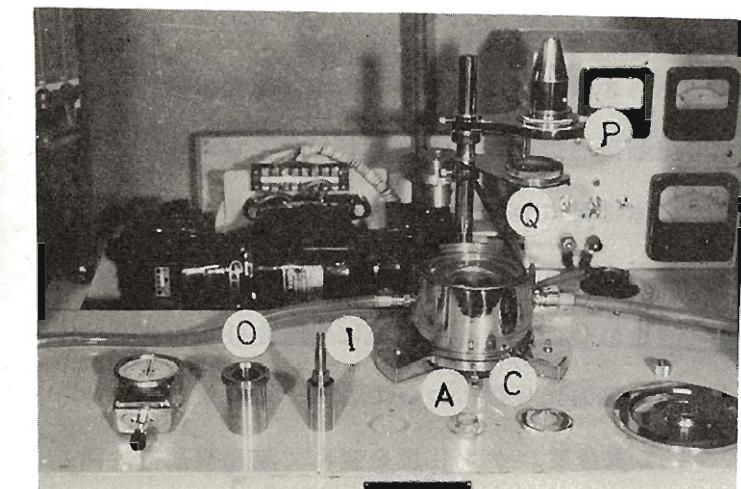


Fig. 4-10 流動複屈折装置の主要部

Fig. 4-10 に示す。

A は検光子、Q は 4 分の 1 波長板、C は十字線把手、P は偏光子、I は内部円筒、O は外部円筒を意味している。たゞしこの写真は各装置がわかりやすいように分解したもので A, Q も光軸上にな

いことに注意する必要がある。

#### 4-3-3 恒温装置

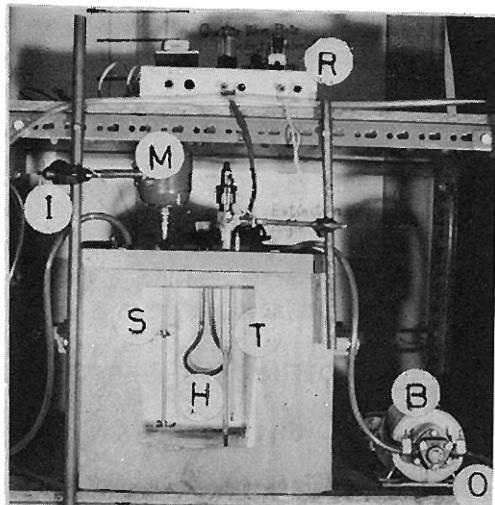


Fig. 4-11 恒温装置

Fig. 4-11に恒温装置を示した。Rはリレー、Mは攪拌棒、Tは温度計、Hはヒーターである。こゝまでは3-3-3の恒温槽と同じ役割をしている。こゝでは循環ポンプBで一定温度の水を流動複屈折装置のジャケットに送って温度が一定になるようにした。なお写真のO、Iは流出側、流入側を示している。

#### 4-4 各種高分子水溶液の流動複屈折の測定

主鎖の異なるビニル系、セルロース系の水溶性高分子について側鎖の種類、主鎖の長さ（重合度）を変えて流動複屈折の変化を測定し、分子レオロジー的立場から考察を加え、高感度の流体材料について検討する。

4-4-1では各種高分子水溶液の速度勾配に対する流動複屈折、消光角の測定結果およびこれに対する考察をのべ、4-4-2では各種高分子水溶液の流動複屈折の感度を比較するため、応力光係数についてのべその結果をまとめた。4-4-3ではPVAについて重合度、ケン化度を変えて流動複屈折、消光角を速度勾配に対して測定して、高配向性について分子論的考察を加える。

特に、発見された負の消光角についてのべる。4-4-4ではPVAの流動複屈折、消光角の温度に対する変化を測定して考察する。4-4-5では試料のゲル化に関連して時間経過に対するPVAの流動複屈折の変化についてのべる。

#### 4-4-1 各種高分子水溶液の速度勾配に対する流動複屈折および消光角の測定

PVA, PVP, CMC, HEC の各試料について速度勾配  $G$  に対する流動複屈折  $\Delta n$  および消光角  $\chi$  を測定した結果を Fig. 4-12 ~ Fig. 4-17 に示す。

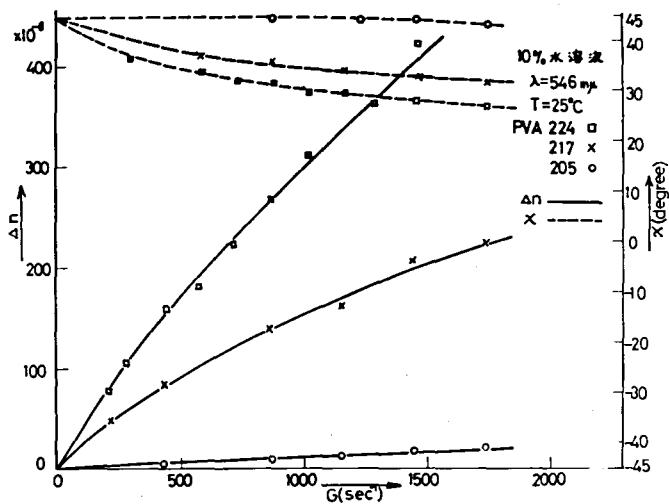
これ等の結果から Fig. 4-13 の高ケン化度の PVA を除いて、ケン化度またはエーテル化度が等しければ、重合度の高いものほど  $\chi$  の変化は大きく、 $\Delta n$  の変化も大きい。Fig. 4-13 の 98.8 % ケン化度の PVA については重合度の高いものほど  $\chi$  の変化は小さい。これについては 4-4-3 節において考察する。

$\chi$  は溶質分子の主軸方向と流線のなす角であるから、 $\chi$  の変化が大きいということは配向、変形しやすいということを意味する。また  $\Delta n$  は配向、変形した程度を表すから、 $\Delta n$  が大きいということは、より多くの分子が配向または変形したことを意味する。

一般に重合度が高くなるほど粘度は高くなるから速度勾配が同じであれば、それ応力  $\tau$  が大きくなる。従って重合度が高くなるほど変形しやすくなる。

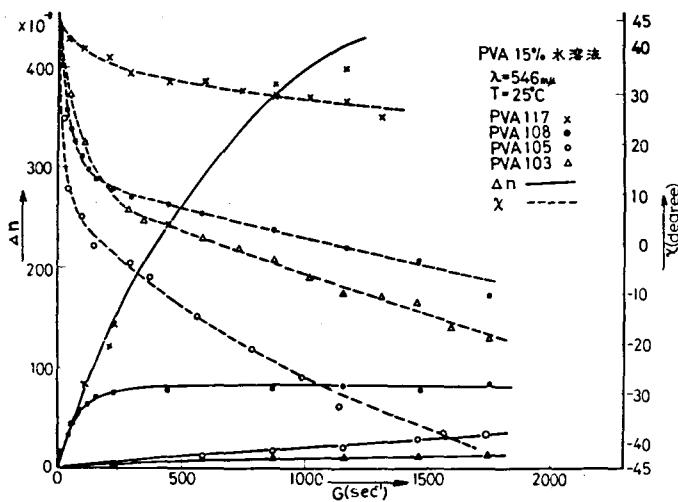
濃度を変化させて CMC 8 ( $\bar{P} = 350$ )  $G$  と  $\chi$ ,  $\Delta n$  の関係を Fig. 4-17 に示す。濃度が高いと  $\chi$  の変化が大きくなっているのは、濃度が高くなると粘度が高くなり、上述と同じような結果になるためである。

Fig. 4-12



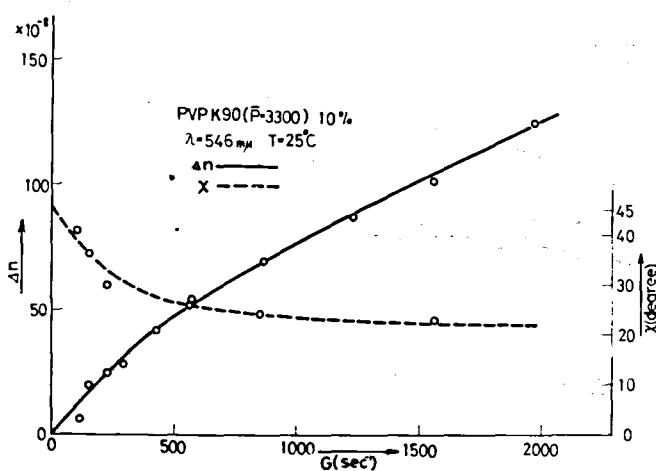
P V A (ケン化度  
88.8%) 水溶液の  
速度勾配に対する  
流動複屈折、  
消光角の関係

Fig. 4-13



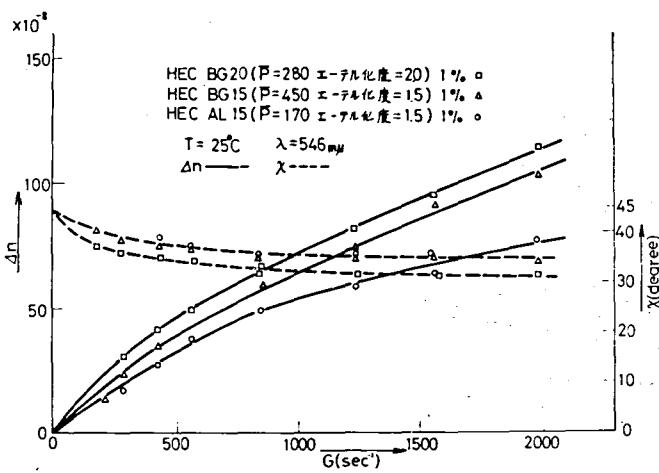
P V A (ケン化度  
98.8%) 水溶液  
の速度勾配に対する  
流動複屈折、  
消光角の関係

Fig. 4-14



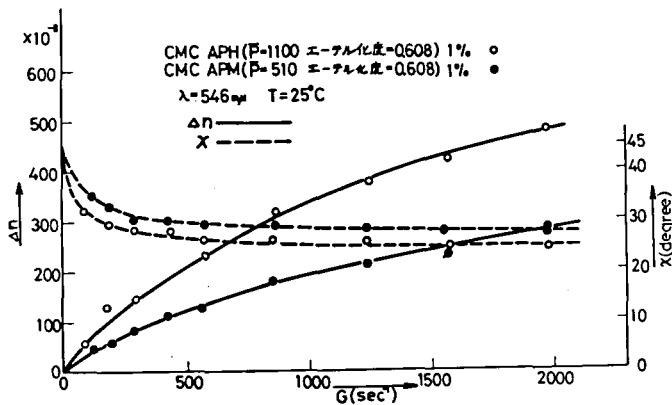
PVP 水溶液の  
速度勾配に対する  
流動複屈折、  
消光角の関係

Fig. 4-15



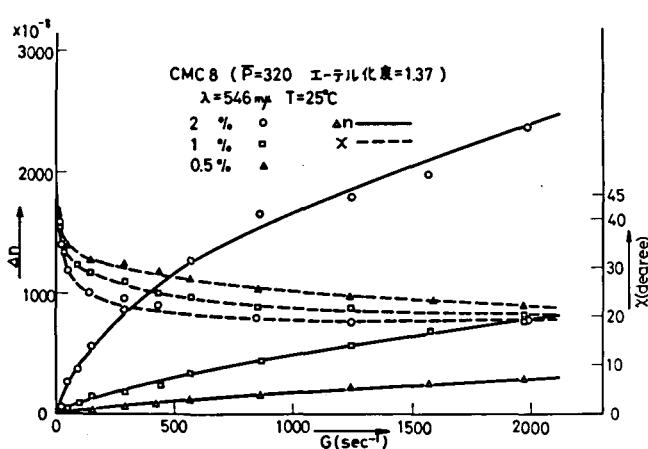
HEC 水溶液の  
速度勾配に対する  
流動複屈折、  
消光角の関係

Fig. 4-16



CMC 水溶液の  
速度勾配に対する  
流動複屈折、  
消光角の関係

Fig. 4-17



CMC 水溶液の  
CMC 濃度に対する  
流動複屈の  
変化

#### 4 - 4 - 2 各種高分子水溶液の応力光係数

流動複屈折の感度を表わすのに、複屈折が何に対応しているかによってその定義の仕方が問題となる。

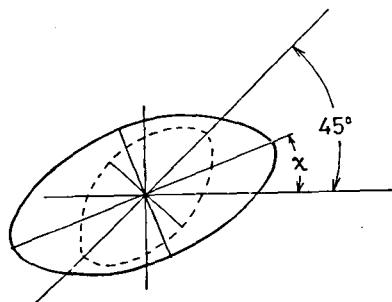


Fig. 4-18 屈折率椭円体と  
strain rate 椭円体の  
軸関係

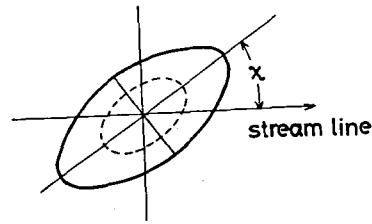


Fig. 4-19 屈折率椭円体と  
応力椭円体の軸関係

##### (1) 複屈折が速度勾配に対応する場合について

$\eta$  がませば粒子のブラウン運動は小さくなり粒子は配向しやすくなる。G に対してよりも、粒子の回転拡散を考慮して  $\alpha = G/\theta$  に対する複屈折の変化量を定義すべきである。温度が一定の場合には  $\alpha = a\gamma/G = a\tau$  ( $a$  ; 定数) となり、 $\tau$  に対して定義すればよい。

$$\text{応力光係数 } C = \frac{\Delta n}{2(\eta - \eta_0)G} = \frac{\Delta n}{2\tau} \quad (4-1)$$

##### (2) 複屈折が応力に対応する場合

Lodge<sup>(33)</sup> は屈折率椭円体の主軸と応力椭円体の主軸が一致するという仮定をおき、主応力差  $\sigma_1 - \sigma_2 = \Delta P$  を次式で表わすことにより応力光係数を次のように定義した。

$$\Delta P = 2\tau \cosec 2\chi \quad (4-2)$$

$$C = \frac{\Delta n}{\Delta P} = \frac{\Delta n \sin 2x}{2\tau} \quad (4-3)$$

法線応力は次式で与えられる。

$$\sigma_y - \sigma_x = 2\tau \cot 2x \quad (4-4)$$

Phillipoff<sup>(38)</sup> はワイゼンベルグゴニオメーターを用いて法線応力  $\sigma_x - \sigma_y$  を力学的測定から求め式(4-4)より  $x$  を計算して得た値と同じ試料で流動複屈折から、光学的に求めた  $x$  がまったく一致することを見いだし、Lo-dge<sup>(33)</sup> の考えを裏づけた。

(1), (2)における応力光係数を一義的に定義するため、 $G \rightarrow 0$  にする。この時  $x \rightarrow 45^\circ$  になるので

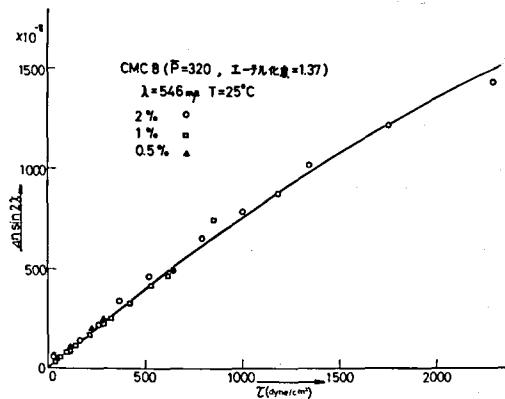
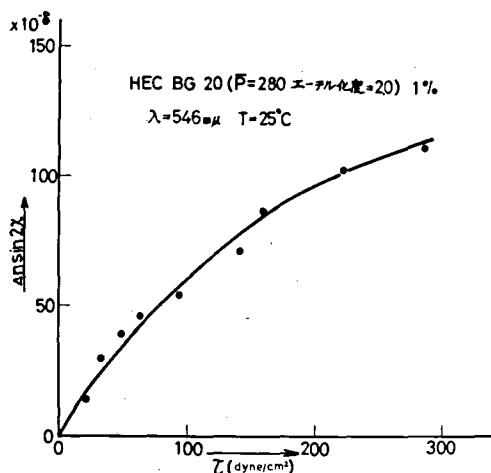
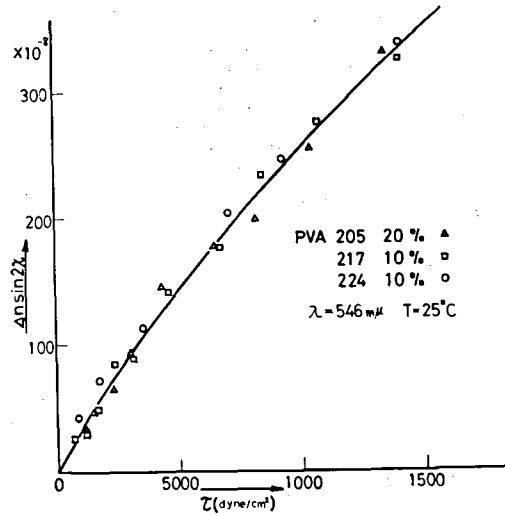
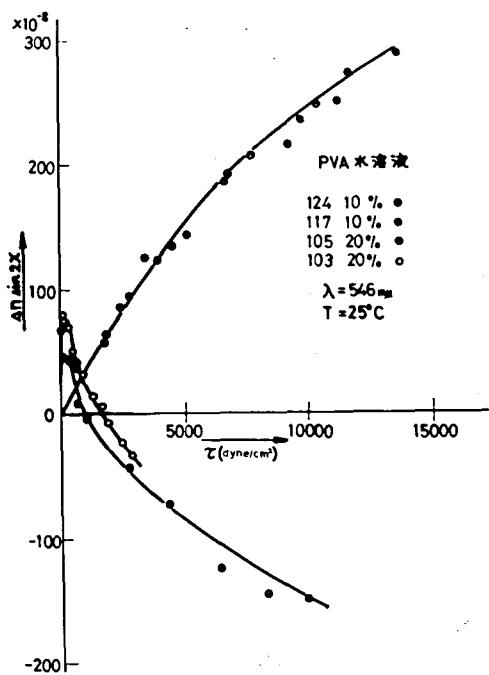
$$C = \lim_{G \rightarrow 0} \frac{\Delta n \sin 2x}{2\tau} = \lim_{G \rightarrow 0} \frac{\Delta n}{2\tau} \quad (4-5)$$

が成立し、これを応力光係数と新たに定義する。

流動複屈折を用いて流速分布を定量的に求めようとする場合、モデル材料の複屈折は速度の微分値である速度勾配に対応していかなければならない。(2)の応力に対応する場合には  $\Delta n \sin 2x / \eta$  が  $G_{max}$  に対応する。

以上のことと元にして 4-4-1 で得られた結果を次に整理する。PVA, HEC, CMC の各データを  $\Delta n \sin 2x$  と  $\tau$  の関係にかきなおすと、Fig. 4-26 ~ Fig. 4-29 になる。

これ等の Fig. からわかるように  $\tau$  と  $\Delta n \sin 2x$  が 2 本の直線で表わされるようである。この原因としては鎖状高分子においては、剪断応力が働いたとき単に配向するだけでなく変形を伴うから、 $\tau$  が小さいところでは主として配向に



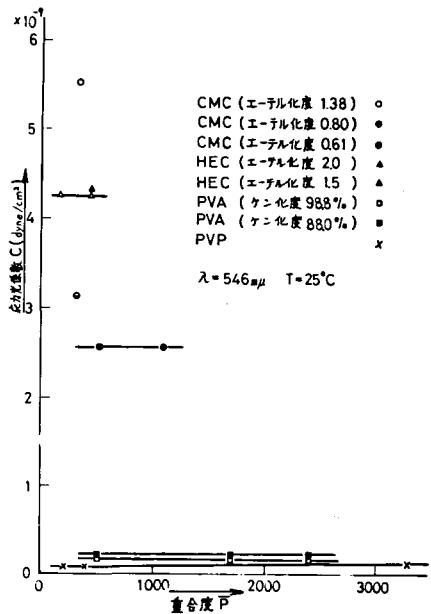


Fig. 4-24 各種高分子水溶液の重合度に対する応力光係数

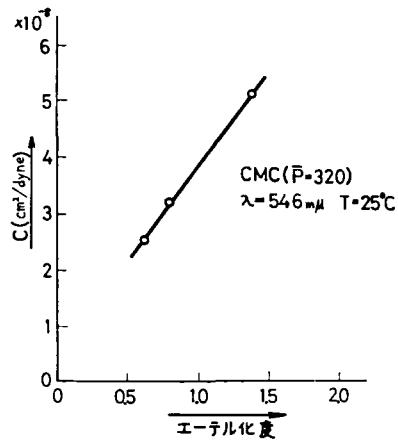


Fig. 4-25 CMC ( $\bar{P} = 320$ ) 水溶液のエーテル化度に対する応力光係数

より  $\Delta n$  が現われて、 $\tau$  が大きいところでは Lodge が示したように主応力差  $\Delta P$  に比例して  $\Delta n$  がますためと考えられる。またこのことは前節 4-4-1 の Fig. 4-12, 4-15, 4-16, 4-17 からもうらづけられる。これらの図では  $x$  の変化はある速度勾配になるとほとんど変化していない。この速度勾配までは主として配向により  $\Delta n$  は増加していると考えられる。 $x$  がほとんど変化しなくなった後の  $\Delta n$  の増加は粒子の変形すなわち原子価角のひずみによって生ずるものと考えられる。

式(4-5)の定義により、各種高分子水溶液について重合度、エーテル化度、ケン化度を変えて応力光係数を求めた結果を Fig. 4-24 に示す。この図よりわることは、応力光係数は一般に重合度により変化しないもの

と考えられる。主鎖がビニル系の PVA, PVP よりもセルロース系の CMC, HEC の方が応力光係数が高い。これは主鎖の分極率の異方性のちがいによる。CMC と HEC の応力光係数のちがいはその側鎖の種類が異なるためと考えられる。

また応力光係数と濃度の関係については Fig. 4-23 からわかるように一定である。このように応力光係数が重合度や濃度に関係しないことは、V. N. Ts-vetkov<sup>(39), (40)</sup>らの結果とも一致する。

Fig. 4-25 は CMC のエーテル化度すなわち側鎖のちがいに対する応力光係数の変化を示したものである。エーテル化度の増大によって応力光係数は増大する。これはエーテル化度のちがいによって解離度が異なるためと考えられる。

以上測定した試料のうち、流体計測のモデル材料に使用するのに適しているものを次に検討する。

流動複屈折の感度から考えると、主鎖はセルロース系のものがよく、側鎖は高いエーテル化度を有するものがよい。CMC 8 は HEC BG 20 よりも感度は高いがそのニュートン性については Fig. 3-13 (前節 3-5-1, 3-5-2 に示した) から HEC BG 20 の方がすぐれている。しかし CMC 8 についても速度勾配の高いところを問題にする場合には、ほどニュートニアントみなせ流体計測に利用できる。

PVA については高ケン化度で低分子量のものは、そのニュートン性と高配向性を利用して高感度の流体材料を作ることができる可能性がある。これについては 4-5 に述べる。

#### 4-4-3 PVA の重合度、ケン化度に対する流動複屈折および消光角と速度勾配の関係

前節 4-4-2 では重合度、ケン化度に対する応力光係数についてのべたが、

PVAの分子構造とその水溶液のレオロジー的な関係を調べるためにPVAの重合度、ケン化度、濃度をかえて速度勾配に対する流動複屈折および消光角を測定した。Fig. 4-32～Fig. 4-36はケン化度98.8% PVAに対して重合度の異なるものを、Fig. 4-37～Fig. 4-39まではケン化度88.8% PVAに対して重合度の異なるものについて、濃度をパラメータにして $\Delta n$ ,  $\chi$ とGの関係を示した。

これらの異なる現象に対する分子構造的な要因は、次のものが考えられる。

(1) 側鎖にOH, OCOCH<sub>3</sub>の含まれる割合のちがいによって、次のものが異なるてくる。

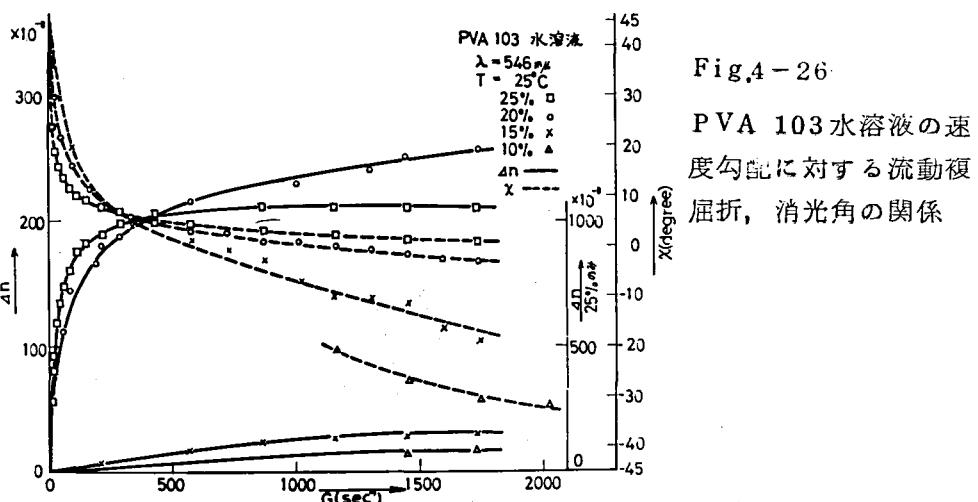
(a) hindrance potential 分子内回転に対する立体障害に基づく内部回転エネルギーである。1つの要素の内部回転に影響を与えるのは3つないし、4つの隣接要素の範囲で近距離相互作用である。

(b) 排除体積効果

① 分子内排除体積効果(1本の鎖の分子間の要素間に働く)

② 分子間排除体積効果(異なった高分子の要素間に働く)

がある。3つ或は4つ以上の要素間に働く、長距離相互作用である。



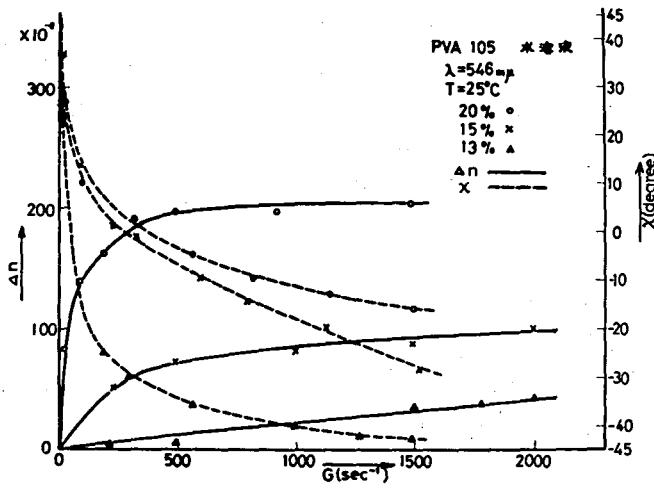


Fig. 4-27 P.V.A 105  
水溶液の速度勾配  
に対する流動複屈  
折, 消光角の関係

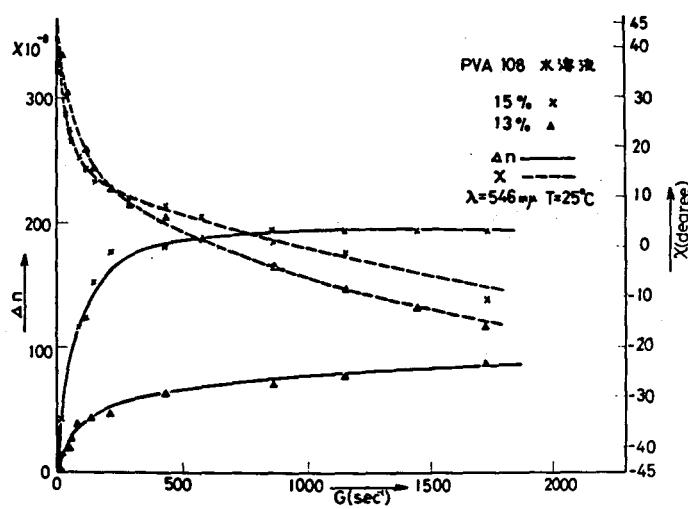


Fig. 4-28 P.V.A 108  
水溶液の速度勾配  
に対する流動複屈  
折, 消光角の関係

Fig. 4-29 PVA 117

水溶液の速度勾配  
に対する流動複屈  
折，消光角の関係

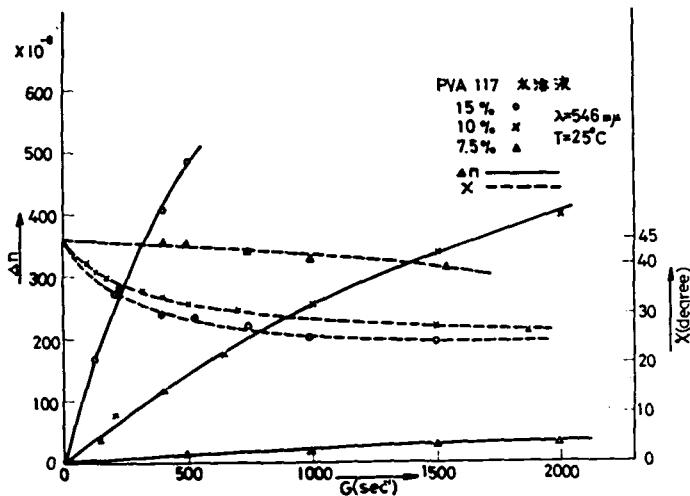
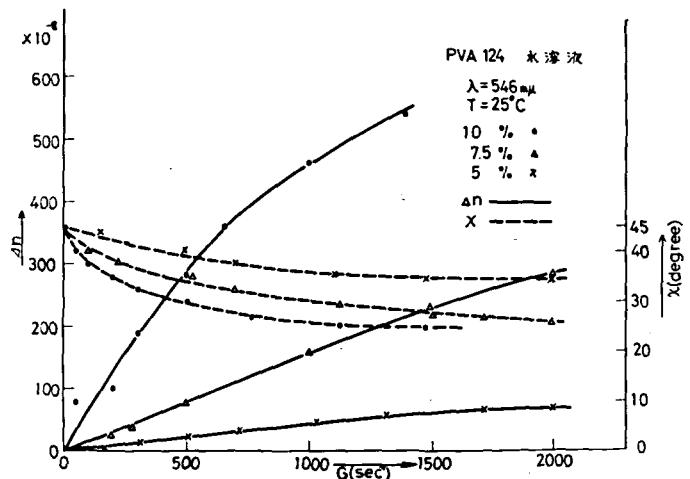


Fig. 4-30 PVA 124

水溶液の速度勾配  
に対する流動複屈  
折，消光角の関係



### (c) entanglement force

- ① 分子鎖の位相幾何学的もつれ
- ② 分子内，分子間に存在する分子間力のからみあい。たとえば水素結合  
のようなもの

(2) 重合度のちがいによって次のものが異なってくる。

(a) entanglement force

- ① 位相幾可学的もつれ
- ② 分子間力のからみあい

これ等の要因をもとにして各々の試料のレオロジー的な性質を次に説明する。

前節 4-4-1 の Fig. 4-12, 4-13 でも示したようにケン化度が同じ時には、重合度が大きい程同一濃度において  $G$  に対する  $\Delta n$  の変化が大きい。これは重合度の増加によって、位相幾可学的もつれ、分子内、分子間に存在する分子間力のからみ合い等の entanglement force が増大し、その結果粘度の上昇が起り剪断応力が増加するためと考えられる。

またケン化度が大きいと  $G$  に対する  $\Delta n$  の変化が大きくなる。これはケン化度が低く酢酸基の量が増えると PVA の分子間、分子内の水素結合がへり分子間力のからみあいが減少し、粘度の低下をともなって剪断力の減少がおこるためと考えられる。

濃度変化に対する  $\chi$  の変化に注目すると、103, 105, 108 の試料だけが、濃度增加に対して  $\chi$  の変化は小さくなってくる。これは分子間のからみあいの作用の仕方が他の試料と異なるためと考えられる。103, 105, 108 の高分子水溶液においては、分子内の hindrance potential、位相幾可学的もつれは小さく、濃度上昇にともなう分子間に存在する分子間排除体積効果の増加はそれ等分子の配向を妨げるためと推定される。他の試料においては分子内の hindrance potential または位相幾可学的もつれは大きく、濃度の増加による分子間力のからみあいの増加により粘度の上昇が起り、剪断力が増加し、配向をましているためと考えられる。

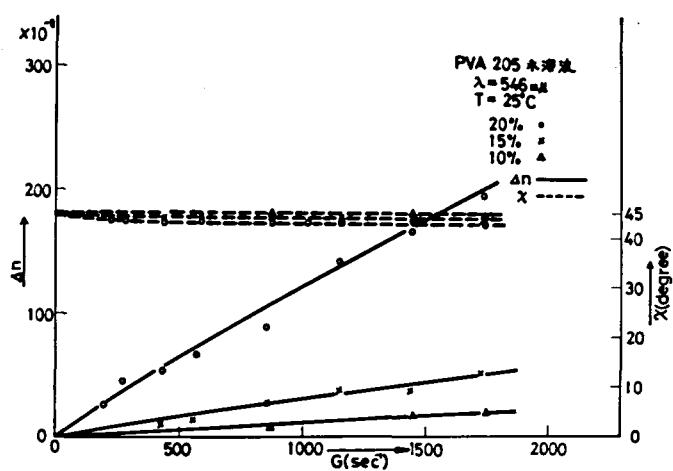


Fig. 4-31 PVA 205

水溶液の速度勾配  
に対する流動複屈  
折, 消光角の関係

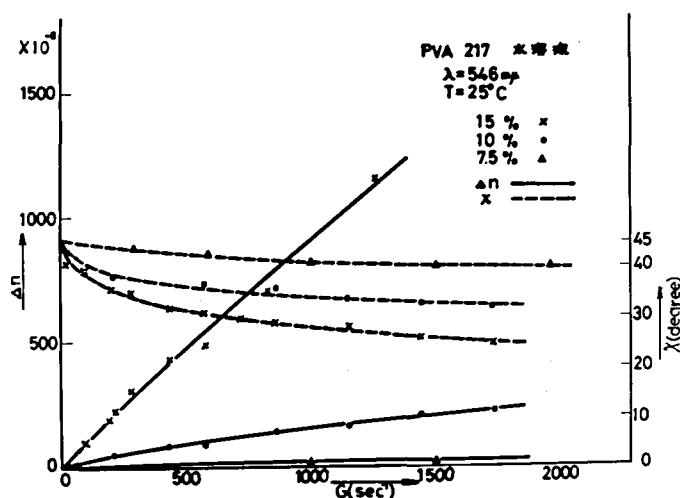


Fig. 4-32 PVA 217

水溶液の速度勾配  
に対する流動複屈  
折, 消光角の関係

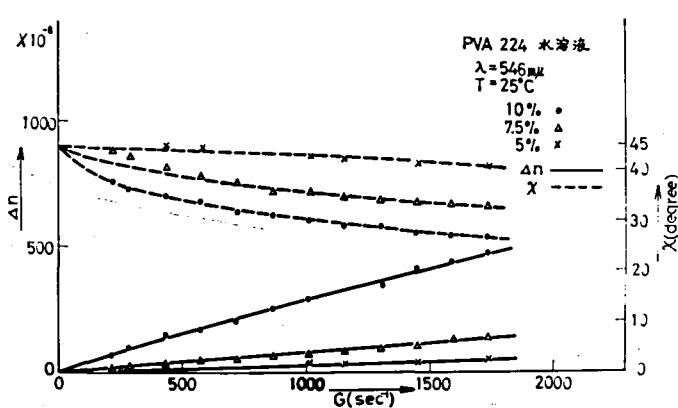


Fig. 4-33 PVA 224

水溶液の速度勾配  
に対する流動複屈  
折, 消光角の関係

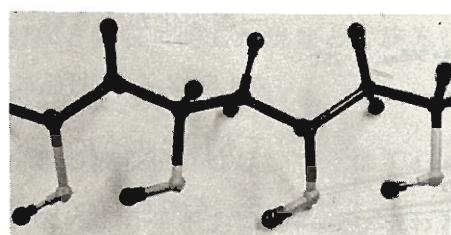
PVA 117, 124 と PVA 217, 224 とでは  $\chi$  の変化は前者が大きい。これは後者においては OH 基よりも  $\text{OCOCH}_3$  基の分子間のからみあいが小さいため濃度増加による粘度の増加が小さいためと考えられる。

PVA 103, 105, 108 において負の消光角が観測された。<sup>(43)</sup> 4-1 に示されたように消光角は  $45^\circ$  から  $0^\circ$  の間を取るとされていた。機械的に考えると

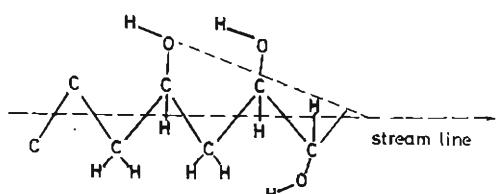
$G$  が高くなると  $\chi$  が  $0^\circ$  を越えて負の値をとることは、溶質分子が流線に沿うて完全配向し、その流線をこえることを意味している。このようなことは考えられない。この理由として幾可学的な主軸と光学的な主軸が一致しないことがあげられる。PVA 103, 105, 108 などのような重合度が低く、ケン化度の高いものでは、低重合度のため、その分子内の entanglement force は小さい上、OH 基は

Fig. 4-34 負の消光角

$\text{OCOCH}_3$  基よりも hindrance potential は小さいので比較的小さい速度勾配で分子鎖は配向し引きのばされて直線に近い形をとるのではないかと推定される。



(a)



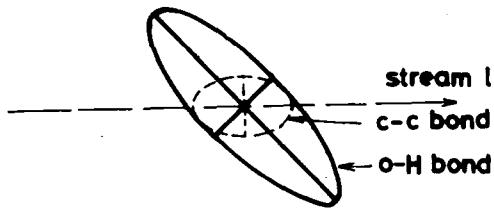
(b)

Fig. 4-35 完全に引き伸ばされた PVA

(a) 模形 (b) 略図

この場合、直線に分子が配向す

ると Fig. 4-35 のように主鎖で



(b)

Fig. 4-36 完全に引き伸ばされた PVA の屈折率椭円体

stream line ある  $-C-C-$  bond が stream line にそって対称にならび、その光学的主軸は stream line と一致する。他方側鎖である OH 基は stream line に一致せずにならぶ。このとき OH 基が非対称

についており、主鎖の光学的異方性よりも、側鎖の光学的異方性の方が大きい<sup>(44), (45)</sup>ので、Fig. 4-36 のように側鎖の stream line に対する光学的非対称性のための負の消光角を取ると考えられる。なお使用した PVA 105 の立体規則性は syndiotactic 36%， atactic 42%， isotactic 22% で 22% の isotactic が光学的な非対称性に寄与していると考えられる。なお OH 基の主鎖に対する非対称なつきかたに対する力学的な非対称性の効果は OH 基の hindrance potential が、小さいため表われず、  $-C-C$  bond は stream line の方向に対称にならぶと考えてよい。

PVA 103, 105, 108

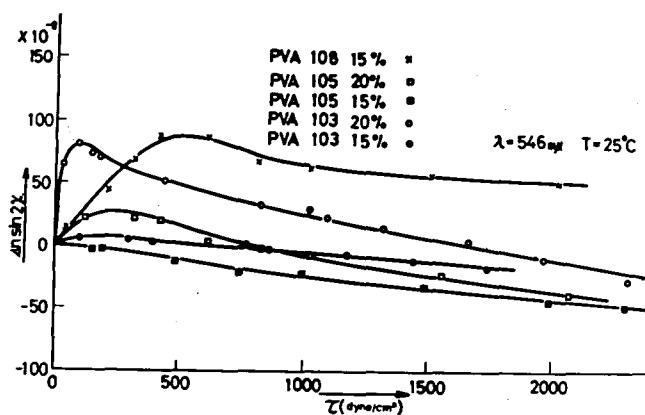


Fig. 4-37 PVA 103, 105, 108 水溶液の  $\tau$ ,  $\Delta n \sin 2x$  の関係

をくらべると  $x$  は 105 が一番変化が大きい。 $\tau - \Delta n \sin 2x$  の関係についても同じようになってい る。これについて次に考 察する。分子のマクロブ ラウン運動を拘束する分

子間のからみあいと分子内の entanglement force が関係しており PVA 103においては両者が小さく、PVA 105 では前者と後者がうまく均合った状態にあり配向が大きくなる。PVA 108 では後者が大きくきいてくるため配向は小さくなると考えられる。

PVA 117, 124 においては分子内の entanglement force が大きくほとんど分子が引き伸ばされていないと考えられる。

PVA 205 においては同一重合度である PVA 105 にくらべてほとんど配向が起らないのは、OH基よりも  $\text{OCOCH}_3$  基の hindrance potential が大きいためである。

なお粘度の測定結果 3-4-5 節の Fig. 3-18 において重合度 1300 を境として、低重合度では 1.8 乗則高重合度では 3.4 乗則が成立する。これは分子の entanglement に關係するとのべた。分子量 1300 以下では、G が  $2000 \text{ sec}^{-1}$  以下で消光角  $\chi$  は負になるが、分子量 1300 以上では負にならない。分子の entanglement のちがいにより配向性が異なると説明した上述の複屈折の測定結果と粘度測定結果の要因が一致する。

#### 4-5 分光的方法によるモデル材料の開発

屈折率と吸収に関した現象と、旋光性と円 2 色性との現象との間にきわめて強い類似があるとされている。

屈折率の波長依存性は、古くは Cauchy の分散の式、最近では Drude, Moffit 等により量子力学的に取り扱われている。たとえば物質の屈折率は一般に短波長ほど大となり吸収帯の両側において異常を示す (Fig. 4-38)。この吸収域における旋光度の異常性と円 2 色性は同時に現われ発見者の名をとっ

(40)  
てコットン効果として知られている。同様な効果は複屈折と平面2色性についても起っていると考えられる。このような観点から第1編の本節において分光的方法によるモデル材料の開発をとりあげ、これと関連して第2編において流動2色性について述べる。

顕著な異方性をもつ物質でも配向性が少ないと、流動複屈折感度は大きくならない。そこで高配向性物質に顕著な異方性の大きな物質をつけると、高配向性物質の配向と共にランダムに分布していた顕著な異方性物質が配向し、大きな複屈折を示す高感度の流体モデル材料が得られる。また分光的立場から可視域で顕著な2色性を示す吸収帯のある物質は吸収域を少しつぶれた所で顕著な屈折率の異方性が存在すると予測し、顕著な異方性物質を選択し、流動複屈折の波長分散を測定すれば、高感度の波長を選択することができる。

また他方では顕著な屈折率異方性物質を高分子に結合させることにより、分子配向、変形等のレオロジー的挙動を推定することができる。

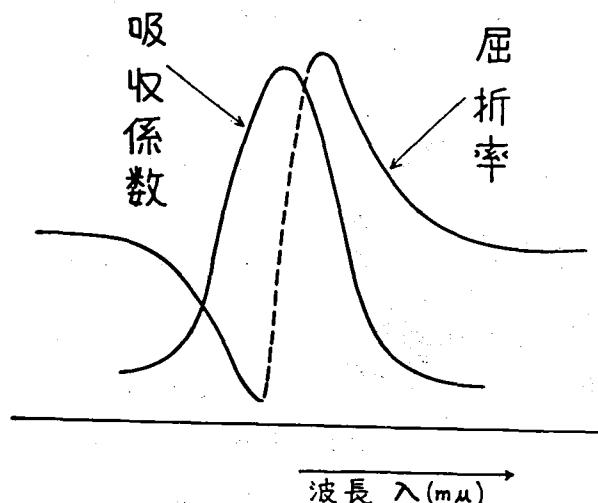


Fig. 4-38 Cauchy の分散

#### 4-5-1 コンゴーレッド添加効果

4-4-3 に示したように  $\chi$  が負になる高ケン化度、低重合度の PVA は高配向性を示すと考えられ、これを高配向性物質として用いた。

Congo Red (CR) は第2章で示したように  $532 \text{ m}\mu$  を中心として可視域に顕著な吸収帯があり、第2編の流動2色性の Fig. 4-3 において示すようにこの吸収帯において顕著な2色性を示すことが知られている。<sup>(47)</sup> 吸収帯を少しほずれた所  $600 \text{ m}\mu$  付近で顕著な異方性を示すと考えられる。

PVA に対する CR の結合は CR の助色団である  $\text{NH}_2$  基が PVA の OH 基と弱い van der Waals 引力で結合していると考えられる。

なお CR 自身を水にとかしたもののが流動複屈折は小さく、回転拡散係数をへらす意味で粘度をますため球形粒子であるグリセリンと CR をませたものについても流動複屈折は小さい。これ等は CR の配向のためには高配向性物質をつける必要があることを示している。

4-4-3 に示した異なった変形をすると推定される 3 種の PVA について、G に対する  $\Delta n$ ,  $\chi$  を測定した結果を Fig. 4-39, Fig. 4-40 に示す。

3 種の PVA 105, 205, 117 (または 124) のうち 105 のみ  $\Delta n$  が著しく増大し、顕著な異方性があらわれる。他の試料は分子配向性が小さいために、 $\Delta n$  はほとんど変化しないと考えられる。4-4-3 に検討したように分子配向が大きくなるためには適当な分子の長さとケン化度が必要であることをのべたが、このことを上の結果は証明している。PVA 117 において  $\chi$  が負になるのは分子配向において CR が丁度光学的異方性が負になるようにならんだためと考えられる。この点 PVA 205 において配向がないことを示し  $\text{OCOCH}_3$  の hindrance potential の大きいことを示している。PVA 105 において、CR の濃度変化に対して  $\chi$  の変化が小さくなる。CR 0.005 % においては負の

消光角を示すのは PVA 自身の光学的異方性が約半分程度寄与しているためと考えられる。

CR 0.010 %, 0.020 %では負の消光角を示さず  $\chi$  の変化は、両者では殆んど同じになる。PVA の光学的異方性よりも CR の光学的異方性が寄与しているためと考えられる。CR 0.100 %では CR 0.020 %より  $\chi$  の変化がわずか小さくなるのは CR 添加によって分子配向が、すこし妨げられるためと考えられる。

したがって CR 添加によって  $\chi$  が負にならないのは、PVA と CR の結合の仕方は、CR が PVA の分子鎖と平行にならぶと推定され、CR 0.100 %程度迄の添加は分子配向をあまり妨げないと考えてよい。

CMCにおいて  $\chi$  の変化が大きく、比較的高配向性を有するとみなされるCMC 8にCRを添加した結果をFig. 4-41に示す。添加によって殆んど変化がないのは CMC のカルボキシル基と CR が結合しないためと考えられる。

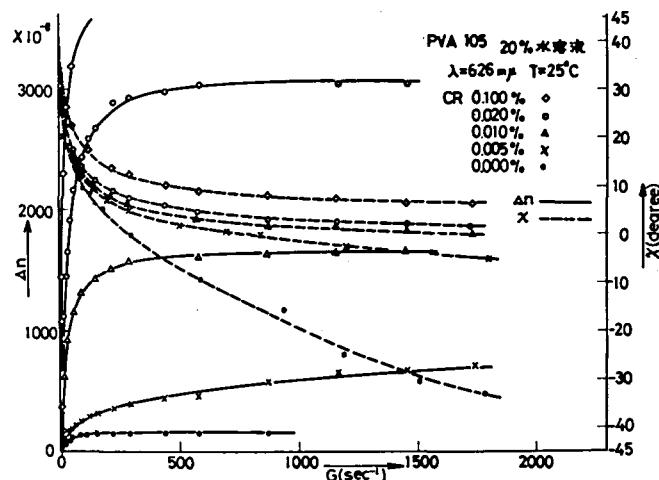


Fig. 4-39 PVA 105  
 水溶液の CR 添加  
 による流動複屈折、  
 消光角の変化

Fig. 4-40 PVA 205,

117, 124 水溶液  
の CR 添加による  
流動複屈折, 消光  
角の変化

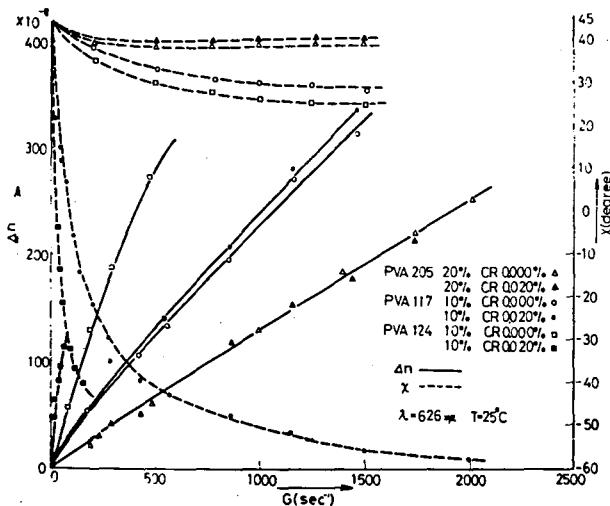
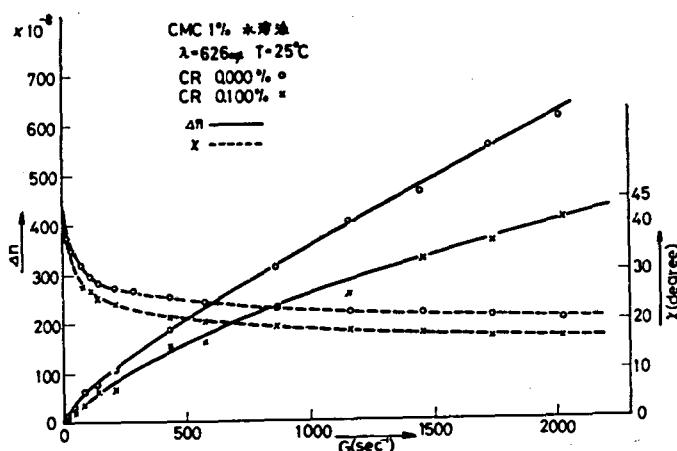


Fig. 4-41 CMC 8 水  
溶液の CR 添加に  
よる流動複屈折,  
消光角の変化



#### 4-5-2 ミリングイエロー添加効果

ミリングイエロー (MY) は Fig. 2-9 に示したように可視域に広い吸収帶 (11)~(13)を持ち、F. N. Peeble 等の実験において比較的感度のよいことが示されたが、その試料の不安定性が問題である。すなわち過飽和水溶液であるため凝集によ

り粒子となり光に対して散乱し、複屈折の測定は難しい。

このMYをCRと同様に高配向性物質であるPVA105にまぜてGに対する流動複屈折および消光角を測定した結果をFig.4-42に示す。

CRと同量のMYを添加した場合、その感度はCRの感度より少し下がる傾

向が見られる。感度が下ることについては解

らない。感度が上らないのは、MYの分子式から比較してコンゴーレッドのような $\text{NH}_2$ 基がないため $\text{OH}$ 基との結合が弱いためMY分子が配向しくいためである。以上の結果からCRに比してMYの添加によって感度上昇

