

高分子ゲルの光学素子への応用

笠原 優*・鬼沢 進*・赤羽 秀郎*・安久 正紘*・大井 健司**・長田 義仁**

*茨城大学工学部メディア通信工学科 〒316 日立市中成沢町 4-12-1
**北海道大学理学部生物科学科 〒060 札幌市北区北 10 条西 8 丁目

Application for Optical Device Using Macromolecules Gel

Masaru KASAHARA,* Susumu ONIZAWA,* Hideo AKABANE,* Masahiro AGU,*
Kenji OOI** and Yoshihito OSADA**

*Department of Media and Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering,
Ibaraki University, 4-12-1, Nakanarusawa, Hitachi 316

**Department of Biological Science, Faculty of Science, Hokkaido University, Nishi
8 cho-me, Kita 10 jo, Sapporo 060

In the present paper, we report on trial manufacture and characteristics of several optical devises using an electrokinetic molecular-assembly-reaction of 2-acrylamido 2-methylpropane sulfonic acid gel (PAMPS gel). When direct voltage is applied to the PAMPS gel, it bends like a half shell by the molecular-assembly-reaction. The PAMPS gel changes its radius of the curvature in a time unit of second and focal length of the gel lens can be controlled by the applied voltage. In this research, active beam splitter which is able to change the angle between reflected and transmitted light, deformable mirror which is able to condense the laser beam and active lens which is able to change the focal length are made and several characteristics of them are measured.

1. はじめに

工業製品の多くは硬くて乾いた材料からできているが、これに対し生物の体の大部分は柔らかくて湿った物質、ゲルからできている。ゲルはこの柔らかさと湿り気のため取り扱いが難しいものとなっているが、反面、他の素材にはない多くの可能性も秘めている。ゲルは温度、pH、電気、イオン濃度の変化などによって、体積が膨張したり収縮したりする。しかも、ある特定の条件下ではわずかな環境変化でも大きな体積変化をおこす^{1,2)}。こうした性質を利用して外界の変化に反応する「インテリジェント・ゲル」を開発しようと様々な研究が行われてきており、今後、工学や医学等の分野においてゲルは重要な地位を占めるようになるだろうと予想される。現在では医学の分野においてはゲルを用いたドラッグデリバリーシステムや人工筋肉などの研究が精力的に行われている^{3,4)}。また、光学の分野においては素材

が透明であるという性質を生かして可変焦点距離レンズなどへの応用が試みられているが、現在のところ応答性のよいものは得られていない⁵⁾。可変焦点距離レンズは光学的に大変興味深い素子であり液晶を用いたものも提案されているが、焦点距離の短いものを作るためにはレンズ本体として従来のガラスやアクリル等を素材とするものが必要なこと、また焦点距離の変化率が小さいなどの問題点がある⁶⁾。そこで筆者らはゲル-ミセル間相互作用を利用し、分子集合反応を制御することによって高速かつ光学パラメーターの変化率が大きな素子の作成を試みた。本論文では高分子ゲル (2-acrylamido-2-methylpropane sulfonic acid gel, PAMPS gel) に外部電圧を印加することで生じる屈曲現象（電気刺激応答性）を利用した焦点距離および反射角可変な光学素子に関する実験の結果について報告する。

