ポリマー微粒子アレイのレンズ機能

林 貞男^{*1}・瀬尾 拓人^{*1}・畑 宏則^{*2}・平井 利博^{*1}

(受付 1994 年 1 月 31 日・審査終了 1994 年 2 月 25 日)

要 旨 ヒドロキシプロピルセルロースを含むエタノール溶液中でのスチレンと γ -メタクリロキシプロピルトリメトキシシランの分散重合で合成した直径 $6.7\mu\text{m}$ のポリマー微粒子アレイのレンズ機能を調べた。メタノールで湿らした粉末試料を硝子板上に置き、これにカバー硝子を乗せて人差し指で押さえつけ、一層あるいは二層からなるポリマー微粒子アレイを作成した。顕微鏡観察から、一層に並んだポリマー微粒子は凸レンズ機能を有することが確認された。一視野のポリマー微粒子アレイの中の粒子による倒立像は、背後から見て、それぞれの粒子の中の同じ位置に結ばれた。このことは粒子アレイ面から物体までの距離がポリマー微粒子の直径の 10^4 倍以上であったことから説明できた。カバー硝子を指先で回転させて二層のポリマー微粒子アレイ間にずれを与えると、各層の粒子アレイに基づくモアレ縞がカバー硝子の回転角度に応じて大きさを変えた亀甲模様として発現した。それに F 文字を照射すると、前層の無数のポリマー微粒子レンズによる F 文字の倒立像に起因して後層の一部のポリマー微粒子が輝き、その輝いた粒子は全体で一個の約 90° 横転した F 文字の像を構成した。この興味ある現象が凸レンズとモアレ縞の原理から考察された。

1 緒 言

ポリマーの軟化点以下で乾燥したラテックス粒子は光の乱反射で白色に見えるが、ポリマーそのものは透明で、しかも、形状は凸であることから、微小凸レンズとしての機能が期待できる。実際に、 $1.8\mu\text{m}$ のポリスチレンのラテックス粒子を室温で一層に配列させて乾燥すると、外観は白色不透明であるが、光学顕微鏡観察から、その微粒子は凸レンズ機能を示すことが確認された^{1),2)}。これは光学レンズとしては最小のものになるであろう。天然の光学微小レンズには昆虫の複眼を構成する個眼がある。個眼の大きさは平均 $30\mu\text{m}$ で、複眼はそれらを球面上に平均して約 3000 個も密に配列した独特の光受容器である。しかし、その光学機構については未だ明らかではない^{3)~5)}。

密なポリマー微粒子アレイは、ちょうど、昆虫の複眼の個眼の配列に類似する。ポリマー微粒子アレイのレンズ機能の検討は、同時に、昆虫の複眼の光受容器の解明とその模倣した光学や工学にも関連する興味深い内容をもつ。その研究には微粒子による物体の鮮明な結像が不可欠で、そのためには数 μm 以上のポリマー微粒子アレイが要求される。本報では、そのような観点から、液晶表示ディスプレイのスペーサにも使われる $6.7\mu\text{m}$ のポ

リマー微粒子アレイについてのレンズ機能を検討した。

2 実 験

2.1 試薬

試薬はすべて特級品でスチレン以外はそのまま用いた。スチレンは使用直前に減圧下で蒸留した。その他の試薬は市販品をそのまま使用した。

2.2 ポリマー微粒子の作成

分子量約 1.0×10^5 のヒドロキシプロピルセルロースの 30 g を 1 l の硝子反応器にとり、これをエタノールの 250 g に溶かし、スチレンの 8 g、 γ -メタクリロキシプロピルトリメトキシシランの 4 g、アゾビスイソブチロニトリルの 0.1 g を仕込み、 65°C で 10 時間窒素の気流下で分散重合を行った。得られた粒子はメタノールで洗浄した後、有機酸で処理し、粒子内部ではシロキサン結合の架橋が、粒子表面ではシラノール基が存在する粒子を合成した⁶⁾。さらに、比重差を利用した湿式分級法で粒子を分別し、再度メタノールで洗浄した後、メンブランフィルターで濾過して微小粒子を除いたものを 2 時間以上減圧乾燥した。試料は粉末状態で得られる。

