

X線プリズムを用いた二光束干渉計

鈴木芳生
JASRI/Spring-8

1. はじめに

ホログラフィーと呼ばれる干渉計画像からの波面再構成は Gabor [1] により始められた。干渉性の悪い光源ではいわゆるin-line照明系で行うしかないために共役像の重なりや試料のほとんど大部分が完全に透明でなければならないといった制約が大きい。これを解決するために off-axis で参照波を照明する Leith-Upatnieks の二光束ホログラフィーが発明された[2]。しかしながら、この方法は干渉性（空間干渉性だけでなく時間干渉性も）が良い光源で照明しなければならないため、可視光でもレーザーのように干渉性の良い光源を使う必要がある。

X線領域での干渉計の実験は非常に古くから行われている。たとえば、Lloydの鏡を用いた干渉縞の観測はX線が光と同じ電磁波であることを証明した多くの実験の一つであるとされている[3]。また、軟X線領域では青木、菊田によるヤングのスリットの光学系を用いた干渉計とホログラフィーの実験[4,5]に始まり、ホログラフィーに関しても多くの研究が行われている。しかしながら、今までの硬X線領域での干渉計実験では高々数本の干渉縞が観測されていたにすぎない。また、干渉縞の観測される領域も非常に狭いものであった。

これに対して、硬X線領域に於ける干渉計では、完全結晶の回折をビームスプリッターやミラーとして用いるBonse-Hart型の干渉計[6]が良く知られている。この干渉計は光源のコヒーレンスに対する要求が高くないので、広い視野が得られ各種の位相計測に利用されている。しかしながら、この干渉計は参照光と物体波の合成において完全結晶での回折を使うために、物体で大きな角度で偏向された部分波が消滅することや、有限の大きさの結晶中での伝搬による波束の広がりのために空間分解能が劣化する等の問題がある。

第三世代の放射光X線源が利用できるようになったことによりこの状況が大きく変わってきた。レーザーのような高次のコヒーレンスはないが、一次のコヒーレンスに関しては干渉実験に十分な強度を持つビームが得られるようになって来ており、数年前から硬X線領域でもホログラフィー等の干渉計測が試みられている。X線ホログラフィーとしては、Gabor型の in-line ホログラフィー（本来の Gabor型は点光源からの球面波を用いるが、平行光照明の場合も Gabor holography と呼ぶことが多い）と Fresnel zone plate を集光/ビームスプリッターとして用いるフーリエ変換ホログラフィーが現在の主な光学系である。フーリエ変換ホログラフィーでは共役像の問題が解決されるとされている場合もあるが、実際には zone plate の+1次回折に重なる-1次の回折光のために必ずしも単純なものではない。

本報告では、硬X線領域でプリズムを用いてコヒーレントビームの一部を偏向して物体波に重ねる方法、すなわち本来のLeith-Upatnieks型二光束ホログラフィーと同一の光学系を組み立てて干渉実験を行った結果[7]について述べる。

2. 実験及び実験結果

干渉計の光学系は図1に示すように単純なものである。X線ビームの一部がプリズムで偏向され、偏向されずに直進する波と画像検出器上で重ねられ干渉縞を生成する。プリズムはアクリル樹脂のブロック（一辺2cmの立方体）である。画像検出器として可視光変換型の間接X線カメラ（浜松ホトノクス、ビームモニタAA50と冷却CCD）またはサブミクロンの解像度を持つズーム管（浜松ホトノクス、C5333と冷却CCD）を用いた。プリズムを透過したビームの偏向角 $\Delta\theta$ は屈折 n の1からのずれ δ ($= 1 - n$) と視射角 θ を用いて、

$$\Delta\theta = \delta/\tan(\theta),$$

で表される。 δ は普通 10^{-6} 程度の量であるため、直入射条件では $\Delta\theta$ は $1\mu\text{rad}$ 程度の小さい量である。しかしながら斜入射条件ではこの偏向角をずっと大きく出来る。また、視射角を変えることで偏向角を制御できる。

実験は SPring-8 BL20XUで行った。このビームラインは周期長26m m, 173周期の真空封止アンジュレータを光源とするビームラインであり、実験ステーションは光源から約245mの位置にある。貢献から42mの位置にある二結晶分光器の直下流に精密四象限スリットが設置されており、このスリットによって実験ステーション位置での空間コヒーレンスを定義している。四象限スリットから実験ステーションまでの距離 (L) は約195mである。空間コヒーレント領域 (S) はスリットサイズ (d) と波長 (λ) をLを用いて、 $S = \lambda L / d$ で定義される。例えば、 $d = 20 \mu\text{m}$, $\lambda = 1 \text{\AA}$ の条件では、 $S = 1 \text{mm}$ に達する。

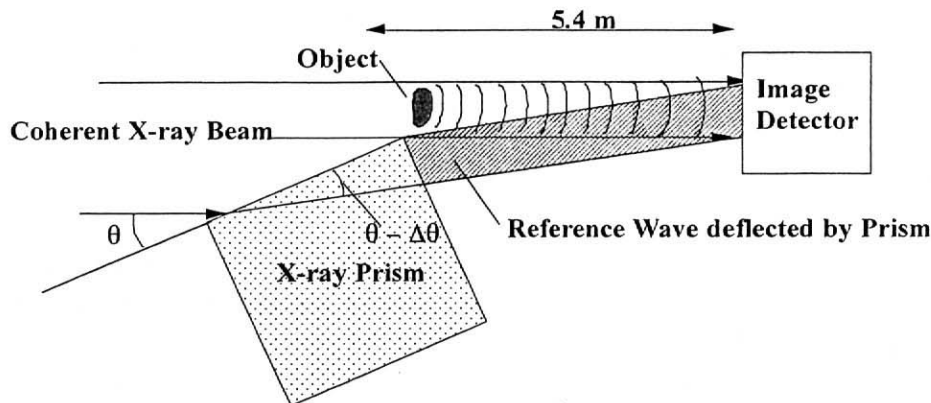


図1. X線プリズムを用いた二光束干渉計の構成

この光学系により干渉縞を計測した一例を図2に示す。X線波長は1 Å, 視射角6度, ビーム偏向角 $15 \mu\text{rad}$ の条件でビームモニタAA50を用いて測定したものである。試料は人間の毛髪先端である。干渉縞 (周期長約 $6 \mu\text{m}$) が明瞭に観測されている。また試料を透過した部分での干渉縞の曲がりも観測されており、この光学系が予想通り機能していることが確かめられた。発表ではこの干渉計の詳細と、コヒーレンス評価等への応用についても述べる予定である。

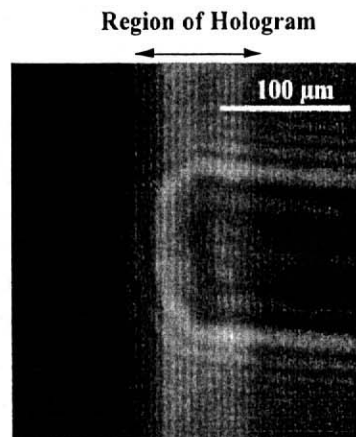


図2. 二光束干渉計を用いて測定した干渉縞

参考文献

1. D. Gabor, Nature **161** (1948) 777.
2. E. N. Leith and J. Upatnieks, J Opt. Soc. Amer. **52** (1962) 1123.
3. W. Linnik, Naturwiss. **18** (1930) 354.
4. S. Aoki, Y. Ichihara and S. Kikuta, Jpn. J. Appl. Phys. **11** (1972) 1857.
5. S. Aoki and S. Kikuta, Jpn. J. Appl. Phys. **13** (1974) 1385.
6. U. Bonse and M. Hart, Appl. Phys. Lett. **6** (1965) 155.
7. Y. Suzuki, Jpn. J. Appl. Phys. **41** (2002) L1019.