

皮膚におけるコラーゲン線維の配向性 からみた運動動作の研究

島根大学 大崎 茂 芳

Study on Skin Motion from the Orientational Viewpoint of Collagen Fibers

by

Shigeyoshi Osaki
Shimane University

ABSTRACT

The orientational distribution of collagen fibers in the entire calf skin was studied. The fiber orientation changed with changing position. The orientation angle and the degree of orientation determined by the microwave method corresponded to those determined by the conventional mechanical method.

It was found that the collagen fibers were mainly oriented parallel to the backbone and the legbones of the calf and that the skin motions such expansion and shrinkage were induced mainly in the direction perpendicular to the fiber orientation of collagen. The results suggest that the collagen fiber orientation closely relates to the motion of calf skin.

要 旨

マイクロ波測定法を用いて、子牛革におけるコラーゲン線維の配向性を調べた。マイクロ波方式で求めたコラーゲン線維の配向方向は、力学的破

断強度の最大方向に対応していた。また、マイクロ波方式で得られる異方性は、力学方式で得られる値に良く対応していることが確かめられた。コラーゲン線維は、平均として牛の背骨や足の骨の方向に沿って配向していることがわかった。これ

らは、皮膚の伸び縮みに対応して、コラーゲン線維組織が伸び縮みすることに対応しているものと考えられる。このようなことから、コラーゲン線維の配向性は牛の皮膚運動と密接に関係していることが示唆される。また、コラーゲン線維配向に関する情報は被服製作に応用可能であることが示唆される。

まえがき

古くから生体組織における筋肉や腱の位置や向きは解剖学的に調べられてきた。ところが、筋肉や腱との関係で重要な皮膚のコラーゲン線維（慣用的に繊維ではなく、線維が用いられている）の物性に関する研究は、光学的にしわを計測したり電子顕微鏡による皮膚の組織を観察する¹⁾以外はほとんど見られない。皮膚におけるコラーゲン線維の配向性は、体の動きと密接に関係することが予想されているにも関わらず、線維の向きおよび配向度合いに関する研究例や、それらと運動動作との関係を調べた報告例は見られない。この大きな原因の一つに、コラーゲン線維の配向を調べる適切な方法がなかったことが挙げられる。

著者は、すでに、分子や繊維の配向性を調べるために、従来の力学的手法や電子顕微鏡による組織観察とは異なった新しい測定法であるマイクロ波方式を開発してきた²⁻⁵⁾。また、本マイクロ波方式をフィルム^{3, 4)}や不織布⁶⁾へ適用するとともに、従来から電子顕微鏡による組織観察の以外は、取り扱いが非常に困難であった人間の動脈および静脈におけるコラーゲン線維の配向性に適用した例について報告した⁷⁾。

そこで、動物の皮膚におけるコラーゲン線維の分布と運動動作との関係を調べる第一歩として、主としてマイクロ波方式を用いることによって、牛革のコラーゲン線維の配向性を調べることを試み、その分布が運動動作と関係あるかどうかを検討することを目的とした。