2.3 電子顕微鏡撮影

ポリマー微粒子をカバー硝子上に並べ、金蒸着後電子顕微鏡装置 (日本電子(株), JSM-220A) で撮影し、平均粒子径を求めた。

2.4 ポリマー微粒子のレンズ機能の測定

粉末状のポリマー微粒子をメタノールを使って傾斜法

^{*1} 信州大学繊維学部 (☎386 長野県上田市常田 3-15-1)

^{*2} ナトコペイント株式会社、研究所 (☎467 愛知県名古屋市中瑞穂区二野町 8-3)

で洗浄し、室温で十分に乾燥したものを使用した。メタノール洗浄したスライド硝子上に少量の粉末状のポリマー微粒子を置き、これにスポイトでメタノールの1~2滴を落とし、メタノールの蒸発の程度を見計らってカバー硝子に乗せ、指先で上から押さえた。この方法で硝子板上に微粒子を一層あるいは二層に配列させた。

ポリマー微粒子を配列した硝子板を顕微鏡のステージに乗せ、黒の厚紙にF文字を切り抜いたもの、あるいはチューリップの形に切り抜いた黒の厚紙に花は赤、葉は緑にあしらい、透明の色紙を張り付けたものを物体とし、これらを照明ランプの上に置いて観察した。倍率は必要に応じて変化させた。顕微鏡は写真撮影装置 (HFX-IIA) を備えたニコン XF-21 を使用した。

2.5 像の発現のパソコンによるシミュレーション

等大球の粒子を平面に密に配列した状態を想定し、紙に同じ丸を互いに接触させて結晶の(111)面様に描き、粒子が倒立像を結んだ状態をその丸の中に書き込んだ。さらに、これに同一の粒子アレイの面を重ね合わせた状態を仮定し、重ねる粒子アレイを区別するために前の丸よりは小さい丸で描き、中心には粒子の焦点を意味する点を施した。最後に、重ね合わせた粒子アレイの面を中央の粒子を原点として任意の角度で回転した状態を想定し、粒子アレイを真似た小さい丸の配列面を回転した状態の図を描いた。この操作で点線のモアレ縞に基づく特殊レンズによる像の発現機構をシミュレーションした。その詳細は結果と考察の項に記述する。パソコンにはプロッター (グラフィック, MP-3200) を備えた NEC, PC-9801 (VM-21) を使用した。

3 結果と考察

3.1 ポリマー微粒子

ポリ(スチレン- γ -メタクリロキシプロピルトリメトキ

Fig. 1. Scheme for preparing single layer array of polymer particles.

シラン) 共重合体の微粒子の平均粒子径は電子顕微鏡写真から $6.7\mu\text{m}$ 、標準偏差値は $0.05\mu\text{m}$ の粒揃いであった。この粒子はシロキサン結合で架橋され、液晶表示板のスペーサ用としても使用できるものである⁶⁾。

すでに、ポリスチレンラテックスの微粒子については直径約 $1\mu\text{m}$ でもレンズ機能のあることを確認し、結像の鮮明度の関係から直径 $1.8\mu\text{m}$ 粒子を使った写真で報告がなされてきた^{1), 2)}。レンズ機能はポリスチレン微粒子に限られることはなく、その他のラテックス微粒子でも同様な結果が得られた²⁾。

3.2 一層に並んだ粒子の結像

ラテックスの場合、粒子をイオン交換樹脂で精製すれば、十分な希釈物を硝子板上に流して乾燥する方法で簡

Fig. 2. Photographs of imaging by polymer particles in single layer array. (a) polymer particle array; (b) and (c) imaging of F letter and tulip by polymer particles in single layer array.

