

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 29 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560038

研究課題名（和文）合成開口アレイフィルターを用いた光・X線位相回復による像再生の研究

研究課題名（英文）Study of image reconstruction by phase retrieval with a synthetic aperture-array filter in wave fields of light and x-ray

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）：近年、レンズを用いないコヒーレント回折イメージングは、X線・電子線によるイメージング分野で大きな注目を浴びている。最近、我々は、開口アレイフィルターを用いた解析的な位相回復法による新規の回折イメージング法を提案した。この方法は、フィルターを通して観測した一枚の回折強度から物体の振幅と位相を再生することができる。本研究では、この方法の有効性をフレネル回折近似条件と近似を超えた厳密な回折条件での光学実験により実証した。

研究成果の概要（英文）：Lensless coherent diffractive imaging has attracted considerable attention during the past decade in the fields of x-ray and electron imaging. Recently, we have proposed a novel method of coherent diffractive imaging using a deterministic phase-retrieval method with an aperture-array filter, which allows for the reconstructions of the modulus and the phase of an object from a single diffraction intensity measured with the filter. In this study, the effectiveness of our method has been demonstrated by the experiments at optical wavelengths under the conditions of the rigorous diffraction as well as the Fresnel diffraction approximation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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：位相回復，X線回折イメージング

1. 研究開始当初の背景

(1) X線を用いた顕微鏡は、X線の透過性により電子顕微鏡では観察できない厚みのある物体の内部構造を観察できる可能性がある。しかし、X線顕微鏡で要求されるフレネルレンズの加工精度が非常に高いため、電子顕微鏡並みの解像度を得ることが

困難となる問題がある。最近、放射光施設（電子加速器）から高強度なコヒーレント（高可干渉性）X線が得られるようになり、光学の分野で開発されたレンズを用いないコヒーレント回折イメージング法（物体からの回折光強度から直接、位相分布を回復して、その振幅と位相からなる複素振幅関

数を逆伝搬させることで物体像を再生する方法)を、生体・材料などの内部構造観測に利用することが試みられるようになった。この方法は、レンズを用いないため原理的に用いる照明X線の波長程度の解像度が得られる利点がある。

レンズを用いないイメージング法としてよく知られているのが、ホログラフィー法であるが、X線の場合、レーザー光ほど空間コヒーレンスが良くないため、物体近くに参照光用の穴を設ける必要がある。そのため、その穴の大きさで再生物体の解像度が制限されてしまう。そこで、最近、光学の分野で開発された参照光を用いない反復アルゴリズムによる位相回復法が利用されるようになった。しかし、反復法は計算機アルゴリズムによって位相分布を再生するため、解の収束性の問題が常に存在し、特に物体が複素振幅物体の場合、しばしば真の解と異なる別の解に停滞することが知られている。

(2) 我々の研究室では、光の分野において、解析的(非反復的)に強度分布から位相分布を回復する方法の研究を長年行ってきた。最近、今までの研究を発展させて新しい光・X線用の位相回復法を考案した。この論文の第1報は、物理分野専門雑誌として最も権威のある **Physical Review Letters** に掲載された。その後、さらに方法を発展させて、2008年及び2009年と続けて論文を米国光学会誌に発表している。特に、2009年の **J. Opt. Soc. Am. A** に発表した論文は、今まで参照光を用いない位相回復法(反復法や強度輸送方程式など)では直接取り扱えなかったフレネル回折近似を超えた高開口数の1回測定条件において初めて位相回復を示したものであり、フレネル回折の場合よりも高解像度な物体再生が得られた。しかし、これらの論文は計算機シミュレーションで有効性を示したのみであり、実際の実験は行っていない。そこで、レーザー光を用いた本方法の実証実験を行う段階に来ていた。

2. 研究の目的

(1) 最初に、本研究期間の前年度2009年から行っていた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)を、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って解決する手法の研究を完成させて論文にすることが目的であった。

(2) 次に、今まで計算機シミュレーションを用いて調べてきた本位相回復法を、実際のレーザー光照明下での種々の物体再生

実験により、その有効性を実証することを行い、特に、再生された物体の振幅と位相の精度がどの程度得られるかについて、開口レイフィルターの開口幅と開口間隔条件などを変えながら調べて、最適な条件を明らかにする。

(3) 物体と開口レイフィルターとの間の距離を縮めることでフレネル回折近似よりも高開口数条件で物体再生を行い、本方法で取り扱える開口数の限界を明らかにする。

(4) さらに、時間がある場合は、低コヒーレンスな発光ダイオードとコヒーレンスを調整する照明光学系を使用して、物体再生が可能となるコヒーレンス条件の範囲を明らかにすること、および、現在、X線イメージングにおいて主に使用されている反復法との比較を行う予定であった。