2. 分子集合反応による屈曲現象

Fig. 1 のように板状のゲルをミセル溶液中（界面活性

剤：ラウリルピリジニウムクロリド($C_{12}\text{PyCl}$)：0.01 M + 硫酸ナトリウム(Na_2SO_4)：0.03 M)に浸し、直流電圧を印加する。ゲルの陽極側の面では、プラスに帶電した界面活性剤分子がマイナスの電荷をもつ高分子ゲルに吸着し、ゲル中の水がはじき出される。この現象により収縮が起り、ゲルは山なりに屈曲する。電場を反転すると界面活性剤分子は溶液中に離散し、ゲルは元の形状に戻る。さらに、そのまま電圧を印加し続けるとゲルは反対方向へと曲がる⁷⁻⁹⁾。以上のようにPAMPSゲルは電圧を印加することによって形状を制御することが可能であり、この現象を用いた様々な光学素子への応用が考えられる。高分子ゲルを用いて光学素子を試作するにあたり、まずゲルに電圧を印加したときの屈曲特性について調べてみた。Fig. 2のように板状のゲルを固定し、両側から電圧を印加すると分子集合反応によりゲルは陽極側へ屈曲する。このときのゲルの変位の様子をゲルの厚さを変化させた場合および高さを変化させた場合について調べてみた。Fig. 3 a に架橋剤(MBAA)濃度0.02 M、Fig. 3 b に0.04 Mで重合したゲルを用いた場合の屈曲速度の厚さ依存性を示す。これらの図より試料のゲルを厚くしていくと、屈曲の速度が小さくなることがわかる。これは厚さが増すにつれゲルを曲げるのに必要なエネルギーが大きくなるからであると考えられる。また、Fig. 3 a と Fig. 3 b を見比べると架橋剤濃度の小さいほう

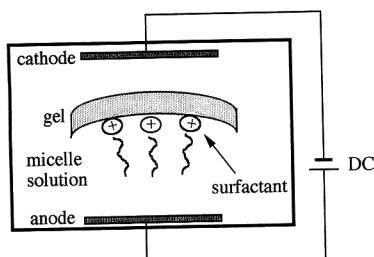


Fig. 1. Schematic diagram of the electrokinetic molecular assembly reaction.

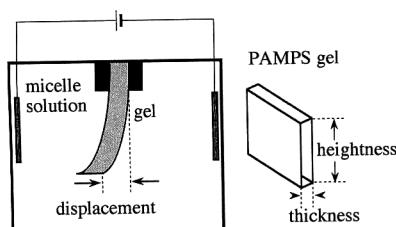


Fig. 2. Measurement system of the bending characteristics.

うが屈曲速度が大きく、素早い動きを実現できることもわかる。ただし、架橋剤濃度を薄くすることはゲルの強度を弱くすることになる。次に試料の高さを変化させた場合の結果をFig. 4に示す。この図より試料の高さを高くしたほうが屈曲速度が大きくなる傾向があることがわかるが、ゲルの自重による影響や変形時における溶液からの抵抗も考慮する必要がある。以上よりゲルを光学素子として利用する場合には、ゲルの強度と屈曲速度

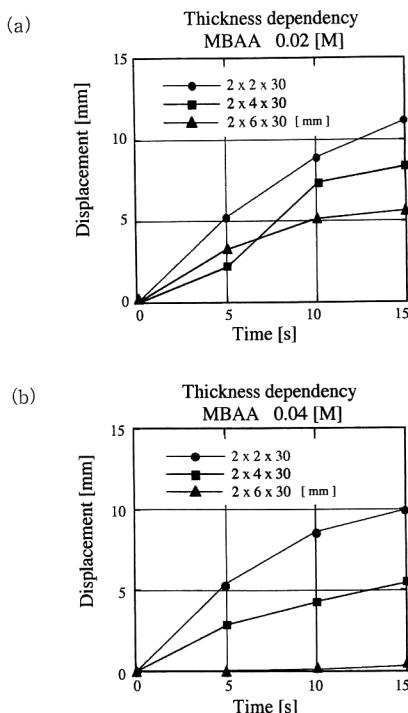


Fig. 3. Bending characteristics depend on thickness of the sample. (a) MBAA 0.020 M, (b) MBAA 0.040 M.

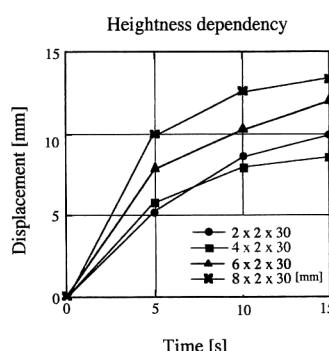


Fig. 4. Bending characteristics depend on highness of the sample.