単に顕微鏡の視野の全面に粒子が密に一層に並んだ状態が得られた。本報のように、粒子が粉体では水に解いてもラテックスのようにうまくは分散しない。そこで、極く少量の粉体を硝子板上にとり、これにメタノールの1滴を落とし、乾燥間際にカバー硝子で押さえる方法を採用した。Fig. 1 にその操作のモデルを示す。わずかなメタノールが粒子に潤滑油のような作用を及ぼし、上からの指圧によって粒子が硝子板上に整然と密に配列した。その結果が Fig. 2(a) である。

一層に並んだ粒子に F 文字の切り抜きを通して光を照射し、粒子の結像を調べた。その結果を Fig. 2(b) に示す。全ての粒子中に F 文字が正立像で明瞭に観察された(粒子は凸レンズであるので倒立像を結ぶが、これが顕微鏡のレンズで逆転して正立像に変わった)。物体に簡単なチューリップの図柄を用いた結果は Fig. 2(c) のとおりである。この場合も、カラーの図柄が鮮明に結像した。これらの結果は $1.8\mu\text{m}$ のラテックス粒子の場合^{1),2)} に比べて極めて鮮明であった。

一視野に整然と並んだ数百の粒子が粒子の中の同じ位置に同じ像を映した現象は次のように考察することがで

Fig. 3. Model for imaging of F letter by convex lenses arranged closely.

Fig. 4. Side view of the model for imaging by convex lens array.

きる。まず、密に並んだ口径の大きな凸レンズに F 文字が結像する場合、Fig. 3 のように、中央のレンズに F 文字をきちっと収めると、中央から上下左右に遠ざかるレンズほど像を上下左右に移動した状態で結像することになる。そこで、レンズの中心間の距離を l_1 、結像間の距離を L とすると次式が成り立つ。

$$L = l_1 + \Delta l \quad (1)$$

ただし、 Δl は中央のレンズの像を基準とした際の隣のレンズの像のずれの距離である。

レンズの並びを横から見た場合は Fig. 4 のように描かれる。Fig. 4 の関係から、レンズ (O_0) から物体 (O) までの距離を a 、レンズ (O_0) から結像 (O') までの距離を b

Fig. 5. Photographs of imaging by holes arisen from lack of polymer particles in single layer array. (a) polymer particle array; (b) imaging of F letter by polymer particle array; (c) imaging of F letter by holes arisen from lack of polymer particles in single layer array.

とすれば、それらと L/l_1 の関係は下記のように導かれる。

$$\frac{L}{l_1} = 1 + \frac{b}{a} \quad (\because l_1 \leq L) \quad (2)$$

両面凸レンズの場合、 a , b とレンズの焦点距離 (f) とには次式のレンズの公式がある。

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \\ = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (3)$$

ただし、 n はレンズの屈折率、 R_1 と R_2 は前面レンズと後面レンズの曲率半径である。

b/a は結像の倍率である。式 (3) から倍率と焦点距離との関係は次のように求まる。

$$\frac{b}{a} = \frac{f}{a-f}$$

よって、式 (2) に式 (3) を代入すると、 L/l_1 は次式のようにまとめられる。

$$\frac{L}{l_1} = 1 + \frac{f}{a-f} \\ = 1 + \frac{1}{a(n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) - 1} \quad (4)$$

式 (1) と式 (4) から Δl は式 (5) で表される。

$$\Delta l = \frac{l_1}{a(n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) - 1} \quad (5)$$

レンズは球体であるので、 $l_1 = 2R_1$, $R_1 > 0$, $R_2 < 0$, $R_1 = -R_2$ として、 Δl は最終的に式 (6) となる。

$$\Delta l = \frac{R_1^2}{a(n-1) - (1/2)R_1} \quad (6)$$

式 (6) で、ポリスチレンの屈折率を使って $n = 1.59$ (20°C)⁷⁾ とし、粒子半径を $R_1 = 3.35 \times 10^{-3} \text{ mm}$ 、粒子から物体までの距離を $a = 100 \text{ mm}$ とすると、 $\Delta l \approx 2 \times 10^{-7} \text{ mm}$ となる。この値は粒子径の約 $3 \times 10^{-3} \%$ に相当する小さな値である。また、正接関数の性質から、Fig. 4 において粒子径 (r) が小さく、 a が大きければ、中心の粒子 (O_0) から数えて s 番目の粒子 (O_s) については次式の近似が成り立つ。ただし、 $r = l_1$, $\angle O_0 O O_1 = \varphi$ とする。