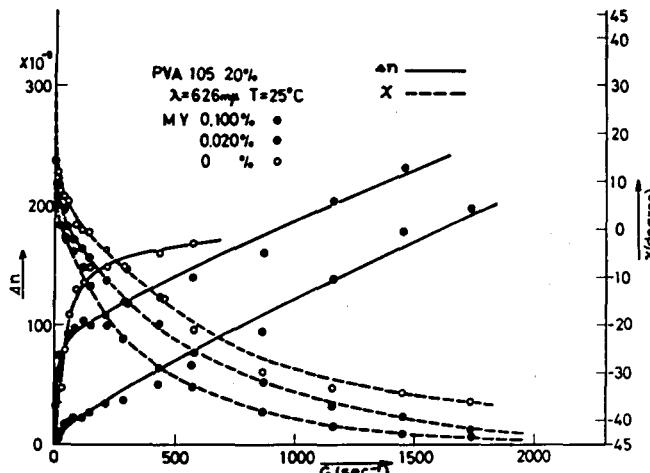


Fig. 4-42 PVA 105 水溶液のMY添加による流動複屈折、消光角の関係

はあまり望めないことがわかり、以下添加剤としてCRを用いる。

#### 4-5-3 PVA 濃度変化に対するPVA-CRの流動複屈折および消光角の変化

PVA-CRの水溶液においてCR 0.100 %に対して速度勾配Gに対する流動複屈折、消光角の関係を検討した結果をFig.4-43に示す。

Fig.4-43においてPVA濃度が低い場合 $x$ の変化が小さいのは、CR 0 %の時の結果Fig.4-27と逆になっている。これはPVAの濃度が低いため、CR

の  $\text{NH}_2$  基と PVA の  $\text{OH}$  基の結合力が弱まり CR の配向性が小さいためと考えられる。

流動複屈折度と 4-4-2 節の式(4-5)を用いて PVA 濃度に対する応力光係数を求めた結果を,

Fig. 4-44 に示す。

PVA 濃度の低下によって応力光係数が下がっているのは Fig. 4-43 の説明と一致している。また PVA 濃度があまりますと分子間のからみあいによって PVA の分子鎖が配向しなくなるので感度

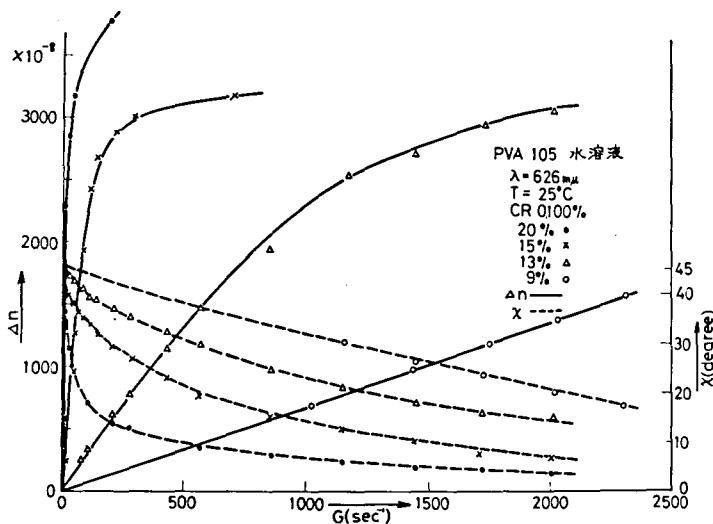


Fig. 4-43 PVA 濃度変化に対する PVA-CR 水溶液の流動複屈折および消光角の変化

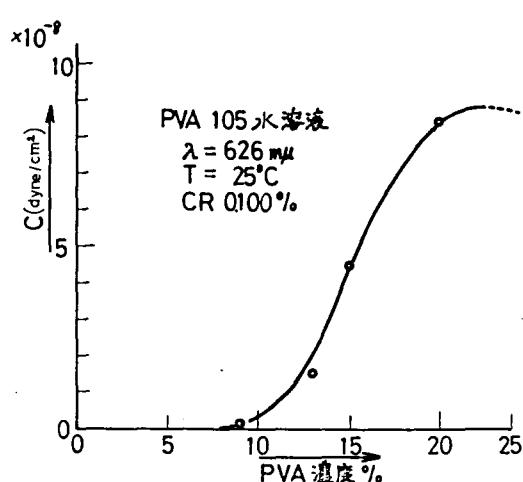


Fig. 4-44 PVA 濃度変化に対する PVA-CR 水溶液の応力光係数の変化

は低下することが考えられる。Fig. 4-44 の点線はこれを示している。

3-5-4 の Fig. 3-17 に示した PVA-CR 水溶液の粘度  $\eta$  はほどニュートニアで、PVA 9 %, 粘度 10 CP 以上では十分な感度が得られ、比較的広い範囲にわたるレイノルズ数について実験が可能である。

#### 4-5-4 PVA 重合度変化に対する PVA-CR 水溶液の流動複屈折および消光角の変化

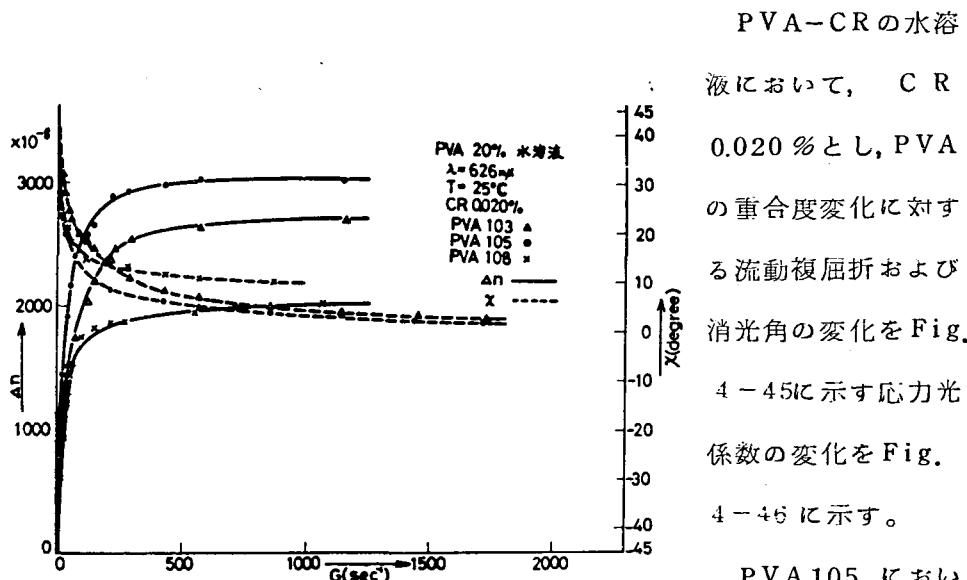


Fig. 4-45 PVA 重合度変化に対する PVA-CR 水溶液の流動複屈折および消光角の変化

数が最大になっている。これは分子のマクロブラウン運動に抵抗する分子間のからみあいと配向を妨げている分子内の entanglement が均合い、分子配向が最高になると考へられる。

高配向性物質として PVA 105 を用いると応力光係数が最大になり広範囲に粘度を変えることができ、すなわちレイノルズ数を広範囲に変える実験が可能

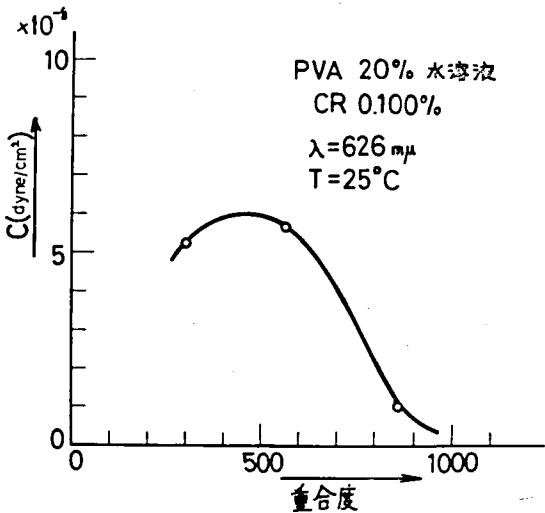


Fig. 4-46 PVA 重合度変化に対する応力光係数の変化

である。

4-5-5 コンゴーレッド添  
加量変化に対する  
PVA-CR 水溶液  
の流動複屈折およ  
び消光角の変化  
PVA-CR 水溶液において流  
動複屈折感度をますため CR添  
加量を変えて流動複屈折、消光  
角および応力光係数を測定した。

その結果を Fig. 4-47, Fig. 4-48 に示す。

PVA の unit length は  $2.52 \text{ \AA}$  で CR 分子の unit length は  $27 \text{ \AA}$  で  
PVA の 11 units に相当する。CR が PVA に 100 % 結合するとすれば PVA

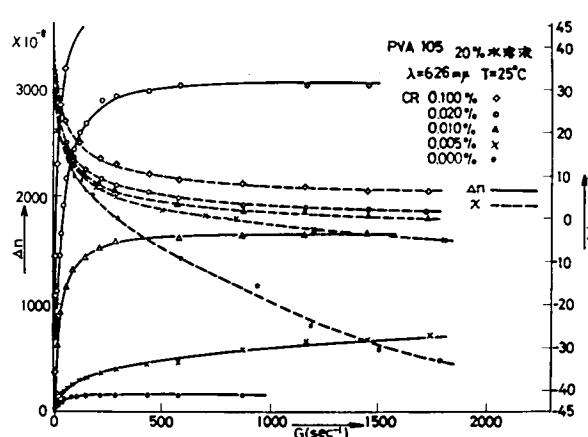


Fig. 4-47 CR 添加量に対する PVA-CR 水溶液の流動複屈折および消光角の変化

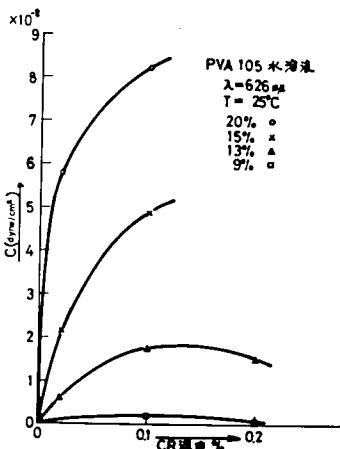


Fig. 4-48 CR 添加量に対する PVA-CR 水溶液の応力光係数の変化

に対する CR 重量比は 44 : 100 であるので、多数 CR を添加できる。しかし Fig. 2-7 に示したように CR には弱い吸収があるため 0.1 % ~ 0.2 % の添加量が  $\Delta n$  の測定限度である。

Fig. 4-45において PVA 13 % 以下では応力光係数 C は CR 0.1 % において飽和し、CR 0.1 % 以上では減少してくる。これは結合した CR が側鎖の役割をし、分子内の hindrance potential をますためと考えられる。Fig. 4-47において消光角  $\chi$  が CR 0.010 %, 0.020 % で同様な変化をし、CR 0.100 %になると  $\chi$  の変化が少なくなっていることからもわかる。3-5-4 節 Fig. 3-17 の粘度測定結果においては CR 0.020 % 迄は CR 0 % 粘度とは同じで CR 0.100 % になると少し粘度は大きくなつたが、これは上の測定結果と一致している。

以上の結果から最高の流動複屈折感度をうるために CR 添加量としては、0.1 % 程度がよい。

#### 4-5-6 PVA-CR 水溶液の流動複屈折の波長分散

PVA-CR 水溶液の波長分散を測定した結果を Fig. 4-49, 4-50, 4-51 に示す。応力光係数 C の波長分散を Fig. 4-52 に示す。波長に対して短波長側で複屈折は増大し、吸収帶 (Fig. 2-7 に示した) を少しつぶれた所で複屈折は大きい。4-5-1 でのべた Cauchy の分散が成立している。流動複屈折モデル材料に使用する場合、吸収の影響が入ると不都合があるので CR の吸収曲線 Fig. 2-7 を参考にして使用波長として  $605 \text{ m}\mu \sim 625 \text{ m}\mu$  程度がよい。PVA 濃度が低くなると応力光係数 C の波長分散が減少しているのは 4-5-3 節の結果と同様に PVA と CR の結合が PVA が低濃度になると低くなるためである。

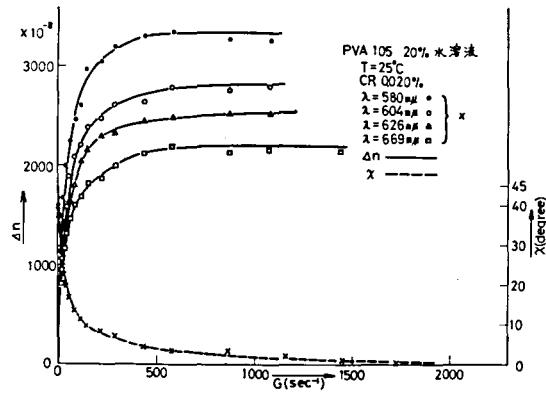


Fig. 4-49 PVA-CR水溶液 (CR 0.020 %) の流動複屈折の波長分散

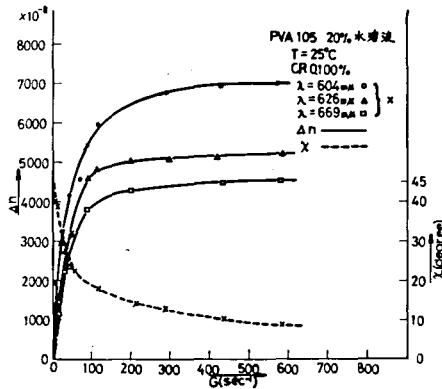


Fig. 4-50 PVA-CR水溶液 (CR 0.100 %) の流動複屈折の波長分散

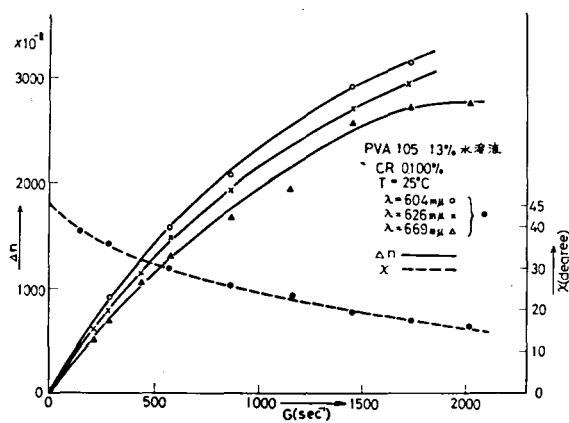


Fig. 4-51 PVA-CR水溶液 (CR 0.100 %) の流動複屈折の波長分散

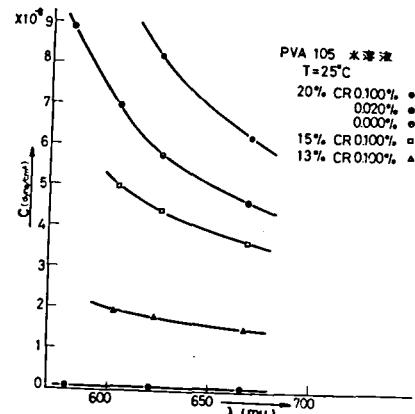


Fig. 4-52 PVA-CR水溶液の応力光係数の波長分散

#### 4-5-7 PVA-CR水溶液の温度変化に対する流動複屈折、消光角の変化

流動複屈折の温度依存性について実験した結果を Fig. 4-53, 4-54, 4-55, に示す。PVA および PVA-CR 水溶液においてはすべて温度の上昇によって  $\Delta n$ ,  $\chi$  の変化は減少する。これはマクロ ブラウン運動が温度に関係するためで、Perrin の式 (4-6) と一致する。

$$\left( \frac{d\chi}{dG} \right)_{G=0} = \text{定数} \times \frac{\eta}{T} \quad (4-6)$$

低温では  $\Delta n$ ,  $\chi$  の変化は大きいが、PVA は 25 °C 以下ではゲル化が激しいので複屈折の感度からみて 25 °C ~ 30 °C で用いるのが望ましい。

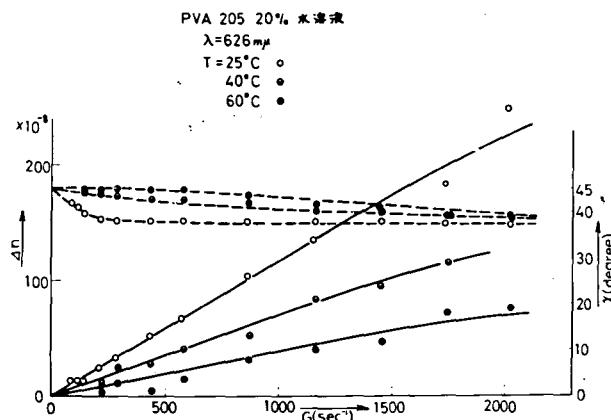


Fig. 4-53 PVA 205 水溶液の流動複屈折、消光角の温度依存性

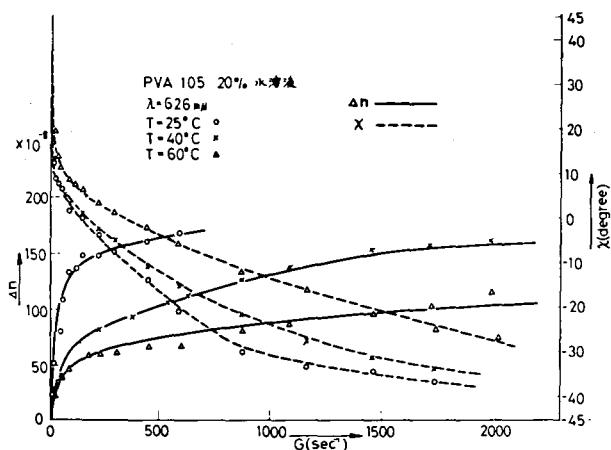
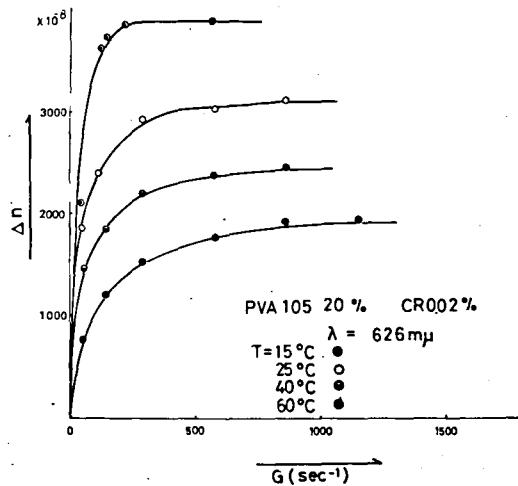


Fig. 4-54 PVA 105 水溶液の流動複屈折、消光角の温度依存性

Fig. 4-55 PVA-CR 水溶液の流動複屈折、消光角の温度依存性



#### 4-5-8 PVA-CR 水溶液の時間経過に対する流動複屈折および消光角の変化

PVA, PVA-CR水溶液の時間経過に対する流動複屈折および消光角の変化を測定した結果を Fig. 4-56, Fig. 4-57, Fig. 4-58 に示す。

2-2で説明したように PVAは試料作成後の時間経過においてゲル化が進行する。すなわち分子間、分子内の水素結合が起り、そのため粘度が上昇し同じ  $G$  に対して  $\tau$  の値が増加する。Fig. 4-57 に示すようにケン化度が低い場合には、時間経過に対する  $\Delta n$  の変化が小さいのは分子内、分子間の結合が OH 基にくらべ  $\text{OCOCH}_3$  基において弱いためである。Fig. 4-58 に示すように Fig. 4-59 に比べ CR 添加によって時間に対する  $\Delta n$  の変化は小さくなり、ゲル化は小さくなり安定性がます。このことは流体計測のモデル材料として使用する場合好都合である。

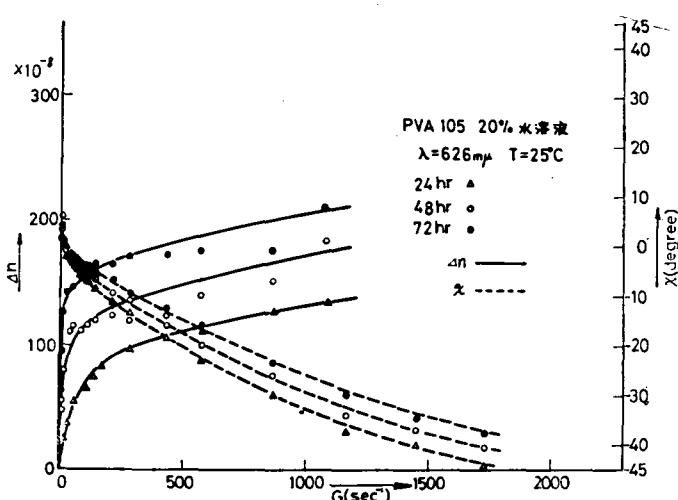


Fig. 4-56 PVA 105 水溶液の時間経過に対する流動複屈折, 消光角の変化

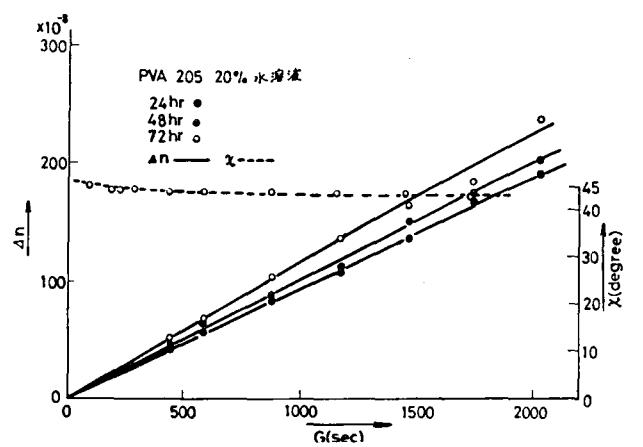


Fig. 4-57 PVA 205 水溶液の時間経過に対する流動複屈折, 消光角の変化

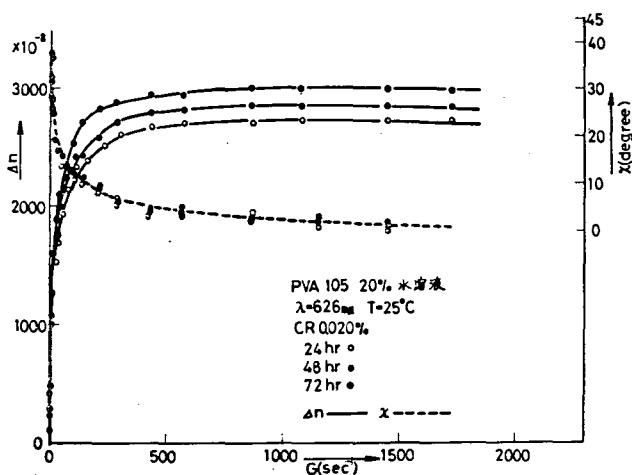


Fig. 4-58 PVA-CR 水溶液の時間経過に対する流動複屈折, 消光角の変化

#### 4 - 6 Poiseulle flow における負の消光角

Couette flowにおいて観察された負の消光角は Couette flow の場合にだけおこって Poiseulle flow の場合にあらわれないとすれば Couette flow において観測された負の消光角は装置的問題となり、一般性がなくなる。そこで今簡単のため平行な 2 平面間を流れる 1 次元 Poiseulle flow について負の消光角の観測を Fig. 4-59 の流动複屈折光学系および光電測光装置を用いて行なった。(なお光電測光装置の詳細については第 2 編の 3-1 において示す。) flow 中の各光学軸の関係を Fig. 4-60 に示す。ここで偏光子 P と検光子 A とを直交させ検光子と管路のなす角を  $\theta$ , 溶質粒子の主軸と偏光子のなす角を  $\varphi$ , 溶液の位相差  $\delta$ , 入射光の強度を  $I_0$  とすると検光子を通過後

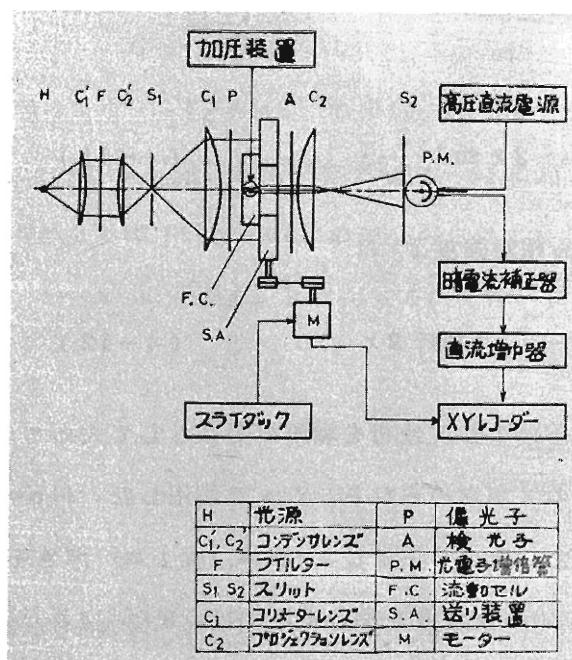


Fig. 4-59 流動複屈折光学系および光電測光装置

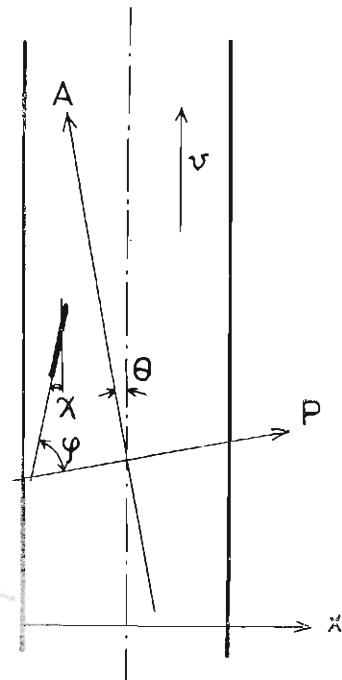


Fig. 4-60 flow 中の各軸の関係

の光の強度  $I_\theta$  は次式で与えられる。

$$I_0(x) = I_0 \sin^2 2\varphi \sin^2 \frac{\delta}{2} \quad (4-7)$$

また Fig. 4-60 より

$$\varphi = 90^\circ - (x + \theta) \quad (4-8)$$

したがって、式(4-7)は

$$I_0(x) = I_0 \sin^2 2(x + \theta) \sin^2 \frac{\delta}{2} \quad (4-9)$$

$\theta = 0^\circ$  のとき

$$I_{\theta=0^\circ}(x) = I_0 \sin^2 2x \sin^2 \frac{\delta}{2} \quad (4-10)$$

$\theta = 45^\circ$  のとき

$$I_{\theta=45^\circ}(x) = I_0 \cos^2 2x \sin^2 \frac{\delta}{2} \quad (4-11)$$

式(4-10)と式(4-11)とから相対強度  $I_r$  は

$$I_r(x) = I_{\theta=0^\circ} / I_{\theta=45^\circ} = \tan^2 2x \quad (4-12)$$

したがって  $\theta = 0^\circ, 45^\circ$  の時の管路の強度分布を場所の関数として求めておけば式(4-12)から任意の場所の  $x$  が求められる。ここで使用した flow cell の実物を Fig. 4-61 に示す。その寸法は長さ 50 mm, 幅 1 mm, 厚さ 10 mm である。試料として PVA105 20% 水溶液を用いて圧力は 0.8 kg/cm<sup>2</sup> かけたので flow cell 中の shear rate は

$$G = \frac{\gamma (\rho g h + p)}{2 L \eta}$$

$$= \frac{\gamma (1 \times 980 \times 20 + 0.8 \times 10^6)}{2 \times 5 \times 7.5} = 10930 \gamma \text{ sec}^{-1}$$

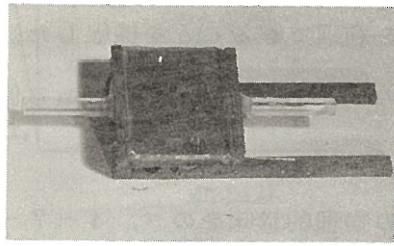


Fig. 4-61 平行 flow cell

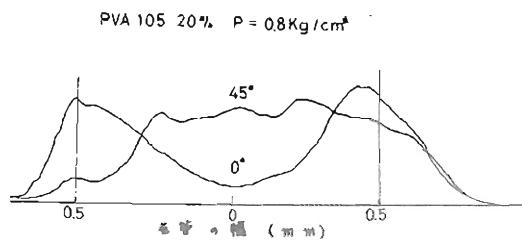


Fig. 4-62 平行 flow cell 中の  
強度分布曲線

$$G_{\max} = 10930 \times 0.05 = 546 \text{ sec}^{-1} \text{ である。}$$

$I_\theta = 0^\circ$ ,  $I_\theta = 45^\circ$  を Fig. 4-59 の光電測光装置を用いて X-Y recorder に記録した結果を Fig. 4-61 に示す。

$\tan^2 2x$  は flow cell の中心からはずれた所で増加するので  $G \rightarrow \infty$  で  $x = 0 \rightarrow -45^\circ$  に近づく。したがって消光角が負になることが確かめられた。

## 4 - 7 ポーラーダイヤグラム

流動複屈折は速度勾配  $G$ , 消光角  $\chi$ , 複屈折  $\Delta n$  の 3 つで規定される。しかし  $G$  に対する  $\chi$ ,  $G$  に対する  $\Delta n$  の関係は簡単にわかつても,  $G$ ,  $\chi$ ,  $\Delta n$  の 3 つの変数が互いにどのような関係にあるかは 1 目でわからぬ。そこで, (49), (51) Phillipoff は横軸に  $\Delta n \cos 2\chi / G$ , 縦軸に  $\Delta n \sin 2\chi / G$  をとれば, その図形をみると分子の配向, 変形状態を判別できることを提唱した。この方法によれば, 単一粒子でない場合各成分のベクトル合成が可能であり便利がよい。

4 - 7 - 1においてポーラーダイヤグラムの物理的意味をのべ, 4 - 7 - 2 では 4 - 4, 4 - 5 の結果をポーラーダイヤグラムに表わし, 分子の変形, 配向の状態を明らかにする。

### 4 - 7 - 1 ポーラーダイヤグラムの物理的意味

ポーラーダイヤグラムの表わす物理的意味について Munk は次のような区別 (44) の分類をしている。

- (1) Pure solvent では消光角は実験可能な範囲では  $\chi \sim 45^\circ$  で, 複屈折  $\Delta n$  は速度勾配  $G$  に比例する。

plot は graph 上の  $\frac{\Delta n \sin 2\chi}{G}$  軸上の点となる。

- (2) Buhe hardening parameter  $\beta = M[\eta] \eta_0 G / RT$  (こゝでは  $M$  は分子量) が十分小さい高分子溶液でも(1)と同じ結果になる。

- (3) 変形しない粒子の場合, Sheraga, Edsall, Gadd 等の計算結果を元にすると, 粒子の橢円の軸比が 1 の場合には  $\frac{\Delta n \sin 2\chi}{G}$  軸上に中心を持つ円となる。軸比が増加すると Fig. 4-69 に示すように円の中心  $S$ , は負側へ移動し  $S_2$  になり, その曲率は大きくなる。原点での曲率の接線が  $\cot 2\chi_\infty$  を

表わし、これは軸比  $P$  と Fig. 4-70 の関係をもつ。

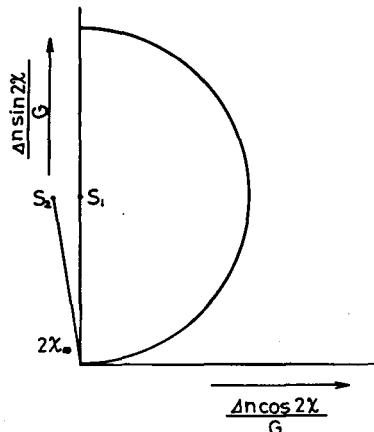


Fig. 4-63 変形しない粒子のポーラーダイヤグラム  
S<sub>1</sub> は軸比が 1 の場合 S<sub>2</sub> は軸比が 1 より大きい

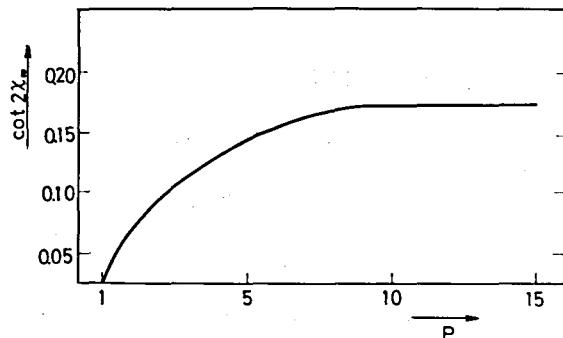


Fig. 4-64 粒子の橢円体の軸比  $P$  と極限消光角  $x_\infty$  の cotangent との関係

- (4) 変形粒子の場合、内部異方性に関する dielectric tensor が stress tensor deviator と一致すれば、 $\Delta n \sin 2x/G$  は与えられた速度勾配に対して比粘度に比例するから  $\Delta n \cos 2x/G$  軸に平行な plot となる。この場合 Newtonian viscosity を持ち、この種のモデルは soft dumbell, gaussian subunit の Rouse's model <sup>(28)</sup> があり、これ等においてはコイルの伸びにともなう流体力学的な干渉の減少を無視している。
- (5) (4)でのべた流体力学的な干渉を考えると粘度は non-Newtonian になる。  
<sup>(53)</sup> Peterlin によれば速度勾配の増加に対して粘度は最初減少して、飽和した後増加する。coil が無限に変形すると仮定すると plot は原点からなれていくが、実際には変形が有限であるので高い速度勾配では原点に近づき、引き伸ばされた橢円の形をとる。

#### 4-7-2 ポーラーダイヤグラム表示結果

4-4, 4-5 の結果をポーラーダイヤグラムに表わした代表例を Fig. 4-65 ~ 4-70 に示す。

Fig. 4-65について、オスモス N は剛体粒子に属し(3)の変形しない粒子に属し、G を大きくする plot は原点に近づく。

Fig. 4-66について、CMC 8 では(3)と同じように速度勾配が小さい所である軸比をもった楕円体として配向し、速度勾配が大きくなると配向のため軸比が大きくなりポーラーダイヤグラムの plot の円の中心は少し負側に移動している。また変形のため(5)のようになかなか plot は原点に近づかない。したがって高速度勾配では主応力差に対応している。

Fig. 4-67について。ケン化度 88.8% PVAについて低速度勾配では(1)に属し  $\chi \sim 45^\circ$  で  $\Delta n \sin 2\chi / G$  軸上の plot に近い形になり、高速度勾配では(5)のようになかなか plot は原点に近づかない。

Fig. 4-68, Fig. 4-69について。ケン化度 98.8% PVAについては Fig. 4-69 は Fig. 4-68 に比し配向性がよく(3)と同じようなポーラーダイヤグラムになる。plot が負になるのは幾可学的主軸と光学的主軸が一致しないためである。

Fig. 4-70について。PVA-CR水溶液では(3)と同じようなポーラーダイヤグラムになり、plot は原点に近づき負にならない。この場合は幾可学的主軸と光学的主軸は一致している。

Fig. 4-71について。PVA-CR水溶液において PVA 自身の複屈折の効果が半分程度とみなされる CR 0.005 % の複屈折から PVA-CR 0 % の複屈折をベクトル的に同じ速度勾配において差引くと plot は負にならない。そして、CR の複屈折が大部分である CR 0.020 % のものと同じポーラーダイヤグラムになる。

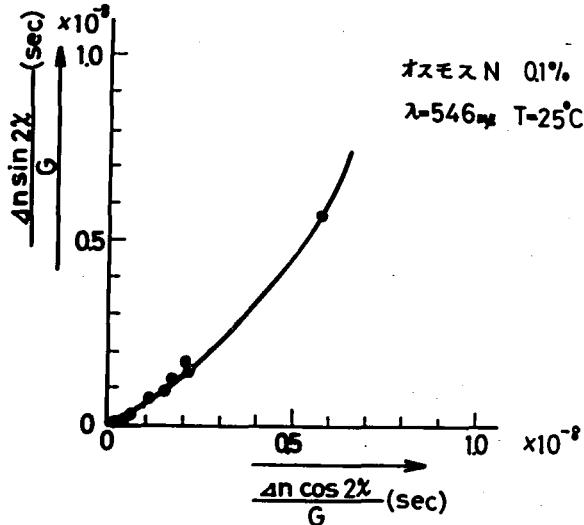


Fig. 4-65 オスモス N のポーラーダイヤグラム

これから考えてみても CR は PVA

オスモス N 0.1%

$\lambda=546_m\mu$  T=25°C

分子鎖に平行に結合していると考えてよい。

以上の結果から PVA-CR 水溶液では CR 0.020 % 以上では(3)の分類に属し、複屈折は G に対応している。そしてその幾何学的主軸と光学的主軸が一致し、また粘度測定結果からニュートン性を示すことから流体計測のモデル材料として適している。

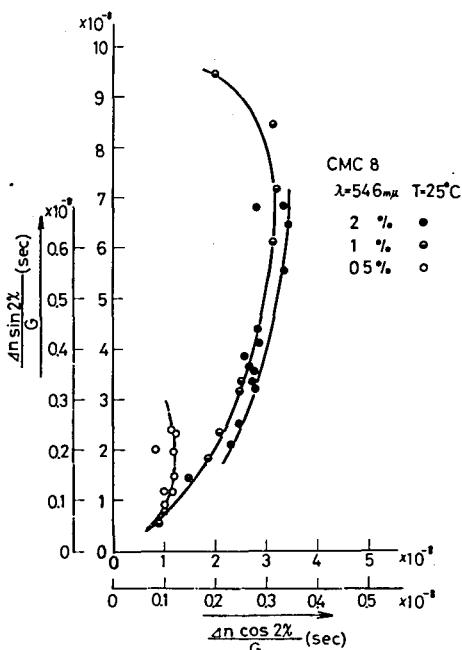


Fig. 4-66 CMC 8 のポーラーダイヤグラム

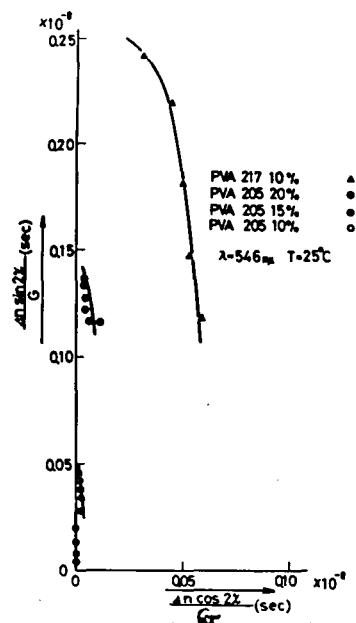


Fig. 4-67 PVA (ケン化度 88.8 %) 水溶液のポーラーダイヤグラム

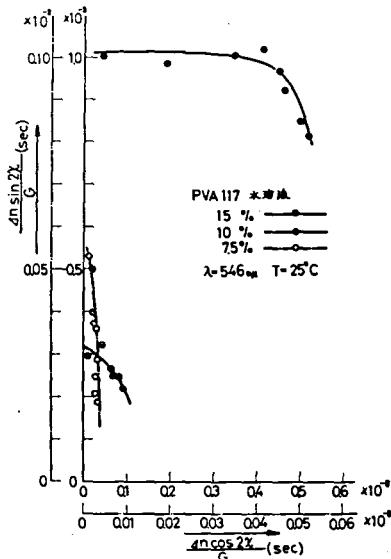


Fig. 4-68 PVA (ケン化度 98.8 %) 水溶液のポーラーダイヤグラム

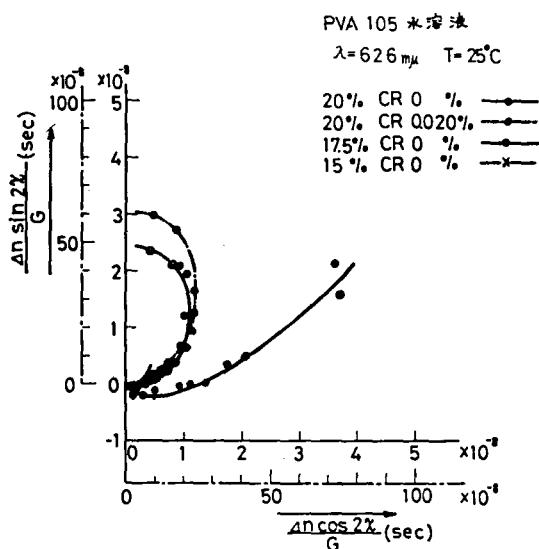


Fig. 4-69 PVA (ケン化度 98.8 %) 水溶液のポーラーダイヤグラム

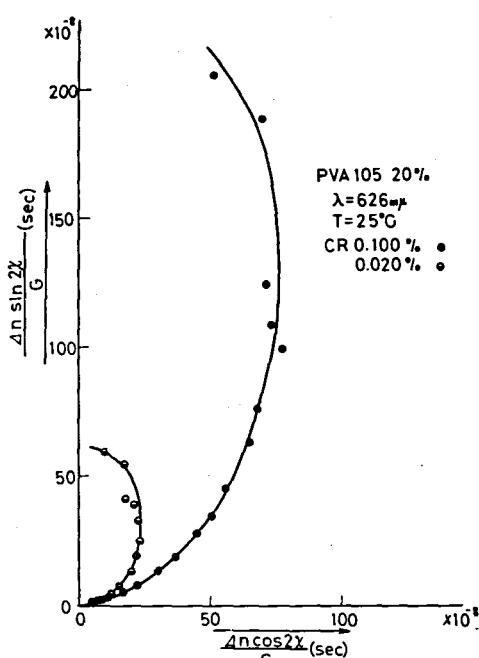


Fig. 4-70 PVA-CR 水溶液のポーラーダイヤグラム

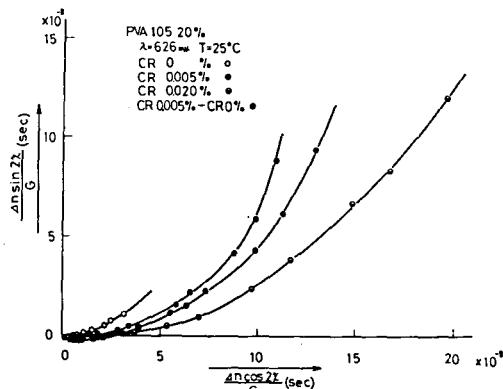


Fig. 4-71 PVA-CR 水溶液のポーラーダイヤグラム

## 第5章 流動複屈折緩和時間の測定

流動複屈折を流体計測に応用するためには速度勾配の変化に対する流動複屈折<sup>(18), (19)</sup>の応答性が問題になってくる。流動複屈折の緩和時間の測定は装置の難しさからあまり実験はなされていない。このため本研究では平行セル(幅1.0mm)を用い、流れている液を急激に停止、または急激に液を流して流動複屈折の緩和時間を測定する装置を試作し測定した。

### 5-1 流動複屈折緩和時間測定装置

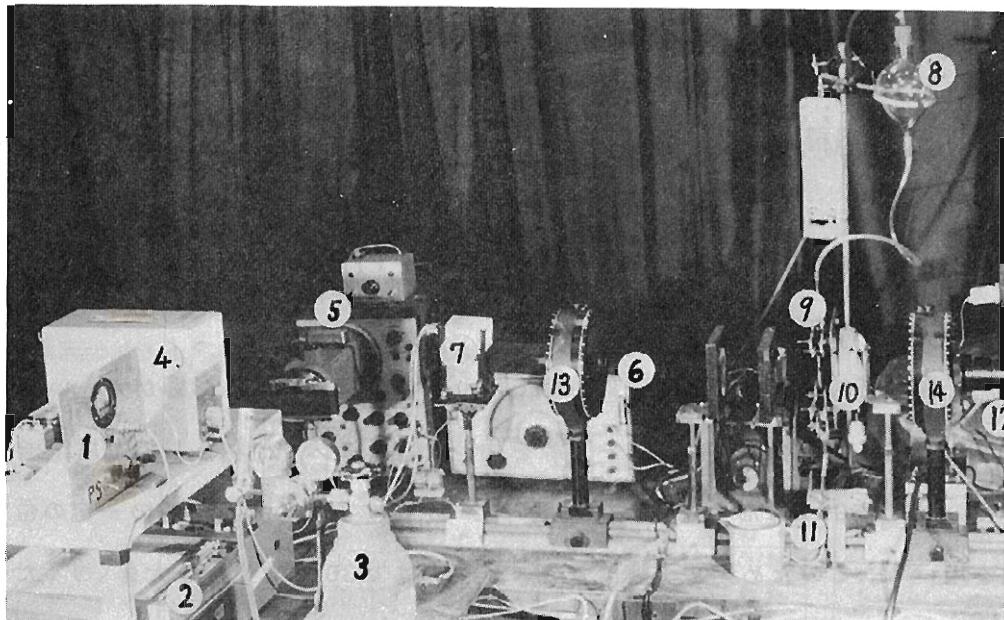


Fig. 5-1 流動複屈折緩和時間測定装置

- 1 ; 光電子増倍管電源 2 ; X-Yレコーダー 3 ; 窒素ボンベ  
4 ; 直流増幅器 5 ; オシロスコープ 6 ; テストオシレーター  
7 ; 光電子増倍管 8 ; 試料容器 9 ; 流動セル 10 ; 流動セル送り装置  
11 ; 液停止装置 12 ; キセノン光源 13 ; 偏光子, 1/4波長板 14 ; 検光子, 1/4波長板

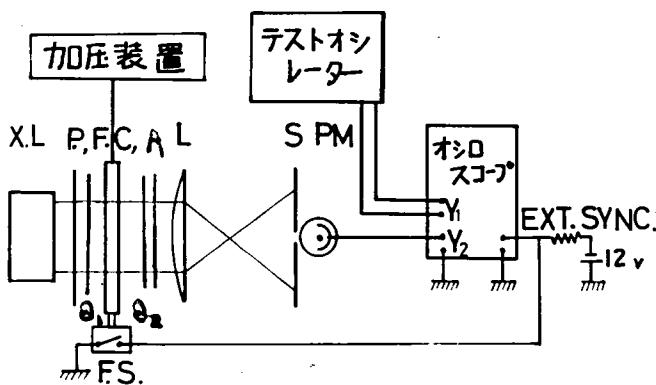


Fig. 5-2 流動複屈折緩和時間測定装置のブロック線図

X. L ; キセノンランプ L ; プロジェクションレンズ  
 P ; 偏光子  $Q_1$ ,  $Q_2$  ;  $1/4$  波長板 A ; 検光子  
 S ; スリット F. S ; 液停止装置 F. C ; 流動セル  
 PM ; 光電子増倍管

試作した流動複屈折緩和時間測定装置の写真を Fig. 5-1 に示す。Fig. 5-2 にそのブロック線図を示す。

流動複屈折の緩和時間の測定においては、光源の脈動による影響が大きいため、比較的脈動の少い、キセノン光源を用いた。キセノン光源として牛尾電機株製の UX L 500 DK 形を用いた。速度勾配一定にするため平行セルの一定の位置を用いる。このため光電子増倍管のスリットは幅  $30 \mu$  で光量を大きくするため高さは  $20 \text{ mm}$  にした。光電子増倍管の出力を直接ブラウン管オシロスコープ（松下通信工業製 CT-2-510 A 形）に接続した。トリガーパルスは Fig. 5-2 に示すように液停止装置と連動するスイッチを用いて行なった。

Fig. 5-3 に液停止装置の写真を示す。Fig. 5-4 に液停止装置の組立図を、Fig. 5-5, 6 に部品図を示す。

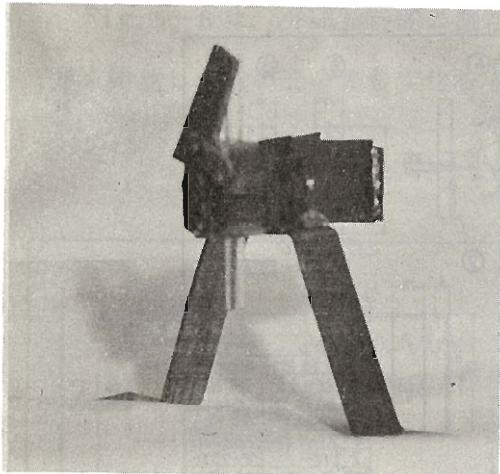


Fig. 5-3 液停止装置

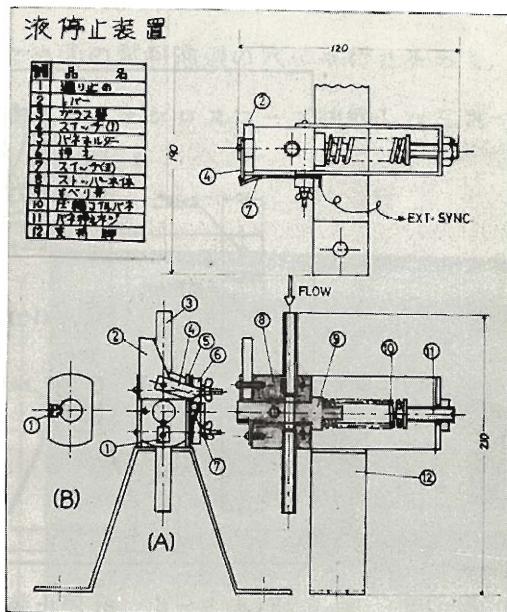


Fig. 5-4 液停止装置組立図

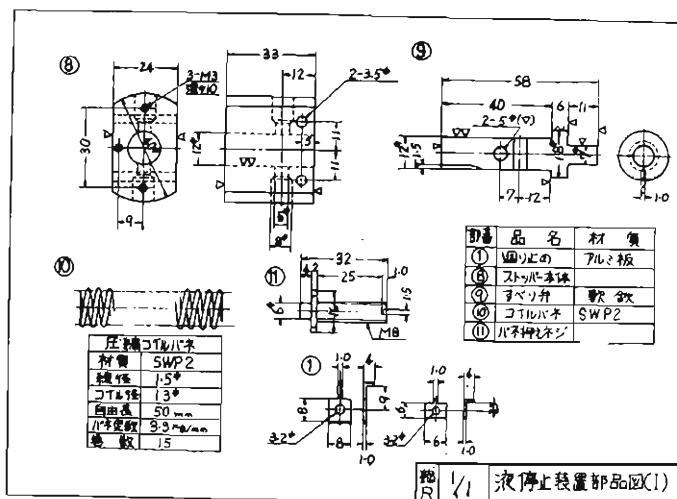


Fig. 5-5 液停止装置部品図(1)

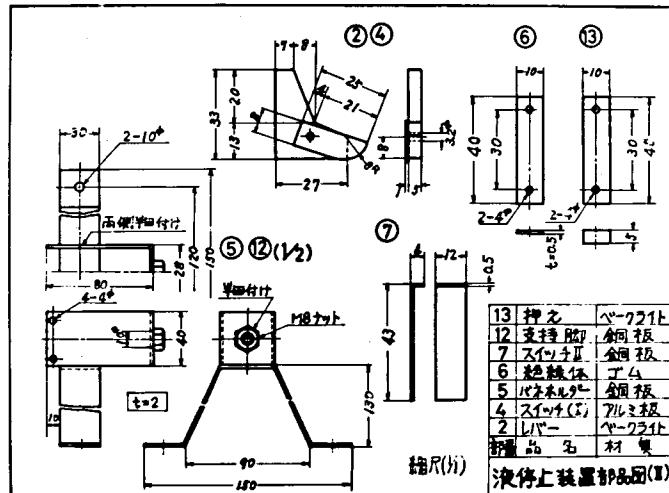


Fig. 5-6 液停止装置部品図 (II)