1. 実験

本研究で用いた試料は、子牛の皮膚から調製した革 (leather) である (図1参照)。良く知られ

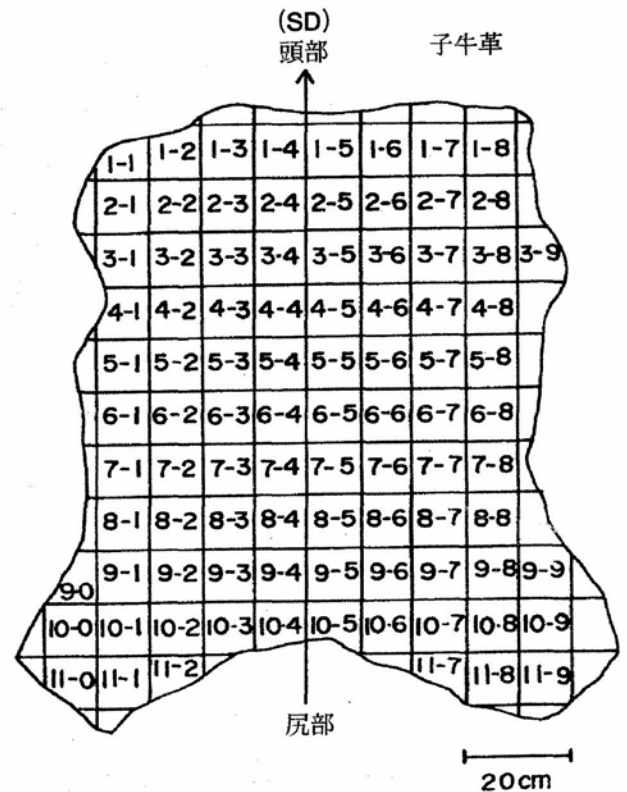


図1 子牛から調製した革

ているように、動物の皮膚は表面から、表皮 (epidermis)、表皮の数倍の厚さである真皮 (corium)、皮下組織 (subcutaneous) の3つに区別されている。子牛から剥がされた皮は、皮下組織、表皮や毛を取り除いて革シート状に調製される。試料は、主としてコラーゲン線維の3次元組織から構成される真皮を用いた。含有水分は16%、脂肪が8%、皮質が60%であった。

マイクロ波による配向性測定法は、10 cm × 10 cm サイズに切断した試料を空洞共振器系に挿入し、試料を6秒間で1回転して、透過マイクロ波強度の角度依存性 (配向パターンとも称す) を測定するシステムである²⁻¹⁰⁾。測定周波数は4 GHzである。配向パターンの測定には約30秒を

要した。透過マイクロ波強度の回転角度依存性において、透過強度が最小の方向を配向角 ANGLE と称する。

力学測定には、5 mm×50 mmの革試料を用い、10 mm/minの引っ張り速度で応力-歪曲線を得た。この応力-歪曲線から、破断強度を測定した。

1. 1 マイクロ波による配向性測定

1. 1. 1 電界

導波管の中央部を切断し、開口部を設けた1対の導波管で空洞共振器系を作る。導波管内での電界強度 E_y は、

$$E_y = E_0 \sin(\pi x/a) \sin(\pi z/c) \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 E_0 は電界強度の最大値、 a および c は導波管の x および z 方向における内面間の距離である。ここで、WRJ-4の導波管($a = 58.1$ mm, $c = 58.1$ mm)を用いた時の共振器内での電界の分布を図2に示す。ちょうど、開

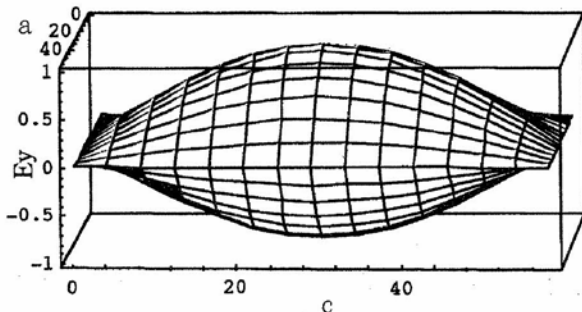


図2 導波管(WRJ-4)内における電波 E_y の分布 $a = 58.1$ mm, $c = 58.1$ mm

口部が電界の腹の部分に相当するように設計し、試料における双極子と電界との相互作用が最大になる開口部に試料を挿入する。

1. 1. 2 透過マイクロ波強度の角度依存性

異方性のある試料を回転すると、照射マイクロ波と分子との相互作用が配向角度によって異なることになる。したがって、透過マイクロ波強度の角度依存性から配向性に関する情報が得られることになる。試料挿入前後の共振曲線は、(2)

式の透過マイクロ波強度 I によって表わされる³⁾。

$$I(\theta) = I_{i_0}(\theta) / \{1 + Q_i^2(\theta) [f_{i_0}(\theta) / f - f / f_{i_0}(\theta)]^2\} \quad (2)$$

