

7.6 多層フォトニック結晶の設計と製作

7.6.1 測定波長、微小球の材質・大きさの決定

測定波長の決定

本研究では、回折強度の計測に光学的フーリエ変換と画像計測を用いることにした。そのため、光源には良質のコヒーレントな光源である He-Ne レーザ ($\lambda = 0.633\mu\text{m}$) を用いることにした。基本的な光学系は、まず視野を微小な結晶に合わせるための顕微像拡大光学系と、そこから得られた波面をフーリエ変換するフーリエ変換光学系から構成されることになる。

微小球の材質・大きさに関する要求と選定

まず微小球の材質については、可視光を考えているので、通常の光学材料であればまず問題になることはない。フォトニックバンド効果、すなわち球の共鳴の強さからすると屈折率が高い方がよい。従って、ここでもポリスチレン系材料を用いることにする。

微小球の大きさに関しては、密着配列ではそれがそのまま格子定数を決め、格子定数と波長の関係でどのくらいの角度で回折光が生じるかが決まるので、今回も慎重に決める必要がある。

まず、最低限の条件として、単層結晶がブラッグ回折を起こさなければならない。そのためには以下の条件を満たす必要がある。

$$Z = \frac{\sqrt{3}D}{2\lambda} > 1$$

$$D > \frac{2}{\sqrt{3}}\lambda = 0.73\mu\text{m} \quad (7.6.33)$$

さらに目標としては、この波長に対してちょうど図 7.5.5 (d) に示したような第 3 隣接逆格子点までを含む回折パターンが観察できるように微小球のサイズを選択したい。観察できる逆格子空間の大きさは、結晶からの回折光を最初に集める対物レンズの開口数 (NA) で決まる。一般的な高分解能対物レンズでは、NA はせいぜい 0.7 程度である。対物レンズの焦点面から波数 k の光が各方向に拡がる時、このレンズで集めることができるのは、面内の波数を k_{\parallel} で表すと、 $k_{\parallel} \leq kNA$ の範囲の光である。このことを図 7.6.1 に示す。この図は、結晶に対して θ で平面波 k_i が入射した時の回折波 $k_{\parallel} + G$ と対物レンズに入射することのできる波面の関係を波

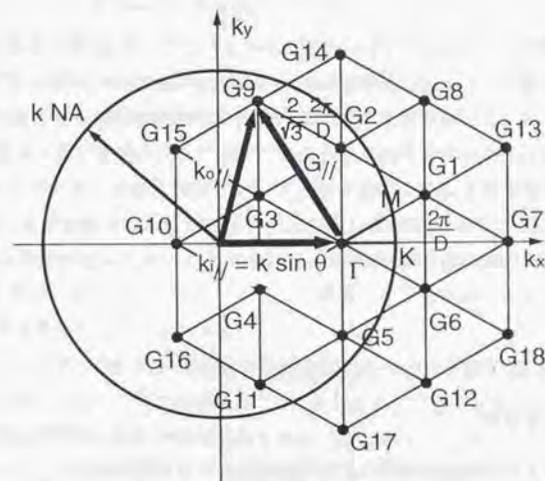


図7.6.1 逆格子空間と観察視野の関係

数(逆格子)空間の xy 平面内で考えたものである。入射した波面をフーリエ変換すると、まったくこの通りの画像が得られる。このことより、逆格子ベクトルの大きさが $\frac{4}{\sqrt{3}D}$ の第3隣接逆格子点 (G_{13} や G_{14} のこと) が観察できるためには、次の条件を満たす必要がある。

$$kNA = \frac{2\pi}{\lambda} NA \geq \frac{4}{\sqrt{3}} \frac{2\pi}{D} \\ D > \frac{4}{\sqrt{3}} \frac{\lambda}{NA} = 2.08\mu\text{m} \quad (7.6.34)$$

式(7.6.33)と式(7.6.34)の2つの条件を考え、ここでも $\phi 2.02 \pm 0.01\mu\text{m}$ の Dow Chemical 社製 Uniform Latex Particles (日新 EM 株式会社) を用いることとした。材質はポリビニルトルエンである。この波長域での屈折率は $n = 1.58$ である。これは式(7.6.34)の方を若干満たさないが、観察できないのは G_{14} と G_{17} だけで、他の第3隣接逆格子点は入射角を変えていくと視野に納まるので、この粒子で良いことにする。このことにより、どのあたりの周波数領域で実験することになるかを無次元化した周波数で表すと、 $Z = 2.73$ 、サイズパラメータで言うと、 $x = 9.93$ である。

7.6.2 多層フォトニック結晶試料の設計

基板に関する要求

基板に関する要求は基本的にどの実験の場合にも共通である。

純粹に球の配列による効果を観察するには、基板が光にとって存在しないかのように見えるよう、屈折率 n が測定波長で1に近いこと、消衰係数 κ が微小であることが必要である。この実験では波長は変化させないので $\lambda = 0.633\mu\text{m}$ に対する特性だけが重要である。

光の多重散乱の効果を観察しようとしているので、基板の中で干渉により電界が増強されたような、現象を複雑化したり本質的に変化させてしまう状態は望ましくない。このことは、基板を非常に薄くするか ($nt < \lambda/2$)、非常に厚くするか ($nt \gg \lambda$) のどちらかを選択せねばならないことを意味する (t は基板の厚さ、ここでの n は基板の屈折率)。

また、微小球配列結晶を製作するためには、本研究の微細作業システムで対応できる $V_{acc} = 0.5 \sim 30\text{kV}$ の加速電圧の範囲で、無帯電状態を実現できることが必要である。

基板の選定

帯電を防止する目的では金属基板や金属薄膜をコーティングした基板が都合が良いのであるが、本実験では反射率が高いこと、透過率を高めるために仮に薄くしても、プラズモンの発生など別の共鳴状態の発生が懸念されるために使用できない。

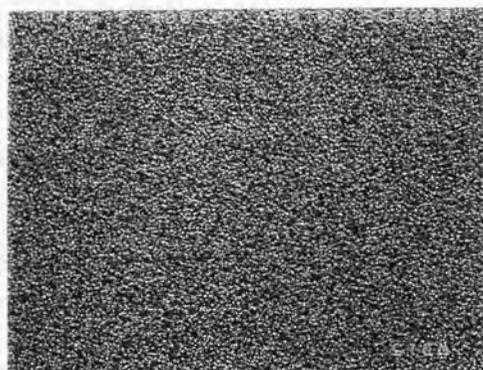
また、単層フォトニック結晶の透過スペクトル測定の際に用いた SiN メンブレンは $nt = 0.63\mu\text{m}$ なので $1.26\mu\text{m}$ 以下の波長ではこれでも厚すぎて干渉が起きてしまう。今は特に $\lambda = 0.633\mu\text{m}$ なので、ちょうど共鳴する波長に当たっている。厚さ 100nm なら使用可能かとも思ったが、より薄いメンブレンになると歩留まりの点で入手が困難で、取り扱いも困難であることよりあきらめた。

可視域では、さいわいに光を透過して導電性を持った材料がいくつかある。そこで、この実験では ITO 薄膜をコーティングしたガラス基板を用いることにした。用いたものは、外径 8mm 角、厚さ 1mm のソーダガラスに ITO、すなわち In_2O_3 (Sn 5%) を厚さ $t = 189\text{nm}$ に蒸着したものである。ITO 薄膜の抵抗値は $10\Omega/\text{cm}^2$ 、屈折率は $n = 2.05 \pm 0.5\mu\text{m}$ [314] で、基板全体の透過率は $0.633\mu\text{m}$ にて 82.9% であった。この抵抗値は十分に小さな値で、SEM 中で観察および物体操作をする上で、帯電による問題はまったく生じなかった。

しかし、今回も屈折率が高い点が問題である。特に今回の膜厚は $nt = 0.387\mu\text{m}$ なので、 $0.774\mu\text{m}$ あたりの光で共鳴を起こし、これは決して速い波長でない。また、この基板の最大の問題は表面の微細構造である。図 7.6.2 に示したように、SEM で観察すると $50 \sim 200\text{nm}$ のグレインが敷き詰められたような表面をしている。これは一つは光を散乱して回折像にノイズが生じることが懸念される。もう一つは微粒子との付着力が前に用いた平滑な SiN などにくらべて小さくなり、操作が難しいことが懸念される。そこで、まず回折光学系にて ITO 薄膜による回折像の劣化を観察した。その結果、透過率に応じて光量が全体的に低下するだけであって、ノイズなどは観察されなかった。これは $0.633\mu\text{m}$ という波長に対しては十分微細な構造なので影響が現れなかったものと思われる。そこで、光学特性上は特に問題ないものと判断した。

サンプルホルダ

ホルダは階層構造とし、大きな開口のあいた円板状の基板ホルダを、同じく大きく開口のあいたベースプレートに取り付け、ベースプレートはナノロボットにも光



(a) 7,000 倍画像 5 μm



(b) 50,000 倍画像 500 nm

図7.6.2 ITO薄膜表面の微細構造

学系にも固定できるようにし、両方で兼用した(図6.3.1(b))。基板ホルダはベースプレート上で自由な方位に回転して固定できる。光学測定時にはここを調節して $\Gamma-K$ 方向と $\Gamma-M$ 方向を選択した。

結晶形状の設計

外形はなるべく等方的になるよう今回も六角形状とした。今回の実験用には単層と2層の2種類を用意することにしたが、将来、3層目を積層してfccとhcp両方の選択ができるよう、1層目の1辺の微小球の数は3個とした。決定した配列方法を図7.6.3に示す。単層結晶は19個、2層結晶は31個の球から構成される。

7.6.3 多層フォトニック結晶の製作

ITO基板については、試料準備上のいくつかの問題が生じた。一つは、一般に液体に対して濡れ性が悪いこと、もう一つはポリビニルトルエン微小球との付着力がどのような加速電圧でも微小で、一度針で持ち上げてしまうと、ほとんど置けなくなってしまうことである。

前者は180Wのショートアーク紫外線(UV)光源(波長範囲290~450nm)でUV光を30min照射することによりある程度改善することができた。これは蒸着時かその後の工程で表面に何かの汚染物が付着しており、それがUV光照射により分解されたものと思われる。後者はおそらく基板表面の微細な凹凸のために微小球と付着しにくくなったものと思われる。最終的には以下に示す手順にて再現性良く都合の良い試料が作れ、微小球が配列できるようになった。

今回の配列作業の特徴は、針状工具に電圧を印加して付着力を調節したこと、それを可能にするために加速電圧を調節して都合の良い微小球の帯電状態を実現したこと、画像テンプレートにて製作したい構造物のCADデータを表示し、高精度の配列を実現したことである。

準備方法

まず、微小球との付着力を大きくするため、UV光照射後の基板にポリスチレンの1.0%溶液をディップコーティングした。ポリスチレンは典型的な炭化水素であるので、表面は疎水性になった。そこで、界面活性剤であるアルキルエーテル硫酸エステルナトリウム0.03%水溶液をITO基板にディップコートしておいてから、

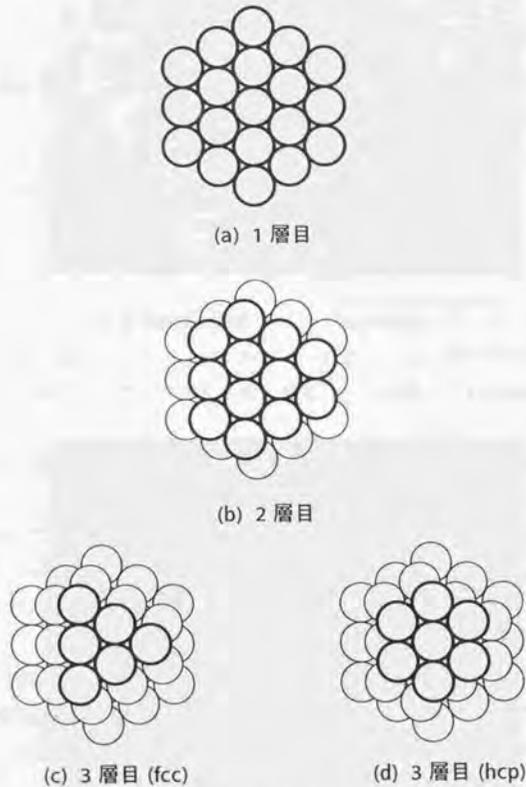


図7.6.3 結晶形状の決定

$\phi 2.02\mu\text{m}$ のポリビニルトルエン微小球を蒸留水に懸濁した 0.04% 溶液を $1\mu\text{l}$ 滴下した。懸濁液液滴は瞬時に濡れ拡がり、微小球は良好に 1 個 1 個分離した状態で分散された。

付着・離脱条件調整

ITO 基板にディップコートしたポリスチレン薄膜は、良好な接着層として機能したが、微小球との付着力が強すぎ、今度は針状工具で持ち上げることが困難になった。そこで、工具に電圧を印加することにした。加速電圧と工具・基板間の電圧を系統的に変えて条件を探った結果、加速電圧を最大の 30kV とし、ITO 基板を接地し、工具に -36V 程度の電圧を印加したとき、微小球が 50% 程度の確率で工具に付着させて持ち上げられることがわかった。加速電圧を高くすることは、微小球を正に帯電させる効果がある。なお、この工具の電圧の値は用いた可変電源の容量によって制限されている。工具に電圧を印加すると、画像が大きくシフトし、SN 比も極端に低下する。従って、微小球を持ち上げる際には、まず偏心押し込みにより基板から剥離し、工具先端を微小球に接触させた状態で電圧を印加し、工具を数 μm 引き上げて即座に電圧を切った。

配列方法

今回はまず、1 個 1 個の球について、SEM 画面上に重畳表示したカーソルで球の縦横の寸法を確認し、直径が $\pm 0.5\%$ の範囲におさまるものだけを用いた。また、球を配列するに当たっては画面上に設計した配列の輪郭を示すテンプレートを表示し、これに合うように並べた。使用したテンプレート画像は図 6.1.3 に示した。

今回の配列を行なうまで、SEM に遠近法による絵画のように、対物レンズから離れるほど小さく見える画像歪があることがわからなかった。6,000 ~ 20,000 倍という高倍率下でもこの歪は無視できなかつた。用いているマニピュレータは試料面が傾斜しており、画面の右の方が下に下がって対物レンズから速くなる。このため、右に行くほどわずかに小さく見える状態になっているようである。この画像歪の存在を認識していなかったため、テンプレートに合わせようとした結果、むしろ結晶に歪を導入する結果となった。

7.6.4 多層フォトニック結晶の製作結果

製作した結果の写真を図7.6.4と図7.6.5に示す。単層結晶の方は他の球と密着していない球が1個あるが、これはSEMの第2の画像歪のためにこのあたりではテンプレートの方が若干大きく表示されており、それに合わせようとしたために隙間があいてしまったものである。多層結晶は2ヶ所隙間の空いた場所がある。多層結晶は一般に歪が積算しやすく、これでもテンプレートを用いたことにより従来になく高精度に配列できた方である。結晶の外形をトレースして六角形の各辺の長さを調べたところ、どちらの結晶も $\pm 1.8\%$ 以内で一致していた。

格子定数は7.7節にて説明する光学系を用いて、波長 $0.633\mu\text{m}$ のHe-Neレーザーの回折角度から実測した。周期 $2.000\pm 0.002\mu\text{m}$ の標準精密格子板で校正した結果、 $D = 1.98\mu\text{m}$ であることがわかった。

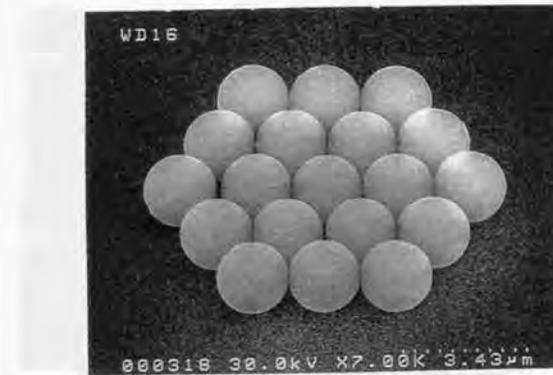
7.7 多層フォトニック結晶のブラッグ反射

7.7.1 測定方法

回折強度曲線を得るために用いた光学系を図7.7.1に示す。この光学系は基本的に平面波を斜入射するための部分、微小なフォトニック結晶の周辺の光波だけを取り出す部分、それをフーリエ変換する部分、透過顕微像を得る部分からなる。

直線偏光したHe-NeレーザーLからの出力光($0.633\mu\text{m}$, 3.3mW , ビーム径 $\phi 0.7\text{mm}$, ビーム拡がり全角 1.3mrad)をNDフィルタFで光量を調節し、 $\lambda/2$ 板WPで偏光方向を調整した後、ITO薄膜上に製作したフォトニック結晶PCの基板裏から入射する。基板垂直方向をZ軸、基板面内方向をX,Y軸とする。Z軸は図7.5.2(b)のz軸と一致しており、結晶を載せたハンドリングホルダをZ軸回りに回転することによって、入射光の斜入射方向であるX軸と、結晶への入射方向 ϕ の角度を調整し、調べる入射方位($\Gamma-K$ か $\Gamma-M$ か)の選択を行なう。入射角 θ は、ミラー M_1 の角度・位置を変化させることにより、変化させる。

透過光を対物レンズ L_1 ($\times 40$, $NA 0.65$)で集め、アパーチャA($\phi 2.0\text{mm}$)面上に120倍に拡大して結像する。結晶から生じたすべての回折波はアパーチャを通過し、結晶以外の部分からの回折波はすべてアパーチャを通過できずに阻止される。基板上には作った結晶以外にランダムに散らばった何百万個もの微粒子があり、入射波 $\phi 0.7\text{mm}$ のビーム径全体に照射されているので、この範囲のすべての粒子が



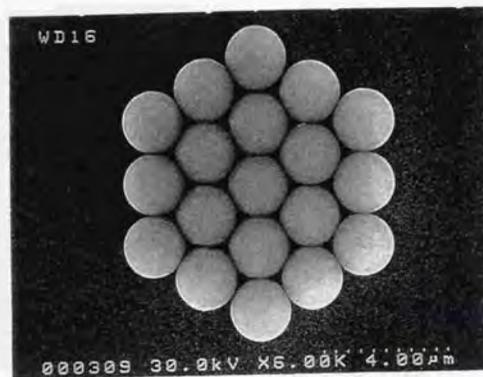
(a) 単層結晶

5 μm 

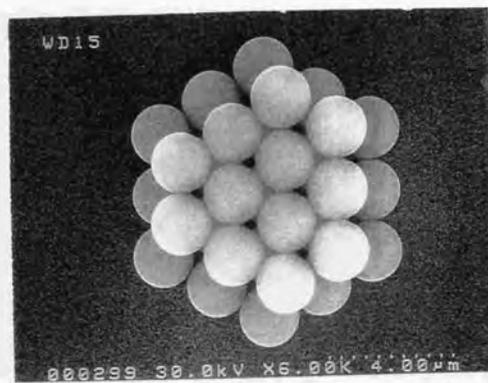
(b) 2層結晶

5 μm

図7.6.4 製作したフォトニック結晶



(a) 単層結晶 5 μm



(b) 2層結晶 5 μm

図7.6.5 製作したフォトニック結晶（真上から見た様子）

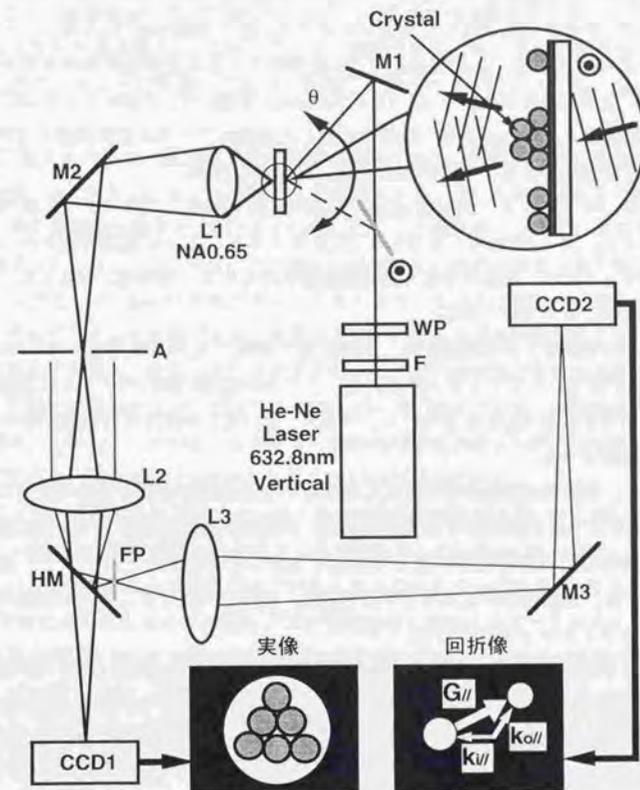


図7.7.1 回折強度測定のための光学系

ら無数の散乱波が生じている。しかし、この光学系で結晶の実像が得られるように調節すれば、結晶から生じた局所的な回折波だけを抽出することができる。

アパーチャAで切り出した波面はレンズ L_2 ($f = 100\text{mm}$) に入射し、ハーフミラー HM で反射後、 L_2 の焦点面 FP に波面のフーリエ変換像が形成される。この仮想的な面をさらにレンズ L_3 ($f = 100\text{mm}$) を用いて、CCDカメラ CCD_2 上に拡大結像する。これにより、結晶を通過した波面のフーリエ変換画像を CCD カメラで直接撮像できる。この画像を以後、回折像と呼ぶ。

一方、ハーフミラー HM を透過する方向に関しては、アパーチャA面の画像がレンズ L_2 ($f = 100\text{mm}$) を用いて CCD カメラ CCD_1 上に拡大結像される。こちらのカメラでは、結晶の単なる透過顕微像が得られる。回折像に対応して、以後この画像のことを実像と呼ぶ。

CCD_2 で撮像される画像には、入射光 k_i と回折光 k_o の XY 成分、すなわち、 k_{\parallel} と k_{\perp} が輝点としてマッピングされる。これらの輝点の間のベクトルは逆格子ベクトルの XY 成分 G_{\parallel} を表している。つまり、図 7.6.1 の視野中の画像がそのまま実際に観察できる。

また、回折強度曲線を獲得するには輝度の定量評価が重要である。測定に先立って CCD カメラの線形性を確認しておき、輝度値が 256 段階のうち、200 以下の範囲であればほぼ入射光量に対して線形であることがわかった。そこで、測定に当たっては、毎回画像の最大輝度の点を求め、その点の輝度がこの線形範囲に入るよう ND フィルタ F を設定した。

観察される回折スポットは結晶の有限性に起因する拡がり $\approx W/\lambda$ (W は結晶の寸法の代表値) を持っている。そこで回折像からこのスポット分の寸法の正方形の領域内の輝度の総和を求め、これをキャリブレーションで求めておいた輝度と強度の関係から nW の単位に変換した。

測定条件は以下の通りである。結晶の方位は $\Gamma-K$ 方向 ($\phi = 0^\circ$) と $\Gamma-M$ 方向 ($\phi = 90^\circ$) とした。入射角は $\theta = -60^\circ \sim +60^\circ$ の範囲で、2層結晶に対しては 2° ごとに、単層結晶に対しては 4° ごとに振った。偏光方向は紙面に対して垂直方向 (s 偏光) についてのみ測定した。

7.7.2 測定結果

測定した結果のうち、以下では2層結晶において特に顕著な傾向が観察された $\Gamma-K$ 方向の結果についてのみ議論する。

観察される実像と回折像

図 7.7.2 に、単層結晶について得られた実像と回折像の代表的な例を示す。なお、これから示す回折像は図 7.5.4 とは上下が逆に観察されている。またこれらの画像は適度に見やすいように強調してあり、実際の回折スポットはもっと暗いものである。

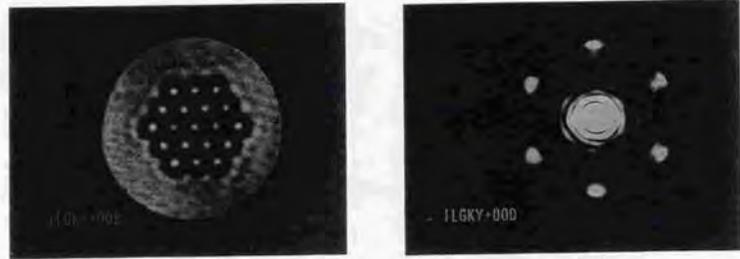
(a) は垂直入射の時、画像は通常の顕微鏡画像であり、回折像の方には中央の入射光の他、 $G1$ から $G6$ までの逆格子点が観察される。(b) は角度を大きくしていったときの典型的な結果で、図 7.6.1 に示したように視野中にシフトした逆格子空間が納まっている。一方、実像の方は個々の球の内部に複雑な輝度分布や周辺部のフリンジが生じる。(c) は角度がさらに大きくなり、もはや入射光 (0 次光) が視野から外れてしまった状態である。実像の方は、いわゆる暗視野顕微像になっており、背景光は消滅し、散乱成分だけが見えている。回折像の方はその場合に単に視野から入射光が外れたというだけで高次のスポットが見えている。単層結晶の回折の特徴は、このようにどのような角度でも視野内の回折スポットがすべて見えていることである。これは図 7.5.4 から予想されていた通りである。

図 7.7.3 には、2層結晶についての実像と回折像の典型例を示す。ここに示した3つの例は、特に強い回折が得られたときのものである。(a) は $G5$ のスポットが強く生じている (回折像は上下逆になっているので上に生じているのが $G5$ である)。(a) の回折像の右に見えるのは対物レンズの端面反射に起因するアーチファクトである。実像の方には $G5$ のスポットに対応して水平の干渉縞が見える。(b) の回折スポットは $G12$ である。また実像にはこれに対応するフリンジが見える。(c) は $G18$ である。このときの実像はすでに暗視野像になっているが、結晶の2層目の部分に複雑な何かのパターンが観察できる。

回折強度曲線

以上見てきたような回折像から視野に入っている各スポットの輝度を計測して、それぞれの点に対しての回折強度曲線を求めた。計測系の視野の関係で、回折光が生じていても視野から外れた場合には曲線が0になってしまっている。そのため、計算による予想結果よりはデータの観察できる領域は狭くなっている。

図 7.7.4 は単層結晶の回折強度曲線の測定結果である。図 7.5.4 で予想されたように、ほぼ単調な特性である。ところが良く見ると、凹凸があり、それは必ずしも



実像

(a) $\theta = 0^\circ$

回折像



実像

(b) $\theta = +32^\circ$

回折像

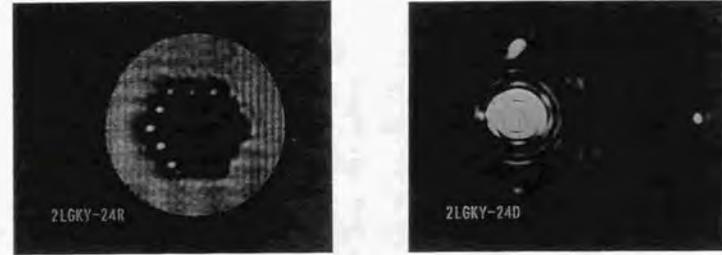


実像

(c) $\theta = -48^\circ$

回折像

図7.7.2 単層結晶の実像と回折像の測定結果の例



実像

(a) $\theta = -24^\circ$

回折像



実像

(b) $\theta = -32^\circ$

回折像



実像

(c) $\theta = +48^\circ$

回折像

図7.7.3 2層結晶の実像と回折像の測定結果の例

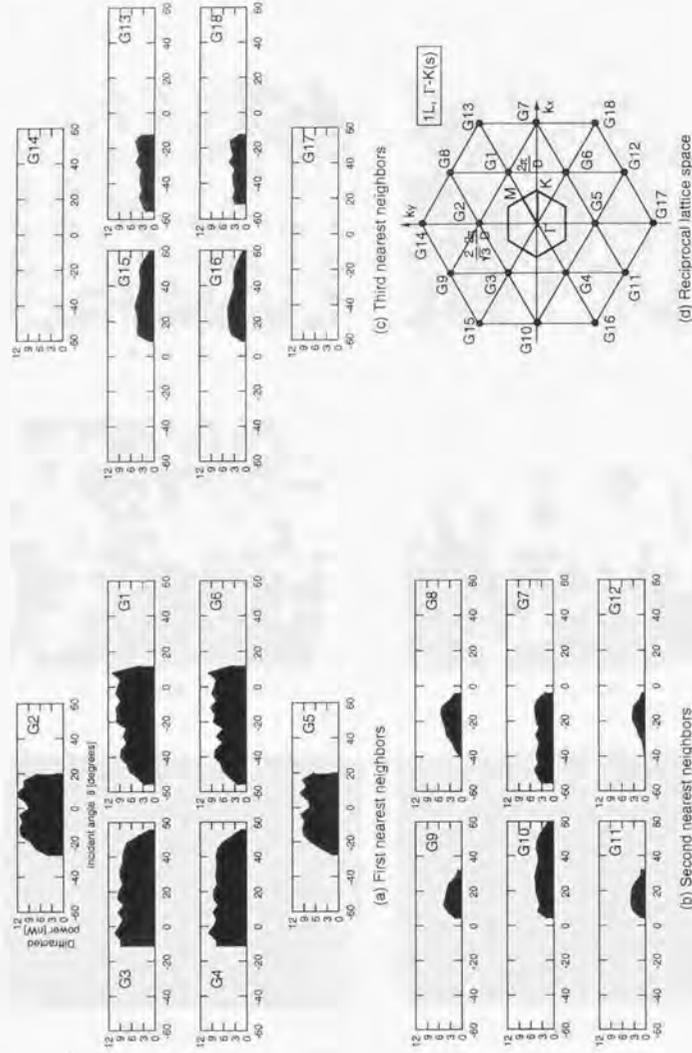


図7.4 単層結晶の回折強度曲線の測定結果

ランダムなノイズでもなく、左右の対応する逆格子点でちゃんと対称になっていた。配列の効果そのものは図7.5.4のように単調な効果しか持たないので、これに球による共鳴に起因する効果に加わって、これらの微細構造が生じているのではないかと思われる。

一方、2層結晶の回折強度曲線を図7.7.5に示したが、こちらは二つの特徴がある。一つは全体に強度がかなり小さいこと、もう一つはいくつか鋭い構造が観察できることである。左右の対応する逆格子点の結果は対称性が良く、このデータを信用して議論できる程度には良い結晶が得られていることがわかる。ところが、予想では図7.5.5のようにそれぞれの逆格子点でいくつかのピークが周期的に現れるはずなのに対して、実験結果の方はごく稀にスポットを生じる逆格子点が存在する、というだけである。これらの大きなピークは単層結晶の場合の輝度の数倍であり、確かに2面間での建設的干渉が起こっていることがわかる。

エネルギー配分

ここで、回折像を撮影している CCD カメラの撮像面の位置にピンホールとパワーメータを置いて、それぞれのスポットの強度を計測し、結晶に入射した光がどちらにどのように振り分けられるかを調べた。このとき、対物レンズの端面反射による干渉により、光量はわずかのセッティングの違いで大きく変化し、正確に測定するのは困難であったが以下のことがわかった。

視野に結晶も何もない状態との比較から、単層結晶に入射している光のうち、0次光や様々な回折光としてレンズに入射して観察されているのは、わずか33.6%で、残りの66.4%はレンズに入ることなく散逸していることがわかった。これは結晶の規模が小さいこと、波長と球径が近く共鳴が強いことなどにより、強く光が散乱されて、レンズ以外の方向にも多くの光が流れてしまっていることを意味している。さらにこの33.6%の内訳を調べてみると、1次光がそのほとんど（結晶入射光の26.6%）で、結晶を素通りしてそれ以降の層に到達する0次光はわずかの部分（結晶入射光の7%）でしかなかった。1次光の回折率が異常に高いようにも見えるが、これは6個（G1～G6）あるからで、個々のスポットに対する回折率は、4.4%である。

図7.5.5の計算に当たっては、他の層での減衰は無視できるほど小さく、どの層に入射する光も同じエネルギーであると仮定していた。しかしながら、実際には2層目に入射する光は1層目でほとんど減衰してしまわずかしかなないのである。

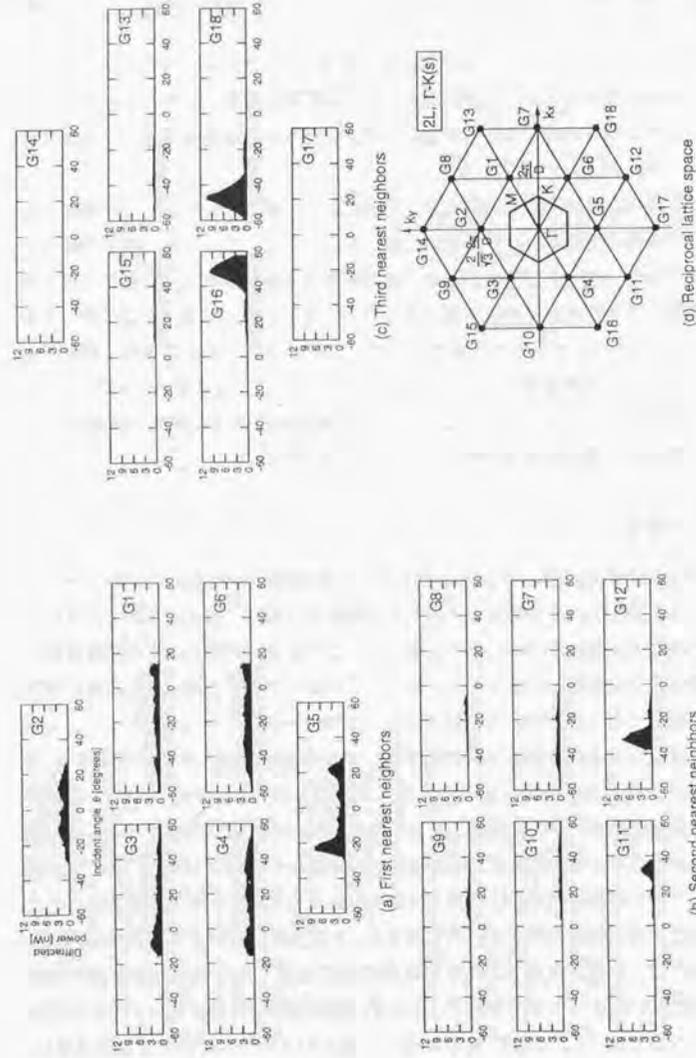


図 7.7.5 2層結晶の回折強度曲線の測定結果

この多くもやはり2層目で散乱損失を受けるであろうから、観察できる光の量はさらに少なくなる。その様々に減衰する要因が働いた結果が図 7.7.5 である。計算上は、層を増やすと、図 7.5.4 から図 7.5.5 にかけての変化のように、干渉のためにピークが大きくなった。しかし、現実の系では干渉で強め合う効果よりも損失する効果の方が大きい。少なくとも同じスケールで単層と2層の回折強度を比較している2層結晶の重要な構造を過小評価していることになる。