Fig. 5-4においてレバー②を手で回転させることにより、すべり弁⑨が急速に動き、液を瞬間に停止または瞬間に流し始める。(A)は液を瞬間に流し始める場合であり、(B)は瞬間に停止させる場合である。レバーを回転させると、すべり弁が動き始める少し前(10 m sec程度)にレバー先端のスイッチが接触し、スイープが開始する。スイープ開始時間の調整はスイッチ⑦を適当に曲げておこなった。

この場合液停止装置の弁の開放速度は流动複屈折緩和時間に比し充分速くなければならない。本研究においては弁の閉る時間を1 m sec程度になるように設計した。Fig. 5-7に示すように質量をmとし、バネ定数をKとして運動方程式をたてる。

$$m \ddot{x} = 12 K - Kx$$

(5-1)

Fig. 5-8 は、弁開放時間の測定のため③の試料通過の穴に平行光をあて、弁を開いた時の光の光量変化を光電測光し、オシロスコープ観察した写真を示す。

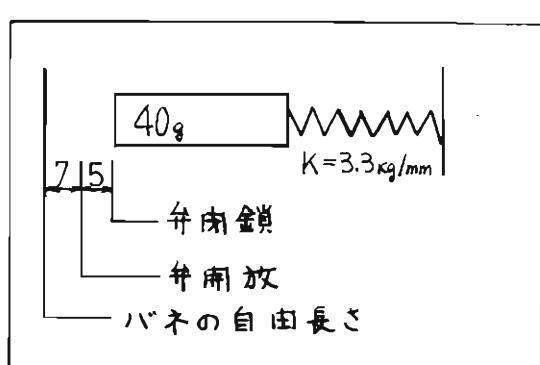


Fig. 5-7 すべり弁の位置  
長さの単位は mm

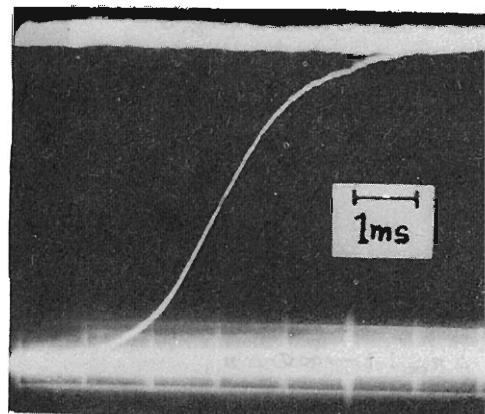


Fig. 5-8 弁開放時間の  
オシロスコープ写真

これから弁の開放時間は 5 msec である。これは摩擦によるため設計値より長くなつたと考えられる。

## 5 - 2 流動複屈折緩和時間の測定結果および考察

5-1 でのべた装置により流動複屈折緩和時間を測定した例 (PVA 105 20 %, CR 0.020 %, G = 10 sec<sup>-1</sup>) を Fig. 5-9 に示す。

Fig. 5-9 は緩和の際の複屈折の変化に対する強度変化を示している。

$$I = I_0 \sin^2 \frac{\delta}{2} \left( \delta = \frac{2\pi \Delta n d}{\lambda} \right) \quad (5-2)$$

$I_0$  : 入射光強度

$d$  : 試料厚み

$\lambda$  : 波長

$\Delta n$  : 複屈折

を用いて光強度を  $\Delta n$  の変化に変換した図を Fig. 5-10 に示す。

$$\Delta n = \Delta n_\infty (1 - \exp(-\tau_t t))$$

(5-3)

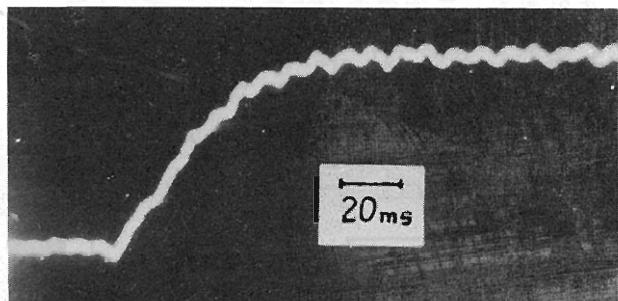


Fig. 5-9 流動複屈折の緩和の際の  
強度変化

$\Delta n_\infty$ :  $t \rightarrow \infty$  の  $\Delta n$

として緩和時間  $\tau_t$  を定義して求めた。

このような方法により緩和時間  $\tau_t$  を各種の試料について求めた結果を Fig. 5-11 に示す。

Fig. 5-11 で点線は液停止または開放装置の

停止または開放に必要な時間の影響が少ないとみられる高濃度の PVA の緩和時間  $\tau_t$  をもとにして粘度に対する還元定数として

$$\bar{\tau}_{red} = \frac{\tau_t}{\eta} \quad (5-4)$$

から  $\bar{\tau}_{red}$  を求め、他の濃度に対して、

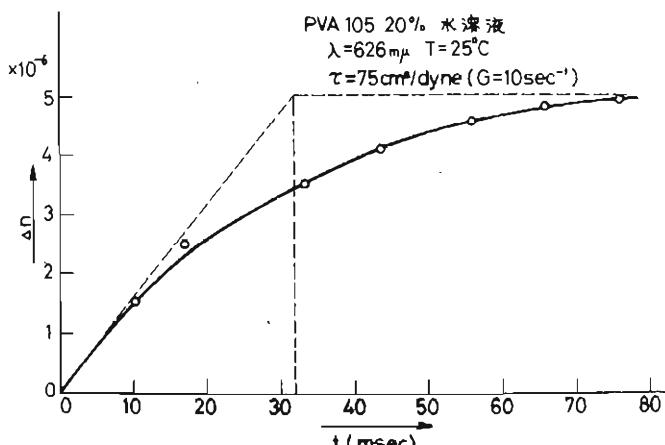


Fig. 5-10 流動複屈折の緩和曲線

$$\tau_t = \eta \bar{\tau}_{red}$$

(5-5)

として計算した値を示す。液開放装置の開口時間は 5 msec であるので低い緩和時間に対して大きく影響してくるのはこのためと考えられる。

このような瞬間に速度勾配が変化する場合、溶液を Maxwell モデルと仮定した時の消光角  $\chi$  と緩和時間  $\tau_t$  の関係は式(5-6)で表わされる。

$$\cos^2 \chi = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{G \tau_t}{\sqrt{1 + (G \tau_t)^2}} \right] \quad (5-6)$$

$G = 10 \text{ sec}^{-1}$ ,  $\chi = 25^\circ$  (実験値) から式(5-6)を用いて緩和時間  $\tau_t$  を計算したところ、 $\tau_t \sim 10 \text{ msec}$  となり Fig.5-10 の実験値 30 msec より短い、これは液開放装置の開口時間よりも溶液を Maxwell モデルとして仮定したためと思われる。

以上の結果から PVA-CR 水溶液の緩和時間は、高濃度の測定値から計算した値により 150 msec ~ 1 msec の間にがあるので、この程度の変化に応答でき

る。

流体計測のモデル材料として使用する場合、このような応答性を十分考慮して用いる必要がある。

## 第6章 流体計測への応用

開発した高感度流体材料を使って2次元流速分布を測定でき、簡便な流れの可視化がされることを示す。流動複屈折法による2次元流解析の試みは実験的(11)～(13)にはF.N.Peeble等や理論的にはHarold Wayland等によってなされた。F.N.Peeble等の用いた試料は非ニュートン性で不安定で凝集し易いという問題点がある。また彼等はreference axisをstream lineにとってprincipal strain rate axisとstream lineのなす角がほど $45^{\circ}$ の時のみを実験値だから流速分布を解析でき、また一般に上述の角が $45^{\circ}$ からはずれた時は、principal optical axisの情報を無視して複屈折 $\Delta n$ が最大速度勾配 $G_{max}$ に対応するものとして $\Delta n$ から流れ関数を計算により求める場合の補助に使って流速分布を計算している<sup>(13)</sup>。

本研究ではreference axisを適当に任意にとって実験値のみから2次元流速分布が求まり、これを積分して流れ関数を求めstream lineを求めることができる。6-1では一般的2次元流の場合について実験から流速分布およびstream lineを求める方法について記す。6-2では、細管中では厚みが小さいので低感度の測定は難しく、高感度流体材料でも流動複屈折は1フリンジ以下になるので流動複屈折、および消光角を光電測光により求める方法について述べる。6-3では拡大流れの2次元流速分布、stream lineの測定例を示す。6-4では高感度流体材料により簡便に流れの可視化を行うことができる例として純流体素子について行なった。

## 6 - 1 2 次元流速分布測定法

複屈折  $\Delta n$  が最大速度勾配を表わす場合について次に述べる。

Principal strain rate axis と 45 度をなす方向が最大の shear 方向である。高分子溶液はマクロブラウン運動をしているため、その変形の主軸は最大の shear 方向よりも小さな角度のところで均合う。その各軸間の角度関係を Fig. 6-1 に示す。

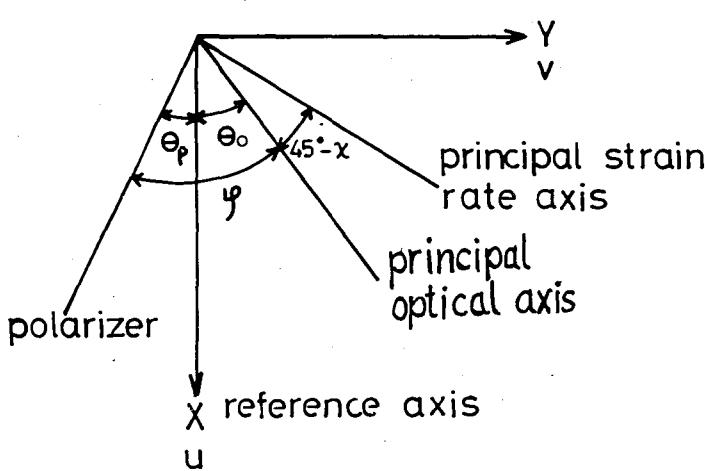


Fig. 6-1 reference axis と各軸との  
間の角度

Couette flow においては、1 次元流であり principal strain rate axis と stream line のなす角は 45 度であり、式 (6-1), (6-2) が求まる。

$$\Delta n = f_1(G)$$

$$(6-1)$$

$$45^\circ - \chi = f_2(G)$$

$$(6-2)$$

2 次元流においては実験から  $\Delta n$ ,  $\theta_o$ ,  $\theta_p$ , が求まる。先ず式 (6-1) の関係のグラフから  $G_{\max}$  が求まり、次にこの  $G_{\max}$  を式 (6-2) に代入して  $\chi$  が求まる。

$x$ ,  $y$  軸方向の速度  $u$ ,  $v$  とすると、次の関係式が成立する。

$$e_{xx} = \frac{\partial v}{\partial x} = -e_{xy} = -\frac{\partial v}{\partial y} = \frac{G_{\max}}{2} \cos 2(45^\circ - \chi + \theta_o)$$

$$(6-3)$$

$$e_{xy} = e_{yx} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right] = \frac{G_{\max}}{2} \sin 2(45^\circ - \chi + \theta_0) \quad (6-4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{G}{2} \sin(\chi - \theta_0) \quad (6-5)$$

$$\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = G \cos(\chi - \theta_0) \quad (6-6)$$

壁において  $u, v = 0$  を境界条件として式 (6-5), (6-6) を積分すれば  $u, v$  が求まる。

Stream line を求めるには流れ関数  $\psi$  と  $u, v$  の間には次の関係があるのので、これを積分することにより  $\psi$  を求め、 $\psi = \text{const}$  をつらねればよい。

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad v = \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (6-7)$$

複屈折  $\Delta n$  が主応力差を表わす場合には、以上の方法において  $\frac{\Delta n \sin 2x}{\eta} = G_{\max}$  を用いればよい。

## 6 - 2 流動複屈折および消光角の光電測光法

流動複屈折の等色縞が 1 フリンジ以下の場合、光電測光により流動複屈折  $\Delta n$  および消光角  $\chi$  を測定することを試みた。

Fig. 6-1 に示したように、偏光子と  $x$  軸とのなす角を  $\theta_p$ 、複屈折媒質の光軸と  $x$  軸とのなす角  $\theta_0$ 、偏光子と複屈折媒質の光学的主軸とのなす角  $\varphi$  とすると次の関係がなりたつ。

$$\varphi = \theta_p + \theta_0 \quad (6-8)$$

直交偏光場において観測される強度  $I$  は、入射光  $I_0$  とすると

$$I = I_0 \sin^2 2\varphi \sin^2 \frac{\delta}{2} \quad (6-9)$$

$$\delta = \frac{\Delta n d}{\lambda} \times 360^\circ$$

式(6-8)を式(6-9)に代入して

$$I = I_0 \sin^2 \{ 2(\theta_p + \theta_0) \} \sin^2 \frac{\delta}{2} \quad (6-10)$$

$\theta_p = 0^\circ$  および  $\theta_p = 45^\circ$  における強度を  $I_{\theta_p=0}$ ,  $I_{\theta_p=45^\circ}$  とすれば、

$$I_{\theta=0^\circ} = I_0 \sin^2 2\theta_0 \sin^2 \frac{\delta}{2} \quad (6-11)$$

$$I_{\theta=45^\circ} = I_0 \cos^2 2\theta_0 \sin^2 \frac{\delta}{2} \quad (6-12)$$

ここで  $I_{\theta_p=0^\circ}$  および  $I_{\theta_p=45^\circ}$  の比をとり  $I_r$  とすれば

$$I_r = \frac{I_{\theta_p=0^\circ}}{I_{\theta_p=45^\circ}} = \tan^2 2\theta_0 \quad (6-13)$$

したがって  $\theta_p = 0$  および  $\theta_p = 45^\circ$  における強度を求めれば、式(6-13)から  $\theta_0$  が求まる。また  $\theta_0$  を式(6-11)または(6-12)に代入すれば、 $\delta$  すなわち  $\Delta n$  が求まる。なお Couette flow においては principal strain rate axis と stream line が  $45^\circ$  をなすから  $\theta_0 = \chi$  となす消光角  $\chi$  が求まる。

流動複屈折  $\Delta n$  については円偏光場において透過光強度  $I$  を測定して式(6-14)から  $\Delta n$  を求めてよい。

$$I = I_0 \sin^2 \frac{\delta}{2} \quad (6-14)$$

## 6 - 3 2次元流速分布測定例

2次元流の1例としてFig. 6-2に示す拡大角28°のflow cellを用いて拡大流の流速分布の測定を行なった。flow cellの製作法、材料、flow-cell scanning光電測光装置については第2編3-1に詳細に示す。

Fig. 6-3は流動複屈折によって、PVA 105 20%，CR 0.020%の水溶液を $Q = 0.021 \text{ cc/sec}$ で流した場合について可視化した流れ模様で、等傾線および等色線図である。Fig. 6-3において偏光子と中心線とのなす角 $\theta_p$ が $0^\circ$ 、 $45^\circ$ の等傾線および等色線においては中心線に対して左右対称の模様が得られたが、 $\theta_p = 22.5^\circ$ では中心線に対して非対称になっている。この現象はつきのように説明できる。

流体中の高分子の光学的主軸

は流動セルの中心線を軸対称として線対称をなしていると考えられる。従ってFig. 6-2の $\varphi$ 、 $\theta_p$ 、 $\theta_o$ の間の関係は中心線より左側の部分では

$$\varphi^L = \theta_o + \theta_p \quad (6-15)$$

右側の部分では

$$\varphi^R = \theta_o - \theta_p \quad (6-16)$$

である。

$L$ は中心線より左側、 $R$ は中心線より右側を示す。ここで、 $\theta_p = 0^\circ$ および $45^\circ$ の場合を

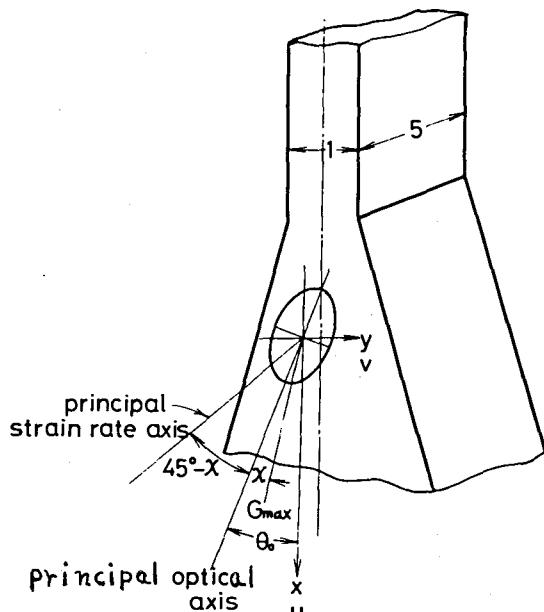


Fig. 6-2 拡大角28°のflow cellと各軸間の関係

を考えると、

$$\begin{aligned} I_0^L &= I_0 \sin^2 2\theta_0 \sin^2 \frac{\delta}{2} = I_0^R \\ I_{45}^L &= I_0 \sin^2 2(\theta_0 + 45^\circ) \sin^2 \frac{\delta}{2} \\ &= I_0 \sin^2 2\theta_0 \sin^2 \frac{\delta}{2} \\ I_{45}^R &= I_0 \sin^2 2(\theta_0 - 45^\circ) \sin^2 \frac{\delta}{2} \\ &= I_0 \cos^2 2\theta_0 \sin^2 \frac{\delta}{2} \end{aligned}$$

$$I_{45}^L = I_{45}^R$$

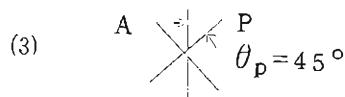
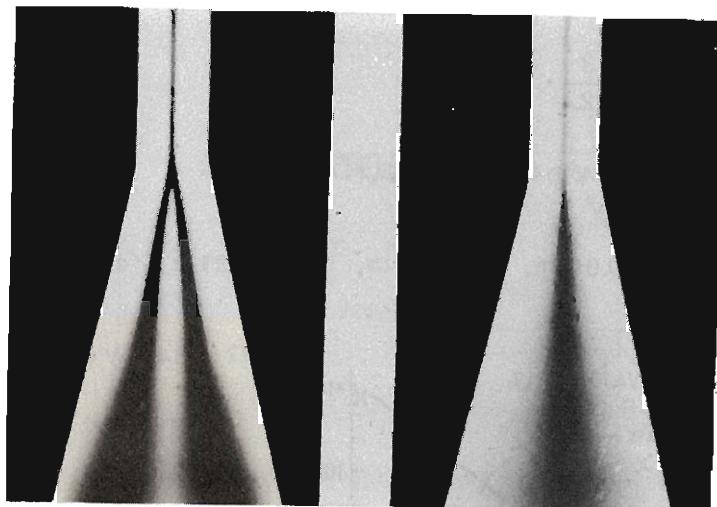
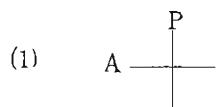
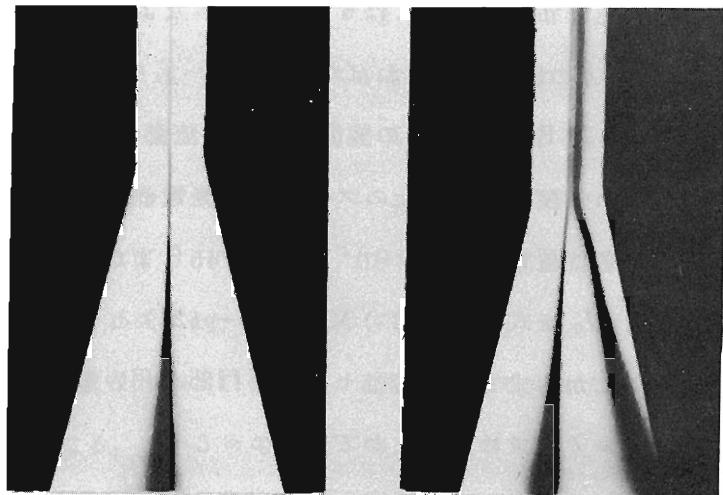
すなわち  $\theta_p = 0$  および  $45^\circ$  の場合には、中心線に関して対称な左右の点の光の強度は一致する。しかしこのことは  $\theta_p = 0$  および  $\theta_p = 45^\circ$  の時に限られる。例えば  $\theta_p = 22.5^\circ$  とすると

$$\begin{aligned} I_{22.5}^L &= I_0 \sin^2 2(\chi + 22.5^\circ) \sin^2 \frac{\delta}{2} \\ I_{22.5}^R &= I_0 \sin^2 2(\chi - 22.5^\circ) \sin^2 \frac{\delta}{2} \end{aligned}$$

となり

$$I_{22.5}^L \neq I_{22.5}^R$$

である。



(4)

Fig. 6-3 拡大角  $28^\circ$  流動セル中の等傾線および等色線

- |                           |                         |
|---------------------------|-------------------------|
| (1) $\theta_p = 0^\circ$  | $\theta_p = 22.5^\circ$ |
| (3) $\theta_p = 45^\circ$ | (4) 等 色 線               |

拡大流れの流速分布を求めるには 6-1 でのべたように式(6-1), (6-2) の  $G$  と  $\Delta n$ ,  $\chi$  の関係を求めねばならない。

このため 4-6 の Fig. 4-59 の装置を用いて流動セルを scan させ flow cell の各位置の強度を光電面上のスリットで光電測光する。直交偏光場において流動セルの各位置に対し  $I_{\theta=0^\circ}$ ,  $I_{\theta=45^\circ}$  または円偏光場で  $I$  の測定を行えば,  $\Delta n$ ,  $\theta_0$  を式(6-13) 又は(6-12) と (6-13),  $\Delta n$  については式(6-14) から求まる。流動セルの平行部を用いると Poiseulle flow となり  $\theta_0 = \chi$  を求めることができる。

解析に必要な流量  $Q$  は、一定時間内に流出する流量をメスシリンドーにて測定することにより求めた。流量  $Q$  と速度勾配  $G$  との間には流動セルの軸の中心を  $y = 0$  とすると次の関係が成立する。

$$G = \frac{3}{2} \cdot \frac{Q}{b^2 d} \cdot y \quad (6-8)$$

$b$  : セルの幅       $d$  : 試料の厚み

$b = 0.05 \text{ cm}$ ,  $d = 0.5 \text{ cm}$ ,  $Q = 0.021 \text{ cc/sec}$  では

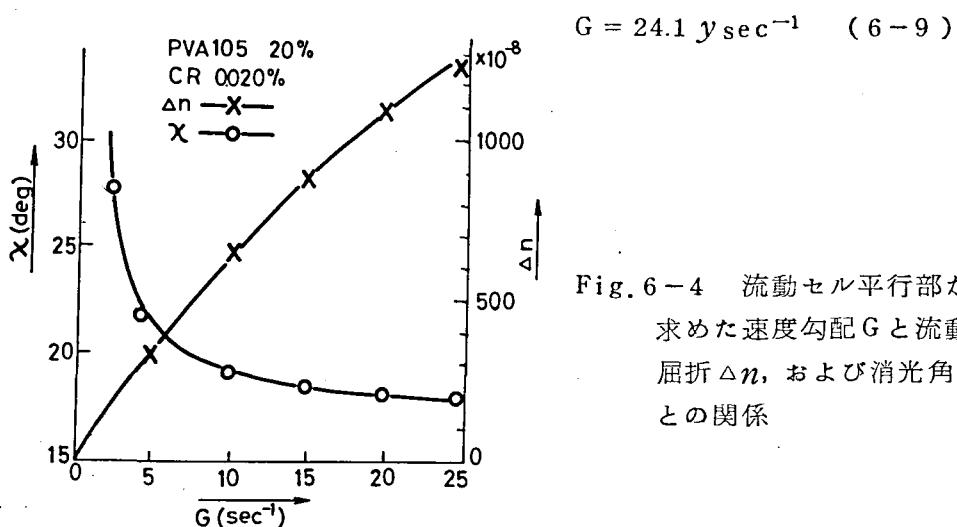


Fig. 6-4 流動セル平行部から求めた速度勾配  $G$  と流動複屈折  $\Delta n$ , および消光角  $\chi$  との関係

この  $G$  と  $\Delta n$ ,  $\chi$  の関係を求めた結果を Fig. 6-4 に示す。

Fig. 6-4 を用いて 6-1 で述べた方法により拡大角  $28^\circ$  の flow cell の最大速度勾配の方向  $\theta_0 - \chi$  および最大速度勾配  $G_{\max}$  が求まる。流動セルの 2ヶ所で求めた結果を Fig. 6-5 に示す。

次に Fig. 6-5 を積分して 6-1 で述べた方法により求めた  $x$  軸方向および  $y$  軸方向の速度  $u$  および  $v$  を Fig. 6-6 に示す。

流動セルの実際の流量と position 2, 3 を積分して求めた流量を比較すると Table 6-1 のようになる。9 ~ 5 % の誤差があるがこれは測定中の加圧変化によるものと思われる。

Stream line については、流速を積分して求めた流れ関数の一定のところをつらねた結果を Fig. 6-7 に示す。理論の stream line とよく一致している。

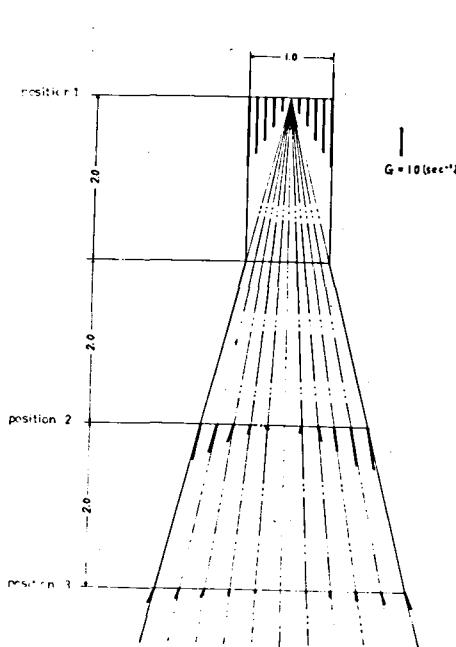


Fig. 6-5 拡大角  $28^\circ$  の流動セル中の  
最大速度勾配とその方向

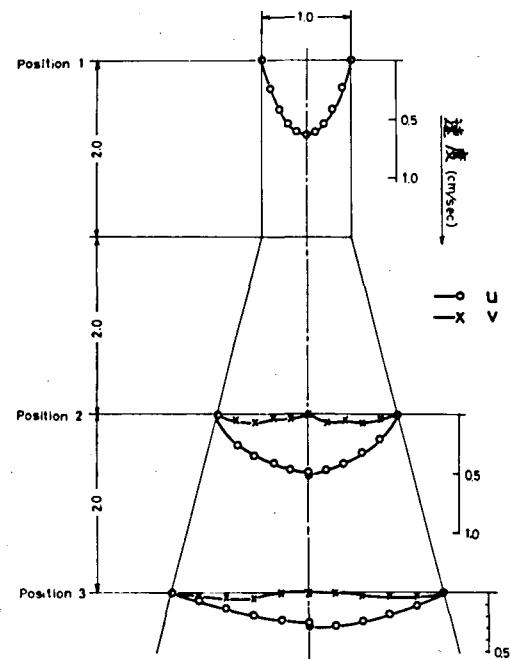


Fig. 6-6 拡大角  $28^\circ$  の流動セル  
中の 2 次元流速分布

Table 6-1 実際の流量と測定値

より求めた流量の比較		
単位 cc/sec		
実際の流量	position 2	position 3
0.021	0.023	0.022

以上により高感度流体材料を用いることにより、2次元流速分布および stream line を求めることができることを示した。

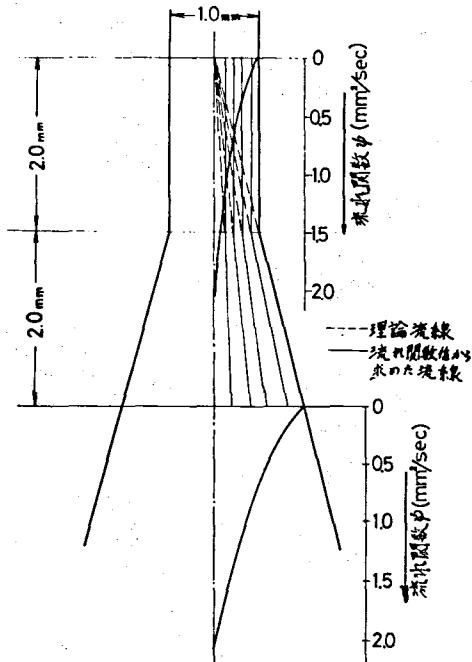


Fig. 6-7 拡大角  $28^\circ$  の流動セル  
中の stream line

#### 6-4 流れの可視化例

高感度流体材料を用いると、きわめて明るい流動複屈折パターンが得られ、流れの可視化を簡便に行うことができる。流動複屈折  $\Delta n$  は最大速度勾配すなわち流速の微分値を示す。特に流れの曲がり等は流速のちがいによって起るので、その微分値が問題となる。これを明瞭に可視化できる。第2編第3章での空気式純流体素子の応用例と同じように、1例として高感度モデル材料を用いて層流形のボルテックス形純流体素子の主噴流と制御流の混合流の流れを可視化した結果を Fig. 6-8 に示す。主噴流みぞ幅 2mm, 厚み 10mm, Re (レイノルズ数) = 1, 制御流量 / 主噴流量 = 1/4, 試料 PVA 13%, CR 0.050 %,  $\eta = 1$  poise, 平行部での主噴流  $G_{max} = 300 \text{ sec}^{-1}$  である上部に滞流

をみることができ、主噴流の曲

げられる様子をみることもできる。なお高レイノルズ数における実験について今後の問題が残されている。

液体における純流体素子においては、その用途が広いにかゝわらず、まだ十分研究されておらずこの方面への応用が今後期待できる。

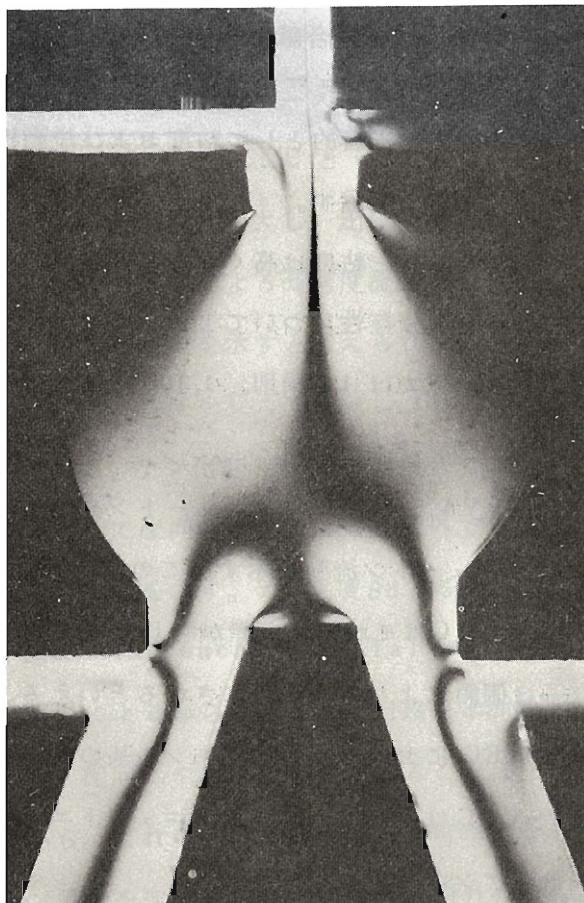


Fig. 6-8 ポルテックス形

純流体素子の流动複屈折パターン、直交偏光場で偏光子の方向は主噴流の方向と平行

## 第7章 総括

流動変形状態に対する分子構造の影響を調べ、ニュートニアンで水溶性、高感度の流動複屈折モデル材料を開発することを主目的として粘度および流動複屈折について実験を行なった結果を次に要約して示す。

(1) a 一般に溶液の重合度、濃度が高くなるほど粘度は高くなり、非ニュートン流動を示すようになる。粘度の重合度依存性について1例としてPVAにおいて調べた結果、重合度1,300以下では1.8乗則、1,300以上では3.4乗則が成立している。

また実験に用いた試料のうち、PVA、HECはほゞニュートン流動を示し、PVP、Na-CMCは顕著な非ニュートン流動を示す。このことは、PVAとPVP、およびNa-CMCとHECはそれぞれ主鎖が同じで側鎖が違っていることから、流動の様子は側鎖により大きく左右されるといえる。ニュートニアンであるPVAとHECにおいてはヒドロキシル基の側鎖を有する点で一致している。Na-CMCは低速度勾配でノンニュートニアンであるが高速度勾配でニュートニアンである。

b PVAにおいては側鎖につく酢酸基の量が多くなるほど粘度が低くなるのは、酢酸基が分子内水素結合を切断するため主鎖の屈曲性がよくなるためと考えられる。またNa-CMCにおいては、エーテル化度が大きくなるほど粘度が高くなるが、これは他の結合力よりも電気的クーロン引力が分子間相互作用に大きく影響するためであると考えられる。

(2) 一義的な流動複屈折感度である応力光係数と分子構造の関係をみるため、水溶性高分子の重合度、主鎖、側鎖の種類、濃度をかえて流動複屈折を測定した。一般に重合度、濃度は応力光係数にあまり影響をおよぼさない。また

PVA-PVP, Na-CMC と HEC のように主鎖が同じで、側鎖が異なるものを比較すると、今の場合主として主鎖が応力光係数に影響を与えており、ビニル鎖よりもセルロース鎖の分極率の異方性が高いためである。セルロース鎖を有する Na-CMC と HEC については、側鎖のエーテル化度の増大により応力光係数は増大し、比較的流動複屈折感度はよい。

(3) 分光的方法による高感度流動複屈折材料の開発と関連して負の消光角を示し、高配向性を示すと考えられる、ニュートン性を示す PVA について重合度、ケン化度を変えて実験し、分子レオロジー的に考察した結果は次のようにある。ケン化度 98.8% で低重合では消光角は大きく変化し、重合度 100～1,300 で配向しやすく、これ以外では配向しにくい。重合度 500 程度において最大点を示す。ケン化度 88.8% では配向しにくい。これについては、OH 基の hindrance potential が  $\text{OCOCH}_3$  基のそれより小さいこと、分子間力によるからみあい、位相幾可学的もつれが分子配向に関係する。すなわち、配向しやすい重合度があることは、マクロプラウン運動は配向を妨げるから、これにうちかって位相幾可学的なもつれをほぐすには、マクロプラウン運動を拘束する或程度の分子間力のからみあいとし、それには適当な重合度が必要である。

(4) 高感度流動複屈折材料を得るため高配向性物質と大きな異方性をもった物質を結合させることによって感度を上昇させることができるのでないかという予測のもとに実験考察を進めていった。

(a) 異方性の大きい物質として分光的に考えて可視域に顕著な吸収帯と 2 色性を示す物質は吸収帯から少しつぶれた所で屈折率の異方性も大きいと考えて、CR を高配向性物質 PVA 105 に吸着させた所、0.020%～0.100% を加えると 30～100 倍程度応力光係数は増大し、最高の応力光係数を示

し、Na-CMCにくらべて10倍程度高くなる。

- (b) ここでCRの濃度と応力光係数の関係を調べた。CR濃度の増加によって応力光係数は増大するが、それについて光の透過率が下がるので、応力光係数と透過率のかねあいから、CRの濃度は0.020%~0.100%が適当であることを示した。
- (c) つぎに応力光係数の波長分散を調べたところ波長が短かくなるにつれて応力光係数が増加することがわかったが、これもCRの吸収が535m $\mu$ 付近で最大となるので、応力光係数と吸収のかねあわせから測定波長は605~626m $\mu$ を使うと良いことを知った。
- (d) PVA濃度に対する応力光係数は20%濃度において最大となる。低濃度ではPVAとCRの結合が弱くなり、高濃度ではPVAの分子のからみあいが大きくなりPVAは配向しにくくなるため応力光係数は低くなる。
- (e) PVA重合度に対する応力光係数は重合度500程度が最大となる。

- (5) PVA105において観測された負の消光角がCouette flowという特殊な速度勾配の与え方をした場合にだけ存在するものかどうかを検討するため平行セルを用いたPoiseulle flowにおいて観測した結果、この場合にもやはり負の消光角が観測できた。一般に単純剪断力を与えた時、消光角 $\chi$ は45°から0°の間にあるのでPVAは光学的に負の消光角をもつ、すなわちPVAの場合には粒子の幾何学的な主軸方向と光学的な主軸方向が一致していないと考えた。

速度勾配が小さい間は、主鎖の配向が少ないのでその影響はあらわれず、速度勾配が大きくなつてPVAの主鎖が直線状になってくると、粒子の主軸方向と屈折率楕円体の主軸方向とのずれが影響を与えるためであると解釈した。完全に伸びたPVAにおいてはOH基は主鎖に対してある角度をなして

おり、この分極率の異方性は他の基よりも大きいので、PVA の立体規則性について isotactic 部分が多ければ消光角は負になると考えられる。CR を吸着させた場合負にならないのはコンゴーレッドが主鎖に平行につくためと考えられる。

- (6) 分子の変形状態と複屈折  $\Delta n$  と消光角  $\chi$  の 3 者の関係を調べるためにポーラーダイヤグラムにより比較してみた。PVA に CR を加えた水溶液では剛体粒子と同じようなポーラーダイヤグラムになり、速度勾配 G に流動複屈折  $\Delta n$  が対応していると考えてよい。Na-CMC については低速度勾配では PVA-CR 水溶液と同じように配向によって複屈折  $\Delta n$  は生じるが、高速度勾配になると変形によって複屈折  $\Delta n$  は生じる。この場合は速度勾配 G に対して  $\Delta n \sin 2\chi$  が対応する。
- (7) 流動複屈折の緩和時間測定装置を試作して緩和時間を測定し、その適用範囲を示した。
- (8) 得られた高感度流動複屈折材料 PVA-CR 水溶液を用いて、2 次元流の速度分布の測定に応用した所、精度よく測定できることが解った。



## 第2編 流動2色性法による流体計測

### 第1章 緒 言

本研究は主として吸収の異方性（2色性）を観測手段として高分子の流動変形状態を測定する装置および流動2色性を用いて流体計測を行う方法、流動2色性材料について検討を加える。

2色性は Bitot が 1815 年電気石の研究中に発見した。以後 2 色性偏光子と (55) して Land 等が利用して以来これに関する多くの研究がなされている。また最近結晶性高分子の変形を研究する上に重要な問題として結晶と非晶領域の配列過程を分離考察することがあるが、その非晶領域の配列を求める手法として赤外非晶バンドの (50) 2 色性と可視 2 色性 (57), (58) を測定する方法が用いられてきた。流動 2 色性については分子の形状を決定するために測定された例はあるが、実験装置に次のような問題がある。従来の流動 2 色性装置として Cavarieli (59) 等が紫外部の 2 色性を、あるいは Bird (54) らが赤外 2 色性を測定する際に用いたものは平行平面板流動セルに圧力を加えて流し、Poiseulle flow により生じた吸収率橙円の平均値を測定している。また和田、小沢 (61) らは流動複屈折法に用いられてきた回転 2 重円筒の間に溶液を入れ、Couette flow により生じた吸収率橙円を光の入射方向の投影として観察している。これ等はいずれも吸収率橙円の主軸の大きさとその方向について測定できない。また流動 2 色性の流体計測への応用については類をみない。

流動 2 色性法は流動複屈折法と同じく、光学的異方性を有する分子が流れによって、その分子の中の原子団や残基とよばれる構造要素がどのような配置と配向をとるかに関して直接的に知る方法である。前者は吸収率異方性を、後者

は屈折率異方性を利用する点で異っている。流動2色性法は流動複屈折法にくらべて吸収帯のある所で顕著な吸収の異方性を示すので構造要素そのもの挙動を知ることができ、光学要素として $1/4$ 波長板や検光子を必要とせず偏光子1枚により測定でき装置が簡便で各波長に対する測定も容易におこなえる。特に流動2色性によると自然光に対しても流れの吸収率変化を生じ、簡便に流れの可視化を行え、その光学厚み変化に対して Lambert-Beer Law が成立し、透過強度は指数函数的に変化するので特に狭い管中の流体計測に有利である。

本研究では流れの可視化のために可視の波長領域において吸収の異方性を示すものについて実験を行なう。

第2章では、任意の3方向(本研究においては $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ )の電気ベクトルを持つ偏光を用いて吸収率橈円の光学主軸方向、流動2色性を測定する方法、<sup>(41),(42)</sup>また流動2色性を流体計測へ応用する方法等についてのべる。

第3章では流動2色性の測定およびこれを流体計測へ応用するために、第2章の原理にもとづき新しく flow cell scanning type の装置を試作し<sup>(42)</sup>、これを従来の装置と比較する。

第4章では試料ポリビニアルコール(PVA)、コンゴーレッド(CR)およびその調製についてのべる。

第5章では各種試料について上記の装置を用いて測定した流動2色性に対するPVA重合度、濃度効果、CR濃度効果についての実験結果を示す。その結果について分子構造と流れの配向挙動との関連について考察する。また流動2色性により2次元流の速度分布解析をおこなえることを示す。

## 第2章 流動2色性の理論および方法

本章では流動2色性の理論および方法について述べる。2-1では、2色性、流動2色性の原理、理論について述べ、さらに、流動2色性による流体計測の原理について述べる。2-2では流動2色性の測定方法について、本研究において試作した方法と従来の方法を比較しながら述べる。

### 2-1 2色性の理論

均一な物質でもある場合には光学的な異方性を有し、特に吸収の異方性を2色性（多色性）という。ある2色性物体に直線偏光をあて、入射光線の振動方向と伝播方向を連続的に変化させると吸収率が変化し、これを最も簡単に表わしたもののが、吸収率橙円体（absorption indicatrix）である。Fig. 2-1に示す吸収率橙円体において、ある入射光線に対する吸収率は、橙円体の中心を通り、入射光線に垂直

直な平面で切った場合の曲線上にあり、入射光線の電気ベクトルの方向によって曲線上の点をとる。一般に、これらの切断面は橙円であるが、特別な場合には、円となり、この場合の入射光線方向を単

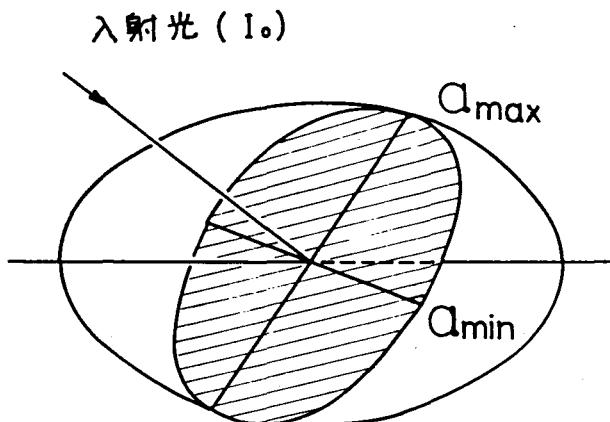


Fig. 2-1 吸収率橙円体

色軸と呼ぶ。

平面内の2色性を考える場合には、吸収率楕円体の入射光線方向にたゞ1つの面を考えればよい。

ここで、透過率 $T$ 、吸収率 $a$ 、吸収係数 $A$ を定量的に表現してみると、

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (2-1)$$

$$a = -\log_{10} \frac{I}{I_0} \quad (2-2)$$

$$A = -\frac{1}{L} \log_{10} \frac{I}{I_0} \quad (2-3)$$

で表わされる。但し、 $I_0$ =入射光強度、 $I$ =透過光強度、 $L$ =光路長さである。

平面内の2色性 $\Delta\varepsilon$ は吸収率楕円の長軸 $a_{\max}$ と短軸 $a_{\min}$ との差で定義され、式(2-4)で表現できる。

$$\Delta\varepsilon = a_{\max} - a_{\min}$$

$$= \log_{10} \frac{I_{\max}}{I_{\min}} \quad (2-4)$$

但し、 $I_{\max}$ 、 $I_{\min}$ は吸収率楕円の長軸および短軸方向の透過光強度である。

式(2-4)で表現される2色性 $\Delta\varepsilon$ は、透過光強度の絶対量を測定する必要はなく、相対的な強度の測定で求めることができる。

式(2-4)で示した2色性 $\Delta\varepsilon$ は分子鎖の配向と対応し、3次元の吸収率楕円体を考えて、2色比 $D$ を式(2-5)のように定義し $(D-1)/(D+2)$ をとると $(D-1)/(D+2)$ は式(2-6)のように与えられる。

$$D = \frac{a_{\max}}{a_{\min}} \quad (2-5)$$

$$\frac{D-1}{D+2} = f \cdot f_{D_{ye}} \cdot f_\theta = f_D \quad (2-6)$$

ここで  $f$  は配向関数,  $f_{D_{ye}}$  は染料自身の  $f_D$  の値であり,  $f_\theta$  は分子鎖と染料分子の光学軸とのなす角を  $\theta$  とした時

$$f_\theta = \frac{1}{2}(3 \cos^2 \theta - 1) \quad (2-7)$$

で与えられる。

いま完全に配向した場合を考えると  $f = 1$  であるので

$$f_D = f_{D_{ye}} \cdot \frac{1}{2}(3 \cos^2 \theta - 1) \quad (2-8)$$

で与えられる。このことは、染料自身の  $f_{D_{ye}}$  を知り、分子鎖が完全に配向した状態を考えると、 $f_D$  の値を測定することにより  $\theta$  を算出することができる。

### 2-1-1 流動2色性の原理

流動2色性の場合には2色性微分子を溶液中に溶かし、統計的にみた全体としての2色性を考える。2色性微分子がランダムに存在している場合には、全体としての異方性ではなく、微分子が統計的に配向することにより2色性が生じてくる。このため流動2色性においては流れの速度勾配により分子が配向することにより2色性を生じる。流れによる速度勾配と流動2色性との関係は実験から求められるが、形式的に表現すると式(2-9)のようになる。

$$G = f(\Delta \varepsilon) \text{ または } \Delta \varepsilon = f^{-1}(G) \quad (2-9)$$

いま流れを(i)非圧縮性流れ、(ii)定常な層流、(iii)2次元流、(iv)Newtonian溶液と仮定し、Fig. 2-2に示す様な平行平板内の流れを考える。Fig. 2-2に

おいて  $y$  方向の流速  $v$  は壁面の流速を零と考えれば

$$v = \int_{-\frac{b}{2}}^x G dx \quad (2-10)$$

で与えられる。また流量については管の巾を  $b$  厚さを  $W$  とすれば

$$Q = \frac{1}{6} W b^2 \quad (2-11)$$

で表わすことができる。この関係を用いれば任意の点  $x$  における速度勾配は

$$G = \frac{12 Q}{W b^3} x \quad (2-12)$$

で与えられ、流量  $Q$  を測定することにより任意の点  $x$  における速度勾配を求めることできる。

一方流動 2 色性  $\Delta \varepsilon$  は、任意の点  $x$  で偏光子を回転し透過光強度曲線を描くことによって、その長軸と短軸とから式 (2-4) に従って算出することができる。以上の方法によって流動 2 色性と速度勾配の関係式 (2-9) を求めることができる。また同時に、流線方向と吸収率橙円の光学軸とのなす角 (消光角  $\chi_D$ ) についても式 (2-15) の関係を求めることができ、これは次節で述べるように 2 次元流の最大速度勾配  $G$  の方向を知るために必要である。

$$\chi_D = F(G) \quad (2-13)$$

Non-Newtonian の場合には粘度  $\eta$  は速度勾配  $G$  の関数であり、このため Fig. 2-2 において式 (2-12) において速度勾配を求めることはできない。

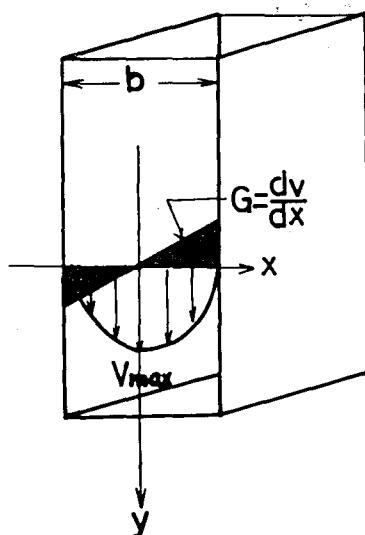


Fig. 2-2 平行平板内の流れ

しかしせん断応力  $\tau_{xy}$  は、Y 方向の圧力差  $\Delta P$ 、Y 方向の長さ  $H$  とすれば、 $x$  の位置では

$$\tau_{xy} = \frac{\Delta P}{2H} \cdot x \quad (2-14)$$

で与えられ、この関係は Non-Newtonian 溶液についても成立する。ここで、圧力差  $\Delta P$  を測定する一方、粘度測定により、 $\eta$  と  $\tau_{xy}$  および  $G_{xy}$  との関係式 (2-15) を求めておけば  $x$  の位置での速度勾配  $G$  は式 (2-16) から求めることができる。

$$\eta = \eta_1(\tau_{xy}), \eta = \eta_2(G_{xy}) \quad (2-15)$$

$$G = \frac{\tau_{xy}}{\eta_2(G)} \\ = \left( \frac{\Delta P}{2H} \cdot x \right) / \eta_1 \left( \frac{\Delta P}{2H} \cdot x \right) \quad (2-16)$$

この値を用いて Non-Newtonian の場合の  $\Delta \varepsilon$  と  $G$  との関係  $\varphi$  を求めることができる。

$$G = \frac{1}{\eta_2(G)} \varphi(\Delta \varepsilon) \quad (2-17)$$

## 2-1-2 流動2色性による流体計測

流動2色性による2次元流の解析を行う場合には、あらかじめ式 (2-9), (2-13) の関係を求めておかなければならぬ。これらの関係を用いて平面内の各点 ( $x, y$ ) における流動2色性  $\Delta \varepsilon$  および座標軸と光学主軸のなす角  $\theta_0$  を測定することにより2次元流の流速分布を求めることができる。

Fig. 2-3 は principal strain rate axis と光学主軸との角度の関係を

示す。 $\Delta \varepsilon$  が実験から求まるとあらかじめ求めておいた  $G = f(\Delta \varepsilon)$ ,  $\chi = F(G)$  を使って  $G$ ,  $\chi$  が求まる。また実験から reference axis と光学軸のなす角  $\theta_0$  を求めて、 $G$ ,  $\chi$ ,  $\theta_0$  の値を式(2-20), (2-21)に代入し、積分することにより、流速  $u$ ,  $v$  を求めることができる。

$$\begin{aligned} e_{xy} &= \frac{\partial v}{\partial y} = -e_{xy} \\ &= \frac{G}{2} \cos(45^\circ - \chi + \theta_0) \end{aligned} \quad (2-18)$$

$$\begin{aligned} e_{xy} = e_{yx} &= \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right] \\ &= \frac{G}{2} \sin(45^\circ - \chi + \theta_0) \end{aligned} \quad (2-19)$$

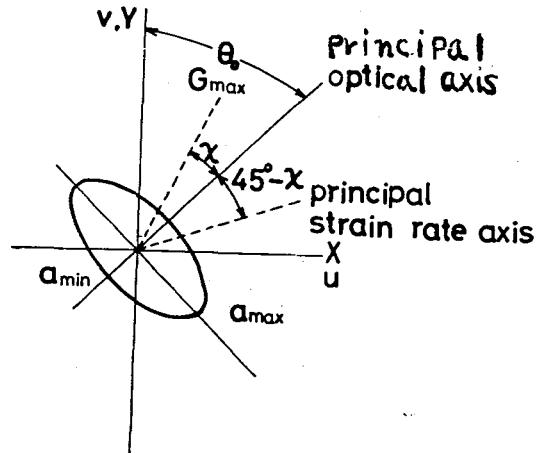


Fig. 2-3 Reference axis  
と各軸との角度の関係

$$\frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{G}{2} \sin 2(\chi - \theta_0)$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} = G \cos 2(\chi - \theta_0) \quad (2-20)$$

## 2-2 流動2色性の測定方法

本研究においては、流動2色性を流体計測に応用するために、flow cell scanning type の流動2色性測定装置を開発した。従来より流動2色性は高分子の配向など物性的な研究に用いられていたが、その測定装置自体についても、問題があり本節ではこれらを比較して述べる。

## 2-2-1 従来の流動2色性測定装置

従来の測定装置としては Fig. 2-4 に示すような (a) Couette type (b) flow cell type などがある。

Couette type は透明2重円筒の間に溶液を入れ、内筒を回転し、溶液に速度勾配を与えるもので、半径方向には速度勾配は一定となる特徴がある。また速度勾配の算出は内筒の回転数より計算する。光の入射方向を、Fig. 2-4 (a) に示すとく、Y 方向とすると、吸収率橙円体の X 方向への

投影を測定することになり、光の入射方向を Z 方向にするとメニカスの影響により、観測が不可能となる。

また、Fig. 2-4 (b) の flow cell type においては、速度勾配は Y-Z 面で変化しているが、観測を Y 方向にするために Y-Z 面での変化は観測できなく、X-Z 面で平均を観測することになる。

## 2-2-2 本研究における流動2色性測定方法

従来の流動2色性測定方法においては、いずれも面内での速度勾配は一定と考えているため、面内で速度勾配が変化している場合には用いることはできない

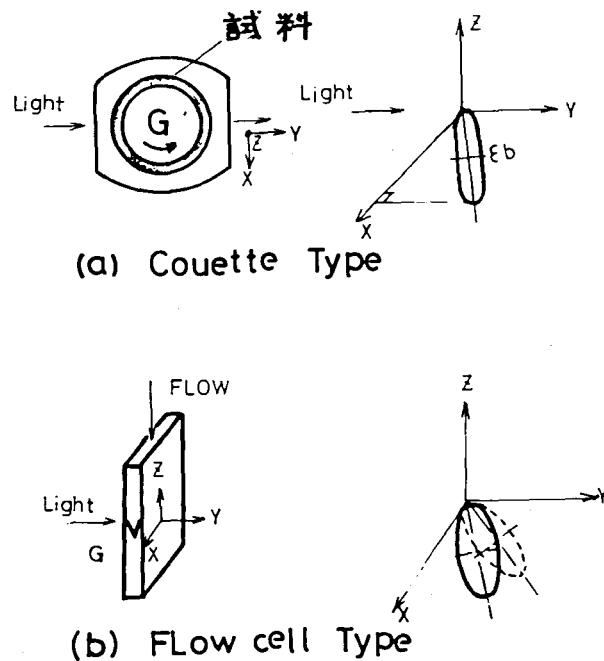


Fig. 2-4 従来の流動2色性測定装置

い。

本研究においては平面内の任意の点( $x, y$ )における流動2色性を観測するため、各点において偏光子を回転させて透過率曲線を描き、光学軸の方向と式(2-4)により流動2色性( $\Delta\varepsilon$ )を求めることができる。

Fig. 2-5 (a)に示すような吸収率楕円に、座標軸と $\theta_P$ なる角度の電気ベクトル $E$ を持つ偏光を入射した場合の透過率 $T_{\theta_P}$ はMalusの法則により

$$T_{\theta_P} = T_{\max} \cos^2(\theta_0 - \theta_P) + T_{\min} \sin^2(\theta_0 - \theta_P)$$

(2-21)

なるまゆ形曲線で与えられる。

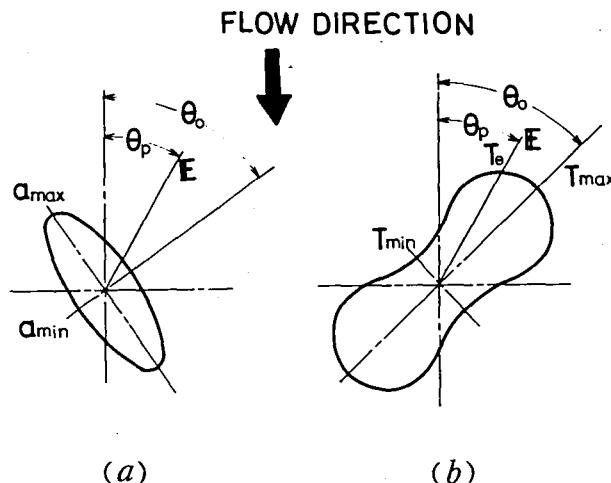


Fig. 2-5 吸収率楕円(a)と透過率曲線(b)の各軸の関係

式(2-21)において、 $T_{\max}$ 、 $T_{\min}$ 、 $\theta_0$ が求めようとする値であるから、 $\theta_P$ について3種類の $T_{\theta_P}$ を測定し、それら3個の測定値より、 $T_{\max}$ 、 $T_{\min}$ 、 $\theta_0$ を算出することができる。

本実験の場合には、 $\theta_P = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  の場合の透過率、すなわち、 $T_0, T_{45}, T_{90}$  の値より、 $T_{\max}, T_{\min}, \theta_0$  を求めた。これ等の関係を式(2-22), (2-23)に示す。

$$T_{\max} = \frac{1}{2} [(T_0 + T_{90}) + \sqrt{(T_0 + T_{90})^2 + \{2T_{45} - (T_0 + T_{90})\}^2}] \quad (2-22)$$

$$T_{\min} = \frac{1}{2} [T_0 + T_{90} - \sqrt{(T_0 - T_{90})^2 + \{2T_{45} - (T_0 + T_{90})\}^2}]$$

$$\tan 2\theta_0 = \frac{2T_{45} - (T_0 + T_{90})}{T_0 - T_{90}} \quad (2-23)$$

以上の関係から、平面内の流動2色性および光学主軸方向を求めるには、偏光子の角度  $\theta_P = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  の場合についての透過率  $T_0, T_{45}, T_{90}$  を測定することにより式(2-22), (2-23)を用いて  $T_{\max}, T_{\min}, \theta_0$  を求めることができる。このことに着目して、本研究においては、平面内の流動2色性を求めるには、各点において、偏光子を回転することなく、 $\theta_P = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  に固定しておき、平面内を scanning し、各々の角度における透過率を記録することにより、能率的におこなうことができる。

また自然光においては、透過率  $T_N$  は式(2-24)で表わされる。

$$\begin{aligned} T_N &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} T_{\theta P} \cdot d\theta_P \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \{T_{\max} \cos^2(\theta_0 - \theta_P) + T_{\min} \sin^2(\theta_0 - \theta_P)\} d\theta_P \\ &= (T_{\max} + T_{\min})/2 \end{aligned} \quad (2-24)$$

## 第3章 実験装置および実験方法

本研究で試作したscanning形の流動2色性測定装置およびその実験方法について以下に述べる。

### 3-1 流動2色性測定装置

2-2-2節に示した流動2色性法の測定原理に従ってFig. 3-1に示す装置を作成した。Fig. 3-2はこの装置のブロック線図を示す。この装置の主なるものは、(1)光学系、(2)流動セルおよび加圧装置、(3)流動セル送り装置(scanning装置)、(4)光電子増倍管および記録部より成り立っている。

本実験に使用した光の波長 $\lambda$ は試料に対して流動2色性の最も大きい5461 Åを使用した。平面偏光場をうるために偏光子を用いた。流動セル送り装置を用いて試料の流れている流動セルを水平方向に送り、位置の信号をX-YレコーダーのX部に送る。各X点での透過光強度を光電子増倍管により電気信号に変え、さらに暗電流補正および直流増幅した後X-YレコーダーのY部に透過光強度を記録した。入射光強度を測定することにより透過率を求め、これらのデータを式(2-22)、(2-23)、(2-4)に代入し流動2色性 $A\varepsilon$ 、光学主軸方向 $\theta_0$ を、また式(2-6)に従い配向度 $f_D$ を、電子計算機(NEAC 2206)を用いて計算した。入射光強度はセル支持台の位置に減光板(オパールグラス透過率1.2%)を置くことにより測定した。また流量の測定はメスシリンダーとストップウォッチにて行なった。

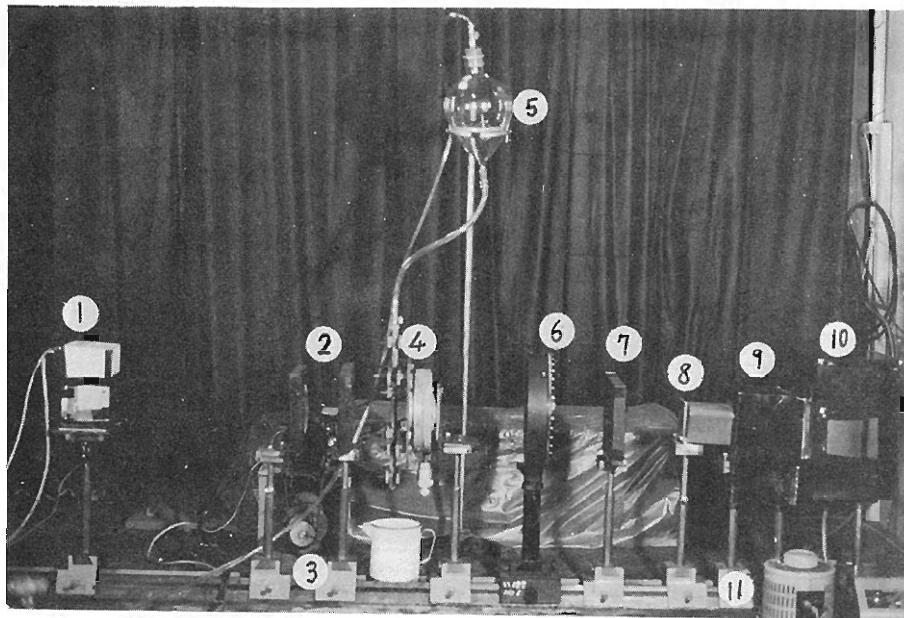


Fig. 3-1 (a) 流動 2 色性測定装置光学系

- 1 : 光電子増倍管
- 2 : プロジェクションレンズ  $C_2$
- 3 : モーター
- 4 : セル支持台
- 5 : 試料容器
- 6 : 偏光子
- 7 : コリメーターレンズ
- 8 : スリット  $S_1$
- 9 : フィルター, コンデンサーレンズ
- 10 : 光源
- 11 : スライダック

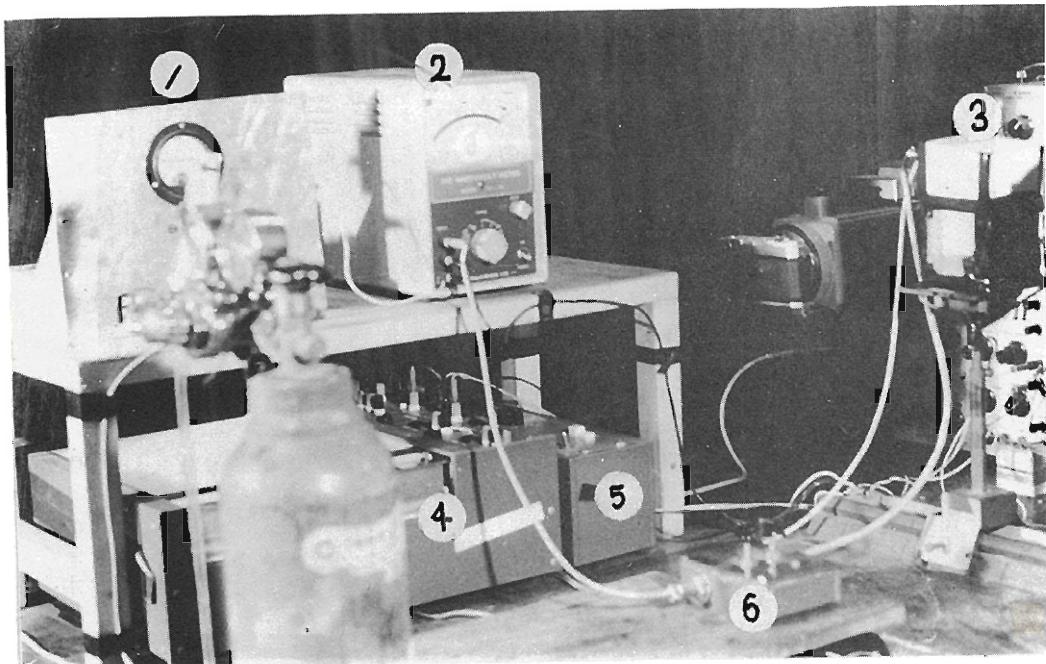


Fig. 3-1 (b) 流動 2 色性測定装置, (光電子増倍管および記録系)

1 : 高圧直流電源

2 : 直流電圧増幅器

3 : 光電子増倍管

4 :  $X-Y$  レコーダー

5 : 分圧器 ( $X-Y$  レコーダー用)

6 : 暗電流補正器

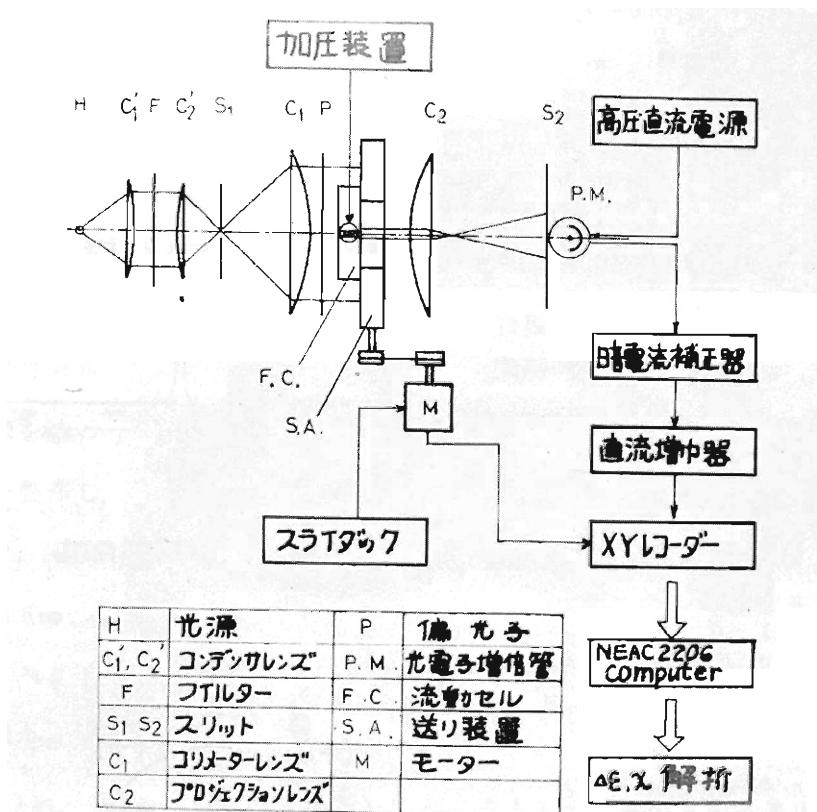


Fig. 3-2 流動 2 色性測定装置ブロックダイヤグラム

### 3-1-1 流動 2 色性測定装置の光学系

流動 2 色性測定装置の光源  $H$  は超高压水銀灯（紫外用，SHL-100 UV-2 形，東京芝浦電気製）を使用した。この光源のスペクトル強度を Fig. 3-3 に示す。

フィルター  $F$  は、干渉フィルターで波長  $546 \text{ m}\mu$ ，透過率の最大  $74\%$ ，半値巾  $22 \text{ m}\mu$  である。Fig. 3-4 にこのフィルターの透過率曲線を示す。この波

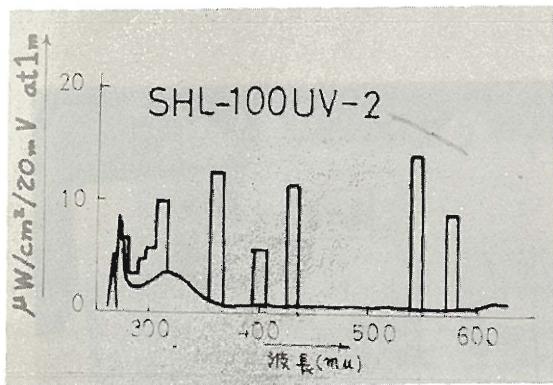


Fig. 3-3 超高圧水銀灯  
のスペクトル強度

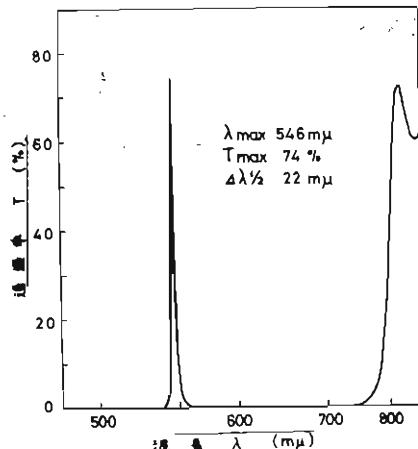


Fig. 3-4 フィルターの  
透過率曲線

長は第4章で述べる様に、試料に対する流動2色性が最大となる。スリット $S_1$ は直径2mmの円形である。光源を出た光はフィルター $F$ で単色光となりスリット $S_1$ とコリメーターレンズ $C_2$ により平行光線にされる。偏光子 $P$ を通過することにより任意の方向の電気ベクトルを持つ平面偏光となる。偏光方向 $\theta_P$ はFig. 3-5に示すように、鉛直方向(座標軸方向)を基準にして光線が紙面の裏より表へ進んでいる場合、反時計方向へ計る。試料を通った光はプロジェクションレンズ $C_2$ により光電子増倍管上のスリット $S_2$ 面上に約3倍の像を作る。

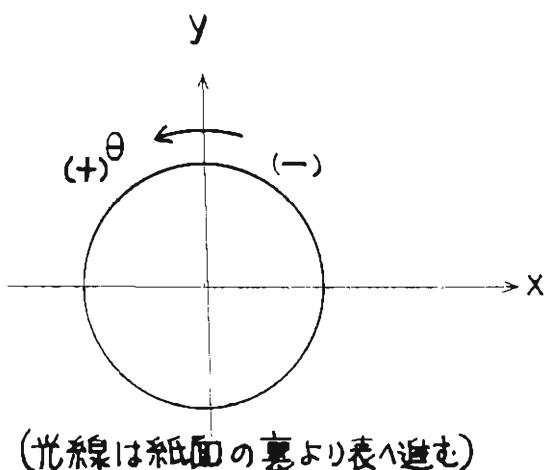


Fig. 3-5 角度の表示

スリット  $S_2$  は分解能と光量を増すために  $6.7 \text{ mm} \times 40 \mu$  の長方形とした。これにより溝の巾  $1 \text{ mm}$  の流動セルでは  $1/70$  の分解能が得られる。またスリットの方向は鉛直方向に設置しておき流動セルの方向と一致させた。2次元流の速度分布の解析の場合には、スリット  $S_2$  は直径  $30 \mu$  の円形とした。

### 3-1-2 流動セルおよび加圧装置

本実験においては、平行セル（平行溝を持つセル）を作成し、使用した。セルの厚みは  $5 \text{ mm}$ 、巾はアスペクト比の影響を見る

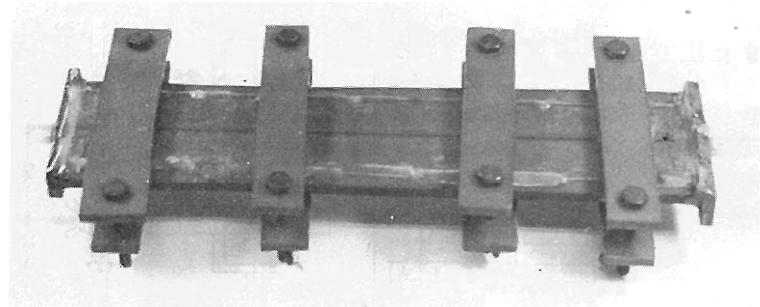


Fig. 3-6 平行セル

ために、 $1 \text{ mm}$ 、 $1.5 \text{ mm}$ 、 $3 \text{ mm}$  の 3 種類を作り、主として  $1 \text{ mm}$  のものを使用した。Fig. 3-6 に平行セルの写真および Fig. 3-7 に形状寸法を示す。流体を 2 次元流とみなすためには、アスペクト比が十分大きくなければならない。Fig. 3-8 に流動 2 色性  $\Delta \epsilon$  および消光角  $\chi$  におけるアスペクト比の影響を示す。このグラフよりアスペクト比が 3 以上では 2 次元流とみなせることがわかる。また Fig. 3-9 に示すような末広がりセルを作製し、2 次元流速分布の解析に用いた。Fig. 3-10 は末広がりセルの形状および寸法を示す。

なお流動セルの側壁は厚さ  $5 \text{ mm}$  のベークライト板にて、#06 のサンドペーパーを用いて仕上げた。表面あらさは約  $3 \mu$  ( $H_{\max}$ ) である。2 枚のガラス板は汚れのないものを選びアルダイトを用いてベークライト板に接着した。圧力に

よる液もれがないようにガラス両面を2枚のベークライトの板でしめつけた。溶液試料に圧力をかけて流すために圧縮窒素ガスを用いた。

Fig. 3-11 に圧力計、窒素ポンベの写真を示す。

また圧力を精度よく測定する場合には水銀マノメーターを用いた。

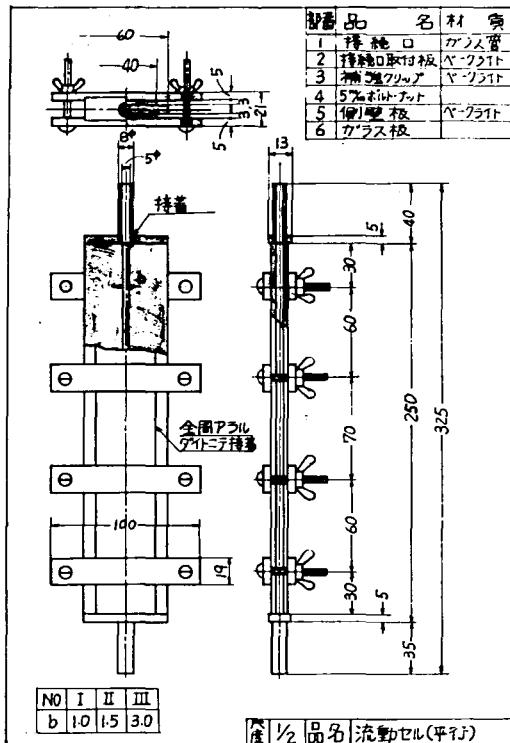


Fig. 3-7 平行セル組立図

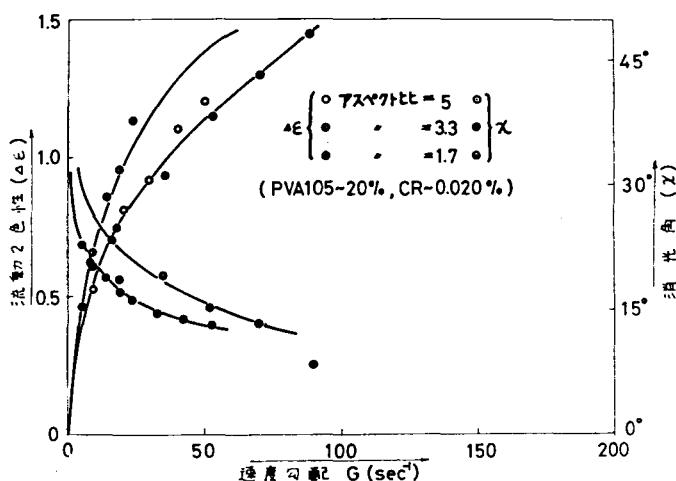


Fig. 3-8 流動2色性、消光角におよぼすアスペクト比の影響

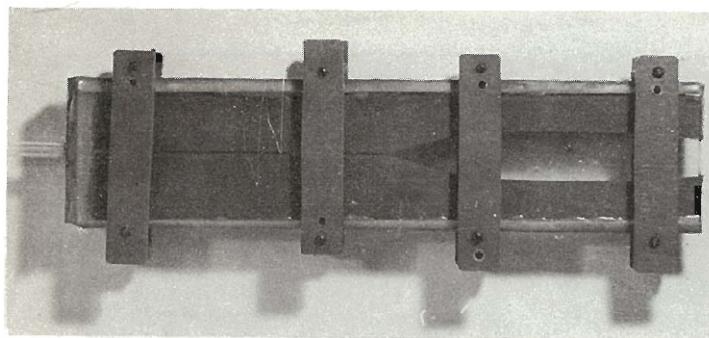


Fig. 3-9 拡大角  $28^\circ$  の流動セル

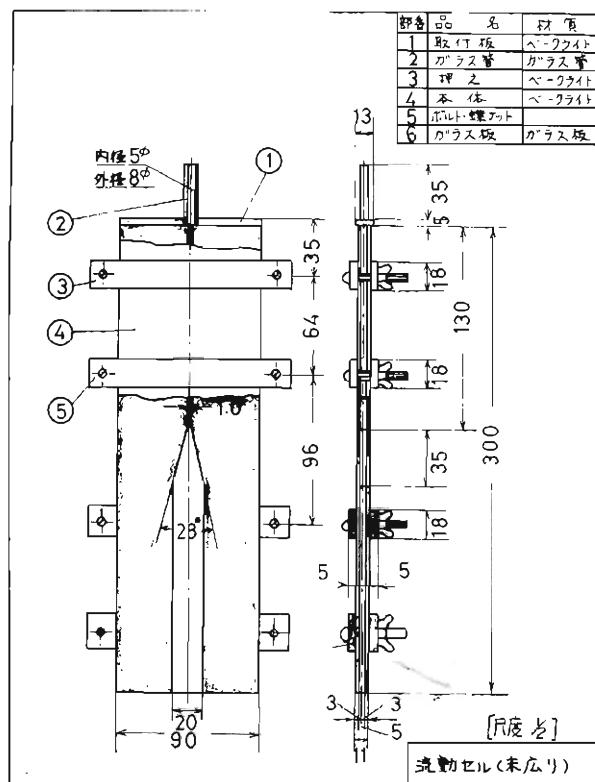


Fig. 3-10 拡大角  $28^\circ$  の流動セル組立図

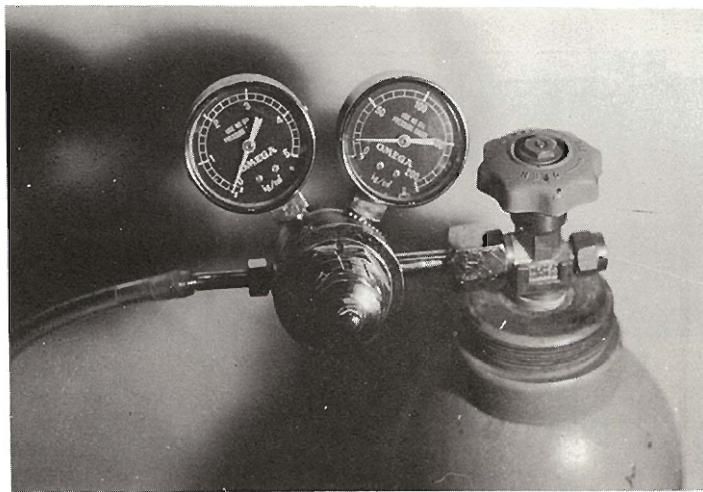


Fig. 3-11 圧力計および窒素ボンベ

### 3-1-3 流動セル送り装置

#### 平面内の流動 2 色性

を能率よく求めるために、2-2節にもとづいて流動セル送り装置を試作した。流動セルを送ることにより、光電測光部を送るよりも、わずかで均一な光学視野内で実験を行うことができる。

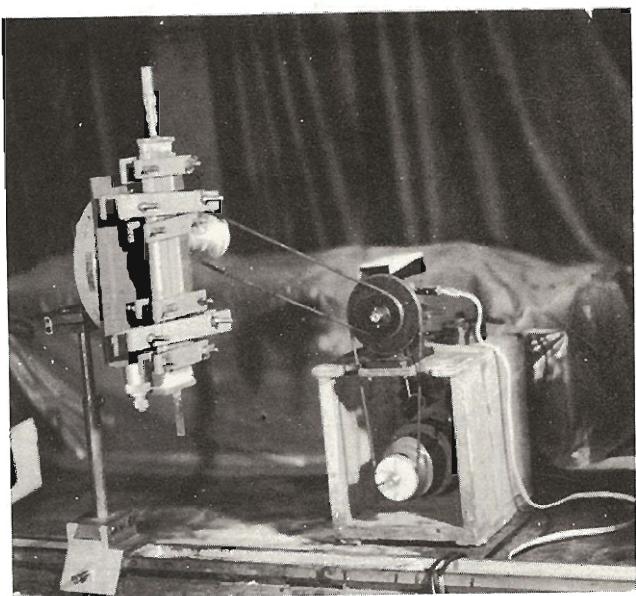


Fig. 3-12 流動セル送り装置

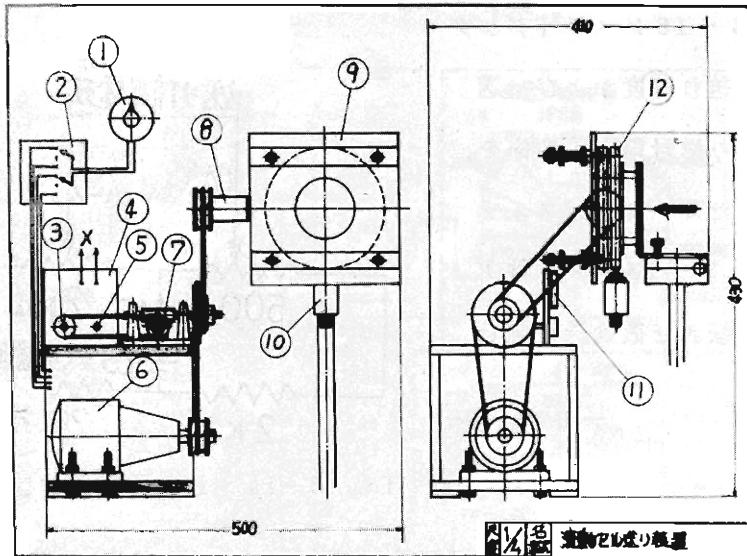


Fig. 3-13 流動セル送り装置組立図

Fig. 3-12 に送り装置の写真および Fig. 3-13 にその組立図を示す。

Fig. 3-13において、①スライダック、②スイッチ板、③可変抵抗器、④送り信号電圧発生器、⑤可変抵抗（位置決め用）、⑥モーター、⑦ウォームギヤー、⑧水平方向送りネジ、⑨セル取付台、⑩垂直方向送りネジ、⑪水銀電池、⑫微動載物台を示す。

微動載物台は神港精機株式会社製（S-25形）であり、2方向（上下左右）にマイクロメータにより0～25mmの微動送りができる。

水平方向の微動送りは減速機を介してモーターの回転によって送られ、同時にウォームギヤーにより可変抵抗器を回転させて、送り量に比例した電圧を端子Xに取出せるようになっている。Fig. 3-14はこの回路図である。(A)の可変抵抗器をウォームギヤーにベルト掛けにて回転させる。

モーターの回転数はスライダックにて、入力電圧を変えて連続的に変化させ

ることができる。

Fig. 3-15 はスライダック  
電圧と送り速度および、送  
り量と送り信号電圧の関係を  
示す。またモーターはスイッ  
チ (Fig. 3-13 の図②番)  
により逆転させ微動送り戻し  
ができる。

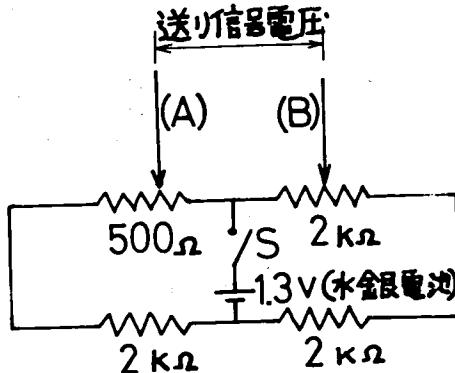


Fig. 3-14 送り信号発生装置の回路図

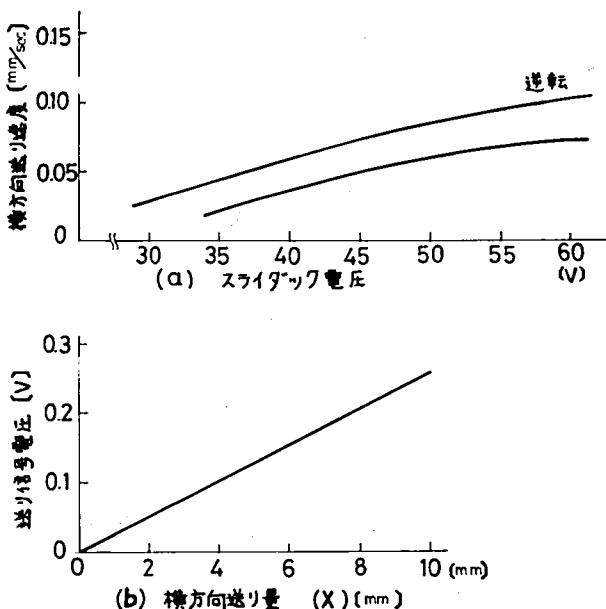


Fig. 3-15 (a) スライダック電圧と送り速度  
(b) 送り量と送り信号電圧

### 3-1-4 光電子増倍管および記録装置

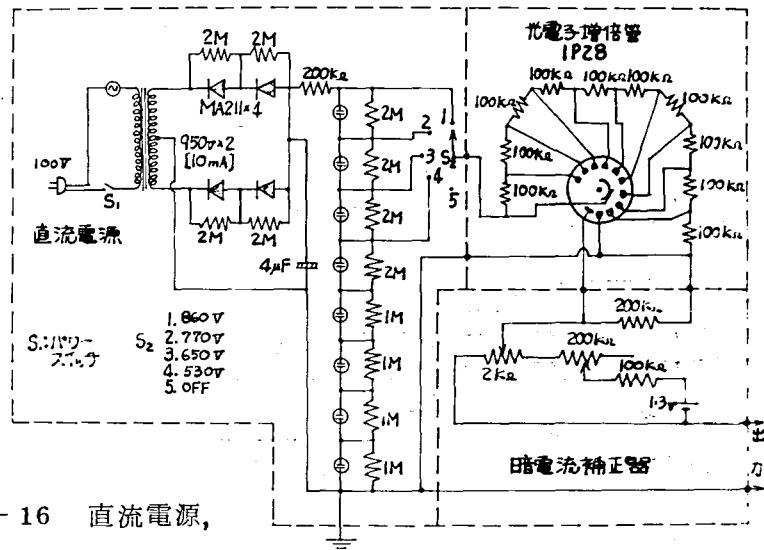


Fig. 3-16 直流電源,  
光電子増倍管,  
暗電流補正器

Fig. 3-1 (b) に示した写真において、光電子増倍管(3)にて光強度を電流に  
変え暗電流補正器(6)を通して電圧增幅した後、 $X-Y$  レコーダーの  $Y$  入力とし、  
送り信号電圧を  $X$  入力として、流動セルの透過光強度曲線を記録した。Fig.  
3-16 に光電子増倍管、直流電源、暗電流補正器の回路図を示す。

光電子増倍管は浜松テレビ機器製の IP 28 で、暗電流は  $0.02 \mu\text{A}$  であった。

電源部は MA 211 (松下)で全波整流し、8 個のネオン管で電圧の安定化を計った。

暗電流補正器は水銀電池を使用し、約  $20 \text{ mV}$  の補正ができる。この出力は、

Fig. 3-17 に示す直流増幅器(東亜電波工業株式会社製 D C. MICROVOLT METER MODEL PM-17 A)に導かれる。直流増幅器のフルスケールの時の出力電流は  $7 \text{ K}\Omega$  の負荷にて  $1 \text{ mA}$  流れるから、Fig. 3-17 の結線において

て X-Y レコーダーのフルスケールと一致するようにした。X-Y レコーダーは横河電気(株)製の PRO-21 形であり分圧器は PRAT-21 形である。

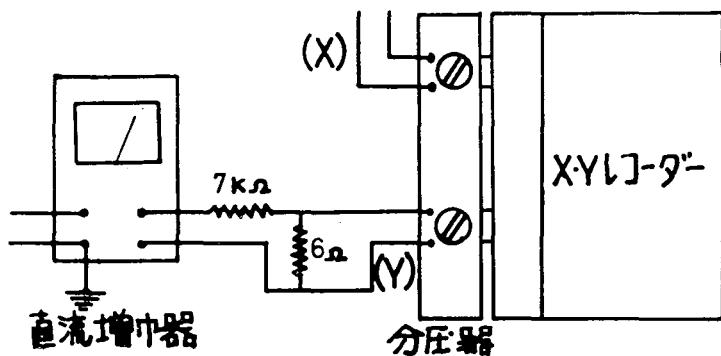


Fig. 3-17 直流増幅器と X-Y レコーダーの結線

## 第4章 試 料

本研究においては、第1編と関連して配向性物質として、水溶性であり、構造式から考えて側鎖の水酸基(OH)が主鎖の配向を妨げることが少く、配向しやすいと推察されるポリビニルアルコールを使用した。また2色性微分子としては水溶性であり、2色性の大きいコンゴーレッドを使用した。本章ではこれら試料について述べる。

### 4-1 ポリビニルアルコール(PVA)

実験に使用したポリビニルアルコールの平均重合度、ケン化度をTable 4-1に示す。

Table 4-1 PVA の平均重合度およびケン化度

PVA	103	105	108	113	117	124	205
重合度( <i>n</i> )	300	540	800	1300	1725	2400	550
けん化度	98.8%	98.8%	98.8%	98.8%	98.8%	98.8%	88.0%

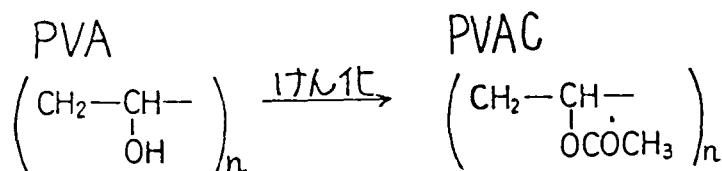


Fig. 4-1 PVA のケン化

ポリビニルアルコールは、Fig. 4-1 に示すようにポリ酢酸ビニルをケン化することにより調製した。

## 4 - 2 コンゴーレッド (CR)

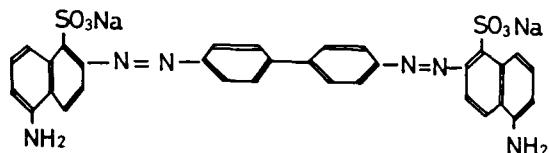
2 色性微分子として可視領域で顕著な 2 色性を示す Congo Red ( キシダ化学製特級 ) を使用した。 Fig. 4-2 に コンゴーレッドの分子式を示す。また, Fig. 4-3 に コンゴーレッド単結晶の 2 色性スペクトル<sup>(62)</sup> を示す。 Fig. 4-3 より、コンゴーレッドの 2 色性の最大値を示す波長

は  $520 \text{ m}\mu$  である。また  $500 \text{ m}\mu$  以上の波長においては吸収率  $a_{\min}$

は零となるので吸収率椭円は直線になってい  
る。このことは式(2-8)において  $f_{Dy_e} = 1$   
となるので  $f_D$  は次式  
のようになる。

$$f_D = \frac{1}{2} (3 \cos \theta - 1) \quad (4-1)$$

のことから、 $f_D$  を求  
めることにより、PVA  
が完全配向したと考え  
られる状態において分  
子軸と染料の光学主軸  
のなす角  $\theta$  を容易に求



$C_{32} H_{22} N_6 O_6 S_2 Na_2 = 696.68$

Fig. 4-2 コンゴーレッドの分子式

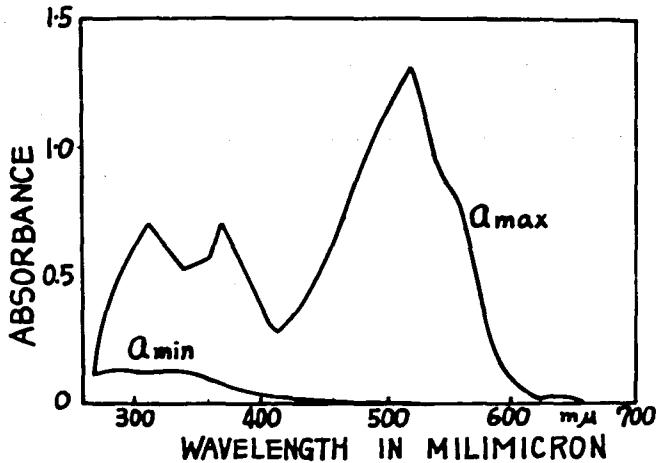


Fig. 4-3 コンゴーレッド  
単結晶の 2 色性スペクトル

(62)  
めることができるが、文献によればコンゴーレッドはセグメントと平行に配列し、 $f_D = 0.95 \sim 1$  であるので  $\theta \approx 0$  としてよい。

#### 4 - 3 溶液の調製

調製した試料の混合比を Table 4-2 に示す。

Table 4-2 試料の混合比

CR \ PVA	13 %	15 %	20 %	25 %
0.010 %			105 108	
0.015 %			103	
0.020 %	108	105 108	*	103 105
0.025 %			103	

\* 103 105 108 113 117 124 205

試料の調製はコンゴーレッドを水に溶かして充分攪拌した後、ポリビニルアルコールを加え、熱湯にて約1時間煮沸した。煮沸中は約10分毎に攪拌した。試料を25°C以下で放置しておくと、ゲル化が起るので約30°Cの恒温浴槽の中に保存し、また48時間後まではゲル化は起らないので、15~30時間後に実験を行なった。

#### 4 - 4 溶液の粘性

加圧形細管粘度計を用いて調製した試料についての速度勾配に対する粘度の

変化を、第1編3-4-4 Fig. 3-17に示した方法で測定した結果をFig.4-4に示す。これ等の結果より粘度は速度勾配によって変化せず Newtonian みなすことができる。

Fig. 4-5に水溶液(PVA 105 20%, CR 0.020, 0.010, 0.005%)についての可視領域の透過率を示す。Fig. 4-6に示す流動2色性スペクトルはFig. 4-3に示したコンゴーレッド単結晶の2色性スペクトルとよく一致している。Fig. 4-6に示す流動2色性スペクトルが最大の2色性を示す波長は約525m $\mu$  ~550m $\mu$ である。このため本研究における光の波長は546m $\mu$ を選んだ。

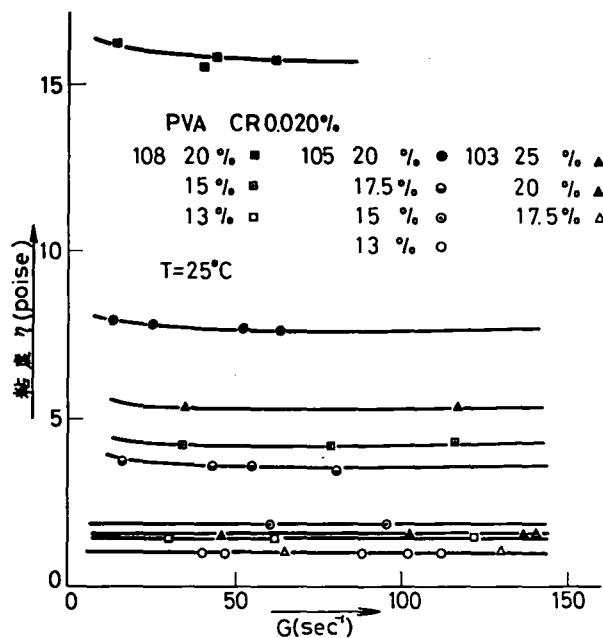


Fig. 4-4 溶液の粘度

4-5 溶液の光に対する透過率および2色性スペクトル

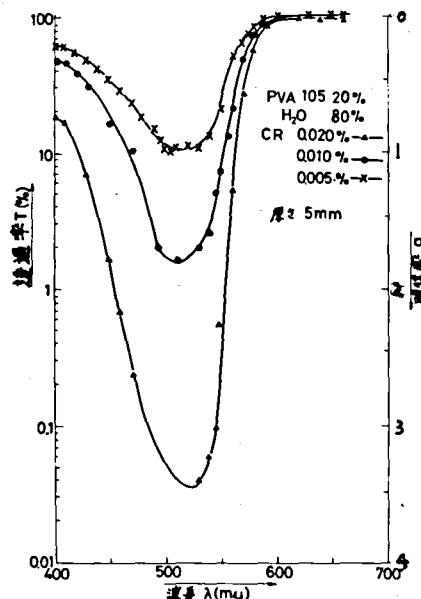


Fig. 4-5 溶液の透過率

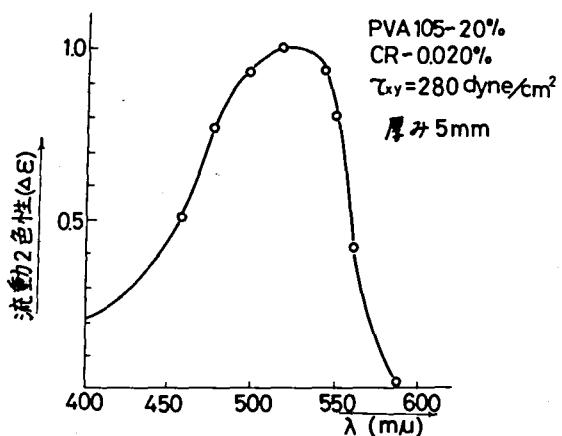


Fig. 4-6 溶液の流動2色性スペクトル

## 第5章 実験結果および考察

こゝでは速度勾配に対する流動2色性、消光角を求める第2章の方法についてその妥当性を実験的に確めた。流動2色性による流体計測の基礎的研究として、ポリビニルアルコール(PVA)の水溶液に2色性微粒子としてコンゴーレッド(CR)を用いた試料についてPVA濃度、PVA重合度、CR濃度を変えて、速度勾配に対する流動2色性、消光角の関係を求め、分子構造変化による流動変形のちがいを考察し、流体計測に用いる試料について検討した。

### 5-1 流動2色性測定方法についての吟味

測定方法は第2章にのべたようにEベクトルの方向 $\theta_P = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ の3種類についての透過光強度を測定し式(2-22),(2-23)に従って $T_{\max}$ ,  $T_{\min}$ および $\theta_0$ を求め、式(2-4),(2-5),(2-6)から $4\varepsilon$ ,  $f_D$ を求める。同時に流量Qを測定することにより式(2-12)に従って速度勾配Gを求めた。

実験中は常に25°Cにすることにより温度による影響を無視できるようにした。使用した流動セルは3-1-2に示した平行セル(アスペクト比=5)である。アスペクト比が3以上では2次元流とみなせることは3-1-2においてのべた。また4-4でのべた様に粘度は速度勾配に対して変化はなく, Newtonianと考えられる。

Fig. 5-1に平行セル(アスペクト比=5)場合についての透過光強度分布写真を示す。強度分布は第3章のscanning形流動2色性装置を用いて測定した。透過率曲線の1例をFig. 5-2に示す。こゝで $I_N$ はnatural light自然光を用いた時の強度、 $T_N$ はその透過率を示す。

他方平行セル内の各点で偏光子をまわして求めた透過率をFig. 5-3の曲線

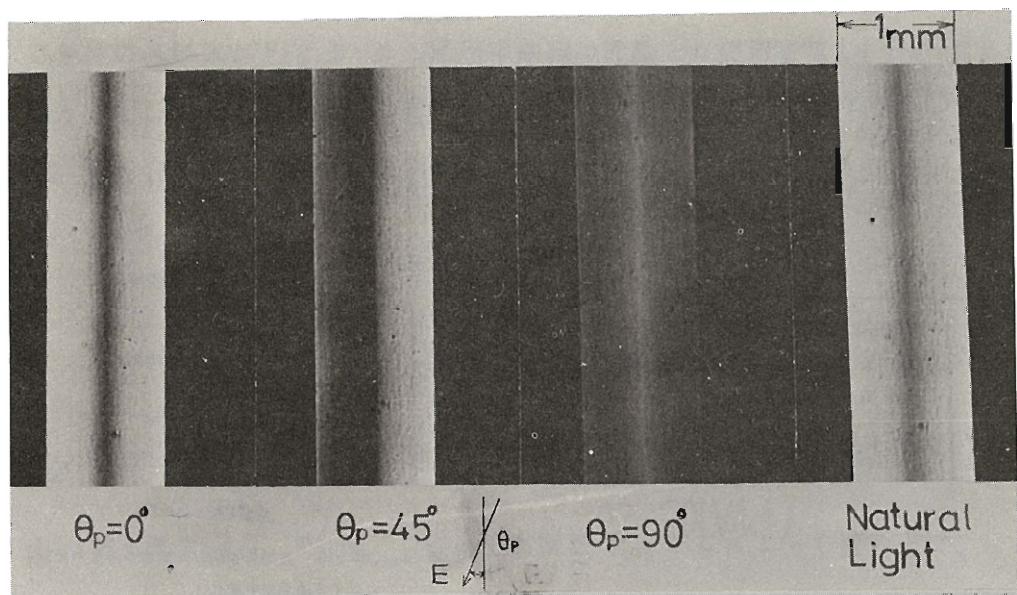


Fig. 5-1 平行セルの透過光強度分布

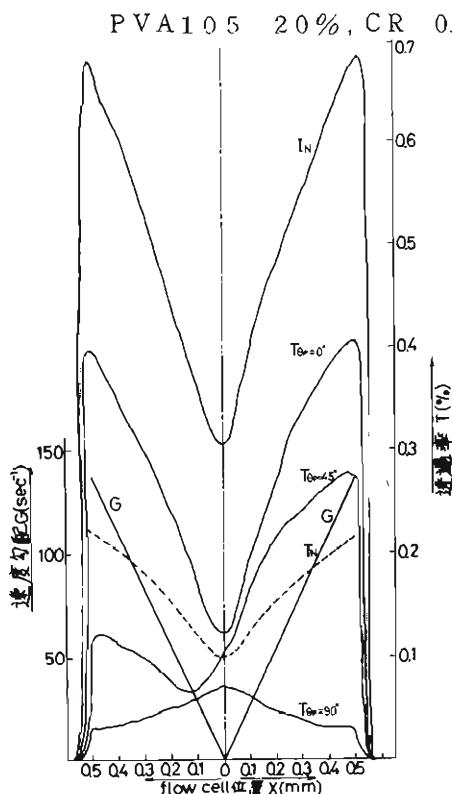


Fig. 5-2 平行セル内の透  
過率曲線および速度勾配

で示す。Fig. 5-2 の透過率から求めた  $T_{\max}$ ,  $T_{\min}$  をその点で示す。かなり精度よく一致し、第2章の方法の妥当性が確認された。