3. 研究の方法

(1) 上記の研究目的(1)については、従来の計算機シミュレーションを続けて行った。

(2) 研究目的(2)で述べたように、当初、開口レイフィルターの開口幅と開口間隔条件などを変えながら調べて、最適な条件を明らかにする予定であった。そのため、設備備品として申請している液晶空間光変調器を開口レイフィルターに利用して、開口条件を可変できるフィルターを作製する予定であった。しかし、予備実験を行った結果、液晶空間光変調器を利用した場合、十分な精度の開口レイフィルターを作製できないことが明らかになった。そこで、業者に、クロム蒸着によってガラス板に開口幅と間隔を変えて開口列を描いたフィルターの作成を依頼した。その3種類のフィルターを用いて実験を行った。

(3) 研究目的(3)の高開口数条件での物体再生を行うためには、回折面上の広範囲の強度分布を観測する必要があった。そこで、観測用の冷却CCDカメラを光軸に垂直面上で移動させ、物体からの広範囲の回折強度を観測できるように実験装置を改良した。

4. 研究成果

(1) 回折強度分布の中心部分の復元

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線の広がり物体広がり比べて約4倍程度大きければ、開口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を計算機シミュレーションにより確認した。この成果は、「5. 主な発表論文等」の論文④として発表した。

(2) 本方法のフレネル近似での実験的実証

研究方法(2)で述べたように、当初、液晶空間光変調器を開口アレイフィルターとして用いることを考えていたが、予備実験の結果、十分な精度が得られないことが分かったので、開口列をクロム蒸着で描いたガラス板の作製を業者に依頼して、それを用いた実験を行った。

図1が実験の概略図である。ダイオードレーザーからの波長 $0.635\ \mu\text{m}$ の光を、偏光板とピンホール(直径: 0.4mm または 0.6mm)に通して物体(市販のUSAF解像度チャート)を照明し、その回折波を距離 $z=530\text{mm}$ に置いた開口アレイフィルター(開口幅 0.1mm の正方形開口が間隔 0.2mm で並んだ 64×64 開口列)を通して、距離 $l=6.8\text{mm}$ に置いた(レンズをつけない)冷却CCDカメラ(1024×1024 点, $13\ \mu\text{m}$ ピクセルピッチ)で強度分布を観測した。

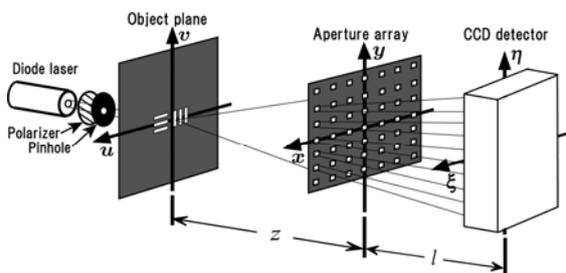


図1: 実験系の概略図

図2(a)が物体であり、これはレンズを用いて解像度チャートのグループ3, 要素4の部分に結像させたもので、三つの縦のラインの周期は $88.5\ \mu\text{m}$ である。レンズを用いず図1のシステムで観測した回折強度分布が、図2(b)である。図2(b)の1枚のデータから本位相回復法を用いて再生した物体の振幅と位相が、それぞれ図2(c)と2(d)である。

図2(e)と(f)は、図2(c)と2(d)の矢印で示された水平方向の振幅と位相の断面分布をそれぞれ表している。図2(e)の点線は図2(a)の矢印方向の断面分布を表している。再生物体は結像物体とほぼ同じ分布が再生されており、再生の横方向分解能は約 $52.6\ \mu\text{m}$ であった。また、物体位相は図2(d)のよう