の関係を考慮して用いる必要があることがわかった。以下の節ではこれらの性質を踏まえ、PAMPS ゲルを用いて試作した様々な光学素子の諸特性について報告する。

2.1 アクティブ・ビームスプリッター

ビームスプリッターはホログラフィーシステム等で用いられるきわめて基本的な光学素子である。

しかし、従来のビームスプリッターは反射光の方向が入射光の角度によって一意的に決定されてしまい、これを時間的に変化させるためにはステージおよびその駆動システムが必要となる。もし、ビームスプリッター自体でその反射光の方向を制御することが可能になれば光学系の適応度を大幅に改善することができる。そこで、本研究ではまず PAMPS ゲルを用いて反射光と透過光とのなす角度を外部電圧によってコントロールできるビームスプリッター（アクティブ・ビームスプリッター：以下 ABS）の作成を試みた。

2.1.1 実験方法

Fig. 5 に ABS 模式図を示す。ミセル溶液中に浸されたゲル ($30 \times 20 \times 3$ mm, MBAA=0.026 M) の試料に、板状の白金電極 ($20 \times 20 \times 0.2$ mm) を介して 0 秒から 30 秒までは 7 V, 30 秒から 90 秒までは -7 V, 90 秒以後は再び 7 V の直流電圧を印加する。すると高分子ゲルは、前述の分子集合反応により陽極側へ屈曲する。ここで He-Ne レーザー光をゲルの固定した端部から入射すると光の一部が試料の側面に当り、屈曲の方向に反射される。この反射の方向および角度は印加電圧によって制御することができる。以上の様子をビデオカメラで撮影し、パーソナルコンピューター（以下 PC）に取り込んで画像処理を行い反射角の解析を行った。

画像処理の方法としては、まず原画像に任意の閾値を設定することでデータを 2 値化し、次にレーザー光の輪

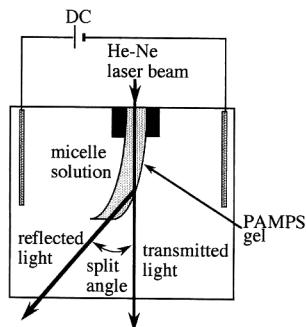


Fig. 5. Schematic diagram of the active beam splitter and its drive system.

郭抽出を行った。これにより透過光と反射光のなす角が印加電圧によってどのように変化するか調べることができる。

2.1.2 実験結果

Fig. 6 に ABS のシステムの電流-電圧特性、Fig. 7 に印加電圧の時間変化と 30 秒ごとのレーザー光が分岐される様子を示す。Fig. 6 によると 3.3 V 以上では傾きが約 5 mA/V とほぼ一定であり、この実験で用いた印加電圧 7 V の場合の消費電力は約 140 mW であることがわかる。高分子ゲルに電圧を印加すると、 $t=0$ s では、ゲルの固定部から入射したレーザー光はそのまま透過するが、 $t=30$ s では、写真の中央部付近で右斜め下に反射するレーザー光と、そのまま透過していくレーザー光が確認できる。次に外部電圧の極性を変えると、 $t=$

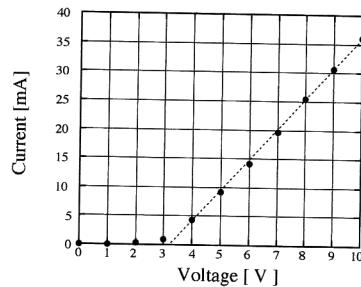


Fig. 6. Current-voltage characteristics of the ABS system.