実際に測定した自然光に対する透過率の関係を Fig. 5-4 に示す。自然光に対する透過率は式(2-24)で与えられる。自然光に対する透過率は主透過率  $T_{\max}$ ,  $T_{\min}$  の平均であり、速度勾配に対する変化は小さいが入射光の強度が大きくとれるので光量の絶対量変化

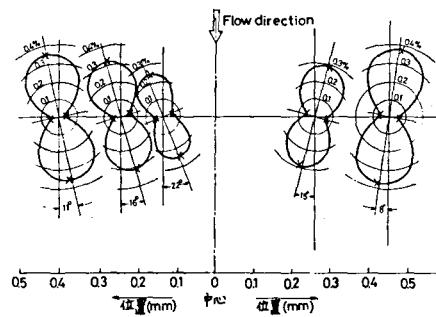


Fig. 5-3 平行セル内の透過率曲線

— 偏光子を回転して求めた。

$\chi \cdot T\theta_p = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$   
から計算した  $T_{\max}, T_{\min}$

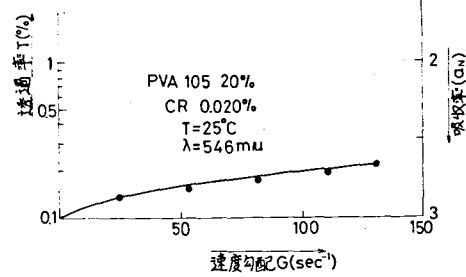


Fig. 5-4 自然光を用いた場合の速度勾配  
に対する透過率の変化

は小さい。このことは偏光子を用いなくても流れの可視化を可能にし、流動複屈折法に比較し大きな長所といえる。

次に、各速度勾配  $G$ において透過率精度の大きさが変わるのは次のように説明できる。

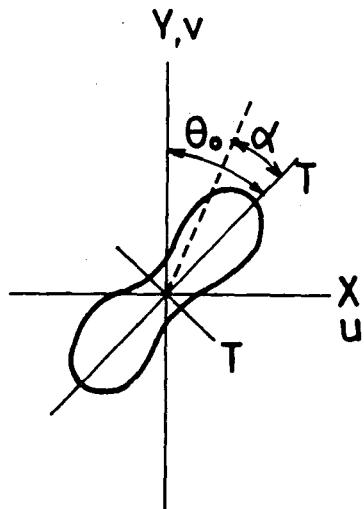


Fig. 5-5 透過率曲線と  
2色性単体

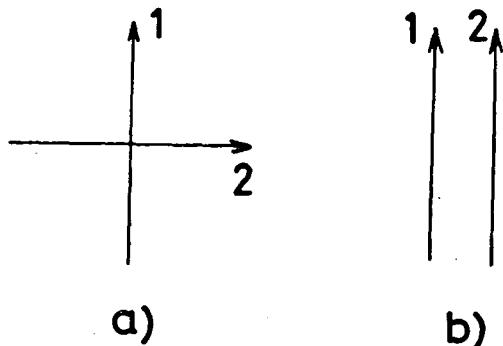


Fig. 5-6 2色性単体

2色性の各単体が Fig. 5-5 の透過率曲線の光軸と  $\alpha$  の角をなし、 $f(\alpha)$  なる分布をしていると考える。2色性の各単体の吸収率  $a_{\max}, a_{\min}$  とすると Congo Red は Fig. 4-3 より  $a_{\min} \neq 0$  であるので式(2-1), (2-2) から

$$T_{\max} = 10^{-\int_0^{\pi} f(\alpha) a_{\max} \cos^2 \alpha d\alpha} \quad (5-1)$$

$$T_{\min} = 10^{-\int_0^{\pi} f(\alpha) a_{\min} \sin^2 \alpha d\alpha} \quad (5-2)$$

$$T_N = \frac{1}{2} \left\{ 10^{-\int_0^{\pi} f(\alpha) a_{\max} \cos^2 \alpha d\alpha} + 10^{-\int_0^{\pi} f(\alpha) a_{\min} \sin^2 \alpha d\alpha} \right\} \quad (5-3)$$

したがって  $T_{\max}, T_{\min}, T_N$  は分布関数  $f(\alpha)$  が  $G$  によって変ると  $T_N$  もかわるのは当然である。

さらにエネルギー保存則によって単体の数が変わらないはずだという疑問が生じるが、Fig. 5-6 のように 2つの2色性単体が(a)のように直交状態にあるとき、光の振動ベクトルを考えると 1を通った光は 2を通らないが(b)で平行状態にあり通ってくる。透過率は分布関数  $f(\alpha)$  にしたがって(a)と(b)との間を変化する理解できる。

## 5-2 流動2色性に対するCR濃度、PVA濃度、PVA重合度による影響と考察

流動2色性の基礎的研究として流動2色性  $\Delta\varepsilon$  および消光角  $\chi_D$  における CR濃度、PVA濃度、PVA重合度による影響を調べた。

### 5-2-1 流動2色性に対するCR濃度の影響

CR濃度変化による、速度勾配に対する流動2色性、消光角の変化を PVA

103, 105, 108 20% 水溶液について測定した結果を Fig. 5-7, 5-8, 5-9 に示す。

CR 濃度が 0.025% 程度までは、配向度  $f_D$  はほとんど変化せず、したがって CR は PVA の配向による影響を与えないから  $f_D$  は PVA の流動配向を表わすと考えてよい。

速度勾配に対する流動 2 色性感度または配向性感度を式(5-4), (5-5) で定義して CR 濃度に対する流動 2 色性の感度の変化を Fig. 5-10 に示す。

$$C_G = \left[ \frac{d \Delta \varepsilon}{d G} \right]_{G=0} \quad (5-4)$$

$$F_{DG} = \left[ \frac{d f_D}{d G} \right]_{G=0} \quad (5-5)$$

Fig. 5-10 から流動 2 色性感度は CR 濃度変化によって直線的に増加するからその測定における強度変化は Lambert-Beer Law から光学厚み変化に対して指数関数的に変化する。

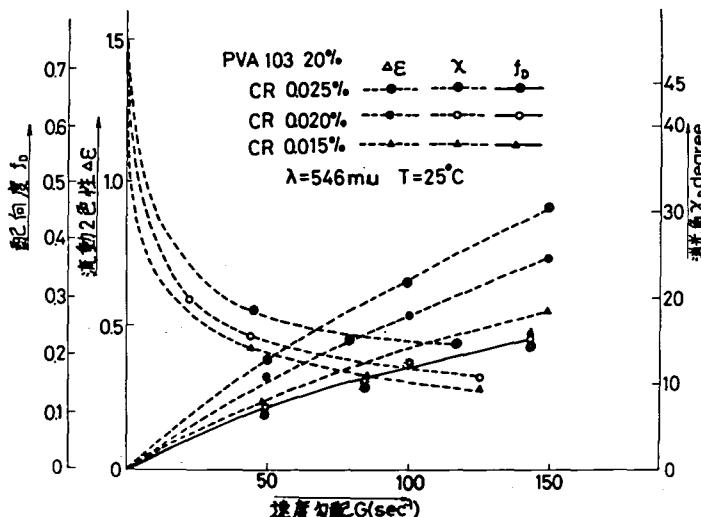


Fig. 5-7 PVA  
103 水溶液の,  
CR 濃度変化に  
よる速度勾配に  
対する配向度,  
流動 2 色性消光  
角の関係。

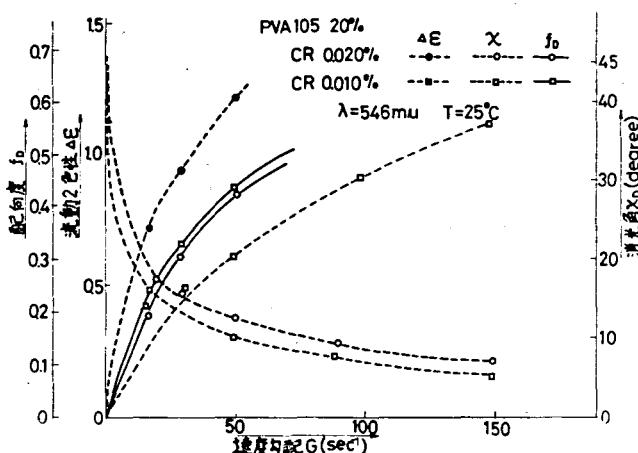


Fig. 5-8 PVA 105 水  
溶液の、CR 濃度変化  
による速度勾配に対する  
配向度、流動 2 色性、  
消光角の関係

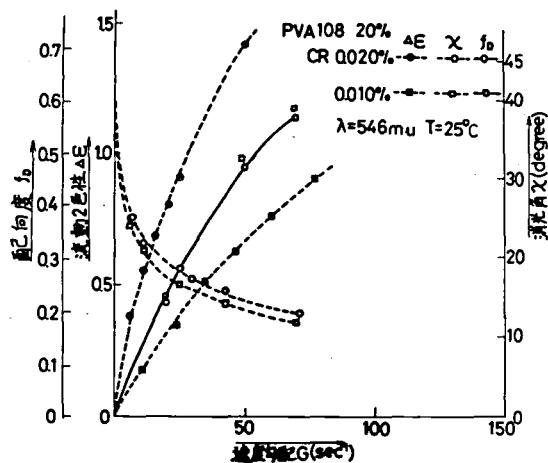


Fig. 5-9 PVA 108 水  
溶液の、CR 濃度変化  
による速度勾配に対する  
配向度、流動 2 色性、  
消光角の関係

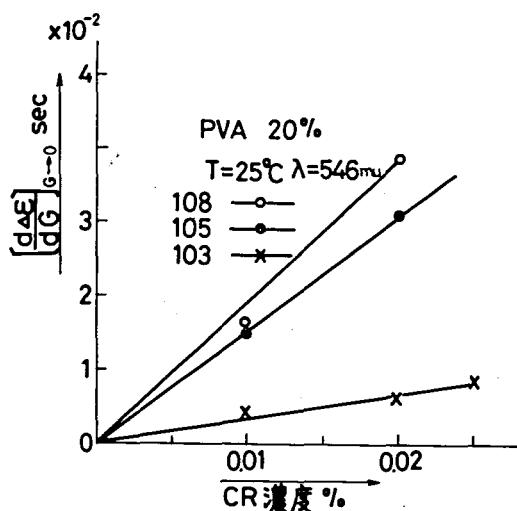


Fig. 5-10 PVA 水溶液  
の CR 濃度変化に対する  
流動 2 色性感度  $C_G$   
の変化

### 5-2-2 流動2色性に対するPVA濃度による影響

PVA濃度変化による、速度勾配に対する流動2色性、消光角の変化をPVA 103, 105, 108水溶液について測定した結果をFig.5-11, 5-12, 5-13に示す。CR濃度はいずれも0.020%である。これらの結果より式(5-4)から求めた流動2色性感度 $C_G$ をFig.5-14に示す。

これ等のFig.のいずれの場合についても濃度の大きい程、流動2色性は急激に立ち上り、消光角 $\gamma$ も急激に変化している。

Fig.5-14においてはPVA濃度約13%以下は重合度に関係なく流動2色性感度 $C_G$ は非常に小さい。13%以上では急激に増加している。重合度の大きい程流動2色性感度は大きい。

第1編の4-4-2において流動複屈折感度を一義的にあらわすものとして応力光係数を定義した。流動2色性は主として配向によって起り、配向のしやすさは回転拡散係数に関係するので、式(5-4)を粘度 $\eta$ で除し、剪断応力に対する流動2色性感度 $C_\tau$ 、および配向性感度 $F_\tau$ を感度として定義する。

$$C_\tau = \left[ \frac{d f_D}{d \tau} \right]_{\tau \rightarrow 0} \quad (5-5)$$

$$F_\tau = \left[ \frac{d f_D}{d \tau} \right]_{\tau \rightarrow 0} \quad (5-6)$$

これ等の感度は、流動2色性を流体計測に使用する場合その相似則において同一粘度の試料を使用した場合の感度を表わす。

Fig.5-15に式(5-5), (5-6)に定義にもとづいて求めたPVA濃度に対する流動2色性感度および配向性感度を示す。PVA 105はPVA濃度の広い範囲で流動2色性感度 $C_\tau$ 、配向性感度は高く、広いレイノルズ数にわたって流体実験が可能であることを示す。

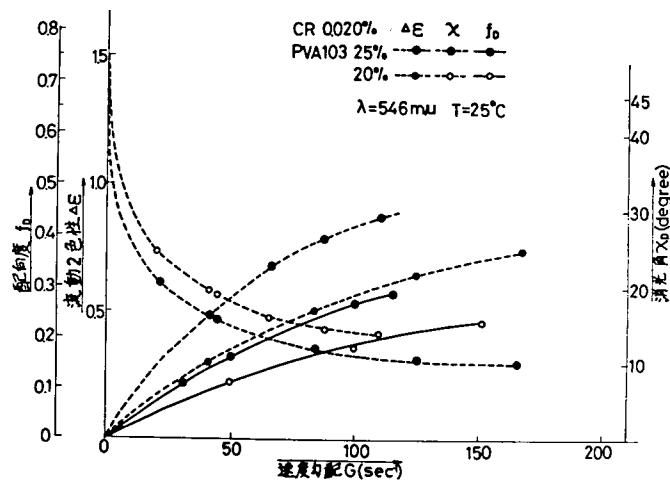


Fig.5-11 PVA 103 水  
溶液の、PVA濃度変化  
による速度勾配に対する  
配向度、流動2色性、  
消光角の関係

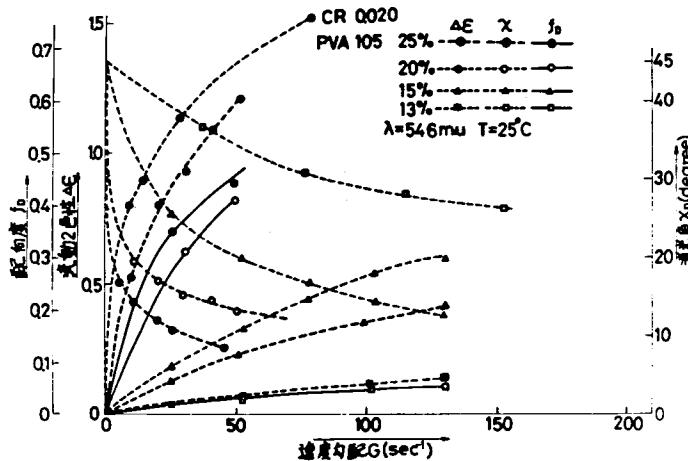


Fig.5-12 PVA 105 水  
溶液の、PVA濃度変化  
による速度勾配に対する  
配向度、流動2色性、  
消光角の関係

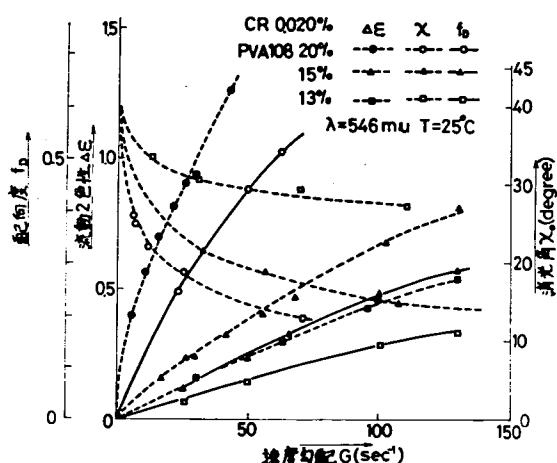


Fig.5-13 PVA 108 水  
溶液の、PVA濃度変化  
による速度勾配に対する  
配向度、流動2色性、  
消光角の関係

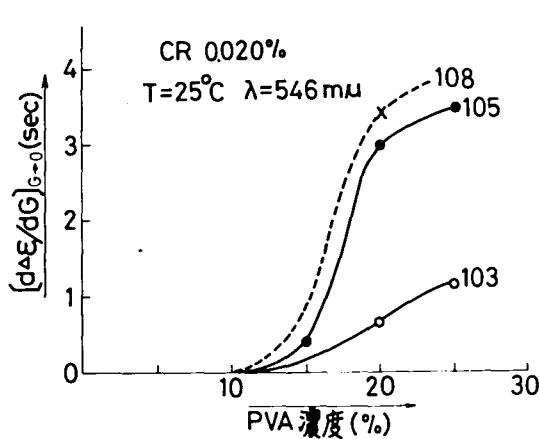


Fig. 5 - 14 PVA 水溶液  
の PVA 濃度変化に對  
する流動 2 色性感度  $C_G$   
の変化

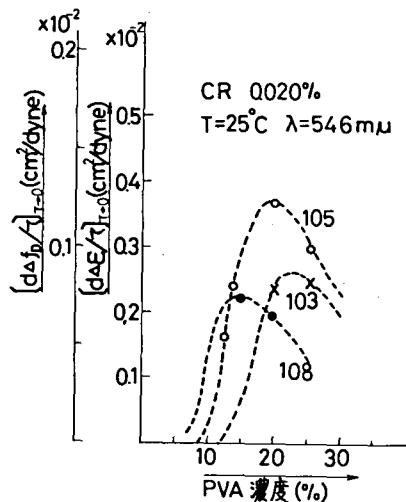


Fig. 5 - 15 PVA 水溶  
液の PVA 濃度変化  
に対する流動 2 色性  
感度  $C_T$  および配向  
性感度  $\Delta C_T$  の変化

分子論的な考察を次にのべる。PVA濃度に対して PVA-CR 水溶液の配向性に最大点があらわれている。これは第 1 編 4-5-3 の流動複屈折においてものべたように、低濃度においては PVA 濃度の増加によって CR 分子の  $-NH_2$  基と PVA 分子の  $-OH$  基との結合が強くなり PVA の配向に対して 2 色性を示す分子自身は配向しやすくなる。高濃度になると PVA 自身はその entanglement すなわち分子内、分子間の分子間力のからみあい、位相幾可学的もつれにより配向しにくくなる。この効果が PVA-CR の結合による効果より大きいため CR 分子も配向しにくくなり流動 2 色性感度は低下してくる。

5 - 2 - 3 流動 2 色性に対する重合度の影響

Fig.5-11

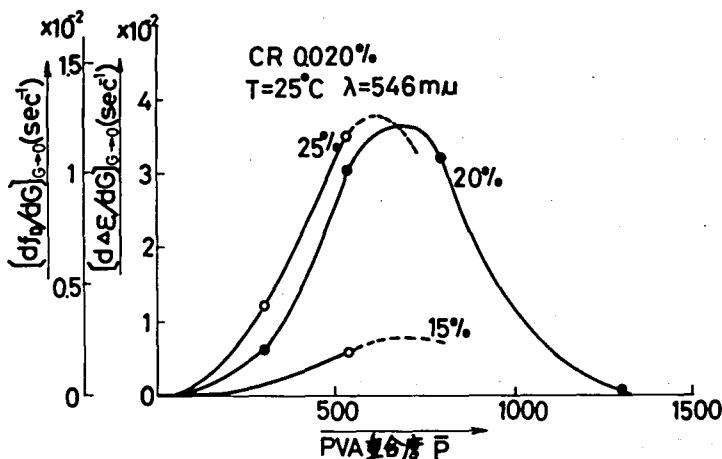


Fig.5-16 PVA 水溶液の PVA 重合度変化に対する流動 2 色性感度  $C_G$  および配向性感度  $F_{DG}$  の変化

~5-13 から  
求めた PVA  
重合度変化に  
対する流動 2  
色性感度  $C_G$  ,  
配向 2 色性感  
度  $F_{DG}$  を Fig.  
5-16 に示す。

Fig.5-17 は  
PVA 重合度  
変化に対する  
流動 2 色性感

度  $C_\tau$ , 配向性感度  $f_{D\tau}$   
の関係を示す。

重合度による 2 色性感度  $C_G$  の変化は濃度が高い程大きくなっている。また濃度が小さくなると重合度による変化はあまりあらわれない。

重合度 100 程度になると PVA 濃度に関

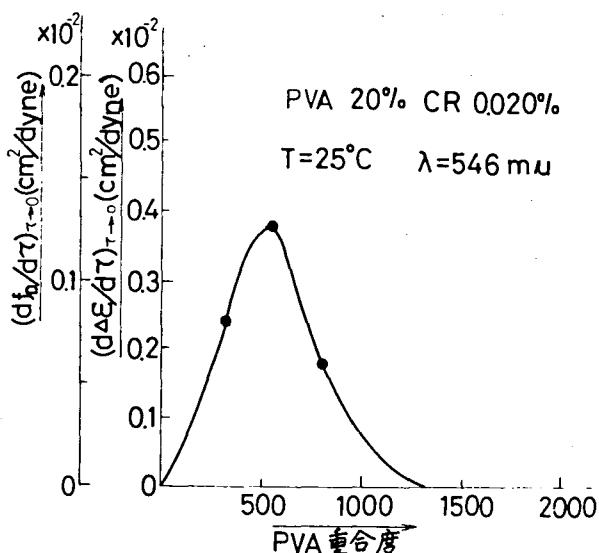


Fig.5-17 PVA 水溶液の PVA 重合度変化に対する流動 2 色性感度  $C_\tau$  および配向性感度  $f_{D\tau}$  の変化

係なく流動2色性感度はほど0になる。また重合度の高いPVA113,PVA117,PVA124,またケン化度の低いPVA205(濃度20%,CR0.020%)において流動2色性は現われなかつたことから重合度1,300以上では配向しないと推察される。このため重合度100と1,300の間に流動2色性感度の最大となる重合度が存在すると思われる。PVA20%溶液においてはFig.5-17のように重合度500~540において流動2色性感度 $C_T$ または配向性感度 $F_{DT}$ は最大になる。

重合度に対してこのような分子の配向性に最大点があらわれるのは、分子鎖の長さによって配向性に関係する entanglement が異なるためである。

Fig.5-17において、重合度300では500のものより配向性が小さいのは分子鎖が短いため、マクロブラウン運動が分子間力のからみあいより大きい効果をおよぼし分子の配向性を妨げている。重合度500~540より高くなると分子間力のからみ合いがマクロブラウン運動のからみあいよりも、配向性を妨げる要因となり、重合度1,300ではほとんど配向を示さなくなる。このことは第3編3-4-5においてのべた粘度における1.8乗則、3.4乗則において分子量に対する臨界分子量が存在することと一致する。またこのことは第1編4-4-3の流動複屈折の消光角 $\chi$ の結果とも一致する。PVA205については $-OCOCH_3$ 基の短距離の hindrance potential のために配向せず流動2色性はあらわれない。

### 5-3 流動2色性測定感度

流動2色性において光路長 $L$ および配向度 $f_D$ が与えられた場合、流動2色性を感度よく測定するためのCR添加量が存在することについてのべる。

CR濃度を大きくすると $A\varepsilon$ は大きくなるが、透過光強度は減少する。そこ

で測定するのは強度変化であるから測定感度  $S_M(C)$  は次式で与えられる。

$$S_M(C) = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_0} = 10^{-c A_{\min}} - 10^{-c A_{\max}} \quad (5-6)$$

$S_M$  が最大になるためには

$$\frac{d S_M}{d C} = 0 \quad (5-7)$$

これから  $S_M$  が最大になるための濃度  $C_0$  は

$$C_0 = \frac{1}{A_{\max} - A_{\min}} \log \frac{A_{\max}}{A_{\min}} \quad (5-8)$$

また流動 2 色性を測定する際の contrast  $S_{\text{cont}}(C)$  は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} S_{\text{cont}}(C) &= \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \\ &= \frac{10^{-c A_{\min}} - 10^{-c A_{\max}}}{10^{-c A_{\min}} + 10^{-c A_{\max}}} \end{aligned} \quad (5-9)$$

式 (5-6), (5-9) を Fig. 5-18 に示す。

式 (2-6) から

$$\frac{D-1}{D+2} = f_D \quad , \quad D = \frac{1+2f_D}{1-f_D}$$

これを式 (5-8) に代入すると

$$C_0 = \frac{1}{A_{\max} - A_{\min}} \log \frac{1+2f_D}{1-2f_D} \quad (5-10)$$

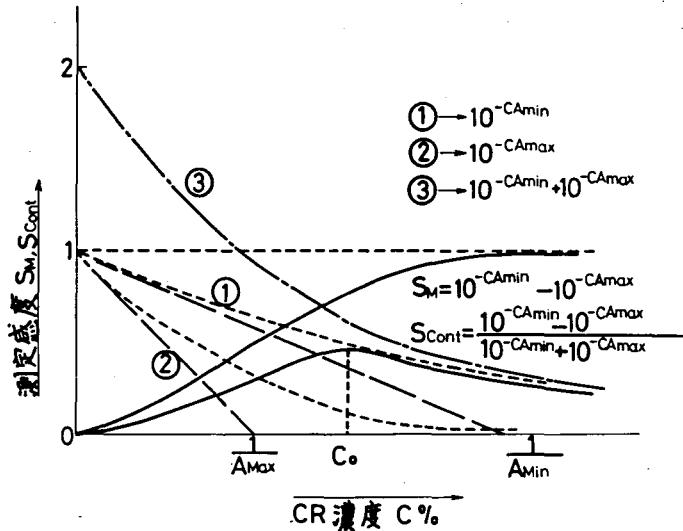


Fig. 5-18 測定感度  $S_M$  と測定 contrast  $S_c$  の  
CR 濃度に対する変化

たとえば Fig. 5-8 において  $f_D = 0.3$ ,  $\Delta \varepsilon = 0.8$  (CR 濃度  $C = 0.020\%$ ) をとると,

$$A_{\max} - A_{\min} = \frac{\Delta \varepsilon}{C} = 40$$

となり、式(5-10)に代入すると  $C_0 = 0.009\%$ となる。しかし contrast を考えると CR 濃度としてこれより少し高い方が望ましく  $0.010\% \sim 0.020\%$  程度がよいと考えられる。

#### 5-4 2次元流速分布の測定

流動2色性の流体計測への応用例として拡大角  $28^\circ$  の流動セル (Fig. 3-13) 内の拡大流の流速分布を測定した。Fig. 5-19 にこのセルの透過光分布写真

を示す。測定方法は、まず、セルの測定位置において透過光強度分布曲線  $T_{\theta_P}$   
 $= 0^\circ$ ,  $T_{\theta_P} = 45^\circ$ ,  $T_{\theta_P} = 90^\circ$  を描く。Fig. 5-20 にこの 1 例を示す。これを  
用いて式(2-4), (2-22), (2-23)から  $\Delta \varepsilon$  および  $\theta_0$  を求める。先ず平行  
部において測定した流量から式(2-12)を用いて速度勾配  $G$  と  $\Delta \varepsilon, \theta_0 = \chi$  の  
関係を求めた Fig. 5-21 に示す。Fig. 5-21 を用いて最大速度勾配  $G_{\max}$  お  
よびその方向  $\chi - \theta_0$  を求める。以下 2-1-2 節でのべた方法に従って流速分布  
を算出する。Fig. 5-22 に各測定位置における  $G_{\max}$  およびその方向を示す。  
Fig. 5-23 は流速分布を示す。以上のようにして求められた流速分布より流  
量を算出し、測定した流量と比較した結果を Table 5-1 に示す。約 10% 以  
下の誤差を生じ比較的精度よく測定できる。

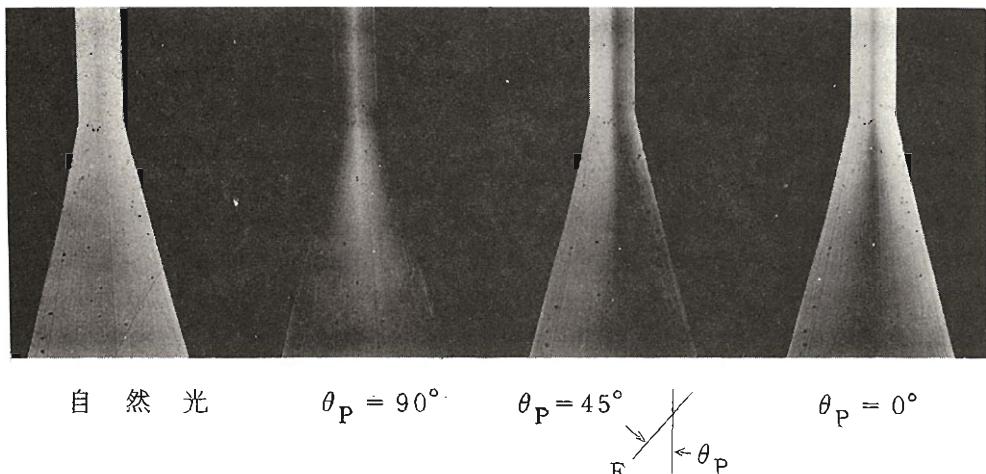


Fig. 5-19 拡大角 28°の流動セルの透過光分布写真

PVA 105 20% CR 0.020% 水溶液,  $Q = 0.042 \text{ cc/sec}$

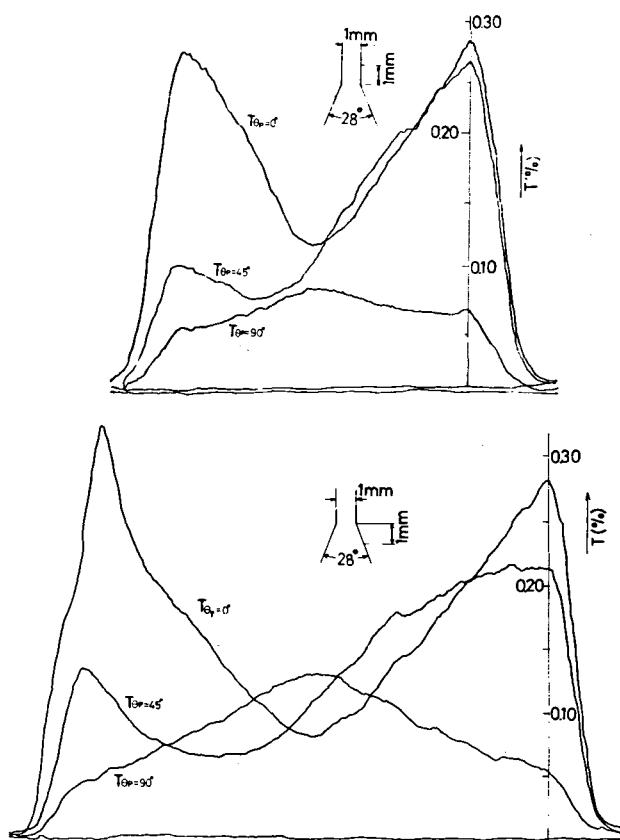


Fig. 5-20 拡大角  $28^\circ$   
の流動セルの拡大流  
に対する流動2色性  
透過率曲線

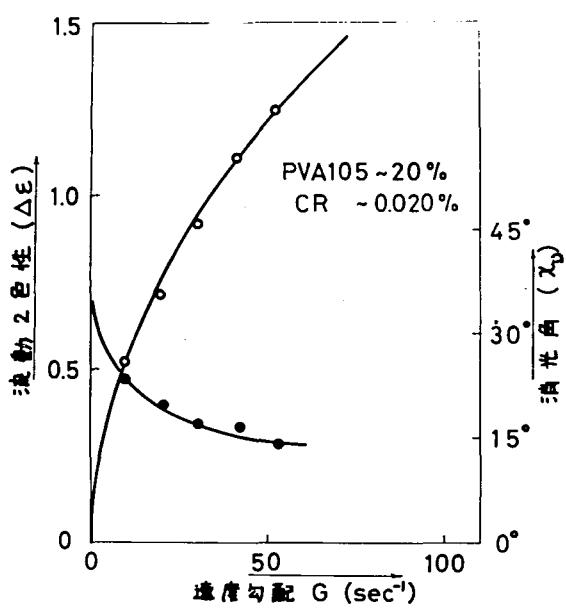


Fig. 5-21 速度勾配  $G$   
に対する流動2色性  
および消光角の関係

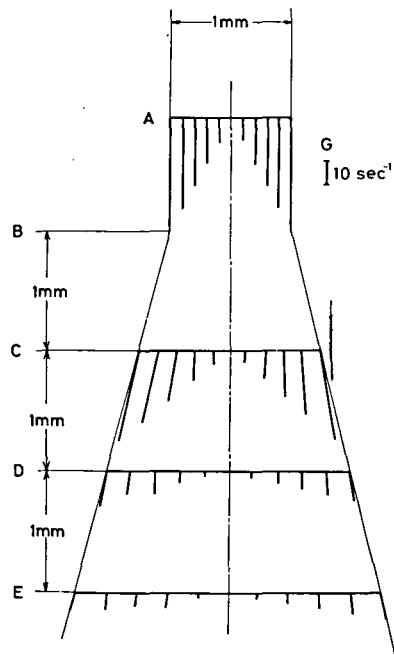


Fig. 5-22 拡大角  $28^\circ$  流動セル  
中の最大速度勾配とその  
方向

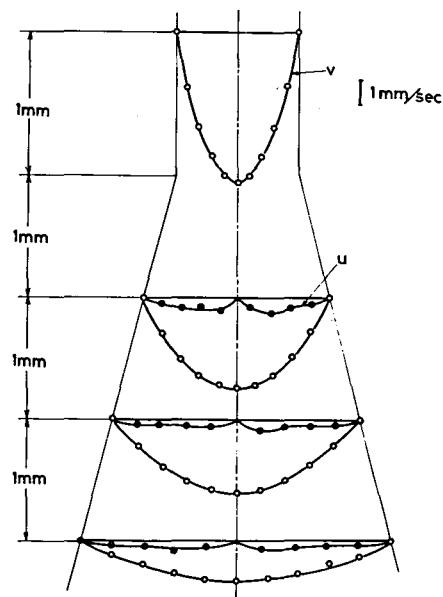


Fig. 5-23 拡大角  $28^\circ$  流動セル  
の速度分布

Table 5 - 1 実際の流量と測定値から求めた流量の比較

流量実測値	C 位 置	D 位 置	E 位 置
0.042 cc/sec	0.039 cc/sec	0.042 cc/sec	0.040 cc/sec

自然光において Fig. 5-22 の D 位置で測定した透過光分布曲線を示す。自

然光においても流れの可視化が可能で最大速度勾配の変化に対応する。偏光板が不要であるので装置的に簡便である。

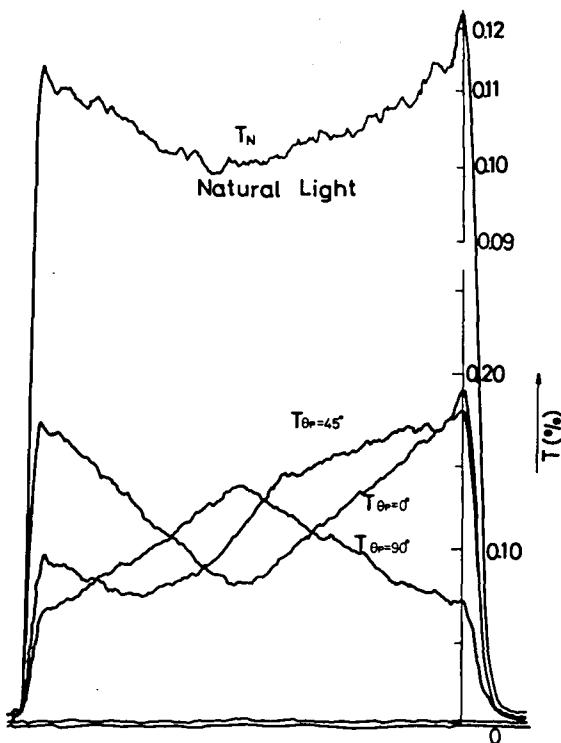


Fig. 5-24 自然光と直線偏光に対する

流動 2 色性透過率分布曲線例

## 第6章 総括

本研究においては流動2色性により流体計測を行うための基礎的研究としてその新しい測定法について検討し、その結果をもとにし、flow cell scanning typeの流動2色性装置を試作し、円偏光、自然光、平面偏光を用いてモデル材料の分子構造（主として重合度）と流動変形の関係を調べた。すなわちモデル材料としてPVA103, 105, 108水溶液にコンゴーレッドを0.010%～0.025%加えたものを用い、平面偏光により速度勾配に対する流動2色性、消光角、自然光により速度勾配に対する吸収率の関係を調べた。最後に2次元流速分布の解析例を示した。

以上の結果を要約すると次のようになる。

- (1) 本研究において試作したflow cell scanning typeにおいては従来の装置と比較して、平面内の流動2色性の分布が測定できると同時に、より能率よく測定でき、吸収率楕円の主軸の大きさと方向を求めることができる。
- (2) 流動2色性においては測定強度は光学厚み変化に対して指指数的的に変化するので、特に狭い管中の流体計測に適している。自然光を用いても速度勾配に対する吸収率が変化し、偏光子を使わずに流れの可視化ができる。
- (3) CR濃度に対する流動2色性感度 $[\frac{dA\epsilon}{dG}]_{G \rightarrow 0}$ ,  $[\frac{dA\epsilon}{d\tau}]_{\tau \rightarrow 0}$ は比例的に増加する。配向性感度 $[\frac{df_D}{dG}]_{G \rightarrow 0}$ ,  $[\frac{df_D}{d\tau}]_{\tau \rightarrow 0}$ はCR濃度0～0.025%においてはほとんど変化しない。
- (4) PVA濃度に対する流動2色性感度 $[\frac{dA\epsilon}{d\tau}]_{\tau \rightarrow 0}$ , 配向性感度 $[\frac{df_D}{d\tau}]_{\tau \rightarrow 0}$ は重合度により多少異なるが、一般に15%以下では低く、15%を過ぎると極端に感度がます。さらに濃度が高い所では下ってくる。15%以下で低くなるのはPVAとCRの弱いvan der Waals結合が弱くなるためと考えられ

る。濃度が高い所で下ってくるのは、濃度の増加による分子間に働くからみあいに起因すると推察できる。

- (5) PVA重合度に対する流動2色性感度  $\left[\frac{dA\epsilon}{dG}\right]_{G \rightarrow 0}, \left[\frac{dA\epsilon}{d\tau}\right]_{\tau \rightarrow 0}$ , 配向性感度  $\left[\frac{df_D}{dG}\right]_{G \rightarrow 0}, \left[\frac{df_D}{d\tau}\right]_{\tau \rightarrow 0}$  には重合度 100 ~ 1300 の間に感度が最大となる極値があることが解った。これは分子鎖の長さによる分子間のからみあいのちがいによって説明できる。
- (6) 測定感度は強度変化で表わされ、光路長および配向性が与えられた場合、それが最大となる最適濃度が存在し、コントラストを考えるとそれより少し高い濃度を用いるとよいことが解った。
- (7) 流動2色性法により2次元流れの速度分布の解析が十分精度よく行える。
- (8) 流体計測を行う場合、そのレイノルズ数  $\rho ud/\eta$  を広い範囲で変えるためには、PVA濃度変化により  $\eta$  を広く変えられる重合度 500 程度がよいことが(4),(5)より解った。また(6)に示したように測定感度、コントラストを考える時、適当な CR 濃度を用いる必要がある。
- (9) (3)より CR 濃度 0.025 %までは CR 添加による配向性には影響しないので、物性の観測手段として使用できる。流動複屈折と比較して、流動2色性では PVA の 2 色性ではなく、CRのみの 2 色性を測定できる。このことは分子のある基に関する挙動をとらえることができる事を示す。
- (10) 以後、今後の研究として次のことが期待される。
- (a) scanning 法についてその測定を早くするために fiber optics 或は高速光掃引をおこなうことが考えられる。
- (b) 測定感度をさらにあげるために、さらに流動2色性感度の大きな材料を開発すること、主鎖と可視2色性物質の結合については van der Waals 結合等弱い結合だけでなく、さらに強い結合法を開発することが望まれる。

(c) 本研究の流動2色性測定法の測定波長領域を紫外領域、赤外領域に広げることにより分子そのものゝ各基の流動に対する挙動をとらえることができる。

## 第3編 再回折シュリーレン法による流体計測

### 第1章 緒 言

本研究は再回折光学系において Fraunhofer diffraction plane 上を filtering することにより、動的または静的な流体の流れの可視化または定量的な測定を行う方法に関するものである。

物質の屈折率の変化、厚みの変化、また表面形状は、これを透過またはこれから反射する光波に位相差を生じせしめる。この効果を利用して物質の光学的位相構造を測定する方法に干渉位相差法とシュリーレン法があげられる。前者は 1948 年に Tolansky<sup>(63)</sup> による超微小位相差の測定を目的としたくり返し干渉法によって著しく精度が向上された。しかし、この方法の欠点として、位相差の変化が大きく縞の極端に密集した部分の測定は困難であり縞の分布の観察だけでは凹部と凸部の識別はできないし、縞次数の判定は難しい。また最近レーザーの発展とともに Holography によって光学的位相を測定する方法があるが、一度 Hologram を写真にとって再生する必要があり、写真フィルムの粒子、収縮等が問題になる。

他方、シュリーレン法は Foucault が反射鏡の検査をした考え方を用いて、1864 年 Toepler によって、流体の密度変化および電気火花の圧縮波を見るのに用いられたのが始めである。その後 Mach<sup>(64)</sup>, Cranz<sup>(65), (66)</sup> 等による流体、音響学への応用、Tiselius<sup>(67)</sup>, Longsworth<sup>(68)</sup>, Schmidt<sup>(69)</sup> 等による遠心分離機、拡散、電気泳動等の化学への応用<sup>(70)</sup>, Nadai<sup>(71)</sup>, Kurada<sup>(72)</sup> 等による金属面の観察など種々の分野に用いられている。また方法的にも Schardin<sup>(73)</sup>, Longsworth<sup>(68)</sup>, Kegel<sup>(69)</sup> 等による干渉屈折法、Sc-

hmidt<sup>(64)</sup>, Philpot<sup>(74)</sup>等による直接投影法などが挙げられ, Towned<sup>(75)</sup>, Taylor 等の装置の改良も注目すべきである。最近では Holder, North<sup>(76)</sup> 等の超音速飛行物体の研究がある。このように、今迄のシュリーレン法はその簡便さから種々の方面に利用されてきたが、主として如何なるパターンが得られるかという定性的な測定が目的であった。シュリーレン法による定量の試みは少なく、 Schardin の格子形遮光板による方法<sup>(77)</sup>, Tiselius の電気泳動法<sup>(67)</sup>, Schmidt の干渉縞による方法<sup>(70)</sup>などがあるが、十分その定量的方法、精度、測定限界について吟味されていない。

一方、電気通信理論の光学への導入は、像形成理論に顕著な進転をもたらし、応用面でも収差補償フィルターによる結像性能<sup>(78)</sup>の改良や<sup>(79)</sup>、再回折法による光学像の修正<sup>(80)</sup>などをあげることができる。

著者は最近の結像理論<sup>(81)</sup>を適用して、再回折光学系における Fraunhofer diffraction plane 上に各種空間周波数フィルタを試み、それ等の特性をまとめ、その結像関係を利用して物体の光学的位相構造の定量を試みた。そして在来のシュリーレン法を一般化し干渉位相差法の欠点を補うことができた<sup>(82)</sup>。<sup>~(87)</sup> その結果広い変域にわたる位相分布の測定、応力集中域の歪分布、光弾性法を併用した 2 次元応力解析等、在来の光学的位相測定法に比べて非常に広い分野における応用が可能であることがわかった<sup>(82)~(87)</sup>、本論文では流体計測という立場から応用については純流体素子での付着噴流の可視化および定量的解析、高分子溶液の流れの測定を行なう。

第 1 章には再回折光学系における像形成理論をのべ試料の位相分布、回折像、像強度について定量関係を明かにし、各種の空間周波数フィルタの代表例について述べその特色をまとめる。そしてこの測定法による精度、測定限界等について考察を加える。

第3章では以上 の方法による流体計測への応用として、空気式純流体素子の付着噴流の可視化および定量的解析を行い設計が非常に簡単に見えることを示す。

第4章では液体は非圧縮性流体として取り扱われているが高分子水溶液は速度勾配により流動複屈折を示し、光学的密度変化が生じる。再回折光学系においてこの試料の前に偏光子一枚おくことにより任意の電気ベクトル方向の屈折率を求めることができ、これから流れの解析が可能であることを示す。

第5章では、カラー法についてレンズの色分散を利用し、鋭敏色により鋭敏に微小な位相差を検知する方法について述べる。

## 第2章 再回折法の測定理論

一般に光学系で物体の像を作るとき、適当な方法で物体を照明することが必要である。これは顕微鏡や投影などにおいても例を見ることができる。すなわち、光源とコリメーターレンズによって照明光束をつくり、物体をこの光束中においてその透過光を集光レンズに受けて結像が行われる。このような照明系を含めた一般の結像光学系について結像関係を考える。

無収差の顕微鏡対物レンズについて Abbe の基本的研究以来、最近では Hopkins や Barham<sup>(88)</sup>、 Goodbody<sup>(89)</sup> 浮田等が照明方法と解像限界についてコヒレンシイを考慮した計算を述べている。また情報理論の光学への導入が行われて Duffieux、 Hopkins<sup>(90)</sup> 等によって、レスポンス関数あるいは transmission factor の概念が結像性能を表示するのに合理的であることが指摘された。これ等の結果は、この研究に用いた再回折光学系の結像理論にそのまま適用することができる。この論文では Hopkins の方法に従って計算をすゝめることにする。

試料の位相分布が一般的の任意の関数形で与えられる場合、結像関係式による実際の積分演算は困難である。それ故、むしろ位相分布を他の簡単な関数で近似して演算を行なう方が、定性的あるいは定量的な結像関係を把握しやすい。そのため位相分布関数を小区間毎 Taylor 展開による近似式で表わして結像関係を取り扱うこととする。2-1においては再回折光学系の結像関係についてのべ、また再回折法の測定原理についてのべる。2-2において位相勾配を測定するための各種フィルタの理論についてのべ、2-3において各種の測定精度、限界についてのべる。

## 2 - 1 再回折法の測定原理

Fig. 2-1 に結像光学系、および座標系を示す。レンズの開口は円形で、光軸付近の結像についてのみ考えることにする。

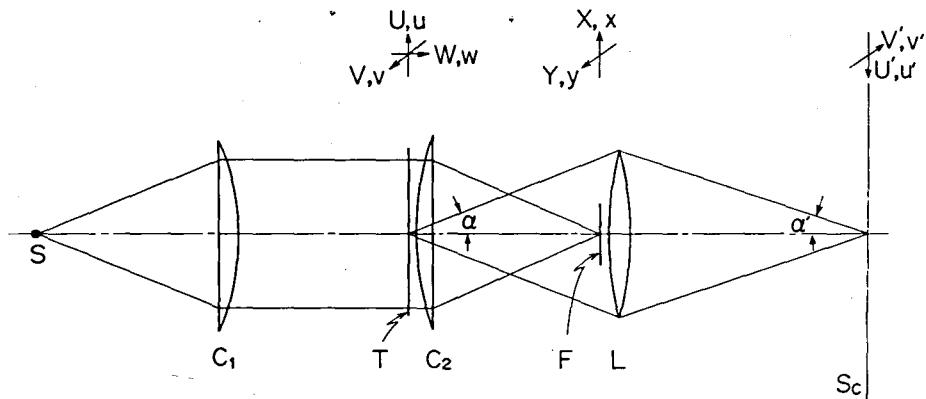


Fig. 2-1 再回折光学およびその座標系

物体と像の関係を簡単にするため式(2-1)の変換座標を用いることとする。

$$\left. \begin{array}{l} u = (k \sin \alpha) U, \quad v = (k \sin \alpha) V \\ u' = (k \sin \alpha') U', \quad v' = (k \sin \alpha') V' \\ x = X/D, \quad y = Y/D \\ x' = X'/D', \quad y' = Y'/D' \end{array} \right\} \quad (2-1)$$

ただし  $k = 2\pi/\lambda$  で  $\lambda$  は光源の波長を示す。大文字は実座標を示し、幾何学的実長を与えるものである。Dは投影レンズの半径、 $D'$ は光源の有効半径である。 $\alpha$ は投影レンズと集光レンズの結合系の開口角、 $\alpha'$ は像側で考えた投影レ

ンズの開口角である。 $(u, v)$  は試料面の座標系、 $(x, y)$  はコリメーターレンズと集光レンズに光源の共軸面すなわち、物体の Fraunhofer 回折面の座標系を示す。 $w$  は試料の厚み方向の座標を示す。結像率を  $m$  とすると、

$$\frac{U'}{U} = \frac{V'}{V} = m \quad (2-2)$$

で与えられるが、式 (2-1) の変換座標を用いると、物体と像とは倍率 1 で対応する。

また投影レンズの入射瞳の周縁は  $x^2 + y^2 = 1$  で与えられる。光源上の  $x'^2 + y'^2 = 1$  の円の外側よりの光線は、コリメーターレンズ、集光レンズで屈折された後、投影レンズに入らないので像形成には関与しない。

Fig. 1-1 の光学系の投影レンズは像面の位置および倍率を規制するためにおかれたものである。したがって投影レンズを欠く光学系でも同じ結像関係が成立する。また収束レンズ  $C_1, C_2$  の 1 つを欠いても物体を収束レンズの瞳面におくと同じ結像関係が得られる。

以下に 1 次元の結像理論について述べる。物体にはコヒーレントな照明を行う。平面光波は位相分布  $*L(u)$  をもった物体を通過すると  $kL(u)$  なる位相のずれを生じる。この transmission function は  $F(u) = \exp \{ ikL(u) \}$  であらわされる。回折理論により Fraunhofer 回折面上の複素振幅  $O(x)$  はレンズ瞳面上の複素振幅  $F(u)$  の Fourier 変換で表わされるので、

$$O(x) = \int F(u) \exp(-ixu) du \quad (2-3)$$

となる。ここで回折面上に振幅透過率が  $m(x)$  で表わされる空間周波数フィルタ

\* ここで用いた物体の位相分布  $L(u)$  は光波の位相に関する光学的厚み分布の意味で、光波の振幅に関するものと区別するために用いた。

をおくと、投影レンズの射出瞳の光波の複素振幅  $O'(x)$  は

$$O'(x) = m(x) \cdot O(x) \quad (2-4)$$

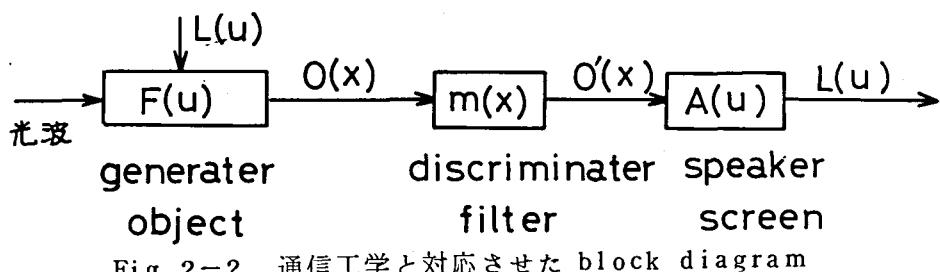
となり、screen 上の複素振幅は式(2-3)と同様にして

$$A(u') = \int O'(x) \exp(i x u') dx \quad (2-5)$$

screen 上の強度分布  $I(u')$  は

$$\begin{aligned} I(u') &= A(u') \cdot A^*(u') \\ &= \iint C(x_1, x_2) O(x_1) O^*(x_2) \exp(ix_1 u') \\ &\quad \cdot \exp(-ix_2 u') dx_1 dx_2 \end{aligned} \quad (2-6)$$

となる。\*印は共軛複素数を示す。 $C(x_1, x_2)$  は光源とレンズを含む伝達系の周波数特性を示し、Hopkins の transmission factor と名づけたものに相当する。 $C(x_1, x_2)$  はこの場合、光源として点光源を考え、かつ投影レンズは無収差と考えているので  $C(x_1, x_2) = 1$  として議論をすゝめる。



本研究の測定原理は Fig. 2-2 に示す様に物体から発振された空間周波数  $k L'(u)$  をもった signal  $F(u)$  を Fraunhofer diffraction plane 上に適当な空間周波数をもった filter を通して同調させ、 screen 上に空間周波数  $k L'(u)$  を取り出そうとするものである。

数学的取扱いの便宜のため試料の位相分布  $L(u)$  を  $u$  に関して若干の小区間に分割する。そして  $j$  番目の区間  $\Delta u_j (u_j - \Delta u_j/2, u_j + \Delta u_j/2)$  で  $L(u)$  を Taylor 展開する。すなわち、

$$L(u) = L(u_j) + L'(u_j)(u - u_j) + R \\ \text{たゞし } R = \frac{L''(\xi)}{2!} (u - u_j)^2 \quad (u_j \leq \xi \leq u) \quad \{ (2-7)$$

で表わす。式 (2-7) の第 2 項までとて Fig. 2-3 に示すように  $L(u)$  を直線で近似する。この区間  $\Delta u_j$  を通過した平面光波の回折像の複素振幅  $O(x)$  は式 (2-3) により次のようになる。

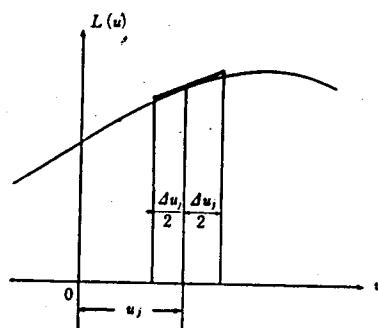


Fig. 2-3  $j$  番目の区間

$\Delta u_j (u_j - \Delta u_j/2, u_j + \Delta u_j/2)$   
における位相分布  $L(u)$  の  
直線近似

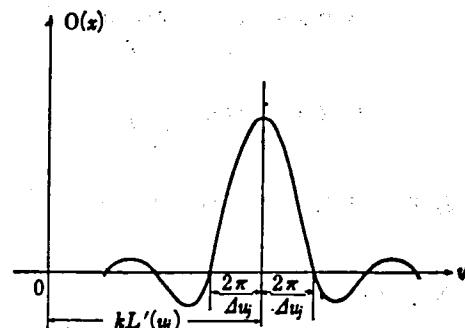


Fig. 2-4 式 (2-8) で表

わされ Fraunhofer 回  
折像の振幅分布

$$\begin{aligned}
O(x) &= \int_{u_j - \frac{4u_j}{2}}^{u_j + \frac{4u_j}{2}} \exp[i k \{ L(u_j) + L'(u_j)(u - u_j)\}] \exp(-ixu) du \\
&= \left| \frac{\exp i \{ k \{ L(u_j) - u_j L'(u_j) \} + \{ k L'(u_j) - x \} \}}{i \{ k L'(u_j) - x \}} \right| \frac{u_j + \frac{4u_j}{2}}{u_j - \frac{4u_j}{2}} \\
&= 2 \exp i \{ k L(u_j) - x u_j \} \frac{\sin \{ x - k L'(u_j) \} \cdot \frac{4u_j}{2}}{x - k L'(u_j)} \quad (2-8)
\end{aligned}$$

この式よりわかるように、回折像  $O(x)$  の振幅分布は  $x = k L'(u_j)$  を中心位置として Fig. 2-4 のように生じる。すなわち回折像の中心位置は位相勾配に比例し

$$x = k L'(u_j) \quad (2-9)$$

で与えられる。

これを式(2-1)により実座標に直すと

$$\begin{aligned}
L'(U) &= \frac{d}{dU} \{ L(k \sin \alpha \cdot U) \} \\
&= k \sin \alpha \cdot L'(k \sin \alpha \cdot U) \\
&= k \sin \alpha \cdot L'(u) \quad (2-10)
\end{aligned}$$

となり、また  $x = X/D$ ,  $\sin \alpha = D/f$  であるから式(2-9)は、

$$X = f \cdot L'(U) \quad (2-11)$$

となる。たゞし  $f$  は集光レンズの焦点距離である。

次に式(2-7)における剩余項  $R$  の影響を考察する。区間  $4u_j$  が十分小さいときは、剩余項  $R$  内で、

$$L''(\xi) \doteq L''(u_j) = \text{const} (\neq 0) \quad (2-12)$$

とみなすことができる。これは区間  $\Delta u_j$  内で放物線による近似を行なったことになる。このとき式 (2-3) を用いて回折像の複素振幅を計算すると次のようになる。

$$O(x) = \int_{u_j - \Delta u_j / 2}^{u_j + \Delta u_j / 2} \exp i k [ L(u_j) + L'(u_j)(u - u_j) + \frac{L''(u_j)}{2!} (u - u_j)^2 ] \cdot \exp(-ixu) du$$

ここで

$$\begin{aligned} \frac{k L''(u_j)}{2j} &= a, \quad k \{ L'(u_j) - L'(u_j) u_j \} - x = b, \\ k \{ L(u_j) - L'(u_j) u_j + \frac{L''(u_j)}{2!} u_j^2 \} &= c \end{aligned}$$

とおくと

$$\begin{aligned} O(x) &= \int \exp i (au^2 + bu + c) du \\ &= \int \exp i \{ a(u + \frac{b}{2a})^2 + \frac{b^2}{4a} + c \} du \\ &= \exp \{ i(c - \frac{b^2}{4a}) \} \int \exp i \{ a(u + \frac{b}{2a})^2 \} du \\ &= \exp \{ i(c - \frac{b^2}{4a}) \} \left[ \int \cos a(u + \frac{b}{2a})^2 du + i \int \sin a(u + \frac{b}{2a})^2 du \right] \\ &= \sqrt{\frac{\pi}{2a}} \exp \{ i(c - \frac{b^2}{4a}) \} \left[ \left\{ \cos \frac{b^2}{4a} - i \sin \frac{b^2}{4a} \right\} \right. \\ &\quad \left. \cdot \left\{ c \left( \sqrt{\frac{2a}{\pi}} (u_j + \frac{\Delta u_j}{2} + \frac{b}{2a}) \right) - c \left( \sqrt{\frac{2a}{\pi}} (u_j - \frac{\Delta u_j}{2} + \frac{b}{2a}) \right) \right\} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \left\{ \sin \frac{b^2}{4a} + i \cos \frac{b^2}{4a} \right\} \cdot \left\{ S \left( \sqrt{\frac{2a}{\pi}} \left( u_j + \frac{4u_j}{2} + \frac{b}{2a} \right) \right. \right. \\
& \quad \left. \left. - S \left( \sqrt{\frac{2a}{\pi}} \left( u_j - \frac{4u_j}{2} + \frac{b}{2a} \right) \right) \right) \right] \\
& = \sqrt{\frac{\pi}{k L''(u_j)}} \cdot \exp \left[ -i \left\{ \frac{1}{2kL''(u_j)} x^2 + \left( u_j - \frac{L'(u_j)}{L''(u_j)} \right) x - k L(u_j) \right\} \right] \\
& \quad \cdot \left[ \left\{ c \left( \sqrt{\frac{1}{k L''(u_j) \pi}} x - k L'(u_j) - k L''(u_j) \cdot 4u_j/2 \right) \right. \right. \\
& \quad \left. \left. - c \left( \sqrt{\frac{1}{k L''(u_j) \pi}} x - k L'(u_j) + k L''(u_j) \cdot 4u_j/2 \right) \right) \right. \\
& \quad \left. + i \left\{ S \left( \sqrt{\frac{1}{k L''(u_j) \pi}} x - k L'(u_j) + k L''(u_j) \cdot 4u_j/2 \right) \right. \right. \\
& \quad \left. \left. - S \left( \sqrt{\frac{1}{k L''(u_j) \pi}} x - k L'(u_j) + k L''(u_j) \cdot 4u_j/2 \right) \right) \right] \quad (2-13)
\end{aligned}$$

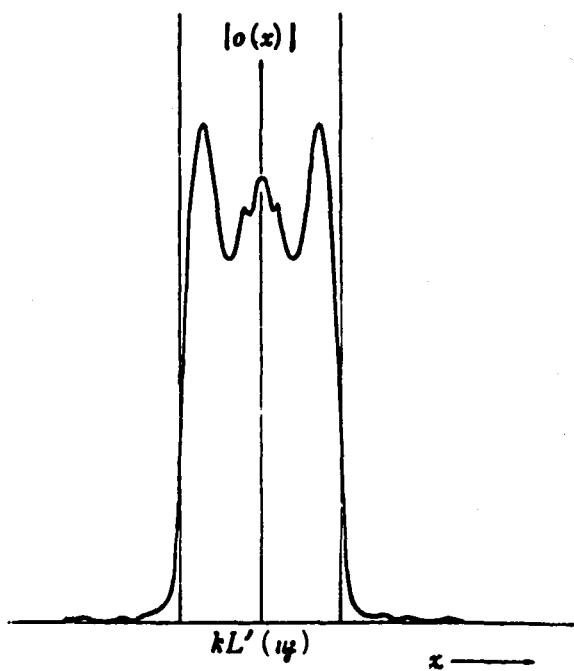
ここで  $S(x)$ ,  $c(x)$  は Fresnel 積分で

$$\begin{aligned}
S(x) &= \int_0^x \sin \left( \frac{\pi}{2} t^2 \right) dt \\
c(x) &= \int_0^x \cos \left( \frac{\pi}{2} t^2 \right) dt \quad (2-14)
\end{aligned}$$

で示される。式 (2-13) の関数で示される回折像の振幅分布を図示すると Fig. 2-5 のようになる。図からわかるように回折像  $x = k L'(u_j)$  を中心にもつことがわかる。したがって  $L''(\xi) = L''(u_j)$  とみなせるような区間  $4u_j$  を通過する半波の回折像の中心は位相勾配に比例すると考えられる。すなわち式 (2-11) の関係は、式 (2-7) の剩余項を考慮して Taylor 展開の第 3 項までとっても成立するとみなすことができる。

Fig. 2-5 式(2-13)に

示される回折像の振幅分布



## 2-2 各種の空間周波数フィルタの測定原理

以下に Fraunhofer diffraction plane 上に各種の空間周波数フィルタを用いて位相勾配  $kL'(u)$  を検出する方法について述べる。

### 2-2-1 sharp cut off amplitude filter

試料の位相分布  $L(u)$  を奇関数と偶関数の和にわけて、

$$L(u) = L_o(u) + L_e(u) \quad (2-15)$$

と書きかえる。ここで添字  $o$ ,  $e$  は夫々奇関数および偶関数を示す。

この物体を通過した平面光波の位相は

$$F(u) = \exp i k \{ L_o(u) + L_e(u) \} \quad (2-16)$$

となる。この回折像の複素振幅は式(2-3)より

$$\begin{aligned} O(x) &= \int \exp i k \{ L_o(u) + L_e(u) \} \exp(-ixu) du \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} [ \{ \cos k L_e(u) \cdot \cos k L_o(u) - \sin k L_e(u) \cdot \sin k L_o(u) \} \\ &\quad + i \{ \sin k L_e(u) \cdot \cos k L_o(u) - \cos k L_e(u) \cdot \sin k L_o(u) \} ] \\ &\quad \cdot \exp(-ixu) du \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \{ \cos k L_e(u) + \sin k L_e(u) \} \cos k L_o(u) \cdot \cos x u du \\ &= i \int_{-\infty}^{\infty} \{ \sin k L_e(u) + \cos k L_e(u) \} \sin k L_o(u) \cdot \sin x u du \end{aligned} \quad (2-17)$$

となる。

式(2-17)において、第1項は  $x$  に関して偶関数となるので

$$O(x) = O_e(x) + i O_o(x) \quad (2-18)$$

と書くことができる。いま回折面上で光軸に関して片側を sharp cut off amplitude filter で遮断する。

すなわち

$$\left. \begin{array}{ll} m(x) = 1 & x > 0 \\ & \\ = 0 & x \leq 0 \end{array} \right\} \quad (2-19)$$

なる透過率のフィルタをおくと像面の振幅分布  $A(u)$  は式(2-5)から

$$\begin{aligned}
A(u') &= \int_0^\infty O(x) \exp i x u' dx \\
&= \int_0^\infty \left[ \{ O_e(x) \cos x u' - O_o(x) \sin x u' \} \right. \\
&\quad \left. + i \{ O_o(x) \cos x u' + O_e(x) \sin x u' \} \right] dx \quad (2-20)
\end{aligned}$$

となる。式(2-20)で第1項の積分は  $\frac{1}{2}\{O(x)$  の Fourier 積分 } で、第2項は  $-\frac{1}{2}\{O(x)$  の球積積分 } に等しい。よって

$$A(u') = \frac{1}{2} \{ \Gamma(u') - i \Gamma_Q(u') \} \quad (2-21)$$

と書くことができる。たゞし

$$\left. \begin{array}{l} \Gamma_Q(u') = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\Gamma_Q(u)}{u-u'} du \\ \Gamma(u') = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\Gamma_Q(u)}{u-u'} du \end{array} \right\} \quad (2-22)$$

なる関係がある。ここで  $\Gamma_Q(u')$  は  $\Gamma(u')$  の球積関数で、互に Hilbert 変換の関係である。

$$\left. \begin{array}{l} \Gamma(u') = \varphi(u') + i \chi(u') \\ \Gamma_Q(u') = \varphi_Q(u') + i \chi_Q(u') \end{array} \right\} \quad (2-23)$$

とおくと式(2-21)は

$$\begin{aligned}
A(u') &= \frac{1}{2} \{ \varphi(u') + i \chi(u') \} + \frac{1}{2} \{ \varphi_Q(u') + i \chi_Q(u') \} \\
&= \frac{1}{2} \{ (\varphi(u') - \chi_Q(u')) + i (\chi(u') + \varphi_Q(u')) \} \quad (2-24)
\end{aligned}$$

となる。式(2-24)により、像の強度  $I(u')$  を求めると、

$$\begin{aligned}
I(u') &= |A(u')^* A(u')| \\
&= \frac{1}{4} [\{\varphi(u') - \chi_Q(u')\}^2 + \{\chi(u') + \varphi_Q(u')\}^2] \\
&= \frac{1}{4} [\{\cos kL(u') - \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin kL(u)}{u-u'} du\}^2 \\
&\quad + \{\sin kL(u') + \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\cos kL(u)}{u-u'} du\}^2] \\
&= \frac{1}{4} [1 - 2 \{\cos kL(u') \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin kL(u)}{u-u'} du \\
&\quad - \sin kL(u') \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\cos kL(u)}{u-u'} du\} \\
&\quad + \{\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin kL(u)}{u-u'} du\}^2 + \{\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\cos kL(u)}{u-u'} du\}^2] (2-25)
\end{aligned}$$

となる。いま  $L(u)$  が  $\lambda/\pi$  に比べて小さいとき

$$\left. \begin{array}{l} \cos kL(u) \approx 1 \\ \sin kL(u) \approx kL(u) \end{array} \right\} (2-26)$$

と近似できるので式(2-25)は

$$I(u') = \frac{1}{4} [1 - 2k \int_{-\infty}^{\infty} \frac{L(u)}{u-u'} du] (2-27)$$

となる。 $L(u)$  に関して解くと定数係数は別として

$$L(u) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{I(u')}{u-u'} du' (2-28)$$

で与えられる、すなわち物体の位相差が光の波長にくらべて小さいときは式(2-28)を用いて強度分布を Hilbert 変換して試料の位相分布を近似的に求めることができる。この近似による誤差は位相差が小さければ小さい程少ない

といふことがいえる。なおこのフィルタの特性をまとめた結果を Table 2-1 に示す。

### 2-2-2 Sharp cut off amplitude filter scanning法

Fraunhofer 回折面上に

$$\left. \begin{array}{ll} m(x) = 1 & (x \geq k L'(u_j) - K \cdot 2\pi / \Delta u_j) \\ m(x) = 0 & (x < k L'(u_j) - K \cdot 2\pi / \Delta u_j) \end{array} \right\} \quad K > 0 \quad (2-29)$$

なるフィルタをおいたとき式(2-8)の回折像による結像面上の像の強度分布は式(2-5)を用いて計算すると次のようになる。

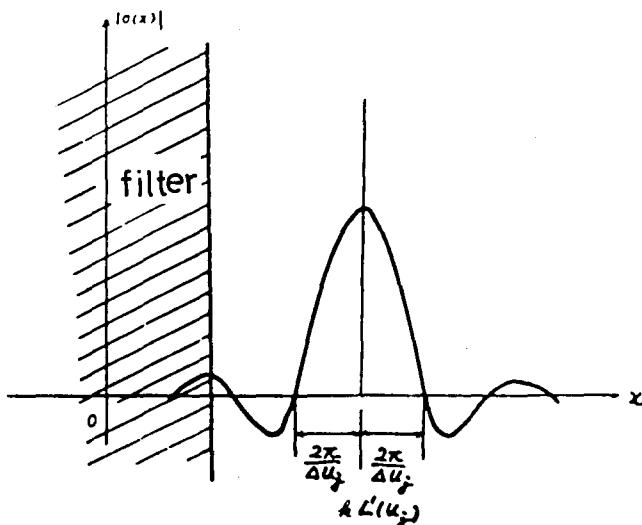


Fig. 2-5 Fraunhofer 回折面上で回折像に対する  
フィルタの位置

$$\begin{aligned}
A(u') &= \int_{kL'(u_j) - K(2\pi/\Delta u_j)}^{\infty} \exp i \{ kL(u_j) - x u_j \} \\
&\quad \cdot \frac{\sin \{ x - kL'(u_j) \} \cdot \Delta u_j / 2}{x - kL'(u_j)} \cdot \exp (-i u' x) dx \\
&= 2 \exp i kL(u_j) \int_{kL'(u_j) - K(2\pi/\Delta u_j)}^{\infty} \exp i (u' - u_j) x \\
&\quad \cdot \frac{\sin \{ x - kL'(u_j) \} \cdot \Delta u_j / 2}{x - kL'(u_j)} dx \exp i \{ kL(u_j) + u_j u' + u_j k L'(u_j) \} \\
&\quad \cdot \left[ \left\{ S_i \left( u' - u_j + \frac{\Delta u_j}{2} \cdot K \frac{2\pi}{\Delta u_j} \right) + \frac{\pi}{2} \right\} \right. \\
&\quad \quad \left. - \left\{ S_i \left( u' - u_j - \frac{\Delta u_j}{2} \cdot K \frac{2\pi}{\Delta u_j} \right) + \frac{\pi}{2} \right\} \right] \\
&- i \left[ C_i \left( u' - u_j - \frac{\Delta u_j}{2} \cdot K \frac{2\pi}{\Delta u_j} \right) - C_i \left( u' - u_j + \frac{\Delta u_j}{2} \cdot K \frac{2\pi}{\Delta u_j} \right) \right]
\end{aligned}$$

( 2-30 )

故に強度分布  $I(u')$  は

$$I(u') = [S_i(u' - u_j + \frac{\Delta u_j}{2} \cdot K \frac{2\pi}{\Delta u_j}) - S_i(u' - u_j - \frac{\Delta u_j}{2} \cdot K \frac{2\pi}{\Delta u_j})]^2 \\ + [C_i(u' - u_j + \frac{\Delta u_j}{2} \cdot K \frac{2\pi}{\Delta u_j}) - C_i(u' - u_j - \frac{\Delta u_j}{2} \cdot K \frac{2\pi}{\Delta u_j})]^2$$

( 2 - 31 )

となる。ここで  $S_i(u')$ ,  $C_i(u')$  は夫々正弦積分関数, 余弦積分関数で次式で示される。

$$\left. \begin{aligned} S_i(u') &= \int_0^{u'} \frac{\sin u'}{u'} du' \\ C_i(u') &= - \int_{u'}^{\infty} \frac{\cos u'}{u'} du' \end{aligned} \right\} \quad (2-32)$$

式(2-30)で与えられる関数をグラフに示すとFig. 2-6のようになる。図

から判断して像は区間  $(u_j' - \Delta u_j/2, u_j + \Delta u_j/2)$  内に結像することがわかる。すなわち試料面上の区間  $\Delta u_j$  に対応した像面の区間  $\Delta u_j$  内に結像しているこ

とがわかる。Fraun

hofer 回折面上に

式 (2-29) のフィルタをおくとき、 $K$  が小さい程すなわちフィルタによって回折像が遮られる割合が大きくなるにつれて像の鮮鋭度は失われ、像の強度分布はひろがり、遂にコントラストを認めがたくなる。そしておよそ  $K \geq 1$  のときすなわち第 1 暗線以上の回折像が通過されるとき像面上で  $\Delta u_j$  の区間内の像のコント

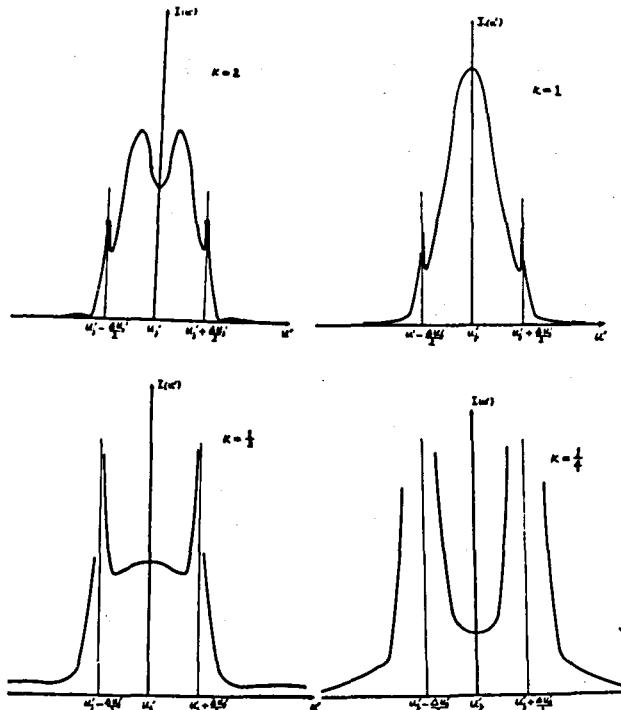


Fig. 2-6 式 (2-29) における  $K$  の種々の値に対応するフィルタ位置のとき得られる像の強度分布

ラストは明瞭に認められると考えてよい。この結果は点光源の場合である。

光源として線光源を用い、sharp cut off amplitude filter の端を線光源に平行におく場合には線光源上の各点から出た光による 1 次元結像が積み重ねられるので、実際に得られた 2 次元像の線光源に直角方向の各断面につ

いて理論的考察を適用することができる。

コンデンサーレンズの入射瞳におかれた位相分布  $L(u)$  の試料の回折像  $\Delta u_j$  每の各区間によって生じた回折像の和とみなすことができる。回折像のそれぞれの成分は、夫々の区間  $\Delta u_j$  内の位相勾配  $L'(u)$  に比例した位置に存在すると考えられる。したがって Fraunhofer 回折面上に式(2-29)に示すフィルタをおくとき、フィルタの端の位置  $X$  に対応する  $L'(u)$  より大なる位相勾配を有する部分のみ結像し像面にコントラストを生じる。このことは試料面上で線光源に直角方向のどの断面についていえるので、像の輪郭は等位相勾配曲線をあらわすと考えられる。そして像の輪郭線上の位相勾配の値  $L'(u)$  はフィルタ端の位置  $X$  を読みとり式(2-11)に代入して計算することができる。なおこのフィルターの特性をまとめて後に Table 2-1 に示す。

### 2-2-3 grid sharp cut off amplitude filter

Fraunhofer 回折面上に明暗の格子状のフィルタをおき、spectrum を遮蔽することにより空間周波数  $x = k L'(u)$  に対応する格子の輪郭を像面上に得る方法である。計算上かんたんのためフィルタとして格子間隔  $2K$  の 1 コの格子を考えるとその振幅透過率は、

$$m(x) = \begin{cases} 1 & k L'(u_j) - K \leq x \leq k L'(u_j) + K \\ 0 & x \leq k L'(u_j) - K \quad k L'(u_j) + K \leq x \end{cases} \quad (2-33)$$

と表わされる。これを用いた時像面上の複素振幅は

$$A(u') = \int_{-\infty}^{\infty} m(x) O(x) \exp(i x u') dx$$

$$\begin{aligned}
&= \int \frac{k L'(u_j) + K}{k L'(u_j) - K} \exp i \{ k L(u_j) - x u_j + x u' \} \\
&\quad \cdot \frac{\sin \{ x - k L'(u_j) \} \Delta u_j / 2}{x - k L'(u_j)} dx \\
&= 2 \exp i k \{ L(u_j) - L'(u_j) u_j + L'(u_j) u'_j \} \\
&\quad \cdot [ S_i(u' - u_j + \frac{\Delta u_j}{2} \cdot K) - S_i(u' - u_j - \frac{\Delta u_j}{2} \cdot K) ] \quad (2-34)
\end{aligned}$$

像の強度は

$$\begin{aligned}
I(u') &= A(u') A^*(u') = 4 [ S_i(u' - u_j + \frac{\Delta u_j}{2} \cdot K) \\
&\quad - S_i(u' - u_j - \frac{\Delta u_j}{2} \cdot K) ]^2 \\
&\equiv 4 [ H(u') ]^2 \quad (2-35)
\end{aligned}$$

$H(u')$  を Fig. 2-6 に示す。

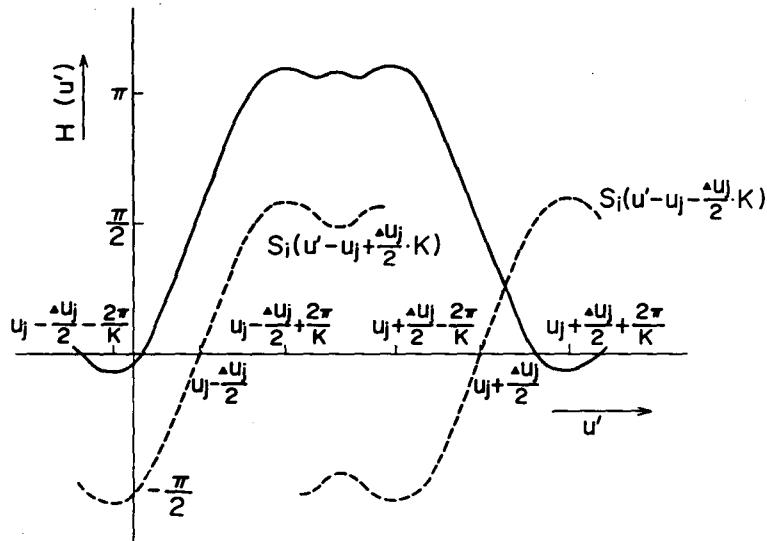


Fig. 2-6 式(2-35)で表わされる像面上の振幅分布  $H(u')$

ここで  $K$  を大きく  $H(u'_j)$  の曲線の立ち上がりが急になり ( $u_j - \frac{\Delta u_j}{2}, u_j + \frac{\Delta u_j}{2}$ ) 内に  $x = k L'(u_j)$  に対応した鮮鋭な格子の輪郭の像を生じる。  $K$  を小さくすると  $H(u')$  の曲線は ( $u_j - \frac{\Delta u_j}{2}, u_j + \frac{\Delta u_j}{2}$ ) の外に広がり、像の鮮鋭さが失われる。鮮鋭な像を生じるためには少なくとも spectrum の第 1 最小点を通す格子定数  $K = \frac{2\pi}{\Delta u_j}$  が必要である。

#### 2-2-4 linear amplitude filter

Fraunhofer 回折面上に

$$m(x) = Kx + H \quad (2-36)$$

なる振幅透過率が直線的に変化する linear amplitude filter を插入する。ここで  $K$  は wedge constant とよばれる定数で、  $H$  は  $|x| \leq 1$  で  $m(x) \geq 0$  になるような定数である。このとき、試料面の区間  $\Delta u_j$  を通過する光波の回折像はフィルタを通過した後式 (2-4), (2-8) を用いて

$$\begin{aligned} O(x) &= (Kx + H) \cdot 2 \exp i \{ k L(u_j) - x u_j \} \\ &\cdot \frac{\sin \{ x - k L'(u_j) \} \Delta u_j / 2}{x - k L'(u_j)} \end{aligned} \quad (2-37)$$

となる。この回折像による像面の振幅分布は式 (2-5) を用いて

$$\begin{aligned} A(u') &= \int_{-1}^1 m(x) \cdot O(x) \exp \{ ix u' \} dx \\ &= 2K \int_{-1}^1 x \cdot \exp i \{ k L(u_j) - x u_j + x u' \} \\ &\cdot \frac{\sin \{ x - k L'(u_j) \} \cdot \Delta u_j / 2}{x - k L'(u_j)} \end{aligned}$$

$$+ 2H \int_{-1}^1 \exp i \{ kL(u_j) - xu_j + x u' \} \cdot \frac{\sin \{ x - kL'(u_j) \} \cdot \Delta u_j / 2}{x - kL'(u_j)} dx \quad (2-38)$$

ここで  $x - kL'(u_j) = X$ ,  $\Delta u_j / 2 = \Delta$  とおくと第1項は

$$\begin{aligned} \text{第1項} &= 2K \int_{-1-kL'(u_j)}^{1-kL'(u_j)} \{ X + kL'(u_j) \} \\ &\quad \cdot \exp i \{ kL(u_j) - Xu_j - kL'(u_j)u_j + Xu' + kL'(u_j)u' \} \frac{\sin X\Delta}{X} dX \\ &= K \cdot \exp i k \{ L(u_j) - L'(u_j)u_j + L'(u_j)u' \} \\ &\quad \cdot [ \int \{ \sin(u' - u_j + \Delta) - \sin(u' - u_j - \Delta) X \} dX \\ &\quad - i \int \{ \cos(u' - u_j + \Delta) X - \cos(u' - u_j - \Delta) X \} dX \\ &\quad + kL'(u_j) \int \frac{\sin(u' - u_j + \Delta) X - \sin(u' - u_j - \Delta) X}{X} dX \\ &\quad - i kL'(u_j) \int \frac{\cos(u' - u_j + \Delta) X - \cos(u' - u_j - \Delta) X}{X} dX ] \end{aligned}$$

となる。この式の始めの2項は投影レンズの口径が十分大きければほとんど0に近い。したがって、

$$\begin{aligned} \text{第1項} &\doteq K \cdot \exp i k \{ L(u_j) - L'(u_j)u_j + L'(u_j)u' \} \\ &\quad \cdot kL'(u_j) [ \int \frac{\sin(u' - u_j + \Delta) X - \sin(u' - u_j - \Delta) X}{X} dX \\ &\quad - i \int \frac{\cos(u' - u_j + \Delta) X - \cos(u' - u_j - \Delta) X}{X} dX ] \quad (2-39) \end{aligned}$$

と考えてよい。第2項も同じように積分変数を変換すると、

$$\begin{aligned}
\text{第2項} &= 2H \int_{-1-kL'(u_j)}^{1-kL'(u_j)} \left\{ kL(u_j) - kL'(u_j) u_j - Xu_j \right. \\
&\quad \left. + kL'(u_j) u' + Xu' \right\} \cdot \frac{\sin X\Delta}{X} dX \\
&= H \cdot \exp ik \{ L(u_j) - L'(u_j) u_j + L'(u_j) u' \} \\
&\quad \cdot \left[ \int \frac{\sin(u' - u_j + \Delta)X - \sin(u' - u_j - \Delta)X}{X} dX \right. \\
&\quad \left. - i \int \frac{\cos(u' - u_j + \Delta)X - \cos(u' - u_j - \Delta)X}{X} dX \right] \\
&\quad (2-40)
\end{aligned}$$

となる。式(2-39), (2-40)を式(2-38)に代入すると像の振幅分布  $A(u')$  は、

$$\begin{aligned}
A(u') &= \{ K \cdot kL'(u_j) + H \} \exp ik \{ L(u_j) - L'(u_j) u_j + L'(u_j) u' \} \\
&\quad \cdot \left[ \int \frac{\sin(u' - u_j + \Delta)X - \sin(u' - u_j - \Delta)X}{X} dX \right. \\
&\quad \left. - i \int \frac{\cos(u' - u_j + \Delta)X - \cos(u' - u_j - \Delta)X}{X} dX \right] \\
&= \{ K \cdot kL'(u_j) + H \} \exp ik \{ L(u_j) - L'(u_j) u_j + L'(u_j) u' \} \\
&\quad \cdot \left[ \{ S_i(u' - u_j + \Delta/2 \cdot 1 - kL'(u_j)) \right. \\
&\quad \quad \left. - S_i(u' - u_j + \Delta/2 \cdot -1 - kL'(u_j)) \} \right. \\
&\quad \left. - \{ S_i(u' - u_j + \Delta/2 \cdot 1 - kL'(u_j)) \right. \\
&\quad \quad \left. - S_i(u' - u_j + \Delta/2 \cdot -1 - kL'(u_j)) \} \right. \\
&\quad \left. - i \{ Ci(u' - u_j - \Delta/2 \cdot 1 - kL'(u_j)) \right. \\
&\quad \quad \left. - Ci(u' - u_j - \Delta/2 \cdot -1 - kL'(u_j)) \} \right]
\end{aligned}$$

$$-C_i(u' - u_j + \Delta u_j/2 \cdot -1 - kL'(u_j)) \} \\ (2-41)$$

で与えられる。式(2-41)を式(2-6)に代入して像の強度分布  $I(u')$  を計算すると、

$$I(u') = \{ K \cdot k L'(u_j) + H \}^2 \\ \cdot \left[ \begin{aligned} & \{ S_i(u' - u_j + \Delta u_j/2 \cdot 1 - k L'(u_j)) \\ & - S_i(u' - u_j + \Delta u_j/2 \cdot -1 - k L'(u_j)) \} \\ & - \{ S_i(u' - u_j - \Delta u_j/2 \cdot 1 - k L'(u_j)) \\ & - S_i(u' - u_j - \Delta u_j/2 \cdot -1 - k L'(u_j)) \}^2 \\ & + \{ C_i(u' - u_j + \Delta u_j/2 \cdot 1 - k L'(u_j)) \\ & - C_i(u' - u_j + \Delta u_j/2 \cdot -1 - k L'(u_j)) \} \\ & - \{ C_i(u' - u_j - \Delta u_j/2 \cdot 1 - k L'(u_j)) \\ & - C_i(u' - u_j - \Delta u_j/2 \cdot -1 - k L'(u_j)) \} \} \end{aligned} \right]^2 \\ (2-42)$$

となる。ここで  $S_i(u')$ ,  $C_i(u')$  は夫々正弦積分関数および余弦積分関数である。式(2-42)で  $\left[ \quad \right]$  の中は式(2-32)の積分区間の異なるものに相当し、物理的にはフィルタを挿入しないときの像の強度分布を示している。そして式(2-32)と式(2-42)との積分限界は異なるが式(2-8)で示され回折像の収束は早いため積分値は程んど変らず Fig. 2-6 の関数形に近いと考える。

えられる。したがってフィルタの挿入の効果は、フィルタのない場合と比較して、像の強度が  $\{K \cdot k L'(u_j) + H\}^2$  倍になっていることが、式(2-42)よりわかる。

一方像の強度が  $I(u')$  のとき、写真フィルムのラチチュード内で一定時間露光して得られた写真像の濃度を測光したとき、光电流の分布  $i(u')$  とすると、

$$E(u') = \text{const} \cdot i(u')^{-\frac{1}{r}} \quad (2-43)$$

$r$  : フィルムのガンマ

なる関係がある。露光量  $E(u')$  は、露光時間が一定ならば強度  $I(u')$  に比例するので式(2-43)より

$$I(u') = \text{const} \cdot i(u')^{-\frac{1}{r}} \quad (2-44)$$

なる関係が得られる。式(2-42)と式(2-44)より

$$K_f L'(U) + H = C \cdot i(u')^{-\frac{1}{2r}} \quad (2-45)$$

が成立する。ただし  $f$  は収束レンズの焦点距離、  $C$  は比例定数である。式(2-45)より写真像の測光により位相勾配  $L'(U)$  を求めることができる。

式(2-32)に示すフィルタのかわりに強度透過率が直線的に変化する光学楔を回折面に挿入しても同じように論じられる。この場合フィルタの振幅透過率  $m(x)$  は

$$m(x) = \sqrt{Kx + H} \quad (2-46)$$

したがって式(2-42)に相当する像の強度分布は  $\{K \cdot k L'(u_j) + H\}$  に比例するので式(2-45)は

$$K \cdot f_j \cdot L'(U) + H = C \cdot i(u')^{-\frac{1}{r}} \quad (2-47)$$

よって振幅透過率が直線的に変化する光学楔に限らず透過光量のエネルギー分布が直線的に変化するものを用いても同様に測定できる。なおこのフィルタの特性をまとめて Table 2-1 に示す。

### 2-2-5 sine amplitude filter

サイン状の濃淡フィルタを用いて像の強度を測定することにより  $kL'(u_j)$  を定量する。

今 Fraunhofer 回折面上に振幅透過率

$$m(x) = a \sin bx + h \quad (2-48)$$

のサイン状フィルタを用いる。 $h$  は一定であるから積分領域が広い場合、直流成分となり初項だけを考えればよい。

$$\begin{aligned} A(u') &= \int_a^{\beta} 2a \sin bx \exp i \{ kL(u_j) - xu_j + xu' \} \\ &\quad \cdot \frac{\sin \{ x - kL'(u_j) \} \Delta u_j / 2}{x - kL'(u_j)} dx \\ &= \frac{1}{2} \exp i k ( L(u_j) - u_j L'(u_j) + u' L'(u_j) ) \\ &\quad \times [ -\exp i b k L'(u_j) \{ C_i (u' - u_j + b + \Delta u_j / 2 \cdot x) \\ &\quad + i S_i (u' - u_j + b + \Delta u_j / 2 \cdot x) \} \\ &\quad + \exp -i b k L'(u_j) \{ C_i (u' - u_j - b - \Delta u_j / 2 \cdot x) \\ &\quad + i S_i (u' - u_j - b - \Delta u_j / 2 \cdot x) \} ] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \exp - i b k L'(u_j) \{ C_i ( u' - u_j - b + \Delta u_j / 2 \cdot X ) \\
& \quad + i S_i ( u' - u_j - b - \Delta u_j / 2 \cdot X ) \} \\
& - \exp i b k L'(u_j) \{ C_i ( u' - u_j + b - \Delta u_j / 2 \cdot X ) \\
& \quad + i S_i ( u' - u_j + b - \Delta u_j / 2 \cdot X ) \} ]_{\alpha - k L'(u_j)}^{\beta - k L'(u_j)} \\
& \quad (2-49)
\end{aligned}$$

$\Delta u_j / 2 \gg b$  に取れば、

$$\begin{aligned}
I(u') & \doteq A(u') A^*(u') \\
& = a^2 \sin^2 b k L'(u_j) \{ C_i ( u' - u_j + \Delta u_j / 2 \cdot \beta - k L'(u_j) ) \\
& \quad - C_i ( u' - u_j + \Delta u_j / 2 \cdot \alpha - k L'(u_j) ) \\
& \quad + C_i ( u' - u_j + \Delta u_j / 2 \cdot \beta - k L'(u_j) ) \\
& \quad - C_i ( u' - u_j + \Delta u_j / 2 \cdot \alpha - k L'(u_j) ) \\
& \quad + S_i ( u' - u_j + \Delta u_j / 2 \cdot \beta - k L'(u_j) ) \\
& \quad - S_i ( u' - u_j + \Delta u_j / 2 \cdot \alpha - k L'(u_j) ) \\
& \quad + S_i ( u' - u_j + \Delta u_j / 2 \cdot \beta - k L'(u_j) ) \\
& \quad - S_i ( u' - u_j - \Delta u_j / 2 \cdot \alpha - k L'(u_j) ) \quad (2-50)
\end{aligned}$$

積分領域が広い場合

$$I(u') \propto C \cdot \sin^2 \{ b k L'(u_j) \} \quad (2-51)$$

したがって  $m(x) = a \sin bx$  (ただし  $b \leq 4u_j/2$ ) のフィルタを用いれば、像の強度は  $\sin^2 b k L'(u_j)$  に比例して表われる。式(2-44)と式(2-51)から位相勾配と光電流  $i(u')$  の関係は

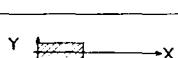
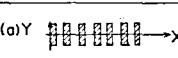
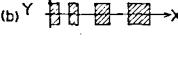
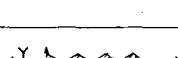
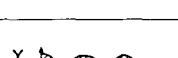
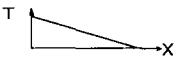
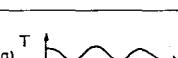
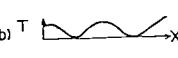
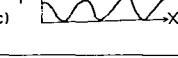
$$A \sin^2 b k L'(u_j) + H = \text{const} \times \{ i(u') \}^{-\frac{1}{r}} \quad (2-52)$$

$i(u')$  を測定すれば式(2-52)から  $k L'(u_j)$  が求まる。

## 2 - 3 各種空間周波数フィルタの特性結果

Fraunhofer回折面上に各種空間周波数フィルタを試みた結果、その特性について Table 2-1 に示す。

Table 2-1 各種空間周波数フィルタの特性

	Filter の 名 称	Filter の 種 類	測 定 法	特 性
1	sharp cut off amplitude filter		スペクトルの遮蔽の違いを利用し像の強度を測定	遮蔽に限界がある、小さい勾配の測定可、動的2次元測定可
2	sharp cut off amplitude scanning filter		スペクトルの遮蔽位置に対する像の輪郭を利用する	filter scan のため動的測定不可、2次元測定可
3	grid cut off filter (a) equal pitch (b) gradient pitch	(a)  (b) 	格子遮蔽位置に対応する像の縞次数測定 位相勾配変化のところで 3 (a) の pitch を粗くとり回折効果減少す	回折効果のため像がぼける、粗い位相勾配測定可、動的2次元測定可、特殊 filter、動的2次元測定可、広領域位相勾配測定可
4	triangular space cut off filter		3 (a) の回折効果少なくするため、スペクトルの遮蔽の違いを利用し像の強度を測定	動的1次元測定可
5	diagonal space cut off filter (a) equal pitch (b) gradient pitch	(a)  (b) 	4 をより精度良く広領域にするためにおり返し像の強度測定 3 (b) と同様に gradient pitch を用いた	広領域位相勾配精度よく測定可、縞から粗い位相勾配測定可、動的1次元測定可
6	sine space cut off filter (a) equal pitch (b) gradient pitch	(a)  (b) 	5 の回折効果を少なくするためにサイン状に連続させた	広領域位相勾配精度よく測定可、縞から粗い位相勾配測定可、動的1次元測定可
7	linear amplitude filter		3 (a) の回折効果少なくするため linear amplitude filter を用いた像の強度測定	動的2次元測定可
8	sine amplitude filter (a) equal pitch (b) gradient pitch (c) unsymmetrical equal pitch	(a)  (b)  (c) 	広領域にするために sine amplitude filter を用いた像の強度測定 3 (b) と同様に gradient pitch を用いた 比較的大きい周期を有する位相を測定するため (a) を非対称にする	広領域位相勾配精度よく測定可、動的2次元測定可、縞から粗い位相勾配測定可

T: 透過率, 1~6 のフィルター: 遮蔽フィルター, 7, 8 のフィルター: 濃淡フィルター

Table 2-1について2-2節で述べたことは省略し、これ以外のものについてのべる。

3 grid cut off filter (b) gradient pitch (a) の equal pitch のフィルタでは、格子間隔を小さくすると回折効果のために像がぼやけ縞次数が解らないので定量できなくなる。また格子間隔を大きくすると位相勾配変化の大きいところで分解するようになるが、小さいところで得られる情報が少なくなってしまう。適当な格子幅が必要である。そこで gradient pitch にし位相勾配の大きいところの pitch を粗くとり、縞を分解できるようにしたるものである。

4 triangular space cut off filter は linear amplitude filter と同じ原理である。すなわち3角形の遮蔽フィルタにより spectrum を遮蔽し、その遮蔽のちがいによって像面の強度が変化する。この強度変化から位相勾配を測定する方法である。2次元的に位相勾配が変化する場合には光源に線スリットを用いても、spectrum が X, Y 方向に変化し、一方フィルタは X 方向のみにしか作用しないので使用できない。

5 diagonal space cut off filter は精度を良くする目的で triangular space cut off filter を繰り返したもので、測定方法は triangular space cut off filter の場合と同じであるが、像が縞状にあらわれるので、その縞次数から粗い測定に使用できる。不連続部分で回折効果を生じるのでこの効果を除くためにサインウェーブ状に連続させたのが 6. sine space cut off filter である。triangular space cut off filter と同じ理由で2次元的に位相勾配が変化する場合には使用できない。

8 sine amplitude filter は grid cut off filter のような回折効果をなくすため連続的なサイン状の濃淡フィルタである。この濃淡フィルタ

は X 方向のみ濃度が変化し、Y 方向に対する濃度の変化はないので 2 次元的な位相勾配の測定ができる。測定範囲が広く連続的なフィルタであるので精度がよい。サイン状フィルタであるので、その最大点、最小点を利用すればディジタル的に粗い縞次数も測定できる。 $8(c)$  のようなフィルタを用いれば周期的に変化する位相勾配の最大、最小を判別できる。

## 2-4 測定限界および精度考察

2-2, 2-3 節において論じた各種フィルタについて位相勾配の定量測定の精度、誤差について考察する。2-1 節に示したように試料の位相分布  $L(u)$  を  $\Delta u_j$  区間に分割して Taylor 展開で近似し結像関係を論じた。このとき物体面上で隣接する 2 つの区間  $\Delta u_j$  に対応する像を生じるためには、少なくとも  $2\pi/\Delta u_j$  ( 実座標で示すと  $f_1 \lambda / \Delta U$  ) の spectrum を通す必要がある。

$\Delta U_j$  区間分割して線分近似をおこなったための spectrum の位置誤差  $\Delta X$  は

$$\Delta X = f_1 \{ L'_2(U_j + \Delta U) - L'_1(U) \} = f_1 L''(U) \Delta U \quad (2-53)$$

となる。

(a) sharp cut off amplitude filter を scan させて位相勾配を像面に検出する場合、その送り幅  $\Delta X$  は sampling theorem より<sup>(91), (92)</sup>

$$\Delta X > \frac{f_2 \lambda}{D} \quad (2-54)$$

について意味がある。

$$L'(U) > \frac{\Delta X}{f_1} = \frac{f_2 \lambda}{f_1 D} \quad (2-55)$$

また分割幅  $\Delta U$  についてはやはり sampling theorem から

$$\Delta U > \frac{f_1 \lambda}{D'} \quad (2-56)$$

したがってフィルタを scan させるときの送り幅は、(2-56) を (2-53) に代入して

$$\Delta X > \frac{f_1^2 L''(U) \lambda}{D'} \quad (2-57)$$

について意味がある。これをかきかえると測定限界として

$$L''(U) < \frac{\Delta X D'}{f_1^2 \lambda} \quad (2-58)$$

周期性物体については式 (2-56) の分割幅の 10 倍程度の周期  $U_m$  であれば定量できるものと考えられるから

$$U_m > \frac{10 f_1 \lambda}{D'} \quad (2-59)$$

の周期であれば定量可能である。

今  $f_1 = 180 \text{ mm}$ ,  $f_2 = 180 \text{ mm}$ ,  $D = 10 \text{ mm}$ ,  $D' = 10 \text{ mm}$ ,  $\lambda = 0.546 \times 10^{-3} \text{ mm}$  を用いる。

式 (2-54) より

$$\Delta X > \frac{180 \times 0.546 \times 10^{-3}}{10} = 0.009 \text{ mm}$$

したがって送り幅は  $\Delta X = 0.010 \text{ mm}$  とすると,  $L'(U)$  の精度は式 (2-55) より

$$L'(U) > \frac{\Delta X}{f_1} = \frac{0.010}{180} = 5.5 \times 10^{-5} \text{ rad}$$

またさらに式 (2-58) から  $L(U)$  の測定限界は

$$L''(U) < \frac{0.010 \times 10}{180^2 \times 0.546 \times 10^{-3}} \div 0.005 \text{ mm}^{-1} \text{ となり}$$

これ以上に  $L''(U)$  が変化する場合測定不可能となる。

周期性については式(2-59)から

$$U_m > \frac{10 \times 180 \times 0.546 \times 10^{-3}}{10} = 0.9 \text{ mm} \text{ となる}$$

#### (b) grid cut off filter

格子間隔  $\Delta X$  の grid cut off filter を用いると、式(2-54)において  $D = \Delta X$  となり、

$$\Delta X > \frac{f_2 \lambda}{\Delta X}$$

$$\Delta X > \sqrt{f_2 \lambda} \quad (2-60)$$

$$L'(U) > \frac{\Delta X}{f_1} > \frac{\sqrt{f_2 \lambda}}{f_1} \quad (2-61)$$

区間  $\Delta U$  に対応する像を生じるため  $f_1 \lambda / \Delta U$  の spectrum 幅を通す必要があるから

$$\Delta X > \frac{f_1 \lambda}{\Delta U} \quad (2-62)$$

式(2-53)と式(2-62)から

$$\Delta X > f_1 \sqrt{\lambda L''(U)} \quad (2-63)$$

格子間隔  $\Delta X$  の grid cut off filter を用いたとき式(2-63)から

$$L''(U) < \frac{\Delta X^2}{f_1^2 \lambda} \quad (2-64)$$

$L''(U)$  がこれ以上に変化する場合、 $L'(U)$  は測定できない。

周期については式 (2-62) から

$$U_m > \frac{10 f_1 \lambda}{4 X} \quad (2-65)$$

(a) と同じ数値を用いて実際の場合について計算すると式 (2-60) より

$$4 X > \sqrt{180 \times 0.546 \times 10^{-3}} = 0.3 \text{ mm}$$

$4 X = 0.3 \text{ mm}$  の grid をフィルタとして用いた場合、 $L'(U)$  は式 (2-61) より

$$L'(U) > \frac{0.3}{180} \doteq 0.0017$$

まで測定可能、また式 (2-64) から

$$L''(U) < \frac{0.3^2}{180^2 \times 0.546 \times 10^{-3}} = 0.006 \text{ mm}^{-1}$$

また式 (2-64) から

$$U_m > \frac{10 \times 180 \times 0.546 \times 10^{-3}}{0.3} = 30 \text{ mm}$$

(c) gradient pitch grid cut off filter

(2j+1)  $4X_0$  の gradient pitch のフィルタを用いるとこれは特殊フィルタであるので spectrum 位置により、測定精度、限界、周期は変り、式 (2-61), (2-64), (2-65) より

$$L'(U) > \frac{(2j+1) 4X_0}{f_1} \quad (2-66)$$

$$L''(U) < \{(2j+1) 4X_0\}^2 / f_1 \lambda \quad (2-67)$$

$$U_m > \frac{10 f_1 \lambda}{(2j+1) 4X_0} \quad (2-68)$$

(d) linear amplitude filter

連続的に spectrum をフィルタするから (a) と同様、その  $L'(U)$  の測定精度、限界、周期は式 (2-55), (2-58), (2-59) となる。

$$L'(U) = \frac{4X}{f_1} > \frac{f_2 \lambda}{f_1 D}$$

$$L''(U) < \frac{4XD'}{f_1^2 \lambda}$$

$$U_m > \frac{10f_1 \lambda}{D'}$$

その他これに像の強度に関する条件が加わる。

(e) sine amplitude filter

$a \sin bx$  のサイン状のフィルタを用いた場合は連続的に spectrum をフィルタしており  $L'(U)$  の測定精度は式 (2-55) と同じで、

$$L'(U) > \frac{f_2 \lambda}{f_1 D}$$

測定限界は  $2\pi/b$  を  $4X$  と考えて、式 (2-58) から

$$L''(U) < \frac{(2\pi/b)^2}{f_1^2 \lambda} \quad (2-69)$$

まで測定でき、周期は式 (2-59) から

$$U_m > \frac{10f_1 \lambda}{2\pi/b} \quad (2-70)$$

となる。その他強度測定に関する条件がこれに加わる。 $b = 4 \text{ mm}$  の sine amplitude filter を用いると、

$$L'(U) > 5.5 \times 10^{-5}, \quad L''(U) < 0.1 \text{ mm}^{-1}, \quad U_m > 0.6 \text{ mm}$$

となり grid filter にくらべて広領域に精度よく測定できる。

以上の結果をまとめて Table 2-2 に示す。

Table 2-2 再回折シェリーレン法における各種空  
間周波数フィルタによる測定精度と測定限界

filter の名称	$L'(U)$ の 精 度	$L''(U)$ の 测 定 限 界	周 期 限 界
sharp cut off amplitude filter	$L'(U) > \frac{f_1 \lambda}{f_1 D}$ $= 5.5 \times 10^{-5}$	$L''(U) < \frac{\Delta X D'}{f_1 \lambda}$ $= 0.005 \text{ mm}^{-1}$	$U_m > \frac{10 f_1 \lambda}{D}$ $= 0.09 \text{ mm}$
equal pitch grid cut off filter	$L'(U) > \frac{\sqrt{f_1 \lambda}}{f_1}$ $= 17 \times 10^{-3}$	$L''(U) < \frac{\Delta X^2}{f_1 \lambda}$ $= 0.006 \text{ mm}^{-1}$	$U_m > \frac{10 f_1 \lambda}{4X}$ $= 3 \text{ mm}$
gradient pitch grid cut off filter	$L'(U) > \frac{(2j+1)\Delta X_0}{f_1}$	$L''(U) < \frac{(2j+1)\Delta X_0}{f_1 \lambda}$	$U_m > \frac{10 f_1 \lambda}{(2j+1)\Delta X_0}$
linear amplitude filter	$L'(U) > \frac{f_1 \lambda}{f_1 D}$ $= 5.5 \times 10^{-5}$	$L''(U) < \frac{\Delta X D'}{f_1 \lambda}$ $= 0.005 \text{ mm}^{-1}$	$U_m > \frac{10 f_1 \lambda}{D}$ $= 0.09 \text{ mm}$
sine amplitude filter	$L'(U) > \frac{f_1 \lambda}{f_1 D}$ $= 5.5 \times 10^{-5}$	$L''(U) < \frac{(2\pi b)^2}{f_1 \lambda}$ $= 0.1 \text{ mm}^{-1}$	$U_m > \frac{10 f_1 \lambda}{2\pi b}$ $= 0.6 \text{ mm} (b=4 \text{ mm})$

計算値は  $f_1 = 180 \text{ mm}$ ,  $f_2 = 180 \text{ mm}$ ,  $D' = 10 \text{ mm}$ ,  $D = 10 \text{ mm}$

$\lambda = 0.546 \times 10^{-3} \text{ mm}$  を用いた。

### 第3章 空気式純流体素子の流体計則への応用

現在その発展途上にある純流体素子の研究においては理論的に解明できることは少なく、実験に頼らざるを得ないのが現状である。このため純流体素子内の流れの可視化技術は重要なものとなっている。<sup>(86), (87)</sup>

空気式純流体素子を対象とする現状の可視化技術としてランプブラック法、<sup>(93)</sup>  
<sup>(95)~(98)</sup>有色煙法、<sup>(100)</sup>噴霧法、<sup>(99)</sup>シュリーレン法があるが定量性はない。

今迄は純流体素子内の空気噴流を非圧縮性とみなし、素子内の圧力変化による密度変化は小さく十分感度が得られず、可視化および定量が行えないものとして光学的方法による十分な研究が行われていなかった。<sup>(99)</sup>

本研究では光学的方法として再回折シュリーレンの1応用例として適當な空間周波数フィルタを用いると空気噴流の可視化、および定量的解析ができることを示す。<sup>(103), (104)</sup>

3-1では純流体素子の付着噴流の理論として衝突流モデル、検査面モデルについてのべ、また純流体素子の設計についてのべる。3-2では使用した再回折シュリーレン装置、純流体素子の実験に関する装置、3-3では再回折シュリーレン法により噴流の位相勾配を検出でき、これを積分して位相分布を求め、静圧分布を測定することを示す。3-4では可視化により噴流解析を各種モデルについて行う。次に流れの可視化によって、バキューム形素子のスプリッタの形状、位置は簡便に設計できることを示す。

#### 3-1 純流体素子について

純流体素子には各種のものがあるが、そのうち側壁付着形論理素子は、現在

研究されている純流体素子の中でも、最もポピュラーなもの一つであり、応用面から見ても非常に将来性あるものと考えられる。それだけにわが国においてもいち早く研究が始まり、現在ではもはや実用段階にはいったといってよいであろう。一方ではこの素子が、Coanda 効果といわれる乱流ジェットの側壁への付着現象を基礎としているためその方面的研究も並行して行われている。しかしながらこの理論的な解析はまだ発展段階というべきで定説はないようと思われる。このため純流体素子の解析も揺籃期にある。次に今迄行われた側壁形素子の噴流解析および設計について述べる。

### 3 - 1 - 1 付着噴流解析

噴流の付着現象の解析のおもな目的は、素子の形状、主噴流流量、制御流量などが与えられた時、主噴流の付着点の位置、不着点より下流の主噴流（以下付着後主噴流とし、上流では付着前主噴流とする）のもつ運動量などを求めることがある。

噴流の付着に関する理論的な解析は 1960 年 Bourque, Newman, Sawyer 等の研究に端を発し、Attachment-Point Model (付着点モデル) と Control-Volume Model (検査面モデル) の 2 つが主流をなしている。これらのモデルには、噴流の拡散係数という実験定数が含まれており、この定数が、素子の形状や動作条件とどのような関係にあるかを求めることが、目下の課題となっている。以下に 2 つのモデルについて簡単に説明することにする。

解析のモデルは Fig. 3-1 に示すように、2 次元噴流の出口から距離 D の所に、角度  $\alpha$  (傾斜角) の壁が、一方の側にのみある場合を考える。また解析をかんたんにするために、噴流の圧縮性を無視し、主噴流と側壁の低圧域の圧力は一定であるなどの仮定をおくことにする。

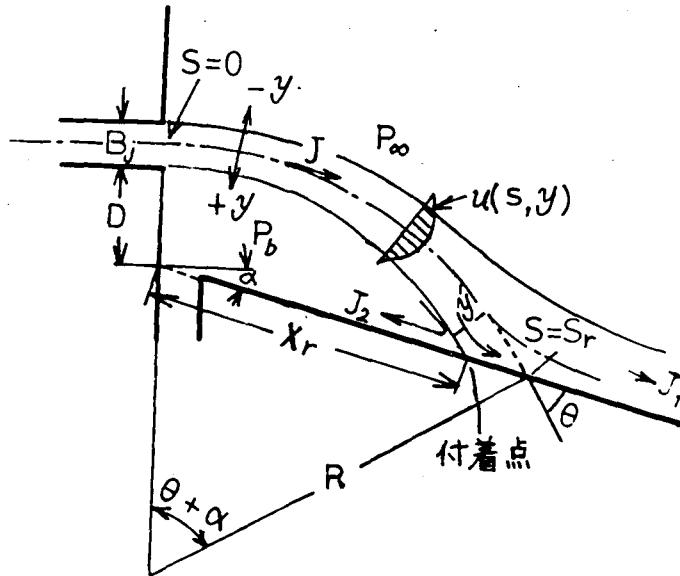


Fig. 3-1 解析モデル

### a) 衝突流モデル

衝突流モデルは噴流の傾斜板衝突時のモーメンタム・バランスを利用するもので、噴流はノルズ噴出時のモーメンタム  $J_0$  を衝突時まで保存する。角  $\theta$  は噴流は側壁と衝突し付着点で流れは左右に分離する。こゝでは

$$J_1 - J_2 = J \cos \theta \quad (3-1)$$

の関係式が成立する。 $J = \rho u_0^2 B_j$  ( $u_0$  ; 噴流の流出時の速度) で与えられ噴流中心線から垂直に測った付着点までの距離を  $y'$  とするとき、 $J_1, J_2$  はそれぞれ次式となる。

$$J_1 = \int_{\infty}^{y'} \rho u_x^2 dy, \quad J_2 = \int_{y'}^{\infty} \rho u_x^2 dy \quad (3-2)$$

付着噴流が円弧状をなして流れると仮定すると、付着角  $\theta$  が決定され、各種

形状は幾可学的に定まる。

$$R = \frac{(D + B_0) \cos \alpha}{\cos \alpha - \cos \theta} \quad (3-3)$$

$$x_R = (R - D - B_j/2) \sin' \alpha + R \sin \theta - \frac{y'}{\sin \theta} \quad (3-4)$$

### b) 検査面モデル

検査領域を定め、側壁に垂直な検査面に対して外気圧  $P_\infty$  と低圧渦領域圧  $P_B$  との差圧と、モーメンタム変化による力の平衡状態で力の方程式を与える考え方である。

円弧をえがく付着噴流の遠心力は  $J/R$  であり、その遠心力は  $(P_\infty - P_B)$  またモーメンタム変化は

$$J \cos \alpha - J_1 = (P_\infty - P_B) (D + B_j/2) \cos \alpha \quad (3-5)$$

であるから幾可学的関係式(3-3)の関係を用いて

$$\cos \theta = \frac{J_1}{J} \quad (3-6)$$

となる。

これ等の基本的な考え方ではモーメンタム  $J_1, J_2$  を噴流の速度分布から計算しなければならない。そこで Bourque & Newman は噴流の速度分布 <sup>(101)</sup> 関数として、式(3-7)の Görtler の式を用いて解析した。<sup>(97)</sup>

$$u = \left[ \frac{3 J \sigma}{4 \rho (S + S_0)} \right]^{1/2} \operatorname{sech}^2 \left( \frac{\sigma y}{S + S_0} \right) \quad (3-7)$$

ここで  $S$  は噴出ノズルから考察点までの距離で、 $S_0$  は噴流の広がり中心（仮想原点）と噴出ノズルとの距離である。

Fig.3-1 で付着流線と噴流中心線間の平均体積流量は  $u_0 B_j / 2$  であり

$$u_0 B_j / 2 = \int_0^{y'} u dy \quad (3-8)$$

式(3-8)を式(3-7)に代入して計算すると

$$\left[ \frac{3 J (S + S_0)}{4 \rho \sigma} \right]^{1/2} \tan h \left( \frac{\sigma y'}{S + S_0} \right) = \frac{u_0 B_j}{2} \quad (3-9)$$

となる。

$J = \rho u_0^2 B_j$  であるから(3-9)は

$$\left[ \frac{3 (S + S_0)}{B_j \sigma} \right]^{1/2} \tan h \left( \frac{\sigma y'}{S + S_0} \right) = 1 \quad (3-10)$$

$$t = \tan h \frac{\sigma y'}{S + S_0} \quad (3-11)$$

とおくと

$$t^2 = \tan h \left( \frac{\sigma y'}{S + S_0} \right) = \frac{2 \sigma B_0}{3 (S + S_0)} \quad (3-12)$$

となり付着流線を与える式となる。  $S = 0$ において、  $J = \rho u_0^2 B_j$  であるから式(3-9)から  $S_0 = \sigma B_j / 3$  となる。

したがって付着流線の式は次式で与えられる。

$$\frac{3 S}{\sigma B_j} = \frac{1}{t^2} - 1 \quad (3-13)$$

Levin, Manion<sup>(107)</sup> は Bourque, Newman の考え方を直接用い、付着角  $\theta$  として次式を導いている。

$$\text{衝突流モデル} \quad \cos \theta = \frac{3}{2} t - \frac{1}{4} t^3 \quad (3-14)$$

$$\text{検査面モデル} \quad \cos \theta = \frac{1}{2} + \frac{3}{4} t - \frac{1}{4} t^3 \quad (3-15)$$

これらの基本的な考え方で、モーメンタム  $J_1, J_2$  を噴流の速度分布から計算しなければならない。速度分布自体に不確定要素が含まれるうえに、その積分範囲  $y'$  が不確定要素をもっている。付着流の遠心力から

$$R = \frac{\rho u_0^2 B j}{P^\infty - P_B} \quad (3-16)$$

において低圧渦圧  $P_B$  を決定することから解析も可能なはずである。しかし低圧渦圧  $P_B$  を誘導した研究はない。

### 3-1-2 側壁付着形素子の設計

この素子の特性をきめるもっとも基本的なものは、側壁に付着した主噴流を切換えるのに必要な制御流の流量、圧力と、出力ダクトからとり出し得る出力圧力であろう。適当な設計によると主噴流の流量対付着流切換えに必要な最小制御流量（あるいは主噴流の供給圧力対付着流切換えに必要な最小制御圧）の比は数十倍に達し、また、出力ポート閉鎖時にとり出しうる出力回復圧も主噴流供給圧の 70 % 程度に達することができる。普通前者は 10 %、後者は約 30 % 程度の場合が多い。側壁付着形素子の特性解析は主として実験的に進められており、その結果を要約すれば、各部の形状が素子の特性におよぼす影響は Fig. 3-2 のようである。

一般に切換制御圧が減少することは付着流の付着安定度が減ることであり、不安定な素子となりやすい。切換圧は低く、出力回復圧は高くしたいのであるから素子の設計にあたっては注意が必要である。

なお前述のようにこれらの特性は理論的解析によって導かれたものではなく、

試行錯誤の実験によって導かれたもので、その要因分析は十分

に行われていて、実験データによつてその傾向を異にするものがある。流れの可視化によつてこのような設計が簡便にできる。

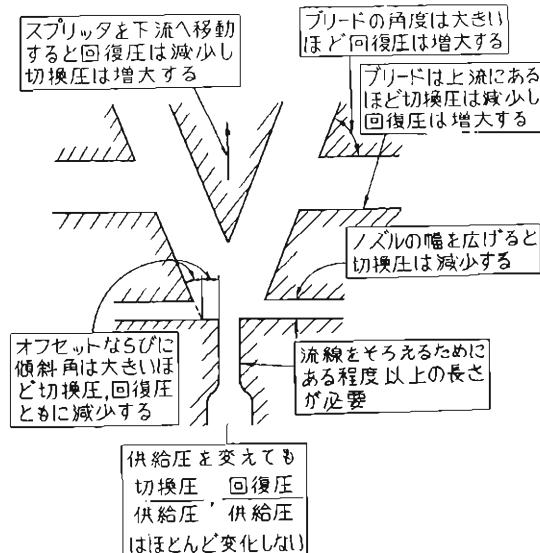


Fig. 3-2 側壁付着形素子の特性

## 3-2 実験装置

### 3-2-1 再回折シリーレン実験装置

実際に使用した光学系の概観を Fig. 3-3 に示す。またその略図を Fig. 3-4 に示す。

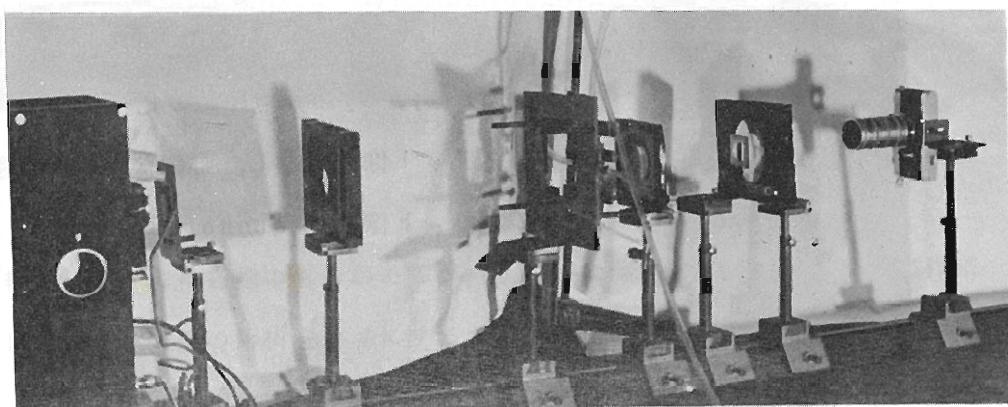


Fig. 3-3 再回折シリーレン実験装置

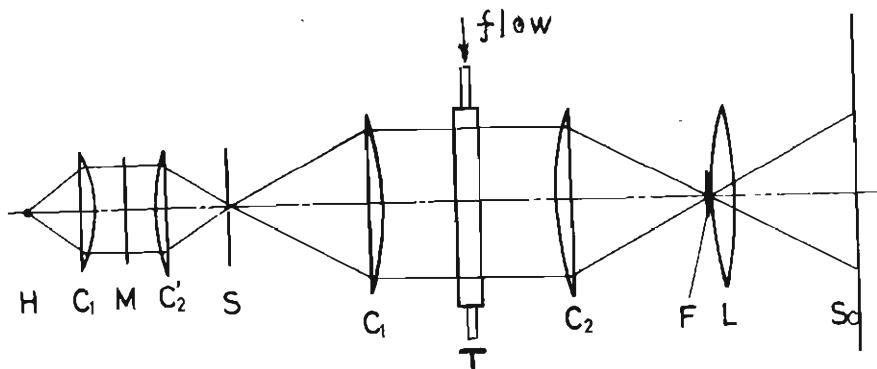


Fig. 3-4 再回折シユリーレン実験装置略図

H ; 超高圧水銀灯 M ; 単色干渉フィルタ  
 $(\lambda = 546 \text{ m}\mu)$   $C_1'$ ,  $C_2'$  ; コンデンサ  
 レンズ S ; ラインスリット ( $2.5 \text{ mm} \times$   
 $0.020 \text{ mm}$ ) T ; セル  $C_1$  ; コリメーター  
 レンズ (焦点距離  $f_0 = 360 \text{ mm}$ )  $C_2$  ; 集  
 光レンズ (焦点距離  $f_1 = 180 \text{ mm}$ ) L ; 投影レンズ  
 (焦点距離  $f_2 = 180 \text{ mm}$ ) Sc ; スクリーン

光源に超高圧水銀灯を用い、干渉フィルタ

で  $546 \text{ m}\mu$  の単色光とした。電源は定電圧装  
 置を通して供給し光源輝度を安定化した。2  
 次光源として  $2.5 \text{ mm} \times 0.020 \text{ mm}$  のスリットを  
 用いた。 $C_1$ ,  $C_2$  の焦点距離の比を  $2 : 1$  に  
 し、スリット像を縮小し、鮮鋭な幅  $10 \mu$  程  
 度のスリット像を Fraunhofer diffra-

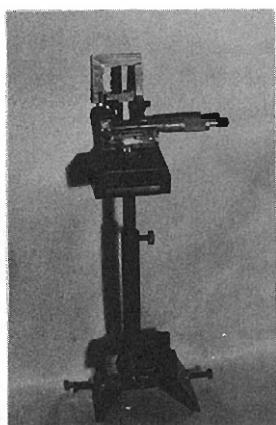


Fig. 3-5 sharp cut off  
 amplitude filter  
 scanning 装置

tion plane 上に作った。空間周波数フィルタは、sharp cut off amplitude filter scanning について Fig. 3-5 に示す。

フィルタは安全カミソリの薄刃で作り、これを scan するためマイクロメータを利用した。フィルタの位置読取精度は  $10 \mu$  である。

### 3 - 2 - 2 空気供給装置

空気源として①日立スーパーべビコン（自動アンローダー式、最大圧力  $5.5 \text{ kg/cm}^2$ ）を使用した。空気中に含まれている水分やホコリは光学測定に邪魔になるので、これを取除くための②シリカゲルの容器および③の日立ドレンセパレータ ACF-30 を使用した。流量測定には④島津製乳遊式流量計 SR 100H形（流動測定範囲  $17 \sim 170 \text{ l/min}$ 、または、 $12.5 \sim 125 \text{ l/min}$ ）を使用した。また静圧測定には水銀または水柱マノメータを使用した。

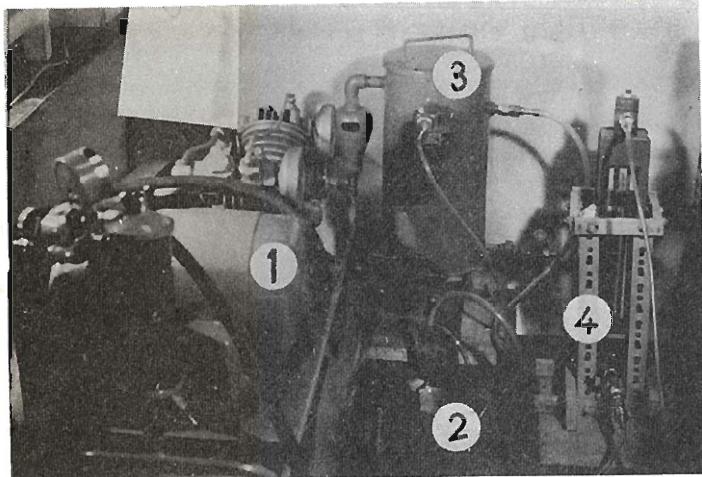


Fig. 3-6 空気供給装置概観

### 3 - 2 - 3 純流体素子の製作

純流体素子には各種のものがあるが、こゝでは側壁付着形論理素子の製作について述べる。その解析を容易にするため、平面構造で流体の通路が方形断面で2次元流として取り扱うために、主噴流ノズルのアスペクト比を5にとった。

側壁付着形素子内の流体の流れは、それを囲む隔壁の形状変化に対して敏感であるので、材料には寸法安定性と加工寸法精度も高いことが必要である。加工の容易さを考慮し隔壁はベークライトを使用した。特にペークライトの空気流にあたる所の加工についてその端面が直角でなるようにし、高精度に仕上げるために数枚重ねて加工し、その両端の板はだれるので除外した。その面の仕上げはエメリペーパー#06で仕上げ表面あらさは約 $1\text{ }\mu$ ( $H_{max}$ )以下である。素子の流路の精度を上げるために投影器で拡大すると共に、ブロックゲージを利用して各部品をとりつけ、接着剤アラルダイトで固定した。製作した側壁付着形素子の概観を Fig. 3-7 に示す。またこの寸法について Fig. 3-8 に示す。

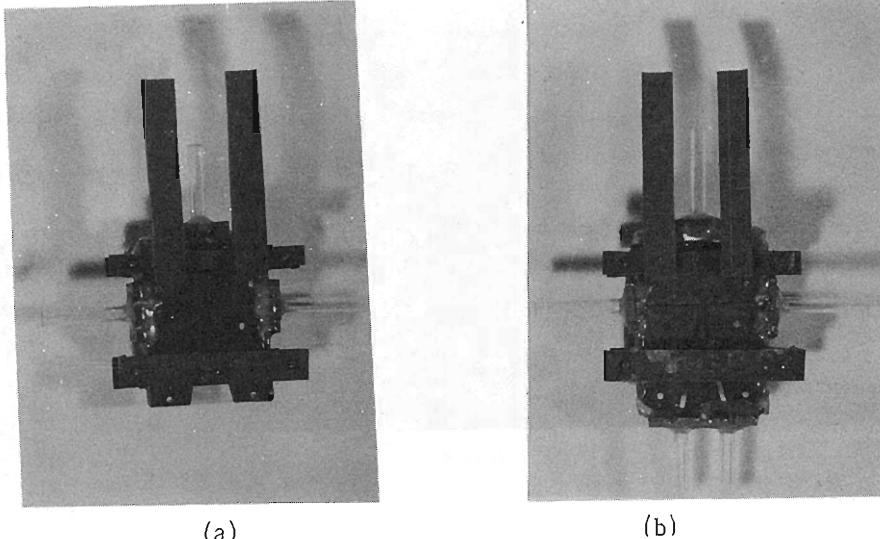


Fig. 3-7 側壁付着形素子概観

- (a) スプリッターのない場合
- (b) スプリッターがある場合

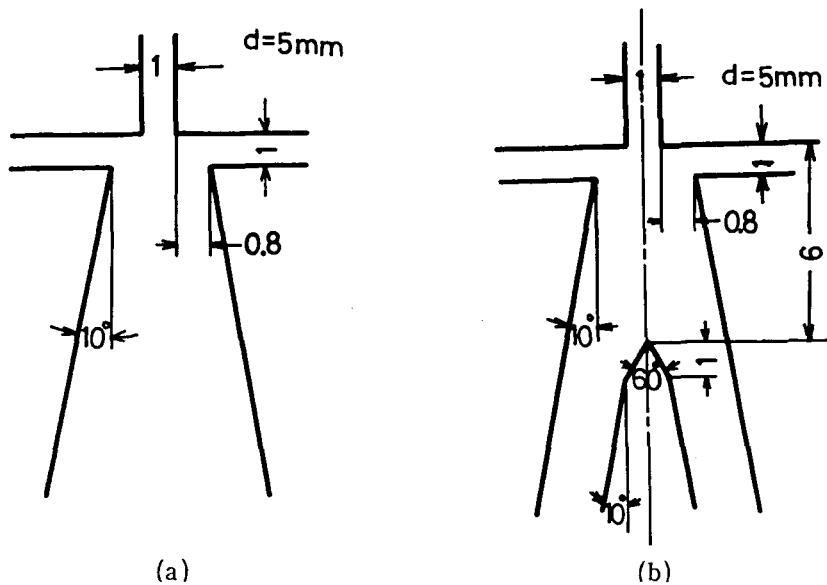


Fig. 3-8 側壁付着形素子寸法

### 3-3 再回折シュリーレン法による付着噴流の静圧分布の定量

側壁付着形素子の噴流では以下に示すように静圧変化による光学的位相変化は 0.2 干渉次数で位相勾配としては  $L'(U) = 55 \times 10^{-5}$  程度であるので sharp cut off amplitude filter では測定領域がたらず, sharp cut off amplitude filter を scan する方法または linear amplitude filter がよいことを示す。

#### 3-3-1 sharp cut off amplitude filter scanning 法

2-2-2 で述べた方法によって sharp cut off amplitude filter を scan させ, その位相勾配を像面上に輪郭として得る。Fig. 3-8(a) に示し

た側壁付着形素子でスプリッターのない場合についてその付着噴流を撮影したパターンを Fig. 3-9, Fig. 3-10 に示す。実験条件は流速  $v = 330 \text{ m/sec}$  レイノルズ数  $Re = 24000$  ( $Re = \frac{\rho v d}{\eta}$   $\rho$  ; 密度,  $v$  ; 流速,  $d$  ; 管幅  $\eta$  ; 粘度), 静圧  $P_s = 0.08 \text{ kg/cm}^2$  である。Fig. 3-9 と Fig. 3-10 のちがいはフィルタの方向が試料に対して  $x$  方向,  $y$  方向である点である。素子中の噴流の曲率は小さいので,  $\frac{\partial L}{\partial U}$  の正, 負のわかれ目すなわち  $\chi = 0.00 \text{ mm}$  での輪郭が噴流中心となり, 噴流中心を明瞭にみることができる。Fig. 3-9, Fig. 3-10 をもとにトレースした等位相勾配曲線を Fig. 3-11 ~ Fig. 3-14 に示す。

Fig. 3-13 の位相勾配曲線は左右非対称でその差から噴流がまがっている状態がよくわかる。Fig. 3-13 を  $U$  軸について積分して位相分布曲線 Fig. 3-15 を得る。このグラフは積分定数を 0 として示したもので,  $P_\infty$  すなわち 1 気圧の空気の位相を加えたものが位相を示す。

また Fig. 3-14 を  $V$  軸について,  $V = 4 \text{ mm}$ ,  $L(U) = 5.5 \times 10^{-5}$  を基準にして積分し位相分布曲線を求めた結果を Fig. 3-16 に示す。この場合の位相に 1 気圧の空気の位相を加えたものが実際の位相である。

空気の圧力変化に対する屈折率変化は, 次式で与えられる。  
<sup>(109)</sup>

$$n_{TP} = 1 + (n_0 - 1) \times \frac{1 + 0.003671 T_0}{1 + 0.003671 T} \cdot \frac{P}{P_0} \quad (3-17)$$

$$T_0 = 22.0 \text{ }^\circ\text{C} \quad \lambda = 546 \text{ m}\mu \quad P_0 = 1 \text{ kg/cm}^2 \quad n_0 - 1 = 27129 \times 10^8$$

$$P ; \text{圧力 } \text{kg/cm}^2 \quad T = 25 \text{ }^\circ\text{C} \quad n ; \text{屈折率}$$

$$n_P = 1 + 2.6986 P \times 10^{-4} \quad (3-18)$$

試料厚さ  $d = 5 \text{ mm}$  では圧力変化  $\Delta P \text{ kg/cm}^2$  に対する位相変化は,

$$L(U) = n_P d = 5 \times 2.6986 \times 10^{-4} \times \Delta P$$

$$= 13.490 \times 10^{-4} \Delta P (\text{mm}) \quad (3-19)$$

で表わされる。

またこれを干渉縞の次数変化 $\Delta N$ で表わすと

$$\Delta N = \frac{n_P d}{\lambda} = \frac{13.490 \times 10^{-4}}{546 \times 10^{-3}} = 2.47124 \Delta P \quad (3-20)$$

( 次数 )

Fig. 3-15において $A_1 - B_1$ の $L(U)$ の最大値 $11.5 \times 10^{-5} \text{mm}$ は式(3-19)から $\Delta P = 0.08 \text{kg/cm}^2$ で主噴流静圧 $P_s$ に相当する圧力で、ピトーパンがはかった静圧と一致する。 $L(U)$ の最小値は $-8.25 \times 10^{-5}$ で $\Delta P = -0.063 \text{kg/cm}^2$ に相当する。マノメータで測定した負圧 $\frac{60}{760} \text{kg/cm}^2 = 0.08 \text{kg/cm}^2$ より少し低い。これは $A_1, B_1$ が制御ノズルから少しづれているためと考えられる。Fig. 3-15とFig. 3-16において最小位相はほど同じであり静圧測定が可能である。

第2章2-4で求めた表2再回折シユリーレン法の測定精度と定量限界によれば、sharp cut off amplitude filter scanning法では

$$L'(U) > \frac{f_2 \lambda}{f_1 D} = 2.75 \times 10^{-5}, \quad L''(U) < \frac{\Delta X D}{f_1^2 \lambda} = 5 \times 10^{-3} \text{mm},$$

$$U_m > \frac{10 f_1 \lambda}{D'} = 0.09 \text{mm} \text{であったから、今の場合 } L'(U) > 5.5 \times 10^{-5},$$

$L''(U) = 5 \times 10^{-4}$ ,  $U_m = 1 \text{mm}$ で十分測定できる。今Fig. 3-15において $L(U)$ の最大値は式(3-20)から0.2干渉次数に相当し、 $1/100$ 干渉次数程度の位相変化の定量が可能であることを示している。なお投影レンズの有口径 $D$ を10 mmとしたが実際には50 mm程度はとれるので、上に述べた精度より少し良いと考えられる。

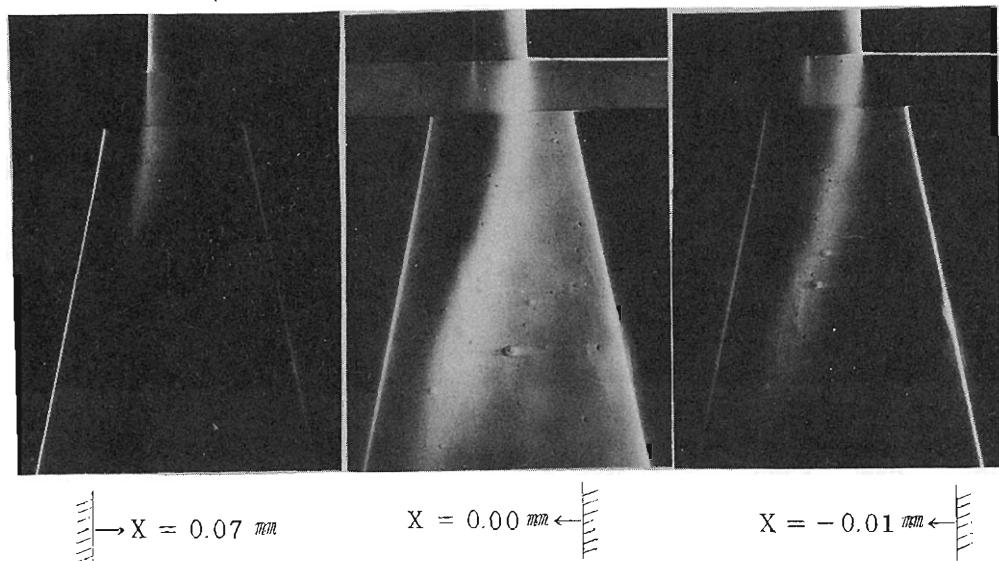
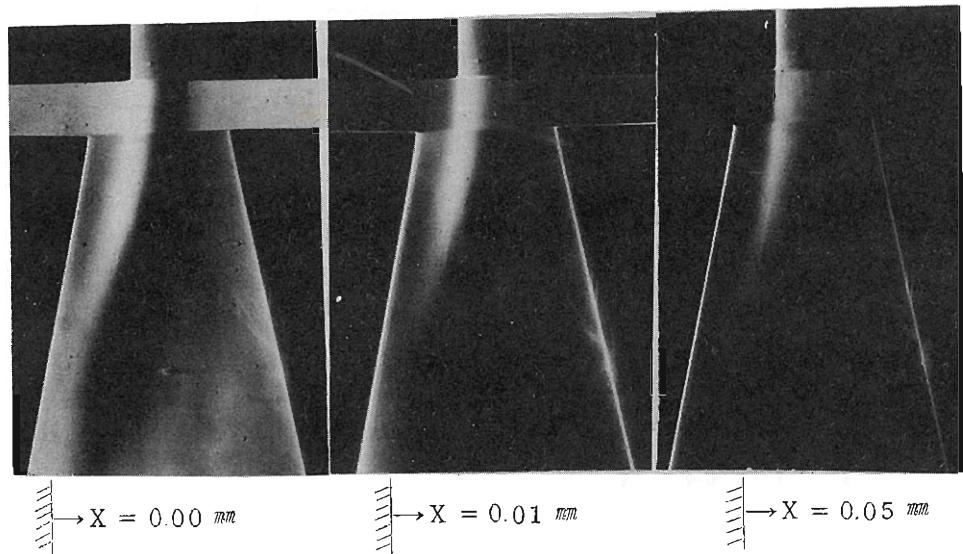


Fig. 3-9 側壁付着噴流等位相勾配パターン  
→は  
フィルタの位置を示す制御ノズル左閉鎖, 右開放

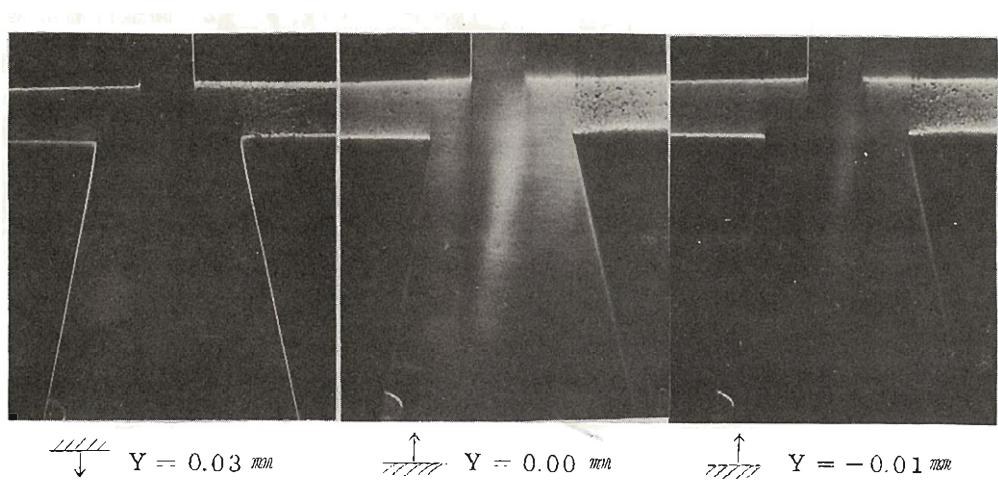
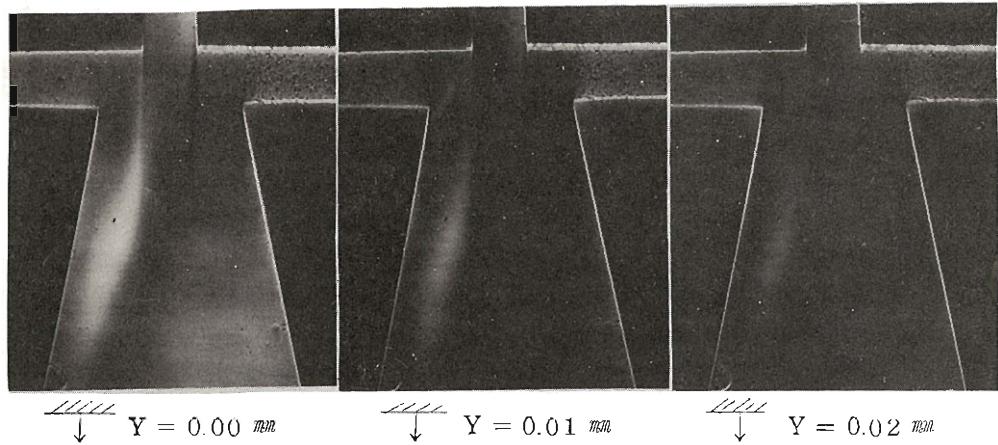
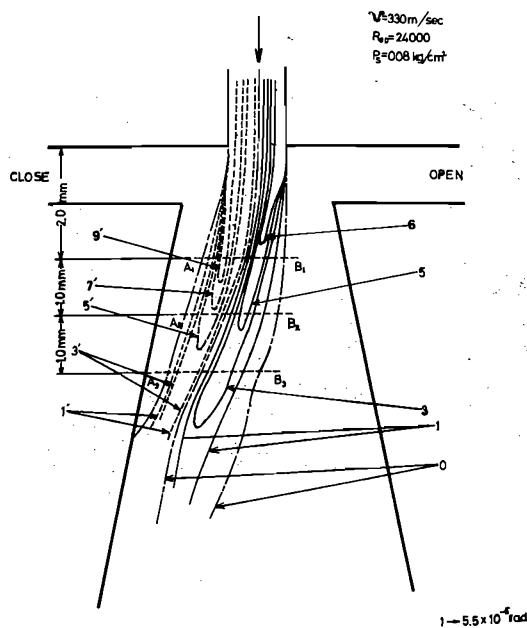


Fig. 3-10 側壁付着形素子の付着噴流等位相勾配パターン

シグマはフィルタの位置を示す。制御ノズル左閉鎖,  
右開放

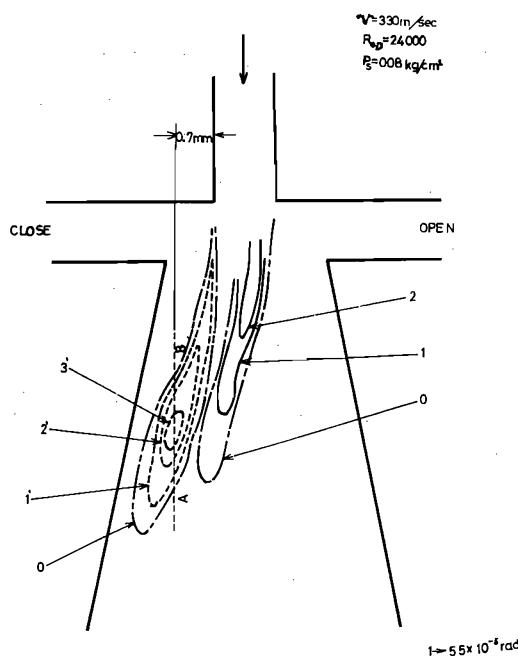
$V=330 \text{ m/sec}$   
 $R_g=24000$   
 $P_s=008 \text{ kg/cm}^2$

Fig. 3-11 側壁付着形素子  
の付着噴流の等位相勾配  
曲線 ( U 方向 )



$V=330 \text{ m/sec}$   
 $R_g=24000$   
 $P_s=008 \text{ kg/cm}^2$

Fig. 3-12 側壁付着形素子  
の付着噴流の等位相勾配  
曲線 ( V 方向 )



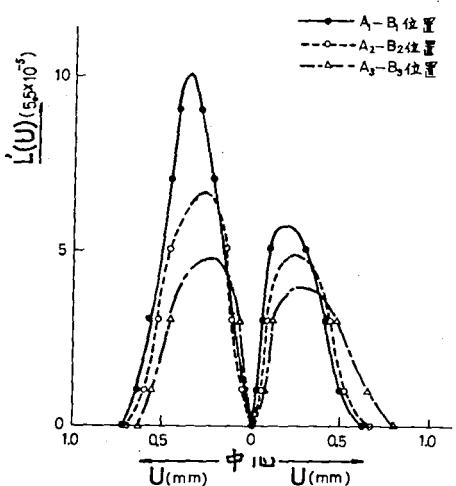


Fig. 3-13 側壁付着形素子  
の付着噴流の位相勾配曲  
線

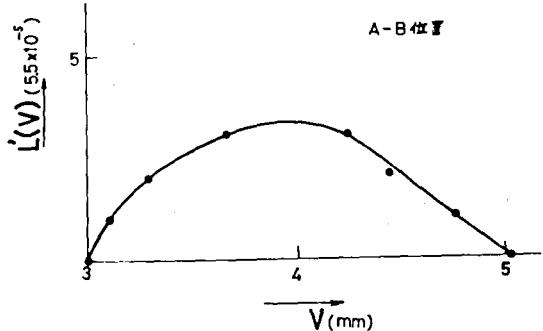


Fig. 3-14 側壁付着形素子の  
付着噴流の位相勾配曲線

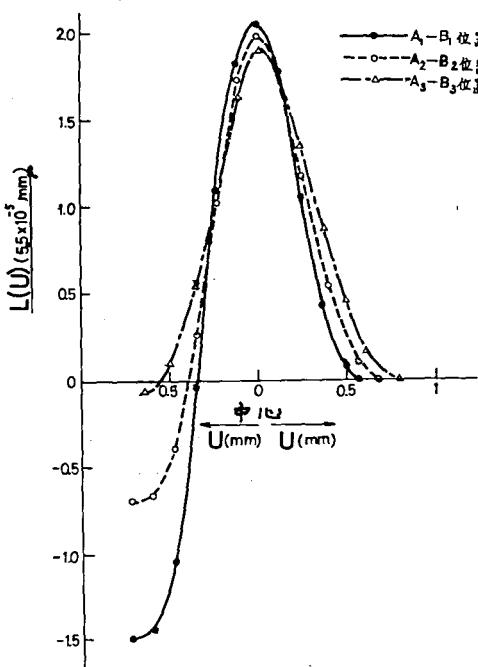


Fig. 3-15 側壁付着形素子の付  
着噴流の位相分布曲線

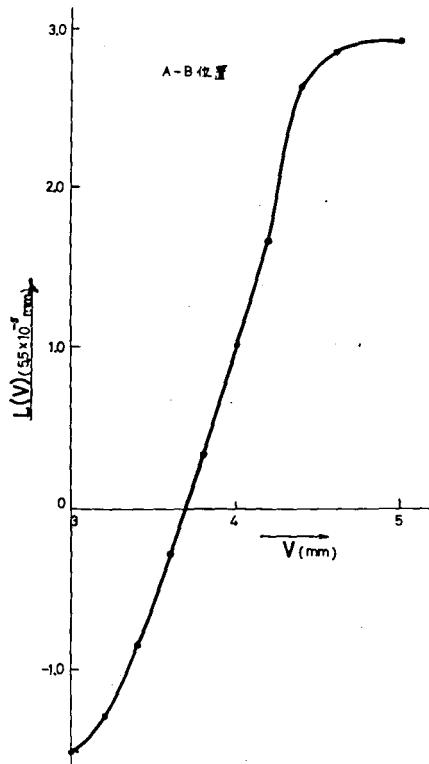


Fig. 3-16 側壁付着形素子の  
付着噴流の位相分布曲線

### 3 - 3 - 2 linear amplitude filter

噴流のまがりは少ないので位相変化による spectrum のはすれは 1 次元的であるとみなしてよいから、 linear amplitude filter と同じ原理である Fig. 3-17 の triangular space cut off filter を用いて 3-3-1 と同じ実験を行なって得たパターンを Fig. 3-18 に示す。このネガフィルムを Fig. 3-11 の A<sub>1</sub> - B<sub>1</sub> 位置において U 方向に光電測光した結果を Fig. 3-19 に示す。今位相勾配が変化した場合スペクトルの半分が透過した点を基準にすると 2-2 の式 ( 2-47 ) とは異なり

$$L'(U) = C \cdot i^\gamma \quad (3-2)$$

と表わされる。C は  $i(U)$  の最大値が  $L'(U)$  の最大値 ( Fig. 3-13 ) と一致するとして求め、  $\gamma = 0.8, 1.0, 1.5$  をとり、これを積分した結果を Fig. 3-20 に示す。この位相勾配曲線を U 軸について積分した結果を Fig. 3-21 に示す。  $\gamma = 1$  の時よく一致しており、このフィルタにより十分測定できる。

位相勾配変化が 2 次元的に大き

く変化する場合には triangular space cut off filter の代わりに linear amplitude filter を用いるとよい。

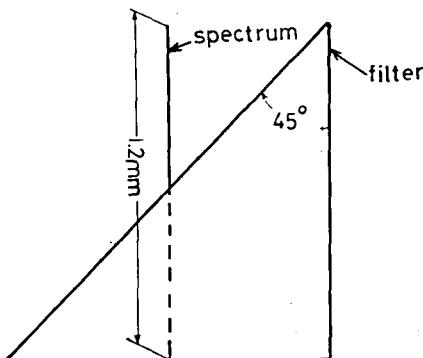


Fig. 3-17 triangular space cut off filter と spectrum

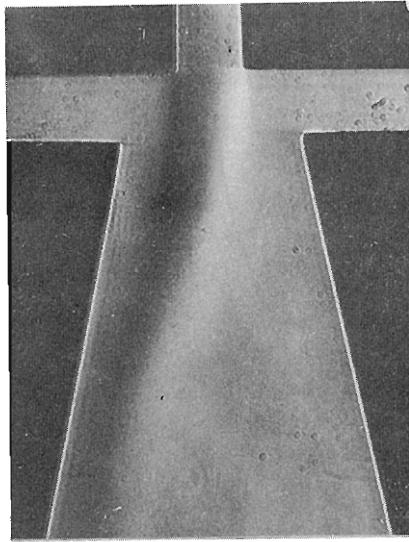


Fig. 3-18 triangular space  
cut off filter による付着  
噴流位相勾配変化パターン

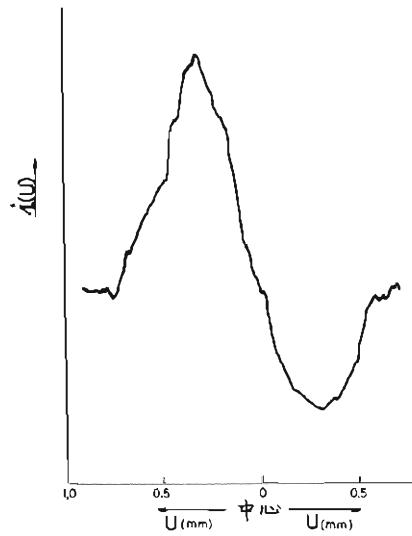


Fig. 3-19 強度分布に対応  
する光電流

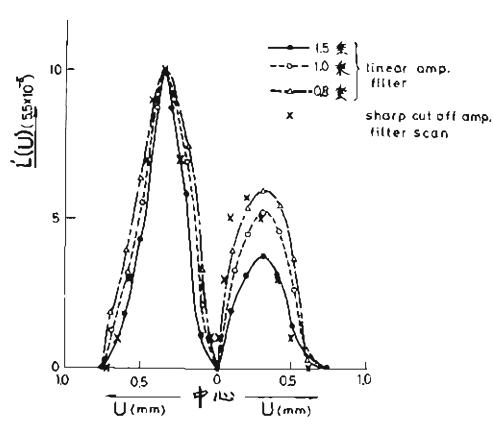


Fig. 3-20 付着噴流の位相  
勾配曲線

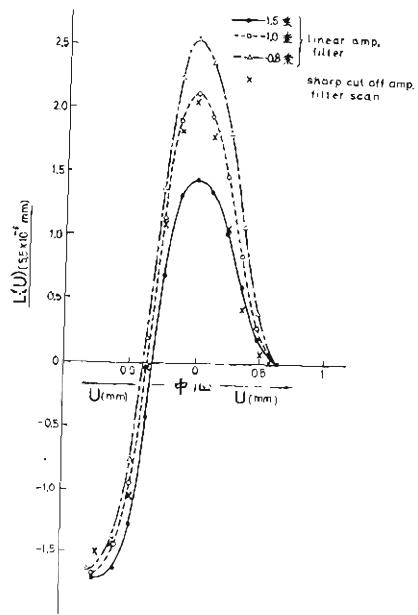


Fig. 3-21 付着噴流の位相分布曲線

### 3 - 4 流れの可視化

#### 3 - 4 - 1 付着噴流解析

3 - 3において得られた  
パターンをもとにして求め  
た Fig. 3-1 に示した解析  
モデルでの各実験定数を、  
Fig. 3-22 に示す。

$$\theta = 33^\circ, R = 9.3 \text{ mm},$$

$$y' = 0.5 \text{ mm}, X_r = 5.2 \text{ mm}$$

である。

Levin, Manion の式を  
用い、

衝突流モデルの場合 ;  $\cos 33^\circ$   
 $= 0.839$

式(3-14)より

$$t^3 - \frac{8}{3} t + 3.36 = 0$$

$$t = -2.08, t = 1.04 \pm \sqrt{-0.58}$$

式(3-11)において  $|\tan h| \leq 1$  であるから解はない。

検査面モデルの場合 ; 式(3-15)より、

$$t^3 - 3t + 0.34 = 0$$

$$t = 1.66, t = 0.14, t = -1.8 \quad \therefore t = 0.14$$

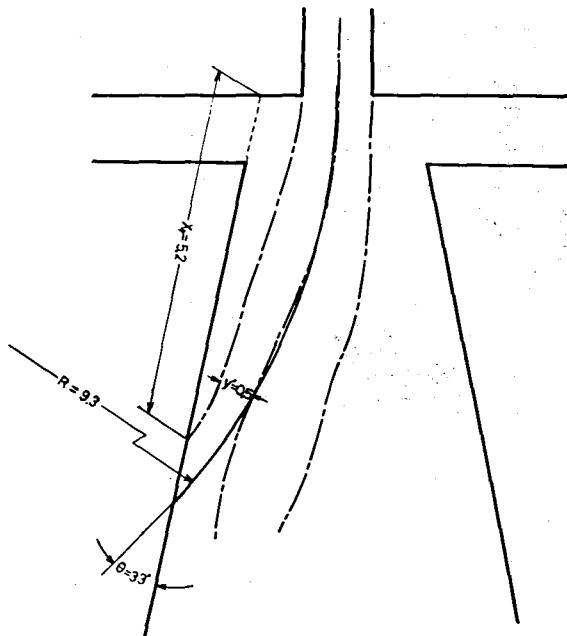


Fig. 3-22 実験から求めた解析  
モデルの各実験定数

$$S_0 = \sigma / 3, \quad S = 6.48 \text{ mm}, \quad y' = 0.5 \text{ mm}$$

を式(3-13)に代入して

$$\sigma = 0.46$$

Levin Manion 等が求めた値はこのような実験では 1 であった。この不一致について今後検討する必要があるが、今の場合検査面モデルに近い形になっている。

実験から求めた  $R = 9.3 \text{ mm}$ ,  $\rho = 0.1319 \text{ Kg} \cdot \text{sec}^2 / \text{m}^4$   
 $v = 330 \text{ m/sec}$ ,  $B_j = 1 \text{ mm}$  を式(3-16)に代入すると

$$P_\infty - P_b = 0.16 \text{ Kg/cm}^2$$

となり  $P_\infty = 0 \text{ Kg/cm}^2$  とすると  $P_\infty = -0.16 \text{ Kg/cm}^2$  となる。この値はマノメータによって求めた値の 2 倍程度の負圧である。この原因は噴流の流速分布を考える必要があり、実際の流速は  $v = 330 \text{ m/sec}$  の 1.5 分の 1 程度と考えれば式(3-16)から計算した値とマノメータから測定した値は一致する。

以上のような不一致はモデルの仮定が不十分であるためで、このような問題に対して 3-3 の付着噴流の静圧分布の測定は役立つ。

次に付着点距離に関する幾何学的関係式(3-4)に  $D = 0.7 \text{ mm}$ ,  $B_j = 1 \text{ mm}$ ,  $\alpha = 10^\circ$ ,  $y' = 0.5$  を代入すると、 $x_R = 5.6 \text{ mm}$  となり実験値とは一致する。

### 3-4-2 側壁付着形素子の設計例

側壁付着形素子でその所要の目的にしたがって、そのスプリッターの位置およびその形状をきめる場合、スプリッターのない場合の主噴流模様を観察して

行うとよい。今 offset 1でバキュームスイッチを行うために設計した例を示す。

Fig. 3-8 (a)に示すスプリッターのない場合の側壁付着形素子で主噴流の様子を観察した結果を Fig. 3-23 に示す。実験条件は 3-3-1 でのべた条件と同じである。制御ノズルを開鎖した場合のパターンからスプリッターは output の噴流を邪魔しない流路幅になるように挿入すると最大出力圧が得られる。その噴流と少し干渉する位置における、回復圧が大きくてバキュームスイッチする素子が得られる。

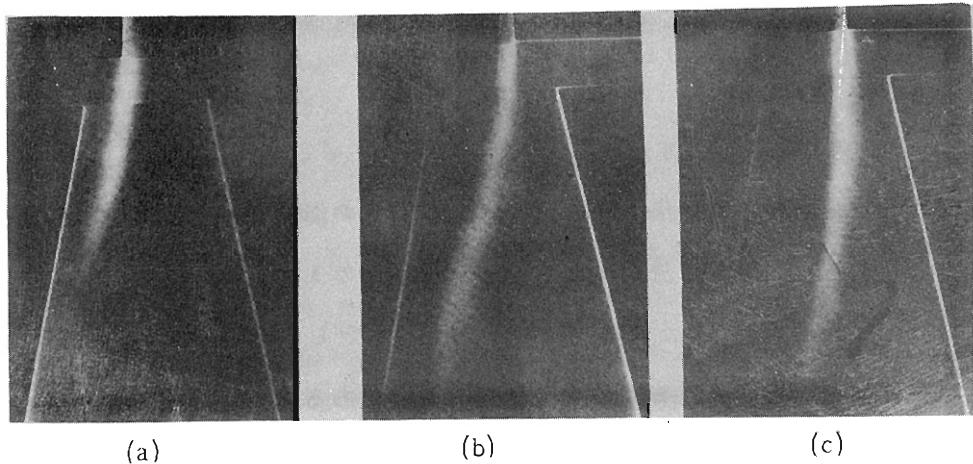


Fig. 3-23 側壁付着形素子等位相勾配曲線  
パターン

- (a) 制御ノズル左閉鎖, 右開放, 正勾配
- (b) 制御ノズル左閉鎖, 右開放, 負勾配
- (c) 制御ノズル左開放, 右開放, 負勾配

噴流の切り換えをなめらかにするため流体の抵抗をへらし、スプリッター先端を  $60^\circ$  または丸みをおびた形状にしてもよい。以上の考察のもとに設計した

側壁付着形素子の寸法をFig. 3-8(b)に示し、これから得られたパターンを、Fig. 3-24に示す。実験条件はスプリッターのない場合と同じである。

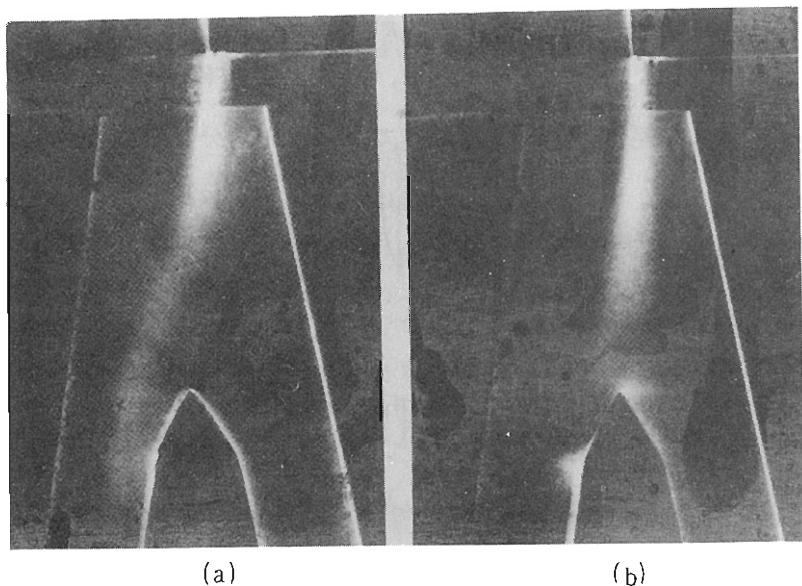


Fig. 3-24 側壁付着形素子等位相勾配曲線  
パターン例

- (a) 制御ノズル左閉鎖, 右開放, 負勾配  
 (b) 制御ノズル左開放, 右開放, 負勾配

以上のようにして、噴流の流れの可視化によって簡単な設計が可能である。

## 第4章 高分子溶液の流体計則

高分子溶液は流動状態において非圧縮性で密度変化はないとされていた。しかし屈折率の異方性を有しているので、当然光学的な位相変化は存在すると考えられる。再回折シュリーン法によれば、その主屈折率およびその方向を求めることができる。複屈折の場合とくらべてより正確に分子の変形状態を把握できる。特に再回折シュリーン法によれば位相勾配を検出するのでその変形の変化率を明瞭に可視化できる。

### 4-1 流動高分子水溶液の主屈折率および消光角の測定法

流動状態の時、試料の屈折率楕円体は Fig. 4-1 のような関係がある。

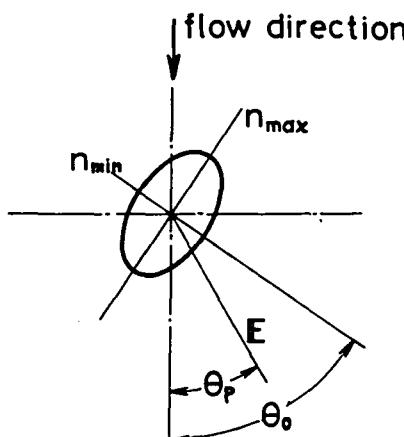
$E$  vector が  $\theta_p$  の時の屈折率を  $n_{\theta_p}$  とすると次の関係が楕円の式から得られる。

$$\frac{1}{n_{\theta_p}^2} = \frac{1}{n_{\max}^2} \cos^2 (\theta_p - \chi') + \frac{1}{n_{\min}^2} \sin^2 (\theta_p - \theta_0)$$

(4-1)

Fig. 4-1 流動状態の高分子水溶液の屈折率楕円の主軸と flow 方向,  $E$  vector との関係

$n_{\max}$ ,  $n_{\min}$ : 主屈折率



Evector の方向が  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  の時  $n_0$ ,  $n_{45}$ ,  $n_{90}$  から

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{n_{\max}^2} &= \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{n_0^2} + \frac{1}{n_{90}^2} - \sqrt{\left( \frac{1}{n_0^2} - \frac{1}{n_{90}^2} \right)^2 + \left( \frac{1}{n_0^2} + \frac{1}{n_{90}^2} - \frac{2}{n_{45}^2} \right)^2} \right] \\ \frac{1}{n_{\min}^2} &= \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{n_0^2} + \frac{1}{n_{90}^2} + \sqrt{\left( \frac{1}{n_0^2} - \frac{1}{n_{90}^2} \right)^2 + \left( \frac{1}{n_0^2} + \frac{1}{n_{90}^2} - \frac{2}{n_{45}^2} \right)^2} \right] \\ \tan 2\chi &= \frac{\frac{1}{n_0^2} + \frac{1}{n_{90}^2} - \frac{2}{n_{45}^2}}{\frac{1}{n_0^2} - \frac{1}{n_{90}^2}} \end{aligned} \right\} (4-2)$$

後述の方法で  $n_0$ ,  $n_{45}$ ,  $n_{90}$  が求まると式(4-2)から屈折率橜円体の主屈折率  $n_{\max}$ ,  $n_{\min}$  およびその方向  $\chi$  を求めることができる。

次に  $n_{\theta_p}$  を求める方法について記す。3-2-1のFig. 3-4に示したように再回折光学系のセルの前に流れ方向と  $\theta_p$  の方向に偏光板1枚挿入し, sharp cut off amplitude filter scanning 法を用いて

$$L'(U) = \{ n_{\theta_p}(U) d \}' \quad (4-3)$$

を求める。これを積分することにより

$$L(U) = \int L'(U) dU + n' d \quad (4-4)$$

$$n_{\theta_p} = \frac{\int L'(U) dU}{d} + n' \quad (4-5)$$

$n'$  ; 変形前の屈折率

$d$  ; 試料の厚み

から  $n_{\theta_p}$  が求まる。

## 4 - 2 実験結果および考察

PVA ビニアルコール(重合度 540, ケン化度 98.8 %) 20 %, コンゴーレッド 0.020 % 水溶液を流しその主屈折率変化の測定を行なった。3-2-1 の Fig. 3-3 に示した光学系において流動セルの前に偏光板 1 枚を用いることにより, sharp cut off amplitude filter を scan させ位相勾配を測定した。液体の流量調整は、流動複屈折測定の場合と同じく窒素ポンベを使用した。圧力はマノメーターで測定し実験中一定圧に保った。

以上のようにして撮影したパターン例を Fig. 4-2 に示す。この写真で明暗の境界は等位相勾配曲線を示す。

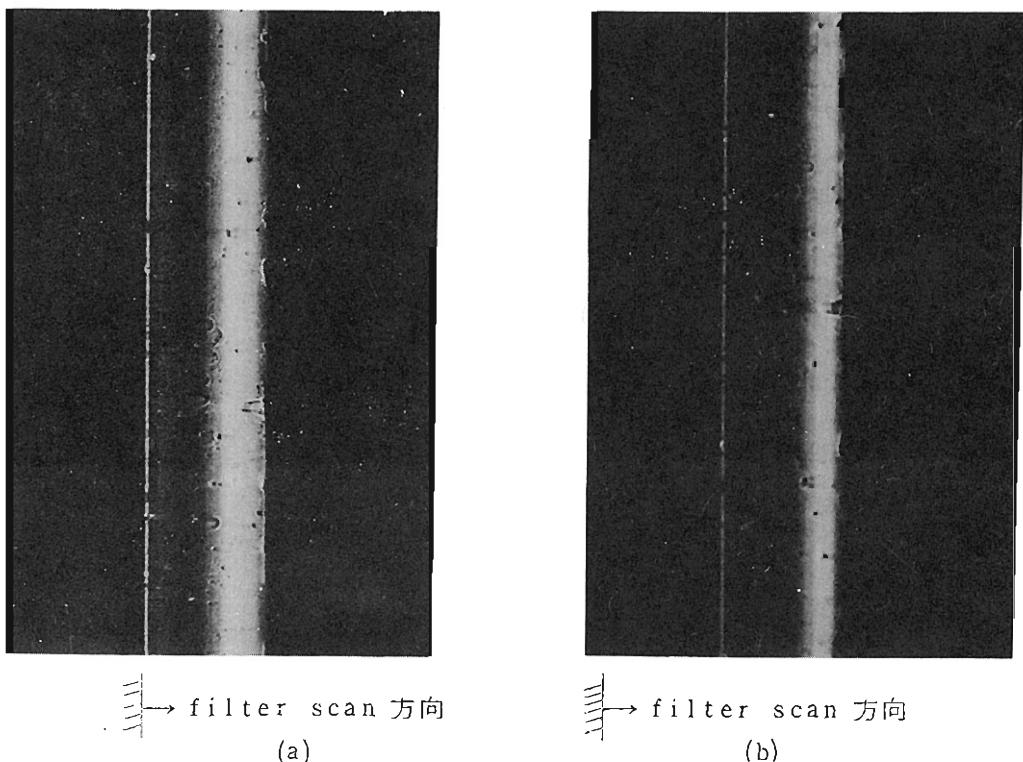


Fig. 4-2 等位相勾配曲線パターン

(a)  $X = 0$  (b)  $X = 0.300 \text{ mm}$

$Q = 0.16 \text{ cc/sec}$ , 流動セルの幅 1 mm, 厚み 5 mm

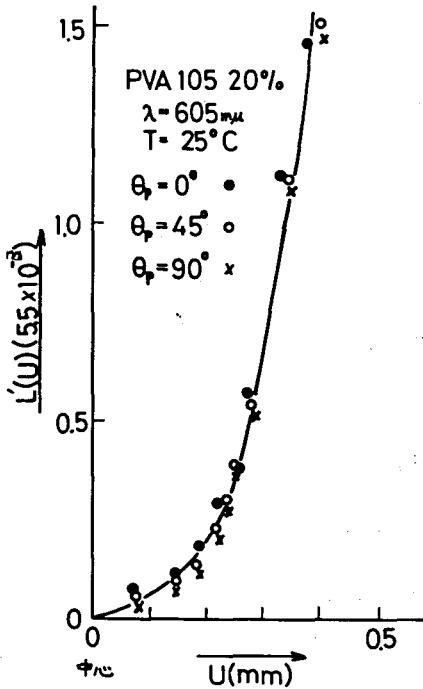


Fig. 4-3 位相勾配曲線 PVA  
20%, CR 0% 水溶液

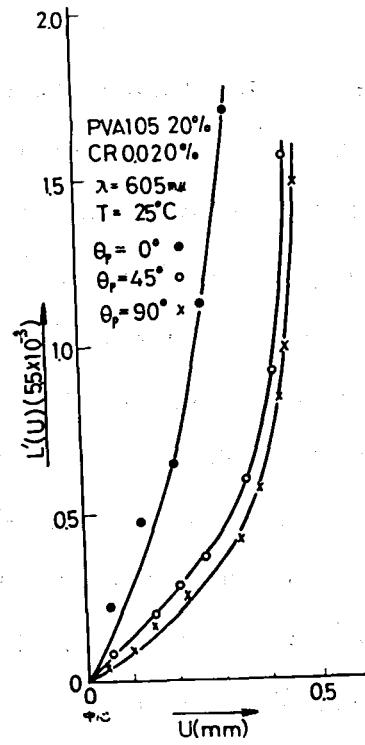


Fig. 4-4 位相勾配曲線  
PVA 20%, CR 0.020  
%水溶液

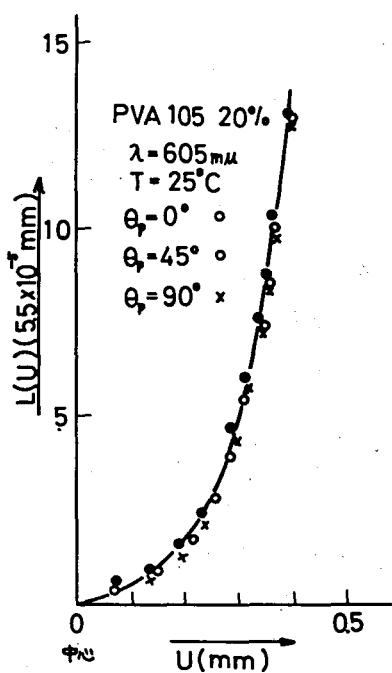


Fig. 4-5 位相分布曲線 PVA  
20%, CR 0% 水溶液

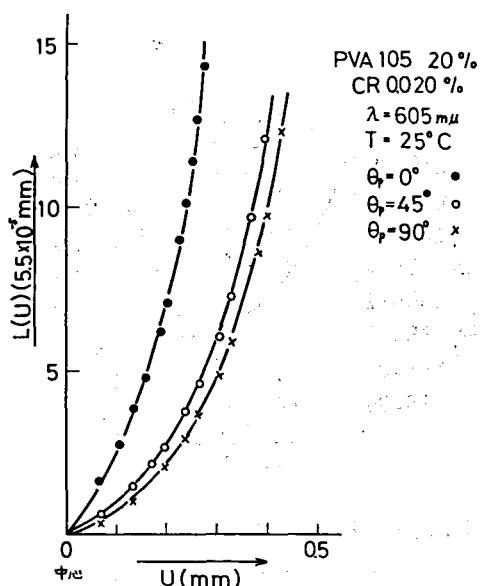


Fig. 4-6 位相分布曲線 PVA  
20%, CR 0.020% 水溶液

これをトレースした結果を Fig. 4-3, 4-4 のグラフに表わした。CR 0%, CR 0.020% 両方共に中心において  $L'(U) = 0$ ,  $U = 0.5 \text{ mm}$  すなわち壁面近くで  $L'(U)$  は大きい値を示している。

Fig. 4-3, 4-4 を  $U$  軸に関して積分し位相分布曲線を Fig. 4-5, 4-6 に示す。なお積分定数を 0 として計算した。

式(4-5)から  $n_{\theta_p}$  を求めた。この場合  $n'$  としてはプルヒリッヒの屈折計で求めた屈折率を用いた。

$$\text{CR} = 0\% \text{ の場合 } n' = 1.36406 \quad \lambda = 605 \text{ m}\mu$$

$$\text{CR} = 0.020\% \text{ の場合 } n' = 1.36417 \quad \lambda = 605 \text{ m}\mu$$

この  $n_{\theta_p}$  をもとにして式(4-2)から  $n_{\max}$ ,  $n_{\min}$ ,  $\chi$  を求めた結果を Fig. 4-7, Fig. 4-8 に示す。

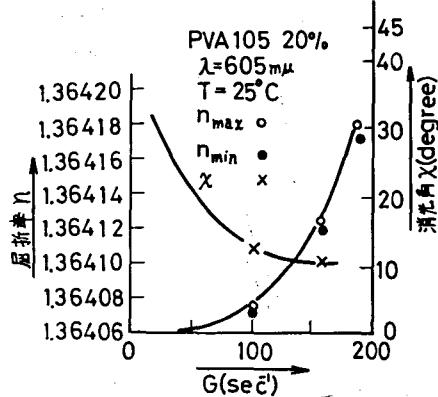


Fig. 4-7 主屈折率および消光角  
PVA 20%, CR 0  
%水溶液

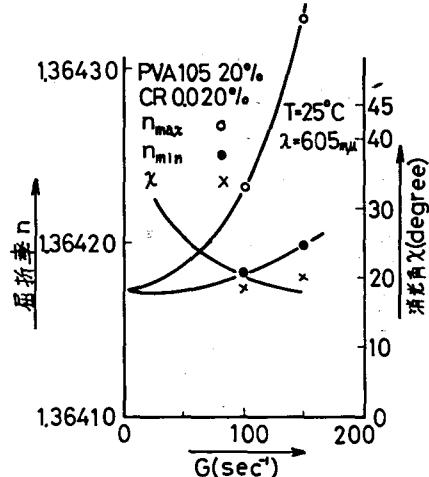


Fig. 4-8 主屈折率および消光角  
PVA 20%, CR 0.020 % 水溶液

Fig. 4-7, 4-8において速度勾配  $G$  は流量から第2編 2-1-1 の式 (2-12) から換算した。 $n_{\max}$ ,  $n_{\min}$  については分子配向によって両者は増加していることを示している。これからでも  $\Delta n$ だけでは解らない情報が得られる事を示している。なお  $n_{\max}$ ,  $n_{\min}$  共に速度勾配に対して増加する原因については解らない。

Fig. 4-8 をもとにして  $\Delta n = n_{\max} - n_{\min}$  複屈折を求めた結果を Fig. 4-9 に示す。この結果は以前に流動複屈折で求めた値とオーダーは一致している。

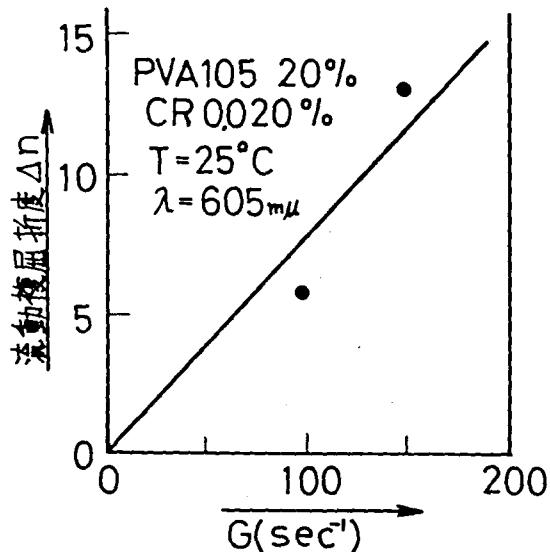


Fig. 4-9 主屈折率から求めた流動複屈折

## 第5章 錐敏色シュリーレン法

今迄のべた方法は、単色光を用いて行なう方法であった。白色光を用いて位相変化を色相変化としてとりだそうとする試み<sup>(108)</sup>はあるが、この場合錐敏色を利用する試みはなされていない。集光レンズに色収差があるものを使用すると、そのレンズの波長に対する分散率が異なるために Fraunhofer diffraction plane 上に連續スペクトルを生じる。このうち  $532 m\mu$  を cut すると錐敏色を back ground とすることができます。これによりわずかな位相変化に対してスペクトルの移動があると錐敏な色変化として検知できる。人間の眼は単色の濃度分布に対する感覚より色相に対する感覚の方が勝れている。多色光源の使用は、単色光に比して物理的にも心理的にも情報量が増加すると考えられる。

### 5-1 錐敏色シュリーレン法

Fig. 3-4 の光学系において  $C_1$  を色消しレンズを用い、 $C_2$  に色収差のある平凸レンズを用いる。先ず干渉フィルタ M として  $532 m\mu$  を用いて Fig. 3-4 の光学系の調整を行い、Fraunhofer diffraction plane 上にスリットの鮮鋭な像を作る。これをスリット像と同じ大きさのフィルタで遮蔽する。干渉フィルタを除き白色光にすると  $532 m\mu$  以外の光線は  $C_2$  レンズの色収差によりスリットの鮮鋭な像を生じない。この鮮鋭さはレンズの分散率によってくる。Fig. 5-1 にこの様子を示す。

屈折率  $n$ 、両面の曲率半径が  $r_1, r_2$  の薄肉レンズの焦点距離  $f$  は

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (5-1)$$

で表わされる。使用した珪クラウンガラス BK7 の屈折率波長分散を Fig. 5-2 に示した。使用した集光レンズの曲率半径は  $r_1 = 94 \text{ mm}$ ,  $r_2 = \infty$  であるので、式(5-1)から波長に対する焦点距離の変化を求めると Fig. 5-3 になる。これから収束レンズの有効半径  $D' = 10 \text{ mm}$  の場合のスペクトルの広がりを波長に対して表わした結果を Fig. 5-4 に示す。したがって  $532 m\mu$  のスリット像に対するラインスリットのフィルタ幅は  $10 \mu$  程度であるので、これにより遮蔽される光線の量は Fig. 5-4 にしたがって異なり干渉色と同じような鋭敏色を back ground とすることができます。

試料にわずかな位相変化があるとき鋭敏に検知できることがわかる。

この場合色収差により像がぼやける心配があるが結像にあずかる集光レンズ  $C_2$  と投影レンズ  $L$  がラムスデンの原理を満足すれば色消しレンズとすることができる。焦点距離  $f_1, f_2$  のレンズを間隔  $\Delta$  離して配置した場合その合成焦点距離  $f$  は

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{\Delta}{f_1 f_2} \quad (5-2)$$

両辺微分して Abbe 数  $\nu$  として

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{1}{\nu} \quad (5-3)$$

の関係を用いると

$$\frac{\Delta f}{f^2} = \frac{1}{f_1 \nu_1} \left( 1 - \frac{\Delta}{f_1} \right) + \frac{1}{f_2 \nu_2} \left( 1 - \frac{\Delta}{f_2} \right) \quad (5-4)$$

焦点距離の色消し条件は  $\Delta f = 0$  より

$$f_1 \nu_1 + f_2 \nu_2 = (\nu_1 + \nu_2) \Delta \quad (5-5)$$

これが Ramsden 形接眼レンズの原理である。

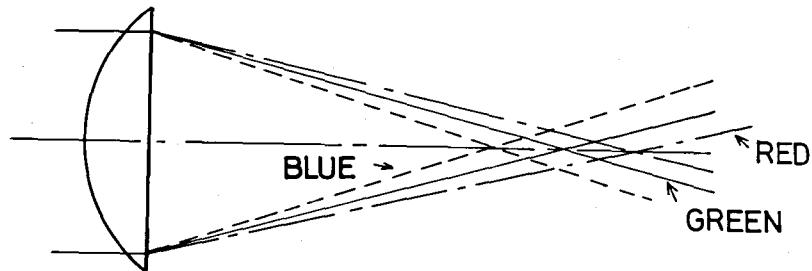


Fig. 5-1 銳敏色シェリーレン法におけるFraunhofer diffraction plane 上の各波長の集光の様子

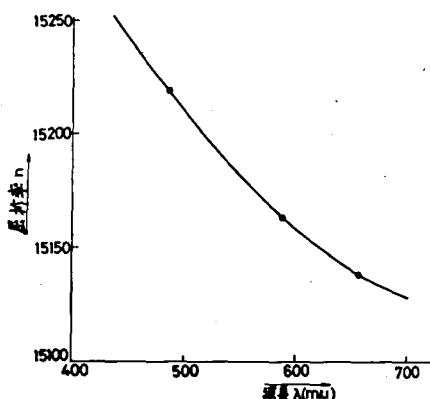


Fig. 5-2 硅クラウンガラス  
BK7 の屈折率波長分散

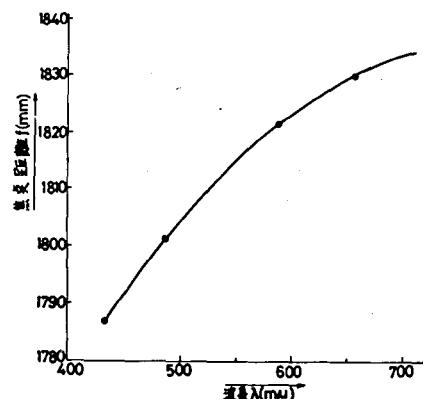


Fig. 5-3 波長に対する焦点  
距離の変化

今  $f_1 = f_2 = \Delta$  とすれば、この原理を近似的に満足するので殆んど色収差は認められず鮮鋭な物体の像を生じる。

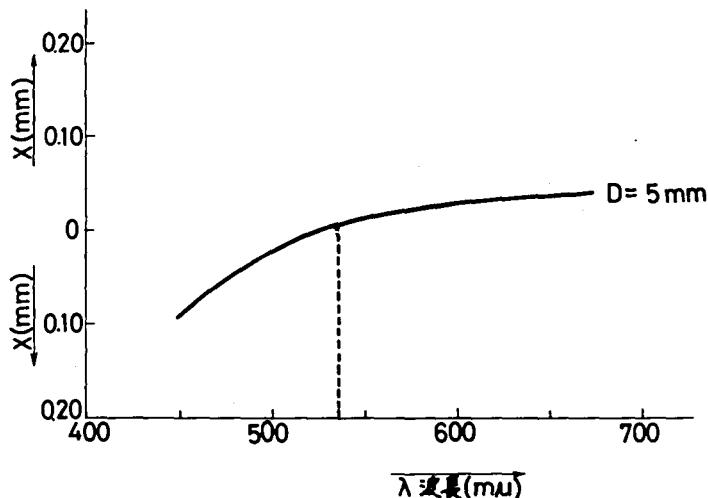


Fig. 5-4 532  $m\mu$ を基準にしたスペクトルムのそれ

## 5-2 純流体素子の流れ模様の観察

5-1 の方法を確かめるために、側壁付着形素子を用いて実験を行なった。

主噴流の流速は 330  $m/sec$ 、静圧 0.08%、総圧 0.8%で行なった。

Fig. 5-6 はそのパターンを示す。噴流の中心部は位相変化が大きいので、白色に近い色を示し噴流のはじめ位相変化はなだらかで、わずかな位相変化が色相の変化としてあらわれている。主噴流中心部が分解していないのは  $L''(U)$  が大きいためと考えられる。この方法は定量性よりもわずかな位相変化を検出するのに適している。特に純流体素子ではその設計のためにその噴流のおよぶ範囲を知りたい場合が多いので、この方法はこのような目的に適しているといえる。

また白色光を用いるので非常に明るい像をみることができ動的な噴流挙動をとらえるのに適している。

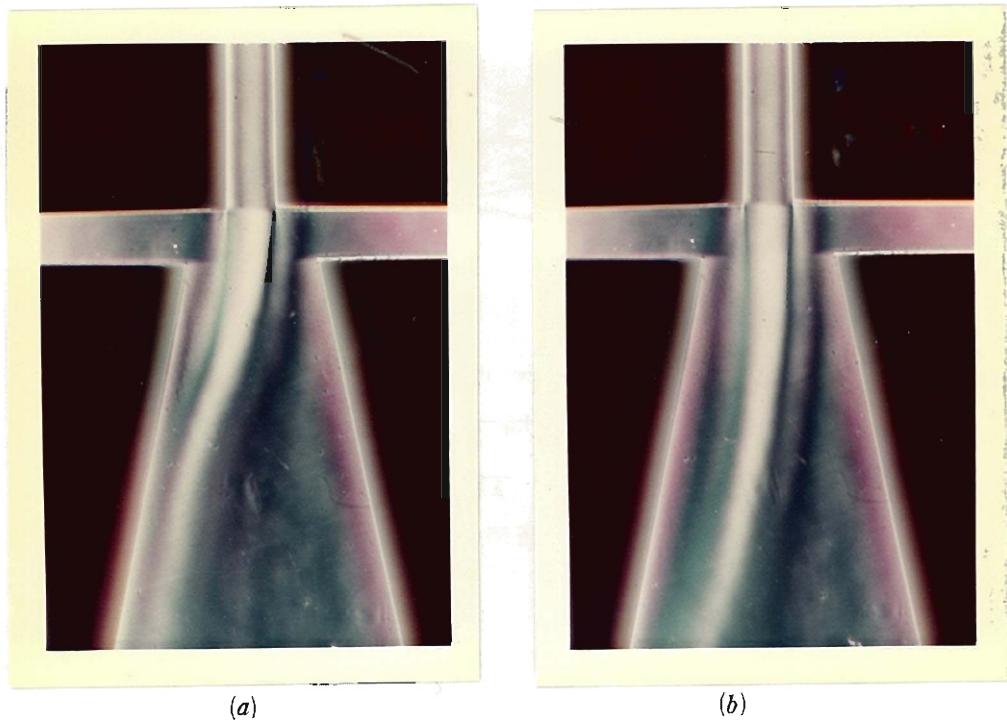


Fig. 5-5 鋼敏色シュリーレン法による側壁付着形素子の付着噴流  
パターン制御ノズル(a)左閉鎖, 右開放, (b)左開放, 右開放

## 第6章 総 括

流体の光学的位相変化を精密に広領域に測定する方法について再回折光学系において Fraunhofer diffraction plane 上に各種の空間周波数フィルタを試み、その特色をまとめ、定量誤差、測定限界、感度について考察を加えた。応用として空気式純流体素子の流れおよび高分子溶液の流れの可視化に応用した。その結果をまとめて次に示す。

- (1) 再回折光学系において Fraunhofer diffraction plane 上の各種空間周波数フィルタについてその特性表をもとに、それぞれの用途に使用すれば、incoherent 光源を使った位相差干渉法にくらべ位相勾配の大きい所も測定でき、位相変化の定量が精密に広領域に行なうことができる。また干渉法にくらべ位相分布の凹凸を簡便に判別できる。
- (2) 光源に白色光源を用い集光レンズの色分散を利用し、極めて簡便な方法で、極めて明るい鋭敏色シュリーレン法を行うことができる。
- (3) 再回折シュリーレン法を空気式純流体素子の噴流の測定に応用した結果
  - (a) 噴流の光学的位相変化は 0.2 干渉次数程度で、sharp cut off amplitude filter scanning 法、linear amplitude filter を用いると精度よく測定でき、この場合の光学的位相変化は静圧に対応する。
  - (b) 静圧分布の正負勾配を見分けることができ、また噴流中心をみることができ、噴流の解析に便利で素子の簡便な設計ができる。
  - (c) 鋭敏色シュリーレン法によれば位相変化を鋭敏に検知でき、噴流のおよぶ領域を明瞭に知ることができ素子の設計を簡便に行える。
- (4) 再回折シュリーレン法は圧縮性流体は勿論、非圧縮性流体でも、流動複屈折を示す液体に適用できる。

- (a) 流動複屈折は速度勾配に対応するから、再回折シュリーレン法によって可視化された位相勾配は速度勾配の変化率を示す。
- (b) 試料の前に偏光板を1枚挿入すれば、任意の電気ベクトルの方向に対する屈折率変化による位相勾配分布を測定でき、これを積分し、主屈折率分布および主軸の方向を計算できる。
- (5) 光学的位相変化については、平行セル中壁に近い方で、空気では減少し、流動複屈折を示す高分子溶液においては増加する。この原因については今後検討する必要がある。
- (6) 再回折シュリーレン法を流体計測へ応用した以上の例においては比較的位相変化が小さいので sharp cut off amplitude filter scanning法, linear amplitude filterを用いたが、他のさらに広領域に位相変化をともなう、たとえば Barus 効果等の測定には他のフィルタを用いるとよい。
- (7) 以上的方法は測定装置も簡単で、安価であるので現場で使用するのに適している。
- (8) 今迄のべた方法は0次のスペクトルについてフィルタを試みたが、高次のスペクトルにフィルタを行うと位相差増幅が可能である、特に微少位相変化の測定に役立つと考えられ今後の問題としたい。

## 結 言

簡便な流れの可視化および精密に流体計測を行うために、光学的流体計測に関する基礎的研究として、各々特色を有する流動複屈折法、流動2色性法、再回折法について研究した結果次のようになる。

- (1) 流動複屈折法について、従来消光角は負になることはないとされていたが、ポリビニルアルコールにおいて負の消光角という新しい現象を発見し、分子レオロジー的に考察した。この高配向性物質を用いて速度勾配に対応する高感度流動複屈折材料ポリビニルアルコールーコンゴーレッド水溶液を開発した。これにより実験的に困難とされていた2次元流の速度分布を精密に定量的に測定でき、簡便な流れの可視化を可能にした。
- (2) 流動2色性法により新しい流体計測が可能であることを示唆し、このため開発した scanning 形流動2色性装置は、流動2色性の吸収率橙円の主軸の大きさと方向を測定でき、分子レオロジー的な研究にも役立つ。
- (3) 再回折シュリーレン法については、各種の空間周波数フィルタを開発し、その特性、精度、測定限界を明らかにし、フィルタの選択によって精密に広領域の流体計測が可能である。新しく考案した、微少な位相変化を検知できる鋭敏色シュリーレン法は流れの可視化に有用である。この方法は圧縮性流体はもちろん、流動複屈折を示す非圧縮性流体にも適用できる。

謝

辞

本研究実施に当り終始かわらぬ懇篤な御指導を賜った大阪大学 副島吉雄教授、ならびに大阪大学 山田朝治教授に深く感謝致します。

再回折法について御教示下さいました大阪大学 篠田軍治名誉教授、大阪大学 鈴木達朗教授、ならびに大阪府立大学永田 良助教授に深く感謝致します。

また実験を行う際に御協力頂いた東 健策氏、奥田省吾氏、矢野俊史氏をはじめ副島研究室の方々に厚く御礼申し上げます。

## 参 考 文 献

- (1) M.J.Rudd : J.sci. Instrum., Ser.2, 1, 723(1968).
- (2) E.R.Pike, D.A.Jackson, P.J.Bourke and D.I.Page: J.sci. Instrum. Ser.2,1, 727(1968).
- (3) M.M.Frocht; Photoelasticity, vol.1, John Wiley, New York(1941).
- (4) J.C.Maxwell: Proc. Roy. Soc.(London), 22, 46(1873).
- (5) A.Peterlin and H.A.Stuart: Z.Phys., 111, 232(1938); 112, 129(1939).
- (6) J.Y.Cassim and E.W.Taylor: Biophys.J., 3, 143(1963).
- (7) P.J.Oriel and J.A.Schellmann: Biopolymers, 4, 469(1966).
- (8) H.Janeschitz-Kriegel: Kolloid Z., 203, 119(1965).
- (9) B.H.Humphry: Proc.Phys. Soc.(London), 35, 217(1923).
- (10) Rosenberg, Benjamin: Rept.617, Navy Dept., David W.Taylor Model Basin, Washington 7, D.C., (1952).
- (11) F.N.Peebles, J.W.Prados, and E.H.Honeycutt; Jr., Prog. Rep. 1 and 3 under Contract Number Nonr-811(04), Eng.Expt. Sta. Univ. Tenn., Knoxville(1954).
- (12) F.N.Peebles and J.W.Prados: J.Polymer Sci., Part C., 5, 37(1964).
- (13) F.N.Peebles and K.C.Liu: Exp.Mech., 5, 299(1965).
- (14) H.G.Jerrard: J.app1. Phys., 21, 1007(1950).

- (15) H.Wayland: J.appl.Phys., 26, 1197(1950).
- (16) 中谷 登, 山田朝治, 副島吉雄: 第 28 回応用物理学会学術講演会予稿集, P199 (1967).
- (17) 中谷 登, 南 光広, 山田朝治, 副島吉雄: 第 30 回応用物理学会学術講演会予稿集, 1, 139 (1969).
- (18) G.B.Thurston and J.L.Shrag: Trans. Soc. Rheology, 6, 325 (1962).
- (19) G.B.Thurston and A.Peterlin: J. chem. Phys., 46, 4881 (1967).
- (20) 小南, 内藤, 小田中: 高化, 12, 34 (1955).
- (21) 細野, 桜田: 高化, 15, 200 (1958).
- (22) 大柳, 松本: 高化, 15, 348 (1958).
- (23) 香川, 津村: 工化, 147, 576 (1944).
- (24) 金子元三: 高分子の物理学, 高分子工学講座, 第 2 卷, P207, 地人書館 (1963).
- (25) 栗山 騒: 旋光分散の利用, 有機化学における物理的方法, 第 5 卷, P5, 共立出版 (1965).
- (26) 日本化学会: 高分子化学上, 実験化学講座, 第 8 卷, P123, 丸善 (1956).
- (27) 倉瀬公男: 計測と制御, 6, 24 (1967).
- (28) T.G.Fox and S.Loshek: J.appl.Phys., 26, 1080(1955).
- (29) 内藤龍之介: 高化, 10, 583 (1959).
- (30) H.A.Scheraga, J.T.Edsall and J.O.Gadd: J. chem. Phys., 19,

- 1101(1951).
- (31) J.J.Hermans: Physica, 10, 777(1943); Rec.trav. Chim., 63, 25(1944).
- (32) W.Kuhn and H.Kuhn: Helv. Chim. Acta, 26, 1394(1943), 28, 1533(1945); 29, 71(1946); 29, 609(1946); J.Colloid Sci., 3, 11(1948).
- (33) A.S.Lodge: Nature, 176, 838(1955).
- (34) H.A.Kramers: J.chem.Phys., 14, 415(1946).
- (35) C.A.Hollingthworth and W.T.Granquist: J.Opt.Soc. Amer., 52, 562(1962).
- (36) C.A.Hollingthworth, W.E.Kaiser and W.T.Granquist: J.Opt. Soc. Amer., 54, 633(1964).
- (37) C.A.Hollingthworth and W.T.Granquist: J.Opt.Soc. Amer., 55, 1617(1965).
- (38) W.Philippoff: J.appl. Phys., 27, 984(1956).
- (39) V.N.Tsvetkov and A.Petaova: J.Phys.Chem., (U.S.S.R.), 23, 368(1948).
- (40) V.N.Tsvetkov: "Newer Methods of Polymer Characterization"  
edited by B.Ke, P563, Interscience, New York (1964).
- (41) 中谷 登, 山田朝治, 副島吉雄: 第 15 回応用物理学関係連合講演会予稿集, 1, 185 (1968).
- (42) 中谷 登, 山田朝治, 副島吉雄: 第 29 回応用物理学会学術講演会予稿集, 1, 219 (1968).

- (43) N.Nakatani, T.Yamada and Y.Soezima: Japan J. appl. Phys., 8, 283(1969).
- (44) J.F.Jackson and S.J.Gill: J.Polymer Sci., Part A-2, 5, 795(1967).
- (45) M.V.Volkenstein: Configurational Statics of Polymeric Chains, P259, 411, Interscience, New York (1963).
- (46) A.Cotton: Compt. Rend., 120, 989(1895).
- (47) Y.Kobayashi, S.Okajima and K.Nakayama: J.appl. Poly. Sci., 11, 2533(1967).
- (48) F.J.Perrin : J.Phys. Radium, 7, 497(1934).
- (49) W.Philippoff: Trans. Soc. Rheology, 4, 159(1960).
- (50) P.Munk: J.Polymer Sci., Part C, 16, 111(1967).
- (51) W.Philippoff: Trans. Soc. Rheology, 5, 163(1961).
- (52) B.H.Zimm: J.chem. Phys., 24, 269(1956).
- (53) A.Peterin: Polymer, 2, 257(1961).
- (54) 山本一二三：レオロジー，新物理学進歩シリーズ8，P155 権書店 (1965).
- (55) E.H.Land: J.Franklin Inst., 224, 269(1937).
- (56) R.S.Stein, G.B.B.M. Sutherland: J.chem.Phys., 22, 1993 (1954).
- (57) D.Patterson and I.M.Ward : Trans. Faraday Soc., 53, 1516 (1957).
- (58) F.P.Chappel: Polymer, 1, 409(1960).

- (59) L.F.Cavarieli: B.H.Rosenberg and M.Rosoff; J.Am.Chem. Soc., 78, 5235 (1956).
- (60) G.R.Bird, M.Parrish and E.R.Blout: Rev. sci. Instrum, 29, 305 (1958).
- (61) 相田昭允, 小沢七兵衛: 應用物理 32, 280 (1963).
- (62) Y.Kobayashi, S.Okajima and K.Nakayama: J.appl. Polymer Sci., 11, 2507(1967).
- (63) Tolansky: Multiple-Beam Interferometry of Surfaces and Films, Clarenden Press, Oxford(1948).  
三宅和夫: 日本物理学会誌, 5, 154 (1950).
- (64) Hand buch der Physik, Bd. xviii, 766, 797(1927).
- (65) Hand buch der Physik, Bd. xviii, 633(1927).
- (66) C.Cranz u. H Schardin: Z.Phys., 56, 147(1929).
- (67) A.Tiselius, K.O.Pedersen and L.B.Eriksson-Ouesel: Nature 139, 546(1937).
- (68) L.G.Longsworth: J.Am.Chem.Soc. 61, 529(1939).
- (69) G.Kegel and L.J.Gosting: J.Am.Chem.Soc. 69, 2516(1947).
- (70) E.Schmidt: Forshng Ing-Wiss. 3, 181(1932).
- (71) Nadai: Am. Soc. Test. Mat. 31, 11(1931).
- (72) 黒田正夫: 理研彙報, 12, 814, 1377 (1933).
- (73) H.Schardin: ZS.f.Insknde 53, 396 424(1933).
- (74) J.St.L.Philpot: Nature 141, 283(1938).
- (75) Towned: J. sci. Instrum., 11, 184(1934).

- (76) D.W.Holder and R.J.North: N.P.L.Nutes in Applied Science No.31(1963).
- (77) H.Schardin: V.D.I.Forchung, Heft 367(1934).
- (78) J.Tsujiuchi: J.Phys. Soc. Japan, 12, 744(1957).
- (79) N.A.Finkelstein: J.Opt.Soc.Amer., 49, 410(1959).
- (80) 辻内順平: 機械試験所報告 No.40 (1961).
- (81) G.Shinoda, T.Suzuki, M.Mino, N.Nakatani, R.Nagata and T.Sasaki: Technol. Repts. Osaka Univ., 14, 521(1964).
- (82) 篠田軍治, 鈴木達朗, 中谷 登, 永田 良: 第11回応用物理学会  
関係連合講演会予稿集, 1, 39 (1964).
- (83) 篠田軍治, 鈴木達朗, 中谷 登, 永田 良: 応用物理, 33, 727 (1964).
- (84) 篠田軍治, 鈴木達朗, 三野正幸, 永田 良: 応用物理, 34, 197 (1965).
- (85) G.Shinoda, T.Suzuki, N.Nakatani and R.Nagata: Japan J.appl. Phys., 3, 663(1964).
- (86) 中谷 登, 山田朝治, 副島吉雄: 第14回応用物理学会関係連合講演会予稿集,  
1, 233 (1967).
- (87) 中谷 登, 山田朝治, 副島吉雄: 応用物理, 37, 216 (1968).
- (88) H.H.Hopkins and P.M.Barham: Proc.Phys.Soc. 63B, 737(1950).
- (89) A.M.Goodbody: Proc.Phys.Soc., 70, 361(1957).
- (90) H.H.Hopkins: Proc.Roy.Soc., 217A, 408(1953).
- (91) S.Goldman: Information Theory, P71-75, Prentice Hall, Inc.  
Englewood Cliffs, New Jersey (1953).
- (92) S.Goldman: J.Opt.Soc.Amer., 52, 1131(1962).
- (93) 尾崎省太郎, 原 美明: 純流体素子入門, P112, 日刊工業新聞社(1967).

- (94) 原田正一, 尾崎省太郎: 流子工学, P 95, 養賢堂 (1969).
- (95) P.A.Lush: Second Cranfield Fluidics Conference P.AFI(1967).
- (96) 米持政忠, 前田良昭, 新居田孝太郎: 第2回純流体素子シンポジウム前刷, P 51 (1969).
- (97) 森永智昭, 太田道男, 山本圭治郎: 第3回純流体素子シンポジウム前刷, P 61 (1968).
- (98) R.A.Sawyer: Second Cranfield Fluidics Conference P.A-2-17 (1967).
- (99) J.R.Keto; Proceedings of the Fluid Amplification Symposium P.109 (1962).
- (100) 野本 明, 島田公雄, 岩泉洋一, 新谷 聰: 第4回純流体素子シンポジウム前刷, P 51 (1969).
- (101) C.Bourgue and Newman: Aeronautical Quarterly 10, 201(1960).
- (102) 花房秀郎, 阪本弘克: 計測と制御, 6, 862 (1967).
- (103) 中谷 登, 金持昭治, 山田朝治, 副島吉雄: 第16回応用物理学会関係連合講演会, 第24回日本物理学会年会合同講演会予稿集, 2, 69 (1969).
- (104) 中谷 登, 南 光広, 山田朝治, 副島吉雄: 第8回SICE学術講演会予講集, P 613 (1969).
- (105) R.A.Sawyer: J.of Appl. Mech., 9, 543,561(1960).
- (106) H.Gortler: ZAMM,22,244(1942).
- (107) S.G.Levin, F.M.Manion: FA5, Dec.(1962).
- (108) H.Phillips: J.sci.Instrum., Ser.2, 1, 413(1968).
- (109) Alan J.Werner: Appl. Optics, 7,837(1968).

## 論 文 目 錄

(主論文のうち印刷公表したもの)

1. Further Consideration on the Measurement of Strain Distribution by the Use of Diffraction Grating-Image of strained Grating in an Optical Double Diffraction System-  
Technol. Repts.  
Osaka Univ.,  
14, 521(1964).  
(昭和39年3月)

(回折格子による歪測定に関するさらに深い考察

-再回折光学系における歪み格子像-)

1. 再回折光学系を用いた不均一歪の定量  
第11回応用物理学  
会関係連合講演会予  
稿集, 1, 39(1964).

(昭和39年4月)

1. 再回折光学系を用いた物体の位相分布の測定 I.  
回折面上のマスクの移動による方法  
応用物理, 33,  
727 (1964).  
(昭和39年10月)

1. Strain Measurement by Double Diffraction Method  
(再回折法による歪測定)  
Japan J. appl.  
Phys.  
3, 663 (1964).  
(昭和39年10月)

1. 広領域シュリーレン法とその歪測定への応用  
第14回応用物理学  
会関係連合講演会予  
稿集, 1, 233(1967).  
(昭和42年4月)

1. 流動複屈折および流動2色性の流体計測への応用 第28回応用物理学  
会学術講演会予稿集,  
P199 (1967).  
(昭和42年10月)
1. 広領域シュリーレン法と歪および主応力測定への 応用物理, 37,  
応用 216 (1968).  
(昭和43年3月)
1. 流動複屈折および流動2色性の流体計測への応用 第15回応用物理学  
II. 会関係連合講演会予  
稿集, 1,185 (1968).  
(昭和43年3月)
1. 流動複屈折および流動2色性の流体計測への応用 第29回応用物理学  
III. 会学術講演会予稿集,  
1, 219 (1968).  
(昭和43年10月)
1. Study of Rheological Properties of Poly- Japan J. appl.  
vinyl Alcohol Aqueous Solution by Flow Phys.  
Birefringence 8, 283 (1969).  
(流動複屈折法によるポリビニルアルコール水溶  
液のレオロジーに関する研究) (昭和44年2月)

1. 再回折法による流れの可視化

第 16 回 応用物理学

会関係連合講演会,

第 24 回 日本物理学

会年会合同講演予稿

集, 1, 69 (1969).

(昭和 44 年 3 月)

1. 空気式純流体論理素子の再回折シュリーレン法による流れ模様の観察

第 8 回 SICE 学術

講演会予稿集,

P 613 (1969).

(昭和 44 年 8 月)

1. 流動複屈折および流動 2 色性の流体計測への応用  
IV

第 30 回 応用物理学

会学術講演会予稿集,

1, 139 (1969).

(昭和 44 年 10 月)

