

平成 22 年 5 月 10 日現在

研究種目：基盤研究(C)  
 研究期間：2007～2009  
 課題番号：19560034  
 研究課題名（和文） シャック・ハルトマン型位相回復による像再生の研究  
 研究課題名（英文） Study of image reconstruction using a Shack-Hartmann type of phase retrieval  
 研究代表者  
 中島 伸治 (NAKAJIMA NOBUHARU)  
 静岡大学・工学部・教授  
 研究者番号：20164189

研究成果の概要（和文）：X線は、可視光よりも遙かに短波長であり、かつ電子線よりも物体に対して透過性がよいので、物体内部の高解像度イメージングが行えるX線顕微法を開発できる可能性がある。しかし、光学または電子顕微鏡のように、X線領域で精度の良い結像レンズを作製することは困難である。本研究では、レンズを用いず、並列開口フィルターを用いた位相回復法による新しいX線物体イメージング法の提案を行い、計算機シミュレーションによる物体再生例によって、その方法の有効性を示した。

研究成果の概要（英文）：Since x rays have far shorter wavelengths than visible light and are much more penetrating than electron waves, there is a possibility of inventing x-ray microscopy for high resolution imaging of the inner structure of an object. It is difficult to make x-ray lenses to achieve as good quality of images as optical and electron lenses. In this study, a new x-ray imaging method using the filter of an aperture array without lenses has been proposed, and the usefulness of the method has been demonstrated in computer-simulated examples of the object reconstructions.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎，応用光学・量子光工学

キーワード：画像・光情報処理，位相回復，X線イメージング

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、シャック・ハルトマン(Shack-Hartmann)センサーを用いて光の波面を計測する手法が広く利用されている。この方法は、微小レンズ列の各レンズの焦点面でのスポットのずれから波面の傾きを求め

る方法である。しかし、このとき求まる波面の傾きは、微小レンズ開口の範囲内での平均傾きしか得られず正確な位相の傾きを求めているわけではない。したがって、コヒーレント光で照明した物体からの散乱光の波面を、シャック・ハルトマンセンサーを用いて

測定してコンピュータ上で逆伝搬させても、広がりをもつ物体を再生するだけの十分な解像度および再生範囲が得られない。

(2) 本研究室では、光学における強度分布からの位相回復法を長年研究してきた。位相回復法とは、ある物体からの回折光強度分布をホログラフィーのような参照波を用いず観測し、その強度分布から直接、高精度に位相を求める方法である。今まで、反復法(J. R. Fienup, *Appl. Opt.* 1982)、強度輸送方程式を解く方法(T. E. Gureyev *et al.*, *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995)等が提案されているが、本研究室では、独自に、ガウスフィルタリングによる方法を提案し(N. Nakajima, *Appl. Opt.*, 1998)、発展させてきた。しかし、位相回復法は、いくつかの問題点がある。例えば、反復法はコンピュータによる繰り返し反復計算を用いているため、解の収束性の問題がつきまとい必ずしも正しい解が求まるとは限らず、特に、複素振幅をもつ物体などを再生するのが難しい。また、強度輸送方程式を解く方法は、波の伝搬軸上に沿って変化する波面の強度分布を2枚から3枚測定する必要があり、さらに、波動場の強度がゼロとなる点(零点)をもつ物体の場合、方程式の解が不定になるという欠点がある。これに対して、ガウスフィルタリング法は解析的(非反復的)に位相回復でき、零点を含む物体の再生も可能である。しかし、ガウスフィルタをかけた場合とかけない場合の複数回の測定が必要となる問題があった。そこで、新たに、矩形開口の多数並列開口フィルターを用いたシャック・ハルトマン型の位相回復法を理論的に研究した。これは、従来とは異なり1回の測定から解析的に位相が求められる方法であって、実時間計測への応用が期待できる。