$$\frac{s \cdot l_1}{a} \approx \tan(s \cdot \varphi)$$

これらのことが、顕微鏡の一視野で、並んだすべての粒子が粒子の中の同じ位置に同じ像を結像したように見えた理由である。式 (6) より、 R_1 が小さいと分母の第二項が無視でき、 Δl は a に反比例し、 R_1^2 に比例する。よって、Fig. 2(a) のような一視野の凸レンズにすべて同じ像を結ぶ結果は、微小な凸レンズアレイを使う場合、よほど a が小さくない限り起こることになる。

粒子を密に配列させた場合に、時には粒子が欠落した箇所が観察される。Fig. 5(a) はその一例を示す。このような欠落粒子アレイで結像を調べると、欠落した部分は粒子に結像するように焦点を合わせた状態では当然のことながら像は結ばれない (Fig. 5(b))。ところが、粒子の結像から、さらに焦点を上げると、粒子の欠落した部分に像が大きな倍率で見える (Fig. 5(c))。この現象は粒子の欠落した部分が針穴写真機と同じ機構で作用したものと考えられる。このことは、ミクロな分野もマクロの分野と同じような現象を起こすことを示唆する。

3.3 二層に配列した粒子の機能

粉末状の粒子を硝子板上に取り、これにメタノールの2滴を落として放置し、メタノールが若干残っている状態でカバー硝子に乗せて指先で押さえた。残ったメタノールの量が適切であると粒子は二層に配列する。そのモデルを示すと Fig. 6 のとおりである。この場合はメタノール層が指圧に対して抵抗し、その効果が粒子の二層の形成に役立っているものと考えられる。カバー硝子を少し回転すると粒子アレイ間にずれが起こり、亀甲文様が発生した。模様の大きさはカバー硝子の回転角度が大きくなると小さくなった。Fig. 7(a), (b), (c) はそれらの写真である。

結晶の (111) 面に相当する配置で同じ丸を互いに接するように描いた2枚の透明なシートをを重ね合わせ、1枚を固定し、他の1枚を回転すると、回転角度に応じて大きさの異なる亀甲模様が発現する。この関係を図示すると Fig. 7(a'), (b'), (c') のようになる。重ねた上のシートを (a') は 7.0° 、(b') は 10.0° 、(c') は 27.8° 右方向に回転した結果である。Fig. 7 においては、(a) は (a') に、(b) は (b') に、(c) は (c') に良く対応する。

この亀甲模様の発現はモアレ縞の原理に基づく。一般に、モアレ縞は等間隔の直線群を描いた透明のシートを

Fig. 6. Scheme for preparing double layer arrays of polymer particles.

Fig. 7. Moiré patterns between double layer arrays of polymer particles and its simulations by a personal computer. (a), (b) and, (c) observations; (a'), (b'), and (c') simulations. Rotation angle between two sheets which showed circles in close contact, (a') 2.0°, (b') 7.0°, (c') 27.8°.

2枚重ね合わせ、1枚を回転すると、容易に観察される (Fig. 8 参照)。これは直線群のためにモアレ縞も直線として現れる。これに対して結晶の (111) 面様に配列した点線群の場合には、点線の方向が三方向に定められ、そ

の合成のモアレ縞として亀甲模様が発生する^{9), 10)}。結晶の (100) 面様に配列した点線群のシート間では、四角形模様が描かれる^{9), 10)}。

微小な凸レンズを結晶の (111) 面様あるいは (100) 面

Fig. 8. Moiré fringes between two lined sheets with different pitches ($p_1 > p_2$), where the lined sheet with a shorter pitch (p_2) was rotated at θ degrees clockwise.

Fig. 9. Appearance of the letter F by Moiré patterns between double layer arrays of the polymer particles. (a) Moiré pattern; (b) letter F appeared in Moiré pattern.