ここで、 θ は回転角度である。 I 、 I_{i_0} と Q_i ($i = 1, 2$)は、それぞれ、任意の周波数 f での透過マイクロ波強度、共振周波数 f_{i_0} での透過強度、 Q 値である。ここでの1および2は試料の挿入前後の状態を示す。

図3に、二軸延伸ポリエチレンテレフタレート(PET) フィルムの4GHzにおける透過マイクロ波強度の角度依存性を示す。ANGLE は分子の配

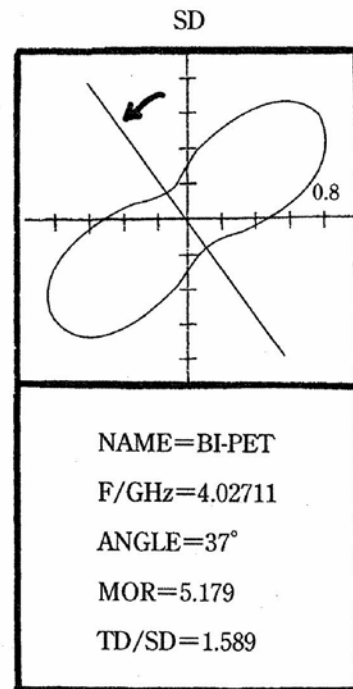


図3 二軸延伸ポリエチレンテレフタレートフィルムにおける4GHzでの透過マイクロ波強度の角度依存性

向角(37°)を、MORは透過マイクロ波強度の最大値と最小値の比(5.179)で異方性の度合いを反映し、TD/SDは標準方向SDの透過強度に対する垂直方向TDでの透過強度の比(1.589)を表わす。参考までに、無配向、一軸延伸、二軸延伸PETの配向パターンと分子あるいは繊維の並び状態の模式図を図4に示す。たとえば、分子鎖あ