にほぼ一様な位相が再生されている。

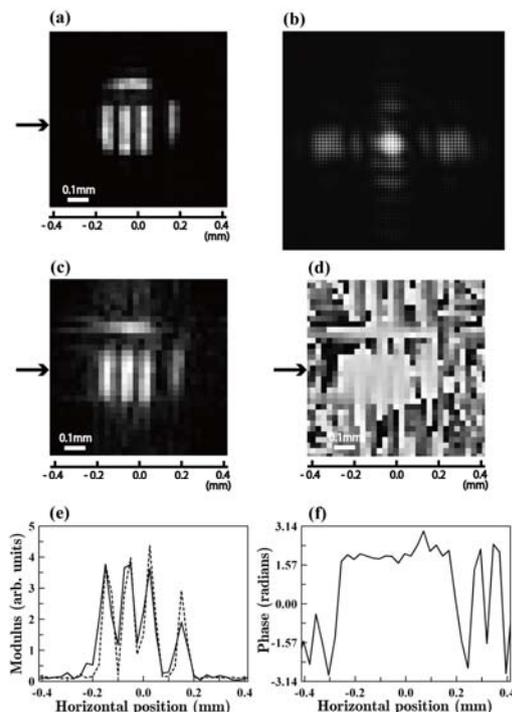


図2: 位相回復法による物体再生

(a)レンズによる結像物体, (b)観測強度分布, (c)および(d)は本方法により再生した物体のそれぞれ振幅と位相である。(e)と(f)の実線は、再生物体の矢印で示した水平方向の断面分布を表し、(e)の点線は対応する(a)の断面分布を表す。

次に、物体が位相変化をもつ場合の実験を行った。図3(a)が物体のレンズによる振幅像である。直径 0.6mm のピンホールでUSAF解像度チャートのグループ2, 要素6の部分に照明した物体であるが、位相変化をもたせるために市販の $1/2$ 波長板を左側の三本のラインに被せてある。図3(b)は、レンズを用いず開口アレイフィルターを通して観測した回折強度分布である。図3(c)と3(d)が図3(b)のデータから再生した物体の振幅と位相である。図3(e)と3(f)は、図3(c)と3(d)の矢印で示された水平方向の振幅と位相の断面分布をそれぞれ表している。図3(e)の点線は図3(a)の矢印方向の断面分布を表している。図3(a)および3(c)から、物体振幅の変化はほぼ再生されていることが分かる。また、図3(f)で示されているように左の三本のラインと右の一本のラインの間の位相差は $1/2$ 波長板による位相遅れだけずれることになるが、そのズレの理論的予想値 $2.77\ \text{rad}$ と比較して、実験値は $2.86\ \text{rad}$ となり、本方法によって再生された位相の精度は ± 2

$\times \pi/30$ rad となることが確認できた。

しかし、再生振幅 (図2(c)と3(c)) の再生の方が結像振幅 (図2(a)と3(a)) より雑音の影響が大きいことが分かる。これは、レンズによる結像ではCCDカメラの一部分の雑音しか像にのってこないが、回折強度分布から再生した物体では、CCDカメラの広い範囲の観測データを用いているので、その範囲の雑音の影響を受けてしまうためである。したがって、本方法はCCDカメラの雑音の影響を受けやすいという問題はあるが、図2(d)と3(d)のように、物体の位相を同時に再生できるという長所も持っている。一方、レンズによる結像の場合、干渉計やホログラフィーのように参照光を用いるシステムでなければ物体位相を再生することができない。以上の成果は、「5. 主な発表論文等」の論文②として発表した。

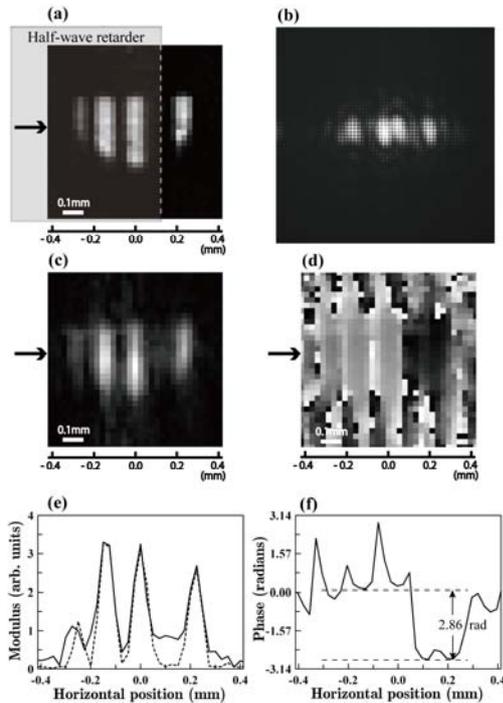


図3：位相変化をもつ物体の再生
(a)レンズによる結像物体，(b)観測強度分布，(c)および(d)は本方法により再生した物体のそれぞれ振幅と位相である。(e)と(f)の実線および点線は、図2(e)と2(f)と同様の断面分布を表す。(f)の位相差2.86 radは1/2波長板の影響による。