簡易理論との比較

そこで、2層結晶の回折強度曲線を図 7.7.6 のように拡大してみた。その結果、このスケールの領域では強くなったり弱くなったりの変化をしていることがわかった。対応する対称な逆格子点では曲線も対称になっているので、これらは明らかに構造に起因する微細構造であってノイズではない。また、全体的に単層結晶の時の微細構造に比べると凹凸が大きくなっている。従って、この図が図 7.5.5 と対比して比較すべき図であると思われる。ところが、これを比較してみると、よく対応する部分もあるし、まったく対応しない部分もある。例えば、G2 の挙動はまったく異なっている。一方で、G6, G4 は非常に良く一致している。他のものは似ているとも似ていないともどちらとも説明できる。

いずれにしてもわかることは、先の単なる周期構造を考慮したモデルがあまり良いモデルではなく、2面間の回折波の干渉だけでない、別のメカニズムが回折の強弱を決めるために働いていることである。それはすなわち球の共鳴であり、フォトニックバンド効果であると思われる。

ところで、簡易理論モデルでわかることは、干渉により生じたピークの高さはどれも一定と言うことである。これは干渉に関与した波面の数の2乗としてピークの高さが決まる。図 7.7.6 のそれぞれの隣接逆格子点ごと ((a), (b), (c) ごと) にピークの高さを比較してみると、それぞれ、たしかにピークの高さは一定になっている。第1隣接点ではおよそ $2.5nW$ 、第2隣接点では $1nW$ 、第3隣接点では $0.5nW$ である。ところが、いずれにもそれとは逸脱して大きなピークが存在している。G5 と G11, G12 と G16, G18 である。それぞれ、同じ隣接点のグループの他のピークの高さと比べると、3倍、8倍、21倍という異常な高さである。しかもこれらのピークは非常に鋭い。2層結晶ではこの数倍広い幅を持ったゆるやかなピークのはずであるから、そのピークの中でもさらにある条件を満たす部分だけが特別に成長していると見える。この異常さは再び図 7.7.5 に戻ってみても際だっている。60%以上

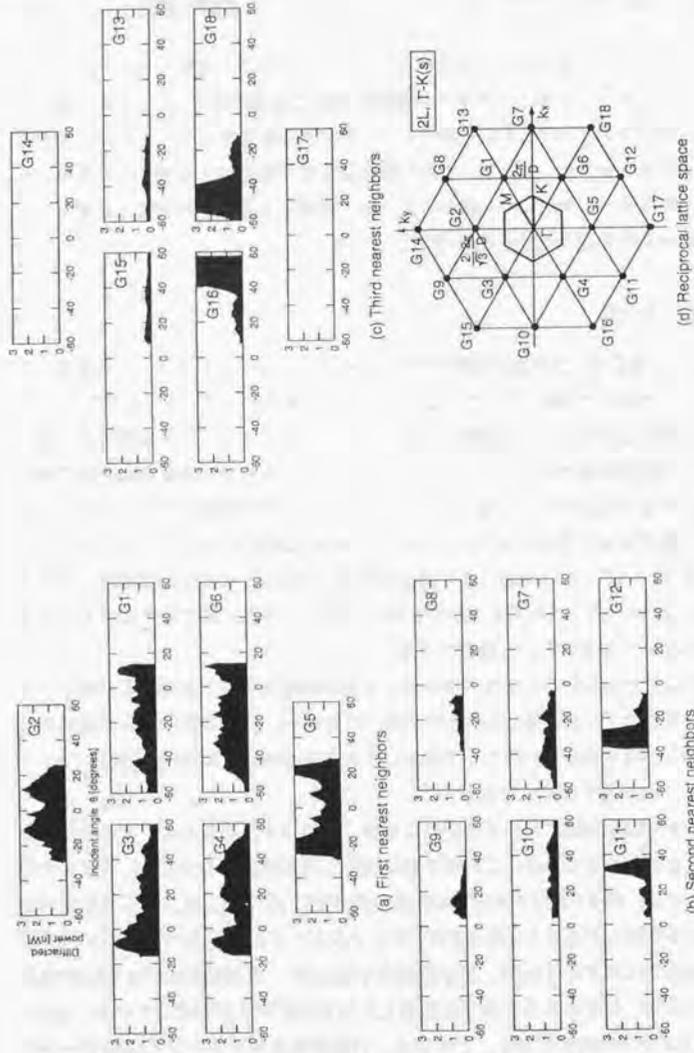


図7.7.6 2層結晶の回折強度曲線の測定結果（スケール補正後）

の光が1層目の結晶で散逸しているにもかかわらず、1層目の時の対応入射角度と比較して、2倍から5倍の強度になっている。

異常ピークを生じている格子面

この測定系ではフーリエ面を観察することによって波数ベクトルを直視しているとはいえ、輝点の相対関係から逆格子ベクトルのXY平面への投影ベクトル G_{\parallel} がわかるだけであり、 G のZ成分は知る事ができない。そのためは、結晶中の光の伝搬速度、あるいは構造の効果を加味した屈折率を知らなくてはならない。図7.5.6に示したのは結晶中を進む光が感じる屈折率が $n=1$ のときには、どのような格子面に相当するかと言うことである。しかし、どの異常ピークも比較的近い位置に格子面によるピークがあり、他の格子面によるピークは遠いので、この対応する面と考えるのが妥当ではないと思われる。そうすると、図7.7.7の格子面が各異常ピークに対応することになる。さらに、このピークの頂点が、 $n=1$ のときには図7.5.6の位置に生じるべきであるが、実際には結晶には何らかの透過屈折率 n_{eff} （等方的と仮定）を考える必要があり、これを考慮したブラッグ反射である結果として、図7.7.5の位置に生じたと考えることもできる。ところが、そのように計算してみると、 $G5$ については $n_{eff} = 0.69$ 、 $G16, G18$ に関しては $n_{eff} = 1.00$ 、 $G11, G12$ に関しては n_{eff} は実数の値を取り得ない。これは明らかに異常で、 n_{eff} を考慮したこと自体がおかしかったことを意味している。

明らかなことは、これらの異常ピークは簡単な回折や屈折としては取り扱いができないということである。

7.7.3 多層結晶のフォトニックバンド効果に関する考察

異常回折の物理的描像

2層結晶の回折はほとんどの逆格子点でほとんどの入射条件で、多くの光が散逸し、顕著な回折を示さない中であって、いくつかの特定の条件を満たす場合にだけ、それまで散逸していた光も含めて、多くの光がある方向（ $G5$ や $G11$ のこと）に向かって流れていくことを示している。

これがバンド図においてどのような部分に相当するのには非常に興味があるが、まだ $Z=2.7$ という高周波域でのバンド構造はわかっていないので、今は議論できない。単層フォトニック結晶のバンド構造がスペクトルから得られたように、ここ

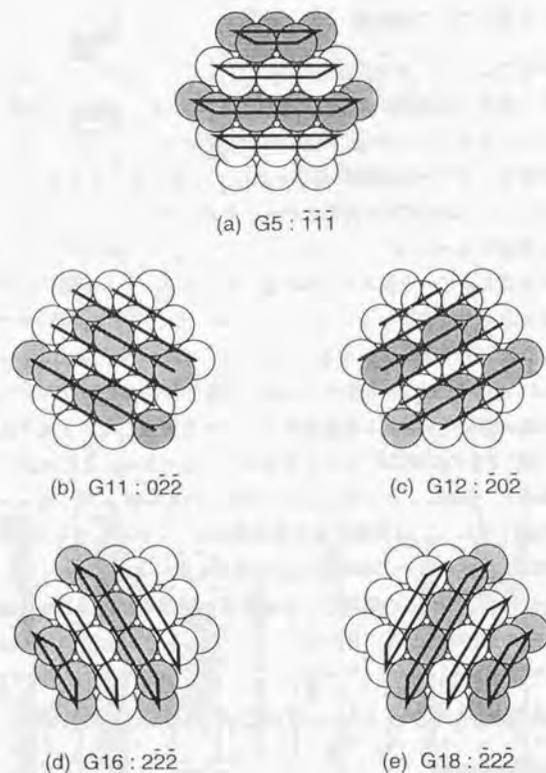


図7.7.7 各異常回折ピークを生じさせていると思われる格子面

でもさらに色素レーザーなどを用いて周波数を系統的に振れば、どのような現象がこの回折の発生に寄与しているか、わかってくると推察される。今はサイズパラメータ $\alpha = 9.9$ という高周波領域を考えているので、球の表面を周回するウィスバリングギャラリモードが重要な役割を果たしているかも知れない。

現在は、まだこのような高次のブラッグ反射については理論的にも実験的にも調べられていないので、どう考えるべきかの定説もあるわけではない。最近 Kosaka らにより発見されたスーパーブリズム効果と関係があるのではないと思われる [96, 97]。これはフォトニックバンド効果で生じた分散曲線の異常により、結晶中の群速度が異常な挙動を示すために生じていると説明されている [55]。

残された課題

今回の実験はまだ不完全で、いくつかやり残したことがある。まず、偏光や他の方位についてまだ詳細に観察していない。 $\Gamma-M$ 方向については、計算上は図 7.5.5 と同様な回折強度曲線が得られるのであるが、測定結果は非常に単調で、 $\Gamma-K$ 方向で見られたような異常なピークも特に観察されないことだけは確認してある。

また、今回は波長の変化させられないレーザーを用いたが、色素レーザーを用いるとどのような変化が見えるのかは興味深いことである。また、今回の結晶の上にさらに3層目を積むとどうなるのか、特に3層目の選択により fcc と hcp とが決まるのであるから、さらに顕著な変化が見られるかも知れない。

7.7.4 多層結晶のフォトニックバンド効果のまとめ

本研究では、微小球配列手法で製作したフォトニック結晶のブラッグ反射特性を調べた。そのために、単層フォトニック結晶と2層フォトニック結晶を製作し、回折強度曲線を第3隣接逆格子点までについて測定した。

その結果、まず、次元の効果により、わずか1層うえに重ねるだけで、単層結晶の回折の様子とは異なることがわかった。また、ある特定の条件で、共鳴的な異常に強い回折が生じることがわかった。この効果は球の共鳴と格子の相乗作用ではないかと期待され、良く知られた簡単な回折や屈折で解釈することはできない。このような顕著な効果を、わずか1辺が3個しかなく、層数も2層しかないような有限の小規模な微小球配列が示すことがわかった。

Figure 7.1: Schematic diagram of a photonic crystal slab. The diagram shows a slab of material with a periodic lattice of spheres. The lattice constant is denoted by 'a'. The slab thickness is denoted by 'd'. The refractive index of the slab is denoted by 'n_s', and the refractive index of the surrounding medium is denoted by 'n_0'. The diagram illustrates the periodic structure and the parameters used in the study.

第8章

フォトニック構造物研究と微細作業技術の今後の展望

Figure 8.1: Schematic diagram of a photonic crystal slab. The diagram shows a slab of material with a periodic lattice of spheres. The lattice constant is denoted by 'a'. The slab thickness is denoted by 'd'. The refractive index of the slab is denoted by 'n_s', and the refractive index of the surrounding medium is denoted by 'n_0'. The diagram illustrates the periodic structure and the parameters used in the study.

8.1 フォトニック構造物に関する研究の将来展望

8.1.1 微小球配列法による研究の展望

本研究ではもっとも基本的な微粒子配列である最密充填結晶についてしか調べなかったが、それを題材として、微小球配列手法で製作したフォトニック構造物において、確かに波長サイズの微細構造と光との特異な相互作用の様子が観測できることを示した。手法としての信頼性が証明できたので、これからは、個々の散乱体の性質を変えたり、結晶構造を変えたり、様々な周波数領域に着目したり、様々な測定手法を適用することにより、多様に研究を展開していくことができる。

多様な散乱体

- 色素ドープ球を用いることにより、発光現象の輻射場による制御という共振器量子電気力学（共振器 QED）、あるいは量子光学上、もっとも興味を持たれている現象を調べることができる。
- 金属球を用いることにより、金属特有の Mie 共鳴を示す球の共鳴モードの結合の様子を調べることができる。金属を主体としたフォトニック構造物では最低周波数領域に全反射による大きな禁制帯が生じることが予測されている [98]。
- 空孔部を高屈折液体で充填することにより、屈折率コントラストの逆転した構造を実現できる。実際のフォトニックバンドはエアアトム状態（原子部分の方が屈折率が小さい）の方が顕著なバンドギャップを示すことが知られている。したがって、微粒子配列による結晶でも完全なフォトニックバンドギャップが観察できるかも知れない。
- その液体に色素を混ぜる。これにより、エアアトムの発光の量子制御を調べることができる。
- 空孔部を気相成長法による半導体などの固体で充填する。CdS などの CVD で微粒子配列の間隙部を充填したエアアトムの実現例が報告されている [105, 106]。本手法の場合にもそのままこの戦略は適用でき、完全なフォトニックバンドギャップの実現やその中の吸収制御について調べることができる。

- 空孔部を無電界メッキによるNiなどの金属で充填する[315]。金属メッシュによるフォトニック結晶は金属特有の遮断周波数を持つ特異なバンド構造を持つことが期待されている。Yablonovitchらはこれを金属の部品を組み合わせることでマイクロ波領域で実現したが、細密充填球の隙間を金属で充填すれば容易に同様の構造が実現できる。
- 中空球を用いることにより、さらに体積充填率の小さな構造物を実現できる。あまり体積充填率を小さくしすぎてもバンドギャップは再び狭くなる傾向があるので、安易にはその効果は期待できないが、これまで理論的にも扱われていない系であり、興味深い。
- その空孔部を液体で充填すると、本当のエアアトム、すなわち、原子部の屈折率が周辺より小さいだけでなく、 $n=1$ という構造が実現できる。これは屈折率コントラストが大きくなるのでバンドギャップの実現や、さらに色素を液体中に混ぜることにより、顕著な発光制御が観察できると期待される。
- 球表面を金属コーティングすることによっても大きなバンドギャップが実現できることがマイクロ波でのBrownらの実験により示されている。
- 球表面をさらに微小な微粒子でコーティングした複合粒子を用いても、空隙を液体で充填したり、表面を金属や気相成長による半導体でコーティングした系と同様の効果が得られる。
- さらに上記の組合せで実に複雑で多様な構造を実現することができる。
- 個々の散乱体をこれまでは球と限っていたが、球以外の異種形状を考慮すると可能な系の組合せはさらに広がる。

多様な結晶構造

- 異種散乱体を組み合わせたNaClあるいはGaAsのような多元系結晶によりちょうどシリコンの欠点をガリウム砒素が補うように、特徴のある結晶を実現できるはずである。
- さらに散乱体の材質だけでなく、異種形状の粒子を複合させることによってさらに多様な多元系結晶が実現できる。

多様な散乱領域

サイズパラメータとQ値の関係に着目すると、一つの材質による散乱についても散乱現象をいくつかのフェーズに分けることができる。屈折率1.6程度の在り来たりの光学材料についても、Q値はわずかなサイズの違いでけた違いに激変する。それにともない、期待できる現象も変化する。それぞれの領域についてどういう面白い研究が実施できるかを考えてみる。

- 大きめのサイズパラメータ領域($x \geq 10$)では、Qの極めて高く、低損失で局在したウイスパリングギャラリモード(WGM)が発生する。このような微小球を配列するとWGMどうしのカップリングが発生し、多数の縮退モードが結合により分裂し、共鳴線のスプリットなどの影響が現れるはずである。これは原子の電子系でいうと比較的大きな原子の外殻電子の相互作用のような弱い結合問題として扱うことができるはずである。理論的にこれを扱うには結合係数を導入し、若干の相互作用が特定のモード間で生じると考えればよい。実際に光学顕微鏡下で1個1個の微小球を操作し、2~4個の配列を製作し、共鳴の結合を観測する研究の例が既に現れている[276, 277, 278]。
- 小さいサイズのサイズパラメータ領域($x \approx 1 \sim 10$)の結合問題とは正に周期系で言うところのフォトニック結晶の問題である。この場合にはs軌道やp軌道のハイブリッド軌道のように本質的な軌道の変革が発生し、極めて強い結合問題として取り扱わねばならない。有限系であれば例えば八木アンテナの電界増強効果などはこの領域の現象として扱えるはずである。

微小球サイズ、観察対象、測定手法の対応

微小球サイズD、周波数範囲Z、およびその周波数領域で有効な分光計測手法を整理し、微小球配列を核にしてどんな現象を観察することが可能かを考えてみると、いくつかの重要な寸法領域が存在することがわかる。

- 例えば $\phi 0.6 \mu\text{m}$ の屈折率1.6の微小球を配列すると、第7章で顕著なバンドが観察された領域は、波長900nm程度になる。これは正にTi:Sapphireレーザが得意とする領域である。特に、超短パルス実験が容易に行なえることがこの領域の特徴であるので、低次バンドでの群速度の実測など、興味ある実験が行なえるはずである。

- 例えば $\phi 0.4\mu\text{m}$ の微小球を配列すると、波長 600nm 程度で重要なバンド構造が観察できるはずである。この領域はコヒーレンシーに優れ、高感度計測や画像計測可能な色素CWレーザが得意とする領域である。特に、ホログラフィックな干渉計測手法による位相測定など、本研究で行なった斜入射透過スペクトルを用いた簡易計測手法でなく、複素透過係数の直接測定を行なうことができる。
- あるいは $\phi 0.4\mu\text{m}$ の微小球配列と色素CWレーザを用いると、干渉による計測法の他にも、エリプソメトリ法を用いた複素透過係数の直接測定が可能ではある。このような位相測定が比較的容易に行なえることは点検出器、面検出器や各種光学部品、光源の揃った可視領域特有の特長である。
- さらに $\phi 0.4\mu\text{m}$ の微小球の配列では、色素CWレーザを光源とした近接場光学顕微鏡による電界分布計測が行なえる。これにより実際の電界ベクトルの分布やエネルギーの面内微小構造間での流れが直視できるはずである。
- $\phi 0.4\mu\text{m}$ の色素をドープした微小球の配列では、波長 600nm 程度で重要なバンド構造による発光制御が観察できるはずである。ここで、 nm オーダの励起光源としてSEMの電子ビームそのものを用いることができる[316]。例えば、球の様々な場所を励起することにより特定のモードを励起することができるかも知れない。時間分解計測に関しても、ストロボ電子光学系を組み込んだ場合には 20ps のパルス励起は可能である[317]。

多様な研究展開

これまではフォトニック構造物の特性と言うことで諸効果を一緒に扱ってきたが、何に着眼するかで様々な重要な知見が得られ、それぞれに大きな分野に発達していく可能性を持っている。

- 分散制御による位相整合条件の人工制御は非線形光学材料の普及のために欠かすことのできない重要な効果である。
- バンドギャップによる自然放射の抑制やバンド湾曲により自然放射の増強は新世代の発光デバイスとして有望である。

- 近接場電界増強効果は微弱発光計測、微弱非線形分光計測等において、かつての銀増感法をさらに人工制御したテクニックとして重要な重要な役割を果たすであろう。
- 離調粒子組合せによる八木アンテナ効果は本研究で独自に提唱しているものであり、これまで研究されていないが、本手法で得意とする有限配列の系統実験により電波帯と同様の電界増強の効果が観察できるものと期待している。
- 光の局在については、従来純粋にランダムな媒質について調べられてきたが、人工的に製作した構造物における局在は実験上はまったく新しい課題である。
- 通常はあまり議論されていないが、もっとも興味深い現象の一つが単一光子のこのような構造中での挙動であろう。普通は量子光学的效果を調べるには発光特性を調べるしかない。ただの受動的特性の測定では、純粋的に古典的な電磁場の問題がわかるだけと考えられている。ところが、単一光子での受動的特性を調べると、機械的構造に起因する輻射場の効果であることを直接的に示せるはずである。それは多くの光子の干渉の結果として受動的特性が発現するのでなく、そこにその構造物が存在するだけで、他の光子とは干渉できない単一光子が仮に反射されたとしたら、それは「場」による効果に他ならないからである。単一光子の応答が量子光学的知見を与えてくれるのは、必ずしもフォトニック結晶に限った話でなく、ランダム媒質のコヒーレント後方散乱ピークや単一球のMie散乱でも同様である。単一球のMie散乱という極めて古典的な問題ですら量子光学の側面を持っているのである。

8.1.2 微細加工技術と微粒子操作技術

本論文では、研究手法として大勢を占めている先端微細加工技術によるフォトニック構造物の製作に関してはほとんど述べず、微粒子操作技術という特殊な手法について述べた。この両者はそれぞれに得意な領域と不得意な領域があり、どちらか一方ですべての研究に役立てるわけではない。現在既にそうであるように適当に棲み分けたり、あるいは徐々にその動きが見られるように融合することによって様々なフォトニック構造物研究に役立てられて行くはずである。

微細加工技術と微粒子操作技術の棲み分け

微細加工技術は、どのような機能のデバイスが実際に実現できるかを指向した研究に適しており、逆に微小球配列によりデバイスを量産することは明らかに考えにくいし、あまり期待すべきでない。一方、微小球（微粒子）配列技術は系統的实验を行ない、どのような現象が期待されるのか、どのようなデバイス応用があるのかがわかっていない中間領域の理論の構築に役に立つはずである。その際に、その場で系統的に構造を変えて遷移を観察するインタラクティブ計測ができることが本手法の特長に有望な点である。また、自己組織化技術は場合によっては比較的大型の光学材料として用いられることもあるかも知れないが、基本的には粒子間隔や屈折率コントラストなどを系統的に変えて実験するのに適している。

微細加工技術と微粒子操作技術の融合

微粒子操作技術は本研究で初めて確立した程度であるので、まだ具体例はないが、微細加工技術によるテンプレートと配列技術の融合に関する研究の計画は広まりつつある。本研究では愚直に粒子の位置を計測によって制御するという原始的な方法を採用したが、半導体加工技術でテンプレートを製作し、その上に安定配列されるように粒子を載せていけば、より容易に均一で大規模な結晶が製作できる。テンプレートが役に立つのは自己組織化技術においても同様でこちらは既に用いられている手法である。これらは2次元精密加工が得意な半導体加工技術と3次元加工が得意なアセンブリのそれぞれのメリットを活かせる方法である。

このほか、逆に微細加工技術で製作した3次元構造物に微粒子配列技術で修飾して半導体加工技術だけでは実現できない特性を持たせたり、あるいは自己組織化技術に1個1個の微粒子をハンドリングする技術を組み合わせて大規模で完全に人工的な構造を実現する方法なども考えられる。

8.2 微粒子の機械的配列手法に関する将来展望

8.2.1 微粒子配列技術の限界の向上

本研究でわかった大事なこと

本研究では実際に様々な微粒子の配列を走査型電子顕微鏡下のマニピュレーションにより実行し、実際にやってみるまではわからなかった次の二つのことを明らか

にした。

- 意外にも0.5 μm 程度の所に大きな壁があり、これより微小な対象物のハンドリングは急激に困難になる。
- ガス放出とその電子ビームによる析出というこれまで重要視されていなかった要因が、その最小サイズを制限していた。

もっと小さなものを扱うには？

これらの知見から、もっと小さな対象物を走査型電子顕微鏡下のマニピュレーションにより扱おうとするとどのような戦略を採りうるかが明快にわかる。

- 一つの方法はじっくり見ながら作業すること重視する方法である。この場合、本質的に汚染物の数値の削減が不可欠である。このことは、超高真空環境の電顕下マニピュレータを用いねばならないことを示している。より具体的には超高真空系にベーク可能なマニピュレータを搭載することになる。物理的には大きな問題ではないが、これは技術的には大きな問題である。かといって、必ずしも無理なわけではなく、Sugaらのマニピュレータ[149]は実際にこの構成を採っている。マニピュレータのベーク可能にともない、材料も脱ガスのないベーク可能なものに限られることとなる。
- もう一つの方法は、あくまでも汎用的な真空レベルで実現することを重視する方法である。この場合には、観察時間を数短縮することが本質的に求められる。つまり、実際に高密度実装機が光学顕微鏡下でそのように作業しているように、事前に1フレームのみ画像を取り込んでおき、そこでの計測結果に応じてフィードフォワード制御を行ない、作業をしている間には観察しないでオープンループ作業を行なうという形態になる。かつて、Satoらにより不確実な世界での作業ゆえの帰結として、じっくり観察しながら作業するというナノハンドアイシステムに関する提案があったが[186]、現実求められる作業は、サブ μm の微小対象物に対しては、このような作業ではなかったようである。ここで注目すべき研究に齊藤による解析と実験がある[121]。この研究は対象物と工具先端との位置関係がある精度でわかっているオープンループでも高い信頼性でピッキングできるし、工具に作用する力が測定できれば、あるいはより簡易的に対象物の工具先端への付着位置がわかれば、オー

ブングループでも高い精度でプレスできるという知見である。これは、不確定な力学環境下であるにも関わらず、ピックもプレスも作業中には観察しなくても良いことを示している。残念ながらまだ一般の場合に対して適用できる程度の確固たる実験結果ではないが、一つの走査型電顕下マニピュレーションの形を提示しているのは確かである。

本研究でわかった微細作業技術マップ

図 1.3.1 では、微小寸法領域における作業技術のマップを示し、大きな空白の領域を埋めることが一つの大きな課題であることを説明した。また、その一つの方法として走査型電顕微鏡下でのマニピュレーションという手法を提案し、その有効性を示した。ところが、その結果、さらにこの空白の領域が精密には二つの領域に分けられることがわかった。

- 100nm 程度以上の物体：通常の高真空 SEM 下でのマニピュレーション
- 100nm 程度以下の物体：ベーク可能な超高真空下マニピュレーション、あるいは中真空 SEM 下での自動高速マニピュレーション

8.2.2 物理学研究と微細作業技術

物理研究に必要な微細作業の分析

本研究で取り扱ったのは、「微細作業」といっても、対象物に針状工具の先端で触れて持ち上げたり、転がしたり、滑らせたり、置いたりというごく限られた作業に過ぎない。本研究ではこれだけの限られた作業が微小世界ですべてでフォトニック構造物に関する様々な知見が獲得できることを示したが、これ以外の多様な作業が実現できれば再現のないほど多様な物理学、あるいはその他の研究手法として役に立つはずである。必要な作業とはいろいろあるが、特に微小構造物の研究を進める上で実験者が光学顕微鏡をのぞき込んで行っている作業がそのまま求められるであろう。具体的には「割る」「折る」「切る」「曲げる」「磨く」「清拭する」「接着する」などの動詞として記述することができる。大きな分野でのマニピュレーションにおける作業は高瀬らにより整理されており、これがそのまま微細世界でも求められると佐藤により予想されていたが [134]、研究現場でのニーズは正にその通りである。また、通常はあまりそうとは認識されていないが、これらの

要素作業を様々な寸法領域で一つ一つ実現していくことがインスツルメンテーションの一分野として重要である。そのためには必ずしも高級なシステムが必要とされているのではない。

「実験」という行為の本質

ここで、「実験」とはどのようなことであるのかをあらためて考えてみる。

実験とは「予測を確かめたり、新しい情報を得るために、ある条件を設定したときに、どのような自然現象が起きるかを調べ、自然に関するより正しいモデルを得ること」と定義できる。

実験は「1. 企画」、「2. 条件設定」、「3. 測定・観察」、「4. 解析・モデル化」という4つの過程から成る。実際の実験においては、測定すべきパラメータの決定や使用する装置の選定・調整、パラメータ間の相関関係の把握などをしながら、試行錯誤的に実験方法を確立していくのが普通である。これは暫定的に条件を設定し、測定・観察しては、逐次その結果を予想結果と比較してモデルを修正し、次の行動（試行）を企画していることになる。このことは4から1に向かう大きなループ（試行錯誤ループ）として考えることができる。また、これとは別に、途中で特に思考過程を経ることなくパラメータを変えては測定・観察するルーチンである小さなループ（データ収集ループ）も存在している。

データ収集ループは存在しない場合もあるが、試行錯誤ループは実験に本質的に不可欠である。手順が確定してこのループが存在しない場合は、「実験」ではなく「試験 (Testing)」に過ぎない。

このように、「実験」とは、本質的に試行錯誤の要素を持った反復的な行為である。この反復性を実現するためには、設定条件が変更できること、設定条件の変更時に時間を要しないこと、という2つの条件が必要である。

微細作業技術とはこの実験の本質である試行錯誤ループを保証するものとみなすことができる。逆にこの試行錯誤ループが実現しにくいのが半導体加工技術などを用いた方法で、これは「試験」である。よく両者を混同し、半導体加工技術の工学的洗練さと微細作業技術の無用さを解く議論があるが、両者は本質的に異なる精神活動であって、どちらが優れているという議論の対象にならないものである。

8.2.3 微細作業技術の展望

微細作業技術は物理学研究だけでなく、科学・産業など様々な局面において重要な普遍的な人間支援技術である。しかし、研究手段として用いるときのように個別の対象物について1回限りの作業を行なう場合と、産業の製造手段として大量の対象物に対して多数回の作業を行なう場合とでは、自ずと実現形態は変わってくる。

個別作業：個別作業は科学研究や開発の現場で頻りに必要とされると思われるが、その場その場の状況や結果に応じて人間が主体となって臨機応変に行なう作業である。このような場合には過度に効率を考えて機械化したり自動化したりすることはむしろ有効ではない。微細作業の対極にある重量物作業においては、近年、ロードバランサという器具が盛んに用いられるようになってきた[318]。これは、重量を支えるという機能は機械が実現し、それをどこにどのように移動するかという軌道は人間が軽く押すことによって実現するものである。あたかも人間の力を増倍してくれるかのような働きをする機械である。この装置は実際には人間の加える力を検知するセンサ、対象物に加わる力を検知するセンサ、対象物を実際に駆動するアクチュエータからなる。現実には電気信号入力に基づいた産業ロボット、あるいはマニピュレータとしての動作が可能な構成になっている。実際にロボットとしてのモードで利用できる機種もあるにはあるが、必ず人間の直接操作による操作が可能になっている。このことは、同じ作業を実現するにしても人間の直観的な操作に基づいて実現できる方が実際の作業現場では有効であることを証明している。あたかも重量物作業におけるロードバランサのように、微細作業において人間が不得手とする高精度の実現の部分だけを機械が受け持ち、操作は人間があたかも実際に作業を行なうような直観的な操作により作業が実現できる微細作業システムが現実には有効なのではないかと推察される。あくまでもロボットが高度な知的判断に基づいて作業を行なうのではなく、作業を決めるのは人間であることが本質的に重要である。現実の社会で必要なロボティクスとは知能ロボットではなく、人間支援機械である。

大量作業：生産現場では大量に高速にかつ、低コストで作業を行なうことが求められる。これは、これまで微細機械の組立がたどってきた道筋を考えれば一つのありそうな姿は容易に想像することができる。腕時計がそのような機械の典型であろう。現在の腕時計は実質的にはセルフアセンブリによって毎秒

1個という猛烈なスピードでかつ高い品質で製造されている[219]。腕時計の自動組立に用いられている手法を丁寧に分析すると、その多くが重力ポテンシャル下、あるいは慣性力ポテンシャル下でのセルフアセンブリで実現されているのである。例えば、1個1個の部品の搬送は振動を用いたパーツフィーダによって行なわれている。また、個々の部品は高精度に組み付ける必要はない。個々の部品の形状が組立性を考慮して最適化されており、部品をある程度の高さから落下させれば自動的に形状の整合により部品が μm オーダの高精度で組み立てられるようになってきている。これらがセルフアセンブリという意味である。さらに微小な数 $10\mu\text{m}$ あるいは数 μm の部品は、第5章にて述べたように重力や慣性力によって動きを制御するのは困難である。従って、この寸法領域で有効な力学原理、すなわち、付着ポテンシャルの下でのセルフアセンブリ、という形態に向かうのではないかと推察される。また、この時、個々の部品は付着ポテンシャルを考えた部品設計や工程設計に基づいて設計されるはずである。これはかならずしも現在の重力下でのアセンブリのように凸部と凹部とが組み合わせられるようなマクロの世界の常識に従うものでなく、例えば、凸部と凸部とが引き合って組み合わせられるような、付着ポテンシャル下特有の原理に基づいたものとなるであろう[231, 232, 233]。

Photonic crystal fibers (PCFs) are a class of optical fibers that have a periodic structure of dielectric rods in a cross-section. They have a wide range of applications in optical communication, sensing, and quantum optics. The unique properties of PCFs, such as low loss, high bandwidth, and the ability to guide light in a hollow core, make them attractive for various applications. In this section, we will discuss the recent progress in the research and development of PCFs, focusing on the fabrication techniques and the potential applications in the field of photonic devices.

The fabrication of PCFs is a challenging task due to the need for precise control of the periodic structure. Several techniques have been developed to fabricate PCFs, including stack-and-draw, co-extrusion, and sol-gel processes. Each technique has its own advantages and limitations, and the choice of the fabrication method depends on the specific requirements of the application. In recent years, significant progress has been made in the development of new fabrication techniques, such as the use of femtosecond lasers and atomic layer deposition, which have enabled the fabrication of PCFs with unprecedented precision and complexity.

In addition to the development of new fabrication techniques, the research on the properties and applications of PCFs has also advanced rapidly. The unique properties of PCFs, such as the ability to guide light in a hollow core, have opened up new possibilities for applications in optical communication, sensing, and quantum optics. For example, PCFs have been used to develop high-performance optical fibers for long-distance communication, and they have also been used to develop novel sensors for detecting various physical and chemical parameters. Furthermore, the unique properties of PCFs have also attracted attention in the field of quantum optics, where they have been used to develop novel quantum devices, such as quantum memories and quantum repeaters.

In conclusion, the research and development of PCFs have made significant progress in recent years, and the unique properties of PCFs have opened up new possibilities for applications in various fields. The development of new fabrication techniques and the advancement of the research on the properties and applications of PCFs will continue to drive the progress of this field in the future.

第9章

結論

The conclusion of this book is that the research and development of photonic devices and micro-fabrication technologies have made significant progress in recent years. The unique properties of photonic devices, such as the ability to control light at the nanoscale, have opened up new possibilities for applications in various fields, including optical communication, sensing, and quantum optics. The development of new fabrication techniques and the advancement of the research on the properties and applications of photonic devices will continue to drive the progress of this field in the future.