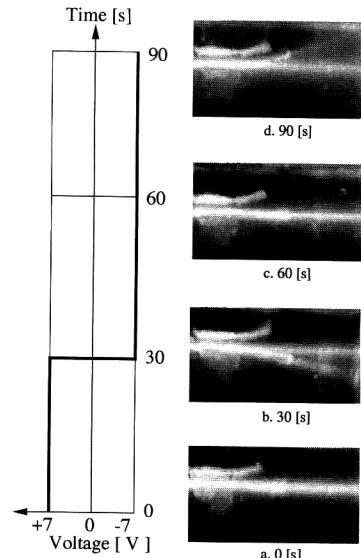


Fig. 7. Change of the applied voltage and the pictures of split laser beam.

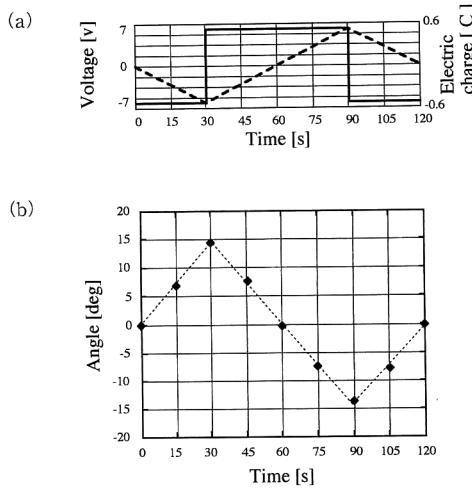


Fig. 8. (a) Relation of the applied voltage versus adsorbed electric charge. The solid line means applied voltage and the dotted line means adsorbed electric charge, (b) Variation of the split angle between reflected and transmitted light.

60 s で $t=0$ s のときと同じ直進光のみの状態に戻る。さらにそのまま電圧を印加し続けると $t=90$ s には $t=30$ s と反対方向にスプリットさせることができる。これらの写真に共通して左上にみられる光の筋はゲルを支持している部分の影響であり本質的ではない。Fig. 8 a に印加電圧とゲルに付着する電荷の量を、また Fig. 8 b には反射光と透過光とのなす角度の時間変化を示す。これらの図から反射光と透過光とのなす角度は付着電荷量にほぼ比例することがわかった。

2.2 可変形ミラー

次に、反射型の素子として可変形ミラーの試作を行った。可変形ミラーは天文学における補償光学等に利用されているものであり、多くの場合その駆動部には圧電素子が使われている。圧電素子の屈曲がマイクロメーターのオーダーであるのに対して、ここで試作した高分子ゲルによる可変形ミラーは数 mm から数十 mm のオーダーで大きく変形することができるという点に特徴がある。

2.2.1 実験方法

Fig. 9 に可変形ミラーを用いた集光実験の模式図を示す。高分子ゲルの屈曲方法は 2.1.1 節で示したものと同様であるがこの場合にはゲルが空気中に露出している部分が存在する点が異なる。溶液中のゲルは屈曲のための駆動部として働き、露出部分は集光のための光学部として機能する。レーザー光はスペイシャルフィルターを介すことによって、波面を整えるのと同時にビームの径を

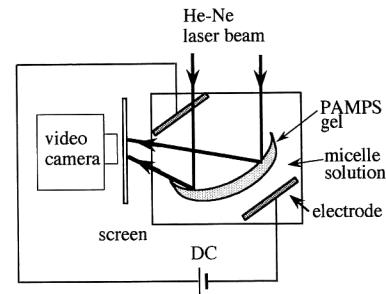


Fig. 9. Schematic diagram of the deformable mirror and its drive system.

広げてある。ゲルの表面をそのまま反射面に用いるには平坦度と反射率の点で問題があるので、ここではゲルの表面に金属膜を張りこれを反射面として用いた。外部直流電圧 (20 V) を印加することによってゲルは屈曲し、ビームを集光することができる。この実験では、ゲルの光学部が空気中で自重によって曲がってしまわないよう、MBAA 濃度 = 0.04 M で重合した硬めのゲル (40 × 15 × 2 mm) を用いた。またこのゲルはその硬さのため屈曲速度が遅いので ABS の実験のときよりも高い 20 V の電圧を印加した。

2.2.2 実験結果

Fig. 10 に可変形ミラーを用いた集光実験の結果を示す。この実験においてはビーム径が 30 mm のレーザー光を入射している。 $t=0$ s においてはゲルの曲率がゼロであることから、集光されずにそのままの径で反射する。その後直流電圧 20 V を 18 秒まで印加すると $t=18$ s では屈曲現象によってゲルの曲率が増加し、レーザー光が集光されビームスポット径は小さくなる。また、印加電圧の極性を反転させることによって、再び曲率をゼロに戻すことができる。以上の結果からこの可変形ミラーを用いると印加電圧により集光の度合いを制御できることがわかった。

2.3 可変焦点距離レンズ（円筒面レンズ）

光学系においては素子や装置に微妙な調整が必要となる場合が多い。従来は専ら機械的な方法を用いてこれらの制御が行われていた。そこで本研究では印加電圧により焦点距離を変えることができる可変焦点距離レンズを提案する。これは、前項と同様にゲルの曲率を変化させることによって焦点距離を制御する光学素子である。また、高分子ゲルの全体的な膨潤・収縮を用いれば凸レンズとしての機能をもたせることもできるが、その行程には數十分程度の時間を要し、現在のところ短時間で

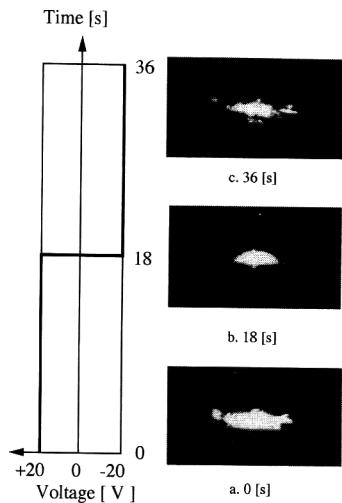


Fig. 10. Change of the applied voltage and the pictures of focused laser beam.

の膨潤・収縮の方法は見つかっていない⁵⁾。本研究で提案するものは分子集合反応を用いることにより秒単位での応答を実現できる点に特徴がある。以下にその例を示す。

2.3.1 実験方法

レンズの形状には両凸、平凸、凸凹、両凹、平凹型等があるが、本研究では平凸型の可変焦点距離レンズを試作した。原理的にはこれ以外の形状のものも作成可能であるが、ここでは構造上もっとも試作の容易な平凸型のレンズを用いて実験を行った。

Fig. 11 に可変焦点距離レンズを用いた集光実験の模式図を示す。まず、ゲルの下側の面をミセル溶液中に、上側の面を空気中に露出するように固定し、この露出部の表面には透明電極を設置する。本研究で用いたPAMPS ゲルは 90%以上が水であるため屈折率は水とほぼ同じである。また、試料のゲルが薄い板状のため、溶液中、またはゲル単体でレンズ効果をもたらせることは技術的に困難である。これは分子集合反応による高分子ゲルの形状変化が単なる屈曲であるため、試料両面の曲率が同様に変化してしまい、レンズとしての機能をもたらせることができないからである。そこで、本研究ではゲルを凸面にミセル溶液を平面に用いることでレンズ効果をもたらせた。ここで容器の形状を変えれば様々な形のレンズをつくることも可能である。この状態で初めの 30 秒間は +7 V、次の 30 秒間は -7 V の直流電圧を印加する。すると分子集合現象によりゲルが屈曲し、溶液を含めた系全体が凸レンズ状になるため集光が可能となる。

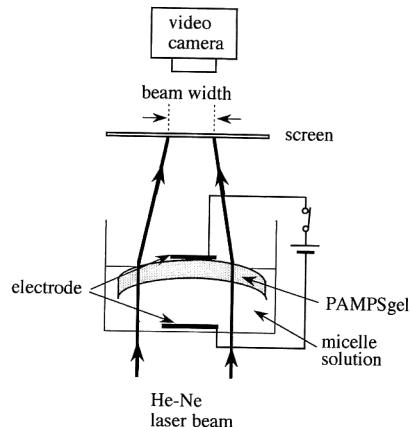


Fig. 11. Schematic diagram of the active lens and its drive system.

