

1次元ラインセンサーによる広角散乱光撮影装置の開発

谷川正幸
京都産業大学理学部

1. はじめに

次世代ディスプレイや光源としての有機電界発光素子¹の改良が進んでいるがエネルギー効率の向上には素子表面構造の工夫による外部量子効率の向上が欠かせず、発光の空間的パターンの測定が必要になる。また、新しい光学材料として自己組織化コロイド結晶が注目されていてその秩序形成機構の解析が待たれているが、それには光散乱法による結晶構造解析が必要である。いずれの場合にも、広がり角としてほぼ180度の範囲に渡る対象表面からの発光をなるべく余すところなく捉えて記録する必要がある。また、多数の点からの発光や長時間に渡る変化を記録するには、操作の自動化も欠かせない。そこで、回転ラインセンサーというシンプルな機構によってこれらの要求を満たす撮影装置を開発し、自己組織化コロイド結晶のKossel線回折像を撮影することができるようにした。

2. Kossel線回折実験装置

オパールは自然に存在するコロイド結晶であるが、その例でわかるようにコロイド結晶は可視光域で光回折を起こし特有の構造色を呈する。人工的なコロイド結晶の制作もできる。ポリスチレンラテックス粒子などを純水中に分散すると始めは混濁しているが、粒子の表面電荷と水中のイオンの電荷により、粒子径のよくそろったものを使う場合には粒子の自己組織化が起こり、徐々に結晶粒が成長していく²。複数の材料を組み合わせた合金結晶もできるし、さまざまな光機能を持ったフォトリソグラフィ結晶の開発に結びつけることも可能となる。

結晶としての秩序形成過程を分析するための実験的手法として、単色レーザー光を照射することによって生じる散乱光のKossel線回折がたいへん有用である。Kossel線は発散光線が結晶中を通過するときに回折条件を満たす方向の光が反射・散乱される結果生じるものである。発散光の回折条件は結晶格子面の向きと間隔によって決まる円錐面上で満たされるので、散乱光はそれらの円錐面上で弱くなり、記録装置面で暗いループとなって記録される。

Kossel 線回折の方法は一度の撮影で多数の結晶格子面を測定することができるため、もともとシンプルで、コロイド結晶のようなやわらかいものの測定や時間変化過程の測定に適している。ただし、多くの情報を記録するには散乱光をなるべく余すところなく捉えて記録する必要があるため、大きな角度広がりカバーすることができる広い記録面をどのようにして得るかという問題がある。従来は、試料を掩うように設置した半円筒面状のフィルムを使って記録している。フィルムでは自動化や測定の効率の点で問題が多いものの、ビデオカメラ等を撮像装置として使う様々な方法・アイデアにはいずれにも難しい問題が存在し、フィルムに替わる有力な記録法は実現しなかった。

3. ラインセンサーの利用

ビデオカメラなどに使われる CCD 素子や CMOS センサーのようなエリアセンサーは幅と高さが 25mm 程度を超えるものの入手が困難であるし、大きい入射角の入射光に対する感度が低下するという問題もある。そこで収束のための光学系が必要になるが、一般にどのような光学素子でも大きい入射角における性能には問題が多い。透過率の低下、反射・散乱によるノイズの増加、光路設計の難しさなどである。これまで試行したものの中では、半透明スクリーン上に投影された散乱光パターンを通常のビデオカメラで撮影するという間接的な方法が比較的有効であったが、光損失が大きい点と空間分解能の低下という点に問題があった。

そこで、散乱光を直接カバーすることができる大面積の撮像面を得るため、エリアセンサーではなくラインセンサーを使用する装置を考案することにした。CCD ラインセンサーなどを用いた「ラインセンサーカメラ」は検査・測定の目的で使われているが、2次元情報を得る必要がある場合、多くは測定対象の移動を使う。今回はコロイド結晶などの解析に適した方法として、測定対象の移動ではなくセンサーのスキャンによる方法を検討した。1次元ラインセンサーを横移動することにより、光のロスはあるが、センサーのサイズと移動経路で決まる面を撮像面として持つエリアセンサーと同等の装置を構成することができる。