In addition, the research on the properties and applications of photonic devices has also advanced rapidly, and the unique properties of photonic devices have opened up new possibilities for applications in various fields. For example, photonic devices have been used to develop high-performance optical fibers for long-distance communication, and they have also been used to develop novel sensors for detecting various physical and chemical parameters. Furthermore, the unique properties of photonic devices have also attracted attention in the field of quantum optics, where they have been used to develop novel quantum devices, such as quantum memories and quantum repeaters.

In conclusion, the research and development of photonic devices and micro-fabrication technologies have made significant progress in recent years, and the unique properties of photonic devices have opened up new possibilities for applications in various fields. The development of new fabrication techniques and the advancement of the research on the properties and applications of photonic devices will continue to drive the progress of this field in the future.

9.1 結論

本研究では、1個1個のマイクロメートルオーダーの誘電体の球を3次元配列する手法を確立し、それがフォトニック構造物の研究に有効であることを証明した。

その過程で得られた主な知見は以下の通りである。

フォトニック構造物研究のための微小球配列技術に求められる要求を満足する方法として、走査型電子顕微鏡観察下での接触マニピュレーションが有効である。しかし、その実現のためには、微細作業システム設計、微小球準備、機械的操作の力学、作業支援に関する知識や技術が必要である。

微小球配列のためのシステムの設計手法を明らかにした。観察のためには、冷陰極電界放射型または熱電界放射型の電子銃を備えた高真空走査型電子顕微鏡を選択するのが良い。マニピュレータを選択する場合には、分解能などの他、目的とする作業に応じた自由度配置を考慮する必要がある。また、工具の剛性に関する考慮もバックラッシュのない作業のために重要である。微小球配列作業を実行する上では汚染物の析出が大きな問題になり、これが操作可能な微小球の大きさの下限を与える。通常の高真空SEMでは、およそ500nm程度が下限である。

微小球配列作業はまず、目的の実験に適した微小球を入手することから始まる。フォトニック構造物研究には、シリカ、ポリスチレン、ガラスなどが有効であることを明らかにした。次に、その微小球を基板上に凝集しないように分散させる手法について理論的・実験的に検討し、湿式滴下法が有効であることを明らかにした。また、微小球はある程度の直径分布を持って供給されるので、適切なものを選別して用いる必要がある。画像情報・光散乱・質量計測の各手法で実現できる分級精度を比較した。適用できる粒径が限定されるものの、光散乱法が特に高精度である。最も簡単な画面上で直径を測定する手法では $\pm 0.5\%$ 程度の選別ができ、サイズパラメータの小さな領域での実験にはこれで十分である。

微小球の力学を理論的・実験的に検討し、操作手法を明らかにした。そのためにまず、微小物体の力学に関する従来の知見を整理したところ、マイクロロボティクスの分野で議論されている付着力の諸理論よりも、表面エネルギーを考慮した弾性接触を考える方が妥当であることがわかった。電顕下での微小球と工具の間の付着力を実測した結果によると、帯電と時間効果が重要であることが明らかになり、付着力を制御するには本質的に帯電を防止すること、一度帯電したものは界面を機械的に剥離することが重要であることがわかった。さらに、電顕下での微小物体の帯

電現象を理論的・実験的に調べ、加速電圧によって帯電の状態を制御できること、絶縁性基板でも薄板化すれば帯電が防止できることを明らかにした。また、球の基板への付着力が高分子コーティングによって増強できること、球の工具への付着力が不十分な場合には工具への電圧印加が有効であることがわかった。

微小球配列作業を遂行する時には様々な周辺技術が必要であった。どのようにして設計通りの構造物を製作するか、どのようにして、以前に作業を行なった位置を探し出すかという再注視、が重要な問題である。本研究により、画像テンプレート呈示手法が有効であることがわかった。また、再注視のためには階層的画像記録が有効であった。また、作業を効率よく進めるためには階層的な作業パッケージの設計が重要なことがわかった。

微小球配列技術がフォトニック構造物研究に有効であることを証明した。それは、理論と実験の唯一の接点である微小球配列のフォトニックバンド効果を実証すれば証明できることである。2次元フォトニック結晶の透過スペクトルの角度依存性から分散曲線を直接計測したところ、理論計算の結果を検証し、微小球配列に起因する分散異常が発生していることが確認できた。さらにそのような結晶中でのフォトンの振る舞いについて考察し、光が球でのトラップ・トンネルを10数回繰り返すこと、時間反転反射光が発生している可能性について述べた。フォトニックバンド効果が実証できたことは、これからは有限規模の任意構造におけるフォトンの挙動は微小球配列技術を用いて実験的に調べていけばよいことを意味している。このことを受けて、多層フォトニック結晶のブラッグ反射を系統的に調べたところ、共鳴的な強いブラッグ反射の発生を確認できた。この現象はこれまでに知られていないもので、起源も良くわかっていないが、球の共鳴に起因すると思われる。

最後にフォトニック構造物研究と微細作業技術の将来の展開の可能性について考察した。その結果、微小球配列という一つの限定的な作業が、極めて多様なフォトニック構造物の特性を明らかにできることや、より一般的な微細作業・微細加工技術がフォトニック構造物研究に貢献できることがわかった。また、微小球配列技術や、より一般的な微細作業は、物理学全般さらには人間活動全般において貢献できることがわかった。

9.2 本研究の意義

本研究で達成されたものが、微小物体操作に関する研究やフォトニック構造物に関する研究において、どのような点が従来にない新しい点であるかを以下に整理する。

微細作業研究における本研究の意義(1): フォトニック構造物に関する基礎研究手法として微小物体操作技術が有力な候補であることを指摘し、実際にフォトニックバンド効果に関する新たな知見を得た。

従来の微小物体操作研究は、生物学者達が自ら行ってきた無数の作業や Johansson の微細構造評価の研究を除いては、実際に新たな価値創出に結びついた応用例はほとんど見られなかった。

本研究は、ニーズに関する調査と理解を元に明確な目標を示し、実際に物理学研究上意味のある新しい知見を獲得した。その結果、微小物体操作技術をフォトニック構造物研究のための一つの研究手法として位置づけることができた。

微細作業研究における本研究の意義(2): マイクロメートルオーダーの3次元微小球配列を機械的操作により初めて実現した

マイクロメートルオーダーの機械的接触操作による配列に関する報告は、3次元配列のみならず2~1次元でもはじめてではないかと思われる。これまでマイクロメートルオーダーの物体の2次元規則正しい配列は、様々な自己組織化手法で実現されてきたが、任意の大きさの周期配列や任意の配列ができるようになったのは初めてである。また、設計通りの層数だけの3次元的に制御された配列も本研究がはじめてである。本研究で実現したものが、知る限りでは光顕や電顕の直視下で組み立てた最小の3次元構造物ではないかと思われる。

微細作業研究における本研究の意義(3): 微小球の機械的3次元配列に必要な知識や技術の体系を初めて整理した。

微細作業システム設計、準備技術、力学理解、支援技術に大別できる諸要素に分解できることを明らかにした。今後ますます盛んになるであろう微細作業技術による物理学研究において、後に続く研究者に個々のケースに応用の効く考え方の指針を与えるため、本研究では特定のシステムや特定の目的にしか適用できない知見にとどまらないよう、できる限り普遍性を持たせて議論する努力をした。微細作業技

術に関する研究は従来マニピュレータや操縦システムの設計論や開発など典型的な機械工学の枠組に収まる範囲に限られていたが、具体的な目的作業を実現する過程で、材料選択から作業手順の計画の仕方まで、多くの学際的な知識や技術が必要であることが明らかになった。

フォトリソグラフィ構造物研究における本研究の意義(1):フォトリソグラフィ構造物に関する基礎研究手法として微細作業技術が有力な候補であることを指摘し、実際にフォトリソグラフィバンド効果に関する新たな知見を得た

従来のフォトリソグラフィ構造物研究は現状の微細加工技術の未熟さが障害となっており、現実可能なコロイドを用いた実験では、個々の微小球の相対的位置関係については人為的に制御できないため、系統的な実験を行なうには不十分であった。

本研究では、この分野でこれまで考慮されてこなかった微細作業技術の適用を初めて提案し、実際にそれが有効な実験手法であることを証明した。すでに同様の微小球の機械的配列手法を取り入れるグループが他に現れるに至ったが、本研究はそこに何らかの影響を与える一つのブレイクスルーになったのではないかと考えている。

フォトリソグラフィ構造物研究における本研究の意義(2):フォトリソグラフィ結晶中の光子の振る舞いが格子数や層数によりどのように変化するかをはじめ系統的に調べた

2次元結晶中の光子の滞在寿命が格子数増大に連れて長くなる様子は物理的な概念としては当然のものとして語られてきたが、透過スペクトル構造の先鋭化という形で実験的に初めて検証した。また、ベクトル球面波展開法による2次元バンド計算を光波帯で初めて実験的に検証する実験にもなった。格子の次元を2次元から3次元的に拡大すると、ブラッグ条件が厳格になり、多くの回折光が消滅するが、中には逆に共鳴的に増強されるものもあることを見いだした。

フォトリソグラフィ構造物研究における本研究の意義(3):光の波長オーダーの数個程度の散乱体の人工的なアレイによる多重散乱現象の重要性を初めて指摘した

「フォトリソグラフィ構造物」というと現状では「フォトリソグラフィ結晶」と同義と受けとめられていると思われるが、本研究ではすべての電磁波帯における現象を整理し直すことにより、散乱体が無限に周期的に配列された結晶以外にも、電波の世界の八

木・宇田アンテナに相当する、精密に設計された有限構造物という重要な構造物の形態があるのではないかと提議した。

A 必要な1次分級精度に関する考察

A.1 目的

最終的に必要な球の直径精度が厳しいときには、はじめから精度良く分級され、直径の揃った微小球サンプルを用意すればよいのは当たり前である。しかし、ある要求精度が与えられたときに実際にどのくらいのサンプルを用意すればよいのかを定量的に把握しておくことは重要である。現実には現在の微小球製造技術や粉体分級技術で実現できる直径精度は限られている。その精度に比較して何桁も高い直径精度が必要な光学実験を計画しても、必要な個数の精度範囲内の球を現実的な作業時間内に見付け出すことができなければ、そのような実験は現実には実現不可能だからである。どの程度のサンプルが入手可能なときにその実験がチャレンジに値するかどうか、ある実験をどうしても実現したいときにどの程度の1次分級を実現せねばならないかを判断する基準を与えることがこの考察の目的である。

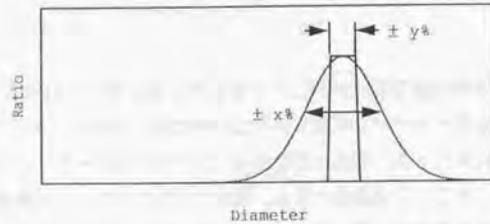
A.2 仮定

1次分級は一般に球を大量に処理するプロセスなので、得られる直径分布は正規分布に従うものとする。その分布の広さを平均直径に対する標準偏差の比を用いて $\pm x\%$ とする。また、最終的に光学実験に用いる球は直径が $\pm y\%$ に納まっていなければならないとする。

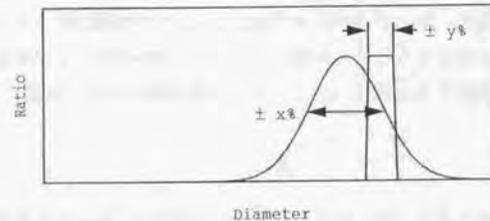
$\pm x\%$ (標準偏差) となるよう1次分級されている微小球サンプルから、 $\pm y\%$ の範囲の球を選別する時の球の直径分布を図 A.1に示す。ここでは、1次分級の平均値を中心として $\pm y\%$ の範囲で選べばよい場合 (図 A.1(a)) を考えて解析する。1次分級の平均値とは違った直径を狙って選別しなくてはならない場合 (図 A.1(b)) には、さらにそういうものを見付けられる確率は低くなる。

A.3 計算

図 A.1(a) の場合について考えると、中心から標準偏差が $x\%$ の正規分布の中心から $\pm y\%$ に収まっている球の割合を求めるのであるから、これはただの誤差関数 $Erf(x)$ そのもので表せる。誤差関数を用いると $\pm k\sigma$ に収まっている割合は $Erf(k/\sqrt{2})$ であることから、求める割合を $P(y; x)$ と記述することになると、以下ようになる [319].



(a) When the prepared average diameter agrees with the required diameter.



(b) When the prepared average diameter does not agree with the required diameter.

図 A.1: ±x%に1次分級した微小球サンプルからの±y%の球の選別操作

$$P(y;x) = \text{Erf}\left(\frac{y}{\sqrt{2}x}\right) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{y}{\sqrt{2}x}} e^{-t^2} dt \quad (\text{A.1})$$

A.4 結果

式(A.1)の結果を図A.2に示す。この結果から以下のようなことがわかる。例えば、±0.5%の直径精度が必要ときに標準偏差±0.5%で1次分級できていれば68%、つまり3個に2個は条件を満たす。もう少し分級精度が悪くて±1%だったとしても、38%、つまり3個に1個は使いものになることがわかる。しかし、1次分級で±5%までしか絞り込めていなかったとすると、そのうち要求を満たす球の割合は7.9%となる。これは13個の球をあたってやっと1個だけ条件を満たすものが見つ

けられる程度の割合である。

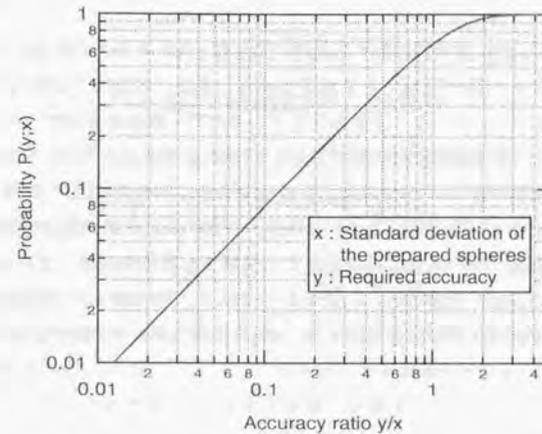


図 A.2: ±x%に1次分級した微小球サンプル中の±y%の球の割合

一般に2~3個に1個の割合で選別できる程度にしたければ、1次分級で必要精度の2~3倍程度までは絞り込んでおく必要がある。後で1個1個選別するから1次分級はあまり重要でないように思えるが、現実の作業では1次分級も重要なのである。あまりきれいに分級できないサンプルは現実には使いものにならない。

一般にブレークダウン法で製作した微小球は製作される時の直径の分布が広く、さらにμmオーダーやそれ以下の球では現在の技術では分級はほとんど不可能であるが、このような球はその製法ゆえにほとんど使いものにならないということである。そうすると、フォトニック構造物の研究に使用できる材料という点、ビルドアップ法で液中中で製作され、自己安定的に直径が定まるメカニズムの働くシリカやポリスチレンなどに自ずと限定されてくる。

逆に1次分級精度が要求よりも高くできる場合を考えると、±0.5%必要ときに3倍高精度に±0.17%まで予め分級できていれば、99.7%は要求を満たすのであるから現実には選別は必要なく、片っ端から並べていけばよい。選別工程を省略したければ要求の数倍厳しく1次分級しておく必要がある。

B ポリスチレンの赤外領域での複素屈折率の測定

B.1 目的

フォトニックバンドに関する実験・解析のためには、用いる材料の対象とする波長領域での屈折率 n の値が明確である必要がある。また、本研究では吸収の存在しない場合のフォトニックバンドを対象としているので、消衰係数 k が十分に無視できるほど小さく、光の吸収がないことを示しておく必要がある。 n と k はそれぞれ、材料の複素屈折率 $\bar{n} = n - jk$ の実部と虚部である。本研究で用いるポリスチレン材料については本研究で扱う $3200 \sim 5700 \text{cm}^{-1}$ ($Z = 0.55 \sim 1.00$) の領域での屈折率 n や消衰係数 k はこれまで調べた限りは文献でも明らかになっていないし、メーカーでも測定したことがないとしている^{*}。従って、測定によりこれらのスペクトルを求め、 n がどのような値であるか、 k が十分小さいと言えるかを示しておくねばならない。

B.2 方法概要

一般に材料の屈折率 n や消衰係数 k を測定する方法としては、エリブソメトリ法が知られている [320, pp. 27.1-27.27]。ところが、市販されているエリブソメータは主に可視領域や紫外領域を対象としており、赤外領域で測定できるものは限られている。このほかに、表面の反射スペクトルから複素屈折率を求める Kramers-Kronig 解析法も知られている [321, pp. 87-91]。また、定義により消衰係数 k は材料中での電界の減衰を与えるので透過スペクトルからも知ることができる [321, p. 67]。本研究ではこれらの手法をすべて利用し、測定技術の整っていない $3200 \sim 5700 \text{cm}^{-1}$ の領域での n と k を調べる。

なお、これらの手法はいずれも微小球についてそのまま測定することはできず、フィルムやブロック状のサンプルを必要とする。しかし、本研究で主に用いたポリビニルトルエン材料はいくつかの直径領域の微小球材料として以外にはほとんど用いられていない材料である。そこで、本研究では、ポリビニルトルエンと類似の構

^{*}Seradyn 社および Dow Chemical 社のラテックスビーズを扱っている日新化成・水元隆憲氏によると、これらの会社からは赤外のデータは入手できず、測定結果は存在しないのではないかとのこと (1995.6.29)。また、国内の製造業者である日本合成ゴム筑波研究所・竹田研爾氏によると、やはり赤外での評価例はなく、自分でキャスト膜を製作して何らかの方法で測定するしかないのではないかとのこと (1997.7.7)。

造を持ち、純度の高い材料が入手できるポリスチレンについての特性を評価した。ポリビニルトルエンとポリスチレンの特性の関係については最後に別途議論する。

B.3 エリブソメトリ法による複素屈折率の測定方法

B.3.1 エリブソメトリ法による複素屈折率の測定原理

エリブソメトリとは界面での反射による光の偏光状態の変化から、材料の光学定数や膜厚などを測定する手法である。材料の複素屈折率を求めるのは2つの物質だけが登場する最も簡単な適用例である [320, pp. 27.2-27.6]。

図 B.3 のように直線偏光した光 E_i (ただし入射面から θ 傾いた直線偏光で一般に p 成分電界 E_{ip} と s 成分電界 E_{is} を持つ) が面 S に入射角 ϕ で入射するとする。この時一般に反射光 E_r は p 成分電界 E_{rp} と s 成分電界 E_{rs} を持つ楕円偏光となる。ふたつの媒質を $i = 0, 1$ で表すことにし、それぞれの複素屈折率を $\bar{n}_i = n_i - jk_i$ とする。このとき、それぞれの偏光成分の反射前後の関係は、

$$E_{rp} = r_p E_{ip}, \quad E_{rs} = r_s E_{is} \quad (\text{B.2})$$

のように、振幅反射率 r_p と r_s を使って表せ、これらは Fresnel の式 [32, pp. 24-28] により以下のように与えられる[†]。

$$r_p = -(\epsilon_1 S_0 - \epsilon_0 S_1) / (\epsilon_1 S_0 + \epsilon_0 S_1) \quad (\text{B.3})$$

$$r_s = (S_0 - S_1) / (S_0 + S_1) \quad (\text{B.4})$$

ただし、

$$\epsilon_i = \bar{n}_i^2, \quad i = 0, 1 \quad (\text{B.5})$$

$$S_i = (\epsilon_i - \epsilon_0 \sin^2 \phi)^{1/2}, \quad i = 0, 1 \quad (\text{B.6})$$

である。

エリブソメトリではこれらの振幅反射率の比 $\rho = r_p / r_s = (E_{is} / E_{ip}) / (E_{rs} / E_{rp})$ を求めることがポイントである。入射光側の偏光板、位相板、反射光側の偏光板によ

[†]ここでは Fresnel の式として屈折角を用いずに記述できる文献 [320] の表式を用いたが、図 B.3 の座標系の取り方はこの文献とは違うので R_p と ρ の符号が原著とは異なっている。図 B.3 は文献 [32] に従っている。

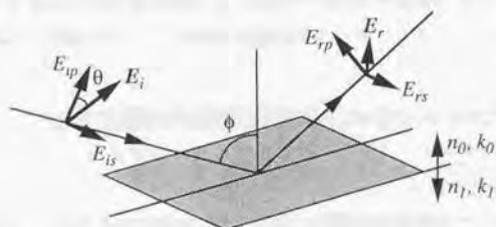


図 B.3: 屈折率の異なる媒質境界面における平面波の反射

り、入射光の偏光状態に対する反射光の各偏光成分の振幅比 $|r_p|/|r_s| \equiv \tan \psi$ や位相差 $\arg(r_p) - \arg(r_s) \equiv \Delta$ を求めると、振幅反射率比 ρ は次のように表せる。

$$\rho = \tan \psi \exp(j\Delta) \quad (\text{B.7})$$

一方、式 (B.3), (B.4) より、

$$\rho = -[\sin \phi \tan \phi - (\epsilon - \sin^2 \phi)^{1/2}] / [\sin \phi \tan \phi + (\epsilon - \sin^2 \phi)^{1/2}] \quad (\text{B.8})$$

と表せる。ただし、 $\epsilon = \epsilon_1/\epsilon_0$ である。

ここで、 ϵ_0 を既知とすると (一般に空気あるいは真空)、 ϵ_1 を以下のように求めることができる。

$$\epsilon_1 = \epsilon_0 \{ \sin^2 \phi + \sin^2 \phi \tan^2 \phi [(1 + \rho)/(1 - \rho)]^2 \} \quad (\text{B.9})$$

ここで、式 (B.7) のように ρ は複素数であるので、 ϵ_1 も複素数である。 $\bar{n}_1 = n_1 - jk_1 = \epsilon_1^{1/2}$ として、材料 $i = 1$ の複素屈折率を求めることができるのである。

B.3.2 赤外領域におけるエリプソメータの現状

このような測定が可能な装置をエリプソメータ、特に本研究で必要とするように、波長可変光源を装備し、ある波長領域での複素屈折率の変化をとらえる装置を分光エリプソメータと言う。国内では溝尻光学工業所、日本分光、ニコンなどの分光器メーカーやファイブラボ、海外では Jobin Yvon などが製造しているが、たいいていは可視領域が中心で、赤外といっても 850nm 程度までしか測れないものがほとんどである。その中で、Jobin Yvon は FTIR を光源とした $850 \sim 4000\text{cm}^{-1}$ ($2.5 \sim 11.8\mu\text{m}$)

での測定が可能な FTIR エリプソメータ IREL を、ニコンはハロゲンランプと回折格子型モノクロメータを組み合わせて、 $5880 \sim 25000\text{cm}^{-1}$ ($0.4 \sim 1.7\mu\text{m}$) での測定が可能な位相差測定装置 NPDM-1000MKII を製造しており、本研究で扱う $3200 \sim 5700\text{cm}^{-1}$ の領域に近いところで計測が可能な市販品はこの 2 機種しかない。本研究はこの両方の装置で測定をおこなった。

B.3.3 Jobin Yvon の FTIR エリプソメータによる測定

FTIR エリプソメータ IREL の主な仕様は以下の通りである。

波長領域	$850 \sim 4000\text{cm}^{-1}$ ($2.5 \sim 11.8\mu\text{m}$)
分解能	$4 \sim 16\text{cm}^{-1}$
入射角	72° 固定
検出器	MCT 検出器

国内には数台納入されているが測定させてもらえる状態の装置がなかったため、フランスの Jobin Yvon 社にサンプルを送付して測定を依頼した。

サンプルは $75 \times 25 \times 2\text{mm}$ のポリスチレン板 (Goodfellow 製) を用いた。ただし、表面は成形されたままの状態、光学顕微鏡で観察すると多くの傷やポイドがあり、鏡面とは言えない状態であった。さらにこのサンプルは平行平板であるが、表面での反射も測定されてしまう可能性があるため、特に吸収の小さな領域では誤差が出やすい。特に消衰係数 k にベースラインがのるなどの誤差が出る。表面の鏡面加工および裏面反射に関する注意がこの測定ではなされていないので、得られる結果はあまり信頼できないことが予想される。

B.3.4 ニコンの位相差測定装置による測定

位相差測定装置 NPDM-1000MKII の主な仕様は以下の通りである。

波長領域	$5880 \sim 25000\text{cm}^{-1}$ ($0.4 \sim 1.7\mu\text{m}$)
分解能	$11 \sim 22\text{nm}$
入射角	$20 \sim 90^\circ$ 可変
光源	100W ハロゲンランプ
検出器	冷却 Si-Ge フォトダイオード

この測定はニコン特機事業部の装置を借用しておこなった。サンプルは75×25mmで厚み方向にはウエッジ状になったポリスチレン板（Goodfellow製、ウエッジ角4.5°、厚い部分の厚み8.7mm）を用いた。ウエッジ状にしたのは裏面反射の影響を防止するためである。また、表面は両面とも1μmのダイヤモンド紙粒まで段階的に機械研磨した後、表面をクリーニングした鏡面状のガラス板の表面を115±3°Cに加熱したところに押し付ける表面熱溶解プレス加工にて鏡面加工した。

測定時には測定場所による再現性を調べ、サンプル中央付近であれば再現性のある結果が得られることを確認した。また、光学系の調整によっては測定される n や k の絶対値に誤差が出るが、屈折率のよくわかっている溶融石英についても同じ条件で測定をおこない、石英の場合と同様の補正をすればよいと考えた。入射角は Brewster 角よりも小さな40°と大きな70°とでおこない、再現性・信頼性のある結果の得られた70°の方を採用した。

B.4 反射 Kramers-Kronig 解析法による複素屈折率の計算方法

B.4.1 反射 Kramers-Kronig 解析法の原理

s 偏光の振幅反射率 r_s は Fresnel の式により、式 (B.4) と表せるが、これは次のようにも表すことができる [322, pp. 3.18-3.22][321, p. 87]。

$$r_s = \sqrt{R_s} \exp(j\psi) = \frac{a - \cos\phi - jb}{a + \cos\phi - jb} \quad (\text{B.10})$$

ここで、 R_s はエネルギー反射率、 ψ は反射時の位相変化角、 a 、 b は、次の関係で材料の複素屈折率と関連付けられた実数である。

$$a^2 - b^2 = n^2 - k^2 - \sin^2\phi \quad (\text{B.11})$$

$$ab = nk \quad (\text{B.12})$$

媒質 $i=0$ はここでは空気あるいは真空とし、 $\bar{n}_0 = 1 - j0$ と仮定している。また、測定対象物である媒質 $i=1$ の屈折率 $\bar{n}_1 = n_1 - jk_1$ をここでは単に $\bar{n} = n - jk$ としている。

式 (B.10) から、この a 、 b は R_s と ψ を用いて以下のように表すことができる。

$$a = \frac{(1 - R_s) \cos\phi}{1 + R_s - 2\sqrt{R_s} \cos\psi} \quad (\text{B.13})$$

$$b = \frac{-2\sqrt{R_s} \cos\phi \sin\psi}{1 + R_s - 2\sqrt{R_s} \cos\psi} \quad (\text{B.14})$$

α 、 β は式 (B.11)(B.12) により n 、 k と結びつけられているのであるから、反射率 R_s 、位相角 ψ がわかれば、材料の複素屈折率が計算できるのである。このうち、 R_s は s 偏光の反射率を求めた結果をそのまま用いればよいが、 ψ は直接は知ることができない。ところが、“因果律”と呼ばれている関係によると、 R_s と ψ とは互いに独立でなく、どちらが一方がわかれば他方がわかる関係にあることが知られている [321, pp. 87-91]。 R_s さえ計測できれば ψ もそれから計算できるので n 、 k が両方とも求められるのである。このようにして複素屈折率を知る方法を Kramers-Kronig 解析法という。

この R_s から ψ を求める関係式のことを Kramers-Kronig の式といい、次のように表せる。

$$\psi(\omega_i) = \frac{\omega_i}{\pi} \int_0^\infty \frac{\ln R_s(\omega)}{\omega^2 - \omega_i^2} d\omega \quad (\text{B.15})$$

あるいは実際の計算には次のように変形した式をよく用いる。

$$\psi(\omega_i) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty \frac{d}{d\omega} (\ln R_s(\omega)) \cdot \ln \left| \frac{\omega + \omega_i}{\omega - \omega_i} \right| d\omega \quad (\text{B.16})$$

ここで、 ω や ω_i は光の角周波数で $\psi(\omega_i)$ は求めようとしている角周波数 ω_i における位相角 ψ である。

Fresnel の式を根拠にしていることはエリプソメトリ法と似ているが、エリプソメトリ法では p 、 s 両方の偏光成分を測定し、電界の位相差を偏光子や波長板を用いて直接的に測定せねばならないのに、Kramers-Kronig 解析は一方の偏光の反射率だけを測定すればよいのであるから、あまりにムシの良い手法のように思われる。しかしながら、この手法には式 (B.15) や (B.16) に示されているように $\omega = 0 \sim \infty$ の範囲で積分をおこなわないといけないという大きな問題がある。実際には限られた波数領域の反射率しか測定できないのであるから、以下のように仮定をおいて計算をおこなう。

- $\omega < \omega_L$ の低波数領域では $R_s(\omega) = R_0$ で一定。
- $\omega < \omega_H$ の高波数領域では $R_s(\omega) = R_\infty$ で一定。

もしもこのように仮定できるとすると、式 (B.16) は、 ω_L 以下の低波数領域、実測領域、 ω_H 以上の高波数領域の ω_i における位相変化の奇与分をそれぞれ $\Delta\psi_L(\omega_i)$ 、 $\psi_m(\omega_i)$ 、 $\Delta\psi_H(\omega_i)$ とおくと、

$$\psi(\omega_i) = \Delta\psi_L(\omega_i) + \psi_m(\omega_i) + \Delta\psi_H(\omega_i) \quad (\text{B.17})$$

として、近似計算が可能になる。

この方法は、結局、 ω_L , ω_H , R_0 , R_∞ の仮定の仕方によって $\Delta\psi_L(\omega_i)$, $\Delta\psi_H(\omega_i)$ の誤差が生じ、これが式(B.13)(B.14)を通じて、 n や k に複雑に影響する。従って、実際には原理に忠実に計測をおこなうエリプソメトリ法に比べるとこの手法の結果は信用できない。実際には、Kramers-Kronig解析法で求めた消衰係数 k スペクトルは吸収スペクトルのプロファイルに酷似した波形となるため、通常は複素屈折率の虚数成分に関しては吸収スペクトルの方を用いる。この方法については後に述べる。

B.4.2 顕微 FTIR 装置を用いた反射 Kramers-Kronig 解析

上記のように反射スペクトルから複素屈折率を求める方法を反射 Kramers-Kronig 解析法というが、これは広い波数範囲にわたって反射スペクトルが計測できる分光器があれば容易に行うことができる。本研究では日本電子の顕微 FTIR 装置 (JIR-Winspec50 + IR-MAU200) を用いた。FTIR 装置には反射計測用光学系は用意していないが、顕微測定ユニットに反射モードがあるので、これを使用した。また、本装置には Kramers-Kronig 解析機能が標準装備されているのでこれを用いて計算した。

顕微 FTIR 装置 JIR-Winspec50 + IR-MAU200 の主な仕様は以下の通りである。

波長領域	400 ~ 7000 cm^{-1} (1.43 ~ 25 μm)
最高分解能	0.3 cm^{-1}
入射角	20 ± 10° 固定
観察倍率	400×
視野	φ450 μm
干渉計	バランスィング型干渉計
光源	高輝度セラミクス光源
検出器	MCT 検出器

サンプルは 75 × 25 × 10 mm の平行平板状ポリスチレン板 (Goodfellow 製) を用いた。視野サイズは φ450 μm しかないので、20° で入射すると裏面での反射は視野から大きく外れるのでこの場合には気にしなくても良い。表面はニコンの位相差測

定装置のサンプルと同じく機械研磨と表面熱溶融プレスにて鏡面加工した、反射測定には反射率が 100% とみさせる基準反射面が必要であるが、本研究では表面をケリーニングしたガラス板に Au を 200 nm スパッタコートしたものをを用いた。

測定時には測定場所による再現性を調べ、1.5% の精度で再現性のある結果が得られることを確認した。Kramers-Kronig 解析の前に、誤差を抑えるために 2300 ~ 2400 cm^{-1} の CO₂ 吸収バンドを直線補間した。また、1200 ~ 2000 cm^{-1} , 3400 ~ 4000 cm^{-1} の H₂O についてはこれだけ広い範囲を補間すると結果が作成的になるため、CO₂ 吸収バンドに比べると影響ははるかに小さいので補間をおこなわなかった。本研究で必要としている 3200 ~ 5700 cm^{-1} を含み、その外側で屈折率が一定になると思われる領域として、ここでは 1300 ~ 6000 cm^{-1} を選んだ。得られた FTIR 反射スペクトルはこの境界部では平坦であるが、その外では両側で大きく落ち込んでおり、これは装置の SN 比が低下しているためや散乱のためと思われる。実際に屈折率や反射率がこの外の領域で一定であるかどうかはわからない。

B.5 吸光度スペクトルからの消衰係数の計算方法

B.5.1 吸光度スペクトルと消衰係数の関係

複素屈折率 $\bar{n} = n - jk$ の媒質中を進行する平面波の電界 E は次のように表せる。

$$E = E_0 \exp j(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + \psi) \quad (B.18)$$

ただし、 $\omega = 2\pi c/\lambda_0$ (c は真空中の光速、 λ_0 は真空中の波長) は角周波数、 \mathbf{k} は波数ベクトル、 $\mathbf{r}(x, y, z)$ は考えている点の位置ベクトル、 E_0 は原点での時刻 $t = 0$ での電界の振幅 (E_{0x} , E_{0y} , E_{0z}) である。

ここで、媒質中では波数ベクトル \mathbf{k} は次のように表せる。

$$\mathbf{k} = \frac{\omega}{c} \bar{n} \mathbf{k}_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \bar{n} \mathbf{k}_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} (n - jk) \mathbf{k}_0 \quad (B.19)$$

ただし、 \mathbf{k}_0 は単位ベクトルである。

これは、屈折率 $\bar{n} = n - jk$ の定義である [321, pp. 66-67]。これを式 (B.18) に代入すると、電界は次のように表せる。

$$E = E_0 \exp j(\omega t - \frac{2\pi n}{\lambda_0} \mathbf{k}_0 \cdot \mathbf{r} + \psi) \cdot \exp(-\frac{2\pi k}{\lambda_0} \mathbf{k}_0 \cdot \mathbf{r}) \quad (B.20)$$

この第 1 項は振動項であるが、第 2 項は減衰項で、振幅が波動の進行 $\mathbf{k}_0 \cdot \mathbf{r}$ とともに減衰していくことを表している。我々が検出できるのは振幅を 2 乗した強度なの

で、任意の点での強度と原点での強度をそれぞれ I 、 I_0 とすると、強度の媒質中での変化は以下のようになる。

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{4\pi k}{\lambda_0} k_a \cdot r\right) \quad (\text{B.21})$$

ここで、吸収係数 α を

$$\alpha \equiv \frac{4\pi k}{\lambda_0} \quad (\text{B.22})$$

波面進行方向の媒質の厚さを t とすると、この媒質に入射した光 I_0 と透過して出射した光 I の比、すなわち透過率 T は、

$$T = \frac{I}{I_0} = \exp(-\alpha t) \quad (\text{B.23})$$

と書ける。光がどれだけ透過しにくいかが、対数で表すのが吸光度 A で、透過率 T とは

$$A = -\log_{10} T \quad (\text{B.24})$$

の関係がある [323, p. 4][324, p. 88][325, p. 124]。教科書によっては自然対数を用いるとしたものもあるが、通常の装置では常用対数である。

従って、通常の FTIR 装置の透過測定により得られる吸光度スペクトルと吸収係数 α や消衰係数 k の関係は、

$$A = -\frac{\ln T}{\ln 10} = \frac{\alpha t}{\ln 10} = \frac{t}{\ln 10} \cdot \frac{4\pi k}{\lambda_0} \quad (\text{B.25})$$

となり、

$$k = \frac{\ln 10 \cdot \lambda_0}{4\pi t} A \quad (\text{B.26})$$

として、吸光度から簡単に消衰係数が求められる。

実際にはこの媒質に光が入射するときと出射するときには Fresnel の式に従って界面反射が生じるので、測定する透過率は吸収と界面反射の両方の効果を含んでいる。従って、式 (B.23) に基づいて求めた吸収係数や消衰係数は大きめに見積もったものとなる。これを正確に見積もうとするとこれまでのエリプソメトリや Kramers-Kronig 解析の透過法に帰着するのであるが、ここでは消衰係数がいかに小さいかを知りたいのであるから、式 (B.26) で見積もった値が小さいとみなせれば、実際はそれよりさらに小さいのであるから十分に要求を満たしていると考えことにする。虚数成分を知るにはこの方法が最も簡単で、かつ信頼性が高いものと思われる。

B.5.2 FTIR 装置を用いた消衰係数の測定

測定には日本電子の FTIR 装置 JIR-Winspec50 を用い、サンプルは厚さ $30\mu\text{m}$ のポリスチレンフィルム (日本電子標準試料) とした。

FTIR 装置 JIR-Winspec50 の主な仕様は以下の通りである。

波長領域	$400 \sim 7000\text{cm}^{-1}$ ($1.43 \sim 25\mu\text{m}$)
最高分解能	0.3cm^{-1}
干渉計	バラシシング型干渉計
光源	高輝度セラミクス光源
検出器	DLATGS

B.6 測定結果

複素屈折率の実数成分 n については、文献調査の他、Jobin Yvon の FTIR エリプソメータ、ニコンの位相差測定装置、顕微 FTIR による Kramers-Kronig 解析の 4 つの方法、虚数成分 k については、Jobin Yvon の FTIR エリプソメータ、ニコンの位相差測定装置、顕微 FTIR による Kramers-Kronig 解析、吸光度からの計算の 4 つの方法を用いた。図 B.4 には得られた結果を補正していない状態のものを示す。

B.6.1 ポリスチレンの複素屈折率の文献調査結果

ポリスチレンについては $365.0 \sim 1014.0\text{nm}$ の波長範囲での屈折率の測定結果が得られており、この範囲で $n = 1.5136 \sim 1.4831$ の範囲で単調に減少する正常分散性を示すとされている [320, p. 34.7]。この報告と Dow Chemical 社の同じ波長での屈折率の値は 0.0002 の精度で一致している。

B.6.2 ニコンの可視・近赤外エリプソメータによる測定結果

$5880 \sim 25000\text{cm}^{-1}$ ($0.4 \sim 1.7\mu\text{m}$) の範囲で測定をおこなったが、途中で回折格子の切換波長があり、その前後ではデータの急激な食い違いや不自然な湾曲が見られた。従って、 $9090 \sim 10870\text{cm}^{-1}$ ($0.92 \sim 1.1\mu\text{m}$) のデータは用いないこととした。しかしながら、その前後で段差がある。変化の傾向としては典型的な正常分散を示しており、文献値とも似た変化をしている。

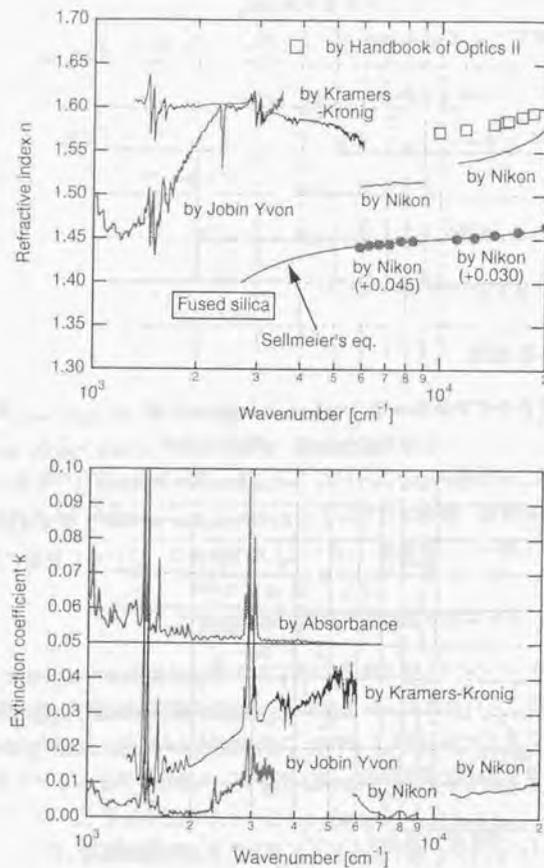


図 B.4: ポリステレンの複素屈折率測定結果 (補正前の全データ)

これとは別に熔融石英に関する測定もおこなった。図 B.4には熔融石英に関する Sellmeier 方程式 [320, p. 33.69] による計算結果も示した。また、図 B.4には熔融石英に関する測定結果をこの文献値と重なるように補正して示した。これらから、この装置による測定結果は若干小さめに出ていること、その補正量は可視領域と赤外領域では異なり、それぞれ+0.030, +0.045 程度であること、単純な平行移動による補正で文献値と非常に良く一致する結果が得られることがわかる。ポリステレンに関する測定結果も同程度の補正をおこなうべきである。

消衰係数 k については、0.01 以下であることは信用して良いが、この装置では 0.001 の桁には信頼度はないとされているので、測定結果の変化傾向は議論に値しない。

B.6.3 Jobin Yvon の FTIR エリプソメータによる測定結果

屈折率 n に関しては $3000 \sim 3500 \text{cm}^{-1}$ で正常分散で、 3000cm^{-1} 前後での吸収帯の部分でステップ状に変化するという典型的な吸収性材料の屈折率特性を示しており、傾向としては信頼できそうな結果である。 $2300 \sim 2400 \text{cm}^{-1}$ の大きなディップは明らかに CO_2 による吸収バンドの影響で、検討に値しない。消衰係数 k については吸光度と同様の鋭い構造が見られる点は信頼できそうであるが、特に 3000cm^{-1} 付近では大きなオフセットが生じており、しかもこの成分がもっとも高い吸収線と同程度の高さに達しており、定性的には不自然である。このあたりは表面反射などによる影響の可能性もあり、議論に値する信頼性はないと考えるべきである。

B.6.4 日本電子の顕微 FTIR による反射 Kramers-Kronig 解析結果

屈折率 n に関しては、特に $3200 \sim 5700 \text{cm}^{-1}$ の重要な領域で異常分散 (低波数ほど高屈折率) を示しており、明らかに不自然である。次に示す吸光度からの計算結果から 3150cm^{-1} より高波数側では顕著な吸収線はないので、この領域は一般に Sellmeier モデルの成り立つ正常分散領域のはずである [320, pp. 33.8-33.20]。従って、この傾向は信用に値しない。これはおそらく鏡面加工したポリステレンサンプルには研磨時の $1 \mu\text{m}$ のダイヤモンド砥粒が表面に食い込んだ状態で残ってしまったので、これによる散乱が高波数ほど急激に顕著になり、測定した反射スペクトルが高波数部で低下したものと思われる。 $n \approx 1.60$ のフラットな低波数領域の値はある程度信頼できるとと思われる。

なお、本測定は反射測定に基づいているので、基準反射面とした Au の反射率の

補正が必要である。そこで、反射率が実際には95%や90%であったとして、反射スペクトルを補正し、それを元にKramers-Kronig変換をおこなってみたが、屈折率はそれぞれ $n \approx 1.58$ 、 $n \approx 1.55$ と、若干小さくなる程度であった。実際のAuの反射率は95~97%と推定するのが一般的であろうから、Auの反射率を補正したとしても、図B.4の結果が0.01~0.02小さくなる程度である。

消衰係数 k はやはり吸光度と同様の構造を示しているが、Jobin Yvon同様にオフセットが存在する。このオフセットはKramers-Kronig変換の波数範囲の設定で大きく異なるので、差し引いて考えるべきである。吸収帯での k のピークの高さはJobin Yvonの結果よりも数倍大きい。しかし、この値は次の吸光度スペクトルからの測定結果と非常に良く一致するので、Jobin Yvonの結果の方に問題があったと考えるべきである。 k へのAuの反射率の影響も無視できる程度であった。

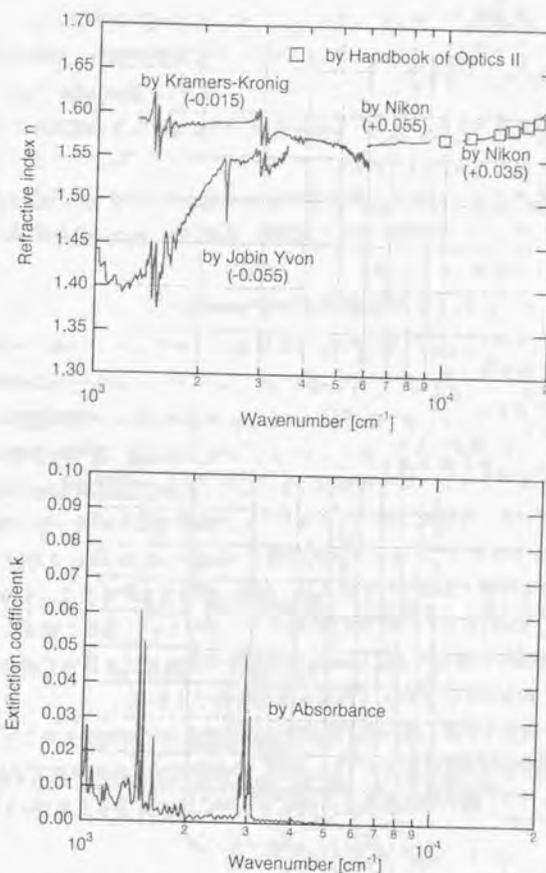
B.6.5 日本電子のFTIRによる吸光度からの解析結果

図B.4にはベースラインを0.05シフトして表示した。3150~6000 cm^{-1} の範囲で $k < 0.0015$ と非常に小さく、これでもFresnel損失を含んだ大きめの見積結果である。本研究で測定した中ではこの結果が最も信頼に値するであろう。

B.6.6 得られた結果のまとめ

図B.4からわかるように、それぞれの手法による測定結果には定量的にも定性的にも食い違いがあり、この結果をそのまま用いることはできない。従って、それぞれの測定手法の特徴や物理的な意味、用いたサンプルや測定器の状態などを考慮して、3200~5700 cm^{-1} の領域での総合的に妥当な値を抽出する必要がある。必要な補正を加えた結果を図B.5に示す。

まず、屈折率 n については、少なくとも3200~5700 cm^{-1} では $n = 1.50 \sim 1.60$ の値を取ることは確かである。しかし、互いにオフセットがあり、きれいにはつなげていない。まず、溶融石英の結果でわかるように、ニコンの位相差測定装置の結果は適切にオフセットを調整すれば合理的な結果になる。そこで、文献値に一致し、かつ滑らかな正常分散特性を示すように補正を加えることとした。また、Jobin YvonのFTIRエリブソメータによる結果もこの先に仮想的に滑らかに接続するように調整した。Kramers-Kronig解析法による結果は、本研究で最も重要な波長領域をカバーするにも関わらず、明らかに分散の傾向そのものが物理的に予想される傾向と反しており、信用に値しない。図B.5では両側との食い違いが大きく



図B.5: ポリスチレンの複素屈折率 (適切な補正を加えた結果)

ならない程度にオフセットを調整して示した。本研究では重要ではないが、サンプルの状態を考えると、むしろ 3000cm^{-1} 以下の低波数領域では Jobin Yvon の結果よりも Kramers-Kronig 解析による結果の方が信頼できると考えられる。

次に、消衰係数 k であるが、吸光度スペクトル以外は各手法ともそれぞれに大きなオフセットがあり、その上に吸収に相関のある構造が乗った結果である。このオフセット成分はどの手法についても生じうる誤差で、議論に値しないものである。従って、吸光度スペクトルから求めた結果だけを信頼できるものとして用いることとする。

以上の結果をまとめると、ポリスチレンの $3200 \sim 5700\text{cm}^{-1}$ における複素屈折率 $\bar{n} = n - jk$ は、実数成分 n が 1.57 程度、虚数成分 k が 0.0015 以下の微小な値ではほぼ一定、と結論づけられる。

ここで、 $k < 0.0015$ という消衰係数がどの程度の吸収が少ないことを意味しているかを考えておく。式 (B.22) から、 k が同じでも波長 λ_0 が短いほど吸収係数 α は大きくなる。最悪例で考えるために、考えている $3200 \sim 5700\text{cm}^{-1}$ の領域でもっとも短い波長である $\lambda_0 = 1.7\mu\text{m}$ における、 $k = 0.0015$ に対する吸収係数 α を求めてみる。すると、式 (B.22) より、 $\alpha = 1.1 \times 10^{-2}\mu\text{m}^{-1} = 1.1 \times 10^2\text{cm}^{-1} = 1/90\mu\text{m}^{-1}$ となる。これはポリスチレン中を $90\mu\text{m}$ 進行したところで強度が $1/e$ に減衰することを意味している。本研究で用いたフォトニック結晶は厚みが微小球 1 個分、すなわち $t = 2\mu\text{m}$ であるので、球による吸収は $1 - \exp(-\alpha t) \approx \alpha t = 2.2\%$ となる。これはむしろ大きな値とみなすべきである。実際、透明な光学材料として用いられる結晶 (MgF_2 , CaF_2 など) の消衰係数は $10^{-5} \sim 10^{-8}$ という極めて微小なオーダーである [326]。しかし、求めた k は Fresnel 反射損失の効果なども含んだ極めて過大な見積の結果であるので、そのまま議論することはできない。

本研究で重要なのは、屈折率が実数成分だけで十分に記述できることを示すことである。屈折率の実数成分 $n \approx 1.57$ に対して複素成分 k は 10^{-3} 以下であるので、 k は十分に小さく、屈折率は実数成分だけで十分に近似できると結論づけて良い。

B.7 ポリスチレンとポリビニルトルエンの光学特性

B.7.1 ポリスチレンとポリビニルトルエンの分子構造

スチレンはベンゼン環にビニル基 ($-\text{CH}=\text{CH}_2$) が結合したもので、ビニル基の 2 重結合が開いて重合することでポリスチレンとなる。ビニルトルエンとはメチル

スチレンと呼ばれることが多く、スチレンのベンゼン環にさらにメチル基 ($-\text{CH}_3$) が結合したものである。メチル基の結合部位によって o (オルト)-、 m (メタ)-、 p (パラ)-があり、それぞれ少しずつ性質が異なる [327]。塗料用改質材などとしてメチルスチレンの名前で市場に出回っている液体は一般に m -が 60% と p -が 40% の混合物であるが、本研究で用いたポリビニルトルエン微小球でこれらの組成がどうなっているかはわかっていない。

本研究では実験に用いる材料の屈折率を確実に把握することは本質的に重要なことである。ここではポリスチレンとポリビニルトルエンの光学特性についてたまたま手に入ったデータから安易に乗数を掛けるようなことはせずに、物理的な根拠を考えて、信頼できる結論を導く努力をする。

B.7.2 ポリスチレンとポリビニルトルエンの屈折率 n

ポリマーの場合にはモノマーの特性からある程度、特性を推定することができる [328, p. VI-451]。屈折率 n 、分子量 M 、密度 d から決まる "Refraction" R という物理量を考えると、分子の R はその分子を構成する原子団の R の総和となる。Refraction にもいくつかの定義があるが、よく用いられる Gladstone-Dale の定義によると、

$$R = (n - 1) \frac{M}{d} \quad (\text{B.27})$$

である。ポリマー、モノマーをそれぞれ添字 p , m で表すと、それぞれ以下のように表せる。

$$R_p = (n_p - 1) \frac{M_p}{d_p} = (n_p - 1) \frac{DP \cdot M_m}{d_p} \quad (\text{B.28})$$

$$R_m = (n_m - 1) \frac{M_m}{d_m} \quad (\text{B.29})$$

ただし、 DP は重合度である。 $R_p = \sum R_{mi} = DP \cdot R_m$ であるので、

$$n_p - 1 = (n_m - 1) \frac{d_p}{d_m} \quad (\text{B.30})$$

が得られる。ポリマーの屈折率はモノマーの屈折率・密度の他、ポリマーの密度によっても変わることがわかる。

ここで、ポリスチレン、ポリビニルトルエンのそれぞれのモノマーについて、わかっている物性値を表 B.1 に整理しておく [327, 329]。また、式 (B.30) から、実際には Refraction には分子量は関係なく、屈折率と密度だけが重要なことがわかる

ので、Refraction として $R_m/M_m = (n_m - 1)/d_m$ も示しておく。メチルスチレンの Refraction がスチレンに比べて 0.6 ~ 1.0% 程度小さいことから、ポリマーの密度が仮に等しければ、ポリビニルトルエンの方がポリスチレンよりも屈折率は小さいであろうことが推察される。なお、一連の表に示す屈折率はいずれも Na 線の波長 589.3nm での結果 (いわゆる n_D) である。

表 B.1: スチレン, メチルスチレンモノマーの主な物性値

モノマー	屈折率 n_m	密度 $d_m [g/cm^3]$	Refraction $(n_m - 1)/d_m$
スチレン	1.54682	0.9060	0.6036 (基準)
<i>o</i> -メチルスチレン	1.5444	0.911	0.5976 (-1.0%)
<i>m</i> -メチルスチレン	1.5410	0.903	0.5991 (-0.7%)
<i>p</i> -メチルスチレン	1.5402	0.900	0.6002 (-0.6%)

一方、それぞれのポリマーについてハンドブックに記載されている屈折率を表 B.2 に示す [328, p. VI-457]。表には密度がわからないので Refraction として単に $(n_p - 1)$ を示したが、メチルスチレンのポリマーの方が 0.8% 小さく、モノマーの Refraction と対応していることがわかる。

表 B.2: スチレン, メチルスチレンポリマーの主な物性値

ポリマー	屈折率 n_p	密度 $d_p [g/cm^3]$	Refraction $(n_p - 1)$
ポリスチレン	1.590-1.592	1.05-1.07	0.590-0.592 (基準)
ポリ <i>o</i> -メチルスチレン (ポリビニルトルエン)	1.5874	—	0.5872 (-0.8%)

さらに、本研究で用いたポリビニルトルエン微粒子を製造している Dow Chemical 社が公表している微小球材料ポリマーの物性値を表 B.3 に示す。ここでも Refraction として単に $(n_p - 1)$ を示した。ポリスチレンの屈折率は表 B.2 とよく一致しているが、ポリビニルトルエンについてはかなり小さくなっている。これはモノマーの Refraction が小さいことに加えて密度が 2% 以上小さいことに起因していると思われる。Refraction の違いは実際に密度の違いにはほぼ対応している。密度が小さい理

由は乳化重合プロセスなどで、材料によって分子の集まり方に違いがあるのではないかと思われる。

表 B.3: メーカーによる微小球材料ポリマーの物性値

ポリマー	屈折率 n_p	密度 $d_p [g/cm^3]$	Refraction $(n_p - 1)$
ポリスチレン	1.5905	1.05 (基準)	0.5905 (基準)
ポリビニルトルエン	1.5793	1.027 (-2.2%)	0.5793 (-1.9%)

以上のことから、ポリビニルトルエンの $3200 \sim 5700 cm^{-1}$ での屈折率を求めるには、 $(n_p - 1)$ がポリスチレンよりも 2% 小さくなるようにすればよいことがわかる。ポリスチレンが $n \approx 1.57$ であったことより、ポリビニルトルエンの屈折率は $n = 1 + (1.57 - 1) \times 0.98 \approx 1.56$ と結論づけることができる。

B.7.3 ポリスチレンとポリビニルトルエンの消衰係数 k

スチレンに新たにメチル基が結合したことによってどこに吸収線、すなわち k の大きなピークが生じるかは、分子構造から容易に推定することができる。本研究で重要な $3200 \sim 5700 cm^{-1}$ の領域にそのような吸収線が存在しないことが示せば良い。

ポリスチレンのそれぞれの吸収線が何の振動に起因するかを同定した結果を表 B.4 に示す [330, pp. 357-387]。また、スチレンにメチル基が結合することにより新たに生じる吸収線を表 B.5 に示す。これからわかるように、メチル基の結合により新たに増える吸収線はすべて、もともとポリスチレンが持っている $2800 \sim 3200 cm^{-1}$ の大きな吸収バンドの中に生じる。このほかには、本研究では対象としない低波数域である $1100 \sim 1200 cm^{-1}$, $700 \sim 820 cm^{-1}$ に 2 置換ベンゼン環の面内・面外変角振動に起因する吸収線が発生するだけである。

このことから、ポリビニルトルエンの消衰係数 k についても、ポリスチレンと同様に、 $3200 \sim 5700 cm^{-1}$ の範囲では十分に微小な値で (おそらく 0.0015 程度以下の) ほぼ一定であると考えて良い。

表 B.4: ポリスチレンの主な吸収線

波数 (cm^{-1})	振動モード
3081	末端ビニル基 ($=CH_2$) の C-H 間伸縮振動
3058	ベンゼン環 (C_6H_6) の C-H 間伸縮振動
3023	メチレン基 ($-CH_2-$) の C-H 間伸縮振動, 末端ビニル基 ($=CH_2$) の C-H 間伸縮振動
2923	メチレン基 ($-CH_2-$) の C-H 間伸縮振動
2850	メチレン基 ($-CH_2-$) の C-H 間伸縮振動
1600	ベンゼン環 (C_6H_6) の面内骨格振動
1492	ベンゼン環 (C_6H_6) の面内骨格振動
1450	ベンゼン環 (C_6H_6) の面内骨格振動

B.8 結論

以上の測定と考察により, ポリスチレンの $3200 \sim 5700 cm^{-1}$ の領域での複素屈折率は以下のように結論づけられる.

- (1) $n \approx 1.57$
- (2) k は十分無視できる ($k/n < 10^{-3}$)

また, 実際に用いた微小球材料であるポリビニルトルエンの $3200 \sim 5700 cm^{-1}$ の領域での複素屈折率は以下のように結論づけられる.

表 B.5: メチル基の結合により新たに発生する吸収線

波数 (cm^{-1})	振動モード
2960 ± 15	メチル基 ($-CH_3$) の C-H 間伸縮振動
2920 付近	ベンゼン環に結合するメチル基 ($C_6H_6-CH_3$) の C-H 間対称伸縮振動
2870 付近	ベンゼン環に結合するメチル基 ($C_6H_6-CH_3$) の 逆対称変角振動
2870 ± 15	メチル基 ($-CH_3$) の C-H 間伸縮振動

- (1) $n \approx 1.56$
- (2) k は十分無視できると考えられる ($k/n < 10^{-3}$ 程度)

屈折率 n は ± 0.01 程度の誤差を含んでいると思われるので, 数値解析の結果と比較する場合には, 基本的には $n = 1.6$, より高精度に計算する場合には $n = 1.55$ とすれば良いであろう.

一、
 二、
 三、
 四、
 五、
 六、
 七、
 八、
 九、
 十、

（五）

一、
 二、
 三、

（六）

一、
 二、
 三、

一、	二、
三、	四、
五、	六、
七、	八、
九、	十、

謝辭

本研究は多くの方々にお力添えをいただいたお陰で実現しました。

東京大学先端科学技術研究センター佐藤知正教授には、企業から大学助手への思いもかけなかった人生の重要なチャンスを与えて下さったことに始まり、5年の間、常に私の研究が最大限に進むようにと時間・空間・精神・金銭など様々な面で格別の配慮を下さり、世界的にも例外的な好環境を実現して下さいました。「光の八木アンテナ」という自分も研究テーマになるとは思っていないような些細なキーワードに着目し、それを進めるよう励まして下さり、こうして実際に論文を書き上げることができたことを心から感謝いたします。また、直々にたたき込んでいただいた、研究計画の立案から成果の取りまとめまでの一連のプロセスの方法論は、研究者として生きていく上での貴重な財産です。一方で、その恵まれた環境にありながら、わがままや失礼な物言いがしばしばありましたことを心からお詫びいたします。

東京大学大学院工学系研究科産業機械工学専攻の長尾高明教授、畑村洋太郎教授、物理工学専攻の宮野健次郎教授、精密機械工学専攻の樋口俊郎教授には、本研究をまとめるにあたって本質的・的を得たご助言をいただきました。お陰でまとめるのが困難な研究をこうしてひとつの論文としてまとめることができましたことを、心から感謝いたします。特に長尾教授には学部学生の時より、大学に戻るに際しても、さらに大学に戻ってからも常に私が有意義に過ごせ、能力を発揮できるよう気にかけて、励まして下さいました。畑村教授には学部学生の時以来、産業や社会と自分の関わりを考える機会を用意いただき、常に考え続けることを教えて下さいました。お陰で企業にいる間も頭をさび付かせずに済みました。また先端研での研究の立ち上げや企業や他の研究グループとの交流など、常に陰の部分から私の研究をサポートし見守って下さいました。また宮野教授には科学技術振興事業団戦略的基礎研究推進事業グループリーダーとして自由に研究しやすいような環境を与えて下さり、日頃より物理現象についての考え方の様々なヒントを与えて下さいました。研究者として「もの」に接し続ける姿には強い感銘を受け、私の研究スタイルの確立に大きな役割を果たして下さいました。樋口教授はご自分自身がよく勉強し、社会における大学や工学者の役割をよく考えて研究をするという日頃の実践をもって、私に工学者のあるべき姿を教えてくださいました。審査の間の短い期間にも、工学者としての的を得たご指摘には本当に多くのことを学ばせていただきました。

この他にも多くの方が本研究にご協力下さったり、研究者として、人間としての手本を示して下さいました。

千葉大学工学部応用物理工学科大高一雄教授には、私の世の中で果たすべき役割を早い時期からご示唆下さり、また常に励まして下さいました。時には我々若手のために特別授業まで開催して物理学の面白さを教えていただいた一方で、先生の大学教育に対する強固な責任感と行動力からも多くのことを学ばせていただきました。また、東北大学大学院工学系研究科応用物理学科宮壽博司助教授には、理論面において細やかにサポートをしていただきました。このサポートがあったからこそ、本論文を自信を持ってまとめることができました。大雑把な物理的描像しか持たないゆえの突拍子もない質問もしばしばさせていただきましたが、何事にも興味を持ち真剣にお答えいただきました。日本女子大学理学部物理学科国府出隆夫教授には常に暖かく見守っていただき、足りないことを率直にご指摘下さったり、我が国のフォトニクス結晶研究者のリーダーとして我々若手にも研究発表の機会を与えて下さいました。東京大学物性研究所の秋山英文助教授には、なかなか物理学的思考の身に付かないがさつな私の考えを尊重し、辛抱強く励まし、さらには文部省科学研究費重点領域研究「相互量子制御」研究会における特別講演という異例のチャンスを与えて下さいました。この場を契機に多くの物理学者と対等にお付き合いできるようになったことが本研究の重要なブレイクスルーになりました。また堅実で力強い研究スタイルは常に私の重要な目標でした。東北大学電気通信研究所の潮田資勝教授には科学技術振興事業団戦略的基礎研究推進事業チームリーダーとして、なかなか成果の出せない私を辛抱強くサポートして下さいました。またこのグループを通じてさらに大きな物理学者の輪に加わることができたことは研究を進める上で良い刺激となりました。東京工業大学工学部開発システム工学科高橋邦夫助教授には、微粒子の付着現象について様々なことを教えていただきました。凝着現象に関する数々の世界的な業績を積み重ねていかれる非凡なご活躍の一方で、常に若手研究者のリーダーとして様々な機会を設けることにご尽力下さいました。佐藤研究室研究員の森下広君には、学部学生時代以来、常に人生について、研究について様々な面で洞察に富んだアドバイスをいただき、強い心の支えになって下さいました。私が先端研に来る決心ができたのも、ここに来れば森下君がいるし彼が作ったナノロボットがあることを知っていたからこそであるし、またこうして研究を遂行できたのも、森下君が常に側にいてくれたからです。森下君の機械を応用しただけで学位の取得を許されるのは一面では心苦しいことですが、その素晴らしい技術の意義を見抜き、誰よりも有効に役立てることができたことを誇りにしたいと思います。埼玉大学工学部情報システム工学科溝口博助教授には情報工学や電子回路を初めと

して、実に幅広い様々な知識を教えていただいたり、私の研究の意義を鋭敏に察知し、励まして下さいました。また、同じ時期に民間企業から佐藤研究室に着任した同期生としても良い相談相手になって下さいました。佐藤研究室の森武俊講師には大学で働く人間のあるべき姿を教えていただきました。企業から大学に来てスタンスを決め兼ねていたところに、早い時期から大学で教職に就くことを強く意識し、実践してきた森先生が現れたことで、自分のなすべきことを客観的に考え直し、明確に自覚することができました。忙しい合間にコンピュータ環境を整えて下さった一方で、研究に関しても的を得た指摘をして下さいました。

さらに中尾政之助教授、光石衛助教授、松本潔助手をはじめとする機械工学系専攻の諸先生方、物理工学専攻の田丸博晴助手にも様々な機会にお世話になりました。

本研究は機械工学だけでなく特に光科学を中心とした学際的な知識や興味を基盤として実現が可能となったものです。それはひとえに浜松ホトニクス株式会社就職中に身に付けたものであり、浜松での5年間は私の人生にとって極めて重要な役割を果たしています。退職後も変わらずお付き合い下さり、励まして下さった壺馬輝夫社長、中央研究所の土屋裕副所長、瀧口義浩氏、システム事業部の大橋義春氏（現・株式会社ネスト）、川崎一郎氏、大阪営業所の小栗康則氏をはじめとする皆様に心から感謝いたします。

また、金属材料技術研究所の新谷紀雄部長ほか、第5研究グループの皆様には、コンペチターとして、あるいは同じ興味を持つ仲間として、孤独感にさいなまれがちな私を常に応援し、力付けて下さいました。

本研究は様々な技術や装置を必要とするものでしたが、日本電子株式会社分析機器技術本部の大木貞嗣氏、川内一晃氏には顕微 FTIR 装置を、株式会社日製エレクトロニクス草ヶ谷敏夫氏には FTIR エリプソメータを、株式会社ニコン特機事業室笠間利司氏には位相差測定装置を借用させていただきました。また、日本アトマイズ株式会社をはじめとする 20 社以上の企業から微粒子サンプルを提供いただきました。後藤勝人社長、鳥谷孝技術部長、出田良雄氏、熊谷徹氏をはじめとするサンユー電子株式会社の皆様、吉見哲夫氏をはじめとする株式会社日立製作所計測器事業部の皆様、谷口昌弘氏、田中守弥氏、相羽淑弘氏をはじめとする日産産業株式会社の皆様には装置の購入や改造にあたって様々なわがままにお付き合い下さり、研究環境の整備にご協力いただきました。また、故・大西謙次氏には研究室の様々な装置を加工していただき、心より感謝しております。これから益々お世話になろうという時に急逝されたのが悔しくてなりません。

佐藤研究室秘書の高橋正江さんには主に様々な購入品の経理処理の面で、林幸子さんには主にリラックスできる雰囲気整備の面で、しっかりとサポートして下さいました。このように秘書の方々に支えられた快適な研究環境は、たまに遊びに来る研究仲間のあこがれの的でした。また佐藤先生の奥様は、我々職員も学生も家族のように受けとめて下さり、研究室の行事でお手伝いいただいたり、一人一人の小さなことにも一緒に心配したり喜んだりして下さいました。

また、研究室の古谷野宏一君、西田佳史君、齊藤滋規君、亀谷尊之君、篠澤康彦君、三由貴史君、笠谷岳士君、富澤泰君、荻野洋司君、Patrick Anquetil 君をはじめとする学生諸君や研究員諸氏には研究室生活を楽しいものにしてくれたり、重要な研究成果を上げてくれただけでなく、むしろ私に多くのことを教えてくれ、私自身の成長に重要な役割を果たしていただきました。

最後に、ゆったりとして快適だった浜松での生活を捨てて東京で生活を始めることに同意してくれ、さらに研究室に入り浸る自分勝手な生活に5年間我慢しながらも私のことを理解し信じ続けてくれた妻・桂子、長女・光、次女・星に心から感謝します。

参考文献

- [1] 大高一雄. 光子バンドと重い光子. 日本物理学会誌, Vol. 52, pp. 328-335, 1997.

個々の散乱体の共鳴が周期配列によってどのようにバンド構造を形成していくかの非常によい解説になっている。大高先生の描像と Joannopolous らの直感性を重視した描像が最も重要と思われるが、MIT グループは主に 2 次元結晶を対象としているために TE/TM が分離して議論できて分かり易いのに対し、大高先生の対象は本質的に 3 次元である球を基本要素としているので、モードの混合が当たり前になり、モードの理解には群論の知識が必要である。従来、光と電子系の相互作用では励起子やプラズモンが関与した共鳴現象だけが注目されていたが、それらの電子系のモードが存在しない場合にも共鳴的増強が期待できることを指摘している。

- [2] 大高一雄. フォトニックバンド計算手法集中講義ノート, 9 1997.

大高先生と国府田先生が若手研究者にフォトニックバンド計算の技術を伝えるためにボランティアで開催して下さったサマースクールの際の講義ノート。9 月 7, 8, 9, 24 日の 4 日間、毎日朝から夕方まで行なわれた。大高先生が数編の論文以外の場でこの計算手法の内容をゼロから講義した場はこの時くらいしかないのではないか。内容は、1. Schrödinger 方程式の散乱問題、2. Green 関数と t 行列、3. 周期系と KKR 方程式、4. 電磁場と電子の違い。

- [3] 徳丸仁. 基礎電磁波. 森北出版, 1992.

光学そのものにまでは踏み込んでいないが、電磁波の普遍的な考え方が丁寧に記述されており、半波長アンテナの後方散乱問題など光領域の散乱問題を考える上でのきっかけになりそうな記述が多い。

- [4] H. C. van de Hulst. *Light Scattering by Small Particles*. Dover Publications, 1957.

光の散乱を考えるとときの最も代表的な教科書。

- [5] C. F. Bohren and D. R. Huffman. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*. John Wiley & Sons, Inc., 1983.

- [6] 遠藤啓二, 佐藤源貞, 永井淳. アンテナ工学. 総合電子出版社, 1979.

各周波数帯で用いられるアンテナ技術が整理されており、他書に比べると写真や具体的な図が豊富なので実物とその原理の対応が良くわかる。

- [7] 千葉郎. アンテナのある風景. クリエイト・クルーズ, 1994.
珍しいアンテナの写真集. 教科書に出てくる各周波数帯の各種アンテナが実際にはどのような形で用いられているのかがよくわかる. どの写真も美しい.
- [8] J. A. Stratton. *Electromagnetic Theory*. McGraw-Hill, Inc., 1941.
日本でいう電磁気学の教科書はたいてい静電場などの高校の知識からスタートして最後に Maxwell が出たあたりで終わってしまうが, この重厚な本は, Maxwell からスタートして静電場から電磁波まで, 電磁波も電波領域で重要になる大地に立つアンテナの放射問題から光波領域で重要になる球の散乱まで, 電場・磁場に関係する学問はすべて網羅し尽くしている. ベクトル波の極座標展開も丁寧に扱っており, 大高先生の議論もここからスタートしている.
- [9] R. P. A. Tricker. *Introduction to meteorological optics*. Mills & Boon, 1970.
Bohren(1983)の中で, 球における電界基本モードの記述が素晴らしいと紹介されている本である. 基本的には天文学における光散乱現象を扱っており, ほとんどが Rayleigh 散乱領域のものである. 興味のある読者のために, という程度の扱いで Mie 散乱理論の数学的取り扱いに1章と特殊関数のために付録の数ページを割いている. 簡単な膜の振動モードを題材に, デカルト座標系における数学的解法と具体的なモードの様子, 円筒座標系における解法とモード, と順に丁寧に説明している. どのような現象を扱っているか, どのような経緯で Bessel 関数などが現れるか, 各モードの数字がどのような経緯で出てくるもので何を意味するかがわかりやすい. しかし, この時期はまだ大高先生登場以前で, ベクトル球面波の展開要素としての完備性などの議論が進んでいなかったらしく, 大高先生の説明に比べると普遍性に欠け, 読むと球のベクトル問題だけは特殊であるという印象を受ける. 有名な各モードの電界や磁界の分布の図 (Mie(1908)がオリジナルで Stratton(1941, p. 226)や Bohren(1983, p. 98)などにも再掲)が E_θ を無視したものであること, それはエネルギー伝搬に寄与しないので合理的であること, (E_θ, E_ϕ) と (H_θ, H_ϕ) が直交するので一方を図示すればすべてを示していることが (どれも当たり前のことであるが) 明示してある.
- [10] 五神真. 微小球による輻射場の量子制御. 応用物理, Vol. 65, pp. 950-954, 1996.
微小球の共鳴とそれによる輻射場の制御についてまとめた良い解説記事であ

- る. 五神先生の目標としている領域は, サイズパラメータの大きめの領域で Q 値が非常に大きな値を取る部分である. 球の WGM のモードの考え方など参考になる.
- [11] M. Kuwata-Gonokami, K. Takeda, H. Yasuda, and K. Ema. Laser emission from dye-doped polystyrene microsphere. *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 31, p. L91, 1992.
- [12] H. Taniguchi, J. Kido, M. Nishya, and S. Sasaki. Europium chelate solid laser based on morphology-dependent resonances. *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 67, pp. 1060-1062, 1995.
 $\phi 17 \sim 50\mu\text{m}$ のポリスチレン球に Eu キレート を内部まで均一に分散させ, MDR すなわちミラー共鳴によってレーザ発振させている. μJ という発振閾値の低さが特徴とのこと.
- [13] G. Griffel, S. Arnold, D. Taskent, A. Serpenguzel, J. Connolly, and N. Morris. Morphology-dependent resonances of a microsphere-optical fiber system. *Opt. Lett.*, Vol. 21, pp. 695-697, 1996.
ファイバ側面を研磨したカプラーの上に $\phi 500\mu\text{m}$ の球を1個置き, ファイバを伝搬する光の球へのカップリングを調べている. 球のモードにマッチした波長は球に流れ込み散乱される. けれどもその結合効率はまだほとんど無視できる程度と言っても良い程度で, すべて球に乗り移るようなことはない.
- [14] 高良和武, 菊田惺志. X線回折技術. 東京大学出版会, 1979.
X線回折に用いられるいろいろな計測手法が系統的にまとめられている.
- [15] 菊田惺志. X線回折・散乱技術(上). 東京大学出版会, 1992.
結晶学と回折条件については Kittel をもう少し詳しくした内容で非常に参考になる. また所々でミラー散乱体を配列したフォトリック結晶に通じる普遍的な考え方が記述されている. 本書の最大の特徴は X 線の動力学的回折理論について非常に詳しく説明している点である. しかし, あくまでも得られた X 線回折データの解析方法の教科書なので, この部分に関しては典型的なケースに対しての数学的な記述に終始しており, 普遍的な知見はあまり得られない.
- [16] 後藤尚久. 図説・アンテナ. 電子情報通信学会, 1995.
我が国を代表するアンテナの研究者によるアンテナに関する教科書である.

Maxwell 方程式の解の直観的なイメージを伝えることに重点が置かれており、非常にわかりやすい。特に八木・宇田アンテナにおける電磁波のエネルギーの流れの解析はおそらく他書で同様の記述は見られない貴重なものではないかと思われる。

- [17] T. K. Wu. *Frequency selective surface and grid array*. John Wiley & Sons, 1995.
マイクロ波～ミリ波帯での平面的な周期パターンによる電磁波の反射などの問題を扱っているが、そのまま光波領域のフォトニック結晶につながる内容である。微細加工技術により製作されたパターンが美しい。平面周期問題なので計算は比較的簡単らしく、様々な計算プログラムが公開されている。
- [18] S. John. Electromagnetic absorption in a disordered medium near a photon mobility edge. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 53, p. 2169, 1984.
- [19] E. Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 58, p. 2059, 1987.
周期的 3 次元誘電体構造物ではバンドギャップが生じるであろうことを直感的に予測し、それが実現できれば、自然放出が制御でき、レーザーの特性などが根本的に改善できることを指摘。半導体技術、あるいはガラスやポリステレンの球を fcc 充填することで実験できるかもしれないと予測。
- [20] Y. Kuga and A. Ishimaru. Retroreflectance from a dense distribution of spherical particles. *J. Opt. Soc. Am.*, Vol. A1, p. 831, 1984.
- [21] S. John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 58, p. 2486, 1987.
光のアンダーソン局在の実現系として、屈折率の高い 3 次元格子の乱れが有望と理論的に考察。Yablonovitch がデバイスの観点から提案しているのに対して John は同じ物理系を純粋な物理的観点からアンダーソン局在の発現する系としてとらえている。
- [22] S. John. The localization of light. In C. M. Soukoulis, editor, *Photonic Band Gap and Localization*, pp. 1-22. Preum Press, 1993.

- [23] 富田誠. 乱れた媒質中での光の揺らぎとアンダーソン局在. 日本物理学会誌, Vol. 46, p. 927, 1991.
光の平均自由行程を考えることが重要。波長より小さすぎない程度の適度な小ささを持った散乱体で、かつ「乱れが強くて」平均自由行程の短い状態で局在が起こる様子を説明している。この分野の人の「乱れが強い」という言葉の意味が今も良くわからないが、「平均自由行程が短い」すなわち「散乱断面積が大きい」ということと思っている。ランダム系の研究に微細加工技術を用いることの有効性にも言及している。
- [24] 岩井俊昭, 岡本卓, 朝倉利光. 光散乱現象研究の展開—単一散乱から多重散乱まで—. 応用物理, Vol. 63, p. 14, 1994.
- [25] D. Wiersma, P. Bartolini, A. Lagendijk, and R. Righini. Localization of light in a disordered medium. *Nature*, Vol. 390, pp. 671-673, 1997.
普通の散乱体の透過率は厚さに比例する分だけ減衰すると考えればよい、ところが局在状態になると、厚さに対して exp 的に減衰する。直径 300nm の GaAs 微粒子を用いて、初めてこの局在状態を実現した。粒子がもう少し大きくて 1 μ m 位の時には、その中間状態として、厚さの 2 乗に反比例する状態が生じた。平均自由行程 l と波数 k の積 kl が大きい時には後方散乱ピークは鋭いが、 kl が小さくなるにつれてピークは拡がり、その延長に局在状態が生じる。よく理解できていないが、吸収による exp 的に減衰の効果でないことを示すために吸収係数の温度特性を利用している。
- [26] N. M. Lawandy, R. M. Balachandran, A. S. L. Gomes, and E. Sauvain. Laser action in strongly scattering media. *Nature*, Vol. 368, pp. 436-438, 1994.
多重散乱によるレーザー発振に関する最初の実験。
- [27] H. Taniguchi, M. Nishiyama, S. Tanosaki, and H. Inaba. Lasing behavior in a liquid spherical dye laser containing highly scattering nanoparticles. *Opt. Lett.*, Vol. 21, pp. 263-265, 1996.
色素液滴にナノ微粒子を混入すると、明確な閾値を持ったレーザー発振が観察できる。粒子濃度によって発振特性が変わるのはもちろん、発振波長もブルーシフトする。粒子が近くにあるほど短い波長にマッチするというのは感覚に合うが、そもそもその中心波長は何によって決まるのだろうか。

- [28] 谷口宏, 田野崎真司, 稲葉文男. 光多重散乱によるレーザー発振. 応用物理, Vol. 66, pp. 25-28, 1997.
レーザー発振のための光帰還の方法には, (1) 光共振器, (2) Morphology Dependent Resonance (or Whispering-Gallery Mode), (3) 多重散乱がある. 微小球を使うレーザー発振にもいわゆる WGM と多重散乱とは別々の機構であることに注意すべきである. この論文は多重散乱によるレーザー発振を述べている. この場合, 散乱体を加えて濁った状態にするほど閾値が下がる. 散乱体が減ると WGM による発振が支配的になるがこの場合の閾値は高い.
- [29] C. M. Soukoulis, editor. *Photonic Band Gap and Localization*. Prentice Hall, 1993.
1992年5月の Crete でのワークショップの予稿集であるが, 特に光の局在の分野の論文が多く集められていること, 学術雑誌に掲載されていない論文も収録されていることが重要な点である. 結局, 局在の分野とフォトニック結晶の分野の論文はきれいに分離されているので両者の関わりがはっきりしないのが残念であるが, 冒頭の S. John や B. R. De et al. など, 周期配列からランダム媒質への遷移について触れたものもあるにはある. 学術雑誌ではうかがいしれないメンバーが1992年の時点ですでに意外といろいろな研究をしていたことがわかる. 教科書としてはまとめてないので, 基礎的な勉強するには結局それぞれの論文を読んで自分でまとめるしかない.
- [30] K. Ohtaka. Energy band of photons and low-energy photon diffraction. *Phys. Rev. B*, Vol. 19, p. 5057, 1979.
誘電体球3次元格子ではフォトンエネルギーバンド構造が現れ, 光波を回折. 金属中の空孔格子でも良い. X線よりも強いブラッグ反射が起こる. ミー・デバイの理論を延長したもの. X線の動的回折条件についての論文以来, 始めて光領域での3次元周期構造の効果について述べた論文と思われる.
- [31] 井上久速. 10年の歴史をもつフォトニック結晶. 日経エレクトロニクス, No. 730, pp. 62-63, 1998.
- [32] 小山次郎, 西原浩. 光波電子工学. コロナ社, 1978.
光の回折など光波について考えるときに最も頼りにしている本であるが, 特に周期構造における結合波理論が詳しく記述してある点が特徴である. 1次

- 元格子のフォトニックバンドのことはすでにこの本の中に自然に記述されている.
- [33] 横山弘之. 微小共振器レーザー: 現状と展望. 応用物理, Vol. 61, p. 890, 1992.
微小共振器レーザーの解説でありながら, 微小共振器を実現しても思うほど万能ではないという否定的な内容がいろいろなところに書いてある. それは小さく作っても3次元的に閉じこめるわけでないので効果が上がらないということ, そのままフォトニック結晶への期待にもつながっている.
- [34] 小林哲郎, 瀬川太郎, 森本朗裕, 末田正. 自然放出を制御した新形のレーザー, 発光素子, 光機能素子. 第43回応用物理学会学術講演会予稿集, p. 127, 1982.
小林哲郎先生がこのような早い時期に波長オーダーの3次元共振器で無閾値 LD, コヒーレント LED が実現できるという予言をしている. Yablonoitch 以後の量子エレクトロニクス分野でのフォトニック結晶の主な議論が信じ難いことにすべてこの1/3ページに書いてある. このほかに, Qスイッチレーザーや光双安定素子など現在あまり議論されていないことも指摘されている. 徹底した「電磁波としての光」に対する考察とレーザー工学に詳しい小林先生らしい発想である. 特許も成立したそうだが, あまりに提案が時代を先取りしすぎていてすでに特許が切れてしまったとのこと.
- [35] 花村栄一. フォトニック・バンドギャップ. 応用物理, Vol. 63, p. 604, 1994.
1993年頃までのフォトニックバンド構造の研究の総合解説. 半導体加工技術による可視域の3次元構造の可能性を楽観視.
- [36] K. M. Leung and Y. F. Liu. Full vector wave calculation of photonic band structures in face-centered-cubic dielectric media. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 65, p. 2646, 1990.
計算により fcc 構造では W 点の縮退のためギャップが存在し得ないことを証明. 従来のスカラー近似による計算は間違っており, 楽観的な結果が出すぎていたことを初めて指摘.
- [37] K. M. Ho, C. T. Chan, and C. M. Soukoulis. Existence of a photonic gap in periodic dielectric structures. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 65, p. 3152, 1990.
計算により fcc 構造では W 点の縮退のためギャップが存在し得ず, 対称性の低いダイヤモンド構造なら $n > 2$ でギャップが開くことを証明. 任意の結晶

構造の計算への組み込み方がわかりやすく説明されており、バンド計算時の良い参考になる。Iowa State Univ. のグループは初期から独自に研究。

- [38] 迫田和彰, 微細構造中の光波解析理論—フォトリック結晶を中心として—, 光学, Vol. 27, pp. 2-5, 1998.
迫田先生によるフォトリック結晶の計算の解説。実は計算手法についてはほとんど触れていない。透過スペクトルの計算方法には離散化法, 球面波展開法, 平面波展開法がある。平面波展開法では境界条件を満たすように展開係数を決めてやることが重要である。
- [39] R. D. Meade, K. D. Brommer, A. M. Rappe, and J. D. Joannopoulos. Existence of a photonic band gap in two dimensions. *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 61, p. 495, 1992.
2次元結晶では3角形の空洞格子でs・p共通のPBGが開くことを系統的な理論計算で見出し, 15GHz程度のマイクロ波実験で確認。
- [40] E. Yablonovitch and T. J. Gmitter. Photonic band structure: The face-centered-cubic case. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 63, p. 1950, 1989.
様々な屈折率差, 球状または球形空洞状原子の結晶を作り, マイクロ波で試行錯誤的にバンドギャップの発生例を見出し, ただし, 後に計算によりW点でのギャップは開き得ず, 実験の不備による間違いであることが証明された。長波長の実効屈折率は屈折率の体積充填率比で決まると仮定し, 実験的に確認。
- [41] E. Yablonovitch, T. J. Gmitter, and K. M. Leung. Photonic band structure: The face-centered-cubic case employing nonspherical atoms. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 67, p. 2295, 1991.
Yablonovite結晶の考案による, 世界で初めての3次元PBGの実証。fcc構造でも非球形の対称性の低い形状の“空洞原子”を用いれば, n (マトリックス側) > 2.1 でバンドギャップ発生。対称性が低くても, 穴でなく, マトリックスが空気の場合のことはこの文献からはわからない。
- [42] S. L. McCall, P. M. Platzman, R. Dalichaouch, D. Smith, and S. Schultz. Microwave propagation in two-dimensional dielectric lattices. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 67, p. 2017, 1991.
2次元フォトリックバンド構造をマイクロ波帯で実現し, バンドギャップと光

子の局在についてかなり詳細な実験をしている。 ϵ の測定にミー散乱波動数特性を利用。全体の透過率, 結晶中に発光点がある場合の透過率, 光子欠陥近傍での電界分布を実測しており, 実験の点では非常に参考になる。

- [43] E. Yablonovitch. Photonic band-gap structures. *J. Opt. Soc. Am. B*, Vol. 10, p. 283, 1993.
フォトリック結晶研究に関する解説。J. Mod. Opt. (1994) の論文の原型らしく, こちらの方が情報量豊富。PBG中では光モード, 自然放出, 零点ゆらぎがゼロになる。BZが球に近いほどPBGは起こりやすいので本質的にfccが有望。構造物規模が小さいとバンド図や透過率の精度が悪いので, 理論検証には大規模構造物が必要。シングルモードLED(SMLE)提案。
- [44] E. Yablonovitch. Photonic crystals. *J. Mod. Opt.*, Vol. 41, p. 173, 1994.
フォトリック結晶研究に関する解説。PBG中では光モード, 自然放出, 零点ゆらぎがゼロになる。BZが球に近いほどPBGは起こりやすいので本質的にfccが有望。構造物規模が小さいとバンド図や透過率の精度が悪いので, 理論検証には大規模構造物が必要。シングルモードLED(SMLE)提案。
- [45] John D. Joannopoulos, Robert D. Meade, and Joshua N. Winn. *Photonic Crystals—Molding the Flow of Light—*. Princeton University Press, 1995.
MITのグループによるおそらく現在世界で唯一のフォトリック結晶に関する教科書で, 理解に必要な基礎知識から, 1993年頃までの研究の到達点, 問題点までこぎれいにまとめてある。電界分布や結晶の設計論に関しては学術雑誌で公開されていない内容がふんだんに盛り込まれている。理論的な考え方では, 定性的な理解を助けるために, モードの対称性に大きな比重を置いているのがMITのグループの論文の大きな特徴で, 本書もそのようになっている。またその延長として常に電磁界分布を丁寧に解析し, イメージとして把握することを重視している。結晶の構造をなるべく単純化したものに絞った上で, 系統的な特性を計算し, 設計論を展開している点も特筆すべき点である。フォトンがどのような構造物中でどのような多様な挙動を示すかという理学的なことよりは, いかにしてバンドギャップを実現するかということだけに興味を特化している。

- [46] J. D. Joannopoulos, P. R. Villeneuve, and S. Fan. Photonic crystals: putting a new twist on light. *Nature*, Vol. 386, pp. 143-149, 1997.
MITグループによるレビュー記事。金属導線による伝送帯域は数 $100kH$ しかないが、光なら数 THz もある。従来は全反射で光をコントロールしていたが、フォトニック結晶はブラッグ反射で閉じこめる。そのかわりそういう結晶を人工的に作り出さないといけない。バンドギャップの上のバンドはパワーが主にエア領域を伝わるエアバンド、下のバンドは誘電体中を流れるダイエレクトリックバンドと呼べる。伝導体・価電子帯と相似である。1列に欠陥が連なった微細導波路にも紙面を多く割いている。キャパティとして点状欠陥を設けたときのモードの形と発光の抑制 or 増強の議論は重要そうだがよく理解できていない。マイクロディスクレーザは表面の加工精度が重要だが、フォトニック結晶は電界が奥に局在するのであまり表面精度が重要でないとしている。MITでの結晶製作例として Foresi の1次元導波路を紹介している。
- [47] 野田進。光波長域3次元フォトリソ結晶実現に向けて—自然放出光の完全制御のために—。光学, Vol. 27, pp. 6-11, 1998。
3次元フォトニック結晶は物理的、工学的に興味深い材料であるにも関わらずこれまで $\lambda < 100\mu m$ では実現されていないとしている。具体例として Albet-Angel の3方向ドライエッチングによる Yablonovite 結晶と野田先生の半導体ウエハ融着法による結晶を紹介。Caltec+UCLAの結果は「バンドギャップが形成されつつある」としている。光デバイス応用の観点から、(1)半導体、(2)発光体の埋め込み可能、(3)欠陥導入容易、(4)電流励起可能。をあげている。野田先生の現状は、 $d = 4\mu m$ 。これは $\lambda = 10\mu m$ に対してPBGを示すはずであるがまだその確認は行なわれていないようである。MBE+リソ+RIE+選択エッチ+レーザ回折位置決め+ウエハ融着という高度な微細加工技術のオンパレード。
- [48] J. R. Wendt, G. A. Vawter, P. L. Gouley, T. M. Brennan, and B. E. Hammons. Nanofabrication of photonic lattice structures in GaAs/AlGaAs. *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 11, p. 2637, 1993。
電子ビームリソとRIEでGaAsデバイス。六角格子2次元フォトニック結晶製作。穴径は $65 \sim 370nm$ 、格子定数は $165 \sim 385nm$ 、 $n = 3.54$ といきなり実用域のサイズを実現。深さは $0.6\mu m$ で波長程度しかない。量子井戸のフォ

- トルミにより、格子に沿った蛍光確認。これは自然放出の制御効果を実際に確認した、と言って良いだろう。バンドギャップという観点では初歩的な実験だろうが、実用的デバイスの観点では相当進んだ実験と思われる。
- [49] T. Baba and T. Matsuzaki. Polarization changes in spontaneous emission from gainasp/inp two-dimensional photonic crystals. *Elect. Lett.*, Vol. 31, pp. 1776-1778, 1995。
EB+RIBE. GaAs系量子井戸構造、 $d = 1.1\mu m$ 、 $\lambda = 1.55\mu m$ 。自然放出光の偏光特性が2次元フォトニック構造によって変化することを報告。
- [50] T. Baba, N. Kamizawa, and M. Ikeda. *Physica B*, Vol. 227, p. 415, 1996。
InPのECRドライエッチングによる2次元結晶の製作。
- [51] 馬場俊彦, 池田充貴, 神澤尚久, ハンスブロム。フォトニック結晶とその応用。応用物理, Vol. 67, pp. 1041-1045, 1998。
最新のフォトニック結晶に関する邦文解説。ほとんど半導体材料を使ったものしか意味がないという立場。2次元結晶中に連なった欠陥が導波路として機能することも計算している。これまでにどのような構造が試みられたかがビジュアルによくまとめている。製作に対する要求が丁寧なまとめられている。アスペクト12、寸法誤差 $10nm$ 、表面粗さ $10nm$ 以下という厳しい要求。鋭利・正確・平滑な構造が必要。
- [52] P. R. Villeneuve and M. Piche. Photonic band gaps in two-dimensional square and hexagonal lattices. *Phys. Rev. B*, Vol. 46, p. 4969, 1992。
2次元結晶では正方格子と六角格子でs-p偏光に共通のPBGが開くことを計算で証明。ただし、六角格子でのPBGは少し前にMITのグループが発見されたので、Brief Reportsに掲載されている。
- [53] G. Arjavalingam, W. M. Robertson, and S. Y. Lin. Application of ultrafast optoelectronics to the characterization of photonic crystals. In *OSA Proc. Ultrafast Electronics and Optoelectronics*, Vol. 14, p. 126, 1993。
秋山さんに紹介してもらった最初のフォトニック結晶の文献で、これから調査を始めた。MITの2次元正方格子の分散カーブ測定に用いた100GHz帯の計測手法について書いたもの。

- [54] W. M. Robertson, G. Arjavalingam, R. D. Meade, K. D. Brommer, A. M. Rappe, and J. D. Joannopoulos. Measurement of photonic band structure in a two-dimensional periodic dielectric array. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 68, p. 2023, 1992.
 $\phi 0.74\text{mm}$. 格子定数 1.87mm のアルミナ 2 次元正方格子 (7 層 \times 25 層). 150GHz までのマイクロ波で位相差も測り, 分散関係を実測. 理論計算も良く一致. 外部光とカップリングできないために観測できないモードが存在した. 長波長での実効屈折率は理論的根拠に従い, 誘電率の体積分率比が良いとして実験と合うことを確認.
- [55] H. Kosaka, T. Kawashima, A. Tomita, M. Notomi, T. Tamamura, T. Sato, and S. Kawakami. Superprism phenomena in photonic crystals. *Phys. Rev. B*, Vol. 58, pp. R10096-R10099, 1998.
 川上先生の結晶におけるスーパープリズム効果の発見と解析. バイアススパッタ法による $\alpha\text{-Si/SiO}_2$ 構造. $d = 0.32 \sim 0.4\mu\text{m}$, $\lambda = 0.96\mu\text{m}$. グラファイト構造が 20 層. グラファイト構造は x 方向の 1 軸性なので 2 次元結晶のように TE/TM の混合がなく, 別々に扱える. Full PBG は存在しない. 第 2 バンドあたりの比較的長い波長領域を考えており, これも自分の対象と近い. これまで結晶中のビームの進み方は調べられていなかった. mm 波ではバンド形成による屈折角変化は調べられているがそれほどの効果は観察されていなかった. 本論文では Snell 則を適用すると屈折率が負になるような異常な効果が観察されている. このようなときは群速度の方を考えないといけない. $v_g = \nabla_k \omega(k)$ なので, 分散曲面に垂直に光は進んでいく. これは自分には理解できていなかった. 非常に参考になる. 多分, 自分が観察している 3 次元結晶での異常な方向への回折も本質的には同じ現象で, 分散曲面を考えると見通しを立てられると思われる. この分散曲面の垂直方向と $k_{//}$ が接続するという条件から結晶内での波数ベクトルは完全にわかる. 光集積回路にはこのスーパープリズム効果が有効としている. Joannopoulos の 2 次元導波路はまずは PBG を実現することが前提で計算だけ進めているが, このような構造は相当製作技術が向上しないと実現できないとしている.
- [56] S. Fan, P. R. Villeneuve, J. D. Joannopoulos, and H. A. Haus. Channel drop filters in photonic crystals. *Optics Express*, Vol. 3, pp. 4-11, 1998.

- フォトニック結晶の光集積回路への応用. 2 本の導波路をリング共振器で結んだ波長選択フィルタを先に発表しており, それをフォトニック結晶中の導波路と欠陥で実現する場合のメリットおよび設計論が書いてある. リング共振器の場合は波長よりずっと大きな共振器なのでいわゆる周回型の WGM の伝搬の描像が良いが, 波長オーダーのキャビティモードは伝搬状態では記述できない. 結合の位相整合, より具体的には電界パターンの偶/奇を考えることが重要. 2 次元フォトニック結晶中の点欠陥モードやその縮退などを定性的・解析的にどう考えればよいか, このグループは物理的描像を明確に持っている. FDTD 法で詳細に計算はしているが, 数値計算で適切な構造を探索するのではなく, 設計はあくまでもイメージに基づいて行ない, 計算でそれを裏付けている. この考え方を身につけたいのだが, うまく理解できない. 純粹な 2 次元結晶で, TE, TM の結合がないからこのように簡単に計算も議論もできるという面もある. 現実の 3 次元的なデバイスでこのような設計法がどれだけ有効かはわからない.
- [57] 菊池隆裕. 光学部品を根底から変えるフォトニック結晶に注目集まる. 日経エレクトロニクス, No. 730, pp. 57-61, 1998.
- [58] E. P. Petrov, V. N. Bogomolov, I. I. Kolosha, and S. V. Gaponenko. Spontaneous emission of organic molecules embedded in a photonic crystal. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 81, pp. 77-79, 1998.
 $d \approx 300\text{nm}$ のシリカからできた人工オパールに色素溶液を浸透させ, 自然放出特性の変化を観察. 球の部分が $n = 1.3$, 間隙が $n = 1.49$ のエアトム型結晶. 元々の構造は $\lambda = 500\text{nm}$ に透過ディップを持つ. 自然放出にも同じ波長に発光ディップが生じている. 単に発光スペクトルを調べたのではなくて, 0.5ns の分解能で時間分解計測もしている. フォトニック結晶がない場合の色素の発光はシングル exp 形の単純な減衰をする. 結晶が存在する場合には寿命が長い成分と短い成分に分かれ, 2 つの exp 項で表される減衰が変わる. これは発光スペクトルの中心に PBG が生じたために光の DOS が再分布するためとしている. この報告よりもずっと先に, 3 次元結晶による可視の自然放出を調べ, 寿命が長くなるという結果を得た報告があった. しかし, その実験では PBG ではなくて, ポリステレン分子と色素分子の相互作用により寿命が変化してしまっていたとされていた. この論文では分子間相互作用の

効果が現れないよう慎重に実験している。SEM写真で見るとはかなり乱れ
の大きい結晶のように見えるのだが、2桁もの透過率の減衰を観測している。

- [59] 山本正樹. 軟 X 線多層膜と応用の現状. 精密工学会誌, Vol. 64, pp. 996-999, 1998.

多層膜による X 線光学薄膜技術の現状の解説記事. よく対象にされるのは $\lambda = 13\text{nm}$ で、この時に必要な膜厚は $d = 6.5\text{nm}$. 短い方では $d = 1.6\text{nm}$. $\lambda = 3.1\text{nm}$ あたりが実現されている. この分野で一般的な反射率は 10 ~ 30% くらいで、60 ~ 70% ができたのが画期的とのこと。

- [60] 波岡武. 軟 X 線光学への期待. 精密工学会誌, Vol. 64, pp. 975-978, 1998.

軟 X 線光学の現状の解説. 多層膜は短い方では $d = 1.4\text{nm}$, $\lambda = 2.7\text{nm}$ あたりが実現されている。

- [61] T. Baba, M. Hamasaki, N. Watanabe, P. Kaewplung, A. Matsutani, T. Mukaiyama, F. Koyama, and K. Iga. A noble short-cavity laser with deep-gating distributed bragg reflectors. *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 35, pp. 1390-1394, 1996.

DBR 共振器をエアギャップで作ったという報告. 屈折率コントラストが非常に高くなるので、わずか 3 周期だけ $R \sim 97\%$ が実現でき、小型の素子でよいことになる. $d = 0.31\mu\text{m}$, $\lambda = 0.98\mu\text{m}$. EB リソ + RIBE (反応性イオンビームエッチング)。

- [62] J. S. Foresi, P. R. Villeneuve, J. Ferrera, E. R. Thoen, G. Steinmeyer, S. Fan, J. D. Joannopoulos, L. C. Kimerling, H. I. Smith, and E. R. Ippen. Photonic-bandgap microcavities in optical waveguide. *Nature*, Vol. 390, pp. 143-145, 1997.

SiO_2 上の Si 導波路型 1 次元フォトニック結晶. 幅 $0.47\mu\text{m}$, 高さ $0.2\mu\text{m}$ という細い導波路に直径 $0.2\mu\text{m}$ の穴を格子定数 $d = 0.63\mu\text{m}$ で 8 個並べている. 中央部は欠陥として間隔が広がっている. X 線リソグラフィで加工している. ギャップは $1300 \sim 1700\mu\text{m}$ と非常に広く、 $1540\mu\text{m}$ に欠陥モードがあり、Q 値は 280 もある. 導波路で光を強く閉じこめているのでこれだけきれいに作用すると思われる。

- [63] A. Goyal and M. Muendel. Optical fiber bragg gratings—have a wide variety of uses. *Photonics Spectra*, Vol. 32, No. 9, pp. 116-122, 1998.

ファイバー回折格子は安価で設計が自在にできるので、LD や Er ドープファイバレーザの波長安定化に有望である. この分野では 180GHz に 20 チャンネルを詰め込むために波長幅 0.8nm が必要とされている. また、高出力・横単一モード・縦単一モードが実現できることから、ファイバ回折格子を利用したレーザは非線形光学素子の光源や分光光源として有望視されている. この記事中の層数が増すにつれて反射率がどう変化するかの記述は自分の結晶サイズによる Q 値向上の解析に役に立ちそう。

- [64] 水波徹. 光ファイバー回折格子. 応用物理, Vol. 67, pp. 1029-1034, 1998.

ファイバー回折格子は紫外レーザの干渉縞を石英ガラスに照射したときのフォトリフラクティブ効果による 10^{-2} の屈折率変化で製作する. これはコア-クラッドの差と同程度の大きな屈折率変調である. 屈折率変化のメカニズムは解明中で意外に確立していないことがわかる. 光通信やセンサへの応用が期待されている. 回折格子を単調な周期でなく、チャープさせたり振幅変調することで様々な特性を持たせる工夫がされている。

- [65] K. Inoue, M. Wada, K. Sakoda, A. Yamanaka, M. Hayashi, and J. W. Haus. Fabrication of two-dimensional photonic band structure with near-infrared band gap. *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 33, p. L1463, 1994.

PbO ガラスキャビラリ延伸法で作った 2 次元フォトニック結晶. $d = 1.17\mu\text{m}$, $n = 2.6$. 3 角格子. 赤外域 ($2.5 \sim 3\mu\text{m}$) での PBG を実証. 光波領域での PBG の初めの実証例. 3 角格子では s 偏光でギャップが開かないが、PBG の効果などを検証する実験では p 偏光した光を用いればよいと妥協。

- [66] K. Inoue, M. Wada, K. Sakoda, M. Hayashi, T. Fukushima, and A. Yamanaka. Near-infrared photonic band gap of two-dimensional triangular air-rod lattices as revealed by transmittance measurement. *Phys. Rev. B*, Vol. 53, p. 1010, 1996.

PbO ガラスによる 2 次元結晶. $\epsilon \approx 2.72$. H に共通なバンドギャップ。

- [67] T. A. Birks, D. M. Atkin, G. Wylangowski, P. St. J. Russel, and P. J. Roberts. 2d photonic band gap structures in fibre form. In C. M. Soukoulis, editor, *Photonic Band Gap Materials*, pp. 437-444. Kluwer Academic Publishers, 1996.

シリカキャピラリの延伸による2次元フォトニック結晶, $d = 1.7\mu\text{m}$, $n = 1.45$. 3角格子.

- [68] U. Grüning, V. Lehmann, and C. M. Engelhardt. Two-dimensional infrared photonic band gap structure based on porous silicon. *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 66, p. 3254, 1995.

シリコンウエットエッチによる2次元結晶, $d = 8\mu\text{m}$, $n = 3.4$, $\epsilon = 11.7$. 正方格子. HとEとで別々にバンドギャップ. $200 \sim 500\text{cm}^{-1}$. 理論計算と良く合う. 非励起モードもあるので計算では現れないギャップが出てくることもある. 短波長では散乱のため, 透過率が減少する傾向あり. 2次元系で好きな充填率, 格子定数の結晶を作るなら, これでサンプル製作技術は完成. あとはGaAsで実現することが課題だけ.

- [69] V. Lehmann. Porous silicon — a new material for MEMS. In *Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop*, pp. 1-6, 1996.

1996年のMEMSの最初の招待講演でいきなりフォトニック結晶の話が出てきて驚いた. 先方もこちらの存在に驚いていた. $d = 2.3\mu\text{m}$, $n = 3.4$, $\epsilon = 11.7$ の3角格子を紹介.

- [70] A. Birner, U. Grüning, S. Otto, A. Schneider, F. Müller, V. Lehmann, H. Föll, and U. Gosele. Macroporous silicon: A two-dimensional photonic bandgap material suitable for the near-infrared spectral range. *personal communication (1998.5.14)*, 1998.

シリコンウエットエッチによる2次元結晶. $d = 2.3\mu\text{m}$, $n = 3.4$, $\epsilon = 11.7$ の3角格子. MEMS96で発表した写真の結晶の光学特性を評価した結果が出ている. HとEとで共通のPBGを確認. $\lambda = 4.4 \sim 6.7\mu\text{m}$.

- [71] T. F. Kraus, R. M. De La Rue, and S. Brand. Two-dimensional photonic-bandgap structures operating at near-infrared wavelengths. *Nature*, Vol. 383, pp. 699-702, 1996.

GaAsのEBリソ+RIEによる2次元結晶, $d = 0.18\mu\text{m}$, $\lambda = 0.83\mu\text{m}$ と実用レベルの構造. 厚みは波長オーダーで $0.55\mu\text{m}$. どういうわけか1993年のWendtの論文を引用しておらず, 構造のスペックとしては3年前のWendtに劣っている. しかし, 2次元(2.5次元)結晶の他の論文に見られない特徴として, どうせ無限に厚い構造は製作できないという理由で積極的に導波路構造を構成しており, 光を閉じ込める工夫をしている. さらに評価のために結晶の周囲に放射状に導波路構造を設けており, $\Gamma-M$ や $\Gamma-K$ 方向からTE, TMそれぞれの偏光で透過スペクトルが評価できる構造になっている. $n = 3.42$ の効果と, この導波路による光閉じ込めの効果で, PBGの減衰は素晴らしい, 10^{-3} もある. 一方で, 高屈折率側を主に光が流れる構造の一般性としてPBGの形成上は不利で, この構造も共通ギャップはあかない. けれども偏光を制御できる発光デバイス実現の点で重要としている. Ti:Saレーザでスペクトルを測っているが, Ti:Saでも波長可変域が狭く, PBGの両エッジを一度に測定できない. そこで, 格子定数の違ういくつかの結晶を使って両エッジを別々に評価している. 周期は最大で20程度. 計算との対応は非常によい(無限円柱系と仮定していると思われるが導波路構造のために相当良い近似のはず). また, 有名な非結合バンドの存在も確認しており, 電界分布からそれが励起できないことを説明している部分は非常に参考になる. この論文でやっとこの考え方が理解できた. 起きていることを多面的にとらえる完成度としては相当高い. こういう実験を“proof-of-principle experiment”というのだそう. 実験も解析もほぼ自分と同じことをやっているのだから今後のまとめ方を考える上でも重要. 自分は結晶の大きさを振ってバンドの成長を見た点に特徴がある.

- [72] M. J. Ries, E. I. Chen, and Jr. N. Holonyak. Photopumped laser operation of a planar disorder- and native-oxide-defined AlAs-GaAs photonic lattice. *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 68, pp. 2035-2037, 1996.

AlAs-GaAsの円板を残して回りを酸化することで2次元結晶を実現. $d = 11\mu\text{m}$. 大きな円板なのでWGMが生じ, これがcouplingすることで発光帯がband化して広くなる様子を確認している. 7個の円板しかないクラスターでも実験し, 無限系に比べるとbandの広がり小さいことを示している. 半導体微細加工技術を用いて, セルの数の効果を調べた珍しい例.

- [73] P. W. Evans, J. J. Wierer, and Jr. N. Holonyak. Photopumped laser operation of a planar disorder- and native-oxide-defined AlAs-GaAs photonic lattice. *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 70, pp. 1119-1121, 1997.
AlAs-GaAs の円板を残して回りを酸化する方式による 2 次元結晶においてレーザ発振を実際に示している, $d = 8\mu\text{m}$, $\lambda = 0.74\mu\text{m}$, 劈開面を用いないでこの結晶によるフィードバックだけで発振できた.
- [74] T. Hamano, H. Hirayama, and Y. Aoyagi. New technique for fabrication of two-dimensional photonic bandgap crystals by selective epitaxy. *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 36, pp. L286-L288, 1997.
2次元柱状結晶. EB リソ+ MOCVD 選択成長+成長. エピタキシャル成長なので六角形の面の揃った柱ができ, 表面も平滑. アスペクト > 10 を実現. $d = 0.49\mu\text{m}$, 高さ $2\mu\text{m}$. せっかく光波帯の結晶ができているのに光学特性の評価にはまったく触れていない. 発光層を埋めこんだことまで書いているのに. 議論しているのは柱のサイズや高さで成長速度の関係だけ.
- [75] H. W. Koops, M. Weber, C. Schössler, and A. Kaja. Three-dimensional additive electron beam lithography. In *Proc. of SPIE Metal/Nonmetal Microsystems: Physics, Technology, and Applications*, Vol. 2780, pp. 388-395, 1996.
SEM を用いた電子線 CVD で有名な Koops が $d = 0.5\mu\text{m}$, 高さ $1.5\mu\text{m}$ の 2 次元立方体結晶を製作している. 材質は Pt 微粒子がカーボンに埋め込まれたような導体ではないかと思われる. 論文中には IBM の Lin, Arjavalingam, and Robertson が可視・赤外あたりで評価していると書いているが, 実際の光学実験はこのような微小クラスターでは困難なので, デモンストレーションに製作しただけで終わっていると思われる.
- [76] 国府田隆夫. ポリスチレン微小球集合体 (ラテックス) での光多重散乱効果とフォトニック・バンド効果. 光学連合シンポジウム東京'95 講演予稿集, pp. 265-266, 1995.
ポリスチレンなどのコロイドを用いたフォトニック結晶の研究は今ではいろいろ発表されているが, 2次元系で実際に結果を観測しているグループというところでも国府田先生のところしかない. ところが, 国府田先生のところでどの程度の結晶でどの程度の結果が得られているかを書こうとすると意外に引用

- する文献がない. この論文では例として, $d = 0.37\mu\text{m}$, $\lambda = 0.25\mu\text{m}, 0.31\mu\text{m}$, $d = 3.25\mu\text{m}$, $\lambda = 2.2\mu\text{m}, 2.5\mu\text{m}$ での 2 次元バンドに起因する透過ディップを観測している.
- [77] D. Mei, B. Cheng, W. Hu, Z. Li, and D. Zhang. Three-dimensional ordered patterns by light interference. *Opt. Lett.*, Vol. 20, p. 429, 1995.
多波干渉で fcc, bcc など様々な光格子が作れることを計算と実験で証明. 干渉縞の写真を撮っているだけで特に何もトラップしていないらしい. 誘電体をトラップしてフォトニック結晶を製作する手段と明言.
- [78] W. H. Hongqiang L. B. Cheng, J. Yang, Z. Ki, J. Xu, and D. Zhang. Planar optical lattice of TiO₂ particles. *Opt. Lett.*, Vol. 20, pp. 964-966, 1995.
 $0.24\mu\text{m}$ の TiO₂ 球を干渉格子中にトラップし, 格子定数 $0.8\mu\text{m}$ の 2 次元フォトニック結晶を製作. 回折パターンを観察. フォトニック結晶への応用を意識.
- [79] 藤村徹, 枝松圭一, 伊藤正, 今田彩, 島田良子, 国府田隆夫, 千葉徳男, 村松宏, 安宅龍明. 走査型近接場光学顕微鏡によるラテックス配列膜の観察. 日本物理学会第 52 回年回講演概要集, 第 2 巻, pp. 248 (31p-YB-11), 1997.
- [80] 藤村徹, 枝松圭一, 伊藤正, 今田彩, 島田良子, 国府田隆夫. 走査型近接場光学顕微鏡によるラテックス配列膜の観察 ii. 日本物理学会 1997 年秋の分科会講演概要集, 第 2 巻, pp. 203 (5a-J-12), 1997.
- [81] 阿部憲一, 黒田隆, 南不二雄, 今田彩, 島田良子, 国府田隆夫. ラテックス単層膜における光パルス伝搬の観測. 日本物理学会第 52 回年回講演概要集, 第 2 巻, pp. 248 (31p-YB-12), 1997.
- [82] 松下俊一, 添野一, 佐藤まりこ, 南不二雄, 今田彩, 島田良子, 国府田隆夫. 2 次元フォトニック結晶中の光伝播. 日本物理学会 1997 年秋の分科会講演概要集, 第 2 巻, pp. 203 (5a-J-11), 1997.
- [83] 松下俊一, 添野一, 南不二雄, 今田彩, 島田良子, 国府田隆夫. 2 次元フォトニック結晶中の光伝播 II. 日本物理学会第 53 回年回講演概要集, 第 2 巻, pp. 182 (30p-YH-6), 1998.
- [84] V. Arbet-engels, E. Yablonovitch, C. C. Cheng, and A. Scherer. Bandgap engineering of 3-D photonic crystals operating at optical wavelengths. In

Proc. Quantum Optics in Wavelengths Scale Structures, NATO Series, 1995.
GaAsの電子線リソとRIEによる微細加工。 $d = 460 \sim 515 \text{nm}$ で 350nm 位の穴、 $1.5 \mu\text{m}$ ウエハ貫通で4層のYablonovite結晶。 $1.2 \mu\text{m}$ あたりにバンドギャップ。穴が不均一なので10%程度の透過率の谷しかできない。マイクロ波ラージモデルを作り、それと比較するだけで、計算との比較はしていない。マイクロ波とは穴の断面形状が真円と楕円の違いがあるのでシフトが起こる。理論-拡太実験-原寸実験のリンクがあまりきれいでない。

- [85] C. C. Cheng and A. Scherer. *J. Vac. Soc. Technol. B*, Vol. 13, pp. 2696-2700, 1995.

Arbet-Engelと一緒にやっているドライエッチングによる光波帯 Yablonovite 結晶の製作について。 $d = 460 \sim 515 \text{nm}$ 。

- [86] C. C. Cheng, A. Scherer, V. Arbet-Engels, and E. Yablonovitch. 3-d photonic crystals operating at optical wavelengths. In *Quantum Electronics and Laser Science Conference*, pp. 35-36. OSA Technical Digest Series, 1996.

Arbet-Engel らのドライエッチングによる光波帯 Yablonovite 結晶の製作について。 $d = 460 \sim 515 \text{nm}$ 。

- [87] G. Feiertag, W. Ehrfeld, H. Freimuth, H. Kolbe, H. Lehr, M. Schmidt, M. M. Sigalas, C. M. Soukoulis, G. Kiriakidis, T. Pedersen, J. Kuhl, and W. Koenig. Fabrication of photonic crystals by deep X-ray lithography. *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 71, pp. 1441-1443, 1997.

LIGAを使ったフォトニック結晶。LIGAは非常に適した手法と思うが、どういふわけかこの報告では格子定数があまり小さくない。もっと能力はあると思うが。 $d = 85 \mu\text{m}$, $\lambda = 125 \mu\text{m}$, $\nu = 2.4 \text{THz}$ 。しかしバンドギャップを確認している。結晶は Yablonovite。ただし、ポジヤネガのレジストやセラミックによる型取りなどLIGA特有の手法をいろいろと用いており、Yablonoviteの逆転構造まで実現している。

- [88] E. Özbay, E. Michel, G. Tuttle, R. Biswas, M. Sigalas, and K. M. Ho. Micromachined millimeter-wave photonic band-gap crystals. *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 64, p. 2059, 1994.

シリコン井桁構造。100GHzにバンドギャップ。面内23層、厚さ7層。位

置決めピンに沿ってウェハ積層。(この ϵ では) -16dBノ層。多くの応用では45~50dBで十分なので、3層で良いと言及。

- [89] E. Özbay, G. Tuttle, J. S. McCalmont, M. Sigalas, R. Biswas, C. M. Soukoulis, and K. M. Ho. Laser-micromachined millimeter-wave photonic band-gap cavity structure. *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 67, p. 1969, 1995.

アルミナ井桁構造。ミリ波帯での初めての欠陥モード観察。100GHzバンドギャップ中に $Q \sim 1000$ の共振モード発生。アルミナを使ったのはシリコンよりも導電率が低く吸収が小さいため。そのかわりシリコンプロセスが使えず、 CO_2 レーザ加工で100GHz帯程度のものしか作れない。

- [90] E. Özbay, E. Michel, G. Tuttle, R. Biswas, K. M. Ho, J. Bostak, and D. M. Bloom. Double-etch geometry for millimeter-wave photonic band-gap crystals. *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 65, p. 1617, 1994.

シリコン井桁構造。350GHzにバンドギャップ。面内80層、厚さ7層。製作技術に関しては1枚のウェハを両側からエッチングするのでより薄い、つまり高周波用フォトニック結晶が作れるというだけ。オーバーエッチングで充填率が制御できる(充填率小で実効屈折率小)ので、ギャップ中心周波数が制御できることをデモ。

- [91] E. Özbay, E. Michel, G. Tuttle, R. Biswas, K. M. Ho, J. Bostak, and D. M. Bloom. Terahertz spectroscopy of three-dimensional photonic band-gap crystals. *Opt. Lett.*, Vol. 19, p. 1155, 1994.

$d = 235 \mu\text{m}$ のシリコン井桁構造。 $\lambda = 600 \mu\text{m}$, 500GHz (サブmm波) にバンドギャップ。面内86層、厚さ4層。ミリ波やサブミリ波の高効率アンテナ、光源、導波路等への応用を協調。透過率だけでなく位相差 $\Delta\phi$ も計測し、 $k = \Delta\phi/L + 2\pi f/c$ から波数を実測。(多分、 $\Gamma-L$ 線上での)分散曲線を直接求めた。

- [92] S. Noda, N. Yamamoto, and A. Sasaki. New realization method for three-dimensional photonic crystal in optical wavelength region. *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 35, pp. L909-L912, 1996.

野田先生のウェハ融着式3次元結晶の製作法の提案。

- [93] N. Yamamoto, S. Noda, and A. Sasaki. New realization method for three-dimensional photonic crystal in optical wavelength region: Experimental consideration. *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 36, pp. 1907-1911, 1997.
野田先生のウエハ融着式3次元結晶の製作法の提案.
- [94] S. Fan, P. R. Villeneuve, R. D. Meade, and J. D. Joannopoulos. Design of three-dimensional photonic crystals at submicron lengthscales. *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 65, p. 1466, 1994.
シリコンプロセスでできる3次元光波帯結晶の提案と計算. 3種類の物質, 広いギャップが開き, 製作時のばらつきに影響されにくい. $d = 0.79\mu\text{m}$ で製作できれば $\lambda = 1.43 \sim 1.64\mu\text{m}$ (中心波長 $\lambda = 1.53\mu\text{m}$) に PBG ができるはず.
- [95] K. A. McIntosh, L. J. Mahoney, K. M. Molvar, O. B. McMahon, S. Verghese, M. Rothschild, and E. R. Brown. Three-dimensional metalodielectric photonic crystals exhibiting resonant infrared stop bands. *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 70, pp. 2937-2939, 1997.
誘電体中に3次元的に金属小片が埋まった形の MDPC を提案している. 高分子のスピノコーティングと Al スパッタ膜のフォトリソ+RIE で3層の赤外用 fcc 結晶を作った. $d = 1.4\mu\text{m}$ で $\lambda = 2 \sim 3\mu\text{m}$ にバンドギャップ. 様々な部分の寸法を系統的に変え, 金属ドットの形状を正方形よりも対称性の悪い長方形にした方がバンドギャップが広がることを明らかにしている. -16dB の減衰が得られており, コロイド以外では実質的にはこれがもっとも短い波長での PBG ではないか.
- [96] 小坂英男, 富田章久, 川嶋貴之, 佐藤尚, 川上彰二郎, 納富雅也, 玉村敏昭. 3次元フォトニック結晶における異常屈折現象. 日本物理学会1998年秋の分科会講演概要集, 第2巻, pp. 263 (28a-YE-1), 1998.
- [97] 小坂英男, 富田章久, 川嶋貴之, 佐藤尚, 川上彰二郎, 納富雅也, 玉村敏昭. フォトニック結晶の異方性分散応用—スーパブリズム効果—. 第59回応用物理学会学術講演会講演予稿集, 第3巻, pp. 920 (17p-T-13), 1998.
- [98] D. F. Sievenpiper, M. E. Sickmiller, and E. Yablonovitch. 3D wire mesh photonic crystals. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 76, p. 2480, 1996.

- 3次元の網目状金属フォトニック結晶. $d = 23\text{mm}, \lambda = 50\text{mm}$. 1辺の長さは 10mm . 誘電体同様の PBG の他, プラズマカットオフによる長波長の PBG が発生. 不純物順位を使って深く電磁波が入り込むことを実験的に確認. 六角格子状の不純物配置によりベンゼン様のエネルギー構造.
- [99] M. C. Wanke, O. Lehmann, K. Müller, Q. Wen, and M. Stuke. Laser rapid prototyping of photonic band-gap microstructures. *Science*, Vol. 275, pp. 1284-1286, 1997.
レーザー CVD によってワイヤを3次元的に描画していったメッシュ状フォトニック結晶を製作した例. Al を含んだ有機系原料ガスを流して Al_2O_3 を析出させる. $d = 66\mu\text{m}, \lambda = 75\mu\text{m}$. PBG 観測.
- [100] C. G. Keller and R. T. Howe. Hexsil tweezers for teleoperated micro-assembly. In *Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop*, pp. 72-77, 1997.
MEMS 技術による熱駆動型グリッパの論文に組み立ててみたい対象として Yablonovitch らのダイヤモンド型ワイヤメッシュが含まれている. 実際にそのための部品まで製作されており, 格子定数は $40\mu\text{m}$ 程度か. 金属メッシュとスケール則が成り立つと仮定すると $\lambda = 80 \sim 100\mu\text{m}$ あたりにたいしての PBG を示すであろう. マイクロマニピュレーションに関しても重要な指針を示している. 部品は半導体プロセスで向きを揃えて作り, 部品が取り付けられているウエハの向きや配置をよく考えておき, マニピュレーションシステムが XYZ の自由度だけで必要な作業ができるようにすることが重要としている.
- [101] Í. Í. Tarhan, M. P. Zinkin, and G. H. Watson. Interferometric technique for the measurement of photonic band structure in colloidal crystals. *Opt. Lett.*, Vol. 20, p. 1571, 1995.
ポリスチレンコロイド溶液の fcc フォトニック結晶で, 色素レーザーの干渉計測により 600nm のバンド端近傍の分散関係を直接測定. 干渉縞のシフトにより屈折率または波数が直接計測できる. 光波帯の3次元バンド構造の最初の計測例. 粒子径は 110nm しかなく, 体積充填率で格子定数が決まる. ミー共鳴に近い球サイズならバンドギャップ大と予想.

- [102] Í. Í. Tarhan and G. H. Watson. Photonic band structure of fcc colloidal crystals. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 76, p. 315, 1996.

ポリスチレンコロイド溶液 fcc 結晶 (屈折率比 1.20). 色素レーザのコッセル線で L 点, W 点などアライメント, その後白色光源で 500 ~ 800nm の透過スペクトル測定. L-W 面内で入射方向を変えて不透過帯のシフトを観察. 不透過端=バンド端とみなして, バンド図を抽出. Δn が小さいので偏光依存性は小. n の違う球を混ぜて不純物準位を研究する可能性に言及.

- [103] H. Míguez, C. López, F. Meseguer, A. Blanco, L. Vázquez, R. Mayoral, M. Ocaña, V. Fornés, and A. Mifsud. Photonic crystal properties of packed submicrometric SiO₂ spheres. *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 71, pp. 1148-1150, 1997.

シリカを沈降させて焼結. 粒径の分散は < 5% としているのでばらつきがひどいように思えるが, SEM 写真を見るとかなりきれい. ドメインの大きさは必ずしも大きくなく, ~ 20 μm 程度. 粒径を 220 ~ 535nm の範囲でいろいろ変えて系統的に透過スペクトルを調べている. $\lambda = 0.4 \sim 1.2\mu\text{m}$. (111) 面の垂直ブラッグ反射は $\lambda = 2nd$ という単純な規則に従い, 特にバンド効果による異常屈折などは何も起こらない. 有効屈折率は誘電率の体積分率が良く合い,むしろ Maxwell-Garnett は合わない. 偏光によっても屈折率変わらない. 角度を変えたときのブラッグ波長と理論計算とを比較することによりもう一つのディップが (220) によると結論づけている.

- [104] W. L. Vos, R. Spirk, A. van Blaaderen, A. Imhof, A. Lagendijk, and G. H. Wegdam. Strong effects of photonic band structures on the diffraction of colloidal crystals. *Phys. Rev. B*, Vol. 53, pp. 16231-16235, 1996.

108 ~ 405nm のシリカコロイドの溶媒を変えたり乾燥させたりして様々な屈折率比 m を実現して, 「散乱強度」 $\Psi = \phi(m^2 - 1)/(m^2 + 2)$ をコントロールしている. いろいろな波長 ($\lambda = 0.4 \sim 0.8\mu\text{m}$) で見かけのブラッグ面間隔を求めて等価屈折率がいくらであるべきかを議論している. 単純に媒質屈折率を用いるただの Bragg 則はもともと合わない (特に短波長で). 動力学的回折理論も合わない. Maxwell-Garnett が最も良いという結論. それでもさらに短波長になるとそれも不適切になる. 式 (1) に間違いあり. Erratum 参照.

- [105] Yu. A. Vlasov, V. N. Astratov, O. Z. Karimov, A. A. Kaplyanskii, V. N. Bogomolov, and A. V. Prokofiev. Existence of a photonic bandgap for visible light in synthetic opals. *Phys. Rev. B*, Vol. 55, pp. R13357-R13360, 1997.

$\lambda = 460\text{nm}$ にて擬ギャップ. TEM 計測により $d = 276\text{nm}$. 試料厚さに対して exp で透過率が減衰することを実証. シリカの fcc 最密格子の隙間の方をさらに屈折率の高い液体や CVD による固体で充填するという発想で, 体積充填率の大きな最密格子でありながら実効的な充填率を逆に低くしている. さらにシリカのアニールで粒子を密着させて隙間を小さくすることもできる. 2 成分の誘電体構造の散乱強度が体積充填率や屈折率コントラストで決まる ϵ_r という量で見積もれる. CdS の CVD により隙間を充填されることで高い ϵ_r が実現できたが, さらに $\epsilon_r > 1$ が実現できれば第 2 ギャップで fcc でも PBG が生じると予測.

- [106] S. G. Romanov, N. P. Johnson, A. V. Fokin, V. Y. Butko, H. M. Yates, M. E. Pemble, and C. M. Stomayor Torres. Enhancement of the photonic gap of opal-based three-dimensional gratings. *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 700, pp. 2091-2093, 1997.

150 ~ 450nm のシリカ球の隙間を高屈折率の InP や TiO₂ で CVD 充填するという Vlasov と同じ発想. 隙間をすべて充填しなくても隙間内面を薄くコーティングするだけで十分としている. この主張以外には特筆すべき点なし. しかし, 我々の場合, コーティングした球を並べることでこれが実現できるのでこれは参考になる知見.

- [107] K. A. Fuller. Optical resonances and two-spherical systems. *Appl. Opt.*, Vol. 30, pp. 4716-4713, 1991.

Morphology dependent resonance 特に Bisphere 系の多体協力散乱現象の過去の研究の良いサーベイ. 面白いことにフォトニック結晶同様, Bisphere 系もはじめはマイクロ波で実験している (1965 年頃). エンドファイア配置では 2 球共鳴は存在する. ただしそれほど大きな増強ではない, ka の 25% 以下のギャップなら 2 球共鳴の効果はある.

- [108] M. I. Mishchenko. Coherent backscattering by two-sphere clusters. *Opt. Lett.*, Vol. 21, pp. 623-625, 1996.

2 球系の後方散乱ピークは起こりうるとそれまでも認識されていたが, 理論

的に正確に解くことができず、あまり顕著な効果はないだろうと予測されていた。この論文も結局理論的には厳密に解くことができず、ランダムなクラスタを扱っている。後方散乱ピーク拡がり角は極めて小さいという結果。

- [109] S. Arnold, A. Ghaemi, P. Hendrie, and K. A. Fuller. Morphological resonances detected from a cluster of two microspheres. *Opt. Lett.*, Vol. 19, pp. 156-158, 1994.

アーノルド先生のピベットとトラップでうまくやると2連球を作ることができる。2連球ができたなら電場トラップ中で軸を垂直にして安定してくれる。結局、2球の球径を揃えることができなかった(といっても $5.3\mu\text{m}$ に対して $\Delta d < 10\text{nm}$ なので0.19%の精度では揃っている)ので期待されたコヒーレントな相互作用は観測できなかった。このことは球が他のものと接していてもミー共鳴は変化せずに生き残るということの意味している。

- [110] H. Heinzelmann and D. W. Pohl. Scanning near-field optical microscopy. *Appl. Phys. A*, Vol. 59, pp. 89-101, 1994.

1994年当時の近接場光学顕微鏡の良し解説論文。NovotnyらのMMP法によるプローブ内部および先端近傍部の電界分布やBetzigらによる単一分子の位置および配向計測まで、結果を豊富に掲載。

- [111] N. García and M. Nieto-Vesperinas. Near-field optics inverse-scattering reconstruction of refractive surfaces. *Opt. Lett.*, Vol. 18, pp. 2090-2092, 1993. 近接場像は多重散乱の効果により形状を反映しないという理論解析の結果。

- [112] L. Novotny, R. X. Bian, and X. S. Xie. Theory of nanometric optical tweezers. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 79, pp. 645-648, 1997.

- [113] E. Betzig and R. J. Chichester. Single molecules observed by near-field scanning optical microscopy. *Science*, Vol. 262, pp. 1422-1425, 1993.

プローブ先端近傍における分子のダイポールにより生じる電界分布を計算している。ダイポールの向きにより分布は複雑になり、プローブのどちらかの端が分子上を通過するときに検出される光強度が最大になる。それを考慮すると個々の分子がどちらを向いていたかさえ近接場像から導くことができる。おそらく微小ダイポールと近似できる蛍光単一分子だからこそ近接場像がこのように正確な情報を伝えてくれるのであろう。

- [114] K. Ohtaka. Scattering theory of low-energy photon diffraction. *J. Phys. C: Solid St. Phys.*, Vol. 13, p. 667, 1980.

2次元誘電体球アレイの回折による透過率や反射率の定式化。

- [115] M. Inoue and K. Ohtaka. Enhanced Raman scattering by a two-dimensional array of dielectric spheres. *Phys. Rev. B*, Vol. 26, p. 3487, 1982.

2次元誘電体球アレイ上でのラマン散乱の増強について数値計算。周期構造による電磁波局在状態の2重励起でラマン増強が起こる。その分散曲線に入射光が交差すると 10^4 倍の増強が起こる。

- [116] T. Takemori, M. Inoue, and K. Ohtaka. Optical response of a sphere coupled to a metal substrate. *J. Phys. Soc. Jpn.*, Vol. 56, p. 1587, 1987.

下地膜のプラズマの影響を受ける2次元球アレイの理論。Ag上のAg球ではプラズモンのカップリングでラマン散乱は 10^8 倍に増強。誘電体球でも検討。

- [117] 神馬洋司, 高林志畿, 宮崎博司. 鎖状誘電体球のガウシアンビームによる光散乱と内部電場. 日本物理学会第53回年講演概要集, 第2巻, pp. 182 (30p-YH-7), 1998.

- [118] 高林志畿, 神馬洋司, 宮崎博司. 少数誘電体球の点光源による光散乱と内部電場. 日本物理学会1998年秋の分科会講演概要集, 第2巻, pp. 265 (28a-YE-12), 1998.

- [119] 宮崎博司, 神馬洋司, 高林志畿. 少数誘電体球の電磁場の固有状態と強結合近似. 日本物理学会1998年秋の分科会講演概要集, 第2巻, pp. 265 (28a-YE-11), 1998.

- [120] 古谷野宏一. 電子顕微鏡下における微細作業システムに関する研究. PhD thesis, 東京大学工学系研究科機械工学専攻, 1997.

- [121] 齊藤滋規. 電顕環境下における微細作業自動化に関する研究. PhD thesis, 東京大学工学系研究科先端学際工学専攻, 1998.

- [122] 竹内敬人. 有機化学—構造と反応入門. 廣川書店, 1977.
第2章の炭素原子の混成オービタルや種々の結合がフォトニック構造物に当てはまる考え方だと思うのだが、対応がまだよくわからない。スカラーとベ

クトルの違い、およびその電子軌道の結合そのものが構造を形作るのか、構造の形成と共鳴状態の結合が別々の話かの違いがあるので、あまり無理にアナロジーを求めようとするのも危険であろう。

- [123] Takashi Yamasaki and Tetsuo Tsutsui. Spontaneous emission from fluorescent molecules embedded in photonic crystals consisting of polystyrene microspheres. *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 72, pp. 1957-1959, 1998.

筒井研の山崎君の論文。1997年末時点でのコロイドを使ったフォトニック結晶研究の良いサーベイになっている。液相中のコロイド結晶を使う実験が多い中で、本研究は乾燥させる永山先生の方法を用いており、屈折率が1.6取れる。実験はマイクロ波や近赤外に限られており、実際の可視での発光はこの論文が始めてとのこと。φ220nm±4%のポリスチレン球で、470~520nmにバンドがある。最密充填結晶をSEMで観察したりしているが、fccかhcpかはわからなくて今後の課題とのこと。これが明確に規定できるのが自分の方法の一つの特徴。z方向の回折についてはどちらの格子でも同じ結果になるからこの論文の実験では関係ない。回折条件はただのBraggとSnellの法則だけで合う。有効屈折率は誘電率の体積平均で求めており、これで十分。つまり第1バンドの辺では少なくともほとんどバンドの曲がりがないというつまらない結果。サブμmの光閉じ込めの基礎研究にはコロイド結晶が有効と結論。導入部で、Fabri-Perot共振器では有機ELの電流注入によるレーザー発振に不十分なことをフォトニック結晶に着目した理由としているのが特徴的で筒井先生らしい。

- [124] C. Kearny. Tweezer tactics. *Lapidary Journal*, No. 9, pp. 89-94, 1993.

西洋風の宝飾品の加工に関する雑誌。東工大長津田と山梨大で読める。人間の手に1個1個の工芸品を作る場合のスキルの教本。作業しやすく、かつ観察しやすいように指の操作範囲を大きくあげ、なおかつ精度良く作業できるように手を固定するため、小指を机に押し付ける方法が何種類も紹介されていたりする。この分野はロウ付けが主要な作業なので、机は作業するところをおおきくえぐってあり、立体角が $2\pi sr$ しか取れない机の“上”でなくて、下に何も無い大きな自由空間でほとんど $4\pi sr$ の立体角全部を使って作業をする。工業的にしかるべき精度・再現性でこのような作業を実現すること、あるいは量産でないにしても、物理法則により定められた必要な精度や確度で

このような作業を実現するために、このような伝統的な手法がどのように変革して行くべきかを我々は議論すべき。

- [125] C. Kearny. Tactical soldering. *Lapidary Journal*, No. 11, pp. 87-90, 1993.

宝飾品の加工に関する雑誌。今回はロウ付けのテクニック。ポイントは先に接合した部分の保護に尽きる。宝飾品はAgなどが主体で、Agは熱を特に伝えやすいのでこれが重要。やることは現在の実装技術と同じで、融点の違うロウを段階的に使ったり、あるいはペーストやジェルを塗って熱を逃がしたり、ピンセットをヒートシンクとして使う。また次にピンセットの先の形状を目的に応じて加工して使うことの重要性が強調されている。我々に興味のある微小物体の把持そのものは、ロック式のピンセットを使うのが普通なのでそれほど重要な問題ではない。

- [126] J. Kirkup. The history and evolution of surgical instruments. *Ann. R. Coll. Surg. Engl.*, Vol. 78, pp. 544-552, 1996.

ピンセットは驚いたことにBC3,300年から存在し、このころ基本的な形はほとんど変わっていない。当時から極最近まで、戦場における矢尻や弾丸の摘出のニーズからこれらの器具が発達してきた。医療における微細作業では左手と右手の役割分担が明確に意識されている。ピンセットの剛性などのメカニカルな考察はあまりなされていないみたい。我々が対象とするような微小物体の操作の目的よりは、穴の奥の届かないところにあるものを力一杯引きずり出すニーズが主らしい。

- [127] 宮崎英樹. 手づくりマイクロピラミッド. 日本機械学会誌, Vol. 100, No. 943, pp. 608-609, 6 1997.

- [128] 高根慎司. HDD用コンポジットヘッドの組立. 1996年度精密工学会秋季大会シンポジウム資料, pp. 55-57, 1996.

コンポジットヘッドが微小化するにつれて人手による顕微鏡下の組立作業では能率良く安定した精度で量産することは困難になってきた。これを自動化する試み。人の作業をそのまま機械化するのは困難なので、動作を見直し、簡単な操作で実現できるような工夫をしている。普通はこのような製品寿命の短い製品の生産設備には市販の機構要素の組合せで実現するが、磁気ヘッドをハンドリングするグリッパだけは市販品で適合できるものがないので新

たに開発している。自動化するために部品の形そのものも連続供給できるように設計変更している。

- [129] 日本機械学会編. 細胞のバイオメカニクス. オーム社, 1990.
細胞用マイクロマニピュレータや関連機器を成茂科学器械研究所と共同で開発してきた平本幸男・元放送大学教授監修による細胞の力学的特性やその測定方法の教科書. 特にマイクロマニピュレータの歴史や現状技術の解説に1章を割いている. これだけのまとまった記述は他では見られない.
- [130] D.M.Eigler and E.K.Schweitzer. Positioning single atom with a scanning tunnelling microscope. *Nature*, Vol. 344, pp. 524-526, 1990.
最初の単一原子機械的操作の論文. 原子1個という究極の微小体に働く力が, 主にファンデルワールス力ではないかと記述. 少なくとも電界の効果はなかった. 4Kにまで温度を下げていっているのは表面へのコンタミネーションを避けるためであって, マニピュレーションそのものは室温でも可能. 熱振動を心配して温度を下げていっているのではない. Xe/Ni系.
- [131] D. M. Schaefer, R. Reifengerger, A. Patil, and R. P. Andres. Fabrication of two-dimensional arrays of nanometer-size clusters with the atomic force microscope. *Appl. phys. Lett.*, Vol. 66, p. 1012, 1995.
気相から作った直径9~10nmのAuクラスターをHOPGやWSe₂基板上でAFMでベクトル走査して2次元的に移動. 簡単な十字架を作っただけ. 理論的な考察は何もなく, やりましたというだけ. AFMでのナノクラスターのマニピュレーションはこれが初めてな点にオリジナリティか. 室温. 500mTorr程度に真空引きしてN₂環境下で操作. 配列による磁氣的・電子的量子効果に期待.
- [132] T. Junno, K. Deppert, L. Montelius, and L. Samuelson. Controlled manipulation of nanoparticles with an atomic force microscope. *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 66, p. 3627, 1995.
エアロゾル法で作って分球した30nmのGaAs粒子をGaAs基板上でAFMにて2次元操作. 大気中. 15個の粒子を1 μ m幅に“nm”と配列するデモ. 位置を思った通りに制御した点が新しい. 押していった位置決めしたとは書いてあるが, 実際は引っ張っていったのではないか. 本文の多くはどうしても良

- い解析. コンボリューションによる粒子画像のぼけと, 表面エネルギーの考察で針が尖っているほど3次元的に持ち上げてしまうことがないという考察.
- [133] M. R. Falvo, S. Washburn, R. Superfine, M. Finch, Jr. F. P. Brooks, V. Chi, and II R. M. Taylor. Manipulation of individual viruses: Friction and mechanical properties. *Biophysical Journal*, Vol. 72, pp. 1396-1403, 1997.
 ϕ 20nm, 長さ1 μ m程度のタバコモザイクウイルスをAFMで切ったり滑らせたりする話. AFMにVR研究の定番の操作情報入力・力表示装置PHANTOMを接続している.
- [134] T. Sato. Micro manipulation world. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems Workshop*, pp. 3-12, 8 1995.
- [135] T.Sato and H. Miyazaki. *Robotics Research*, Vol. 7, chapter Intelligent Manipulation Robot in Micro and Nano meter World, pp. 596-604. Springer, 1996.
- [136] Tomomasa Sato. Micro/Nano Manipulation World. In *Proceedings of the 1996 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 834-841, 1996.
- [137] Y. Hatamura and H. Morishita. Direct coupling system between nanometer world and human world. In *Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop*, pp. 203-208, 1990.
- [138] H. Morishita and Y. Hatamura. Development of ultra micro manipulator system under stereo SEM observation. In *Proc. IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1717-1721, 1993.
- [139] 森下広. 微小世界における加工と作業. 畑村洋太郎(編), 情報機器技術, pp. 187-207. 東京大学出版会, 1993.
- [140] 佐藤知正, 古谷野宏一, 畑村洋太郎, 中尾政之. 集動マニピュレーションシステムの構築と微細作業実験による評価. 日本機械学会論文集(C編), Vol. 62, No. 598, pp. 2314-2320, 1996.

- [141] 佐藤知正. 微細作業 - その研究事例 -. 日本ロボット学会誌, Vol. 14, No. 8, pp. 33-36, 11 1996.
- [142] K. Koyano and T. Sato. Micro object handling system with concentrated visual fields and new handling skills. In *Proc. IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2541-2548, 1996.
- [143] J. Hümmeler and M. Weck. 2m³ large-chamber SEM and its application for microsystem production techniques. In *Proc. Micro System Technologies 96*, pp. 832-834, 1996.
- [144] M. Klein and S. Klein. Adapting human behaviour for the development of a new scanning electron microscope. In *Proc. International Conference on Micromachronics for Information and Precision Equipment (MIPE'97)*, pp. 324-328, 7 1997.
- [145] 米山猛, 北川正義, 適用英. マイクロハンドリング装置の試作. 日本機械学会第73期通常総会講演会講演論文集, 第IV巻, pp. 460-461, 1996.
- [146] Y. Hatamura, M. Nakao, and T. Sato. Construction of Nano Manufacturing World. *Microsystem Technologies*, Vol. 1, pp. 155-162, 1995.
- [147] M. Nakao, Y. Hatamura, and T. Sato. Tabletop factory to fabricate 3D microstructures, Nano Manufacturing World. In *Proc. SPIE Microrobotics: Components and Applications*, Vol. 2906, pp. 58-65, 11 1996.
- [148] K. Tsuchiya, M. Nakao, T. Okusa, Y. Hatamura, and K. Matsumoto. Microwork transfer system in Nano Manufacturing World. In *Proc. SPIE Microrobotics and Microsystem Fabrication*, Vol. 3202, pp. 147-156, 1997.
- 畑村研のNMWの部品搬送の部分を取り出した話. 単にマニピュレータを作っているだけでは出てこない話で実際に作業を行う上で本質的に重要なテーマ. マクロなパレットを位置決めする事でマイクロ部品の位置決めができる. 寸法のダイナミックレンジの大きさを階層的に位置決めでカバーしていることになる. これは腕時計の製造などでも使われている当たり前の発想. 同じ会議でFraunhoferのグループがチャックの話やマガジンの話を出してきたのは面白い. Fraunhoferが広く産業一般に通用することを重視しているのに対して

- この論文はNMWに特化した話だが, 本質的には同じことを議論している. 複数のパレットを視野範囲に置くことが重要であることを指摘している点, そのために配置を取っている点はこの論文の特筆すべきポイント.
- [149] T. Suga and N. Hosoda. A novel approach to assembly and interconnection for micro electro mechanical systems. In *Proc. IEEE Intern. Workshop on Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 413-418, 1995.
- [150] M. Schuenemann, R. Grimme, T. Kaufmann, G. Schwaab, U. Bader, W. Schaefer, and J. Dörner. Manufacturing concepts and development trends in the industrial production of microelectromechanical systems. In *Proc. SPIE Microrobotics and Microsystem Fabrication*, Vol. 3202, pp. 130-141, 1997.
- Fraunhofer-Institut for Manufacturing Engineering and Automationの研究. ドイツの μ -FABプロジェクトはモノリシックのMEMSの産業への応用の際には組立・調整によるハイブリッド化が必要と強く主張している. 本家と違って日本よりも真剣にやっている. センサやアクチュエータを作ろうとすると今のICよりも工程がはるかに増えるのだからすべての工程がうまく行く確率, すなわち歩留まりは必然的に減少する. そこでハイブリッド化を実現するためのマイクロファブリケーションプロセスセンターという構想を持っている. 星形チャンバの各部屋で一つ一つの工程ができるプロセスセンターを構築し, さらにマガジンを共通化して外部のプロセスともつなげるようにすることで現実的に集積デバイスを実現しようとしている. 将来的にはプロセスセンターだけで何もかも完結できるはずとしながら, マガジン共通化によってそれぞれの技術を持ったメーカーがそれぞれの加工を分担しながら徐々に集積できるように考えていることがポイント. 基本的には畑村先生のNMWと同じ問題意識だが, 大きく違うのは現在走っている産業の規格や機器をそのまま用いて, これをいかに進化させていくかを考えている点. 組立も重要な工程としつつ, 多様なプロセスが連結できることを重視している点. 究極のデスクトップファクトリーを考えている.
- [151] V. Grosser, V. Hillmann, Herbert Reichl, and R. Grimme. Microfabrication techniques for microsystems - μ fab - and first practical experience. In *Proc. Micro System Technologies 96*, pp. 549-554, 1996.

- [152] R. Grimme, M. Schuenemann, J. Schliesser, T. Kaufmann, and W. Schaefer. Development trends and cleanroom concepts in the industrial production of microelectromechanical systems. In *Proc. Micro System Technologies 96*, pp. 555-560, 1996.
- [153] C. L. Ramin and R. O. Warrington. Micro-assembly with a focused laser beam. In *Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 285-290, 1994.
- [154] R. Buchi, R. Buser, A. Codourey, J. Dual, G. Greitmann, E. Mazza, M. Muler, I. Pappas, G. Schiltges, B. Vogeli, H. von Kanel, and W. Zesch. Nanorobotics in an optical microscope. In *Proc. Micro System Technologies 96*, pp. 621-626, 1996.
- [155] 光石, 渡辺, 中西, 浅井, 渡辺. テレ・マイクロ・サージェリ・システムの試み. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'95 講演論文集, pp. 1408-1411, 1995.
- [156] 佐藤, 三由, 宮崎. 細胞ハンドリングロボットシステムの開発. 第14回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 1135-1136, 1996.
- [157] R. A. Russel. Development of a robotic manipulator for micro-assembly operations. In *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems*, pp. 471-474, 1993.
- [158] K. W. Grace, J. E. Colgate, M. R. Glucksberg, and J. H. Chun. A six degree of freedom micromanipulator for ophthalmic surgery. In *Proc. International Conference on Robotics and Automation*, pp. 630-635, 1993.
- [159] I. W. Hunter, S. Lafontaine, P. M. F. Nielsen, P. J. Hunter, and J. M. Hollerbach. Manipulation and dynamic mechanical testing of microscopic objects using a tele-micro-robot system. *IEEE Control Systems Magazine*, 1990.
- [160] M. Olivier, I. W. Hunter, S. Lafontaine, C. J. H. Brenan, A. Laferriere, and L. R. B. Patterson. A tele-nano-positioning-robot for micro-fabrication and micro-assembly. In *Proc. International Advanced Robotics Program Workshop on Micromachine Technologies and Systems*, pp. 72-83, 1993.

- [161] T. Arai, J. M. Herve, and T. Tanikawa. Development of 3 DOF micro finger. In *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems*, pp. 981-987, 1996.
- [162] P. Kallio, M. Lind, Q. Zhou, and H. Koivo. A 3 DOF piezohydraulic parallel micromanipulator. In *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1823-1828, 1998.
- [163] T. Tanikawa, T. Arai, and T. Masuda. Development of micro manipulation system with two-finger micro hand. In *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems*, pp. 850-855, 1996.
- [164] 新井健生, 谷川民生, R. Larssonneur. マイクロハンドを構成するフィンガーマジュールの機構と制御. 日本ロボット学会誌, Vol. 15, pp. 402-407, 1997.
- [165] G. Greitmann and R. A. Buser. A tactile microgripper for application in microrobotics. In *Proc. SPIE Microrobotics: Components and Applications*, Vol. 2906, pp. 2-12, 1996.
- [166] Y. Suzuki. Underwater performance of flexible microgripper and fine particle manipulation. *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 33, pp. 6056-6057, 1994.
- [167] 中尾政之, 石井和久, 佐藤知正, 畑村洋太郎. 離脱機構を有する非把持形マイクロ・ハンドリング工具の試み. 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 61, No. 583, pp. 1021-1026, 1995.
- [168] 今野武志, 江頭満, 新谷紀雄. 静電界型プローブによる粉体粒子マニピュレーション (第1報). 日本機械学会第72期通常総会講演論文集, 第4巻, pp. 291-292, 1995.
- [169] 古谷野宏一, 笠谷岳士, 宮崎英樹, 佐藤知正. 微小体に働く微小力測定システムの構築. 第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 803-804, 11 1995.
- [170] W. Zesch, M. Brunner, and A. Weber. Vacuum tool for handling microobjects with a nanorobot. In *Proc. 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 2, pp. 1761-1766, 1997.

- [171] C. Bark, T. Binnenböse, G. Vögele, T. Weisener, and M. Widmann. Gripping with low viscosity fluids. In *Proc. 1998 IEEE Micro Electro Mechanical Systems Conference*, pp. 301-304, 1998.
- [172] S. Konishi and H. Fujita. Two-dimensional conveyance system using cooperative motions of many microactuators. In *Proc. IEEE International Conference on Intelligent Robot and Systems*, pp. 988-992, 1996.
- [173] F. M. Moesner and T. Higuchi. Devices for particle handling by an ac electric field. In *Proc. 1995 IEEE Micro Electro Mechanical Systems Conference*, pp. 66-71, 1995.
- [174] R. Grimme, W. Schmutz, D. Schlenker, M. Schuenemann, A. Stock, and W. Schaefer. Modular magazine for the suitable handling of microparts in industry. In *Proc. SPIE Microrobotics and Microsystem Fabrication*, Vol. 3202, pp. 157-167, 1997.
- Fraunhofer-Institut für Manufacturing Engineering and Automation の研究。個々を中心としたドイツの μ -FAB プロジェクトは少し先の産業の要素になる技術を非常にしっかりと開発している。この論文は部品を搬送するマガジンだけに焦点を当てている。自動組立には部品を向きが揃って高精度に供給でき、自由にアクセスできるマガジンが必要である。まずマガジンに必要とされる機能を丁寧に整理している。バーコードなどが表示できることなど、当たり前だが目頭考えないことがいろいろ書いてある。次に従来の半導体産業で使われたマガジンを紹介・分析して、これが今後の微細組立には不十分であると指摘している。この部分だけでも滅多に読めない内容なので面白い。最後に小さな機械部品を搬送できるモジュラーマガジンシステムを紹介している。実際に企業と協力して規格を決め、これを開封する装置などの周辺技術も開発している。直径 3mm のレンズを保持するための三爪ホルダーやそれから部品を取り出すチャックなど面白い。日本でこそどこかでこういう研究をしてそうだが、どこでこういう研究は進められているのか。
- [175] S. Johansson. Hybrid techniques in microrobotics. In *Proc. 1st IARP Workshop on Micro Robotics and Systems*, pp. 72-83, 1993.

- [176] 宮崎英樹, 篠澤康彦, 森下広, 佐藤知正. 電子顕微鏡下での超微小接合システムの開発. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス'95 講演会講演論文集, pp. 1396-1399, 6 1995.
- [177] 谷川, 新井, 橋本. 二本指マイクロハンド用自動焦点システムの開発. 第 14 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 1125-1126, 1996.
- [178] T. Tanikawa, T. Arai, and Y. Hashimoto. Development of vision system for two-fingered micro manipulation. In *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems*, pp. 1051-1056, 1997.
- [179] A. Sulzmann, P. Boillat, and J. Jacot. New developments in 3D computer vision for microassembly. In *Proc. SPIE Microrobotics and Micromanipulation*, Vol. 3519, pp. 36-48, 1998.
- [180] T. Kasaya, H. Miyazaki, S. Saito, and T. Sato. Micro object handling under sem by vision-based automatic control. In *Proc. SPIE Microrobotics and Micromanipulation*, Vol. 3519, pp. 181-192, 1998.
- [181] S. Allegro and J. Jacot. Automated microassembly by means of a micromanipulator and external sensors. In *Proc. SPIE Microrobotics and Microsystem Fabrication*, Vol. 3202, pp. 108-116, 1997.
- [182] T. Akiyama, N. Blanc, and N. F. de Rooij. A force sensor using a cmos inverter in view of its application in scanning force microscopy. In *Proc. IEEE International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 447-450, 1996.
- [183] H. Noguchi, H. Aoki, H. Miyazaki, and T. Sato. Development of finite element analysis system for micro manipulation. In *Proceedings of the International Conference on Computational Engineering Science(ICES'95)*, Vol. 1, pp. 261-266, 7 1995.
- [184] T. Sato, J. Ichikawa, M. Mitsuishi, H. Miyazaki, and Y. Hatamura. Micro-teleoperation with manual task execution posture. *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 15, No. 1, pp. 22-29, 2 1995.

- [185] 光石衛, 中西泰文, 久保田寛之, 富澤泰. 操作者の見たいものを見せる微細作業用視覚システム. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'96 講演論文集, 第 A 巻, pp. 125-128, 1996.
- [186] T. Sato, T. Kameya, H. Miyazaki, and Y. Hatamura. Hand-eye system in nano manipulation world. In *Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 1, pp. 59-66, 5 1995.
- [187] I. Pappas and A. Codourey. Visual control of a microrobot operating under a microscope. In *Proc. IEEE International Conference on Intelligent Robot and Systems*, pp. 993-1000, 1996.
- [188] W. Zesch and R. S. Fearing. Alignment of microparts using force controlled pushing. In *Proc. SPIE Microrobotics and Micromanipulation*, Vol. 3519, pp. 148-156, 1998.
ETH でナノロボットを開発した Zesch が Fearing のところに移籍している。マクロでもしばしばロボット工学で問題にされるプッシングにより微小物体を面内でアライメントする研究。プッシングの研究ではマイクロは最も現実重要な例ではないか。点接触で押すために AFM カンチレバーを使っている。押すのに必要な摩擦力は再現性がなく、日によって違う。それに適応できるように閾値を決めている。力がその値を超えないように押して行き、 $7\mu\text{m}$, 2° の精度で目標物体に沿うように配置している。ロボット工学で Pushing がこれまでどういう理由で注目を集めてきたのか不勉強でわからないが、マイクロ世界での物体操作が Pushing が本質的に重要な初めてのケースなのではないか。
- [189] 宮崎英樹, 笠谷岳士, 古谷野宏一, 佐藤知正. 視覚・力情報を用いた微小物体ハンドリングスキルの実現. 日本機械学会第 74 期通常総会講演論文集, 第 4 巻, pp. 17-18, 3 1998.
- [190] B. J. Nelson, Y. Zhou, and B. Vikramaditya. Integrating force and vision feedback for microassembly. In *Proc. SPIE Microrobotics and Microsystem Fabrication*, Vol. 3202, pp. 30-41, 1997.

- [191] S. Faticow and K. Santa. Planning and control of a microassembly process in a flexible microrobot-based desktop station. In *Proc. SPIE Microrobotics and Micromanipulation*, Vol. 3519, pp. 24-35, 1998.
- [192] 斉藤滋規, 宮崎英樹, 森武俊, 佐藤知正. 超微細世界における微粒子積み上げ作業状態の記述. 第 13 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 第 3 巻, pp. 807-808, 11 1995.
- [193] A. Sulzmann, J. M. Breguet, J. Carlier, and J. Jacot. Virtual reality and high-accuracy vision feedback as key information for microrobot telemanipulation. In *Proc. SPIE Microrobotics: Components and Applications*, Vol. 2906, pp. 38-57, 1996.
- [194] 谷川民生, 新井健生, 橋本佳幸. 微細作業用視覚システムの開発. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス'97 講演会講演論文集, 第 A 巻, pp. 87-88, 1997.
焦点深度の浅い光学顕微鏡下での微細作業において, 別々の焦点面の画像をヘッドマウントディスプレイを用いて, それぞれ右眼と左眼に呈示し, 位置決め操作が効率的にできるよう支援する方法.
- [195] Stephen Palm, Taketoshi Mori, and Tomomasa Sato. Behavior sampling: a recording mechanism for visually based teleoperation. In *Proceedings of the 1998 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1753-1760, 1998.
- [196] M. A. Rodriguez, A. Codourey, and I. Pappas. Field experiences on the implementation of a graphical user interface in microrobotics. In *Proc. SPIE Microrobotics: Components and Applications*, Vol. 2906, pp. 196-201, 1996.
- [197] Stephen Palm, Hideki Murayama, Taketoshi Mori, and Tomomasa Sato. Status driven teleoperation system a new paradigm and an application to the microworld. In *Proceedings of the 1996 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1187-1194, 1996.
- [198] T. Sato, Y. Nishida, J. Ichikawa, Y. Hatamura, and H. Mizoguchi. *INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS*, chapter Active Understanding of Human

- Intention by a Robot through Monitoring of Human Behavior, pp. 349-372. ELSEVIER, 1995.
- [199] 宮崎英樹, 大草武徳, 佐藤知正. 微細作業における再注視機能の実現. 第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 811-812, 11 1995.
- [200] K. Matsumoto, M. Nakao, Y. Hatamura, T. Okusa, and T. Sato. Image-driven operation system for the Nano Manufacturing World. In *Proc. SPIE Microrobotics: Components and Applications*, Vol. 2906, pp. 86-95, 11 1996.
- [201] R. S. Fearing. Survey of sticking effects for micro parts handling. In *Proc. IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 2, pp. 212-217, 1995.
- ロボット研究者の間ではこの論文が微小物体の操作における力学を体系的に扱った最初のものでされている。実体は主に粉体工学において古くから用いられている理論をそのまま掲載しただけである。しかしながら、どうやっても物体との間で引き合う電荷を除去することができず、かならず残留付着力が作用するという指摘は重要である。
- [202] F. Arai, D. Andou, and T. Fukuda. Adhesion forces reduction for micro manipulation based on micro physics. In *Proc. IEEE Intern. Workshop on Micro Electro Mechanical Systems*, p. 1996, 354-359.
- 新井先生はこのころ数年にわたって、微小物体操作のために付着力を軽減する各種の方法を検討されている。表面に粗さを持たせる方法、コロナ放電で帯電を除去する方法などである。この論文はその一連の試みの集大成となっている。
- [203] Y. Ando, J. Ino, K. Ozaki, Y. Ishikawa, and T. Kitahara. Friction and pull-off force on silicon surfacemodified by fib. In *Proc. IEEE Intern. Workshop on Micro Electro Mechanical Systems*, p. 1996, 349-353.
- [204] 宮崎英樹, 笠谷岳七, 古谷野宏一, 佐藤知正. 微小物体に働く付着力. 日本機械学会論文集(C編), Vol. 64, No. 620, pp. 1250-1257, 4 1998.
- 相対湿度 25%程度の比較的低湿環境下での直径数10 μm の酸化膜に覆われた金属微小球の付着力を扱っている。それが静電力による場合が多く、表面粗

- さに依存することを示しているが、どのようにして帯電電位が定まるのかには言及していない。
- [205] Y. Zhou and B. J. Nelson. Adhesive force modeling and measurement for micromanipulation. In *SPIE Microrobotics and Micromanipulation*, Vol. 3519, pp. 169-180, 1998.
- [206] H. Miyazaki, Y. Tomizawa, K. Koyano, and T. Sato. Adhesive forces acting on micro objects in manipulation under SEM. In *SPIE Microrobotics and Microsystems Fabrication*, Vol. 3202, pp. 197-208, 10 1997.
- [207] 宮崎英樹, 富澤泰, 齊藤滋規, 佐藤知正. 電子顕微鏡下の微小物体に作用する付着力. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'98 講演論文集, 第98-4巻, pp. CDROM. 1BIV1-7(1)-1BIV1-7(2), 6 1998.
- [208] A. L. Tiensuu, M. Bexell, J. Å. Schweitz, L. Smith, and S. Johansson. Assembling three-dimensional microstructures using gold-silicon eutectic bonding. *Sensors and Actuators A*, Vol. 45, pp. 227-236, 1994.
- [209] 今野武志, 江頭満, 新谷紀雄. マイクロプローブによる粉体粒子アセンブル技術の開発(第2報). 日本機械学会第74期通常総会講演論文集, 第4巻, pp. 275-276, 1997.
- [210] 増田峰知, 谷川民生, 新井健生. マイクロハンド用エンドエフェクタにおける吸着力の評価実験. 日本機械学会第73期通常総会講演会講演論文集, 第IV巻, pp. 450-451, 1996.
- [211] 齊藤滋規, 宮崎英樹, 森武俊, 佐藤知正. 付着力の時間的変化を利用した微小物体操作手法の提案. 日本機械学会第74期通常総会講演論文集, 第4巻, pp. 281-282, 3 1997.
- [212] 齊藤滋規, 宮崎英樹, 佐藤知正. 電子顕微鏡下超微細作業における place 操作の実現. 日本機械学会第75期通常総会講演論文集, 第4巻, pp. 15-16, 3 1998.
- [213] 宮崎英樹, 佐藤知正. マイクロマニピュレータを用いた電子顕微鏡下でのハンダ付作業. 溶接技術, Vol. 44, No. 9, pp. 123-126, 9 1996.

- [214] 高橋誠也, 中田秀人, 小川治男. 微細ケーブル接続のための顕微鏡を用いたレーザ半田付け技術の開発. 1996年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 462-464, 1996.
- [215] 中尾政之, 村上彰啓, 土屋健介, 大草武徳, 畑村洋太郎. ペンシル形半導体レーザを用いた微細半田付け技術の開発. 日本機械学会第75期通常総会講演会講演論文集, 第IV巻, pp. 7-8, 1998.
- [216] T. Tanikawa, Y. Hashimoto, and T. Arai. Micro drops for adhesive bonding of micro assemblies and making a 3-D structure "Micro Scarecrow". In *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems*, pp. 776-781, 1998.
- [217] 三輪昌史, 金子礼三, 三澤弘明. レーザマニピュレーション法による微小構造物ハンドリング. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'97講演論文集, 第A巻, pp. 83-84, 1997.
レーザトラッピングしたポリスチレン粒子の一部をレーザアブレーションするとその部分には接着性の生成物が付着している. ここに補足した他の粒子を接触させると接合できる. こうして4個の微小球の連結体まで製作している.
- [218] 稲葉孝徳, 元済亨, 藤原英樹, 笹木敬司, 増原宏, 宮脇稔, 佐藤節哉. 光操作した高分子微粒子のレーザマイクロボンディング. 第45回応用物理学関係連合講演会講演予稿集, 第3巻, p. 1015, 1998.
これまでレーザトラッピングでの物体組立というと, せいぜい4個程度の浮遊物体の接合を行なった程度であったが, この論文では基板への微粒子のレーザ励起接着による固定を行なっている. 数 μm オーダーの大きさの誘電体微小球による構造物組立に関してはSEM下での物体組立にレーザによる組立が迫ってきたことを示している.
- [219] 大井. 腕時計ムーブメントの自動組み立て. 1996年度精密工学会秋季大会シンポジウム資料, pp. 43-50, 1996.
腕時計の組立プロセスは微小物体操作によるデバイス組立の一つの最も完成された姿. これを構成する個々の作業要素や機構が必ずしも独自の高度な技術を使ったものとは限らないが, 作業全体の設計とその統合が他に例がないほど完成されている.

- [220] U. Gengenbach. Automatic assembly of microoptical components. In *Proc. SPIE Microrobotics: Components and Applications*, Vol. 2906, pp. 141-150, 1996.
LIGAで有名な旧KfKの研究. 研究室レベルの手作りの微小デバイスを自動大量生産しようとする設計そのものを適した形に変更しなくてはならない. LIGAで作ったベースにボールレンズやフィルタ, LD, PD, ファイバを組み付ける光送受信器を自動化することを題材にこれらの問題を一通り検討している. 部品の供給の仕方(各部品専用のマガジン), 把持の仕方(グリッパや真空チャック), 接合(勘合や接着)をすべて盛り込んだ自動アセンブリを試みている. 発表の時点では完全に動作するところまでは行っていないが, ドイツのいくつかのグループのこうした具体的な工業製品を題材とした実装システムの構築は日本の汎用的な微細作業システムの構築とは観点がかなり違う.
- [221] W. Andreasch, C. de Graffenried, R. Kohler, R. Clavel, T. Sidler, R. P. Salathé, R. Müller, H. Bleuler, B. Gächter, and H. Ehbets. Flexible automated assembly of micro-optical elements (optical SMD). In *Proc. SPIE Microrobotics: Components and Applications*, Vol. 2906, pp. 162-170, 1996.
EPFLの研究. 光学システムを自動組立するシステム. 光学素子はすべて規格化された10mm角のホルダに納め, ホルダには3個の球面上の脚があり, これを位置決めしてはレーザ溶接して固定していく. 固定時の位置ずれ誤差は $\pm 0.7\mu\text{m}$ と評価されている. 要素作業をこのように規格化することにより様々な光学システムが自動化できる. しかもこの規格化されたホルダだけをつかめればよいので, 1種類のチャックを持ったスカラロボットと, 溶接用の光学系を動かすステージだけでシステムが構成できる. LDコリメーションユニットや光学式の位置センサなどを実際に自動製作している. 作業の設計, システムの設計により完成度の高い微細作業が実現されており, 微細作業の重要な研究課題はマニピュレータ開発にあるのではないことがよくわかる.
- [222] M. Bexell and S. Johansson. Microassembly of a piezoelectric miniature motor. In *Proc. SPIE Microrobotics: Components and Applications*, Vol. 2906, pp. 151-161, 1996.
Johanssonの微細組立に関する最新の論文. 昔から提唱している圧電式マイ

クロモータを遂に自分で開発したマニピュレーションシステムで製作した。新しいマニピュレータは結局は電顕には入れずに大気中で使っている。圧電素子の組付けはソルダリングで行っており、 $\pm 1\mu\text{m}$ の精度で6個の素子を固定しなくてはならない。モータサイズは $\phi 4\text{mm}$ 、長さも4mm位。商業生産のためには部品点数を少しでも減らしたい。そのためにステータは基板(Si)と圧電素子6個を組み立てておいてユニット化する。このステータユニットを作る部分の作業を実現した。組立はヒータの上で行ない、圧電素子を正確に位置決めするために、真空ピンセットで持ち上げ、アライメントコーナで方位出しをしてから組み付ける。この作業はすべて自動で行なう。基板のステージへの取り付けあたりの作業がどうなっているかは不明、おそらく、前準備はマニュアルで芯出しなどいろいろな作業をしておき、その後の部品の把持から接合までが自動化されているだけであろう。

- [223] G. Lim, K. Minami, M. Sugihara, M. Uchiyama, and M. Esashi. Active catheter with multi-link structure based on silicon micromachining. In *Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 116-121, 1995.

形状記憶合金で駆動される外径2.8mmの多リンク構造能動カテーテルを試作している。組立作業を低減するために複雑な形状をしたリンク部はシリコンプロセスで製作し、その中央の穴にシリコンゴム製のチューブを通して並べ、リンク間を形状記憶合金のコイルで接続する。1つの関節で10度程度回転する。チューブはエンドエフェクタの通り道となるだけでなく、組立時にはガイドとして機能する。チューブを骨格とした構造を採ることにより、組立工程を人間でも容易にできるようにしている。必ずしもマニピュレータなどを使うわけではないが、微小物体操作による組立作業を人間にも可能になるように設計・統合している例と言える。

- [224] H. Ota, T. Araki, H. Narumiya, T. Oda, and M. Kobayashi. Coil winding process for radial gap type electromagnetic devices with cylindrical stator. In *Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 325-330, 1996.

マイクロモータの組立において、メッキで作ったコイルを円筒内に配置する作業を磁力を使ってステータの回りに巻き付けてはじめて調整された状態で組み立てるプロセスの提案と実際の有効性の確認。必ずしもマニピュレー

タなどを使うわけではないが、微小物体操作による組立作業を人間にも可能になるように設計・統合している例と言える。

- [225] L. Y. Lin, S. S. Lee, M. C. Wu, and K. S. J. Pister. Micromachined integrated optics for free-space interconnections. In *Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 77-82, 1995.
- [226] H. Masuhara. Microchemistry: Manipulation, fabrication, and spectroscopy in small domains. In *Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 1-6, 1995.
- [227] T. Kozuka, T. Tuziuti, and H. Mitome. Non-contact micromanipulation using an ultrasonic standing wave field. In *Proc. IEEE The Ninth Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 435-440, 1996.
- [228] M. Washizu. Manipulation of biological objects in micromachined structures. In *Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 196-201, 1992.
- [229] G. Fuhr, R. Hagdorn, and T. Muller. Linear motion of dielectric particles and living cells in micofabricated structures induced by traveling electric fields. In *Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 259-264, 1991.
- [230] C. H. Ahn and M. G. Allen. Fully integrated micromachined magnetic particle manipulator and separator. In *Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 91-96, 1994.
- [231] H. J. Yeh and J. S. Smith. Fluidic self-assembly of microstructures and its application to the integration of gaas on si. In *Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 279-284, 1994.
- [232] K. Hosokawa, I. Shimoyama, and H. Miura. Two-dimensional micro-self-assembly using the surface tension of water. In *Proc. 1996 IEEE Micro Electro Mechanical Systems Conference*, pp. 67-72, 1996.

- [233] N. Bowden, A. Terfort, J. Carbeck, and G. M. Whitesides. Self-assembly of mesoscale objects into ordered two-dimensional arrays. *Science*, Vol. 276, pp. 233-235, 1997.
- [234] 谷川民生, 新井健生, 小谷内範徳. 微量接着剤塗布による微小組立. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'98 講演論文集, 第 98-4 巻, pp. CDROM. 1BIV1-4(1)-1BIV1-4(4), 1998.
- [235] 日本電子顕微鏡学会関東支部編. 走査電子顕微鏡の基礎と応用. 共立出版, 1983.
チャージアップ効果に関する重要な記述を抜粋すると以下の通り.
pp.62-63 帯電防止法→加速電圧を 5kV 以下に, 試料を 60 度以上に傾斜, 電子線を完全に透過させる. 一般には金属皮膜+表面導通
pp.104-106 帯電が起こると画像がどうなるかに少し言及, 対策→コーティングし直し. 加速電圧小さく, コーティングとグラウンドの導通.(帯電防止が目的で加速電圧を小さくする際には除荷のため一度リークが必要)
pp.159-161 導電性接着剤のほか, 帯電防止剤なども紹介.
pp.175-176 薄い生物試料では電子透過法による無蒸着観察が可能.
p.212 粉末 (=微小物体) 観察の注意点の中でチャージアップに言及.
pp.458-460 生物試料などの電顕下マイクロマニピュレーションでは, 解剖により内部が露出しても帯電が起こらないような工夫が必要なことに言及, 高速走査と低加速電圧を推奨.
- [236] 外村彰編. 電子顕微鏡技術. 丸善, 1989.
2次電子像の電位コントラストを利用した電子ビームテストを紹介. 空間分解能 $0.1\mu\text{m}$ で電位分解能 10mV, それを実現するために, 2次電子検出器の前に減速グリッドを取り付けている.
- [237] A. M. Donald. Taking SEMs into a new environment. *Materials World*, Vol. 6, pp. 399-401, 1998.
環境 SEM(ESEM) は一般的な低真空 SEM とは異なったジャンルの SEM である. 湿ったものというよりもむしろ液体そのものを観察することが主目的で, 20Torr という低真空 SEM よりも 1桁高い圧力を実現し, そのために検出もガス増幅を使った独自の原理に基づいている. 低真空のために WD は

5-10mm に制限され, また, 試料室の蒸気圧・温度を対象物の蒸気圧特性に合わせて慎重に制御する必要がある.