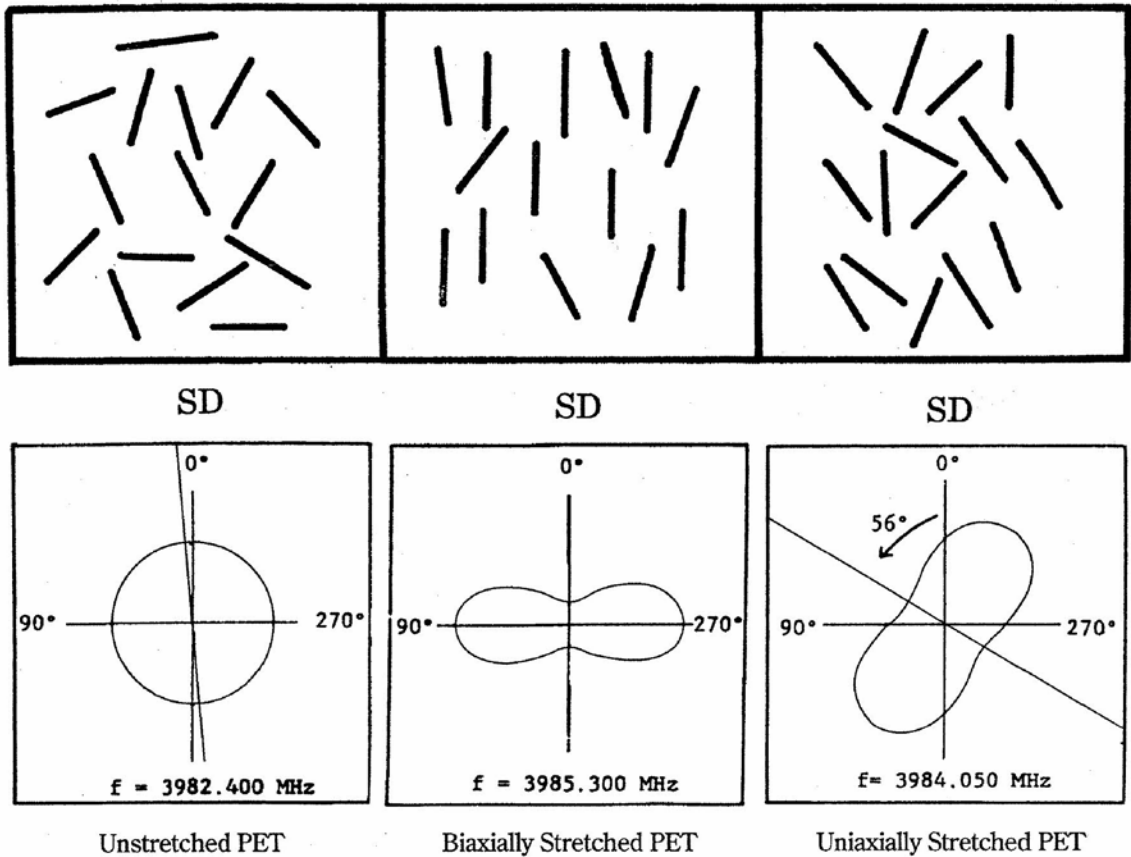


図4 無配向 (unstretched), 一軸延伸 (uniaxially stretched), 二軸延伸 (biaxially stretched), ポリエチレンテレフタレートフィルムにおける透過マイクロ波強度の角度依存性と線維の配向の模式図

るいは繊維が平均として特定の方向に並んでいると、マイクロ波と双極子との相互作用が配向方向によって異なり、まゆ状の配向パターンが得られる。通常、分子の配向方向では、透過マイクロ波強度が最小となる。分子鎖あるいは繊維が無配向に配列しておれば、配向パターンは円になる。

1. 1. 3 複素誘電率

周波数シフトが共振周波数と比べて非常に小さくするために、空洞共振器と比べて体積が小さい試料を挿入すると、摂動理論が適用できる。そのとき、試料の誘電損失は非常に小さくならない^{4, 5)}。

シート状の試料が、導波管開口部より大きいときには、誘電率 ϵ' および誘電損失率 ϵ'' は以下の式で与えられる。

$$\epsilon' = 1 + A(c/t) \{ (f_{10}-f_{20})/f_{20} \} \quad (3)$$

$$\epsilon'' = (Bc/2t) \{ (1/Q_{20}) - (1/Q_{10}) \} \quad (4)$$

または、

$$\epsilon'' = (Bc/2t)(1/Q_{10})(\sqrt{I_{10}/I_{20}} - 1) \quad (5)$$

ここで、 c は矩形導波管の深さで、 A と B は装置に関する定数である。誘電率は、共振周波数のシフトから求められるのに対して、誘電損失率は共振線の鋭さを反映している Q 値から求められる。

ここで、マイクロ波方式のブロックダイアグラムを図5に示す。

2. 結果

図6は、子牛革の特定の部位における透過マイクロ波強度の角度依存性である。無配向のポリエステルなどのフィルムでは透過マイクロ波強度の角度依存性が見られないが、一軸延伸フィルムや二軸延伸フィルムでは角度依存性が存在すること