様に配列した同じものどうしを重ね合わせ、1枚を回転すると、レンズ様の亀甲模様が発現する。これにF文字の切り抜きを通して光を照射すると、前面のレンズアレイのすべての凸レンズにF文字の倒立像が結像し、も

Fig. 10. Simulation for the appearance of the letter F by Moiré patterns between double layer arrays of the polymer particles. (a) imaging by lenses in the first layer array; (b) After superposing the second layer array on (a), the second layer array was rotated at 5.0 degrees clockwise; (c) lenses in the second layer array, whose lens center overlapped just on the image of letter F in the first layer array, were painted black.

し、後面のレンズアレイを右方向に回転していたとすれば、後面のレンズアレイの亀甲模様の中に輝いたレンズによって必ず1個のF文字が約90度右方向に横転した像として構成される。後面のレンズアレイが左方向に回転されていたとすれば、その像は左方向に約90度横転した状態で現れる^{11)~13)}。この現象をポリマー微粒子で調べた結果がFig. 9である。Fig. 9(a)はポリマー微粒子アレイ間のモアレ縞の特殊レンズの写真で、Fig. 9(b)はその特殊レンズへF文字を照射した際に輝いた粒子によって構成された像の写真である。なお、顕微鏡観察で

は粒子レンズの像が逆になるので、実験は発現する像が粒子レンズで見たままに観察できるように、前以て、照射する F 文字を倒立状態にセットして行った。

この現象は次のように考察することができる。まず、前面の粒子アレイの結像面に後面の粒子アレイの焦点が重なるとする。次に、前面の粒子に倒立像が結ばれたとし、後面の粒子アレイを回転した後、後面の粒子について焦点がちょうど前面の粒子の像の上に重なるものと重ならないものについて考える。後方から見た場合、もし、前者であれば粒子は明るく、後者であれば粒子は暗く見えることになる。これをシミュレーションすると Fig. 10 のようになる。Fig. 10(a) は前面の粒子の全てに F 文字の倒立像が結像した状態を示す。Fig. 10(b) は全面の粒子アレイに後面の粒子アレイを重ね、それを 5.0 度右方向に回転したモデルである。ただし、後面の粒子アレイを前面の粒子アレイと区別するために、後面の粒子の大きさを前面の粒子の大きさよりも小さな丸で表示し、後面の粒子の中央に焦点の位置を点で明示した。Fig. 10(c) は後面の粒子で焦点が前面の粒子の結像の上に重なるものを黒く塗りつぶした。黒く塗りつぶされた粒子の並びは Fig. 9 で発現した像と同じ状態の約 90 度右方向に横転した F 文字を描く。

Fig. 8 に示したように、直線群シートを重ね合わせた後、前面のシートを右へ回転したときの傾斜が β であったとすれば、 β に対するモアレ縞の方程式は次のように表される^{(14), (15)}。

$$y = \left(\tan \beta - \frac{p_2}{p_1} \sec \beta \right) x + p_2 m \sec \beta$$

ただし、 p_1 と p_2 は直線群のそれぞれのピッチ、 m はモアレ縞次数である。

ここで、Fig. 8 より、 $\beta = 90 - \theta$ と置けば、 y は後面の直線群シートの回転角度 θ の関数として下記のように書き換えられる。

$$y = \left(\cot \theta - \frac{p_2}{p_1} \csc \theta \right) x + p_2 m \csc \theta$$

よって、同じ粒子アレイを重ね合わせて後面の粒子アレイを回転した際のモアレ縞の傾斜、すなわち、発現する像の傾斜 ($\tan \phi$) は後面の粒子間のピッチを l_2 とすると、 $p_1 = L$, $p_2 = l_2$ となり、 $L \approx l_2$ であるので、次式で求まる。

$$\begin{aligned} \tan \phi &= \cot \theta - \csc \theta \\ &= -\tan(\theta/2) \end{aligned} \quad (7)$$

式 (7) から、後面の粒子アレイに発現する像は物体に対しては $90 + (\theta/2)$ 度横転することになり、実験結果とよく一致する。

また、Fig. 8 の直線群間のモアレ縞の間隔 (δ) は次式で表される^{(14), (15)}。

$$\delta = \frac{p_1 \cdot p_2}{\sqrt{(p_1 \sin \beta - p_2)^2 + (p_1 \cos \beta)^2}}$$