また印加電圧の極性を反転すれば、界面活性剤分子はゲルの下側の面から離れるので元の平坦な形状に戻すことができる。

2.3.2 実験結果

Fig. 12 および Fig. 13 に可変焦点距離レンズの集光実験の結果を示す。Fig. 12 はビデオカメラを用いてスクリーンに写ったビームスポット径の変化を撮影したもので、 $t = 0$ s から $t = 60$ sまでの間を 10 秒ごとに示してある。電圧を印加すると分子集合反応によってレンズの曲率が変化する。これによって $t = 0$ s から $t = 30$ sの間ではレーザー光が収束してゆき、印加電圧の極性を反転した $t = 30$ s から $t = 60$ sの間ではビーム径が元の状態に広がっていくのがわかる。ここでビームスポットの中に光の弱い部分がみられるが、これは透明電極の表面における反射が影響しているものと考えられる。

以上の様子をビデオカメラで撮影し PC に取り込んで 2 値化した後、輪郭抽出を行い、ビームスポットの大きさの時間変化について調べてみた。

Fig. 13 a は架橋剤濃度が 0.020 M の柔らかいゲル ($40 \times 20 \times 4$ mm) を用いたときの結果であり、一方 Fig. 13 b は架橋剤濃度が 0.026 M の比較的硬いゲル ($40 \times 20 \times 4$ mm) を用いた場合の結果である。いずれのゲルを用いた場合でも電圧印加時間に比例した応答特性が観測され、レーザー光を集光することができた。また、この 2 つの図を比較すると柔らかいゲルを使用した場合、反応速度が約 2 倍程度速くなっていることがわかった。

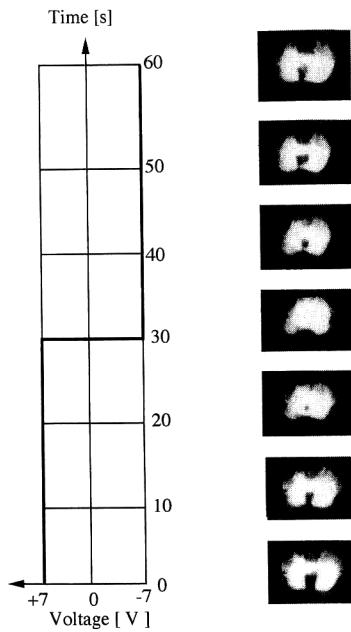


Fig. 12. Change of the applied voltage and the pictures of focused laser beam.

3. 実用化へ向けての問題点

以上に示したとおり ABS, 可変形ミラー, 可変焦点距離レンズを試作し, 高分子ゲルが光学素子の原材料として有望であることが確認できた。しかし, これらの精度を向上させるためには, まだ多くの改善すべき点がある。

まず, ゲルを用いた可変光学系ではその応答速度が問題となる。一般に応答速度を速くするためには柔らかいゲルを用いればよい。しかし柔らかいゲルには壊れやすく加工しにくいという短所もあり, 応答性と加工性の両面を兼ね備えた新しいゲルの開発が必要となる。

また, 構造上の問題点としては電極がゲルに接触している部分ではイオンの移動や対イオンの交換に基づく歪みが生じることが挙げられる。

この問題を解決するためには, 電気伝導性をもち, 屈折率や比重が異なる 2 種類のミセル溶液を見いだす必要がある。このような溶液が見つかればゲルの保湿性の面からも大変有益である。