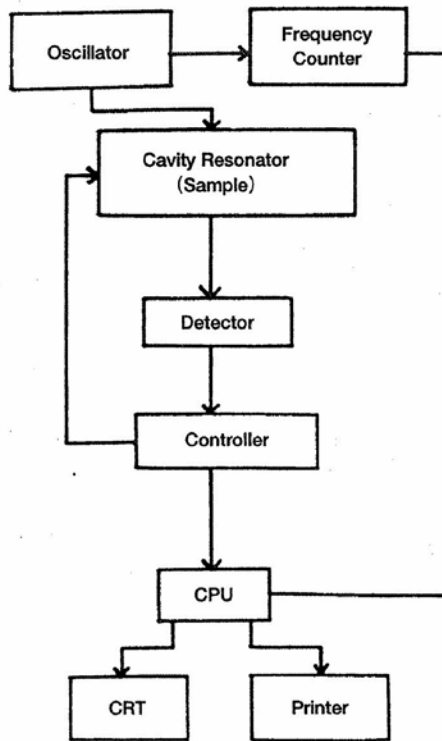


図5 マイクロ波方式の測定系におけるブロックダイアグラム。発振器 (Oscillator) からの電波は空胴共振器系 (Cavity Resonator System) 中にある試料 (Sample) に照射され、透過マイクロ波を検波器 (Detector) で検出するシステム。回転等は、Controllerで自動制御し、CPUで演算した結果をCRTに表示するとともにPrinterにて印刷する

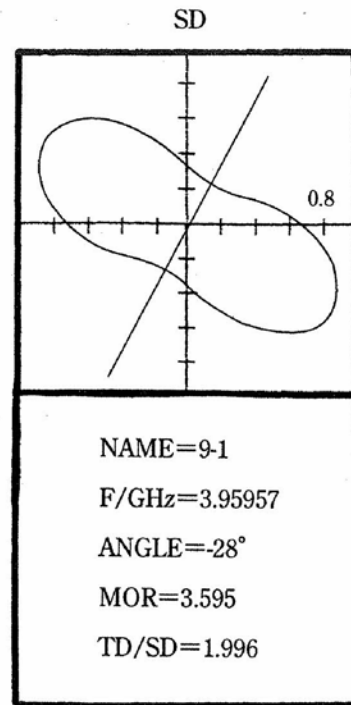


図6 子牛革における透過マイクロ波強度の角度依存性

がわかっている。したがって、この子牛革における角度依存性では、MORが3.595であり、試料に著しい異方性が存在することを示唆している。TD/SD比は1.996で通常のTDおよびSDの2方向における異方性は比較的小さい。また、透過マイクロ波強度の最小方向の角度 (ANGLE) は 35° であった。

一方、マイクロ波測定を行った後の $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ の子牛革シートから切り出した試料で力学測定を行った結果を図7に示す。力学破断強度の最大方向の角度は、標準方向から 32° 傾いていることがわかった。マイクロ波法と力学法で得た角度はかなり似た値である。このことから、破断強度の最大方向が透過マイクロ波強度の最小方向に対応していることがわかる。一方、電子顕微鏡