ここで、Fig. 8 より、 $\beta = 90 - \theta$ と置けば、 δ は後面の直線群シートの回転角度 θ の関数として下記のように書き換えられる。

$$\delta = \frac{p_1 \cdot p_2}{\sqrt{(p_1 \cos \theta - p_2)^2 + (p_1 \sin \theta)^2}}$$

これを粒子アレイに応用し、後面の輝いた粒子の連りの数を N とし、 N を δ の関数で表す。このとき、 $p_1 = L$, $p_2 = l_2$, $h = L/l_2$ ($\because L > l_2$) とする。

$$\begin{aligned} N \cdot l_2 &= \frac{c}{L} \cdot \delta \\ &= \frac{c}{\sqrt{1 + h^2 - 2h \cos \theta}} \end{aligned} \quad (8)$$

ただし、 c は前面の粒子の結像の大きさである。

一方、後面の粒子アレイの中に発現する像の倍率 (M_2) は物体の大きさを Y とすると式 (9) で書ける。

$$M_2 = \frac{N \cdot l_2}{Y} \quad (9)$$

よって、式 (8) を式 (9) に代入すると、 M_2 は次のようにまとめられる。

$$M_2 = \frac{M_1}{\sqrt{1 + h^2 - 2h \cos \theta}} \quad (10)$$

ただし、 M_1 は前面の粒子の結像の倍率 (c/Y) である。

ここで、同じ粒子アレイの重ね合わせによるモアレ縞の発現とすれば、 $L \approx l_2$ であるので $h \approx 1$ となり、(10) 式は次のような簡単な式になる。

$$M_2 \approx \frac{M_1}{2 \sin(\theta/2)} \quad (11)$$

さらに、小さい θ の値の際は $2 \sin(\theta/2) \approx \sin \theta$ と近似できるので、式 (11) は式 (12) のようになる。

$$M_2 \approx \frac{M_1}{\sin \theta} \quad (12)$$

実際に、後面の粒子アレイの中で発現する像は後面の粒子アレイを重ねるだけでは起こらない。これは (12) 式から、 $\theta = 0$ より $\sin \theta = 0$ となり、 M_2 が無限大になることから理解できる。また、 M_2 は後面の粒子アレイの回転角度 (θ) の増大によって急激に減少する⁽¹³⁾。これは Fig. 10 に示したシミュレーションで、種々の回転角度に対して発現する F 文字の大きさの変化が式 (12) の関係と良く一致することから説明できる。

3.4 その他

粒子径の小さな粒子をレンズアレイとして使用すると、式 (6) から明らかなように、 Δl が無視され、10 cm 先の物体でも、すべての粒子が粒子の同じ位置に同じ倒立像として結像することになる。したがって、これらを後面の粒子アレイで一つにまとめるためには、必ず、後面の粒子アレイを回転しなければならない。微粒子を昆

虫の複眼の個眼に真似てレンズとして利用するとすれば、まず、この点が問題になる。 Δl が無視できない条件、例えば $l_1 \neq l_2$ を選べば、後面の粒子アレイを重ねるだけで前面の粒子アレイの全粒子の倒立像を一つにまとめることが可能になる¹⁶⁾。ポリマー微粒子レンズアレイを利用した人工複眼への開発は、昆虫の複眼はなぜ個眼を球面に密に配列しているかという謎の解明に関連する。この解明の鍵は球面に微小レンズを配置することで Δl を作り出すことにあると言えよう。これについての詳述は本誌の内容にそぐわないので省略した。

4 結 論

6 μm 以上のポリマー微粒子になると鮮明に物体を結像することが確認できた。昆虫の複眼を構成する個眼の大きさは平均約 30 μm といわれている。このような大きさのポリマー粒子であれば、さらに物体を鮮明に結像することができるので、人工複眼のレンズとしての機能も期待できることが分かった。本報のモアレ縞の原理に基づく特殊レンズ機能の発現原理から、後面の粒子アレイは粒子径に比べてずっと細い光ファイバーを粒子と同じピッチで配列させた光センサー群に置き換えても、前面の粒子アレイの無数の粒子の倒立像を一つにまとめられると判断できる。このことは昆虫の複眼の謎解きにも関連し、ポリマー微粒子をレンズに利用した人工複眼の可能性を示唆する。

Lens Functions of Polymer Micro-Particle Arrays

Sadao HAYASHI^{*1}, Takuto SEO^{*1}, Hironori HATA^{*2}, and Toshihiro HIRAI^{*1}

^{*1} Faculty of Textile Science and Technology, Shinshu University (3-15-1 Tokida, Ueda, 386 Japan)

^{*2} Research Laboratory, Natoko Paint Co., Ltd. (8-3 Futano, Mizuho, Nagoya, 467 Japan)

The lens functions of polymer micro-particle arrays of 6.7 μm diameter prepared by the dispersion copolymerization of styrene and γ -methacryloxy-propyltrimethoxysilane in ethanol solution containing hydroxypropylcellulose were investigated. The polymer particle arrays of a single layer or double layers on a slide glass were obtained by pressing the powdery sample dampened with methanol from the upside of a cover glass put on the sample by an index finger. The particles arrayed in a single layer were recognized to show a good convex lens function from the observation with a microscope. When the inverted images by the particles in a field of vision were observed from behind, they were found to be focused at similar places and in a similar shape in each particle. This was explained from the fact that the distance between the polymer particle array and the object was over 10^4 times than the particle diameter. If the cover glass was rotated with an index finger to cause slide between the double layer arrays of the polymer particles, Moiré fringes between the two arrays were formed as hexagonal patterns with changing size depending on the rotation angle of the cover glass. When light was applied to the Moiré pattern through the window of a cut-out F letter, some particles on the back layer were seen brightly due to inverted images by the particles on the front layer. The shining particles showed one F letter over-turned at about 90° in one hexagonal pattern. This interesting phenomena was considered from the principles of a convex lens and Moiré fringes.

KEY WORDS Polymer Micro-Particle / Lens Function of Polymer Particle / Moiré Fringes / Particle Array / Optics between Particle Arrays /

(Received January 31, 1994; Accepted February 25, 1994)

[Kobunshi Ronbunshu, 51(9), 623—630 (1994)]

文 献

- 1) 林 貞男, 高分子, 39, 222 (1990).
- 2) S. Hayashi, Y. Kumamoto, T. Suzuki, and T. Hirai, *J. Colloid Interface Sci.*, 144, 538 (1991).
- 3) H. Eltringham, *Trans. Ent. Soc. London*, 67, 1 (1919).
- 4) N. Yagi and N. Koyama, "The Compound Eye of Lepidoptera", Maruzen, Tokyo (1963).
- 5) 立田栄光, 三村圭一, 富永佳也, 小原喜明, "昆虫の神経生物学", 培風館, 東京 (1979).
- 6) ナトコペイント(株), 特開平, 5-232480.
- 7) J. Brandrup and E. M. Immergut, Ed., "Polymer Handbook", 3rd ed., Wiley-Interscience, New York (1989).
- 8) 林 貞男, 鈴木 崇, 平井利博, 村山守生, 繊維学会誌, 45, 287 (1989).
- 9) 林 貞男, 栗沢知司, 平井利博, 村山守生, 繊維学会誌, 44, 517 (1988).
- 10) 林 貞男, 消費科学, 32, 233 (1991).
- 11) O. Mikami, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 14, 417 (1975).
- 12) 三上 修, 応用物理, 45, 1045 (1976).
- 13) S. Hayashi, M. Kobayashi, Y. Kumamoto, K. Suzuki, T. Suzuki, and T. Hirai, *J. Colloid Interface Sci.*, 153, 509 (1992).
- 14) P. S. Teocaries, "Moiré Fringes in Strain Analysis", Pergamon Press, Oxford (1969).
- 15) 篠原 昭, 繊維機械学会誌, 37, 253 (1984).
- 16) 林 貞男, 麻田宏司, 鈴木 嵩, 平井利博, 第 45 回コロイドおよび界面化学討論会講演要旨集 (1992), p. 422.