この他の重要な問題としては, レンズ表面での反射や表面の凹凸に基づく散乱等が挙げられる。

これにはゲルの歪み, 泡, インクルージョン, 均質性といった材質に関する問題と, 砂目, 傷, 光沢等加工に関する問題が関係している。特に加工に関しては従来の固体材料に対する技術のみでなく, 高分子ゲルのよう

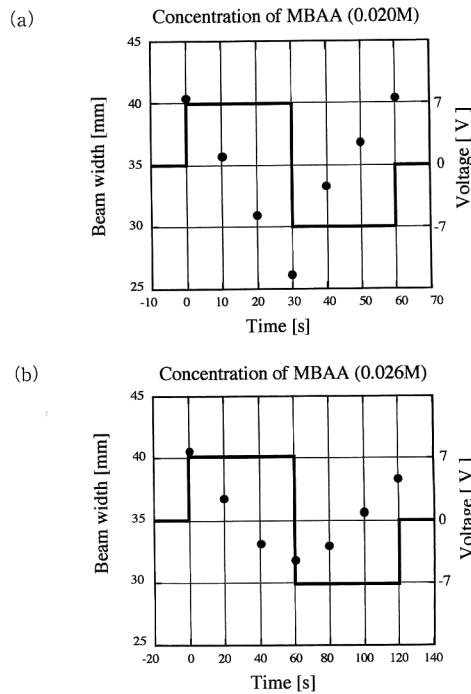


Fig. 13. Relation of the applied voltage versus beam width (a) MBAA (0.020 M), (b) MBAA (0.026 M). The solid line means applied voltage and the black circle means beam width.

な, 柔軟で湿った材料に対する精密加工技術の研究が切望される。

4. ま と め

光学素子の素材に高分子ゲルを用い, ゲルのもつ電気刺激応答性(分子集合反応)を利用してアクティブピームスプリッター, アクティブミラー, アクティブレンズ等の試作を行った。これらの光学素子は外部印加電圧を変化させることによりスプリット角や焦点距離等のパラメーターを変化させることができるものである。実用化に向けては先に述べたような解決すべき問題点も残されてはいるが, 高分子ゲルを用いた可変光学素子への可能性を示すことができた。

文 献

- 1) 萩野一善, 長田義仁, 伏見隆夫, 山内愛造: ゲル-ソフトマテリアルの基礎と応用(産業図書株式会社, 1991).
- 2) 山内愛造, 廣川能嗣: 機能性ゲル(共立出版株式会社, 1990).
- 3) 長田義仁, S. B. ロス=マーフィー: “人工筋肉をめざすインテリジェント・ゲル”, 日経サイエンス(1993. 7), 58-65.
- 4) 奥崎秀典, 長田義仁: “分子集合反応による電動ゲルアクチュエータ”, 日本機械学会第2回バイオエンジニアリングシンポジウム講演論文集, 920-7 (1992) 9-10.
- 5) 森田慎三, 服部秀三, 河井康秀, 伊藤良久: “高分子ゲルを用

- いた可変焦点距離レンズ”, 平成元年電気学会全国大会, 3-198 (1989).
- 6) Y. Takaki and H. Ohzu: “Liquid-crystal active lens: a reconfigurable lens employing a phase modulator,” *Opt. Commun.*, **126** (1996) 123-134.
 - 7) 奥崎秀典, 長田義仁: “高分子電解質ゲル-ミセル間コンプレ
- ックス生成によるケモメカニカル運動”, *Polym. Prepr.*, **40** (1991) 615.
- 8) 長田義仁, 宮野真理: “電気に敏感に応答するゲル”, 新素材 (1992. 4), 25-29.
 - 9) Y. Osada, H. Okuzaki and H. Hori: “A polymer gel with electrically driven motility,” *Nature*, **355** (1992) 242-244.