研究開始当初、本方法はレーザー光を用いた実証実験および応用のための基礎実験の段階に来ていた。

## 2. 研究の目的

(1) 上記の新しい方法は、それまでに、理論的および計算機シミュレーションで有効性が確認できていたので、本研究期間内で実際の光学系を用いた実証実験を行い、雑音の影響、精度、再生条件などを詳しく調べる予定であった。さらに、近年研究されている、全反射エバネッセント光照明による走査プローブを用いない近接場顕微鏡システム(D. Marks and P. Scott Carney, *Opt. Lett.* 2005)に、本方法を組み込むことを考えていた。従来の方法は、物体からの散乱波面の位相を参照波を用いた干渉測定によって求める必要があるため、システム及びデータの処理が複雑

となり、かつ干渉縞の測定が振動に弱いという問題があった。これに対して、本方法を用いれば散乱光の波面位相を参照波なしに、直接、2次元強度分布から実時間で簡便に再生でき、振動に強いシステムになると考えている。このような多数並列開口フィルターを用いたシャック・ハルトマン型の位相回復法を利用した新しい近接場顕微鏡システムを作製し、実際に生体組織などの再生実験を行うことが当初の目的であった。

(2) 本研究の位相回復法は、矩形並列開口を用いるだけでその他全くレンズシステムを必要としない特徴がある。しかも、微小なレンズアレイを必要とするシャック・ハルトマンセンサーよりも簡便に、かつより高精度に波面の位相を求めることができる。また、レンズシステムが必要ないことで、X線や電子線などの波動にも利用できる可能性がある。したがって、本研究は、光の領域だけでなく、近年注目されているコヒーレントな放射X線を用いたナノ物質イメージングシステムに対しても新しい手法を示すことが、もう一つの目的であった。

## 3. 研究の方法

(1) 申請後の研究の進展により、申請段階で計画していた上記目的の(1)、(2)を入れ替えて実施した。当初、矩形開口の多数並列フィルターによる位相回復法は、計算機シミュレーションによって、可視光領域の光を物体照明とする場合の有効性が確認できていた。ところが、外国の研究グループからコヒーレントな放射光X線を使った反復位相回復法によるイメージング法に関する論文が多数発表されるようになったため、本方法をさらにX線の領域へ拡張することを先に行うことにした。まず、最初に、短波長のX線(波長1 nm程度)を照明光として用いる場合に適用し、その再生条件や、再生精度、雑音の影響などをシミュレーションで調べた。

(2) X線領域でも本方法が有効であることが確認できたので、上記目的の(1)にある光学システムを用いた実証実験を行うことにした。本研究で用いる光学システムの概要は図1に示してある。ここで、コヒーレント光照明した物体からの散乱光は、フレネル回折面上の矩形開口列フィルターを通過後、観測面で強度分布が測定される。得られた強度分布をコンピュータで処理して、フレネル面上の波面の位相と振幅を求め、物体面上へ逆伝搬させて物体の複素振幅を再生する。計算機シミュレーションで調べた条件を基に、実際の光学系を用いた実証実験を行い、有効性を調べた。

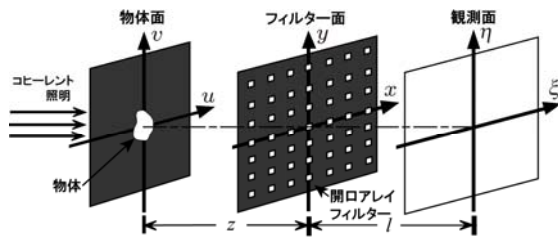


図 1: 開口列フィルターによる位相回復

#### 4. 研究成果

(1) 波長 1nm のコヒーレント X 線を光源として用いた場合でも、図 1 の方法が実際のスケールで構築でき、有効に働くことを計算機シミュレーションで確認することができた。特に、それまで、ホログラフィーのような参照波を用いず、1 回の回折強度測定から、反復的ではなく解析的に位相回復できる方法が存在しなかったが、本方法によって初めてそれが可能となった。特に、近年種々の分野で話題になっている位相渦状態も位相回復できることを示した。一般的に利用される反復法による位相回復法では、奇数個の位相渦状態の再生が難しいという性質があるが、本方法は、奇数個の位相渦も 1 回の強度分布測定から通常計算で解析的に位相回復できる。図 2 が、その再生例であり、(a), (b) がもとの物体の振幅の絶対値と位相である。ここでは、3 つの位相渦がある物体を想定している。図 2(c) が観測面上の強度分布であり、その雑音を含まない強度から再生した物体が (d), (e)、雑音を含む強度から再生した物体が (f), (g) である。この成果は、「5. 主な発表論文等」の論文④で発表した。