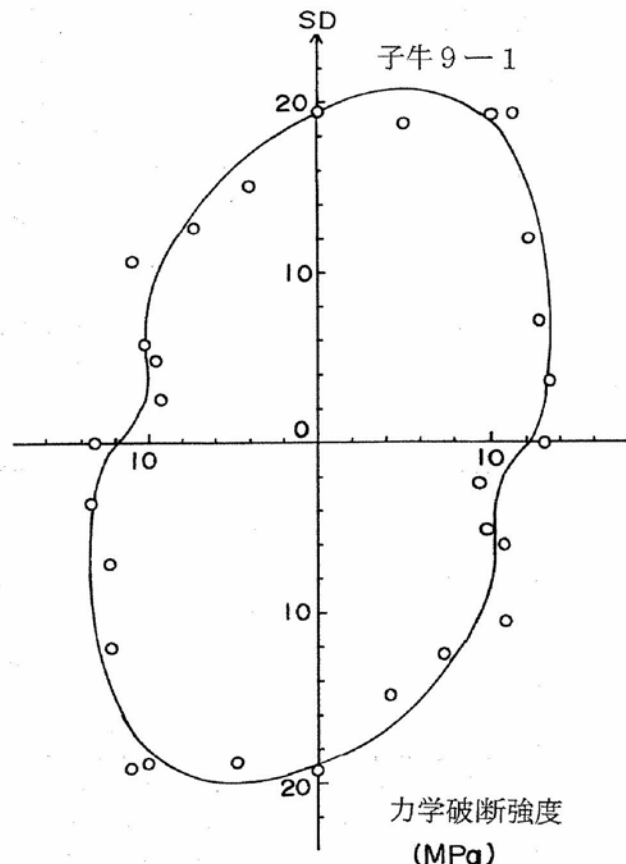


図7 子牛革における破断強度の角度依存性

観察から、コラーゲン線維は平均的に破断強度の最大方向に配向していることが確かめられた。

以上の結果から、革を構成するコラーゲン線維は、平均として透過マイクロ波強度の最小方向に配向していることが判明した。

図8に子牛革の前足部から腹部、さらに後足部にかけての領域における配向パターンを示す。部位の変化による配向パターンの変化は著しい。すなわち、腹部において、コラーゲン線維の配向方向は、平均として背骨に平行である、前足と後足近くの部分では足骨に平行であることがわかる。特に、8-8の部位の異方性は著しい。また、背骨から足の先に向かって異方性が上昇していることが読み取れる。このように、コラーゲンの線維の配向方向は、どの部分でも骨の方向に平行であることがわかった。

もし、食後の反芻によって、腹が増減する際には、線維の配向方向と直角な方向に伸び縮みしやすいことが予想される。たとえば、足の骨の方向には、通常筋肉の伸び縮みがないことから、この方向に線維が配列していることと良く対応している。このようなことより、年齢によって運動機能が衰えると、人間の動脈の場合⁷⁾と同じように、コラーゲン線維の配列が異なってくるものと思われる。

3. 応用

繊維の伸びや強度が配向状態によって異なることから、コラーゲン線維の配向分布を調べることにより、被服制作に適した裁断を行うことが可能になった。すなわち、従来の引っ張り測定法は破壊方式であるため、一度測定を終わった試料は再び使用はできなかった。また、力学測定から配向分布を得るには、多くの角度で切断した試料を調製しなければならず、測定には極めて長い時間を要するので、現実的ではない。ところが、本方式では、コラーゲン線維の配向が非破壊で、しかも短時間で知ることができるのである。そのため、皮革の配向分布を調べておくと、被服材料としてどの箇所がふさわしいのかを知ることが可能である。このようにして、実用的かつ適切な材料配置を考慮した被服製作へのアプローチが可能になると考えている。

4. まとめ

今回、子牛革におけるコラーゲン線維の分布と運動との関係の手がかりの第1歩を得たが、今後は、年齢別の試料や線維の配向分布と実際の運動状態との関係を詳細に検討すべきものと考えている。

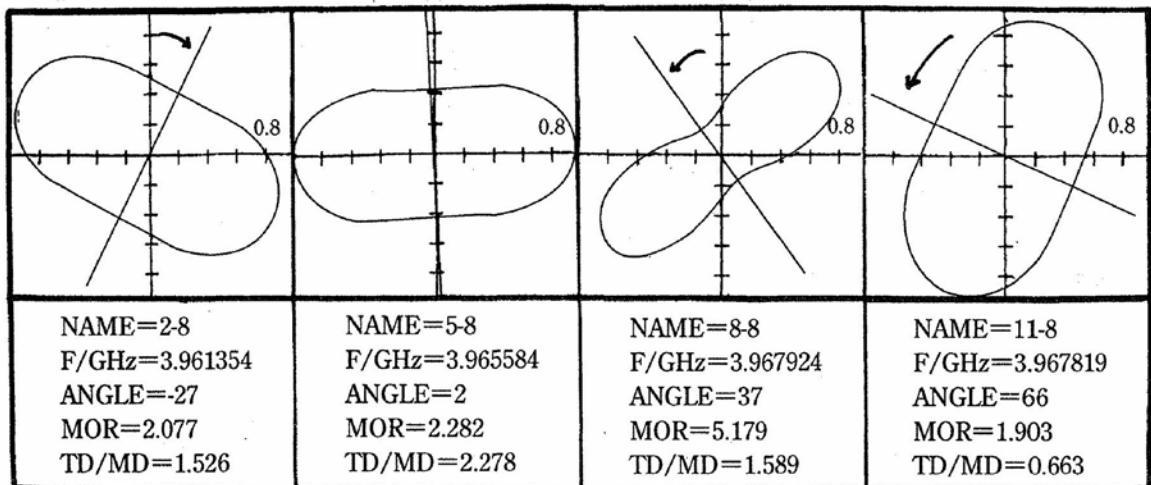


図8 子牛革における前足部と後足部の間における透過マイクロ波強度の角度依存性

また、被服製作においては、今回は新しいマイクロ波方式での提言の段階であるが、今後、具体的な力学強度や伸びとの比較を通じて明らかにすべきものと考えている。

文 献

- 1) Green, M., Isaac, D. H., Jenkins G. M. ; Collagen fiber orientation in bovine secondary osteons by collagenase etching, *Biomaterials*, **8**, 427 (1987)
- 2) Osaki, S. ; Microwaves quickly determine the fiber orientation of paper, *Tappi*, **70**, 105 (1987)
- 3) Osaki, S. ; A new method for quick determination of molecular orientation in poly (ethylene terephthalate) at microwave frequencies, *Polym. J.*, **19**, 821 (1987)
- 4) Osaki, S. ; Dielectric anisotropy of stretched poly (ethylene terephthalate) at microwave frequencies, *J. Appl. Phys.*, **67**, 6513 (1990)
- 5) Osaki, S. ; Explanation of orientation pattern determined for sheet materials by means of microwaves, *J. Appl. Phys.*, **67**, 6513 (1990)
- 6) Osaki, S. ; Dielectric anisotropy of nonwoven fabrics by using the microwave method, *Tappi*, **72**, 171 (1989)
- 7) Yamamoto, K., Osaki, S., Yamashita, S., Yamada, M-o. ; Age-related anisotropic change in the fiber orientation of the human blood vessel, *Cell. & Mol. Biol.*, **34**, 571 (1988)
- 8) Osaki, S. ; Quick determination of dielectric anisotropy of paper sheets by means of microwaves, *J. Appl. Polym. Sci.*, **37**, 527 (1989)
- 9) Osaki, S., Uranishi, K. ; Determination of refractive index and birefringence for biaxially stretched poly (ethylene terephthalate) at microwave frequencies, *Polymer*, **31**, 33 (1990)
- 10) Osaki, S. ; Density dependence of complex dielectric constant of paper sheets at microwave frequencies, *Sen-i Gakkaishi*, **46**, 26 (1990)
- 11) Osaki, S. ; Frequency dependence of complex dielectric constant for poly (vinylidene fluoride) films at microwave frequencies, *J. Polym. Sci., C*, **28**, 147 (1990)
- 12) Osaki, S. ; Orientation test, *Nature*, **347**, 132 (1990)
- 13) Osaki, S., Yamada M-o., Takakusu, A., Murakami, K. ; A new approach to collagen fiber orientation in cow leather by the microwave method, *Cell. & Mol. Biol.*, **39**, 673 (1993)
- 14) Osaki, S. ; Dielectric anisotropy of strip polymer films at microwave frequencies, *Polym. J.*, **25**, 1311 (1993)
- 15) Osaki, S. ; High temperature dielectric loss of poly (ethylene terephthalate) films at microwave frequencies, *Polymer*, **35**, 47 (1994)
- 16) Osaki, S. ; Microwave frequency dielectric properties of poly (vinylidene fluoride) films, *J. Polym. Sci., Polymer Physics*, **33**, 685 (1995)
- 17) Osaki, S. ; Refractive index of uniaxially stretched poly (ethylene terephthalate) film at microwave frequencies, *Polym. J.*, **28**, 131 (1996)
- 18) Osaki, S. ; High temperature dielectric anisotropy of poly (vinylidene fluoride) films at microwave frequencies, *Polym. J.*, **28**, 323 (1996)