- [238] 牧野洋. 自働機械機構学. 日刊工業新聞社, 1976.
ロボット工学の基礎となる各種の要素機構やその力学考え方などの教科書で, その点では特筆すべき点はないと思われるが, それを末尾の章でロボット機構として統合する際に, 「目の前にある物体をどうしたいのか」という必要機能の観点から機構の選択方法を記述している点が他のロボットの教科書にない特徴である. 初期のこのような重要な思考法がどうして失われてしまったのか. 失われてしまった後の典型例がロボット工学ハンドブック (コロナ社, 1990) である.
- [239] 日本ロボット学会編. ロボット工学ハンドブック. コロナ社, 1990.
1980年代までのロボット工学研究の成果を知るには適したハンドブックである. しかし, 各種センサ, アクチュエータ, ハンド, 視覚処理技術など, 個別の技術についての学術的な内容や奇異な機構の列挙の点では充実している反面, 応用の上で肝心なハンドリングしたい対象物が与えられたときにどのような自由度が必要かというような普遍的な物事の考え方がまったく記述されていない. ロボットの分野は何でもそうであるが, どうしてもっと系統的に整理する努力がなされていないのか. 役に立たない本の例として引用.
- [240] 相山康道, 稲葉雅幸, 井上博允. グラスプレス・マニピュレーションの研究: 操作形態の分類とピボット操作の実現. 日本ロボット学会誌, Vol. 14, pp. 114-121, 1996.
物体をハンドリングする際にグリッパで把持して持ち上げて移動するのでなく, 床や壁など環境との接触を積極的に用い, 1本あるいは数本の指で押し付けて物体の姿勢や位置を変えていく手法に関する研究. 著者は重たい物体のハンドリングを主に想定しているようだが, グリッパの有効でない微小世界ではこれこそが主要な操作手法となる. マクロ世界のグラスプレスマニピュレーションでは, 物体が重力場において不安定な姿勢をとる過渡的な状態では 2-3本の指による指示が不可欠であるが, 微小世界では床との接触部や指との接触部で付着が生じ, 接触点では引張力や抵抗モーメントも作用するので, 微小世界では同じ手法の多くを 1本の指で実現できると考えられる.

- [241] 波辺瞭. 手の振動系におけるマルチループ・フィードバック解析. 第37回日本ME学会大会予稿集, p. 249, 1998.
- [242] K. Takahashi, R. Mizuno, and T. Onzawa. Influence of the stiffness of the measurement system on the elastic adhesional contact. *J. Adhesion Sci. Technol.*, Vol. 9, pp. 1451-1464, 1995.
いわゆる TMO 理論である. JKR 理論に支持系の剛性を加えた理論である. ヒステリシス挙動について初めて明示的に記述している. また, JKR 理論の解説としても重要である.
- [243] K. L. Johnson, K. Kendall, and A. D. Roberts. Surface energy and the contact of elastic solids. *Proc. R. Soc. London A*, Vol. 324, pp. 301-313, 1971.
いわゆる JKR 理論である. Hertz 理論に界面エネルギー (表面エネルギーの差) を考慮したものである. これが発端となって表面エネルギーを考慮した各種接触力学の理論が誕生した. 重要なのは実際に加えた力よりも見かけ上大きな力で押し付けられているように界面が変形すること. およびこの余分の力は必ずしも一定でなく, 押し付け力の関数になっており, 単純に一定の付着力を加えればよいという簡単な話になっていないことである. 物体の離脱に必要な力は $3/2\gamma\pi R$ と表せる.
- [244] J. N. Israelachvili. *Intermolecular and Surface Forces*, 2nd ed. Academic Press, 1992.
最初の版が出てから AFM を中心とした凝着の研究が進んだこともあって, 第2版では JKR 回りが詳しくなり, またヒステリシス現象など最近の話題も加筆されている. 残念ながら英語版のみ.
- [245] H. W. P. Koops, J. Kretz, M. Rudolph, M. Weber, G. Dahm, and K. L. Lee. Characterization and application of materials grown by electron-beam-induced deposition. *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 33, pp. 7099-7107, 1994.
1994年までの電子ビームを用いた CVD 造形法のサーベイ. SEM を用いたもの意外に STM を用いたものも網羅している. 近年目立つようなポンプオイルをそのまま使っているようないい加減な報告はむしろほとんどなく, 意図的に反応物質を選んでいる.

- [246] B. Huebner, H. W. P. Koops, H. Pagnia, N. Sotnik, J. Urban, and M. Weber. Tips for scanning tunneling microscopy produced by electron-beam-induced deposition. *Ultramicroscopy*, Vol. 42, pp. 1519-1525, 1992.
- [247] D. J. Larson, C. M. Teng, P. P. Camus, and T. F. Kelly. Fabrication of microtips on planar specimens. *Applied Surface Science*, Vol. 87/88, pp. 446-452, 1995.
コンタミによる微細加工に言及しているが実は将来課題としてカーボンのコンタミのスパイクを使えば自在な場所にティップが作れるとしている. この論文自体はダイヤモンド研磨粒子を基板上にばらまいておいてそれをマスクとしてイオンビームスパッタリングすればコーンが形成できるというもの. 著者らは微細加工の技術がないので粒子をばらまいているが, 人工的にパターンの作れる方法としてリソグラフィとコンタミを挙げている.
- [248] N. Miura, H. Ishii, J. Shirakashi, A. Yamada, and M. Konagai. Electron-beam-induced deposition of carbonaceous microstructures using scanning electron microscopy. *Applied Surface Science*, Vol. 113/114, pp. 269-273, 1997.
東工大・電総研のコンタミで微細構造を作るという報告. 1997年秋に新聞に室温単一電子トランジスタを実現したとして報道されたグループ. SEM の雰囲気特にコントロールするでもなく, 計測するでもなく, 炭化水素が分解してカーボン質の物質ができることがきけられない, という根拠だけに基づいて形だけ古い論文を1件引用して Koops 他何も重要な研究を引用していない. 現実的に AFM のティップや MIM ダイオードをこれで試作して動作を確認している.
- [249] V. V. Aristov, N. A. Kislov, and I. I. Khodos. Direct electron beam-induced formation of nanometer carbon structures in STEM. In *Microscopy of Semiconducting Materials - 1991*, pp. 775-780. IOP Publishing Ltd, 1991.
- [250] 堀越源一. 真空技術. 東京大学出版会, 1983.
- [251] 飯島徹穂, 大塚寿次, 飯田俊郎. 真空技術活用マニュアル. 工業調査会, 1990.
- [252] 橋口隆吉, 神山雅英訳. デッカー固体物理. コロナ社, 1958.

- [253] H. Miyazaki and T. Sato. Mechanical assembly of three-dimensional micro structures under a scanning electron microscope. In *Proc. International Conference on Micromachronics for Information and Precision Equipment (MIPE'97)*, pp. 335-340, 7 1997.
- [254] 化学工学会編. 微粒子制御. 積書店, 1996.
微粒子の製造から力学, 分散まで一通り必要な知識についてそれぞれそこそこの深さで書いてある. 増田先生による微粒子付着現象の基礎の章からは, だいたいこの分野で力学がどのように認識されているのかがよくわかる.
- [255] 北原文雄. コロイドの話. 培風館, 1983.
親水基と疎水基を持つ界面活性物質にまつわる様々な現象や考え方がわかりやすく書いてある.
- [256] 一ノ瀬昇, 尾崎義治, 賀集誠一郎. 超微粒子入門. オーム社, 1988.
超微粒子と呼ばれる $1 \sim 100\text{nm}$ の粒子の特徴的な物理的性質や特有の製造方法などをいろいろと書いているがまとめ方が雑多なままで特殊な例を並べただけなのか, 普遍的なことなのか何が大事なのかわかりにくい.
- [257] 北原文雄, 吉澤邦夫. 最新コロイド化学. 講談社サイエンティフィク, 1990.
単分散コロイド粒子の製法が詳しく書いてある. また, 本書の最大のポイントは表面間力を直接測定する手法, 特に Israelachvili の SFA やその測定結果が詳しく書いてあることである.
- [258] 日本粉体工業技術協会編. 微粒子工学—分散の基礎と応用—. 朝倉書店, 1994.
まず微粒子間の力をがっちり記述し, 一貫してどうやって分散すればよいかを論じている. 粉体に関する各種の技術のことがかなり詳しく書いてある.
- [259] 小石真純, 岩崎隆夫. ポリマー粒子をつくる. 共立出版, 1994.
乳化重合法による高分子コロイド粒子の製法に関する本であるが, これをさらにある程度まとめて大きな粒子を作ることに力点が置かれている. 液相中での分散の考え方がわかりやすく書かれている. DLVO 理論について説明した本は多いが, 本書は電気二重層の具体的な厚みなど具体的なイメージの手助けとなる記述が多い. 高分子の緩凝集体では, ファンデルワールスポテンシャルの他に, ポリマー分子鎖の相互浸透による接着力が働いており, それが

- 高温ほど顕著なこと, 表面の分子のガラス転移点温度がその重要なパラメータであることなどが独自の記述である.
- [260] 日新化成(株). Uniform Latex Particles, 1995.
Seradyn 社および Dow Chemical 社のラテックス粒子のカタログ.
- [261] 山崎照彦, 川上英昭, 堀浩雄. カラー TFT 液晶ディスプレイ. 共立出版, 1996.
液晶ディスプレイに用いられるスペーサには樹脂ビーズ, シリカビーズ, シリカファイバがある. シリカビーズが現在の主流である. 散布方式は湿式から乾式に移っている.
- [262] 小林幹彦, 不動寺浩, 江頭満, 新谷紀雄. CaTiO_3 基板上における SiO_2 粒子の配列プロセス. 資源と素材, Vol. 112, pp. 481-486, 1996.
低加速電圧 (2kV) で SEM 観察すると電位コントラストにより帯電分布が計測 (相対値のみ) できることを示している. 電子ビームで絶縁物を帯電させると広い範囲に電荷が分布. 一度リークすると周辺部は除荷される.
- [263] 不動寺浩, 小林幹彦, 江頭満, 新谷紀雄. マイクロメーターサイズの粒子配列. 粉体工学会誌, Vol. 33, pp. 176-181, 1996.
- [264] 国立天文台編. 理科年表. 丸善, 1994.
- [265] 東京化成工業編. 取り扱い注意試薬ラボガイド. 講談社サイエンティフィク, 1988.
- [266] 栗原福次, 大石不二夫. 高分子材料. オーム社, 1969.
- [267] P. Pieranski. Two-dimensional interfacial colloidal crystals. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 45, pp. 569-572, 1980.
これがサブ μm 球の 2 次元配列の最初の実験らしい. 粒子は気液界面に強くトラップされる. ゆっくり乾かすと周囲に集まってしまうので, 球に乾かした方がよい.
- [268] K. Nagayama. Fabrication of protein crystalline films on mercury. *Material Science and Engineering*, Vol. C1, pp. 87-94, 1994.
2 次元結晶化のポイントは, 蒸発による対流, 横方向キャピラリ力, 基板の

- 清浄さが重要なので水銀を用いている。他の候補は劈開直後のマイカ、酸洗いたしたガラス。
- [269] A. A. Bochkarev, M. V. Pukhovoy, and L. N. Kasyanova. Kinetics of colloidal particle deposition on solid surfaces. *J. Colloid Interface Sci.*, Vol. 175, pp. 6-11, 1995.
微粒子の凝集や付着の過程をどうモデル化していけば良いかがよくわかる。
- [270] J. Feder. Random sequential adsorption. *J. Theor. Biol.*, Vol. 87, pp. 237-254, 1980.
RSA モデル。平面上を円板が重ならないように埋め尽くしていく過程をコンピュータシミュレーションし、時間との関係や被覆率に普遍的特徴があることを見出した。
- [271] P. Schaaf, A. Johner, and J. Talbot. Asymptotic behavior of particle deposition. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 66, pp. 1603-1605, 1991.
DRSA モデル。すでに吸着した球と新たに接近した球の相互作用も考慮した凝集モデル。
- [272] Shigeo Horiuchi and Shigeru Suehara. Simple method to disperse crystal fragments on a microgrid. *J. Electron Microsc.*, Vol. 39, p. 432, 1990.
TEM 試料調整方法の例。粒子をばらまく際の溶媒の選び方の例でとても参考になる。無機鉱物の観察の際には細かく破碎してサンプルを作るが、その際に CCl_4 の中で砕くのが一般的方法らしい。この溶媒は水を含まないのだからサンプルとの反応が少ない点で優れているらしい。しかし分散性は良くない。この論文はエタノールを少量加えると分散性が良くなるということを報告している。 CCl_4 は分子構造から明らかかなように非極性だが、エタノールは極性で粒子をくるむから、としている。つまり鉱物粒子は帯電しているということか。自分の場合、シリカには有効。高分子には損傷を与えるので使えない。
- [273] 二見明, 黒澤実, 樋口俊郎. 弾性表面波マイクロ霧化器. 日本機械学会第 73 期通常総会講演論文集, 第 4 巻, pp. 73-74, 1996.
 9.6MHz 駆動での液滴の直径は平均 $10\mu\text{m}$. 小さい方は $2\mu\text{m}$ から生じている。液滴の直径の測り方が面白く、潤滑油に霧を照射して顕微鏡で 1 個 1 個の粒の大きさを測っている。 48MHz 駆動ではさらに液滴が微小化し、 $2\mu\text{m}$ 以下

- の割合もかなり大きいとのこと。こういうものがあると少量の懸濁液から基板に粒子をばらまくのに有効だと思う。より一般的な顕微鏡の試料調整法としても良いのではないか。
- [274] M. Kurosawa, T. Watanabe, and T. Higuchi. Surface acoustic wave atomizer with pumping effect. In *Proc. IEEE Intern. Workshop on Micro Electro Mechanical Systems*, p. 1995, 25-30.
液滴の直径は平均 $19\mu\text{m}$. 小さい方は $5\mu\text{m}$ から生じている。分布はかなり広く、 $60\mu\text{m}$ あたりまで混じっている。粒径はレーザドップラーを使った装置で計測している。
- [275] 粉体工学会編. 粒子径計測技術. 日刊工業新聞社, 1994.
粒子の大きさを計測する技術についてはじめにどのような系統の技術が存在するかを述べた後に、それぞれの各論を詳しく記述しており、非常に参考になる。
- [276] 向山敬, 竹田研爾, 五神真. 微小球共振器の結合モード. 日本物理学会 1997 年秋の分科会講演概要集, 第 2 巻, pp. 209 (5p-J-4), 1997.
- [277] 向山敬, 李瑛, 竹田研爾, 五神真. 2 連微小球の結合モードの観察. 日本物理学会第 53 回年回講演概要集, 第 2 巻, pp. 182 (30p-YH-5), 1998.
- [278] 向山敬, 竹田研爾, 五神真. 1 次元配列微小球系における結合モードの観察. 日本物理学会 1998 年秋の分科会講演概要集, 第 2 巻, pp. 242 (27a-YE-2), 1998.
- [279] 宮崎英樹, 荻野洋司, 佐藤知正. 超微細作業のための共振式近接センサの開発. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス'97 講演会講演論文集, 第 A 巻, pp. 79-80, 6 1997.
- [280] 宮崎英樹, 荻野洋司, 佐藤知正. 微細作業ロボット搭載用共振式近接センサの開発. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'98 講演論文集, 第 98-4 巻, pp. CDROM. 1BIV1-3(1)-1BIV1-3(4), 6 1998.
- [281] E. Betzig, P. L. Finn, and J. S. Weiner. Combined shear force and near-field scanning optical microscopy. *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 60, pp. 2484-2486, 1992.
シアフォースを用いた近接場顕微鏡の最初の論文。シアフォースという言葉

はこの論文で初めて登場したのではないか。シアフォースが何物であるかはまったく触れていない。どうしてこれで接触していないといえるかも説明していない。いろいろなプローブに容易に適用できる点を利点として主張している。周波数固定で、振幅が単調に減少し、位相は上昇してから減少することを測定している。先端振幅は $5nm_{p-p}$ 、距離がゼロの点をどうやって判定したか書いてないが、おそらく振幅がゼロになった点と安直に考えているのではないか。近接検知特性は湿度などの環境やプローブの共振カーブの形状に大きく左右されることに言及している。 $K = 0.8N/m, f = 123kHz, Q = 160$.

- [282] R. Toledo-Crow, P. C. Yang, Y. Chen, and M. Vaez-Iravani. Near-field differential scanning optical microscope with atomic force regulation. *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 60, pp. 2957-2959, 1992.

Betzig とは独立に研究されたシアフォース型 NSOM。ガラスピベットを使っている点が我々に近い。ピベットの軸方向 2ヶ所の反射光の干渉によりピベットの振幅を測っている。この計測法の分解能の記述はないが、先端の振幅は $9nm_{p-p}$ と見積もっている。周波数固定で振幅の現象をモニタしているが、近接にともなう振幅の現象の仕方のデータもないし、どうやって接触していないと言えるかも書いてない。けれども特に根拠を示さずにサンプルとの距離を $8nm$ に保ったと述べている。Betzig et al., Toledo-Crow et al. がどちらもシアフォースの実態や本当に接触していないかに触れなかったことが、この点があいまいなまま 6年も多く多くの研究がなされていることの原因かも知れない。 $f = 82kHz, Q = 76$.

- [283] Igor I. Smolyaninov, Walid A. Atia, Saeed Pilevar, and Christopher C. Davis. Experimental study of probe-surface interaction in near-field optical microscopy. *Ultramicroscopy*, Vol. 71, pp. 177-182, 1998.

トンネル電流を同時に測ることでシアフォースは本当に非接触かどうかを調べた論文。結論は接触しており、シアフォースループで制御している最中にプローブ振動数と同期して μA オーダの電流が流れている。また、トンネル電流とシアフォースの関係は針の剛性によって異なる。冒頭にシアフォースのメカニズムは今なお議論されており、空気、真空、液体ヘリウムなどどんな環境でも共通なメカニズムであることまでは推定できていると現状の理解を記述している。この時期まで本当にトンネル電流の報告がなかったのか信じがたい。

原子レベルの接触によるインピーダンスが $\approx 35k\Omega$ という記述が参考になる。トンネル電流と接触による電流は明確に区別できるもので、その間は Jump to contact により不連続に変化する。先端振幅を簡単に Q 値を用いて見積もっているが、荻野の測定によるとそう単純ではないはずだ。ガラス針に金コーティングしたものは剥げやすいことを示したりもしているが、本当にこんな程度の内容がこの分野の人に新しいことなのか。そのことが信じがたい。チューブスキヤナ式が $K = 5N/m, f \sim 3kHz, Q = 50$ 、先端振幅 $5 \sim 10nm$ 。チューニングフォーク式が $K = 10N/m, f \sim 33kHz, Q = 1000 \sim 2000$ 、先端振幅 $0.5nm$ 。

- [284] 奥山喜久夫, 増田弘昭, 東谷公, 近沢正敏, 金澤孝文. 2粒子間相互作用. 粉体工学会誌, Vol. 22, pp. 451-475, 1985.

粒子の付着力についてこれほどがっちりとして書いてある解説書は他にはない。この後で出版されたいくつかの本の基本になっているが、この論文がもっとも詳しい。ただし、表面粗さのファンデルワールス力への影響については数式が間違っており、これをそのまま信じると粗さを考慮してもファンデルワールス力がとんでもなく大きな値となる。自分も研究の当初、その間違いを犯してしまった。

- [285] T. J. Shaffner and J. W. S. Hearle. Recent advances in understanding specimen charging. In *Proc. of the Ninth Annual Scanning Electron Microscope Symposium*, pp. 61-70, 1976.

チャージアップ効果と総称される SEM 画像異常の起こり方を系統的に分類。1971, 1973 の論文の総集編であるが、ミラー効果の原因など研究の進展にともなって記述が変化している部分がある。試料外部にできる電場だけでなく、内部に生じる電場の影響にも言及。正味の第 2 クロスオーバー電圧 E_0 が帯電による電場で変化するショットキー効果を大きく取り上げている。チャージアップによる像障害を防止するには高エネルギー電子で画像形成すべきという結論は、チャージアップそのものを防止したい我々にとっては使えない。

- [286] 古谷野宏一, 佐藤知正. 電子顕微鏡内での微小物のハンドリング—帯電による静電力についての考察—. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス'96 講演会講演論文集, 第 A 巻, pp. 521-522, 6 1996.

- [287] 富澤泰. 電子顕微鏡下での微細作業における微小物体間の付着力に関する研究, 1998.
- [288] 日本機械工学会編. 機械工学便覧 A4 材料力学. 丸善, 1984.
- [289] K. L. Johnson. *Contact Mechanics*. Cambridge University Press, 1985.
応力分布を直接的に扱い, JKR 原著とは違うやり方で議論を展開している. また, 力制御で離脱する場合と変位制御で離脱する場合の挙動の違いに言及しており, どうも JKR の後にもう少し詳細に議論した重要な文献が存在するものと思われる.
- [290] D. Maugis and H. M. Pollock. Surface forces, deformation and adherence at metal microcontacts. *Acta Metall.*, Vol. 32, pp. 1323-1334, 1984.
JKR 以後の一連の付着理論の中で, これだけが塑性域まで議論を拡張している. Rimai et al. は系統的な実験から ϕ 数 μm のポリスチレン球は塑性域に入っていることを示している.
- [291] K. Takahashi and T. Onzawa. Effect of the stiffness of the measurement system on adhesion force curves in the elastic continuum limit. *J. Adhesion Sci. Technol.*, Vol. 10, pp. 17-31, 1996.
TO 理論である. MYD 理論にさらに系の剛性を加えた理論で, Herzt に始まる一連の付着接触力学のすべての項を取り入れた弾性論の範囲では統一理論である.
- [292] T. B. Jones. *Electromechanics of Particles*. Cambridge University Press, 1995.
- [293] H. Miyazaki and T. Sato. Mechanical assembly of three-dimensional microstructures from fine particles. *Advanced Robotics*, Vol. 11, No. 2, pp. 169-185, 10 1997.
- [294] 静電気学会. 静電気ハンドブック. オーム社, 1992.
- [295] 三由貴史. 細胞ハンドリングロボットシステムの開発, 1997.
- [296] 和光信也. コンピュータでみる固体の中の電子—バンド計算の基礎と応用—, 講談社サイエンティフィック, 1992.

- 具体的なバンド計算を実行するための知識が書いてあり, かつ基礎として必要な量子力学や結晶学の知識も丁寧に説明してある. ブリルアンゾーンを描いてバンド図を近似的に描いてみたり, 計算によるバンド図を読み取ることができるようになる上で, 本書がもっとも役に立った.
- [297] Neil W. Ashcroft and N. David Mermin. *Solid State Physics*. Harcourt Brauce College Publishers, 1975.
Kittel の入門書の次に深く理解するにはこの本が良い. Kittel 同様にまず結晶学の知識を理解した後, 逆格子, 周期構造の効果の一般論, 弱結合バンド, 強結合バンドと構成が進んでいくのでバンド理論をしっかりと把握しようとする際には有効である.
- [298] A. Modinos. *Quantum Theory of Matter —A Nobel Introduction—*. John Wiley & Sons, 1996.
原子の量子力学から分子, 結晶と進んでバンド理論に到達するタイプの教科書であるが, 1個の原子にしても結晶中のブロッホ波にしても波動関数の表式を丁寧に整理し, そのイメージの図をふんだんに使っている点の特徴である.
- [299] 近角聰信. 続・物性科学のすすめ. 培風館, 1980.
バンドを説明する上で周期構造の側からでなく, 個々の原子のエネルギー単位が, 結晶化して構造が大きくなることによって低波数の波動関数も存在できるようになってバンドとして広がっていくという説明をしている例. しかし, 分散曲線を導入する部分で論旨に飛躍があり, うまく理解できない.
- [300] 垂井康夫. 半導体デバイス. 電気学会, 1978.
機械科の学生時代から半導体の教科書として用いてきたものだが, 冒頭の半導体の理論の部分も初心者にもイメージが湧くようには書いていないし, 実際にトランジスタを設計しようとする人以外に役に立つ教科書とは思えない. 典型的なバンド理論の利用例としてのみ引用した.
- [301] 花村栄一. 非線形量子光学. 培風館, 1995.
本研究では冒頭のフォトニックバンドギャップの節を参考にした. この部分は応用物理誌の解説記事の修正版である. 1993年頃の当時のフォトニックバンド研究のよいサーベイになっており, 末尾に光の局在との関連や非線形光

学応答の重要性を指摘し、大きな方向性を示唆しているものの、具体的な記述がないのが残念。

- [302] 藤原邦男. 振動と波動. サイエンス社, 1976.
波動の普遍的特徴の基礎中の基礎の教科書である. 連成振動による個々のモードの結合と周波数の分離の部分を理解する上で参考にした.
- [303] 宇野良清, 津屋昇, 森田章, 山下次郎共訳. Charles Kittel 固体物理学入門(上), 丸善, 1988.
結晶, 逆格子の概念, それによる X 線回折の概要を知るには最も適している. 本研究では格子空間の記述, 逆格子空間への変換, 回折条件などを考えるときに常にこの本を主に用いた. 第 1 章と第 2 章が役に立つ. ところが, バンド理論などの部分は具体的な理解が難しく, この点については本書はほとんど用いなかった.
- [304] 山西正道. 半導体中の輻射場の量子制御. 応用物理, Vol. 63, p. 885, 1994.
微小共振器による自然放出光の制御の解説の中で, フォトニックバンド構造の大きな可能性, 光領域での 3 次元構造が実現されていないことに言及. 輻射場や真空ゆらぎのことが初心者にもわかりやすいように, また間違えやすいところを明確に指摘しつつ丁寧に書いてある. MEMS1996 では微小 3 次元共振器が輻射場を制御するということを自分の書ける範囲で書く努力をしたが, そのときに非常に参考になった.
- [305] 山本喜久, 渡部仁貴. 量子光学の基礎. 培風館, 1994.
共振器電気力学の説明をする上で真空場の零点ゆらぎという考え方を積極的に用いている点で輻射場の状態密度の意味が理解しやすい. p.3, pp.145-161 あたりが参考になる.
- [306] 高橋康. 電磁気学再入門 —QED への準備—. 講談社サイエンティフィク, 1994.
輻射場の概念について自分が持っている中では最もちゃんと説明しており, かつ理解しやすい解説書である. 光量子のモードの数などは pp.113-116 あたりに解説されている.
- [307] H. Miyazaki and K. Ohtaka. Near-field images of a monolayer of periodically arrayed dielectric spheres. *Phys. Rev. B*, Vol. 58, pp. 6920-6937, 1998.

- [308] 矢野聡, 瀬川勇三郎, J. S. Bae, 水野皓司, 大高一雄. 誘電体微小球によるミリ波領域における 2 次元光結晶. 日本物理学会 1997 年秋の分科会講演概要集, 第 2 巻, pp. 203 (5a-J-13), 1997.
- [309] G. Birkl, M. Gatzke, I. H. Deutsch, S. L. Rolston, and W. D. Phillips. Bragg scattering from atoms in optical lattices. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 75, p. 2823, 1995.
Cs 原子の格子定数 300 ~ 600nm の光格子による可視光のブラッグ反射の初めての観測例. 散乱しやすいように共鳴線に近いプローブビームを用い, ブラッグ反射を固定角度で計測. 格子を組むことで反射率が 10^5 倍に増強. 光格子の構成ビームを遮断して直後にプロービング. デイレイや波長のアチューニングをいろいろ変えて実験. 原子密度が高くなり, 多重散乱が支配的になるとフォトニックバンドギャップなども観察できると言及. 後で良く見ると Phillips 先生のグループの論文.
- [310] M. Weidemuller, A. Hemmerich, A. Gorkitz, T. Esslinger, and T. W. Hansch. Bragg diffraction in an atomic lattice bound by light. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 75, p. 4583, 1995.
Rb 原子の格子定数 390nm の光格子の長距離範囲での配列具合の情報を得るために, 共鳴線に近い青色光のブラッグ反射を観測. 計算では回折効率 3% 位で実測は 0.2%.
- [311] 矢野聡, 瀬川勇三郎, J. S. Bae, 水野皓司, 大高一雄. 誘電体微小球による 2 次元光結晶の作製. 日本物理学会第 53 回年回講演概要集, 第 2 巻, pp. 181 (30p-YH-3), 1998.
- [312] 矢野聡, 瀬川勇三郎, J. S. Bae, 水野皓司, 大高一雄. ミリ波領域における 3 次元光結晶の作製. 北大電研シンポジウム・フォトニック結晶による輻射場の制御, 3 1998.
- [313] S. Datta, C. T. Chan, L. M. Ho, and C. M. Soukoulis. Effective dielectric constant of periodic composite structures. *Phys. Rev. B*, Vol. 48, pp. 14936-14943, 1993.
- [314] R. R. Alfano et al., editor. *The Photonics Design & Application Handbook*. Laurin Publishing, Inc., 1995.

- [315] Tadanori Yoshioka, Masahiro Kawasaki, Junko Yamamatsu, Takeshi Nomura, Toshiyuki Isshiki, and Makoto Shiojiri. A preparation method of sections of fine particles and cross-sectional transmission electron microscopy of Ni powder. *J. Electron Microsc.*, Vol. 46, pp. 293-301, 1997.
微粒子の断面をTEM観察するために粒子を無電界Niメッキで包埋し、それをスライスするという方法の提案。これはフォトリソグラフィのメタルにエアアトムを埋め込んだ構造の一つの実現方法として参考になる。
- [316] Hiroshi Matsuo, Nobutaka Kobayashi, Yoshihide Kimura, and Ryuichi Shimizu. Development of a nanoprobe cathodoluminescence scanning electron microscope. *J. Electron Microsc.*, Vol. 45, pp. 453-457, 1996.
近年(1996年)のカソードルミネッセンスの実施例。写真や図が丁寧に実際にどういふ器具を使うかがよくわかる。かなり古くからある技術のはずだが、1996年の時点でも教科書で良く見るものと基本的には変化はなくこの程度である。自分のフォトリソグラフィの研究でもCLが今後有力な武器になると期待している。
- [317] Katsumi Ura, Hiromu Fujioka, and Teruo Hosokawa. Picosecond pulse stroboscopic scanning electron microscope. *J. Electron Microsc.*, Vol. 27, pp. 247-252, 1978.
SEM中で20psのパルスビームを実現した例。1978年の論文なので現在はもっと短いパルスも実現されているだろう。この程度のパルス励起ならSEM中でカソードルミネッセンスで使えるということだ。
- [318] 大橋弘隆. ロードバランサとその応用. 計測と制御, Vol. 36, pp. 874-880, 1997.
知能を持ったロボットでなく、作業に求められる機能のうち、人間に得意な部分は人間に任せ、人間が苦手な機能だけを分担する、というコンセプトで作られた装置。作業者をハンドリング対象物の荷重から解放し、人間が得意とする位置決め作業に専念させる。遠隔操作方式に比べ、現場に違和感なく受け入れられる性格を持っているとのこと。きっとこの微細作業に対するバージョンが存在するはず。それこそが重要。
- [319] 林周二. 統計学講義. 丸善, 1982.

- [320] Michael Bass. *Handbook of Optics II*. McGraw-Hill, Inc., 1995.
光学関係の各種計測手法や物性値など本当に漏れなく記述してある。わからないことがあったらとりあえずこの本に当たると何か手がかりがつかめる。
- [321] 工藤恵栄. 光物性の基礎. オーム社, 1977.
電磁波の物質との作用や伝搬を考える上では最も頼りにしている本である。特に第2章の放射電磁界の部分では分極や誘電率、屈折率のことが非常に詳しく記述してある。
- [322] 日本電子. JIR-WINSPEC50 WINSPEC ソフトウェアシステム(追補版), 1996.
Kramers-Kronig 変換の原理などもある程度詳しく書いてある。
- [323] 田岡三生. FT-IR の基礎と実際. 東京化学同人, 1986.
我が国の代表的な分子分光学者による教科書。赤外スペクトルの意味やFTIRの各種測定法(顕微法も含む)がバランス良くまとめられており、FTIRに関してはもともと代表的な教科書と思われる。
- [324] 平石次郎. フーリエ変換赤外分光法. 学会出版センター, 1985.
フーリエ変換方式の分光法の原理や数学的取り扱い、各種の補正方法、FTIRのメカなど、どちらかというとFTIRを製作しようとする人向けの教科書で、FTIRで得られるスペクトルの物理的な意味などの記述はまったくない。
- [325] 中原勝儼. 分光測定入門. 学会出版センター, 1987.
細かい技術的なことにはあまり参考にならないが、いろいろな波長域でどのような素子やテクニックが用いられるか、どのような現象やどの程度の周波数精度が問題とされるかなどが概観できる。
- [326] Edward D. Palik. *Handbook of Optical Constants of Solids II*. Academic Press, Inc., 1991.
末尾に各種金属、半導体、酸化物、フッ化物などの遠赤外から真空紫外までの詳しい複素屈折率のデータがあるが、なぜかAu, Ag, Cu, Si, SiO₂など重要な物質に限ってデータが記載されていない。

- [327] 化学大辞典編集委員会編. 化学大辞典. 共立出版, 1993.
化学物質のことがわからなかったらまずはこれを見る. 製法・構造・性質が一通り書いてあり, 性質はかなり細かいことまで書いてある.
- [328] James C. Seferis. Refractive indices of polymers. In J. Brandrup and E. H. Immergut, editors. *Polymer Handbook*. Wiley, 1989.
ポリビニルトルエンの屈折率の問い合わせに対して, 自分で計算しろということ Seradyn Inc. からコピーが送られてきた.
- [329] 日本化学会編. 化学便覧 基礎編 I. 丸善, 1994.
様々な化合物の主な特性が一覧表になっている. 密度や光学特性は記載されていたり記載されていないかったりする.
- [330] 堀口博. 赤外吸光図説総覧. 三共出版, 1993.
様々な物質の赤外吸収スペクトルや原子団の様々な振動モードと対応する吸収線を示したデータブック.