(3) フレネル近似を超えた条件での物体再生実験

本方法の有効性を上述の実験によって確認できたが、これは物体とフィルター間でフレネル回折近似が成立する条件での実証であった。そこで、物体とフィルター間の距離をさらに縮め、フレネル近似 (すなわち近軸近似) を含まない一般化された回折条件での実験を行った。この場合の理論解析は、2009年に論文[N. Nakajima, J. Opt. Soc. Am. A 26, 2172 (2009)]として発表したレーリー・ゾンマーフェルド (RS) 回折公式による解析結果を利用した。この回折条件を用いると、物体からの回折角の大きい強度データを取り扱えることになるので、フレネル回折近似による再生よりも高分解能な物体再生を達成できる利点も持っている。

図4と5が実験結果であり、図2と3で用いたものと同じ光源、開口レイフィルターを利用した。物体とフィルター間の距離は、 $z=37.83$ mm, $l=45.75$ mm で、冷却CCDカメラ (1024×1024分点, $14.8 \mu\text{m}$ ピクセルピッチ) で測定した。物体としては、直径50

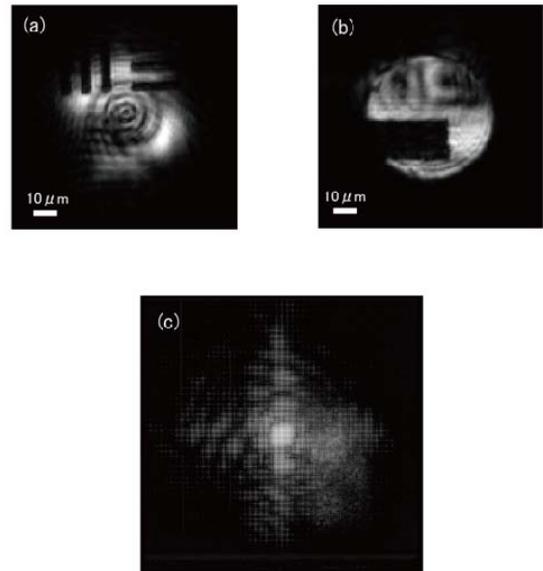


図4：奥行き構造をもつ物体データ
(a),(b)は顕微鏡対物レンズによる結像物体振幅で，(a),(b)間は光軸方向に約 $140 \mu\text{m}$ 離れている。(c)は観測強度分布 (1600×1600点) である。

μm の円形ピンホールを二枚のUSAF解像度チャートガラス板で挟んだものを作製した。そのため、物体は光軸（ z 軸）方向に奥行き構造をもっている。図4(a)と4(b)が物体を顕微鏡対物レンズで結像させてのものであり、二つの物体構造パターン間の距離は約 $140\mu\text{m}$ である。図4(a)のライン間隔は $8.77\mu\text{m}$ で、図4(b)のライン幅は $17.5\mu\text{m}$ である。図4(c)は回折強度分布（ 1600×1600 点）であり、これはCCDカメラを ξ および η 方向に移動させて観測した4枚の強度データと中央で観測した1枚の強度データ（合計 1024×1024 点 $\times 5$ 枚）を合成して得た強度分布である。

図5(a), (c), (e)と5(b), (d), (f)は、図4(c)の回折強度分布から再生した位相から回折波面を求め、その逆伝搬をそれぞれ逆RS回折式と逆フレネル回折式を用いて計算した結果の物体振幅である。図5(a), (b)が物体面上 $z=0.0$ 、図5(c), (d)および図5(e), (f)がそれぞれ $z=-30\mu\text{m}$ 、および、 $z=-150\mu\text{m}$ の位置における再生物体振幅である。これらの結果から、逆フレネル回折式を用いた場合は、図4(a)のライン物体が再生できていないことが分かる。これは、フレネル回折近似を超えた範囲の回折強度分布から位相回復したデータを用いているため、逆フレネル回折式では正しい物体再生ができないことを意味している。一方、逆RS回折式による再生では図5(c)で示すように図4(a)のラインが再生されており、図4(a)と4(b)間の距離（約 $140\mu\text{m}$ ）が図5(c)と5(e)で示されているように約 $120\mu\text{m}$ となり、本実験の光軸方向の理論的な分解能 $24\mu\text{m}$ の範囲内で奥行きが再生されていることが確認できた。なお、横方向分解能は（2）の実験に比べて約10倍（約 $5.16\mu\text{m}$ ）分解能を上げることに成功した。これは、使用している照明光波長の約8倍である。

本システムは、物体と開口アレイフィルターとの間の距離を縮めることで、従来のフレネル回折近似（すなわち近軸近似）を含む位相回復法と異なり、近似を含まない一般化された回折条件での物体再生が可能となる利点があり、照明光の波長程度まで分解能を上げることが理論的に可能である。また、この方法はレンズを用いないので、X線や電子線などの照明波源を用いても同様に物体再生が可能である。

以上の実験によって、もし十分大きな範囲の回折強度分布が観測できれば、X線や電子線

を用いた回折顕微鏡において、波長程度の高分解能な物体再生を本方法により実現可能であることを確認できた。この成果は、「5. 主な発表論文等」の論文①として発表した。

なお、研究目的（3）の開口数の限界については、実験装置を改良する予算が無いため実施することができなかった。また、研究目的（4）は、研究期間内に行う時間が無かったので実施できなかった。

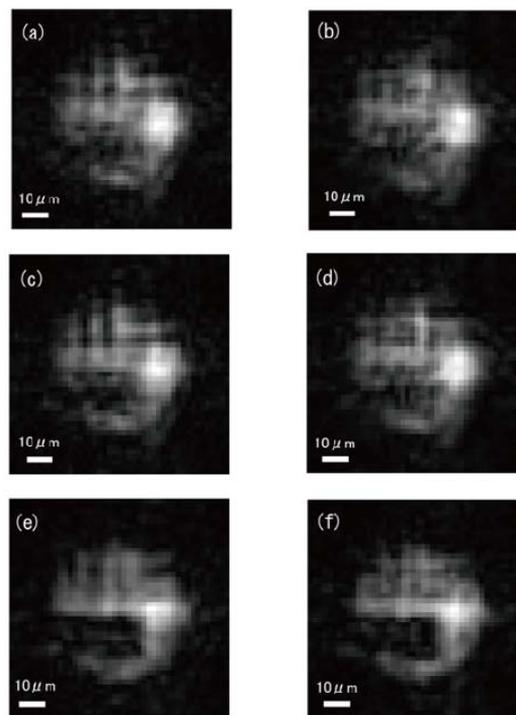


図5：奥行きをもつ物体の再生
(a),(c),(e)は図4(c)から再生した波面を逆RS回折式により逆伝搬させて得た物体振幅である。(b),(d),(f)は同じ再生波面を逆フレネル回折式で逆伝搬させた結果である。(a),(b)と(c),(d)および(e),(f)は、それぞれ $z=0.0$ 、 $-30\mu\text{m}$ 、および、 $-150\mu\text{m}$ の位置での再生物体振幅である。

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, “Coherent diffractive imaging beyond the Fresnel approximation using a deterministic phase-retrieval method with an aperture-array filter,” *Appl. Opt.*, **52**, C1-C10 (2013). 査読有.
<http://dx.doi.org/10.1364/AO.52.0000C1>
- ② N. Nakajima, “Experimental verification of coherent diffractive imaging by a direct

phase retrieval method with an aperture-array filter,” Opt. Lett., **36**, 2284-2286 (2011). 査読有.
<http://dx.doi.org/10.1364/OL.36.002284>

- ③ 中島伸治: “光一回折強度からのレンズレスイメージング,” 計測と制御, 50 巻, 5 号, 320-325, (2011). 査読無し
- ④ N. Nakajima, “Noniterative approach to the missing data problem in coherent diffractive imaging by phase retrieval,” Appl. Opt., **49**, 4100-4107 (2010). 査読有.
<http://dx.doi.org/10.1364/AO.49.004100>

〔学会発表〕(計 5 件)

- ① 中島伸治, レンズレス回折イメージング: フレネル近似を超えた条件での物体再生, 第 73 回応用物理学会学術講演会, 2012 年 9 月 13 日, 愛媛大学.
- ② 中島伸治, 位相回復法を用いた回折イメージングの進展—光から X 線・電子線へ—, 電子情報通信学会北海道支部学生会講演会, 2011 年 12 月, 室蘭工業大学.
- ③ 中島伸治, 開口アレイフィルターによるコヒーレント回折イメージングの実証, 第 72 回応用物理学会学術講演会, 2011 年 9 月 13 日, 山形大学.
- ④ 中島伸治, 光学における位相回復法と回折イメージング, 日本学術振興会産業計測第 36 委員会第 401 回研究会, 2011 年 7 月, 東北大学東京分室.
- ⑤ 中島伸治, コヒーレント回折イメージング: 中心強度消失問題の非反復的解法, 第 71 回応用物理学会学術講演会, 2010 年 9 月, 長崎大学.

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