ラインセンサーの移動経路は直線である必要はなく、原理的には自由に選ぶことができる。たとえば、ラインセンサーの次元方向に対して平行な直線を軸として回転移動をおこなうようにすれば、円筒面フィルムと同等の撮像面が得られる。この方法は蓄積された過去のデータとの比較や解析ノウハウの活用が容易である点でメリットがある。ただ、フィルムの場合はレーザー光の入射経路としてフィルムに開けた小さい穴を使うことができたが、ラインセンサーの場合は別に入射経路を確保する必要がある。また、試料の周りを取り囲むように移動するため、試料の取り付け方への制限が生じたり特殊な駆動メカニズムを開発する必要が生じたりする。

今回は、開発期間やコストの問題を避けるため、別の方法として、センサー次元方向に対して垂直な軸の周りにラインセンサーを回転させるようにした。こうすると、おおむねセンサー

の長さを半径とする円を撮像面とすることができる。図1で概念を示すように、2つのラインセンサーを回転ステージに取り付けて回転させるようにし、内側のセンサーのカバーする範囲と外側のセンサーのカバーする範囲を合成して広い撮像面を得ることもできる。また、同図で示すように、回転軸の近傍に空間を設けることによって、そこをレーザー光入射経路として使うことができる。ラインセンサーからのビデオ信号の各ラスタースキャンは動径方向（R方向）でありスキャンの向きは方位角方向（ θ 方向）であるので、R- θ 座標をX-Y座標に変換する画像マッピングが必要になるが、これはソフトウェアでおこなうことができる。マッピングによって画質劣化が生じるので、データ保存については生データを諸パラメータと共に保存するようにする。

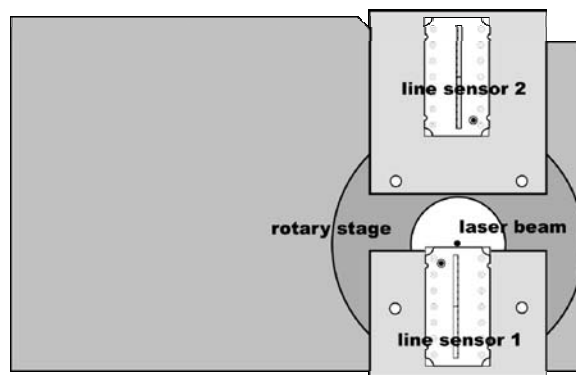


図1

4. 装置開発

本装置はシンプルさが特徴であるが、装置開発においても簡便さを重視して短時間で全体を仕上げるよう考慮した。そのため、個々の機能に適した道具を選び、その組み合わせで全体を構成する。

センサーヘッド

回転ステージはステッピングモーターで駆動される市販品を使った。回転軸の位置に空間を設けてレーザー光の入射経路を確保した。レーザー光は金属パイプの中を通るようにし、ラインセンサーの電気配線をそのまわりに配置して、レーザー光の経路に干渉しないようにした。図2に実装状態の装置の写真を示す。2つのラインセンサーをデカップリングコンデンサーなどと共に円形のプリント配線基板に乗せ、レーザー光・ケーブル導入部とともに回転ステージに取り付けた。



図2

ラインセンサーチップはTexas Advanced Optoelectronic Solutions が作っている TSL1402R を使用した。これの特徴は受光部の端とパッケージの外縁との距離が 1.5mm 程度しかないことであり、受光部の端のかなり近くにレーザー光を通過させることができる。それがこの素子を選んだ大きな理由である。図2で円形プリント基板の中央に見える穴はレーザー光を通過させる穴である。TSL1402R の受光部の長さは 16.4mm しかないので、2つの TSL1402R を配置してトータルの長さを 32mm まで伸ばした。画素数は1インチあたり 400 である。

センサー駆動回路

2つの TSL1402R を動作させる駆動回路は PSoC というプログラマブルコントローラーチップで作った。PSoC のプログラミングと回路作成はほとんど準備がいらす簡単な作業で終了する。今回は水晶発振器を組み込んで時間精度を高め、ビデオ信号処理プログラムでのタイミング補正の省略を図った。この駆動回路と同じ基板上に、ビデオ信号から高周波数ノイズを除くローパスフィルターと、ビデオ信号レベルを調整する分圧回路を置き、そこからアナログ入力インタフェースへ接続する。

ステージ駆動とビデオ入力のプログラム

回転ステージはモーターコントローラーを PC から制御して駆動する。モーターコントローラーの制御プロトコルを自動実行するために expect というインタープリターで動作するスクリプトを作成した。このスクリプトでは、ビデオ入力プログラムの制御もおこない、ステージの回転とビデオ信号入力のタイミングを同期させた。複数のプロセスとの通信を同時に制御することが容易にできるため expect を使用した。モーターコントローラーとの通信を直接おこなうプログラムは cu というプログラムである。ビデオ入力は PC に接続したオーディオインタフェースのライン入力からおこない、そのコントロールには ecasound というプログラムを使った。

オーディオインタフェースはノイズの少ない良質のアナログ入力装置であるが、ビデオ信号の直流成分が失われるため、そのままでは低周波領域に歪みが生じる。そこで、センサー駆動

回路のタイミングによってラスタースタック間に無信号期間を設け、その信号レベルを基準にして直流成分の回復をおこなう。

ビデオ信号の座標マッピング変換

記録されたビデオデータにさまざまな処理を加えてX-Y座標上の画像データに変換する。これをおこなうプログラムは octave というインタプリタで作成した。これは1次元時系列データや2次元画像データのいろいろな計算を効率よくおこなうことができるが、R- θ 座標からX-Y座標への座標マッピング処理は別の高速な C++ プログラムによっておこなった。

マッピングに必要なパラメータを得るため、透明スケールを通った平行光線を本装置で撮影した。図3は1mm間隔の透明スケールと、取り込んだデータをR- θ 平面（下向きにR,右向きに θ ）にプロットしたものである。2つのセンサーの位置は180度ずれているが、このプロットではその補正はすでにおこなわれている。また、両センサーの重複部分の消去もおこなわれている。

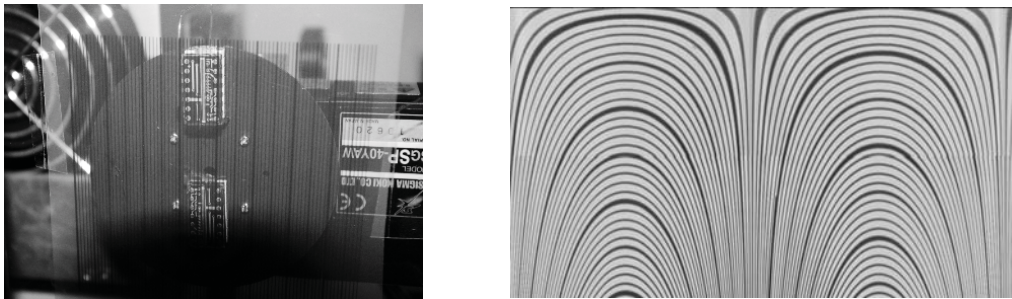


図3

5. Kossel線の撮影

実際にKossel線の撮影を試みた結果とそれによって浮かび上がった検討課題について述べる。

レーザーは波長488nmのアルゴンイオンレーザーで、出力光パワーは0.5mWたらずである。レーザービームは回転軸の位置に沿って回転ステージとセンサー基板に開けた穴を通過して試料に達する。レーザービームは焦点距離250mmの凸レンズでゆるく絞って試料セルに入射している。センサー面と試料の間隔は約20mmであり、半径32mmの円形撮像面によってカバーされる範囲は半立体角のほぼ45%になる。露出調整はセンサー出力レベルをオシロスコープで観察しながら入射光強度を調整することによっておこなった。入射光強度の調整はアルゴンイオンレーザーの出力調整機能である程度できるが、モノクロメータの離調による減衰も使用する必要があった。試料中の結晶欠陥によってほぼ等方的に散乱光が生じるような場所を探す。

図4は本装置で得られた Kossel 線像であるが、ビデオ信号の直流成分の喪失によって起こる動径方向の濃淡パターンが存在する。ピーク強度が高い（白い）部分を含むラスタの黒レベルが他に比べて低くなっていて、それに伴い、内側センサーのエリアと外側センサーのエリアの境界が強調されている。黒レベル変移によってセンサーのエリア境界が強調されるのは、両センサーが異なる動径上に取り付けられているためである。

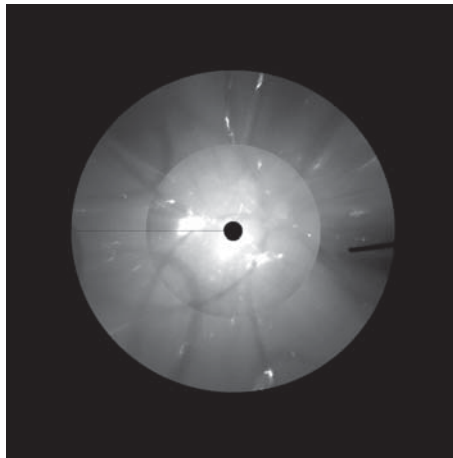


図4

図5は同じビデオデータのラスタごとに黒レベル推定をおこなって補正した結果である。動径方向の濃淡パターンはほぼ完全に補正され、Kossel 線パターンがより明瞭になった。内側センサーと外側センサーのエリア境界はセンサー素子のばらつきによると思われる、必要なら、さらに補正をおこなうこともできる。

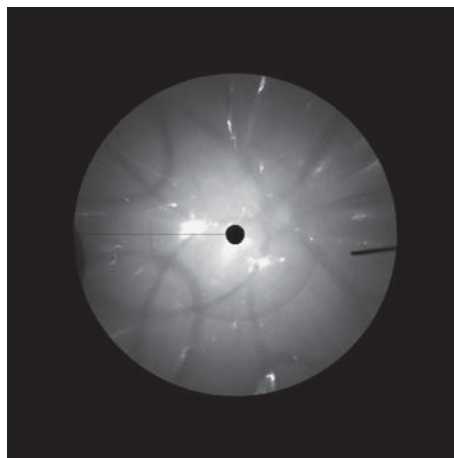


図5

この試料の場合は微結晶が多くその表面反射による明るいスポットが見られ、それによる全体の明度低下があるものの、ループ状の Kossel 線をはっきりと認めることができる。試料は三元合金のコロイド結晶である。合金では複雑な結晶構造をとる場合もあるが、結果を見ると、単純な六方構造であると思われる。正確な判定はシミュレーションとの比較によっておこなう必要があるが、従来円筒面フィルムの場合に使用していたプログラムを平面用に修正する必要がある、これは今後おこなう。

結晶格子定数の決定には撮像面と試料との位置関係を正確に測定する必要もある。Kossel 線の線幅に効いている要因を調べるには、明るいスポット以外のノイズを装置側の工夫によって低減する工夫も必要である。図 5 にも現れている同心円を描くノイズは、センサー感度の不均一が原因であると考えられるが、このようなノイズはセンサー素子の選別によって減らすこともできるし、補正によって系統的に低減することもできる。

6. まとめと今後の課題

回転ラインセンサーというシンプルな機構の装置を作成してコロイド結晶の Kossel 線回折の撮影をおこない、この方式が広角散乱光の撮影に十分有効であることが示された。

前節で述べた検討課題に加え、本装置にはまだ残された開発課題がある。その第一は、言うまでもなく自動露出調整である。液晶シャッターやフィルターのような光学素子を光路中に余分に入れることは撮影範囲を制限することになるし、反射光によってノイズの増加が生じる。しかし、センサーの光積分時間の変更ができるようにすることによって露出調整は実現可能であり、その場合は余分な制限や画質悪化を避けることができる。積分期間とデータ読み出し期間を分け、積分期間のタイミングをフォトダイオードなどの光センサーから得られる明るさ情報で制御する。回折光撮影の場合は、レーザー光源側の調節も併用することができる。測光は複数の光センサーによる多点計測にするのが望ましい。

前述のように、現在の装置ではカバー範囲は半立体角のほぼ 45% であるが、外側センサーを回転軸に垂直な向きから 45 度程度傾けて取り付けることによって、カバー範囲をさらに広げることが可能である。これは試料からの散乱光強度の増大とあいまって本質的な改善となる。

参考文献

1. NIKKEI ELECTRONICS, No.654 (1996), 85
2. 愿山毅, 曾我見郁夫, 谷川正幸, 篠原忠臣, 京都産業大学総合学術研究所所報第 5 号 p85(平成 19 年 7 月)