

博士學位論文

①

論文題目 ラビングレタ高分子膜表面に
おける液晶の表面配向力に関
する研究

提出者 東北大学大学院工学研究科
電子工学 専攻

学籍番号 97TD3526

氏名 若生一広

指 導 教 官	内 田 龍 男 教 授
審 査 委 員 (○印は主査)	○ <u>内田龍男</u> 教授 1 <u>沢田康次</u> 教授 2 <u>川上彰二郎</u> 教授 3 <u>吉野勝美</u> 教授 4 <u>宮下哲哉</u> 助教授

目次

第1章 序論	1
第2章 ラビングによる高分子配向膜表面での溝形成機構の解析	8
2-1 緒言	8
2-2 ラビング繊維形状とラビングにより高分子配向膜上に形成される溝の観察	8
2-2-1 繊維一本によるラビング	8
2-2-2 ラビング繊維形状の観察および繊維一本でのラビングによって高分子配向膜上に形成される溝の観察	10
2-3 ラビング繊維形状と溝形状についての定量的解析	16
2-3-1 モデルによる考察	16
2-3-2 曲率半径によるラビング繊維形状と溝形状の定量的比較	18
2-4 結言	23
第3章 ラビングされた面積比と表面配向力の関係	24
3-1 緒言	24
3-2 表面配向力の測定	24
3-2-1 表面配向力の測定原理	24
3-2-2 液晶ねじれ角の測定方法	31
3-2-3 表面配向力の測定限界	34
3-3 ラビング面積比による表面配向力の定量的表現	37
3-3-1 ラビング面積比と表面配向力の関係	37
3-3-2 液晶配向分布の測定	40
3-3-3 液晶配向分布の理論的導出	42

3-3-4 理論と実験の比較	47
3-4 結言	49
第4章 ラビング面積比によるラビング強度の統一的表現	50
4-1 緒言	50
4-2 押し込み量の定量化	50
4-2-1 押し込み量の基準点の設定方法	50
4-2-2 ラビング強度パラメータLと表面配向力の関係	52
4-2-3 押し込み量の変化がもたらす液晶配向への影響	53
4-3 多数の繊維の場合におけるラビング面積比と表面配向力の関係	59
4-3-1 配向寄与領域の累積幅Sの理論的導出	59
4-3-2 配向寄与領域の累積幅Sの導出法	64
4-3-3 配向寄与領域の累積幅Sと表面配向力の関係	66
4-3-4 ラビング面積比によるラビング強度の統一的表記	68
4-4 結言	70
第5章 結論	71
参考文献	73
謝辞	75
投稿論文	76
学会発表	77

第1章 序論

分子の形状が棒状もしくは板状となるある種の物質では液体と結晶の間の温度領域において、結晶の持つ分子配列の規則性による異方性を保持しつつ液体の持つ流動性を兼ね備えた状態をとる^{1,2)}。この状態が液晶相状態であり、このような状態を取る物質を液晶と呼んでいる。また、液晶分子の配向分布はその分子形状に起因する分子場によって決まり、この平均配向方向をダイレクタと呼ぶ。

液晶には光学的異方性があり³⁾、また弱い電場の印加によって分子配列を変化させることが可能である⁴⁻⁷⁾。これによって液晶の分子配列の変化に伴う光学的性質の変化を利用した光学素子へ応用することができる。その際に低電圧でしかも非常に薄い試料で大きな光学特性の変化が得られるために、液晶はディスプレイという形で広く用いられている。更に、液晶の特異な電気光学的性質を利用することにより光メモリ、空間光変調素子、光コンピュータ等の種々の素子への応用が可能であり、これらの実現に向けて様々な研究が行われている⁸⁻²⁸⁾。

液晶を電気光学素子として動作させるためには、一般に図 1-1 に示したように表面に透明電極を付け、数 μm ~ 数十 μm の空隙を設けた 2 枚のガラス基板の間に液晶を封入し、その液晶のダイレクタを一方向にそろえる必要がある。このための配向処理

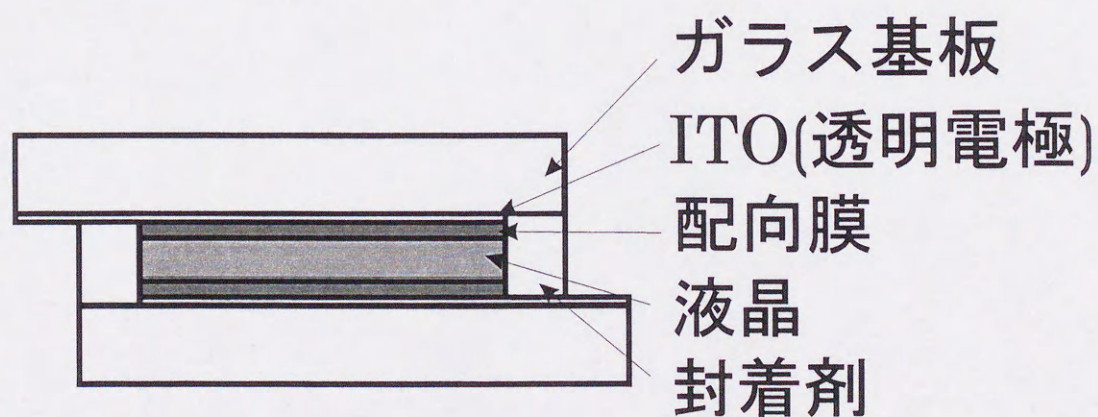


図 1-1 液晶素子の構成

法としては現在、無機物の斜方蒸着法²⁹⁾、Langmuir-Blodgett (LB)法³⁰⁾、高分子延伸法³¹⁾、紫外線照射による光配向法³²⁾、電子/イオンビーム法³³⁾、転写法³⁴⁾、ラビング法³⁵⁾等が提案されている。この中でラビング法は図 1-2 に示すようにガラスの表面に

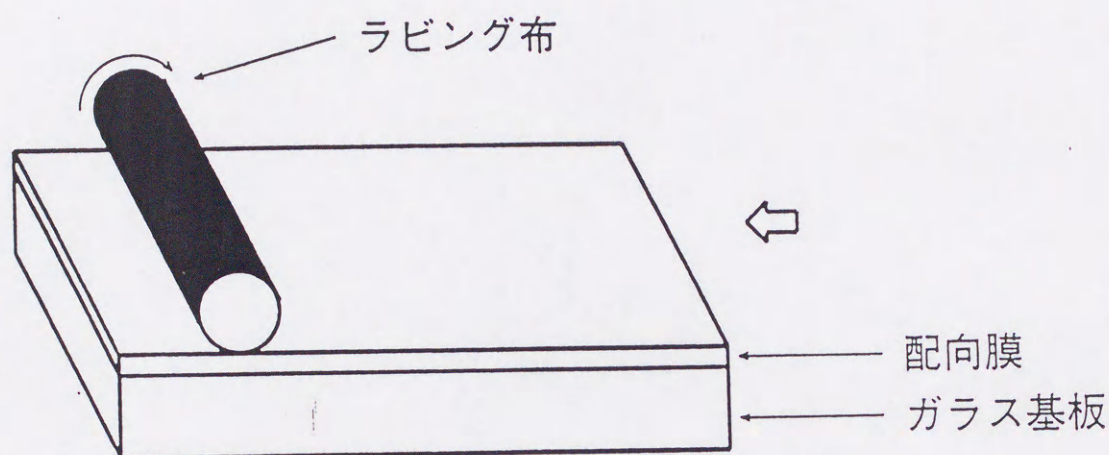


図 1-2 ラビング法の概要

高分子有機薄膜（配向膜）を形成し、この表面をベルベット状の布で一方向に擦ることによって液晶ダイレクタをそろえるという簡便な方法である。このため、経験的な手法であるが工業的に最も広く用いられている。この方法は大面積を高速で処理でき、均一な配向を再現性良く得られるという特長を有している。しかし、この方法による液晶の配向メカニズムについては十分に解明されておらず、このため表面配向力³⁶⁾⁻⁴⁰⁾の定量的な制御において、所望の表面配向力を得るための処理条件を見出すことが困難であるという大きな問題がある。ここで、表面配向力とは液晶の配向を制御する程度を表すパラメータとして用いられており、これは基板など固体の表面における液晶について、図 1-3 に示すように液晶ダイレクタを配向しやすい方向すなわち配向容易軸方向に固定しようとする力を表す量である。この表面配向力は液晶デバイスの特性を左右する重要なパラメータであるだけでなく、配向処理を行った場合の液晶配向機構解明のためにも有効なパラメータとなる。表面配向力は基板からの起き上がり方向である極角方向と、基板表面における方位角方向の 2 つの表面配向力に分けられる。配向処理の条件を変化させることによりこの表面配向力が変化する。

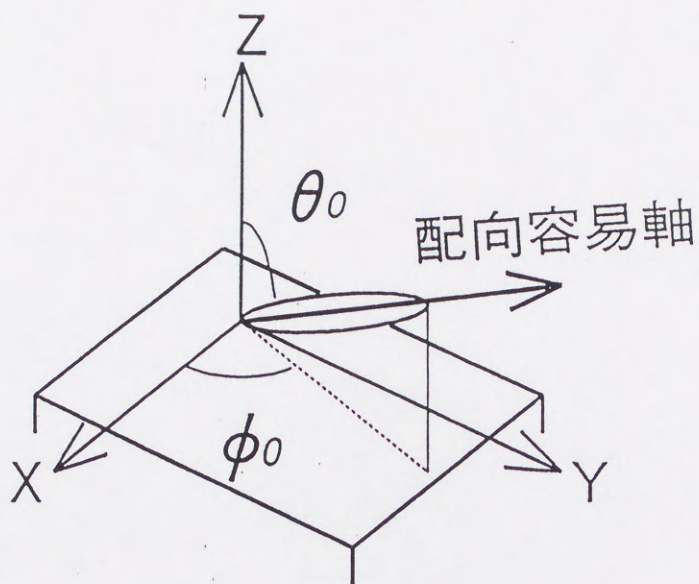


図 1-3 表面における配向容易軸

ラビングされた配向膜表面における液晶分子の配向機構としては、これまで主として次の二つの説が考えられていた。

(1) 表面形状説

ラビングの際にマイクログループと呼ばれる nm オーダーの多数の細かい溝が形成され⁴¹⁾、図 1-4 に示すように液晶層が受ける配向歪みエネルギーが最小となるように、この溝の方向に液晶分子が配向するという説

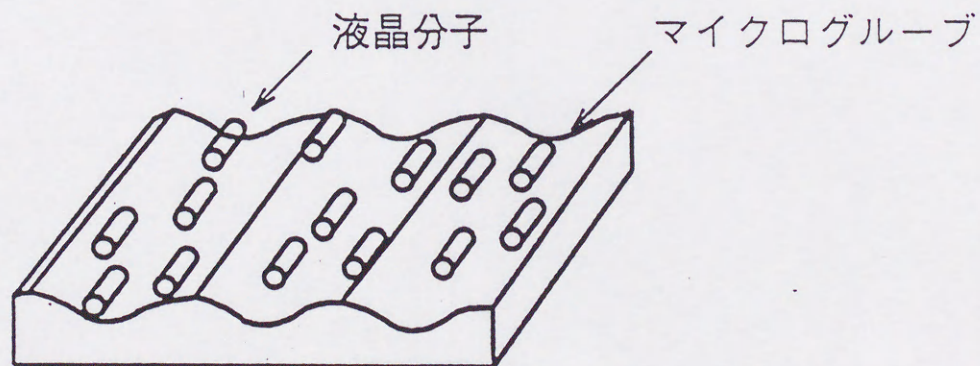


図 1-4 表面形状による液晶分子の配向

(2) 分子間相互作用説

ラビングの際に配向膜表面の高分子が一方方向に配向し、図 1-5 に示すように配向した配向膜表面の高分子と液晶分子の相互作用によって系全体の自由エネルギーが最小

となる方向に液晶分子が配向するという説

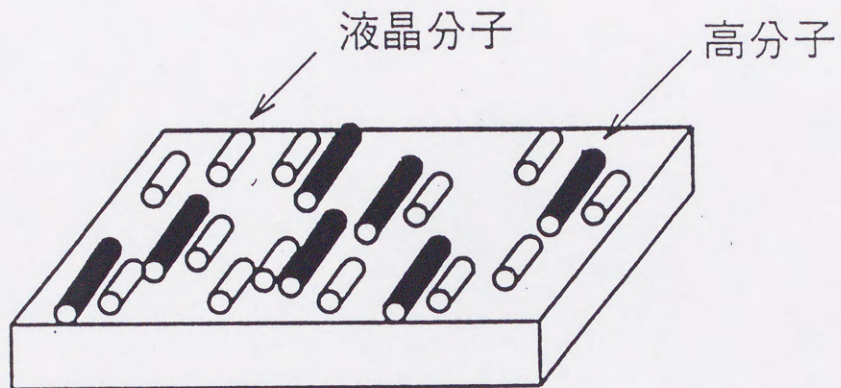


図 1-5 分子間相互作用による液晶分子の配向

これらのいずれが主な配向メカニズムであるかを明らかにする研究が当研究室の李らによって行われ、その結果図 1-6 に示すように表面配向エネルギーの観点から、近距離相互作用が支配的な要因であり、長距離相互作用は主たる要因ではないことが明らかにされた⁴¹⁾。

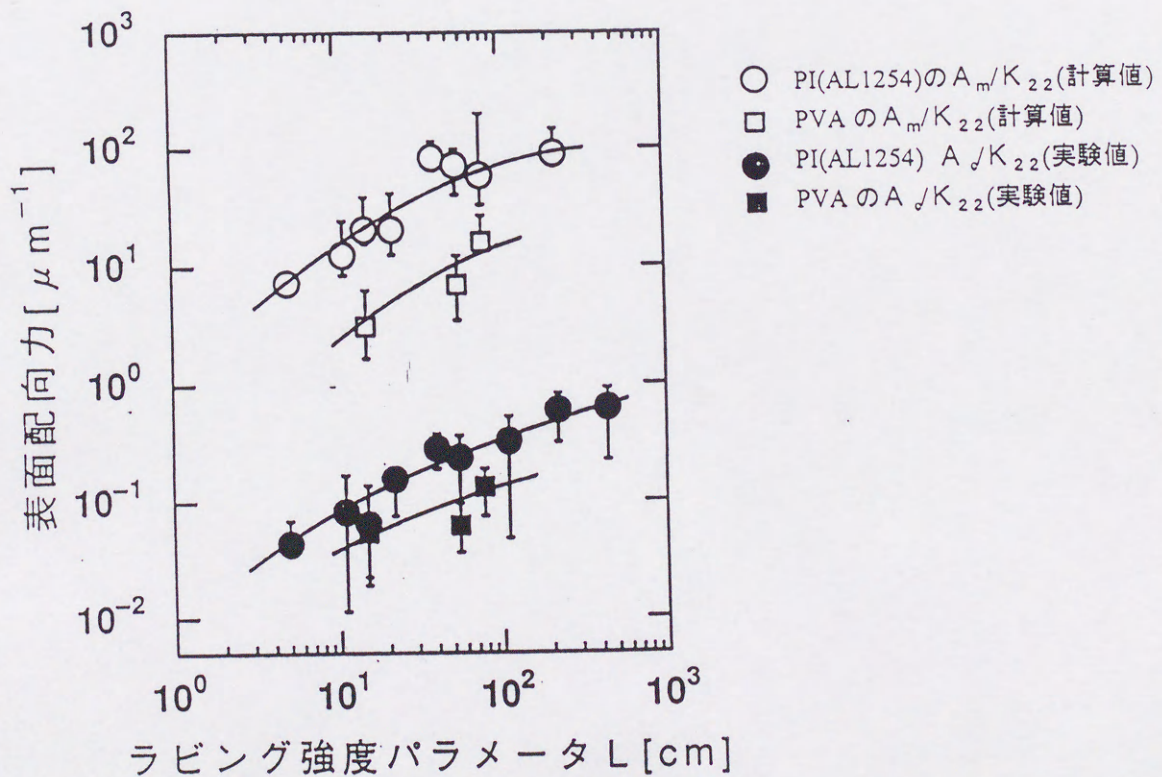


図 1-6 (a) 表面形状説に基づく表面配向力の計算値及び実験値⁴¹⁾

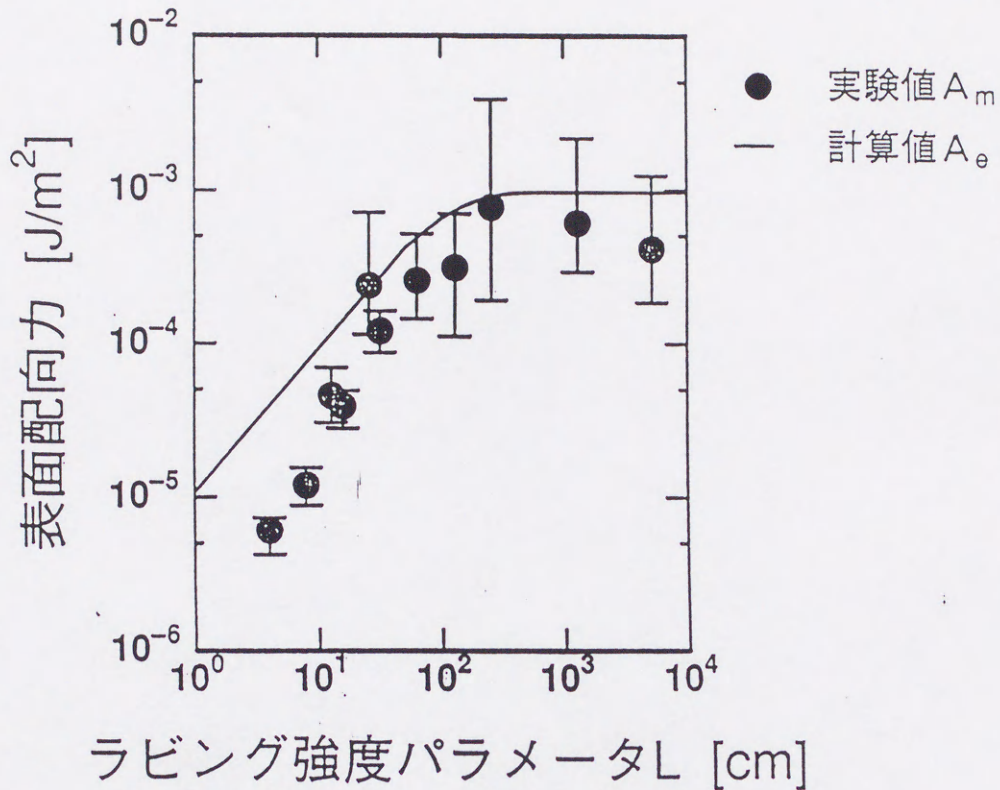


図 1-6 (b) 分子間相互作用説に基づく表面配向力の計算値及び実験値⁴¹⁾

一方、長距離相互作用説の基幹となるマイクログループは基板表面に存在するダスト粒子によって形成されたものであり、液晶分子の配向とは直接対応しないとの報告がある⁴²⁾。このように液晶の配向メカニズムの解明を行う上で、ラビングによる液晶の配向効果や配向膜の表面形状変化及びその発生機構をより詳細に解明することは非常に重要である。

ラビング処理においてラビングの強度を表す方法としてこれまでは以下のラビング密度Dが提案され用いられてきた。⁴³⁾⁻⁴⁷⁾

$$D = \gamma \cdot L \quad (1-1)$$

ここで、Lはラビング強度パラメータと呼ばれ、基板上的の任意の一点をラビング布が通過する長さを表し、次式で与えられる。

$$L = N \cdot \ell \cdot \left(1 + \frac{2\pi r n}{60v} \right) \quad (1-2)$$

図 1-7 に示すように、(1-2) 式中のN (回) はラビング回数、r (cm) はラビングローラー

の半径、 n (rpm) はローラーの回転速度、 v (cm/sec.) は基板移動速度、 l (cm) は接触長とよばれラビング布と基板が接する部分の長さである。一方、(1-1) 式中の r は押

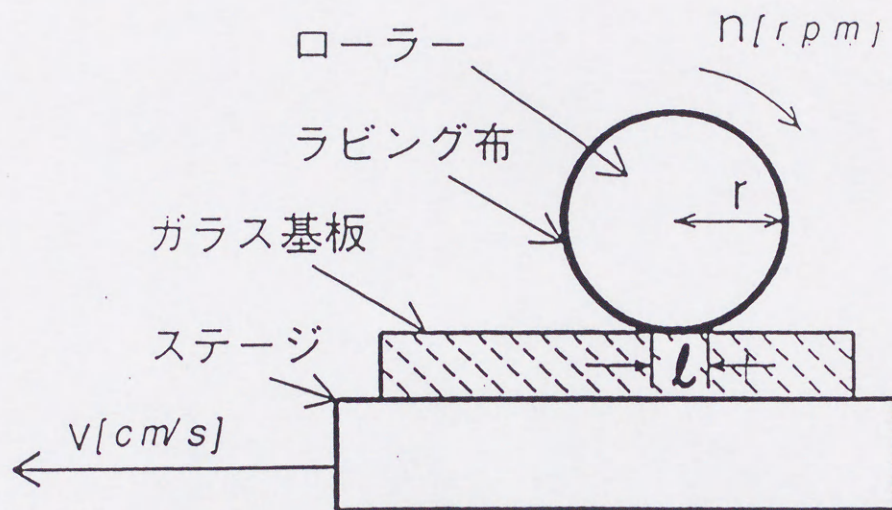


図 1-7 ラビング強度パラメータ L の概要

し込み量、ラビング繊維密度、摩擦係数等の関数である。ここで、押し込み量とは図 1-8 に示すようにラビング繊維が基板にどれだけ押し込まれているかを表し、 M と表

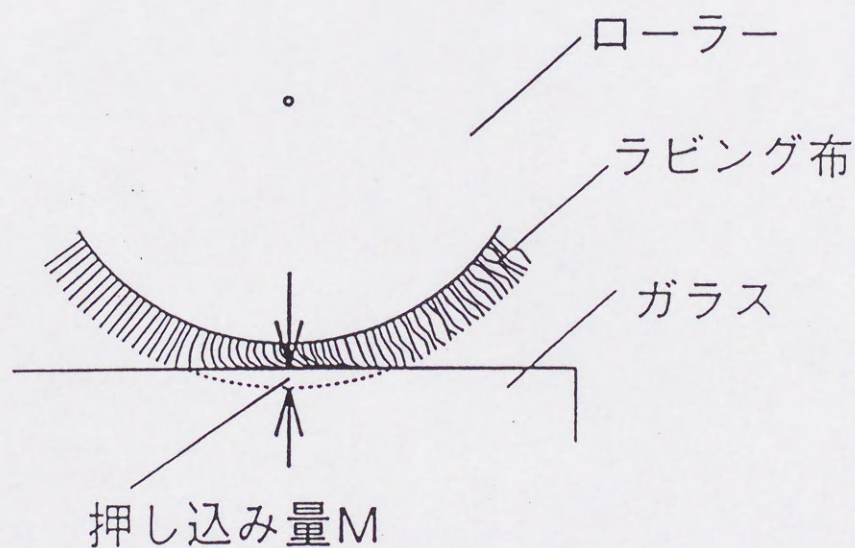


図 1-8 押し込み量の説明図

記する。 r は現在のところ定量的に与えることが困難であるため、一般には r に影響を与える条件を一定にして定数とみなし、 L を変化させることによってラビングの強

度を変化させている。ラビング法では、 L を変化させることによって方位角方向の表面配向力(以後、単に表面配向力と呼ぶ)を制御できることが明らかになっている。しかしながら、ラビング密度 D の中には一般の製造工程で用いられている押し込み量による制御や、繊維密度等のパラメータが入っていないため、実用的には有効性の低いものである。ところで、ラビング密度 D はラビング法が配向膜全体を同条件で均一に処理を行うものとするマクロな観点から導かれたパラメータである。ラビング表面に関する他の研究もこの見解からのアプローチがほとんどであった。これに対して実際は有限の繊維で構成された布を用いてラビング処理を行っている。この布中の個別の繊維一本ずつに着目した場合、それによるラビングで形成される配向膜表面の形状や、液晶配向への影響といったミクロな観点からの明確な定量的解析はまだ行われていない。また通常のラビングにおいては、多数の繊維で配向膜表面を擦っているためにミクロな観点からの解析を困難にしている。従って本研究では、多数の繊維によるラビングを繊維一本によるラビング⁴⁸⁾の重ね合わせとして捉えた実験を行った。これによって精密かつ均一に制御されたラビングを行い、高分子配向膜表面形状の変化及びラビングによる液晶の配向効果について、ミクロな観点による定量的な解析を行った。

本章は全5章により構成され、第1章は序論である。第2章では、基板表面に塗布した高分子配向膜のラビングによる表面形状変化について詳細に調べた結果について述べる。第3章では、ラビングされた面積比と表面配向力の関係について定量的に調べた結果について述べる。第4章では、新たに押し込み量を含めた統一的なラビング強度を表すパラメータを提案し、表面配向力との関係について解析した結果を述べる。第5章は結論である。

第2章 ラビングによる高分子配向膜表面での溝形成機構の解析

2-1 緒言

液晶の配向処理法であるラビング法において、通常行われているラビングは多数の繊維が植毛されたラビング布をローラーに取り付け、ローラーを回転させながら基板を移動させることにより配向膜表面を一方向に擦るものである。しかし、この過程では多数の繊維でラビングを行っているために、繊維長のばらつきや、繊維どうしのよじれ、たわみ等による繊維密度分布の不均一性、さらには繊維それぞれにおけるラビング方向のばらつきが生じる。そのためにラビングの過程でどのように配向膜表面に溝が生成されるかを詳しく調べるのは困難である。ここで、このラビングについて考えると、これは繊維一本のみによるラビングの重ね合わせとして捉えることができる。そこで、繊維一本のみによるラビングを行った場合に配向膜表面に生じる溝の形成機構が解明できれば、通常行われる多数の繊維でのラビングによる液晶の配向メカニズムがより詳しく考察できる。本章では繊維一本のみによるラビングで配向膜表面がどのような変形を受けるかについて4種類のラビング繊維を用いて実験を行い、繊維と配向膜表面に形成される溝形状との対応について調べた。

2-2 ラビング繊維形状とラビングにより高分子配向膜上に形成される溝の観察

2-2-1 繊維一本によるラビング

繊維一本のみによるラビング方法を図2-1に示す。ローラー上にラビング繊維一本のみを残し、他の繊維は除去してローラーを等速度で回転させ、ローラー回転方向に対して垂直に基板を等速度で移動させるラビングを行った。この方法により等間隔かつ平行で精密に制御されたラビングが実現できる。そこで実際にこのラビングを行い、

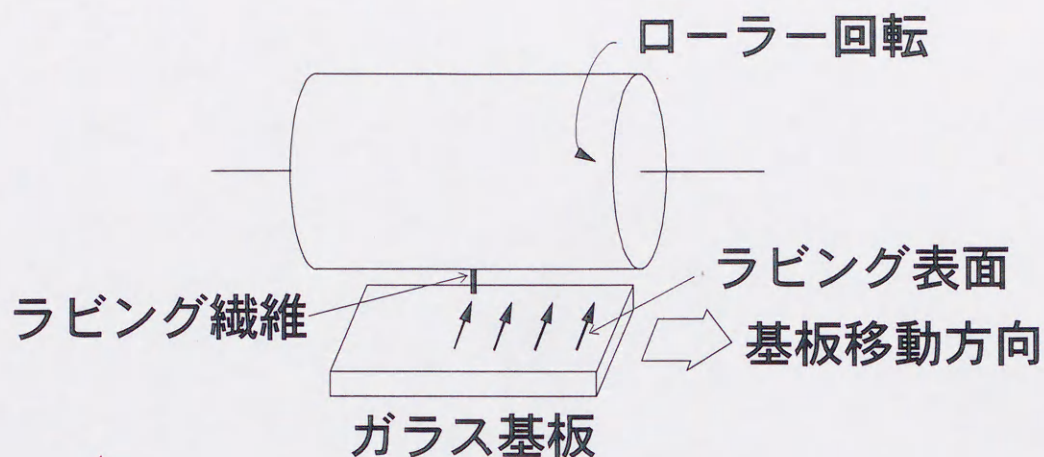


図 2-1 繊維一本によるラビング方法

ラビングした部分の液晶の配向を観察した。ラビング条件としては、作製する液晶セルの片側の基板はラビング間隔を $9.38(\mu\text{m})$ に設定して繊維一本によるラビングを行い、もう片側の基板は通常の多数の繊維により強ラビングを施した。これらの基板のラビング方向が平行となるようにセルを作製し、その後ネマティック液晶(GR-41, チッソ(株)製)に自発的なねじれを持たせるためにカイラル剤であるコレステリルノノアート(Cholesteryl nonanoate, CN)を 0.88wt% 添加したものをセルに導入した。液晶のねじれピッチは $22.0(\mu\text{m})$ 、セル厚は $5.5(\mu\text{m})$ である。なおカイラル剤、ねじれピッチ及びセル厚の設定については第 3 章で詳しく述べる。作製した液晶セルについて、偏光顕微鏡を用いてクロスニコルの条件で観察したものを図 2-2 に示す。図より、繊維一本でラビングされた部分の液晶がラビング方向に配向して暗いライン状の部