(2) 実際の X 線が部分的コヒーレント光であるために生じる再生物体の劣化問題の解決について検討した。その結果、部分的コヒーレント光により照明された物体の回折強度分布からでも、別に測定した X 線のコヒーレンス関数を用いて測定強度の補正を行うことで、再生物体の劣化を大きく改善できることが確認できた。この成果は、「5. 主な発表論文等」の論文③で発表した。

(3) 従来、観測面との間で用いられてきたフレネル条件 (近軸近似) を超えて、観測の範囲をさらに広げた (高開口数状態) にして再生物体の解像度を上げる方法の理論的検討を行った。その方法によって、物体の解像度を照明光の波長程度まで上げることが可能かどうか、計算機シミュレーションによって調べた。その結果、矩形開口列フィルターを用いた本方法によって高解像度物体再生が可能であることを計算機シミュレーションで確認した。図 3 が再生例である。

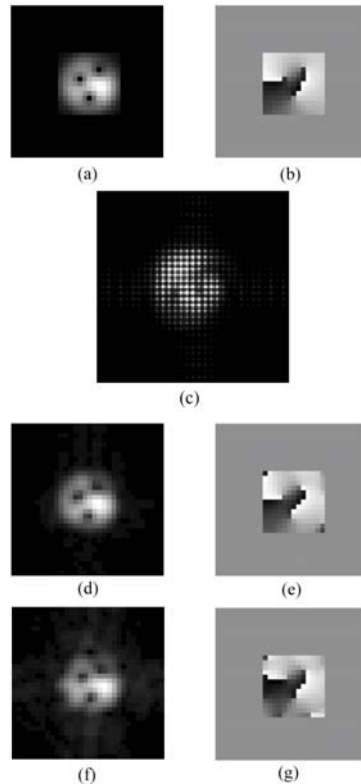


図 2: 本方法による渦位相をもつ物体の再生 (a)もとの物体振幅と(b)位相 (3 つの渦) (c)観測面強度分布, (d),(e)雑音のない場合の再生振幅と位相, (f),(g)雑音のある場合.

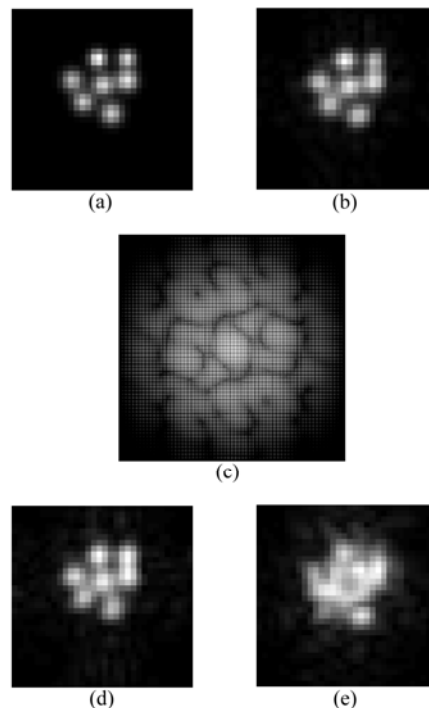


図 3: 高開口数測定強度からの物体再生 (a)もとの物体, (c)高開口数観測強度分布, (b)雑音がない, (d)雑音のある場合の再生物体, (e)従来の再生物体