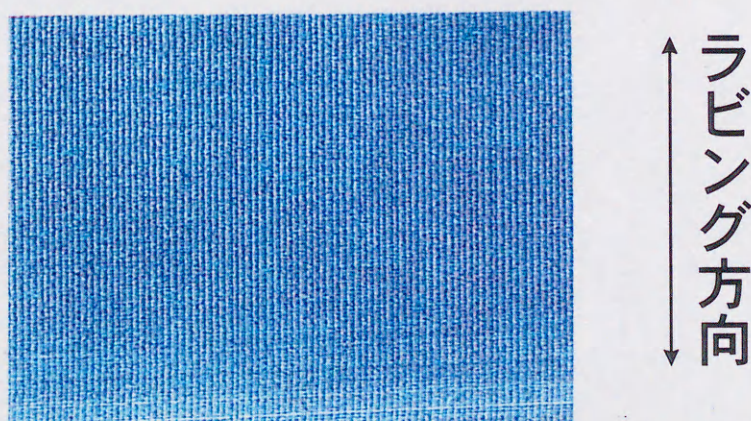


図 2-2 繊維一本ラビングを施した液晶セル

分として観察され、ほぼ等間隔にその配向領域が形成されていることが確認された。これより、この方法でラビングされた部分のみ液晶をラビング方向に配向させていることを確認した。以下では繊維一本でのラビングにおける配向膜上の溝形成機構について詳細に調べた結果を述べる。

2-2-2 ラビング繊維形状の観察および繊維一本でのラビングによって高分子配向膜上に形成される溝の観察

まず、繊維一本のラビングによって生じる配向膜表面形状の変化について、走査型プローブ顕微鏡（セイコー電子工業株製 SFA300, SPA300）を用いて原子間力顕微鏡（Atomic Force Microscope, AFM）モードで観察した。配向膜としては、主鎖型のポリイミドである AL1051（JSR株製）を使用した。この化学構造を図 2-3 に示す。また、ラビングの際のパラメータ及び用いた繊維の種類をそれぞれ表 2-1 及び表 2-2 に示す。ここで、表 2-1 における押し込み量の設定方法については、第 4 章で詳しく述べる。

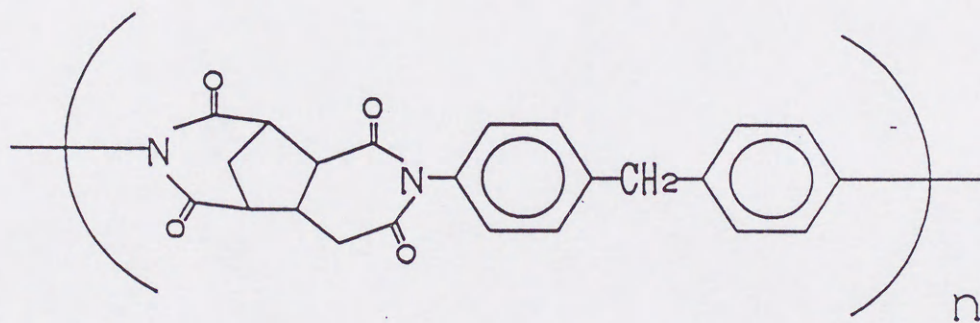


図 2-3 AL1051 の化学構造

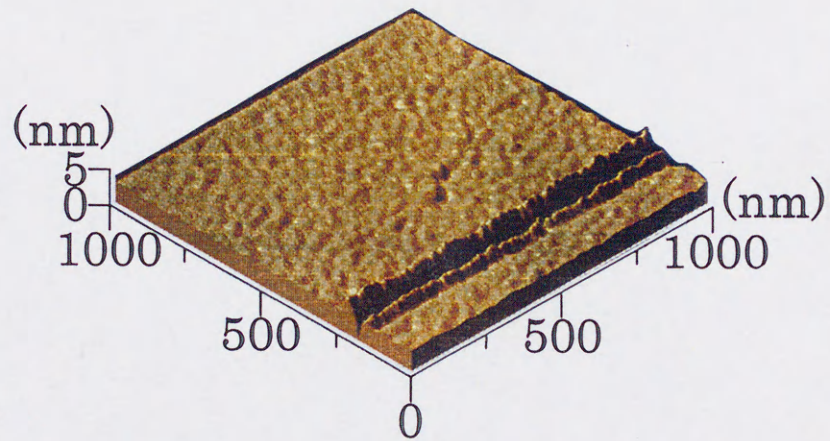
表 2-1 繊維一本ラビングの際のパラメータ

ラビング回数 N (回)	1
ローラー回転数 n (rpm)	400
基板移動速度 v (μm)	70.8
押し込み量 M (mm)	0.2

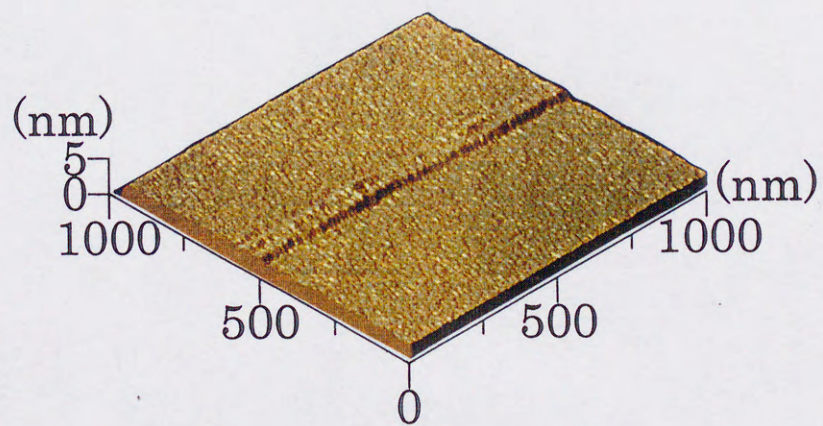
表 2-2 用いた繊維

材質	型番
ナイロン	YO-15-N (株吉川化工 製)
レーヨン	YA-20-R (")
綿	YA-25-C (")
グラスファイバ	

走査型プローブ顕微鏡による配向膜表面の測定結果を図 2-4 に示す。AFM モードによる基板の測定範囲は $1(\mu\text{m})$ 四方、スキャン速度は $2(\mu\text{m}/\text{sec.})$ とした。図より、い

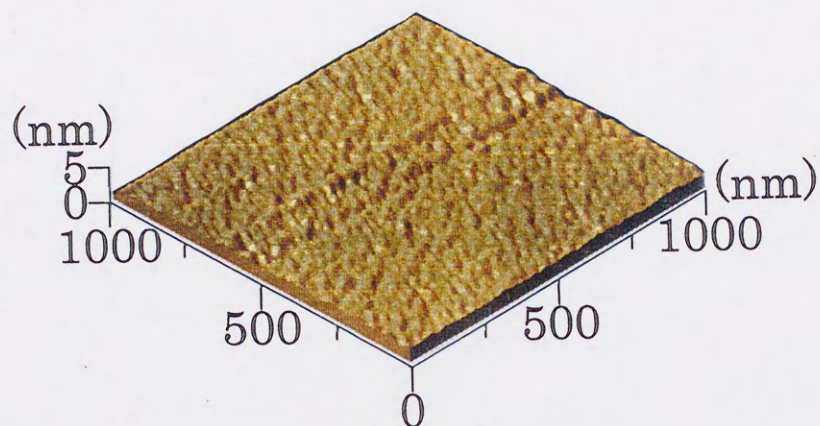


(a) YO-15-N (ナイロン)

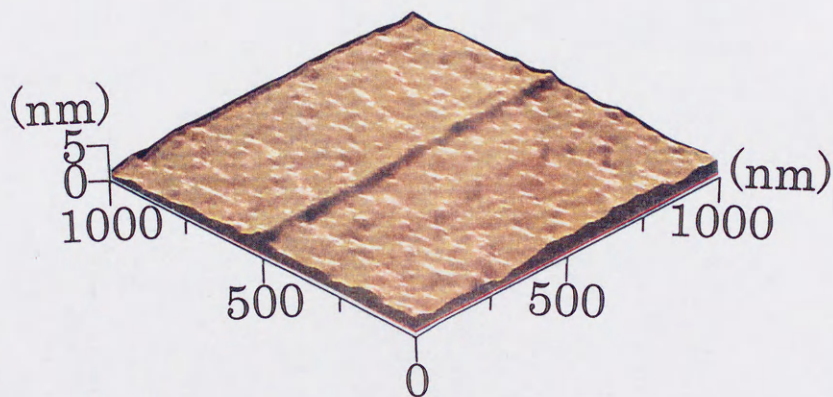


(b) YA-20-R (レーヨン)

図 2-4 繊維一本ラビングを行った配向膜表面形状



(c) グラスファイバ



(d) YA-25-C (綿)

図 2-4 繊維一本ラビングを行った配向膜表面形状

ずれの場合も繊維一本によるラビングの結果、溝が形成されており、それは中央の谷部分とその両側の山部分で構成されていることを確認した。また、溝の形状はそれぞれの繊維で異なった形状を有している。更に、これらの溝形状は、再現性良く得られ、通常の多数の繊維でラビングした場合も同様の形状が観察されることを確認した。なお、このラビングにより配向膜表面に生じた溝の形成原因としては、これまで配向膜表面に存在するダスト粒子によるものであるという報告もあった⁴²⁾。もし溝の形成がダスト粒子によるものであるならば、その形状によって溝形状が決定されると考えられる。しかし、この場合には繊維の種類によって溝形状が異なることや、それぞれの

繊維において溝形状が再現性良く得られることについての説明は困難である。よってダスト粒子により溝が形成されるとの説は妥当ではないといえることができる。

次に、それぞれのラビング繊維の形状について、走査型電子顕微鏡(Scanning Electron Microscope, SEM)(日立製作所製 S-800)を用いて観察した。この結果を図2-5に示す。ここから判別できるそれぞれの繊維の特徴を表2-3に示す。また、測定

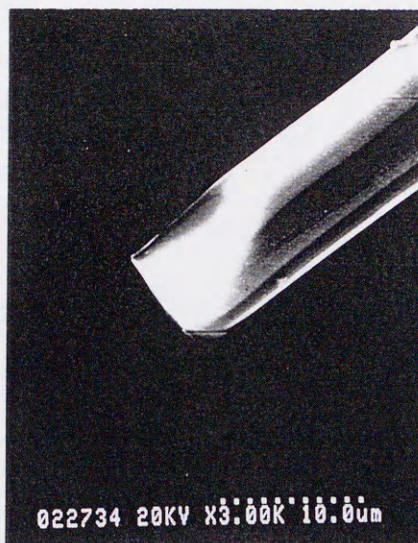


(a) YO-15-N (ナイロン)



(b) YA-20-R (レーヨン)

図 2-5 ラビング繊維の形状



(c) グラスファイバ



(d) YA-25-C (綿)

図 2-5 ラビング繊維の形状

表 2-3 ラビング繊維の特徴

	端部	表面
YO-15-N (ナイロン)	<ul style="list-style-type: none"> ・広がっている ・突起状の凹凸 	<ul style="list-style-type: none"> ・凹凸が存在
YA-20-R (レーヨン)	<ul style="list-style-type: none"> ・すぼまっている ・凹凸が存在 	<ul style="list-style-type: none"> ・サボテン状
グラスファイバ	<ul style="list-style-type: none"> ・滑らか 	<ul style="list-style-type: none"> ・滑らか
YA-25-C (綿)	<ul style="list-style-type: none"> ・凹凸が存在 	<ul style="list-style-type: none"> ・ねじれている

した AFM 像から求めた配向膜上の溝の幅及び深さと、SEM 像から得た繊維直径を表 2-4 に、図 2-6 にラビング繊維 YO-15-N における溝の断面図と、溝の幅、深さの定義を示す。表より繊維直径が μm のオーダーであるのに対し、溝の幅、深さは nm のオーダーである。また、断面図における溝の山部分と谷部分の面積の割合がほぼ等しいことから、谷部分の配向膜が両側におしのけられて溝が形成されたと考えられる。さらに、通常の多数の繊維によるラビングを施した後にそのラビング方向に対して垂直な方向に繊維一本によるラビングを行った配向膜表面の AFM 像を図 2-7 に示す。

表 2-4 繊維直径及び溝の幅、深さの比較

	繊維直径 (μm)	溝の幅 (nm)	溝の深さ (nm)
YO-15-N (ナイロン)	12	26~57	0.35~2.1
YA-20-R (レーヨン)	12	74~96	0.43~0.62
ガラスファイバ	9.5	130~398	0.40~3.1
YA-25-C (綿)	9.6~16	14~89	0.16~1.1

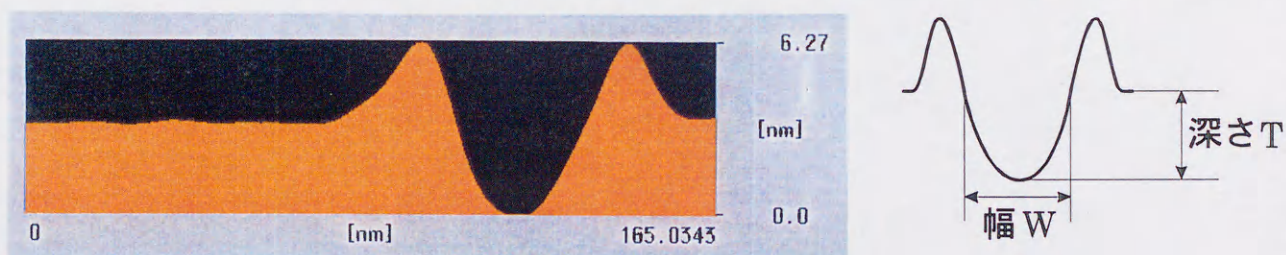


図 2-6 溝の断面図および溝の幅、深さの定義
(μm)

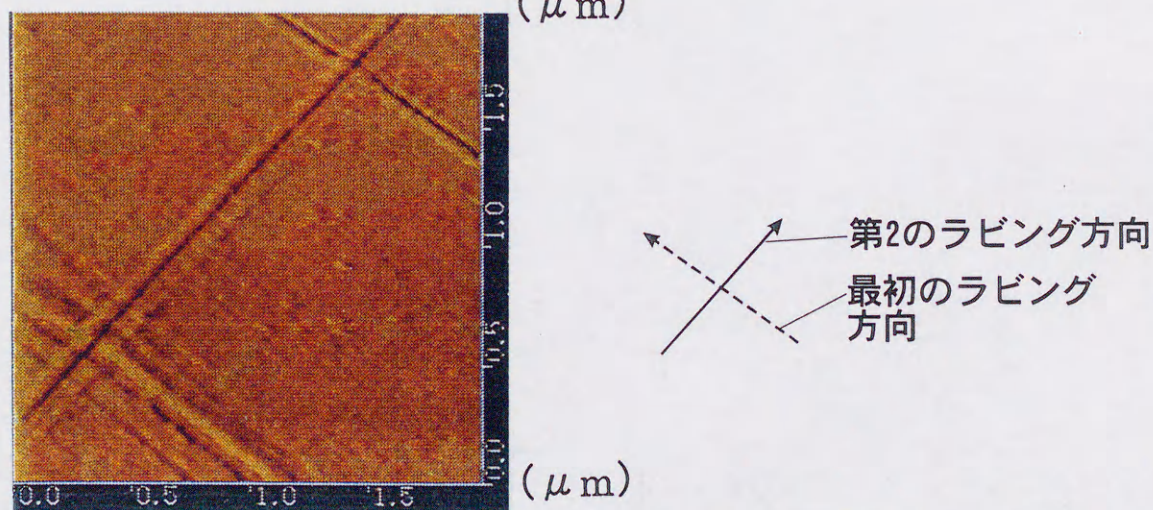


図 2-7 最初のラビング方向に対して垂直に第 2 のラビングを行った配向膜表面図より、最初のラビングにより生じた溝と第 2 のラビングで生じた溝が交差する部分

に着目すると、第2のラビングで生成した溝の山部分の端から他方の山部分の端に対応する配向膜のみが第2のラビング方向に延伸され、他の部分には変化が生じていないことが観察される。溝の山部分における延伸量は約40nmである。以上の結果から、ラビング繊維と配向膜との接触部分は繊維直径に対して非常に微小な領域であることを明らかにした。

2-3 ラビング繊維形状と溝形状の関係についての定量的解析

2-3-1 モデルによる考察

ラビング繊維と配向膜とが繊維直径に対して非常に微小な領域で接触していることから、図2-8に示すように表面が平滑な繊維の先端微小領域が配向膜と接触して溝を形成するモデルを立てて解析を行った。SEM像より求めた繊維直径 D 及びAFM像から求めた溝の幅 w を用いると、図2-9のように溝の深さ T は次式で表される。

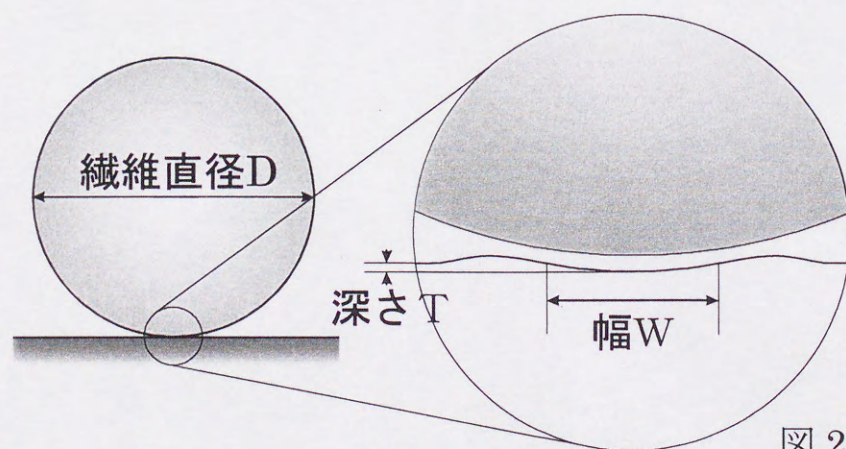
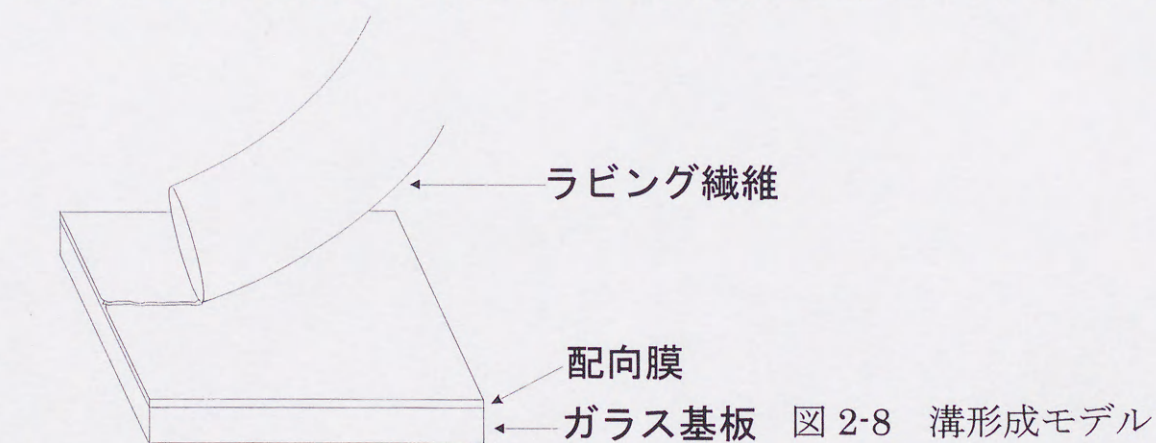
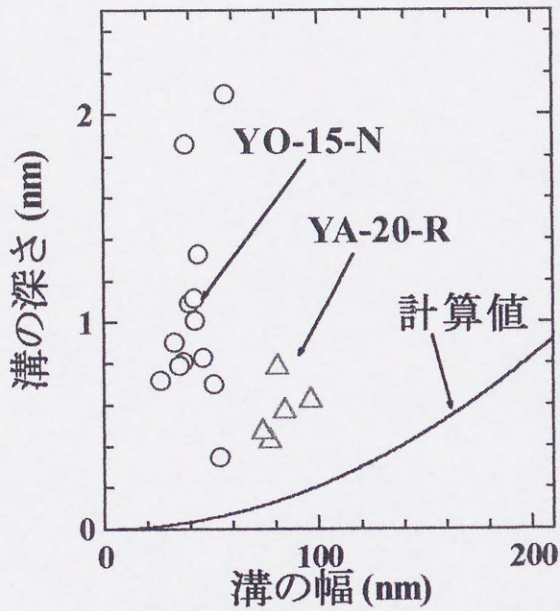


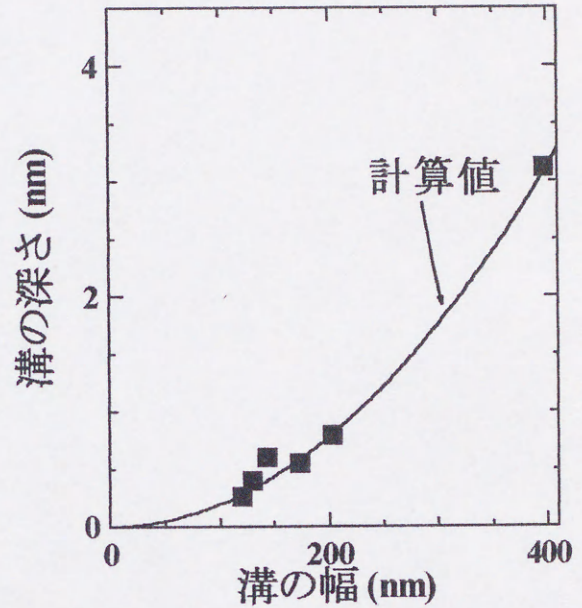
図2-9 溝の深さ T の導出

$$T = \frac{D}{2} \left\{ 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{W}{D} \right)^2} \right\} \quad (2-1)$$

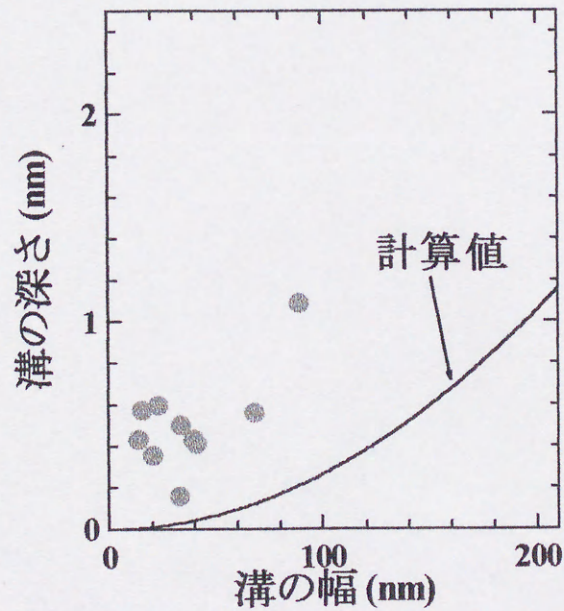
ここで、計算値 T と実際に測定した AFM 像より求めた溝の深さを比較したものを図 2-10 に示す。図より、繊維の表面が平滑なガラスファイバの場合には計算値と実測値



(a) YO-15-N 及び YA-20-R



(b) ガラスファイバ



(c) YA-25-C

図 2-10 モデルと実測値との比較

が一致するが、異なった繊維形状を有する他の3種の繊維については計算値よりも深い溝が形成されている結果を得た。これより、配向膜上の溝の形成には繊維端部の微細形状が関与していることが予想される。

2-3-2 曲率半径によるラビング繊維形状と溝形状の定量的比較

溝を形成すると予想される繊維端部の微細形状を図2-11及び表2-5に示す。これ

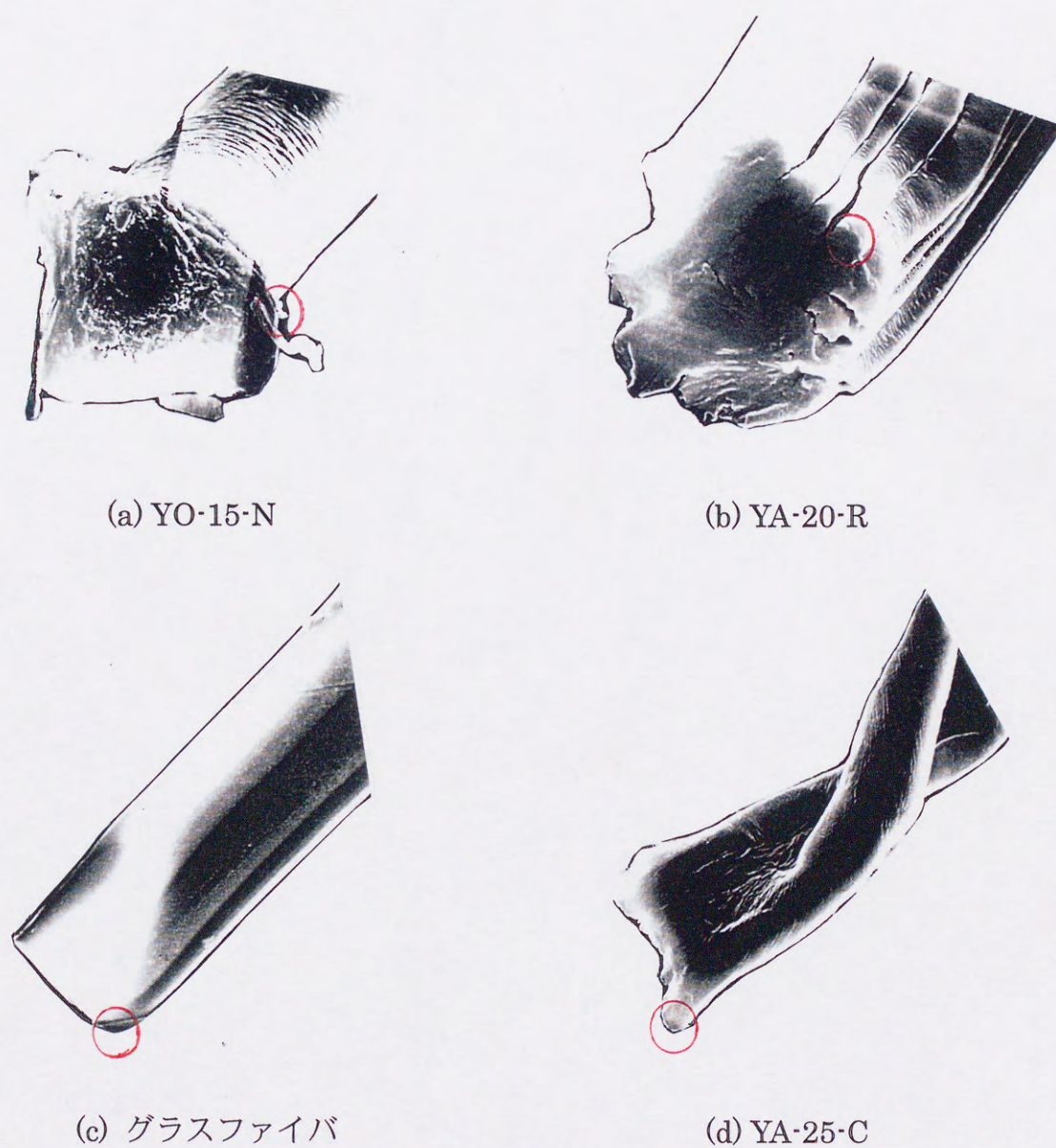


図2-11 溝を形成すると予想される繊維端部微細形状

表 2-5 溝を形成すると予想される繊維端部微細形状

ラビング繊維	溝を形成すると予想される微細形状
YO-15-N (ナイロン)	繊維端部の突起状の凹凸
YA-20-R (レーヨン)	サボテン状のひだの1つの端部
グラスファイバ	滑らかな端部
YA-25-C (綿)	端部の凹凸

らの微細形状により溝が形成されたものであるかを定量的に検討するために、溝形状及び繊維端部微細形状について曲率半径を用いて両者を比較した。実際の溝の断面形状は円弧ではないが、図 2-12 に示すように溝部分が下に凸のなだらかな形状であるため、ここでは円弧とみなして比較を行った。ラビング繊維端部の微細形状についても同様に球または円筒とみなして測定した。

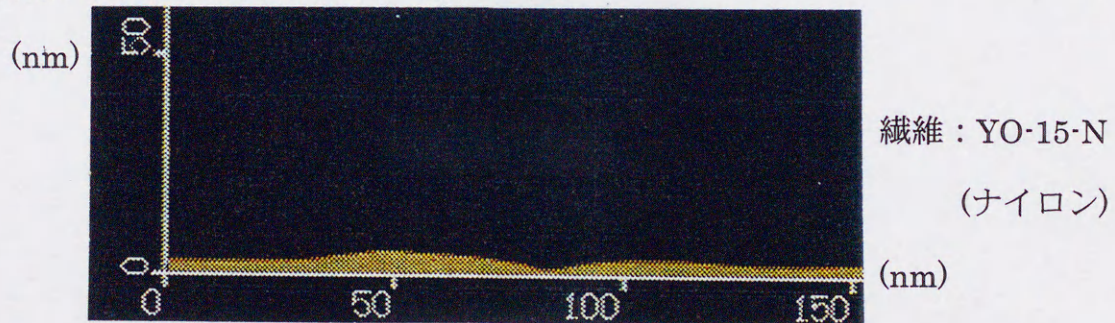


図 2-12 実際の溝形状

配向膜上の溝は、AFM 像から得た溝の幅 w と溝の深さ T を用いて、図 2-13 及び以下の式より曲率半径を計算した。

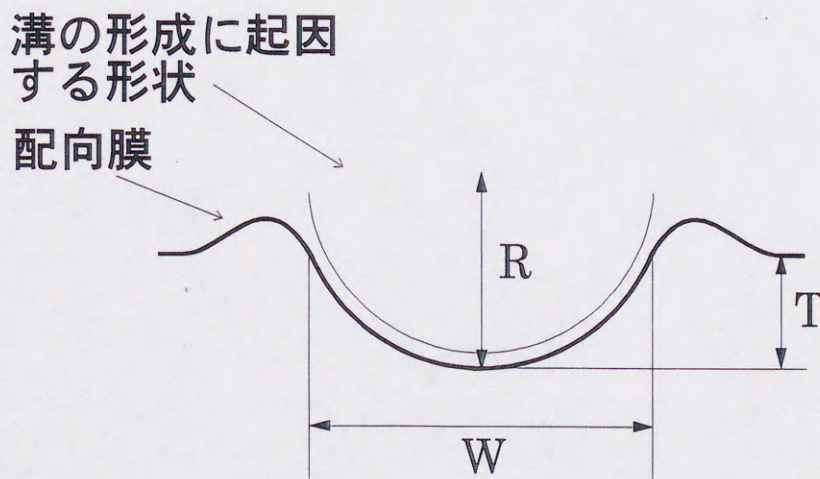


図 2-13 曲率半径の計算

$$R = \frac{1}{2} \left(T + \frac{W^2}{4T} \right) \quad (2-2)$$

その際、AFM モードのみによる測定ではラビングされていない配向膜表面の凹凸が大きいため溝の幅を精度良く測定するのは困難である。そこで、摩擦力顕微鏡 (Friction Force Microscope, FFM) モードを用いて測定を行った。この原理を図 2-14 に示す。AFM モードが試料表面の凹凸をカンチレバーのたわみとして検知するのに

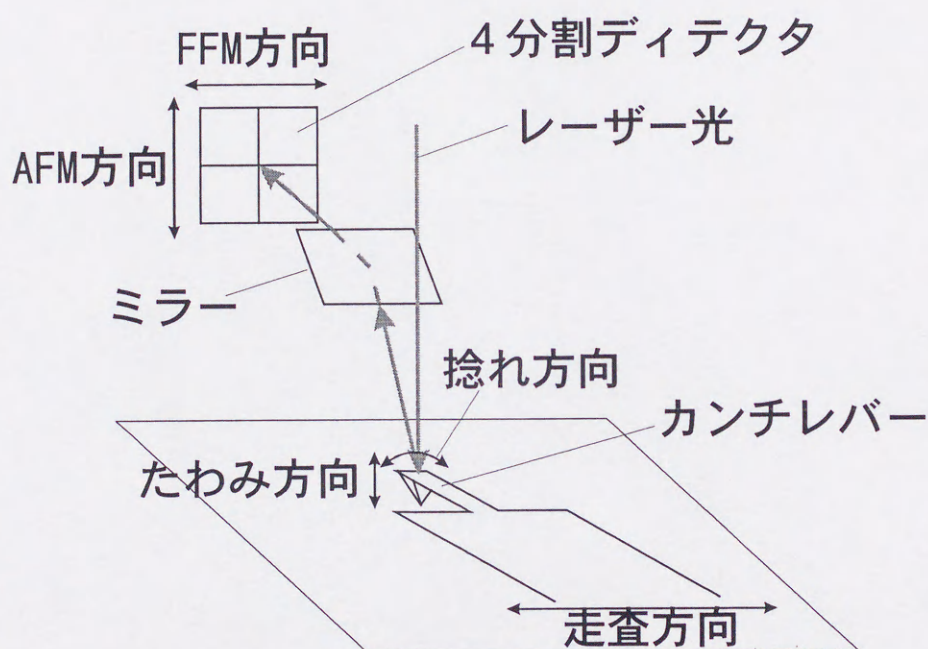


図 2-14 摩擦力顕微鏡の測定原理

対し、FFM モードではカンチレバーと試料との間の摩擦力をカンチレバーのねじれとして検知する。図 2-15 に配向膜上の同一領域を AFM, FFM 両モードで測定したものを示す。これより、AFM モードの場合と比較して FFM モードによる測定のほうが鮮明に溝部分を測定できることが分かった。ただし FFM 像からは深さに関する情報は得られないため、溝の幅を FFM 像から、深さを AFM 像から求めた。これらの値から曲率半径について計算したものと、AFM 像のみから溝の幅、深さを求めて曲率半径を計算したものを比較した結果を図 2-16 に示す。図より、両者を併用して用いたほうがより精度の良い測定が可能であることがわかる。

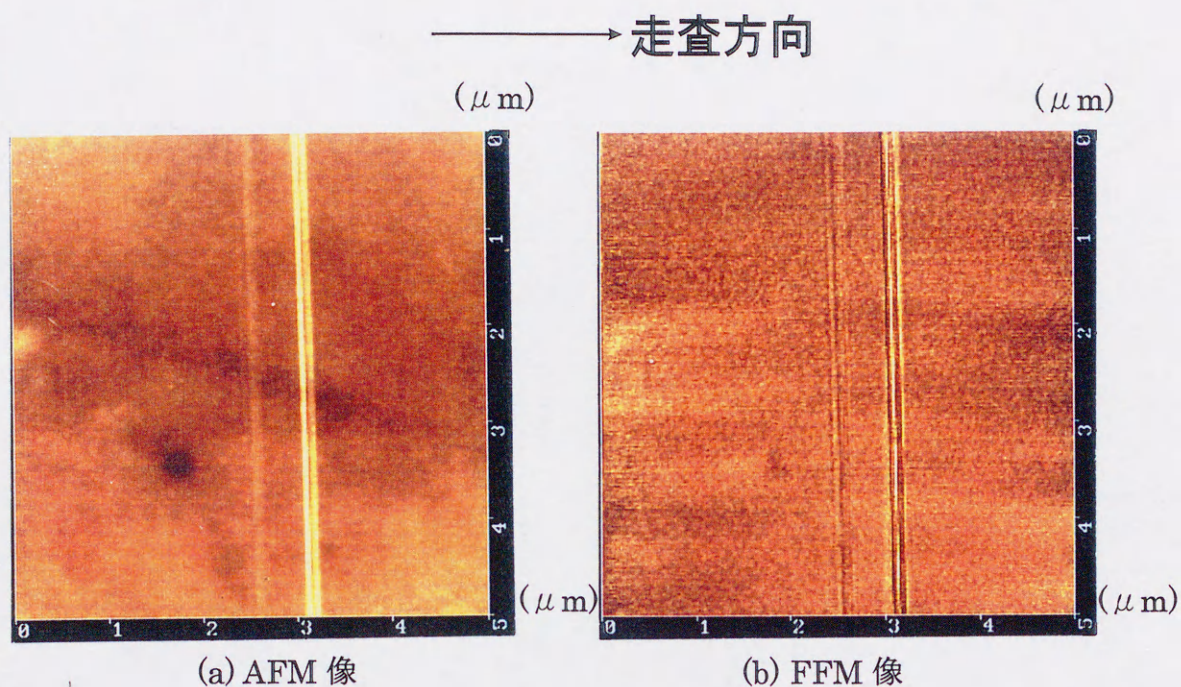


図 2-15 AFM、FFM モードによる配向膜表面測定像の比較

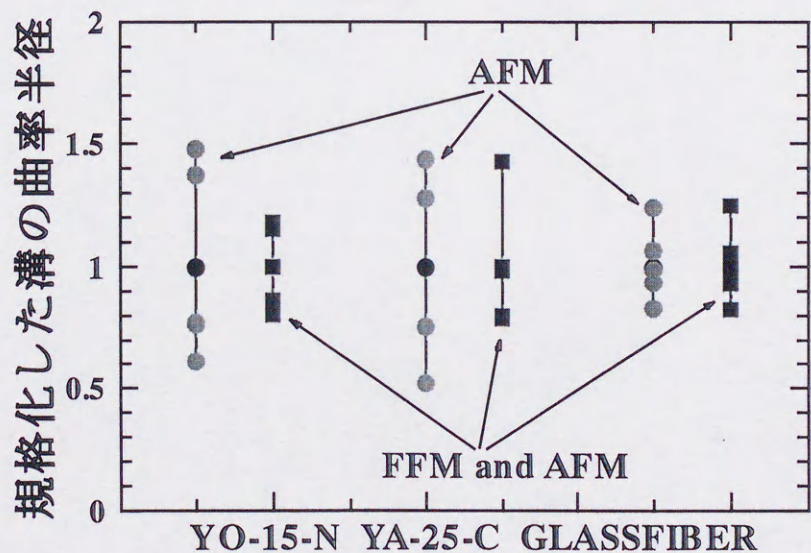


図 2-16 測定精度の比較

繊維端部微細形状の曲率半径については測定した SEM 像から求めた。この値と計算した溝の曲率半径とを比較した結果を図 2-17 に示す。グラフ上で両者の曲率が等しいところを破線で表す。図より 4 種類の繊維いずれの場合についても値が破線上に

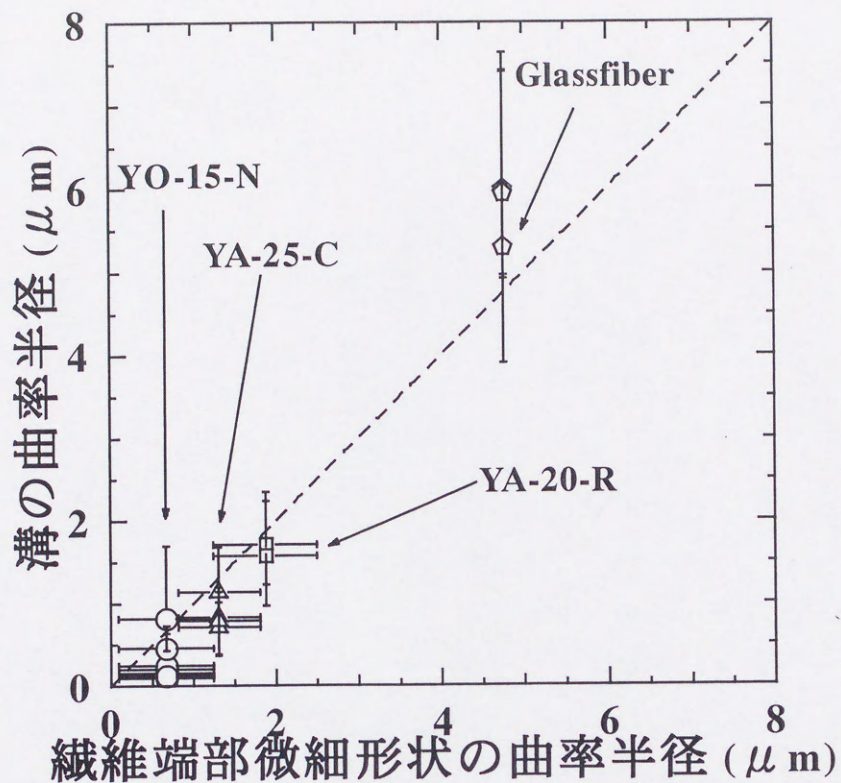


図 2-17 繊維端部微細形状の曲率半径と溝の曲率半径の比較

ほぼることから、繊維端部の微細形状と配向膜上の溝の曲率が良く対応していることがわかる。以上の結果から、ラビングによって高分子配向膜上に生じる溝は、ラビング繊維端部の微細形状によって形成されることを明らかにした。

2-4 結言

本章ではミクロな観点から、繊維一本による精密に制御されたラビングを材質、形状の異なる4種類のラビング繊維を用いて行い、配向膜上に形成される溝とラビング繊維との関係について解析を行った。その結果、以下の事項を明らかにした。

- (1) ラビングにより生じる溝は中央の谷部分とその両側の山部分から構成される。
- (2) ラビング繊維と配向膜とは繊維直径に対して非常に微小な領域で接触する。
- (3) 配向膜上に生じる溝は配向膜上に存在するダスト粒子によるものではなく、ラビング繊維端部の微細形状によって形成され、その形状が溝形状を決定する。

第3章 ラビングされた面積比と表面配向力の関係

3-1 緒言

ラビング処理は高分子配向膜上を布で擦るという方法をとる。その際、ラビング条件と表面配向力との関係を表すために、ラビングの強さを定量的に表す必要がある。これまでは配向膜上の1点がどれだけの長さだけ布によって擦られるかという点から検討されてきた⁴³⁻⁴⁷⁾。しかしこれはラビングした配向膜表面全体が同じ条件で均一に処理を施されたとするマクロな見解から構成されたものであり、ラビング繊維一本ずつによって配向膜表面に生じる形状変化、液晶配向への影響といったミクロな現象を基礎としたものではない。前章ではラビングによって生じた配向膜表面の溝とラビング繊維形状との関係について詳細に調べ、この溝形成の原因を明らかにした。そこで本章ではこの溝の領域を、ラビングによって配向膜高分子がラビング方向に延伸され液晶の配向に寄与する領域と、寄与しない領域に分割して考え、またラビングされていない領域は液晶の配向に寄与しないと考えることにより、全体の領域に対する高分子延伸領域の面積比という観点から表面配向力との関係について定量的な解析を行った。次に、この考え方の妥当性を理論と実験の比較によって示した。

3-2 表面配向力の測定

3-2-1 表面配向力の測定原理

配向容易軸の方向と液晶ダイレクタが平行な状態における基板の表面配向エネルギーを0とし、この方向からずれた場合の表面配向エネルギーを F_s とする。この時外部から加えられたエネルギーによって生じる液晶の歪みトルク γ は、

$$\gamma = -\frac{\partial F_s}{\partial \phi_s} \quad (3-1)$$

で与えられる。ここで、 ϕ_s は配向膜表面における液晶ダイレクタの配向容易軸からのずれ角である。 F_s は ϕ_s のずれの方向に対して対称であるために次式で表すことが

できる⁴⁹⁾。

$$F_S = \frac{1}{2} A_m \sin^2 \phi_S + \frac{1}{2} \sum_{n=2}^{\infty} A_{mn} \sin^{2n} \phi_S \quad (3-2)$$

ここで、 A_m と A_{mn} は液晶ダイレクタが配向容易軸方向に束縛される強さを表すものであり、表面配向力（アンカリング強度）と呼ぶ。この表面配向力はエネルギー面密度の次元を持つ。上式で ϕ_S が小さいとすると、表面配向エネルギーは次式で表すことができる⁴⁹⁾。

$$F_S = \frac{1}{2} A_m \sin^2 \phi_S \quad (3-3)$$

(3-3)式より、 ϕ_S と F_S が分かれば、 A_m を求めることができる。実験によって表面配向力 A_m を測定するためには、液晶ダイレクタを配向容易軸からずらし、 $\phi \neq 0$ とする必要がある。本研究ではこの方法として液晶自体の自発的なねじれによるトルクを利用するトルクバランス法を用いた^{43-47, 50)}。

トルクバランス法は、配向処理を施した2枚の基板を用いて図3-1に示すように上下の基板の配向容易軸を平行に揃えてセルを構成し、カイラル剤を添加することにより自発的なねじれを持たせたネマティック液晶をこのセルに導入して測定を行うものである。導入するカイラル剤の種類により、右ねじれか左ねじれかが選択され、ま

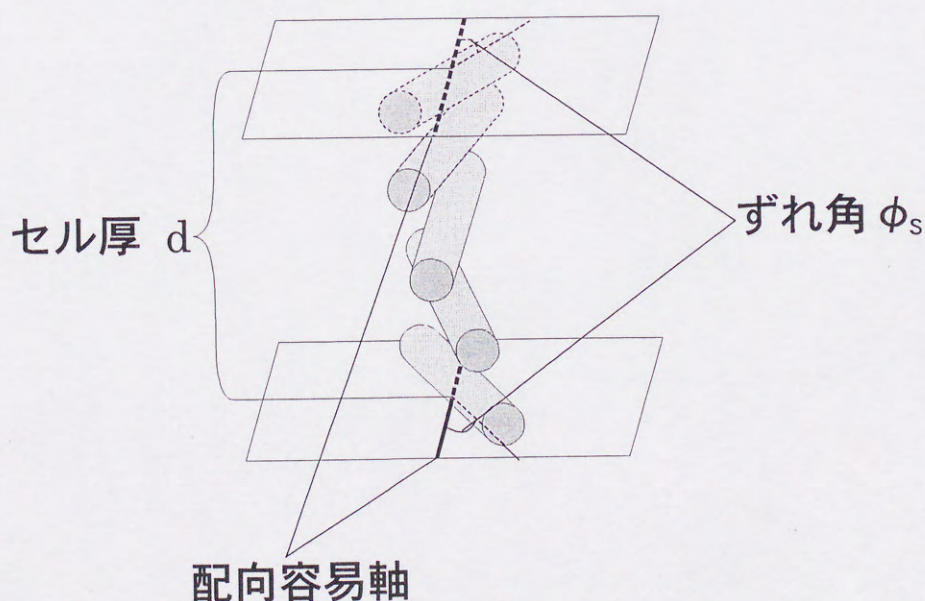


図3-1 トルクバランス法の原理図

た添加する量によりねじれのピッチを調節できる。液晶の配向は図3-2に示すように、カイラル剤による自発的なねじれのと配向処理による束縛力とのバランスによって決まる。この時、ねじれのピッチ、セル厚を調節し、配向膜表面における液晶ダイレクタの配向容易軸方向からのずれ角 ϕ_s を測定することによって表面配向力を求めることができる。

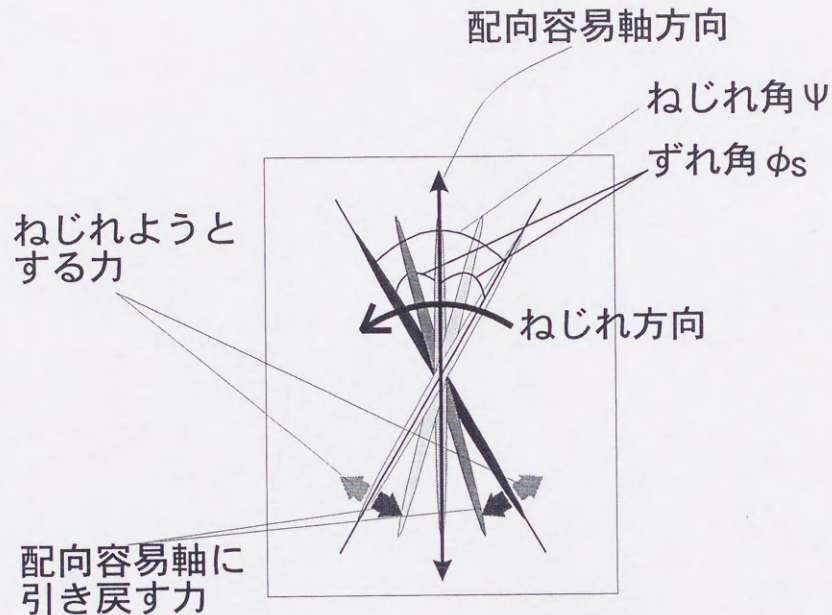


図3-2 トルクバランスを保った状態

液晶のバルクについて、セル厚方向における液晶のねじれは一様であるとする、ねじれ変形に起因する単位面積当たりの弾性エネルギー F_b は次式で表される⁵⁰⁾。

$$F_b = \frac{1}{2} K_{22} \left(\frac{\Psi}{d} - \frac{2\pi}{P_0} \right)^2 \cdot d \quad (3-4)$$

ここで、 d はセル厚、 P_0 は液晶の自発的なねじれの螺旋ピッチ、 $\Psi (=m\pi + 2\phi_s; m$ は整数)は試料内の液晶のセル厚方向におけるねじれ角である。 Ψ 及び ϕ_s は添加するカイラル剤の種類によりねじれ方向が決定されており、以後、左ねじれを正の値とする。この系の単位面積当たりの自由エネルギー F は表面配向エネルギー F_s と弾性エネルギー F_b の和で与えられる。

$$F = F_b + 2F_s \quad (3-5)$$

液晶は自由エネルギーFが最小となるように配向する。その安定状態の配向は $\partial F / \partial \phi_s = 0$ によって与えられ、その結果次式が得られる。

$$K_{22} \left(\frac{2\pi}{P_0} - \frac{\Psi}{d} \right) = \frac{1}{2} A_m \sin 2\phi_s \quad (3-6)$$

(3-6) 式の左辺は液晶が自発的にねじれた状態を保持しようとして生じるトルクであり、右辺は表面配向力によって液晶ダイレクタを配向容易軸方向に揃えようとして生じるトルクを示す。この式より、表面配向力 A_m はねじれの弾性定数 K_{22} で規格化した値として次式で与えられる。

$$\frac{A_m}{K_{22}} = \frac{2}{\sin 2\phi_s} \left(\frac{2\pi}{P_0} - \frac{m\pi + 2\phi_s}{d} \right) \quad (m=0, 1, 2 \dots) \quad (3-7)$$

この式より、 A_m/K_{22} を求めるためには、ずれ角 ϕ_s もしくはねじれ角 $\Psi (=m\pi + 2\phi_s)$ を測定すればよい。以後、この規格化した表面配向力を単に表面配向力と呼ぶ。

ϕ_s の測定には、図 3-3 に示すように、セル厚が場所によって連続的に変化するくさび形セルを用い、カイラル剤を添加した液晶を導入して使用する。このセルでは

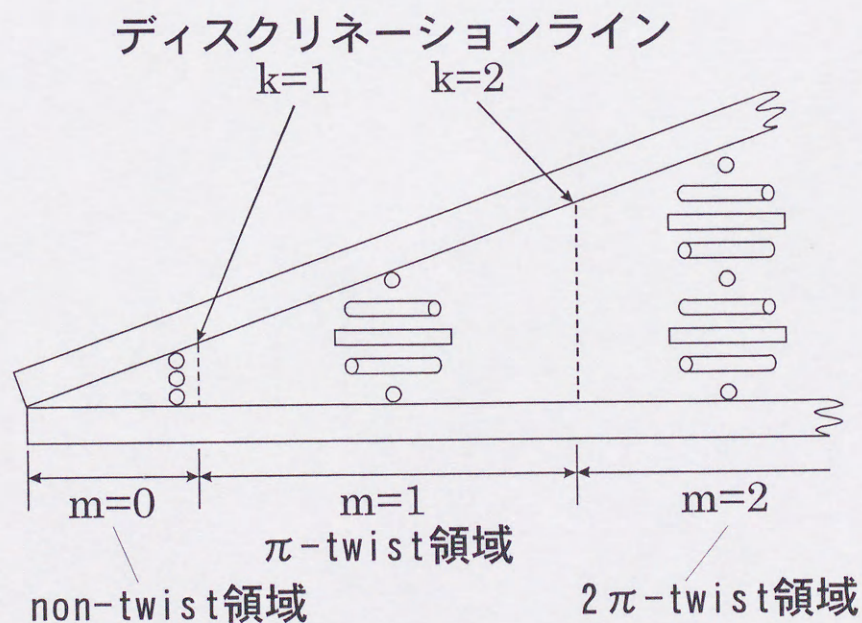


図 3-3 くさび形セルの模式図

厚さが連続的に変化することから、弾性エネルギーを最小にするために液晶の配向が不連続に変化する境界が生じる。その境界はディスクリネーションラインとして観察される。このディスクリネーションラインで区分される領域をセル厚の薄いほうから順に non-twist 領域、 π -twist 領域、 2π -twist 領域、…と定義する。平衡状態ではディスクリネーションラインの位置におけるセル厚は次式で与えられる。

$$d_k = (2k-1)\frac{P_0}{4} \quad (k=1, 2, 3, \dots) \quad (3-8)$$

ここで、 k はディスクリネーションラインの次数を表す定数である。 $k=1$ 、すなわち、non-twist 領域における第 1 ディスクリネーションライン近傍では、(3-7) 式は次式で表される。

$$\frac{A}{K_{22}} = \frac{\pi - 4\phi_S}{d_1 \sin 2\phi_S} = \frac{\pi - 2\Psi}{d_1 \sin \Psi} \quad (3-9)$$

d_1 は第 1 ディスクリネーションライン上におけるセル厚であり、 d_1 と P_0 の間には $d_1 = P_0/4$ の関係がある。non-twist 領域における第 1 ディスクリネーションライン近傍で測定を行うことにより、液晶の自発的な螺旋ピッチが分かっていたらセル厚を測定しなくても測定点のセル厚を正確に得ることができる。なお、第 1 ディスクリネーションライン付近では液晶のバルクにおける弾性エネルギーが最も大きくなるために表面における液晶ダイレクタのずれ角 ϕ_S が最も大きくなり、精度良い測定が可能である。

また片側基板に非常に強い配向処理を行ってその基板側の液晶ダイレクタが配向容易軸に平行とみなせる場合には、表面配向力は以下の形で表せる。

$$\frac{A}{K_{22}} = \frac{\pi - 2\Psi}{d_1 \sin 2\Psi} \quad (3-10)$$

次にねじれ角 Ψ を求めるために以下のジョーンズマトリクスを用いた理論解析に

基づく方法を用いた。測定系を図 3-4 に示す。偏光子の光軸を x 軸、光の進行方向を

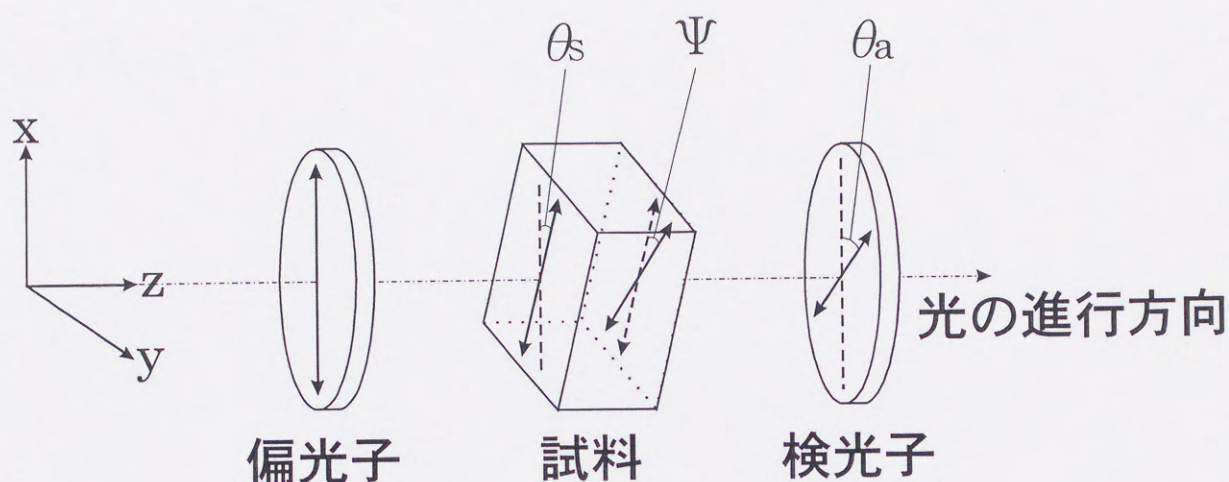


図 3-4 ねじれ角の測定系

z 軸にとる。偏光子を透過した光は直線偏光となり、次式で表される。

$$\begin{pmatrix} e_x \\ e_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3-11)$$

液晶層をセル厚方向に N 等分する。光の波長を λ 、セル厚を d、液晶の屈折率異方性を $\Delta n(\lambda)$ とする。各々の層におけるリタデーションは以下の式で表される。

$$\frac{\Gamma}{N} = 2\pi \cdot \Delta n(\lambda) \cdot \frac{d}{N} \cdot \frac{1}{\lambda} \quad (3-12)$$

液晶のねじれ角が Ψ であり、かつセル厚方向でねじれが一様に変化しているものとする。各分割層における液晶のねじれ角を $\rho = \Psi/N$ とすると、液晶層全体について、ジョーンズマトリクスを用いて以下の形で表現できる。

$$M = \prod_{m=1}^N R(m\rho)WR(-m\rho) \quad (3-13a)$$

$$W = \begin{pmatrix} e^{-i\Gamma/2N} & 0 \\ 0 & e^{i\Gamma/2N} \end{pmatrix} \quad (3-13b)$$

$$R(\theta) = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \quad (3-13c)$$

回転行列 R に対して以下の恒等式を適用する。

$$R(\theta_1) + R(\theta_2) = R(\theta_1 + \theta_2) \quad (3-14)$$

上式より、(3-13a) 式は以下の形で表すことができる。

$$M = R(\Psi) \left[WR \left(-\frac{\Psi}{N} \right) \right]^N \quad (3-15)$$

これより (3-15) 式は

$$M = R(\Psi) \begin{pmatrix} e^{-i\Gamma/2N} \cos \frac{\Psi}{N} & e^{-i\Gamma/2N} \sin \frac{\Psi}{N} \\ -e^{i\Gamma/2N} \sin \frac{\Psi}{N} & e^{i\Gamma/2N} \cos \frac{\Psi}{N} \end{pmatrix}^N \quad (3-16)$$

と表せる。上式において $N \rightarrow \infty$ の極限をとると、次式で表される。

$$M = R(\Psi) \begin{pmatrix} \cos \chi - i \frac{\Gamma \sin \chi}{2 \chi} & \Psi \frac{\sin \chi}{\chi} \\ -\Psi \frac{\sin \chi}{\chi} & \cos \chi + i \frac{\Gamma \sin \chi}{2 \chi} \end{pmatrix} \quad (3-17a)$$

$$\chi = \sqrt{\Psi^2 + \left(\frac{\Gamma}{2} \right)^2} \quad (3-17b)$$

ここで、液晶の偏光子側のダイレクタが x 軸から θ_s 傾いている場合、偏光子と液晶部分についてのジョーンズマトリクス S は次式で表される。

$$S = R(\theta_s) M R(-\theta_s) \quad (3-18)$$

また、検光子の光軸が x 軸から θ_a 傾いている場合の検光子のジョーンズマトリクス P は以下の形で表される。

$$P = \begin{pmatrix} \cos^2 \theta_a & \sin \theta_a \cos \theta_a \\ \sin \theta_a \cos \theta_a & \sin^2 \theta_a \end{pmatrix} \quad (3-19)$$

よって、図 3-4 の系を透過した後の光の偏光状態はこれらの行列の積という形で次式のように表せる。

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = P S \begin{pmatrix} e_x \\ e_y \end{pmatrix} \quad (3-20)$$

また、透過光強度 T は以下の式で表せる。

$$T = |E_x|^2 + |E_y|^2$$

$$= \left\{ \cos \chi \cos(\theta_a - \Psi) - \frac{\Psi}{\chi} \sin \chi \sin(\theta_a - \Psi) \right\}^2 + \left\{ \frac{\Gamma}{2\chi} \sin \chi \cos(2\theta_s + \Psi - \theta_a) \right\}^2 \quad (3-21)$$

3-2-2 液晶ねじれ角の測定方法

液晶のねじれ角の測定方法としては、図 3-5 に示すように偏光子の光軸に対して検光子の光軸をある角度 Θ で固定し、試料を回転させて最小となる透過光強度 $T_{\text{Min}}(\Theta)$ を求める。この過程を検光子の光軸の角度 Θ を変化させて繰り返し、 Θ と $T_{\text{Min}}(\Theta)$ の関係から透過光強度が最小となる角度 Θ_{Min} を求める。実際には、試料を回転させるこ

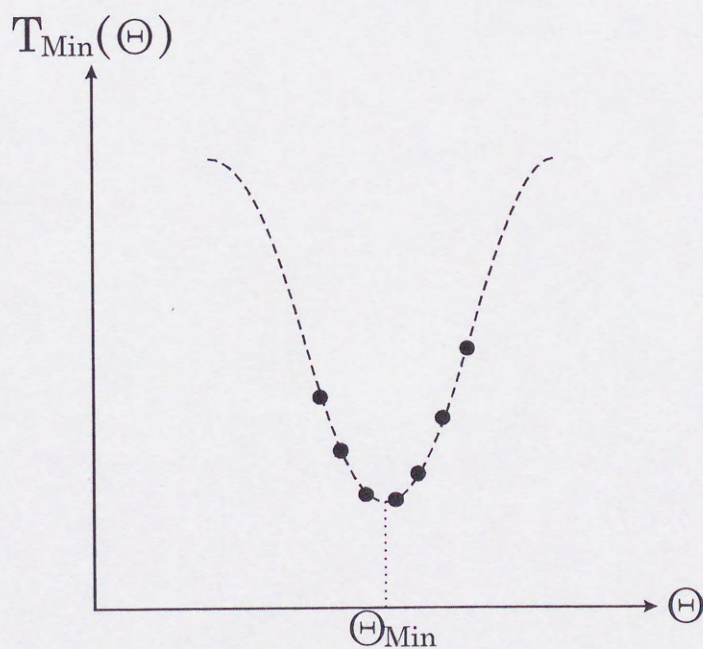
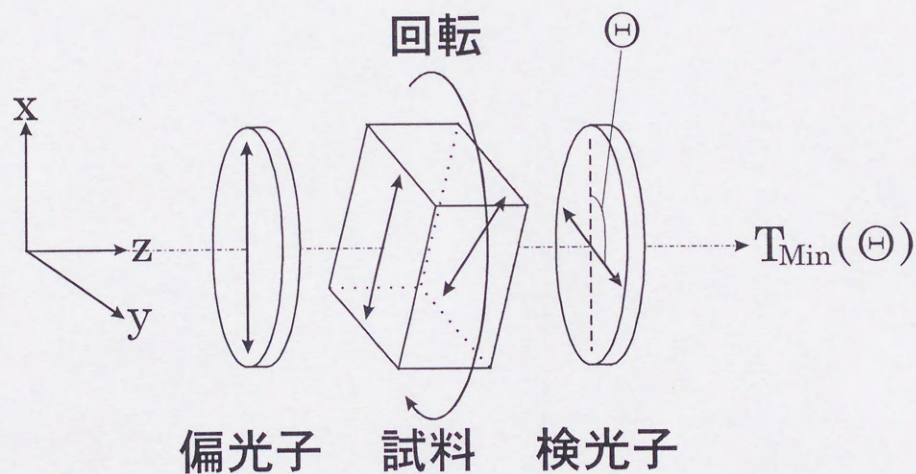


図 3-5 ねじれ角の測定方法

とによる測定領域のずれが生じるのを防ぐために、試料を固定して偏光子、検光子を回転させることで相対的に同じ操作を行っている。この際、光源、検出器の偏光特性が問題となるため、あらかじめ光源、検出器の偏光特性を測定し、その結果を基にしてねじれ角測定において検出される透過光強度を補正して Θ_{Min} を導出している。以下の解析では試料を回転させるものとして理論解析を行う。(3-21)式において、ある検光子の角度 Θ で試料を回転させたとき、最小になる透過光強度 $T_{Min}(\Theta)$ は次式で表される。

$$T_{Min}(\Theta) = \left\{ \cos \chi \cos(\Theta - \Psi) - \frac{\Psi}{\chi} \sin \chi \sin(\Theta - \Psi) \right\}^2$$

$$= \left\{ \cos^2 \chi + \left(\frac{\Psi}{\chi} \right)^2 \sin^2 \chi \right\} \cos^2(\Theta - \Psi - \delta) \quad (3-22)$$

ここで、

$$\delta = \arctan \left(\frac{-\Psi \sin \chi}{\chi \cos \chi} \right) \quad (3-23)$$

である。(3-22)式より、透過光強度が最小となる検光子の角度 Θ_{Min} は

$$\Theta_{Min} = \Psi + \delta + 90^\circ \quad (3-24)$$

となる。これより、実際に測定より得られる見かけ上のねじれ角 Ψ' は

$$\Psi' = \Theta_{Min} - 90^\circ = \Psi + \delta \quad (3-25)$$

となる。つまり、 Ψ' は液晶のねじれ角 Ψ と δ との和で表される。 δ はねじれ角 Ψ 、セル厚 d 、波長 λ 、液晶の屈折率異方性 $\Delta n(\lambda)$ の関数であり、 d 、 λ 、 $\Delta n(\lambda)$ が分かればねじれ角 Ψ が求められる。 d は液晶のねじれピッチ P_0 を求めておき、くさびセルの第1ディスクリネーションライン近傍を測定することにより決定される。 $\Delta n(\lambda)$ については使用する液晶についてあらかじめ測定を行い求めておく。今回使用した液晶の波長分散を図3-6に示す。また、今回の測定では光源からの白色光に $\lambda = 546 \text{ nm}$ のフィルターを透過させて使用した。そこで、図3-7に示すように顕微鏡の光源の強度分布 $f(\lambda)$ を測定する。顕微鏡の光をインコヒーレント光と近似できるため、連続スペクトルの光を用いた場合の結果は単一スペクトルの光強度の和で表される。このため、透過光強度 $I(\Theta)$ は以下の式で表される。

$$I(\Theta) = \sum_{\lambda} f(\lambda) \cdot T_{Min}(\Theta, \lambda) \quad (3-26)$$

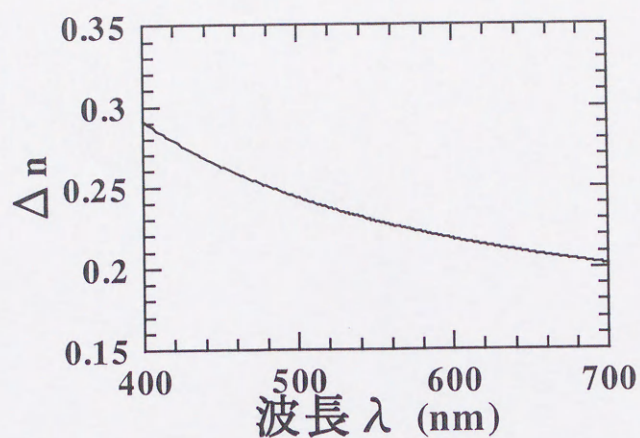


図 3-6 液晶 GR-41 の波長分散

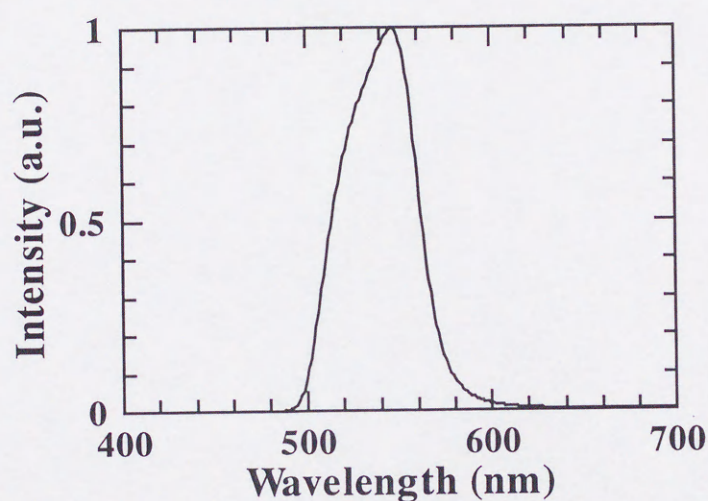


図 3-7 光源の波長特性

実際には $I(\Theta)$ が最小となる検光子の角度が Θ_{\min} として求められる。今回用いた液晶及び光源の場合について、見かけ上のねじれ角 Ψ' と実際のねじれ角 Ψ の関係を図 3-8

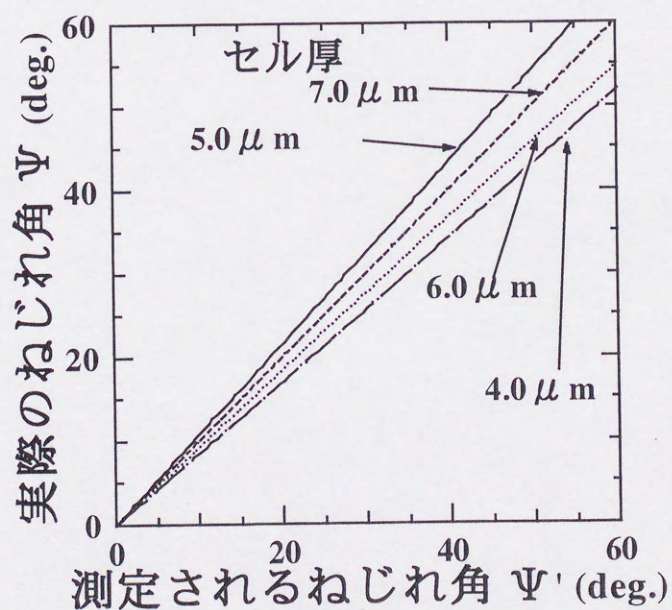


図 3-8 測定されるねじれ角と実際のねじれ角の関係

に示す。この関係から、実際のねじれ角を導出した。

3-2-3 表面配向力の測定限界

トルクバランス法における表面配向力の精度は、液晶のねじれ角の測定精度に起因する。ここで、理論から導かれる液晶のねじれ角と表面配向力の関係を図 3-9 に示す。図より、液晶のねじれ角が小さくなるにつれて、表面配向力は指数関数的に大きくなる

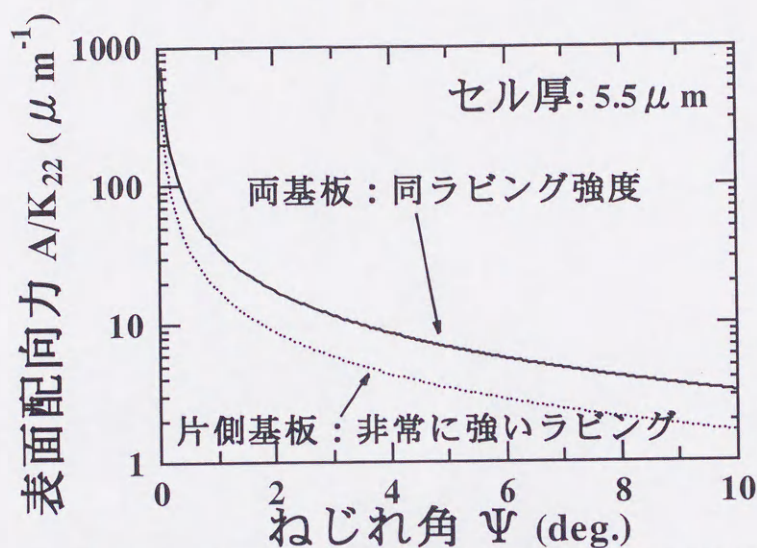


図 3-9 液晶ねじれ角と表面配向力の関係

る。このことから、強い表面配向力を測定する場合には液晶のねじれ角の測定誤差が大きく影響を及ぼす。この誤差が生じる原因としては、セル作製時における上下基板での配向容易軸方向のずれがあげられる。また、ラビング法を用いる場合には基板面内の局所的なラビング方向のずれも影響する。

上下基板での配向容易軸方向のずれについて、以下のような解決法がこれまで提案されている。これは、図 3-10 に示すように配向容易軸方向がほぼ平行になるように作製したくさびセルにおいて、シール剤で測定試料を 2 つの領域に分割し、一方にカイラル剤を添加して自発的なねじれを持たせたネマティック液晶を導入し、他方にはネマティック液晶のみを導入するものである。ここで、カイラル剤を添加したネマティック液晶を導入した領域を N^* 領域、ネマティック液晶のみを導入した領域を N 領域とする。 N 領域では、液晶自身にねじれようとする力がなく、また上下基板の配向容易軸方向のずれ角が小さいために液晶に生じる歪みトルクは非常に微小である。そのため上下基板の配向容易軸方向に沿って液晶が配向するとみなすことができる。したがって、この領域で測定される液晶のねじれ角は上下基板の配向容易軸方向のずれ角

ϕ_N を表していると考えることができる。また N^* 領域のねじれ角 Ψ_{N^*} は、トルクバランスの原理によって生じるねじれ角 Ψ に上下基板の配向容易軸方向のずれ角 ϕ_N が加わった値で測定される。そこで、それぞれの領域におけるねじれ角を測定し、その値

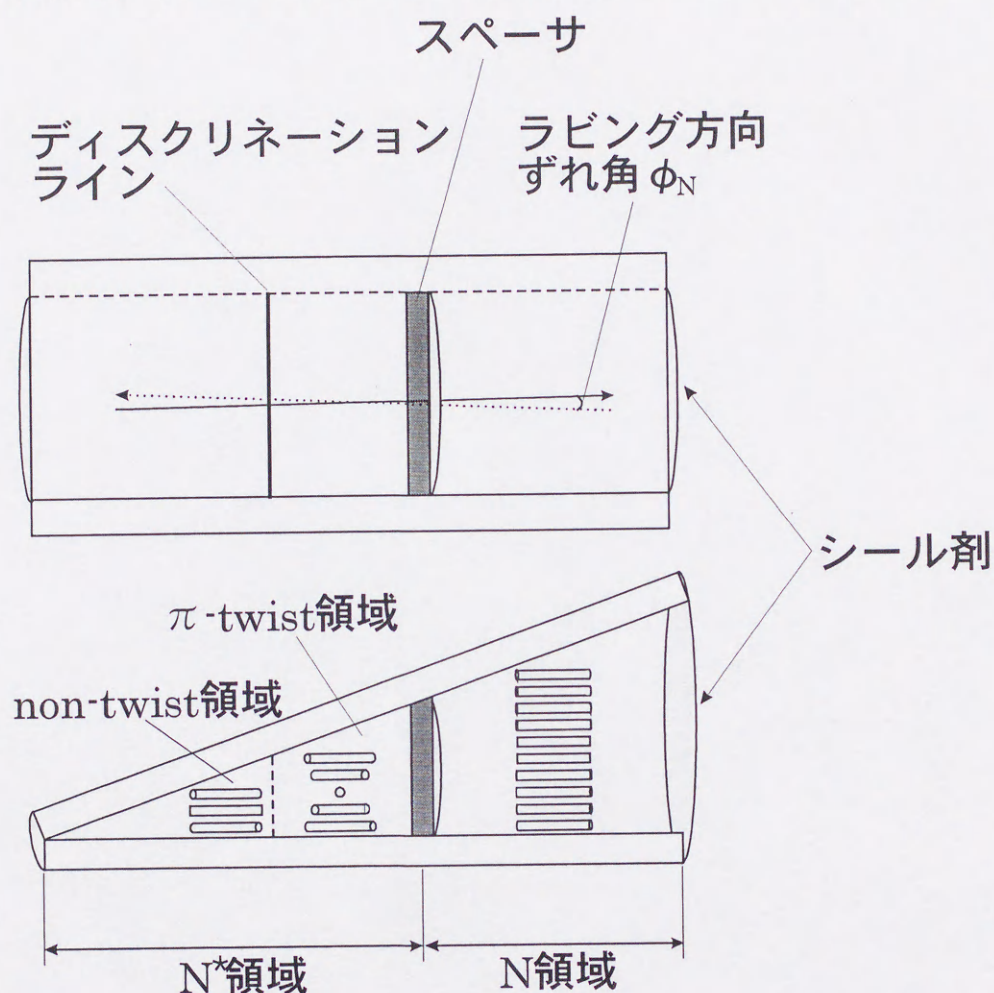


図 3-10 配向容易軸方向のずれの補正方法

からトルクバランスの原理によって生じる液晶のねじれ角 Ψ を以下の式で求めることができる。

$$\Psi = \Psi_{N^*} - \phi_N \quad (3-27)$$

したがって、実験ではこの方法により上下基板の配向容易軸方向のずれを補正する。

ラビング法におけるもう1つの問題である、ラビング時における基板面内での局所的なラビング方向のずれは、ラビング繊維の不均一性から生じ、その結果、測定される液晶ねじれ角の局所的なばらつき幅は $\pm 0.3^\circ$ 程度あることが報告されている⁵⁰⁾。トルクバランスの原理では、ねじれ角 Ψ は常にカイラル剤によるねじれ方向と同一である。しかし、(3-27)式を用いて Ψ を求める場合、ラビング方向の局所的なずれのた

めに Ψ のねじれ方向がカイラル剤によるねじれ方向と逆の方向になる場合があり、これが表面配向力の精度を大幅に低下させている原因である。便宜上、ねじれ方向が逆になる場合には表面配向力が無限大であるとして表記し、液晶のねじれ角のばらつき幅を $\pm 0.3^\circ$ であるとする、図 3-11 に示すように表面配向力が約 $100 \mu\text{m}^{-1}$ 以上の領域では精度良い測定が困難となる。現在のところ、通常のラビング布を用いた場合

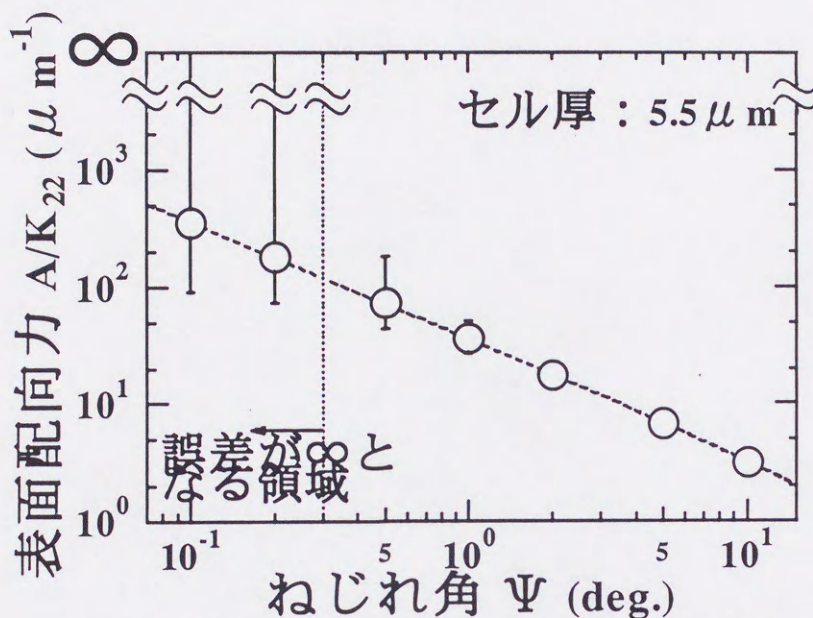


図 3-11 ラビング方向のばらつきによる表面配向力の誤差

にラビング方向の局所的なずれを完全に無くす方法について、有効な方法を示すことは難しい。そのため、表面配向力の表記法としては以下に示す方法を用いる。実験条件を表 3-1 に示す。液晶セル 1 つにおいて 5~12 点測定し、得たねじれ角の平均値 $\bar{\Psi} = \bar{\Psi}_N - \bar{\phi}_N$ を求めた後にその値から表面配向力を計算した。図 3-12 にラビング強

表 3-1 実験条件

ラビング条件	片側基板：L を変化 逆側基板：非常に強いラビング (L=2113cm)
ラビング繊維	Y0-15-N (ナイロン)
液晶	N 領域：GR-41 N*領域：GR-41+CN0.88wt%
配向膜	AL1051 (主鎖型)
表面配向力	トルクバランス法による測定
セル厚	5.07 μm

度パラメータ L と表面配向力の関係を示す。1 つの測定点は測定した液晶セル 1 つに対応する。また測定値におけるねじれ角のばらつきは、それぞれの値について表面配

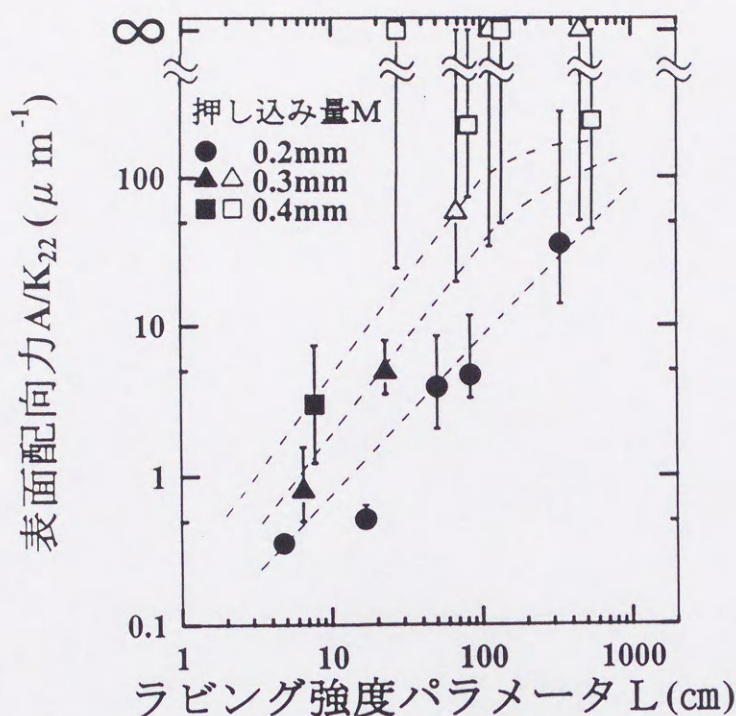


図 3-12 ラビング強度パラメータ L と表面配向力の関係

向力を計算した値をグラフ上にばらつきとして表している。図中の黒塗りの点については測定したねじれ角 Ψ が全てカイラル剤によるねじれ方向と同一の場合であり、信頼性の高い測定ができている点と考えられる。白抜きの点に関しては、 Ψ のねじれ方向がカイラル剤によるねじれ方向と逆になる測定値を含む場合である。以下この表記法を用いて表面配向力を表すこととする。

3-3 ラビング面積比による表面配向力の定量的表現

3-3-1 ラビング面積比と表面配向力の関係

第 2 章では、ラビング時に配向膜表面に生じる溝はラビング繊維端面の微細形状によるものであることを明らかにした。また、液晶を配向させる機構としては配向膜高分子がラビング方向に配向し、配向膜高分子と液晶分子との相互作用によって液晶が配向する近距離相互作用説が支配的であることが明らかにされている。これらの結果から、溝のある領域を配向膜高分子がラビング方向に配向され、液晶の配向に寄与する領域として捉えることにより、ラビングの増加を高分子が配向した領域の増加であると考えられる。そこで、全面積における高分子が配向した領域の面積の割合という概念を用いることによって、これと表面配向力との関係について明らかにすることを試みた。以降、この割合をラビング面積比と定義する。はじめに、ラビング

面積比と表面配向力との相関性について調べた。実験の際のラビング条件及び測定条件を表 3-2 に示す。片側の基板はラビング強度パラメータ $L=2113 \text{ cm}$ の非常に強い

表 3-2 ラビング及び測定条件

	繊維一本によるラビングを行った基板	非常に強いラビングを行った基板 ($L=2113\text{cm}$)
押し込み量 (mm)	0.4	0.4
ローラー回転数 (rpm)	300	500
ラビング回数 (回)	1	12
溝間隔 (μm)	0.195~8.75	
基板移動速度 (cm/sec.)		0.71

ラビング繊維	Y0-15-N (ナイロン)
液晶	N 領域: GR-41 N*領域: GR-41+CN 0.88wt%
配向膜	AL1051 (主鎖型)
表面配向力	トルクバランス法による測定
面積比、溝間隔	AFM モード, FFM モードによる測定
セル厚	5.07 μm

ラビングを行い、液晶ダイレクタがラビング方向に平行であるとみなせるようにした。もう一方の基板は繊維一本により等間隔でラビングを行った。その際に基板移動速度を変化させることにより溝間隔を変化させてラビング面積比を調整した。

繊維一本でラビングを行った基板の配向膜表面を図 3-13 に示す。ここで図 3-14 に示すように、ラビングによって形成される形状の山の端から他方の山の端までをラビング領域と定義した。またラビングによって配向膜高分子がラビング方向に配向し、

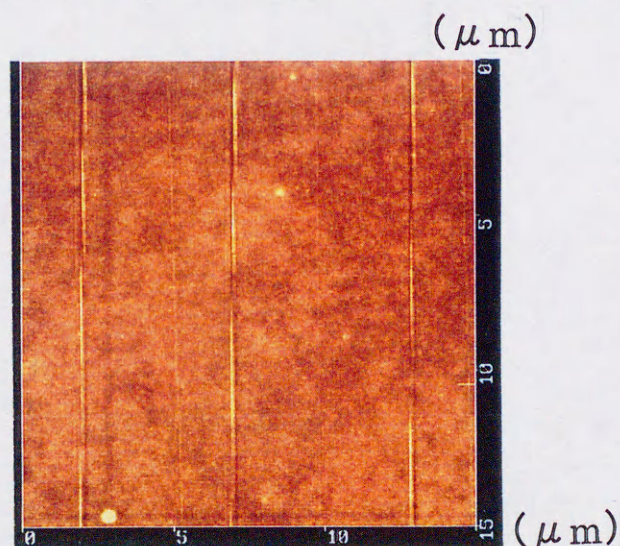


図 3-13 繊維一本でラビングを行った配向膜表面

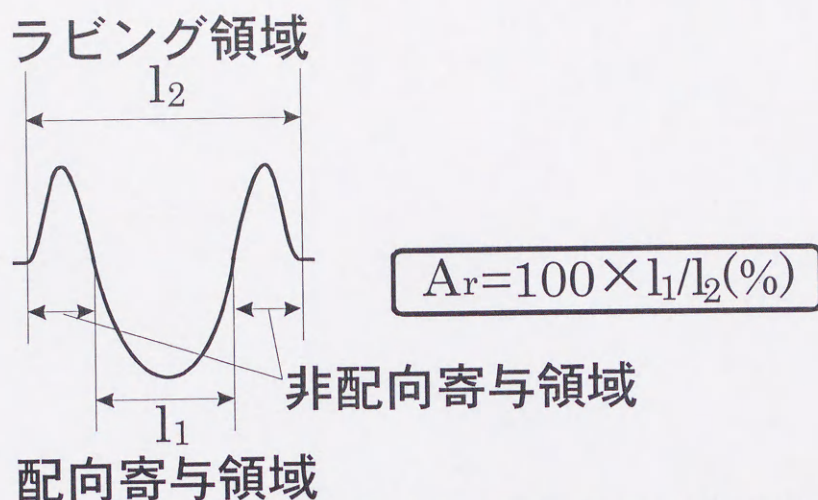


図 3-14 ラビング領域、配向寄与領域、非配向寄与領域及び谷比率の定義

液晶の配向に寄与する領域を溝の谷の部分とみなし、この領域を配向寄与領域、それ以外の山の部分に相当する領域を非配向寄与領域と定義する。走査型プローブ顕微鏡の AFM、FFM モードによる測定結果より、配向寄与領域の平均的な幅は 40nm、ラビング領域の幅は 80nm という値を得た。ここでラビング領域の幅に対する配向寄与領域の幅の割合を谷比率 A_r と定義する。今回の場合は $A_r=50\%$ と表される。この結果をもとにして測定領域全体に対する配向寄与領域の割合としてラビング面積比を計算した。表面配向力の測定ではスポット半径を図 3-15 のようにラビング領域とラビングされていない領域双方が含まれる形で測定し、透過光強度の光学的平均値を用いて液晶の実効的なねじれ角を求め、表面配向力を算出した。図 3-16 にラビング面積比に対する表面配向力の関係を示す。図より、ラビング面積比に対して表面配向力が単調増加を示していることから、ラビング面積比による表面配向力の表現が有望であることを示した。

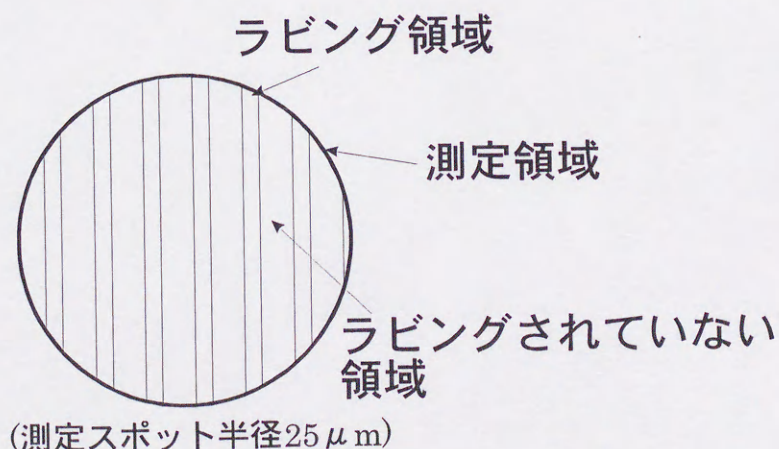


図 3-15 測定領域の取り方

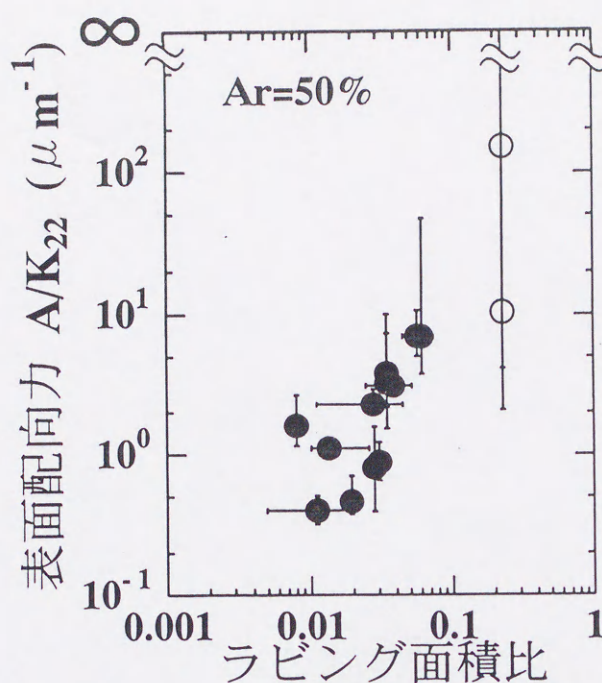


図 3-16 ラビング面積比と表面配向力の関係

3-3-2 液晶配向分布の測定

表面配向力の測定では実効的な液晶ねじれ角をラビング領域とラビングされていない領域の双方が含まれた形に測定領域を設定し、この場合の光学的な平均値から求めたが、相関性の定量的な解析をより詳細に行うためには、それぞれの領域における液晶の配向状態を知る必要がある。そこで、まずラビングされていない領域の液晶配向分布の測定を試みた。測定用セルのラビング方法を図 3-17 に示す。片側基板には非常に強いラビングを行い、もう一方の基板は通常の多数の繊維がついたラビング布を用いてローラーを停止させたまま基板を1回だけ移動させることによる非常に弱いラビングを行った。液晶にはカイラル剤を添加して自発的なねじれを持たせ、くさび

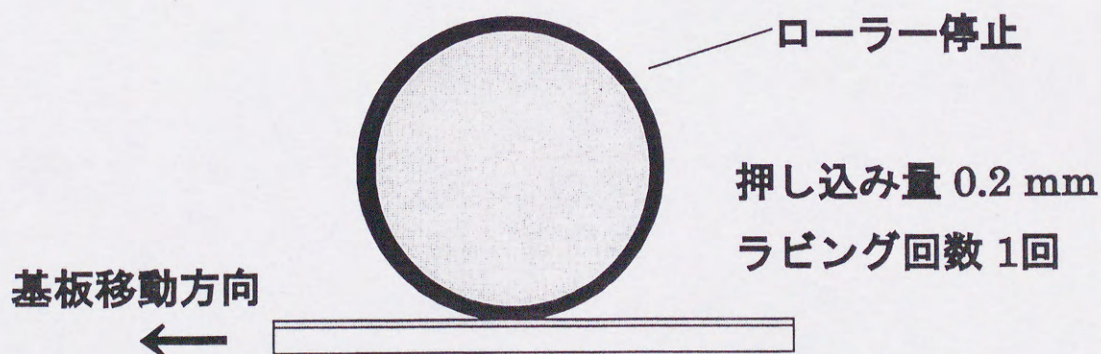


図 3-17 液晶配向分布観察用セルのラビング方法

型セルを作成して第1ディスクリネーションライン付近を観察した。観察には図 3-18 のように、偏光顕微鏡を用いて偏光子の光軸方向と強いラビングを行った下側基板のラビング方向を平行にして、検光子の角度を変化させて観察を行った。液晶のねじれに追従して回転した偏光方向と検光子の偏光方向とが一致した領域が、最も透過光強

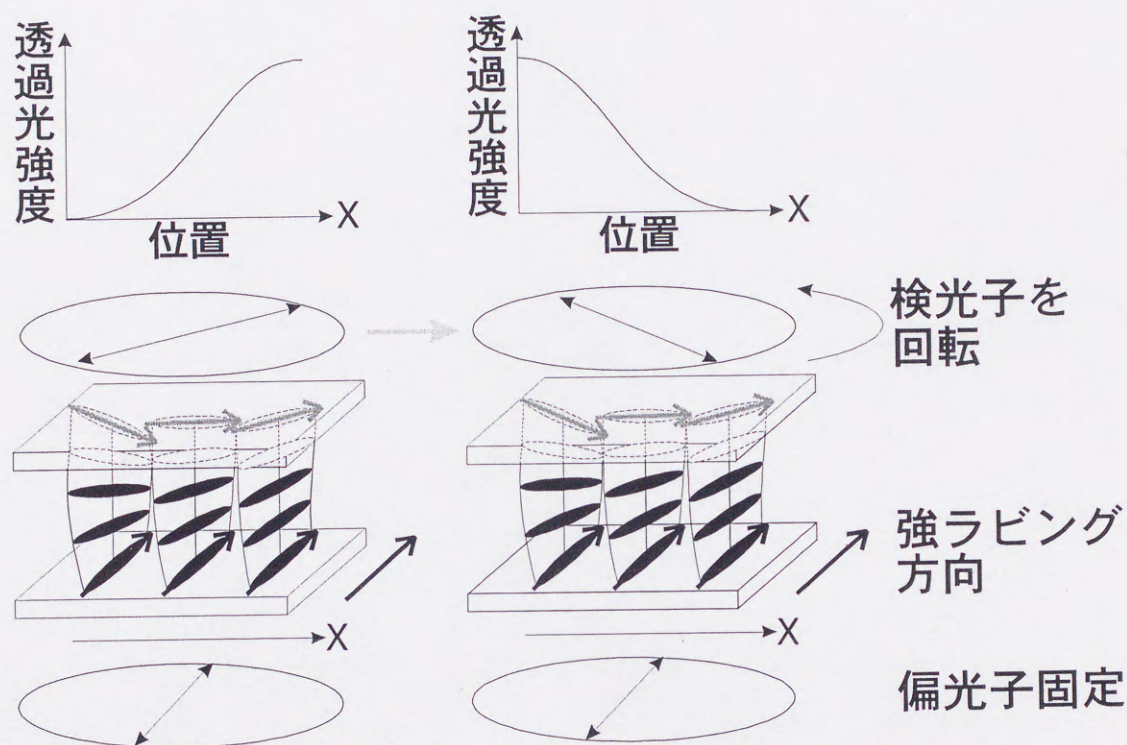


図 3-18 液晶配向分布観察方法の模式図

度が強く観察される。検光子を回転させることにより、液晶の配向分布にしたがって透過光強度の分布が変化する。図 3-19 に観察結果を示す。これより、ラビングによって液晶が配向している領域がライン状に観察できた。また検光子の角度を変化させていくにつれて、ラビングによってラビング方向に配向した領域の中心部分から端に向かって透過光強度が連続的に変化していることがわかる。したがって液晶の配向方向はラビングによる液晶配向領域の中心部分から連続的に変化していることが分かった。

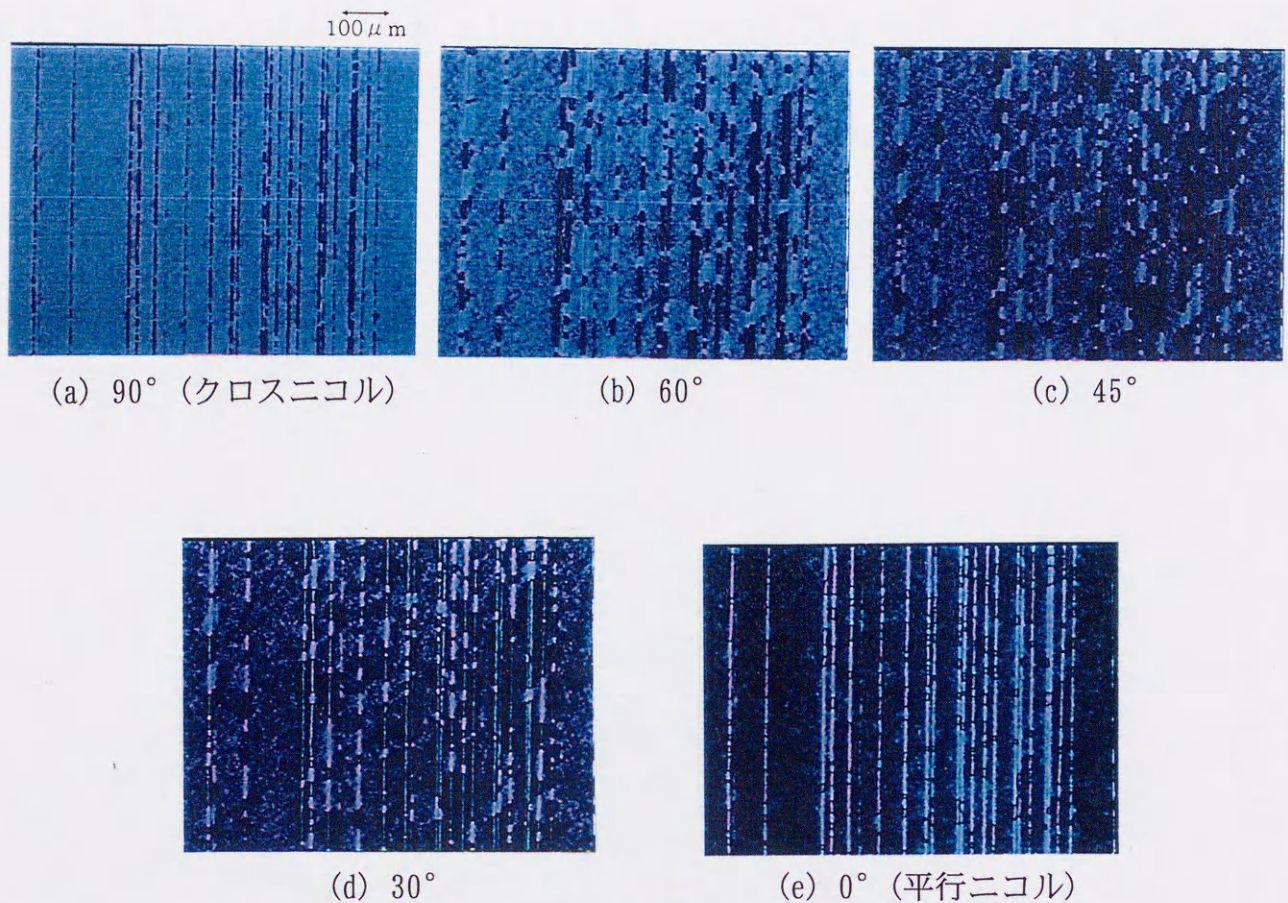


図 3-19 液晶配向分布の観察

3-3-3 液晶配向分布の理論的導出

上節の結果から、液晶配向分布について図 3-20 のようなモデルを立てることができる。すなわちセル厚 d がねじれピッチ P に対して $d=P/4$ の条件を満たすセル厚において、等間隔にラビングされた領域とその間のラビングされていない領域が含まれるように測定スポットを設定する。カイラル剤を添加して自発的なねじれを持たせた液晶を用いることから、配向寄与領域では液晶がある一定のねじれ角をもって均一に配向していると考えられる。ラビングされていない領域及び非配向寄与領域では、液晶は強いラビングを施した下側の基板のラビング方向に対して 90° ねじれた配向をとろうとするが、隣接する配向寄与領域における液晶ダイレクタの影響を受けるために配向が連続的に変化し、これらの領域の液晶ダイレクタは、図中の x 軸方向に関して、隣り合う高分子延伸領域の間隔幅で決まる、ある連続的なねじれ角分布を持って配向する。ここで図 3-20 の座標系を考えると、任意地点の液晶ダイレクタ \hat{n} は以下のように表せる。

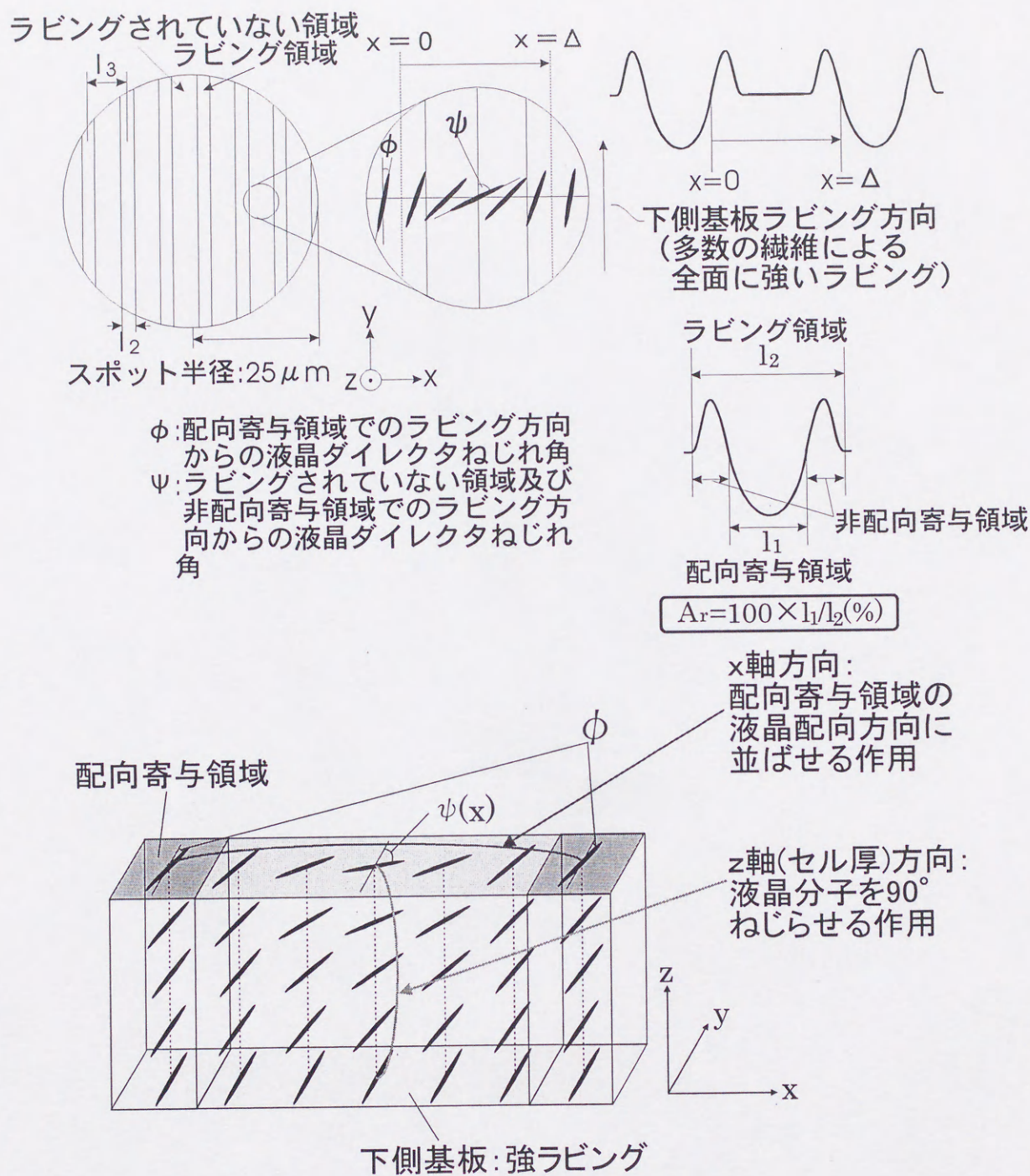


図 3-20 液晶配向分布モデル

$$\begin{aligned}
 n_x &= \sin \psi(x, z) \\
 n_y &= \cos \psi(x, z) \\
 n_z &= 0
 \end{aligned}
 \tag{3-28}$$

弾性連続体理論⁵¹⁾を用いることにより、配向寄与領域に挟まれた、非配向寄与領域及

びラビングされていない領域の全自由エネルギー密度 \mathfrak{S} は

$$\begin{aligned}\mathfrak{S} &= \frac{1}{2} \left\{ K_{11} [\nabla \cdot \hat{n}(\vec{r})]^2 + K_{22} \left[\hat{n}(\vec{r}) \cdot \nabla \times \hat{n}(\vec{r}) - \frac{2\pi}{P} \right]^2 + K_{33} [\hat{n}(\vec{r}) \times \nabla \times \hat{n}(\vec{r})]^2 \right\} \\ &= \frac{1}{2} \left\{ K_{11} \cos^2 \psi \left[\frac{d\psi}{dx} \right]^2 + K_{22} \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - \frac{2\pi}{P} \right)^2 + K_{33} \sin^2 \psi \left[\frac{d\psi}{dx} \right]^2 \right\}\end{aligned}\quad (3-29)$$

と表せる。ここで、 K_{11} 、 K_{22} 、 K_{33} はそれぞれ Splay, Twist, Bend の弾性定数である。したがって、 y 軸方向に関して単位長を考えることにより、考慮する領域の全自由エネルギー F は次式で表せる。

$$\begin{aligned}F &= \int_{x=0}^{x=\Delta} \int_{z=0}^{z=d} \mathfrak{S} dx dz \\ &= \frac{1}{2} \int_0^\Delta \int_0^d \left\{ \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} \right)^2 (K_{11} \cos^2 \psi + K_{33} \sin^2 \psi) + K_{22} \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - \frac{2\pi}{P} \right)^2 \right\} dx dz\end{aligned}\quad (3-30)$$

と表せる。 $K_{11}=K_{22}=K_{33}=K$ と簡略化することにより、(3-30)式は以下のように表せる。

$$F = \frac{K}{2} \int_0^\Delta \int_0^d \left\{ \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - \frac{2\pi}{P} \right)^2 \right\} dx dz\quad (3-31)$$

ここで、 z 軸方向の液晶ダイレクタのねじれは一様であると近似すると、 $\psi(x, z)$ は以下のように表せる。

$$\psi(x, z) = \psi(x, d) \cdot \frac{z}{d}\quad (3-32)$$

したがって、(3-31)式は

$$F = \frac{K}{2} \int_0^\Delta \int_0^d \left\{ \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - \frac{2\pi}{P} \right)^2 \right\} dx dz$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{K}{2} \int_0^\Delta \int_0^d \left\{ \left(\frac{\partial \psi(x,d)}{\partial x} \cdot \frac{z}{d} \right)^2 + \left(\frac{\partial \psi(x,d)}{\partial z} \cdot \frac{z}{d} - \frac{2\pi}{P} \right)^2 \right\} dx dz \\
&= \frac{K}{2} \int_0^\Delta \int_0^d \left\{ \left(\frac{z}{d} \right)^2 \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\psi}{d} - \frac{2\pi}{P} \right)^2 \right\} dx dz \\
&= \frac{K}{2} \int_0^\Delta \left\{ \frac{d}{3} \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} \right)^2 + d \left(\frac{\psi}{d} - \frac{2\pi}{P} \right)^2 \right\} dx \\
&= \frac{Kd}{6} \int_0^\Delta \left\{ \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} \right)^2 + 3 \left(\frac{\psi}{d} - \frac{2\pi}{P} \right)^2 \right\} dx
\end{aligned}$$

(3-33)

となる。(3-33)式にオイラー・ラグランジェ方程式を適用することにより、以下の微分方程式

$$\frac{d^2 \psi}{dx^2} = \frac{3}{d} \left(\frac{\psi}{d} - \frac{2\pi}{P} \right) \quad (3-34)$$

が得られる。モデルでは、 $d=P/4$ であることより、(3-34)式は

$$\frac{d^2 \psi}{dx^2} = \frac{48}{P^2} \psi - \frac{24\pi}{P^2} \quad (3-35)$$

となる。(3-35)式を境界条件 $\psi(0) = \psi(\Delta) = \phi$ を与えて解くことにより、液晶ダイレクタの分布式

$$\psi(x) = \frac{\pi}{2} - \left(\frac{\pi}{2} - \phi \right) \frac{\sinh \eta x + \sinh \eta (\Delta - x)}{\sinh \eta \Delta} \quad (3-36a)$$

$$\eta = \frac{4\sqrt{3}}{P} \quad (3-36b)$$

が得られる。この式より得られる、ラビングされていない領域及び非配向寄与領域における $\psi(x)$ の分布を図 3-21 に示す。 Δ の幅が広がるにつれて、間隔中央の分子のねじれが大きくなることが分かる。

次に、配向寄与領域における液晶のねじれ角を測定した。配向寄与領域幅はラビング繊維 Y0-15-N の場合平均 40nm と非常に微小であるため、この領域のみについて測定することは困難である。そこで、図 3-22 に示すように測定スポットを十分に小さくとり、ライン状にのびている配向寄与領域に対して測定スポットを垂直に移動させ、クロスニコルの状態で透過光強度を測定する。図 3-23 に示すように、ライン状の配

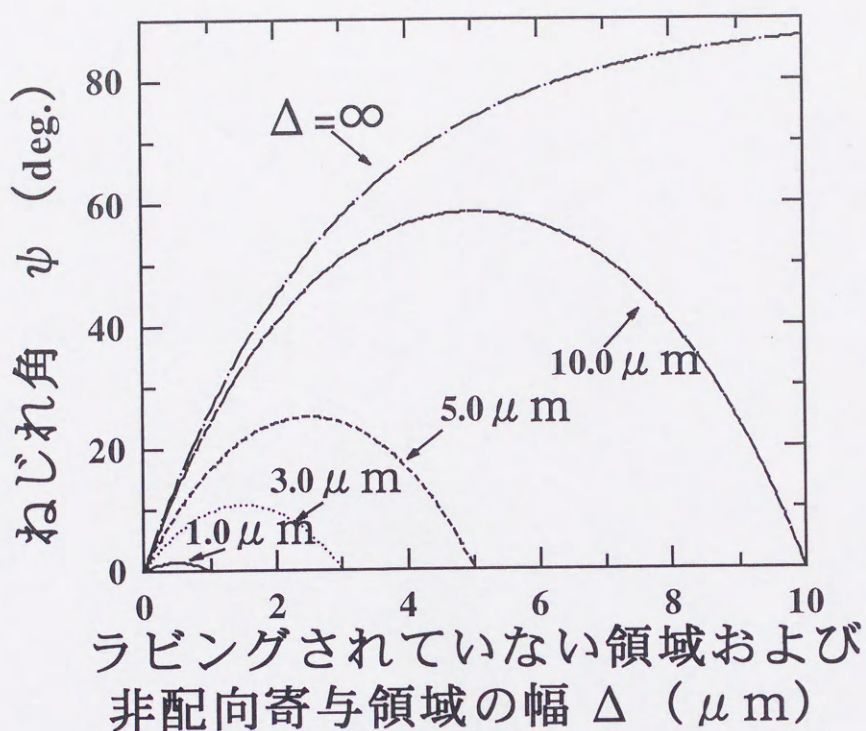


図 3-21 ラビングされていない領域及び非配向寄与領域における液晶ねじれ角分布

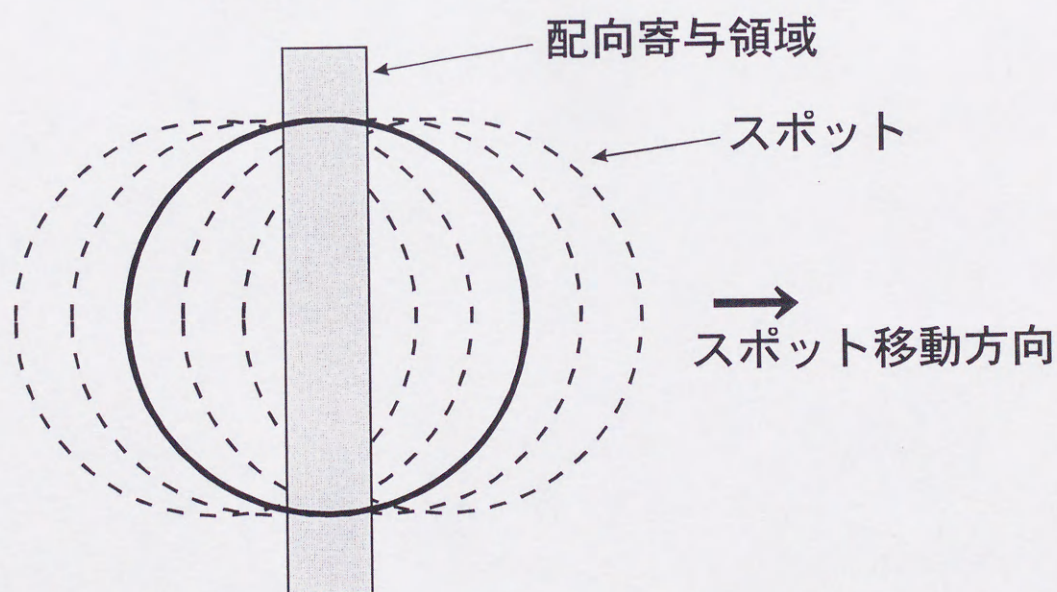


図 3-22 配向寄与領域のねじれ角測定方法

向寄与領域が測定スポットの中央に配置した場合、透過光強度が最も小さく測定されると考えられる。そこでその値が最も小さくなる場所において実効的なねじれ角を導出した。図 3-23 に示すように (3-36) 式に基づいて測定領域内の液晶配向分布を規定し、測定領域内の実効的なねじれ角と配向寄与領域におけるねじれ角の関係を導出した。測定した透過光強度から測定領域内における実効的な液晶ねじれ角を計算し、前

述の関係から配向寄与領域の液晶ねじれ角を換算した。その結果配向寄与領域の液晶ねじれ角は平均 0.16° という値が得られ、ほぼ平行に近い状態で配向していることが明らかとなった。

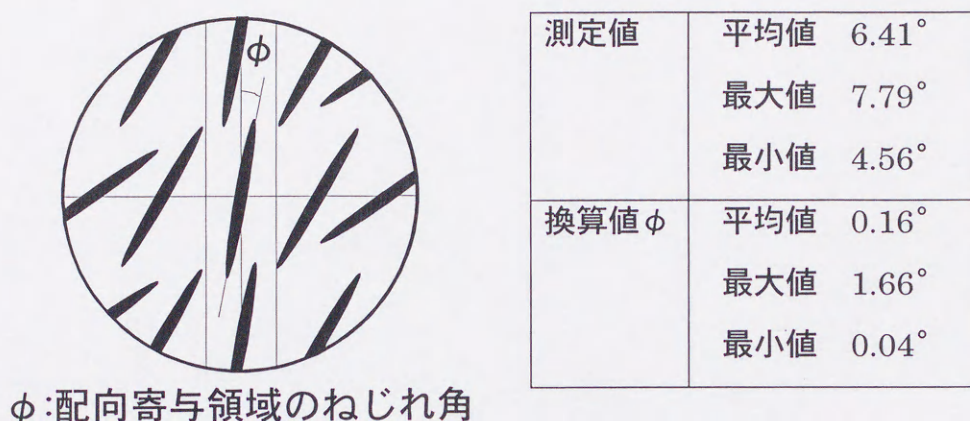


図 3-23 配向寄与領域のねじれ角の換算

3-3-4 理論と実験の比較

これらの結果を用いてラビング面積比に対する表面配向力の関係について解析を行った。計算方法として、等間隔に配置した高分子延伸領域の間隔を変えることによってラビング面積比を変化させた。高分子延伸領域の液晶ねじれ角は 0.16° 、ラビングされていない領域及び非配向寄与領域は(3-36)式より得られる液晶配向分布をしているとし、計算領域内の透過光強度の平均が最も小さくなるときに導出される実効的な液晶ねじれ角を用いて表面配向力を導出した。また、配向寄与領域に、隣接するラビング領域が重ならないものとして計算を行った。この条件よりラビング面積比の最大値は図 3-24 に示す配置をとる場合となり、 $A_r=50\%$ の場合には面積比の最大値は

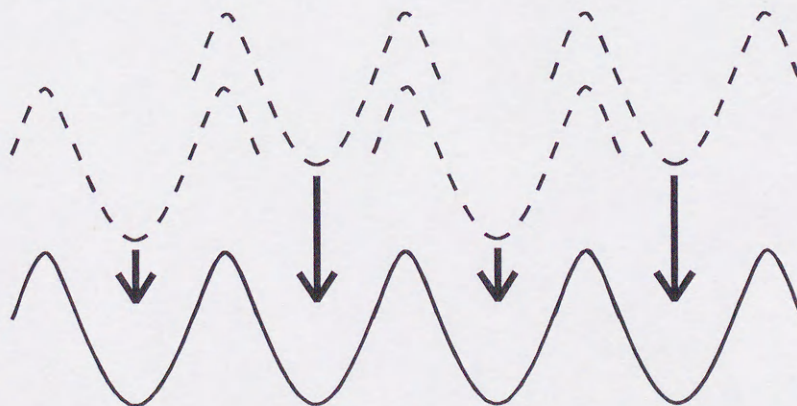


図 3-24 ラビング面積比が最大となる溝配置

0.67 となる。結果を図 3-25 に示す。図より理論値と実測値がほぼ一致していることから、前述の考え方の妥当性を確認した。また、ラビング面積比が大きい領域では表面配向力は飽和傾向を示すことが分かる。これより新たに提案したラビング面積比が表面配向力と対応させることのできる有効な物理パラメータとして用いることができることを示した。また図 3-26 より、配向寄与領域の液晶ねじれ角のわずかな差によって、計算値における表面配向力の飽和値に大きな影響があらわれることから、今後配向寄与領域の微少な液晶ねじれ角を正確に測定する方法が確立されれば、あらゆるラビング表面の配向効果を統一した形で定量的に記述できると考えられる。

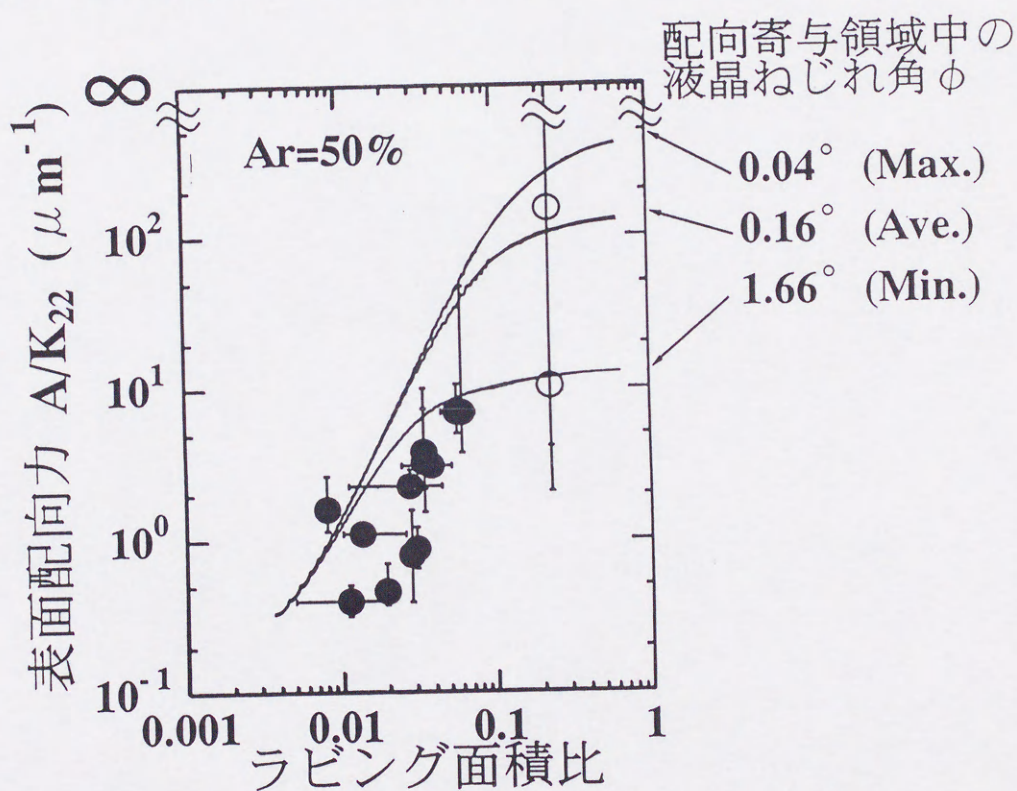


図 3-25 ラビング面積比と表面配向力の関係

3-4 結言

本章ではラビングによって生じる溝を、配向膜高分子がラビング方向に延伸され液晶の配向に寄与する領域と、配向に寄与しない領域に分割して考え、前者を溝の谷の部分、後者を山の部分であると仮定して、それぞれ配向寄与領域、非配向寄与領域と定義した。ついでラビングされていない領域も液晶の配向に寄与しないと考えることにより、全領域に対する配向寄与領域の割合をラビング面積比と定義した。そして繊維一本によるラビングを行ってラビング面積比を調節し、表面配向力との関係について解析を行った。その結果を以下に示す。

- (1) ラビング面積比と表面配向力の関係について、測定値より両者の間に明確な相関性があることを明らかにした。
- (2) 配向寄与領域の液晶ねじれ角と、ラビングされていない領域及び非配向寄与領域の液晶配向分布に関する理論から得た計算値と実測値との比較を行った結果、両者がよく対応することを明らかにした。

以上の結果から、新たに提案したラビング面積比が表面配向力と対応させることのできる有効な物理パラメータとして用いることが可能であることを示した。

第4章 ラビング面積比によるラビング強度の統一的表現

4-1 緒言

これまでラビング強度を表現する方法としては、ラビング密度 D が用いられ、 D 中の押し込み量、ラビング繊維密度、摩擦係数等の条件を一定にして、ラビング強度パラメータ L を変化させることにより表面配向力との関係を表してきた。しかしこのパラメータのみでは、一般の製造で用いられている押し込み量による制御や、繊維密度等のラビング布によって決まるパラメータを定量的に表記することができず、そのため統一的な形でラビング強度を表すことができないという問題があった。前章ではラビング面積比という新しい考え方をを用いて、繊維一本による厳密に制御されたラビングを行うことにより表面配向力との関係についてミクロな観点から定量的な解析を行い、両者の間に良好な対応があることを明らかにした。そこで本章では、この考えを通常の多数の繊維によるラビングの場合について拡張し、まずこれまで困難であった押し込み量の定量化について検討を行った。次に繊維長のばらつきと溝の重なりを考慮した場合のラビング面積比について検討し、介在パラメータとして実用上有効な配向寄与領域の累積幅を用いて表面配向力との関係を解析した。そしてラビング面積比による、押し込み量を含めた形のラビング強度の統一的な表現について検討した。

4-2 押し込み量の定量化

4-2-1 押し込み量の基準点の設定方法

押し込み量の基準点の設定方法として、繊維一本の場合及び、多数の繊維の場合についてそれぞれ述べる。方法としては、繊維一本の場合及び多数の繊維の場合双方について、基板を停止させローラーを回転させてラビングを行った。このラビングによって、ステージ高を変化させることで繊維と基板の距離を変えて複数個の基板を作製

し、前述のラビング方向と垂直方向に、非常に強いラビングを行った基板を逆側の基板として用い、液晶セルを作製した。そして図 4-1 に示すようにそのセルを平行ニコ

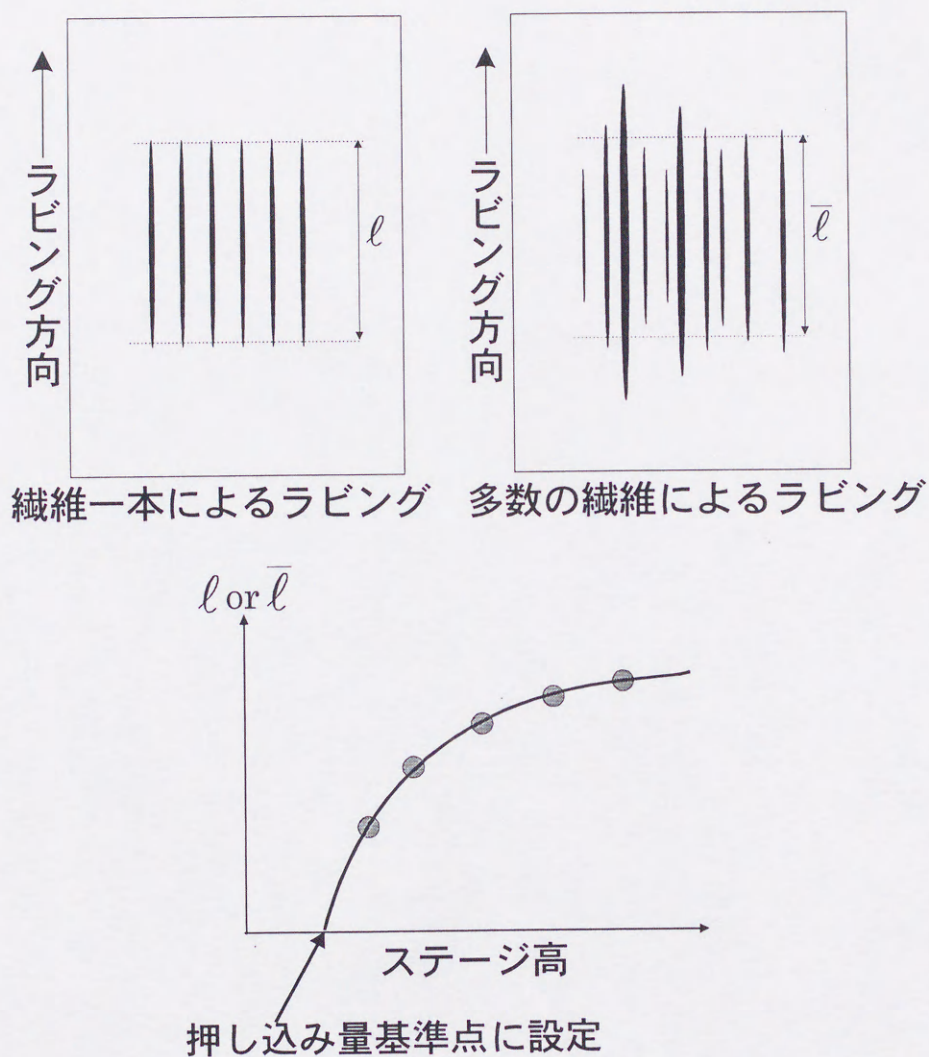


図 4-1 押し込み量基準点の設定方法

ル下で観察し、液晶がラビング方向に配向することで黒く観察される部分の長さである、接触長を測定した。接触長を l 、ローラー半径を r 、押し込み量を M とすると、押し込み量と接触長の関係は次式で表される。

$$l = 2\sqrt{M(2r - M)} \quad (4-1)$$

繊維一本によるラビングの場合には(4-1)式を用いて、ステージ高と接触長の関係から押し込み量がゼロとなる点を外挿し、その点を基準点とした。通常の数多くの繊維によるラビングの場合には、測定時には個々の繊維長のばらつきにより接触長もばらつく。

(4-1)式より、繊維長の平均値と接触長の平均値は一致しない。しかし、以下の解析において繊維長の平均値から押し込み量の基準点をとる必要性は薄いため、便宜上接触長の平均値を用いて押し込み量に対して外挿をおこない、押し込み量の基準点を設定した。

4-2-2 ラビング強度パラメータLと表面配向力の関係

ラビングの程度を表すパラメータとしては、これまで一般にラビング強度パラメータLが用いられてきた。そこで、ラビング強度パラメータLと表面配向力との関係について、押し込み量の変化により両者の対応にどのような違いが現れるかについて検討を行った。結果を図4-2に示す。ラビング及び測定条件は表3-1と同一である。図より、押し込み量が一定の場合には両者の関係は1つの対応を示すが、押し込み量が変わった場合はそれぞれの押し込み量により両者の対応が異なるものとして表され

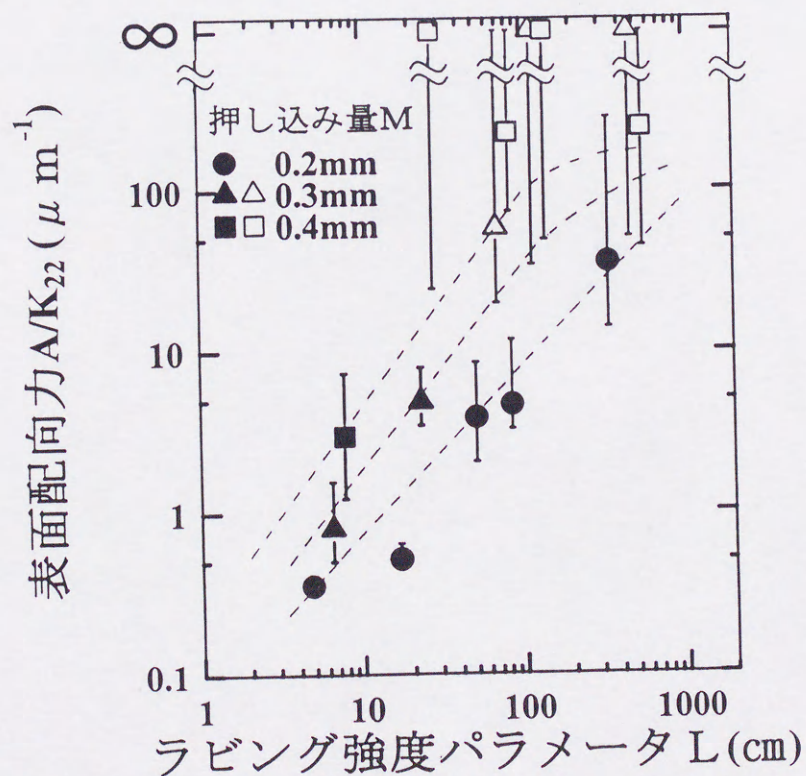


図 4-2 ラビング強度パラメータLと表面配向力の関係

る。これより、このパラメータでは押し込み量を含めた形でのラビング強度の表現は不可能であることを確認した。

4-2-3 押し込み量の変化がもたらす液晶配向への影響

ラビング時において、押し込み量の違いによる液晶配向への影響を解析することにより、押し込み量を定量化できると考えられる。その影響としては、以下の3つが考えられる。

- (1) 配向寄与領域中の表面配向力の変化
- (2) 配向寄与領域の幅の変化
- (3) 配向膜に接触するラビング繊維本数の変化

これら3つの要因についてそれぞれ検討を行った。

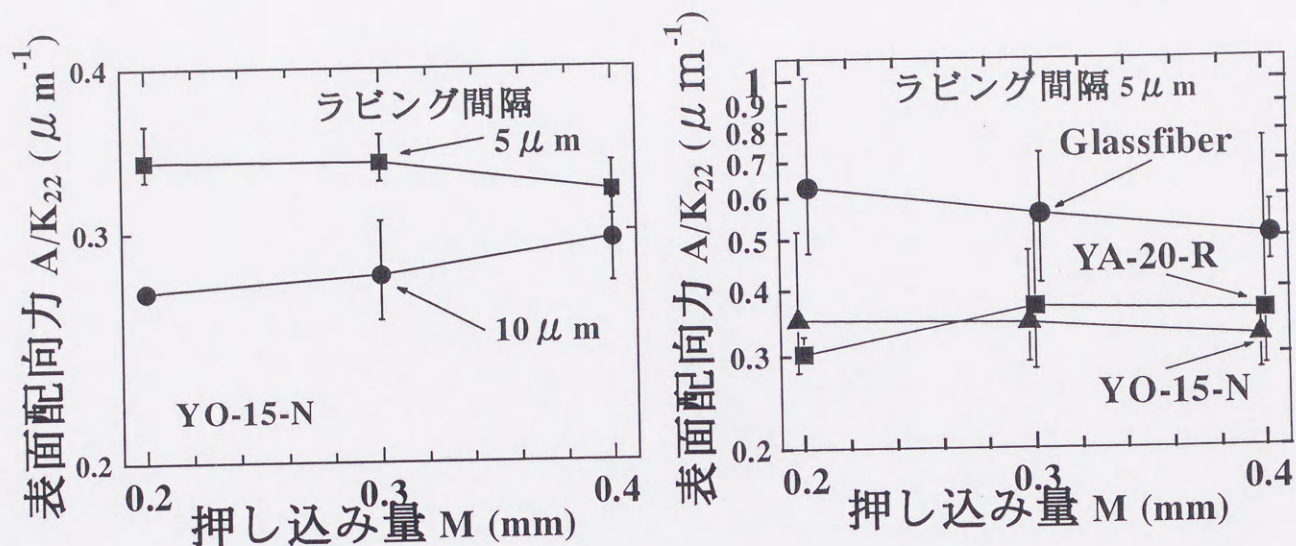
まず、押し込み量の変化によって配向寄与領域中の表面配向力が変化するかについて検討を行った。方法としては、繊維一本のみによる等間隔なラビングを、押し込み量を変化させて行い、配向寄与領域と非配向寄与領域及びラビングされていない領域が含まれた形で測定スポットを設定し、実効的な表面配向力を測定した。ラビング及びセル作製条件を表4-1に示す。測定結果を図4-3に示す。図より、押し込み量が変

表4-1 ラビング及びセル作製条件

ラビング繊維	YO-15-N, YA-20-R, グラスファイバ
配向膜	AL1051
押し込み量	0.2, 0.3, 0.4 mm
ラビング間隔	5, 10 μ m
ラビング方法	片側基板：繊維一本によるラビング 逆側基板：非常に強いラビング (L=3297cm)
測定スポット直径	50 μ m
表面配向力測定方法	トルクバランス法

繊維一本によるラビング条件

ラビング間隔 (μ m)	5	10
ローラー回転数 (rpm)	300	300
基板移動速度 (μ m/sec.)	50	25



(a) ラビング間隔を変えた場合

(b) 繊維の種類を変えた場合

図 4-3 ラビング間隔一定の場合の押し込み量と表面配向力の関係

化することによる表面配向力の変化はラビング間隔の変化及びラビング繊維の変化による表面配向力の変化に対して微少であることがわかる。これより、測定した範囲内では押し込み量の変化にかかわらず、配向寄与領域における表面配向力の変化は微少であると考えられる。

次に考えられる要因として、押し込み量の変化により、高分子配向膜上に形成される溝の幅が変化し、その結果配向寄与領域の幅 w が変化することが考えられる。そこで4種の繊維について、繊維一本によるラビングについて押し込み量を変化させて行い、配向寄与領域の幅 w が変化するかを測定した。押し込み量は0.2, 0.3, 0.4mm、 w の測定は走査型プローブ顕微鏡のAFM, FFMモードを用いて行った。結果を表4-2に示す。この結果、YO-15-N、YA-20-Rのように押し込み量の変動により配向寄与領域の幅 w がほとんど変化しない繊維と、グラスファイバ、YA-25-Cのように大きく変化する繊維が存在することがわかった。

表 4-2 押し込み量と配向寄与領域の幅の関係

(1) YO-15-N(ナイロン)

押し込み量 M (mm)	配向寄与領域の幅 w (nm) (平均値)
0.2	40.0
0.3	43.9
0.4	45.4
全平均値 (変動幅)	43.1 (-7.2%~+5.3%)

(2) YA-20-R(レーヨン)

押し込み量 M (mm)	配向寄与領域の幅 w (nm) (平均値)
0.2	76.4
0.3	86.8
0.4	90.1
全平均値 (変動幅)	84.4 (-9.5%~+6.8%)

(3) グラスファイバ

押し込み量 M (mm)	配向寄与領域の幅 w (nm) (平均値)
0.2	149
0.3	203
0.4	398
全平均値 (変動幅)	250 (-40%~+59%)

(4) YA-25-C(綿)

押し込み量 M (mm)	配向寄与領域の幅 w (nm) (平均値)
0.2	32.7
0.3	37.0
0.4	56.0
全平均値 (変動幅)	41.9 (-22%~+34%)

第3の要因として、ラビング繊維にばらつきが存在するため、押し込み量の違いにより配向膜表面に接触するラビング繊維本数が変化することが考えられる。そこで、通常のラビング布において、押し込み量を変化させて非常に弱いラビングを行って液晶セルを作製し、ライン状に観察されるラビング方向への液晶配向領域の本数(以下、ラビングラインと定義する)を測定した。ラビング条件を表4-3に示す。また、作製

表 4-3 ラビング条件

ラビング繊維	YO-15-N(ナイロン)、YA-20-R(レーヨン)
ラビング方法	片側基板：ローラー停止のまま基板を1回移動 逆側基板：強ラビング (L=3297cm)
押し込み量	0.1, 0.2, 0.3, 0.4mm
基板移動速度	70.8 μ m/sec.

した液晶セルを偏光顕微鏡で観察したものを図 4-4 に、押し込み量とラビングラインの本数の関係を図 4-5 に示す。図より、押し込み量が増加するにつれて、測定範囲内においてラビングラインの本数が急激に増加することがわかる。ここで、ラビングライン本数の測定方法としては、上記のラビングを行った基板を用いて液晶セルを作製し、偏光顕微鏡像からの目測で認識できるラインの本数を測定値とした。また、ラビング間隔を $50\mu\text{m}$ 、押し込み量を約 0.04mm として繊維一本によるラビングを行って液晶セルを作製し、偏光顕微鏡によりラインの端部付近を観察した像を図 4-6 に示す。図の下方がラビングの端の方向である。ラビングラインが鮮明に観察されていることから、少なくとも押し込み量が 0.04mm 以上のものはラビングラインとして観察

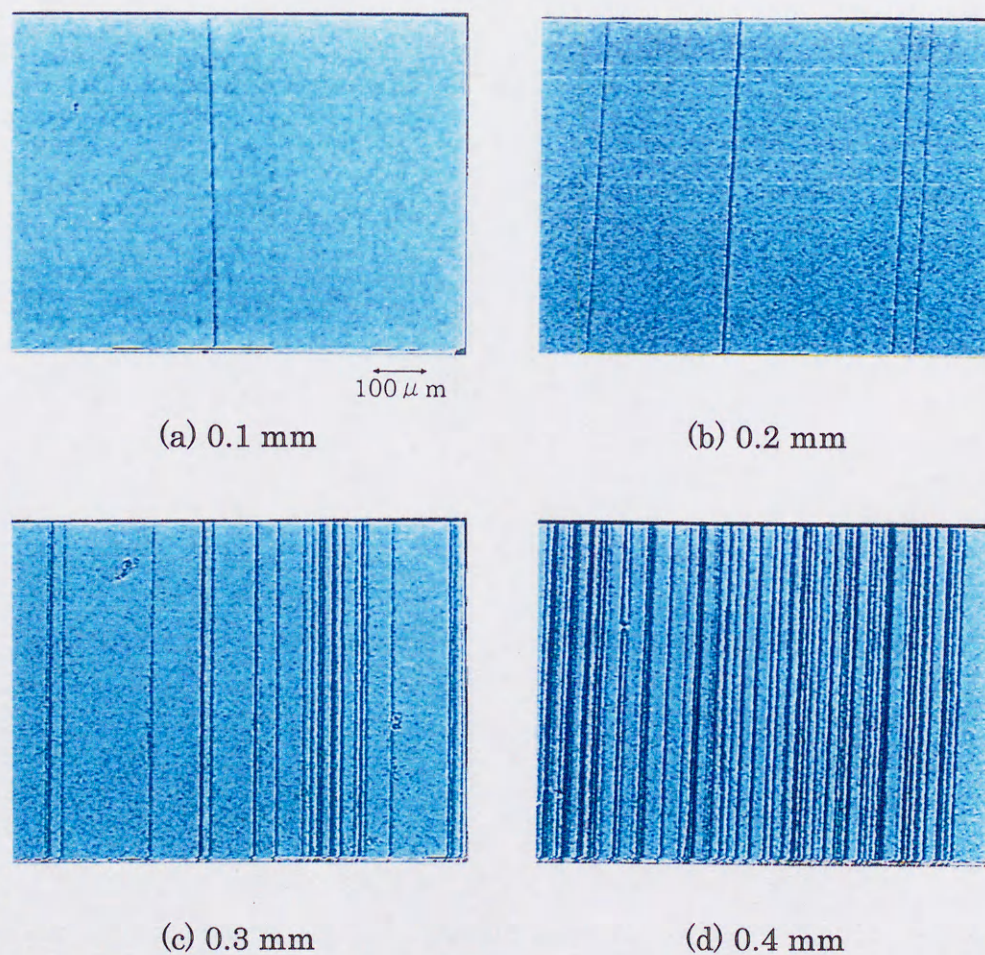


図 4-4 ラビングライン本数の測定 (YO-15-N)

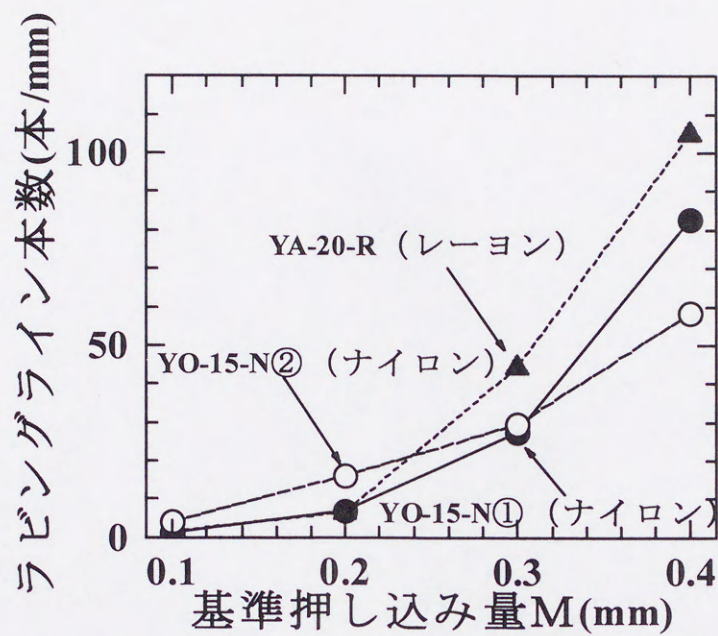


図 4-5 押し込み量とラビングライン本数の関係

されている。また測定より得たラインの長さは 2.74mm である。ついで走査型プローブ顕微鏡の AFM モードを用いて、溝の端部における配向寄与領域の幅、ラビング領域の幅を測定した結果を図 4-7 に、溝の深さを測定した結果を図 4-8 に示す。図より、幅について、接触開始点から 150 μm あたりまで急激に増加し、その後ほぼ一定値となるのがわかる。溝の深さに関しては測定範囲内において増加傾向を示す。ここで、

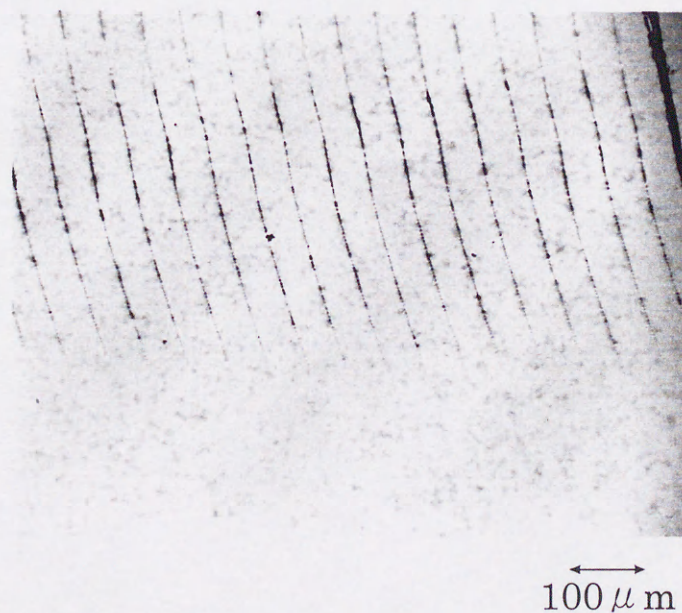


図 4-6 偏光顕微鏡によるラビングライン端部付近の測定像

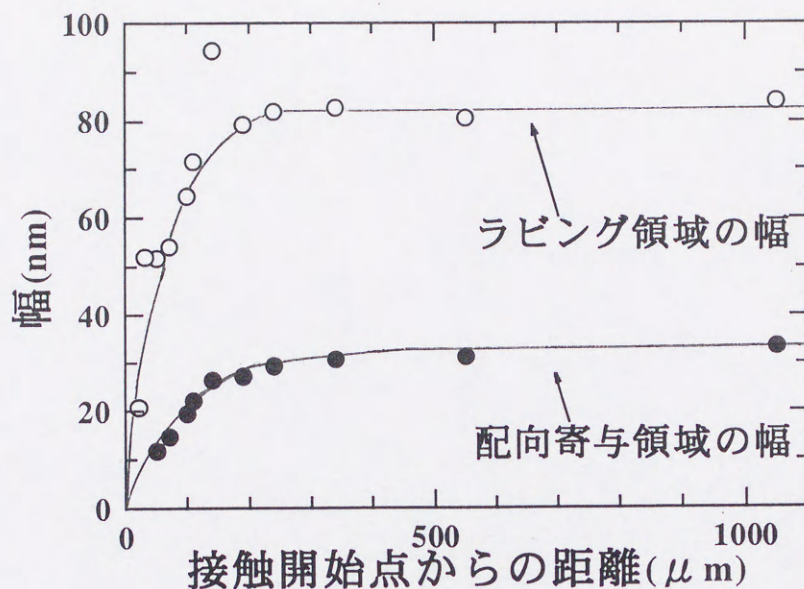


図 4-7 溝の端部付近における配向寄与領域及びラビング領域の幅

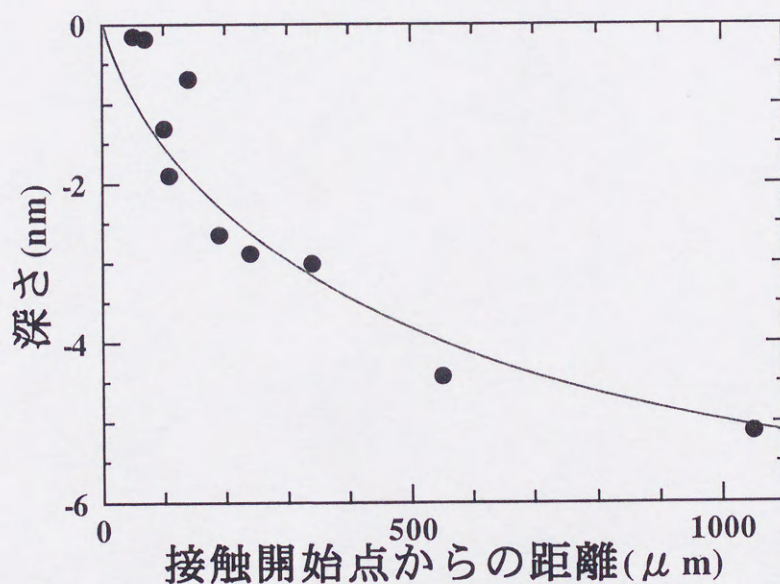


図 4-8 溝の端部付近における溝の深さ

繊維接触開始点からの距離を $x(\text{mm})$ 、その地点における押し込み量を $n(x)(\text{mm})$ とする。今回測定したラインの長さにおける両者の関係を計算したものを図 4-9 に示す。また幅が急激に変化する溝の端部は液晶を配向させる作用が弱く、ラインとして観察されていないと仮定し、溝の長さを 3.00mm として計算した結果についても示す。図 4-7、図 4-9 より、溝の幅が急激に変化する境界となる $150\mu\text{m}$ 付近に相当する押し込み量は 0.008mm 、溝の長さを 3.00mm と仮定した場合でも 0.009mm である。以上より、観察されるラインの長さに対して、配向寄与領域及びラビング領域の幅が急

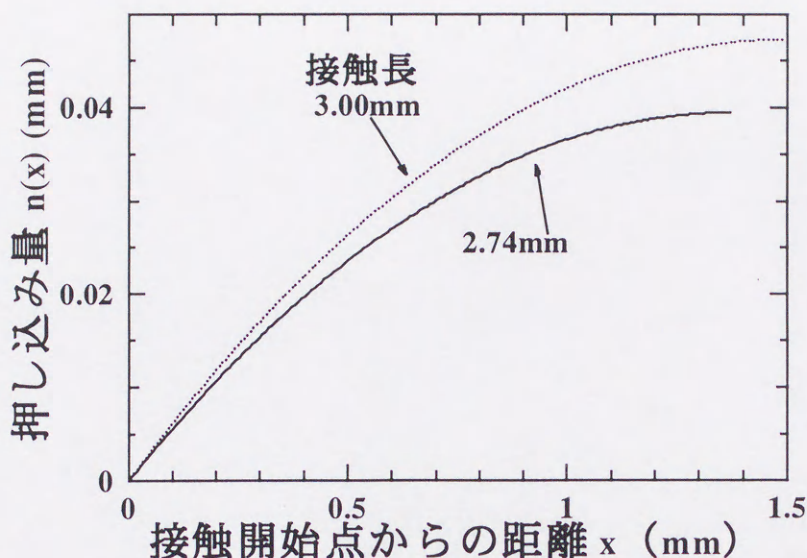


図 4-9 接触開始点からの距離とその地点での押し込み量の関係

激に変化する部分の長さは微小であり、溝の端部まで液晶の配向に寄与していると考えた場合でも、溝端部付近における液晶配向の変化が全体に及ぼす影響はわずかであるといえる。また溝の幅が変化する部分に相当する押し込み量は、その部分が液晶の配向に寄与しないとした場合でも 0.009mm 以下と微小である。よって押し込み量が 0.009mm 以上で生じるラビングラインは目測で確認できており、それ以下の押し込み量に対応する部分の影響は微小であるため無視できるとして解析を行った。この、押し込み量が非常に微小な場合における液晶配向への影響についての詳細な解析は、今後の課題である。

以上の結果から、押し込み量の変化とはすなわち繊維接触本数の変化ととらえることができ、さらに配向寄与領域の幅の変化が大きな繊維の場合にはこの要素も含めた形で表すことができることを明らかにした。

4-3 多数の繊維の場合におけるラビング面積比と表面配向力の関係

4-3-1 配向寄与領域の累積幅 S の理論的導出

前章及び前節の結果をもとに、ラビング面積比の考え方を通常多数の繊維による

ラビングの場合についても適用させることについて考える。この場合、それぞれの繊維長が一定ではなくばらつきをもっていること、またラビング領域どうしが重なることが問題としてあげられる。そこで、解析の手順としてまずラビングにより生成される配向寄与領域について、溝の重なりを考慮せずにその累積幅を導出し、それをふまえて、溝の重なりを考慮したラビング面積比と配向寄与領域の累積幅の関係について検討した。

はじめに、配向寄与領域の累積幅 S の導出について考える。モデルを図 4-10 に示す。ここで、図中の M (mm) はローラー中心から基板に垂直におろした地点における

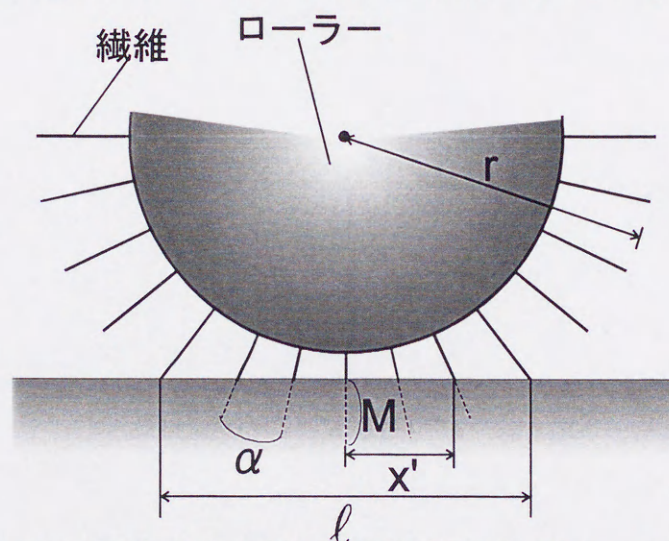


図 4-10 配向寄与領域の累積幅 S の導出モデル

押し込み量を表し、基準押し込み量と定義する。また、 r (mm) はローラー半径、 x' (mm) は配向膜上における基準押し込み量地点からの距離、 l (mm) は配向膜上において繊維が接触可能な距離を表し、接触長と定義する。また、モデルでは繊維は繊維間隔 α (mm) で格子状に配置しているものとする。

基板移動速度を v (mm/sec.) とすると、基板上の任意の 1 点が微小距離 $\Delta x'$ 移動する際の移動時間は以下の式で表される。

$$\frac{\Delta x'}{v} \quad (\text{sec.}) \quad (4-2)$$

任意地点の押し込み量を $n(x')$ (mm) とすると、 n は r , M , x' を用いて以下の式で表せる。

$$n = r - \sqrt{(r - M)^2 + x'^2} \quad (4-3)$$

また、ローラー回転数を $N(\text{rpm})$ とすると、基板上における繊維の回転速度 $V_r(\text{mm/sec})$ は以下の式で表せる。

$$V_r = \frac{2\pi(r-n)N}{60} \quad (4-4)$$

ここで、一般に $n \ll r$ であるため、(4-4)式について以下のように近似を行う。

$$V_r = \frac{2\pi r N}{60} \quad (4-5)$$

よって、基板上の 1 点での繊維通過速度は V_r と v の関係から、

$$V_r \pm v \quad (4-6)$$

と表せる。ただし $+$ はローラー回転方向と基板移動方向が同一であること、 $-$ はローラー回転方向と基板移動方向が逆であることを示す。(4-2), (4-6)式より、繊維が通過する長さを ΔD (mm) とすると、以下の式で表すことができる。

$$\Delta D = \frac{2\pi r N \Delta x'}{60v} \pm \Delta x' \quad (4-7)$$

通過する繊維本数は以下の形で表せる。

$$\frac{\Delta D}{\alpha} \quad (4-8)$$

実際のラビング繊維の場合には、個々の繊維の長さにはばらつきが存在する。ここで、押し込み量 n に関して、繊維が接触する確率分布関数を $f(n)$ とする。(4-3)式を用いることにより、 $f(n)$ は M と x' を変数とした $g(M, x')$ の形で表すことができる。実際に配向膜に接触する繊維の本数は繊維本数と繊維接触確率の積で与えられ、以下の形で表せる。

$$\frac{\Delta D}{\alpha} \times g(M, x') = \frac{1}{\alpha} \left\{ \frac{2\pi r N}{60v} \pm 1 \right\} \Delta x' \times g(M, x') \quad (4-9)$$

接触長 ℓ を積分範囲として積分を行うことにより、ラビング方向と平行な 1 列分における基板 1 点を通過する繊維総本数を $G(M)$ とすると、以下の式で表すことができる。

$$G(M) = \frac{2}{\alpha} \left(\frac{2\pi r N}{60v} \pm 1 \right) \int_0^{\ell/2 = \sqrt{M(2r-M)}} g(M, x') dx' \quad (4-10)$$

ラビング回数を C (回) とすると、ラビング方向に垂直な単位幅あたりのラビングライ

ン本数 R_L は、以下の式で表せる。

$$R_L = C \cdot G(M) / \alpha \quad (4-11)$$

よって、配向寄与領域の幅を $w(M, x')$ (mm) とすると、累積幅 S は以下の式で表せる。

$$S = w(M, x') \cdot R_L \\ = C \frac{2}{\alpha^2} \left(\frac{2\pi r N}{60v} \pm 1 \right) \int_0^{l/2} w(M, x') \cdot g(M, x') dx' \quad (4-12)$$

S は図 4-11 に示すように単位幅中における配向寄与領域の累積幅が単位幅に対して占める割合を表す。

実際のラビングでは配向膜上で配向寄与領域が重なることが考えられる。そこで次に配向寄与領域の累積幅 S と、配向膜上における実際のラビング面積比との関係について検討を行った。ここで、図 4-12 に示すように、仮定として配向膜上に存在する溝に新しく溝が重なる場合、新しい溝における領域の区分が支配的であるとした。つまり配向膜上のすべての領域をラビングした場合でも、溝中の山部分の存在により全領域が配向寄与領域になることはないとする。この仮定のもとで、シミュレーショ

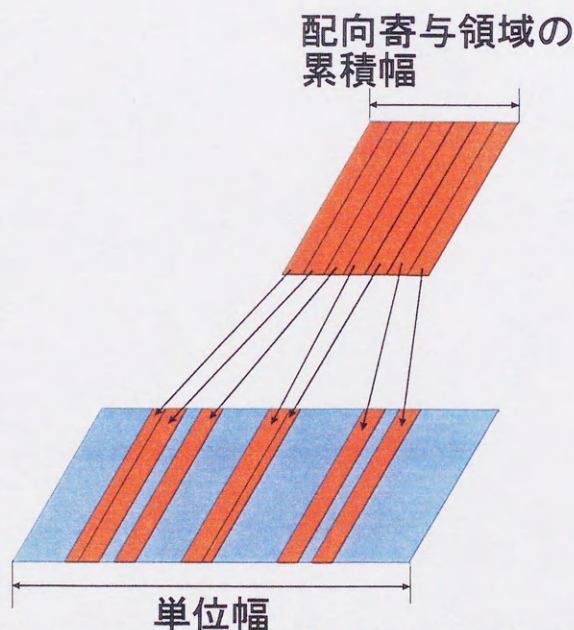


図 4-11 配向寄与領域の累積幅 S の概念図

ンを行った。計算条件を表 4-4 に示す。また、計算中の配向寄与領域の幅 S とラビング領域の幅の値は、ラビング繊維 YO-15-N の場合における測定値を用いている。結果を図 4-13 に示す。図より、配向寄与領域の割合は飽和傾向を示し、その飽和値は配向寄与領域の幅とラビング領域の幅の比に対応する。また、この値は配向寄与領域

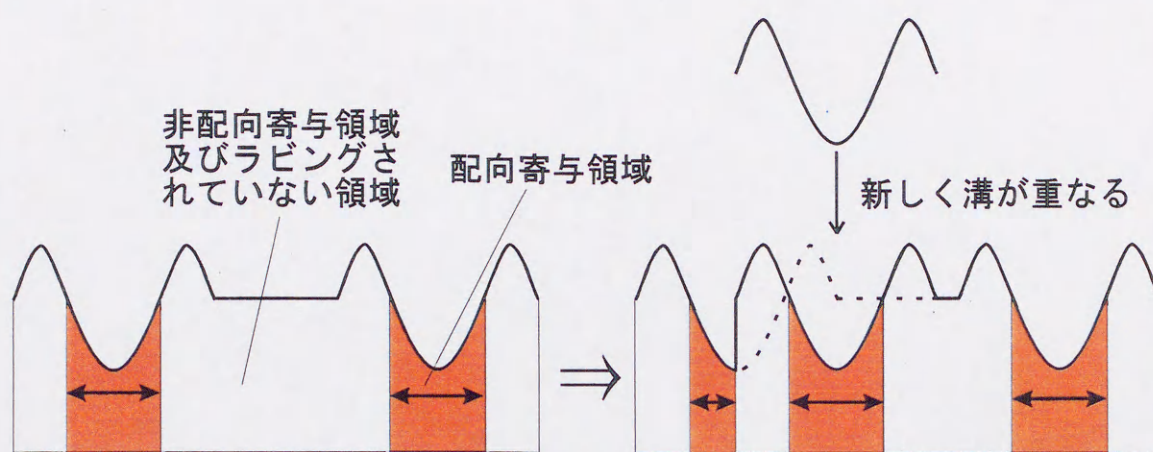


図 4-12 溝が重なる場合の領域の区分方法

の幅とラビング領域の幅の値が変わった場合でも両者の比に対応することを確認した。この関係を用いることにより、配向寄与領域の累積幅 S とラビング面積比を対応づけることができる。

表 4-4 シミュレーション条件

使用アプリケーション	LabVIEW 5.1 (National Instruments 製)
配向寄与領域の幅	40 nm
ラビング領域の幅	80 nm
溝配置条件	計算領域幅中にランダムに配置

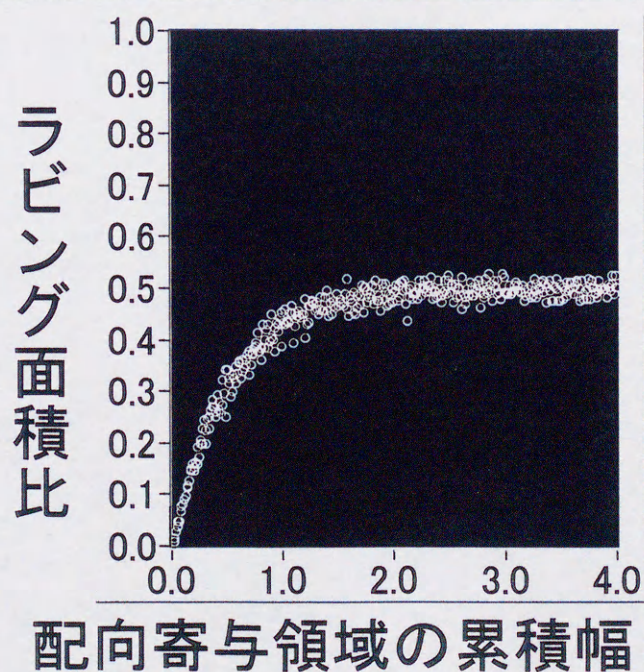


図 4-13 配向寄与領域の累積幅 S とラビング面積比の関係

4-3-2 配向寄与領域の累積幅 S の導出法

次に、実際に配向寄与領域の累積幅 S を導出する方法について検討を行った。方法として、以下の2つの場合に分類できる。

- (1) 押し込み量の変化に対して、配向寄与領域の幅 w がほとんど変化しない場合
- (2) 押し込み量の変化に対して、配向寄与領域の幅 w が変化する場合

両者の代表的な例としては表 4-2 に示したように、(1)についてはラビング繊維 YO-15-N、(2)についてはグラスファイバがあげられる。この2つの場合それぞれについて、実際に S を導出する方法を検討した。

まず、押し込み量の変化に対して配向寄与領域の幅 w がほとんど変化しない場合の累積幅 S の導出方法について検討を行った。方法として、図 4-14 に示す予備測定を行う。任意の基準押し込み量 $M=M_0$ において、ローラーを停止させ基板を1回移動させることにより、繊維が接触した部分はラビングラインとして観察される。上記の

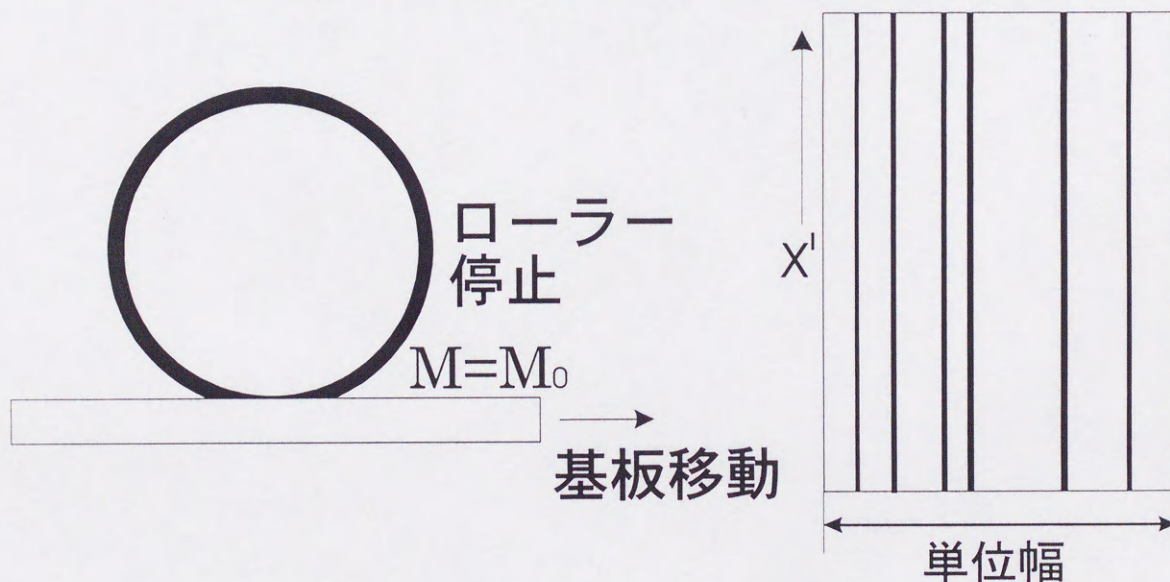


図 4-14 押し込み量の変化に対して配向寄与領域の幅 w の変化が微少な場合の予備測定方法の模式図

操作により生成される単位幅あたりのラビングライン本数を $G'(M_0)$ とすると、この値は以下の式で表される。

$$G'(M_0) = \frac{2}{\alpha^2} \int_0^{\ell/2} g(M_0, x') dx' \quad (4-13)$$

実際にラビングラインの本数 $G'(M_0)$ を、基準押し込み量を変えて複数点測定することにより、図 4-5 に示した基準押し込み量とラビングライン本数の関係が得られる。また配向寄与領域の幅 w はラビングした基板表面を AFM、FFM モードを用いて測定を行う。この値は押し込み量に依存しないと近似できるため、配向寄与領域の累積幅 S は(4-13)式を用いて以下の式で表すことができる。

$$\begin{aligned} S &= C \frac{2}{\alpha^2} \left(\frac{2\pi r N}{60v} \pm 1 \right) \int_0^{\ell/2} w(M, x') \cdot g(M, x') dx' \\ &= C \cdot w \cdot \left(\frac{2\pi r N}{60v} \pm 1 \right) \cdot G'(M) \end{aligned} \quad (4-14)$$

あらかじめ基準押し込み量とラビングラインの本数の関係を測定しておくことにより、(4-14)式を用いて簡便に S を導出することができる。

次に、押し込み量の変化に対して配向寄与領域の幅 w が変化する場合における配向寄与領域の累積幅 S の導出方法について示す。予備測定の方法を図 4-15 に示す。方法としては、任意の基準押し込み量において、基板を停止した状態でローラーを 1 回転させる。この方法により、図に示すようにラビングされた部分が生成される。単位幅中における配向寄与領域の幅及びラビングライン本数のラビング方向に対する分布を測定し、両者を積算した後にラビング方向について平均をとる。この値に接触長とローラー 1 回転での移動距離との比 $\ell/2\pi r$ をかけることにより、ローラーを停止させ基板を 1 回移動させたことに対応する以下の式で示す値が得られる。

$$G''(M_0) = \frac{2}{\alpha} \int_0^{\ell/2} w(M_0, x') \cdot g(M_0, x') dx' \quad (4-15)$$

(4-15)式より、基準押し込み量 $M=M_0$ における配向寄与領域の累積幅 S は以下の式で表すことができる。

$$S = C \cdot \left(\frac{2\pi r N}{60v} \pm 1 \right) \cdot G''(M) \quad (4-16)$$

この場合においても(1)の場合と同様に基準押し込み量 M と $G''(M)$ の関係を測定しておくことにより、(4-16)式から S を導出することができる。

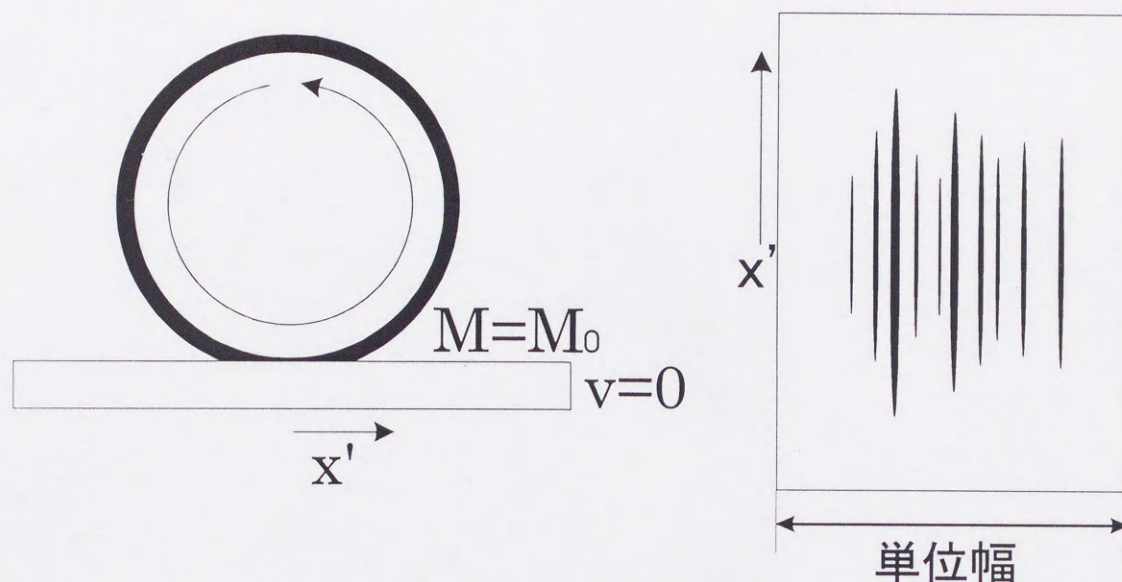


図 4-15 押し込み量の変化に対して配向寄与領域の幅 w が変化する
場合の予備測定方法の模式図

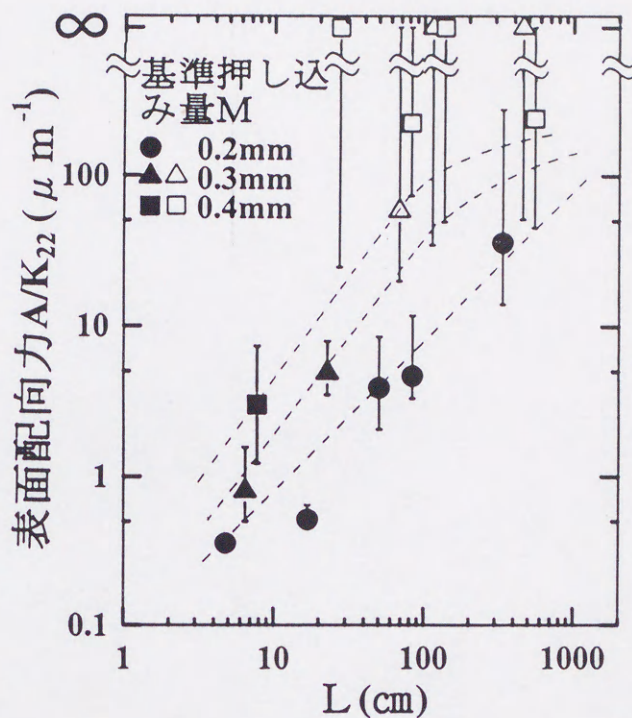
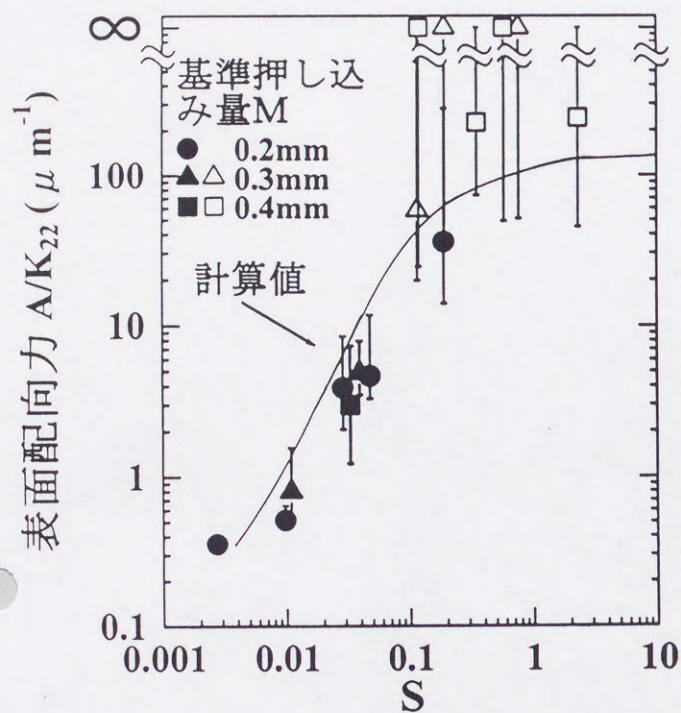
4-3-3 配向寄与領域の累積幅 S と表面配向力の関係

ラビング面積比によるラビング強度の表現の妥当性を確認するために、実際に配向寄与領域の累積幅 S を導出して表面配向力との関係について解析を行った。ラビング及び測定条件を表 4-5 に示す。使用したラビング繊維 YO-15-N 及び YA-20-R は表 4-2

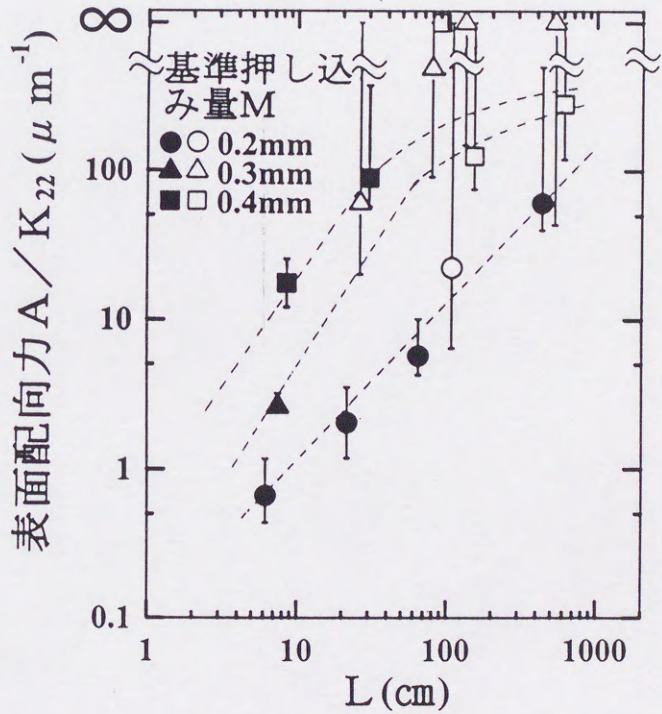
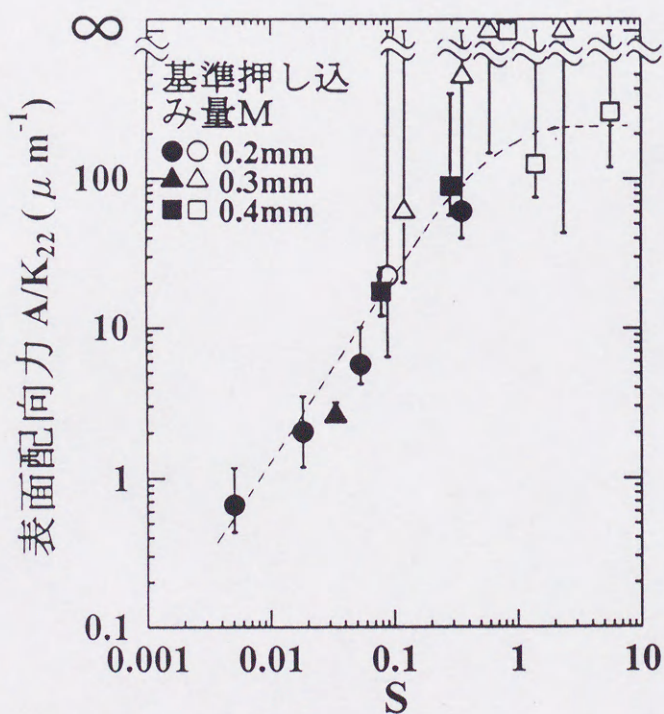
表 4-5 ラビング及び測定条件

ラビング条件	片側基板：L を変化 逆側基板：非常に強いラビング ($L=2113\text{cm}$)
ラビング繊維	YO-15-N (ナイロン)、YA-20-R (レーヨン)
液晶	N 領域：GR-41 N* 領域：GR-41+CNO. 88wt%
配向膜	AL1051 (主鎖型)、Poly vinyl alcohol (PVA)
表面配向力	トルクバランス法による測定
セル厚	$5.07\ \mu\text{m}$

に示したように押し込み量の変化に対して配向寄与領域の幅 w の変化が微少であるため、図 4-13 及び(4-14)式で示した方法を用いて S を導出した。図 4-16 にラビングの強度と表面配向力の関係について、同じ測定値について配向寄与領域の累積幅 S を用いて表記した場合と、ラビング強度パラメータ L を用いて表記した場合について示す。また、ラビング繊維 YO-15-N、配向膜 AL1051 を用いた場合について、理論か

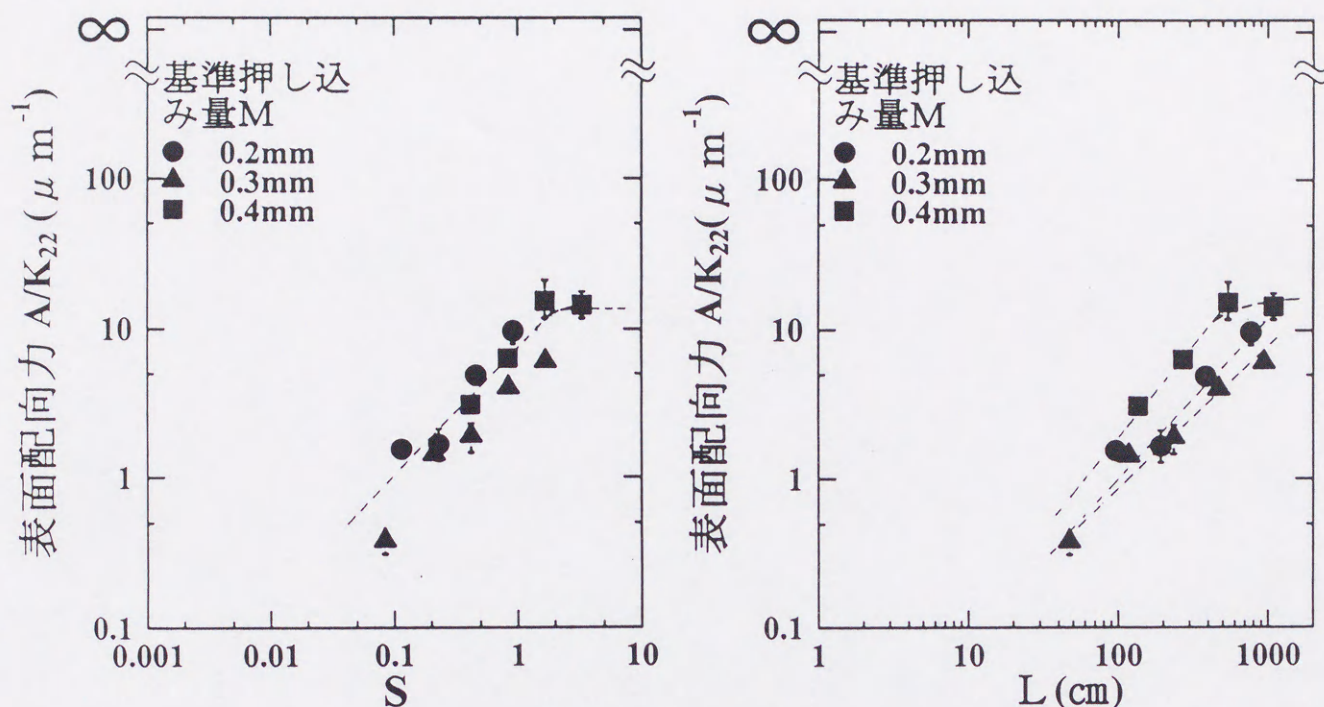


(1) 繊維: YO-15-N(ナイロン)、配向膜: AL1051



(2) 繊維: YA-20-R(レーヨン)、配向膜: AL1051

図 4-16 2種のパラメータによるラビング強度と表面配向力との関係の比較



(3) 繊維：YO-15-N(ナイロン)、配向膜：PVA

図 4-16 2種のパラメータによるラビング強度と表面配向力との関係の比較

らの計算値を示す。この計算値は図 3-26 で示したラビング面積比と表面配向力の関係を表したグラフ中の計算値と、図 4-13 で示した配向寄与領域の累積幅 S とラビング面積比の関係を表したグラフを用いて、 S と表面配向力の関係を計算したものである。図より、ラビング繊維を変えた場合および配向膜を変えた場合いずれにおいても、ラビング強度パラメータ L では基準押し込み量の違いにより傾向が異なった表記となるが、 S を用いることにより、押し込み量の変化を含めた形で表面配向力との関係に対応づけられることが示された。また計算値とも良い対応を示すことから、 S の有効性を確認した。

4-3-4 ラビング面積比によるラビング強度の統一的表記

前述の結果から、配向寄与領域の累積幅 S と表面配向力との関係について、押し込み量を含めた良好な対応が示された。この配向寄与領域の累積幅 S は、使用の際に簡単な予備測定のみを行えば良く、 S と表面配向力との関係は実用性の面から有効であ

る。また、図 4-13 より S とラビング面積比とは 1 対 1 の対応を示すことを明らかにした。ラビング面積比と表面配向力の関係も図 4-13 に示す関係から容易に導出できる。以上からラビング面積比の考え方の妥当性を確認し、押し込み量を含めた統一的なラビング強度を表すパラメータとしてラビング面積比が有効であることを明らかにした。

4-4 結言

本章では、前章で提案したラビング面積比を、通常の多数の繊維によるラビングの場合について適用することを試みた。まず、これまで困難であった押し込み量の定量化について検討を行った。ついで、介在パラメータとして配向寄与領域の累積幅 S を導出し、ラビング面積比と S の関係、および S と表面配向力との関係から、ラビング面積比によるラビング強度の表現の有効性について解析を行った。その結果を以下に示す。

- (1) 押し込み量の変化は、配向膜に接触する繊維本数の変化と配向寄与領域の幅の変化としてとらえることができることを明らかにし、これらの観点から押し込み量が定量化できることを示した。
- (2) 配向寄与領域の累積幅 S を理論的に導出した。ついで S とラビング面積比との関係について解析し、両者の間に 1 対 1 の対応が得られることを明らかにした。
- (3) ラビング時において、実際に配向寄与領域の累積幅 S の値を導出する方法を示し、 S と表面配向力との関係について、理論値と測定値双方の点から両者が良く対応づけられることを明らかにした。

以上の結果からラビング面積比の有効性を明らかにし、これを用いることにより、これまで不可能であった押し込み量を含めた形での統一的なラビング強度の表現が可能であることを示した。

第5章 結論

本研究では、ラビングによって形成される高分子配向膜表面の形状、液晶の配向効果などについてミクロな観点から定量的解析を行った。一般に行われている多数の繊維によるラビングを繊維一本によるラビングの重ね合わせとして捉え、精密かつ均一に制御されたラビングを施すことによって、従来困難であった詳細な解析を可能にすることができた。その結果をまとめると次のようになる。

- (1) ラビング繊維と配向膜とはラビング繊維直径に対して微小な領域で接し、繊維端部の微細形状が溝を形成することを明らかにした。
- (2) ラビングにより生じた溝は中央の谷部分とその両側の山部分から構成されることを明らかにした。このうちラビングによって配向膜高分子が延伸されてラビング方向に配向し、液晶の配向に寄与するのは谷部分のみであると仮定して、その部分を配向寄与領域と定義し、またこの領域が全体に対して占める割合をラビング面積比と定義した。ついで、このラビング面積比と表面配向力との関係を解析し、理論値と実験値双方の点から両者が良く対応付けられることを明らかにした。
- (3) 押し込み量の変化は、配向膜に接触するラビング繊維本数の変化と配向寄与領域の幅の変化で表すことができることを明らかにし、押し込み量を定量化できることを示した。次にラビング面積比を多数の繊維の場合に拡張し、解析を行った。介在パラメータとして配向寄与領域の累積幅 S を理論的に導出し、ラビング面積比との関係について1対1の対応が得られることを明らかにした。さらに配向寄与領域の累積幅 S と表面配向力との関係について、理論値と実験値双方の点から良好な対応を得たことから、ラビング面積比の有効性を確認し、これを用いることによりこれまで不可能だった押し込み量を含めた統一的なラビング強度の表現

を可能とした。

以上、本研究では配向膜上に生じる溝の形成機構を明らかにするとともに、ラビングと表面配向力の関係を定量的に解析し、両者の関係を統一的に結びつけるラビング面積比を導いた。またこれによって表面配向力を理論的に導出できることを明らかにした。提案した介在パラメータである配向寄与領域の累積幅 S は、用いる際に簡便な予備測定のみを行えばよいため、液晶デバイス製造の際における液晶配向制御といった実用性の面からも非常に有効である。

参考文献

- 1) F. Reinitzer : Wiener Monatschr. Fur Chem., 9 (1888) 421
- 2) O. Lehmann : Z. Phys. Chem., 4 (1889) 462
- 3) G. Friedel : Ann. Phys., 18 (1922) 273
- 4) M. Born : Chem. Zentr., 11 (1916) 366
- 5) K. Lichtennecker : Physik. Z., 24 (1926) 115
- 6) W. Kast : Z. Physik., 76 (1932) 115
- 7) W. Maier and G. Meier : Z Naturforsch., 16A (1961) 470, 262, 1200
- 8) G. H. Heilmer, L. A. Zanoni and L. A. Barton : Proc. IEEE, 56 (1968) 1162
- 9) G. H. Heilmer and L. A. Zanoni : Appl. Phys. Lett., 13 (1968) 91
- 10) J. J. Wysocki, A. Adams and W. Haas : Phys. Rev. Lett., 18 (1971) 127
- 11) M. Schadt and W. Helfrich : Appl. Phys. Lett., 18 (1971) 127
- 12) H. K. Bucher, R. T. Klingbiel and J. P. van Meter : Appl. Phys. Lett., 25 (1974) 186
- 13) M. Hareng and S. Le Berre : Int. Electron Veciece Meeting., (1978) 258
- 14) N. A. Clark and S. T. Lagerwall : Appl. Phys. Lett., 36 (1980) 899
- 15) T. J. Scheffer, J. Nehring, M. Kaufman, H. Amstuty, D. Heilmgartner and P. Edlin : SID'85 Digest (1985) 120
- 16) W. A. Crossland and P. J. Ayliffe : 1981 SID Int. Symp. Digest (1981) 104
- 17) L. C. Lipton and N. J. Koda : 1973 SID Int. Symp. Digest (1973)
- 18) M. N. Ernstoff, A. M. Leupp, M. J. Little and H. T. Peterson : IEDM'73 Digest (1973) 548
- 19) P. G. Le Comber, W. E. Spear and A. Ghaith : Electronics. Lett., 15 (1979) 179
- 20) A. Misumi, K. Sunahara, H. Tanabe and M. Kumada : Int. Electron Device Meeting (1981) 305
- 21) M. Matuura, Y. Takafuji, N. Nonomura, F. Funada and T. wada : 1982 SID Int. Symp. Digest (1982) 34
- 22) D. E. Castleberry : 1978 Bienial Display Res. Conf. (1978) 42
- 23) D. R. Baraff, R. Boynson, B. Gribbon, J. R. Long, B. K. MacLaurin, C. J. Miner, N. M. Serinken, R. W. Streater and W. D. Westwood : 1980 SID Int. Symp. Digest (1980) 200
- 24) N. Szydlo, E. Chartier, J. N. Perbet, N. Proust, J. Magarino and M. Hareng : Japan Display '83 (1983) 416
- 25) J. R. Hansen and R. J. Schneeberger : IEEE Trans, Electron Devices, ED-15 (1968) 896
- 26) J. D. Margerum, J. Nimoy and S. Y. Wrong : Appl. Phys. Lett., 17 (1970) 51
- 27) H. Melchior, FG, J. Kahn, D. B. Fraser : Appl. Phys. Lett., 21 (1972) 392
- 28) S. Morizumi, T. Sonehara, H. Kamakura, T. Ono and S. Aruga : 11986 SID Int. Symp. Digest (1986) 375
- 29) W. Urbach, M. Box and E. Guyon : Phys. Rev. Lett. 25 (1974) 479
- 30) Y. Nishikata, A. Mokikawa, Y. Takiguchi, A. Kanamoto, M. Suzuki, M. Kakimoto and Y. Imai : Nihon Kagaku Kaishi (1987) 2174

- 31) H. Aoyama, Y. Yamazaki, N. Matsuura, H. Mada and S. Kobayashi : *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 72 (1981) 127
- 32) M. Schadt et al.: *Jpn. J. Appl. Phys.*, 31 (1992) 2155
- 33) P. Chaudhari, J. A. Lacey, S-C. A. Lien and J. L. Speidell: *Jpn. J. Appl. Phys.*, 37 (1998) 55
- 34) E. S. Lee, P. Vetter, T. Miyashita, T. Uchida, K. Sugawara, M. Abe and M. Kano: *Jpn. J. Appl. Phys.* 32 (1993) L1436
- 35) 黒田、角田 : 第 26 回応用物理関係連合講演会予稿集 (1979) 114
- 36) J. Cognard : *Mol. Cryst. Liq. Cryst. Suppl. Sec. 1* (1982) 1
- 37) L. M. Blinov, E. I. Kats, A. A. Sonin : *sov. Phys. Usp.*, 30 (1987) 604
- 38) H. Yokoyama : *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 165 (1988) 265
- 39) G. Barbero, I. Dozov, J. E. Palierne and G. Durand : *Phys. Rev. Lett.* 56 (1986) 2056
- 40) S. Featti : *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 179 (1980) 217
- 41) 李応相 : 東北大学大学院電子工学専攻博士学位論文 (1994)
- 42) 菊池裕嗣、J. A. Logan, Do Y. Yoon : 第 20 回液晶討論会予稿集 3G606 (1994)
- 43) 酒井英明 : 東北大学大学院電子工学専攻 修士学位論文 (1989)
- 44) T. Uchida, M. Hirano and H. Sakai : *Liq. Cryst.* 5 (1989) 1127
- 45) 佐藤多俊 : 東北大学大学院電子工学専攻 修士学位論文 (1991)
- 46) Y. Sato, K. Sato and T. Uchida : *Jpn. J. Appl. Phys.* 31 (1992) L579
- 47) 佐藤由美子 : 東北大学大学院電子工学専攻 修士学位論文 (1992)
- 48) I. Nakamura : Private communication
- 49) M. Nobil, C. Lazzari, A. Schirone and S. Faetti: *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 212 (1992)
- 50) 米納均: 東北大学大学院電子工学専攻 修士学位論文 (1996)
- 51) Ping Sheng: "Introduction to the Elastic Continuum Theory of Liquid Crystals"
RCA Review Vol. 35 (1974)

謝辞

本研究は東北大学大学院工学研究科電子工学専攻内田龍男教授の御指導のもとに行われたものであります。本研究を行うにあたり、ラビングによる液晶の配向機構の解明といった大変興味深い研究テーマを与えて頂くとともに、終始懇切なる御指導を賜った内田龍男教授に心から感謝申し上げます。研究面において研究者としてのあり方について説いて下さっただけでなく、人間性の面において深く御教示して頂きましたことは、私のこれからの人生をおくる上で大きな礎となります。

また、多角的な見地から大変有意義かつ示唆に富んだ御指導、御助言を頂きました東北大学電気通信研究所沢田康次教授ならびに川上彰二郎教授、大阪大学大学院工学研究科電子工学専攻吉野勝美教授に深く御礼申し上げます。

東北大学大学院工学研究科電子工学専攻宮下哲哉助教授には研究生活全般にわたりさまざまな便宜をはかって頂くとともに、常に有意義な御指導を頂きました。ここに心から感謝致します。さらに、終始暖かい御激励と並々ならぬ御援助を頂いた川上徹助手、鈴木信技官に御礼申し上げます。

方向性を見失いがちな私に卒業後も常に適切に御指導して頂きました韓官榮博士に心から御礼申し上げます。また、同分野で常に御討論、御助言、御援助を頂きました宣麗博士、川村忠史博士、大島隆裕氏に深く感謝致します。さらに、研究生活を送る上で大きな支えとなってくれた石鍋隆宏氏、鶴川雄成氏、洪永泰氏の友情に厚く御礼申し上げます。

最後に、内田研究室の皆様の多大なる御支援、友情に深く御礼申し上げます。

投稿論文

- (1) “Relation among micro-structure of rubbing fiber, shape of the microgroove of rubbed polymer and its anchoring strength.”

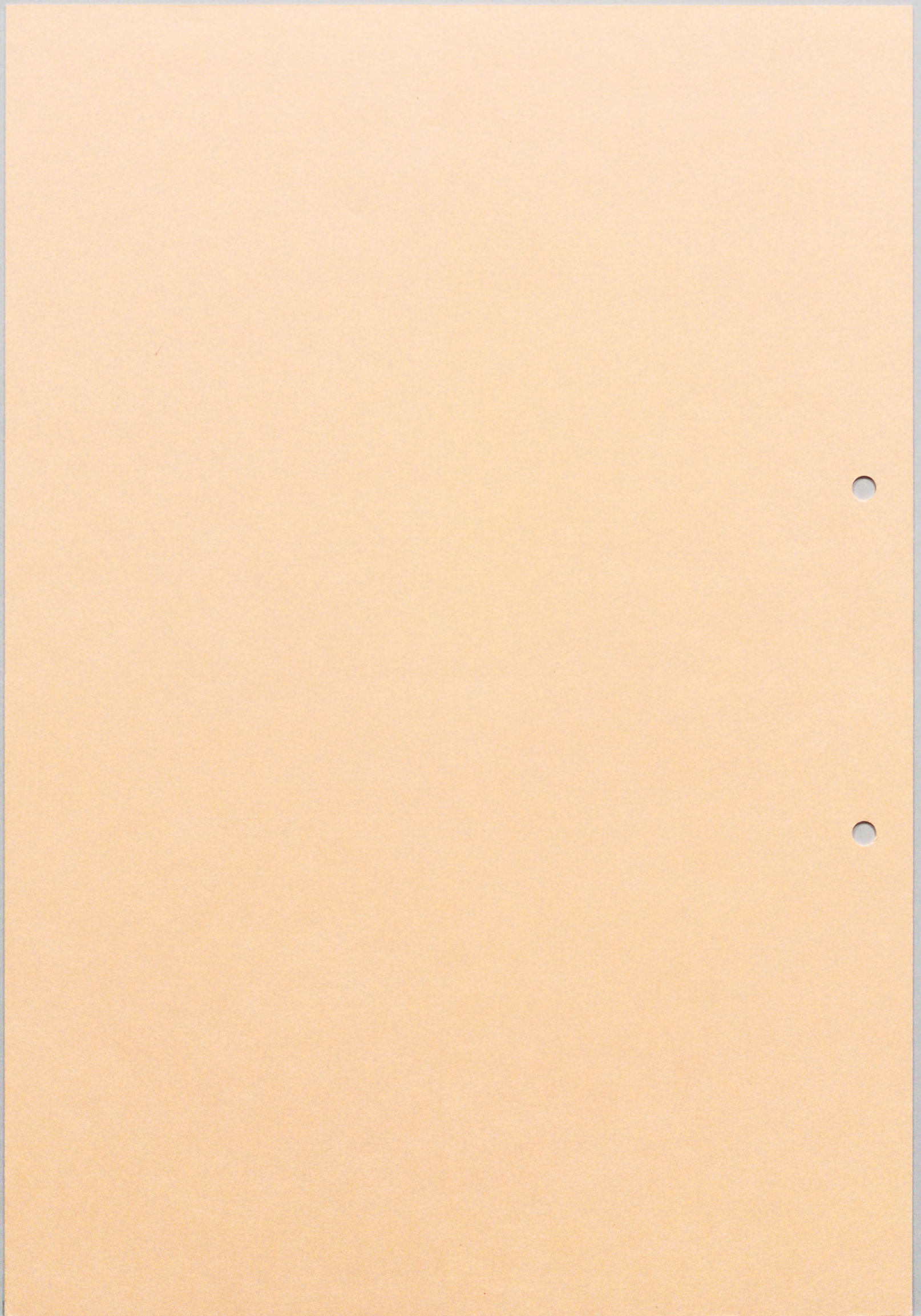
K. Wako, K-Y. Han and T. Uchida

Molecular Crystals and Liquid Crystals, Vol. 304 (1997) 235

学会発表

- 1) 1A06 「ラビングした高分子配向膜におけるマイクログループの形成と表面配向力 —ラビング繊維形状の影響—」
若生 一広, 韓 官榮, 内田 龍男
第 21 回 液晶討論会 宮城県仙台市 メイフェアプラザ仙台 1995 年 9 月
- 2) 2AP08 「ラビング繊維形状に起因する高分子配向膜でのマイクログループの形成と表面配向力」
若生 一広, 韓 官榮, 内田 龍男
第 4 回 ポリマー材料フォーラム 東京都千代田区 アルカディア市ヶ谷
1995 年 11 月
- 3) EID95-137 「ラビングした高分子配向膜におけるマイクログループの形状と表面配向力」
若生 一広, 韓 官榮, 内田 龍男
電子情報通信学会技術研究報告 宮城県仙台市 東北大学 1996 年 2 月
- 4) 27aZP10 「ラビングした高分子配向膜におけるマイクログループの形状と表面配向力」
若生 一広, 韓 官榮, 内田 龍男
第 43 回 応用物理学会連合講演会 埼玉県朝霞市 東洋大学朝霞校舎
1996 年 3 月
- 5) B4P.04 “The relation between the micro-structure of the rubbing fiber and the shape of the microgroove of polymer and its anchoring strength”
K. Wako, K-Y. Han and T. Uchida
16th International Liquid Crystal Conference, Kent State University,
Kent, Ohio, USA, June 1996

- 6) LCp5-2 "Relation among the micro-structure of rubbing fiber, shape of the Microgroove of polymer and its anchoring strength
— Correlation with the ratio of the total area of each microgroove —"
K. Wako, K-Y. Han and T. Uchida
1996 INTERNATIONAL WORKSHOP ON ACTIVE-MATRIX LIQUID-CRYSTAL DISPLAYS in conjunction with IDW'96, International Conference Center Kobe, Kobe, Japan, November 1996
- 7) EID97-22 「高分子配向膜上におけるラビング面積比と表面配向力の関係」
若生 一広、韓 官榮、大島隆裕、内田 龍男
電子情報通信学会技術研究報告 東京都港区 機械振興会館 1997年6月
- 8) LP2 "Evaluation of the Anchoring Strength of Liquid Crystals Based on the Rubbed Area Density"
K. Wako, K-Y. Han, T. Oshima and T. Uchida
1997 INTERNATIONAL DISPLAY RESEARCH CONFERENCE, SHERATON CENTRE TORONTO, Toronto, Canada, September 1997
- 9) LCT2-1 "Alignment Model of the Liquid Crystal on the Rubbed Polymer Surface and Evaluation of its Anchoring Strength"
K. Wako, K-Y. Han, T. Oshima and T. Uchida
THE FOURTH INTERNATIONAL DISPLAY WORKSHOPS, Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan, November 1997
- 10) 1A04 「高分子配向膜上におけるラビングライン密度と表面配向力の関係」
若生 一広、宮下 哲哉、内田 龍男
日本液晶学会討論会 富山県富山市 富山大学工学部 1999年9月
- 11) 5-6 「液晶の分子配向制御におけるラビングライン密度と表面配向力の関係」
若生 一広、宮下 哲哉、内田 龍男
映像情報メディア学会冬季大会 福岡県福岡市 アクロス福岡 1999年12月



Inches 1 2 3 4 5 6 7 8
cm 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19

Kodak Color Control Patches

© Kodak, 2007 TM: Kodak



Kodak Gray Scale



© Kodak, 2007 TM: Kodak

A 1 2 3 4 5 6 **M** 8 9 10 11 12 13 14 15 **B** 17 18 19