図 3(a)がもとの物体であり、図 3(c)が高開口数 (NA=0.214) の広がりで見測した場合の回折強度分布である。その雑音をのせない回折強度分布から再生した物体が図 3(b)であり、雑音をのせた回折強度からの再生物体が図 3(d)である。図 3(e)は、従来の低開口数状態での物体再生に用いられていたフレネル近似によって再生した物体である。この方法により解像度を照明光の波長程度まで上げることが可能であることが確認できた。

レンズを用いない位相回復法を高解像度システムへ適用することは、世界的に見ても今までほとんど行われていなかった。従って、レンズを用いた高解像度物体再生が困難な X 線顕微鏡への応用が期待できる成果である。この結果は、「5. 主な発表論文等」の論文①で発表した。

(4) コヒーレント X 線照明した物体の回折光強度測定の際に生じる中心データ消失問題 (物体からの回折光の中心部分情報が強い直接光と重なり埋もれてしまう問題) に対して、従来の反復法とは異なる、サンプリング定理を用いた補間法による消失データ復元法を提案し、それが本研究の解析的位相回復による物体再生に非常に有効であることを計算機シミュレーションで明らかにした。特に、照明 X 線の直接透過光の中心強度が、物体の最大強度の 1 億倍であっても、照明 X 線の広がりが物体広がり比べて約 4 倍程度大きければ、開口アレイフィルターの中心部分の 3×3 個の開口を閉じることで直接透過光をカットでき、そのとき同時に失われた物体波の中心部分はサンプリング定理による補間法によって復元できることが確認できた。

この方法は、従来からある反復法による復元法とほぼ同じ効果があり、解析的方法であるため反復法よりも計算処理時間が短いという利点をもっている。この成果は、論文として発表する予定である。

(5) レーザダイオードと光学素子からなるシステムを用いた実験を行い、本研究の位相回復法による物体再生法の有効性を示す結果を得た。本システムは、レンズなどの結像系や参照波による干渉システムなどを利用していないため、振動に強く、測定装置が簡便であるという利点をもっている。特に、現在よく利用されている反復法では、1 枚の回折強度分布からの複素振幅物体再生が非負条件を利用できる振幅物体再生に比べて困難であるという欠点があるが、本方法は、解析的方法であるため、そのような問題がないという優位な特徴をもつ。しかし、実験は予算の関係で、簡易的な実験しか行えなかった。再生物体の精度の評価などを厳密に行うためには、今後、実験装置を揃えて、より精

密な実験を行う必要がある。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① N. Nakajima, "Phase retrieval from a high-numerical-aperture intensity distribution by use of an aperture-array filter," J. Opt. Soc. Am. A, **26**, 2172-2180 (2009). 査読有
- ② 中島伸治, 合成開口アレイフィルターを用いた X 線位相回復, 光学, 38 巻, 2009, pp. 516-522. (解説論文) 査読無
- ③ N. Nakajima, "Phase retrieval using an aperture-array filter under partially coherent illumination," Opt. Commun., **282**, 2128-2135 (2009). 査読有
- ④ N. Nakajima, "Lensless coherent imaging by a deterministic phase retrieval method with an aperture-array filter," J. Opt. Soc. Am. A, **25**, 742-750 (2008). 査読有

[学会発表] (計 3 件)

- ① 中島伸治, 開口アレイフィルターを用いた位相回復: 高開口数強度からの物体再生, 第 70 回応用物理学会学術講演会, 2009 年 9 月 9 日, 富山大学.
- ② 中島伸治, 矩形並列開口フィルターを用いた位相回復: 空間コヒーレンス補正, 第 69 回応用物理学会学術講演会, 2008 年 9 月 4 日, 中部大学.
- ③ 中島伸治, 矩形並列開口フィルターを用いた位相回復法によるコヒーレント X 線イメージング, 第 68 回応用物理学会学術講演会, 2007 年 9 月 5 日, 北海道工業大学.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中島 伸治 (NAKAJIMA NOBUHARU)

静岡大学・工学部・教授

研究者番号: 20164189

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし