

## ●体積ホログラムにおける収縮の影響

新事業企画推進部 新事業企画グループ 佐々木 裕

光により記録可能なフォトポリマー材料を利用した体積ホログラム記録において、光重合時の体積収縮による屈折率格子の変形は記録品質の低下につながる重要な問題である。ホログラム記録材料では記録密度向上のために多重記録を行う必要があるが、その際の収縮に起因したクロストークやノイズグレーティング等を議論できるようなモデルはこれまでに提案されていない。

本論文では、線形弾性体シミュレーション(Elastica)を利用して、二光束干渉ホログラムの記録領域内での光重合により生じる局所的な体積収縮をシミュレートした。その際の記録領域内の微小領域の位置変移から、収縮後の回折光を推定し、収縮が屈折率格子に及ぼす影響を検討した。また、実際の収縮が比較的大きな記録媒体を用いて、実現象と比較検討も行った。

### 1 はじめに

CDに始まった光デジタルメモリーは、DVDを経て現在立ち上がりつつあるBlu-rayにまで、順調に発展してきている。これらの記録方式は、平面状に記録されたピットの反射率の違いによりデジタルデータを記録するという、同一の原理に基づいている。その記録密度はピットの大きさにより決まるため、最新の方式であるBlu-rayにおいて、ほぼその限界に近づきつつあるという見方が支配的である。この限界を打破できる次世代型記録方式として、記録媒体の同じ場所に複数のページデータを多重記録できるホログラフィックメモリーが注目されている<sup>1,2)</sup>。

ホログラフィックメモリーにおいては、コヒーレントな二本のレーザー光(情報光と参照光)の干渉を利用して、記録媒体中に屈折率格子(ホログラム)としてデータを記録する、体積位相型ホログラムが広く採用されている。記録方式としては、情報光と参照光との二軸の光束を利用する二光束干渉方式と、情報光とその外側の輪帯状の領域からの参照光が干渉するコリニア方式がある。

多重方式としては、屈折率格子のブラッグ選択性を利用した各種方法が提案され、二光束干渉方式では、参照光の角度を変化させて同一の記録領域に多重記録を行う角度多重が広く検討されている。この場合、再生光の角度を変化させることにより、それぞれの記録を独立した回折光として読み出すことが可能となっている。

記録媒体として各種材料が提案されてきているが、モノマーの光重合による屈折率変化を利用したフォトポリマー材料が主流である。その主要な構成要素は、モノマー、マトリックス、光開始剤等であり、干渉により生じた光強度の空間分布に従いモノマーが光重合し、生成したポリマーが凝集することにより、干渉縞を屈折率格子として記録することが出来る。

一般に、モノマーが重合してポリマーへと転換する場合、体積

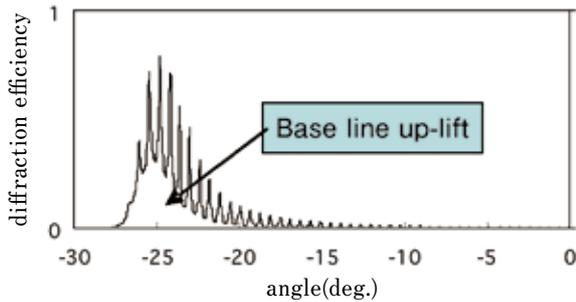
の収縮(重合収縮)が発生する。フォトポリマーを利用したホログラム記録材料において、光重合時の収縮は記録品質の低下につながる重要な問題である。すなわち、記録時に重合収縮が生じた場合、データを記録している屈折率格子の周期や傾きが変化することでブラッグ条件が変化してしまうと、記録時の参照光と同一の再生光を照射しても、期待通りの回折光が得られなくなってしまう。

二光束干渉体積ホログラム記録の一般的な処方において、記録領域のサイズは数ミリ程度である。一般に、1ページの記録においては、その記録領域のモノマーの1%未満の微量の光重合により記録を行うため、その収縮の影響は小さいものと考えられる。しかしながら、同一領域に多重記録を行った場合、結果として記録領域のモノマーのほぼ全部を消費するように記録を行うため、記録領域での局所的な体積収縮が発生するものと想定できる。この際、多重記録の初期に書き込まれた屈折率格子は、その後に多重された記録書込みによる重合収縮の影響を強く受けるものと推定できる。このような影響は、一般に光デジタルメモリーでクロストークと呼ばれる現象と類似の記録品質の低下と考えることが出来る。

しかしながら、フォトポリマー材料の収縮に関する検討はこれまでにあまり多くなく、記録後に記録媒体全体に光照射(後硬化)を行うことにより均等な収縮が生じた場合に、屈折率格子が一様に変化するというマクロな視点のモデルでの検討が報告されているのみであった<sup>3)</sup>。

最近、我々は収縮率が約0.5%と比較的大きな記録媒体を用いた場合、二光束干渉方式の角度多重記録において、ベースラインが上昇したような現象(Fig.1)を確認している。このような現象については、上記のマクロなモデルでは、解析することが出来なかった。

このような状況を鑑み、我々は、体積ホログラム記録時の局所的な体積収縮が屈折率格子に及ぼす影響をシミュレートできる方法の確立を目的として検討を行った。



**Fig. 1 Bottom noise in high shrinkage media (0.5%) in angular multiplexing records**

具体的には、有限要素法を利用した線形弾性体シミュレーションを用いて、二光束干渉法により多重記録した際に生じる局所的な体積収縮による場の歪みを定量化し、その歪みにより生じた屈折率格子の変化に応じた回折光の変化を数値シミュレーションにより解析を行った。また、実際の収縮が比較的大きな記録媒体を用いて、実事象と比較検討した。

## 2 シミュレーション

### 2-1 基本的条件

本検討を行う際に、以下のような假定条件を設定した。なお、下記の条件中に現れる各種光(情報光等)やサンプルのサイズは、実際の実験条件のものを使用した。

假定条件:

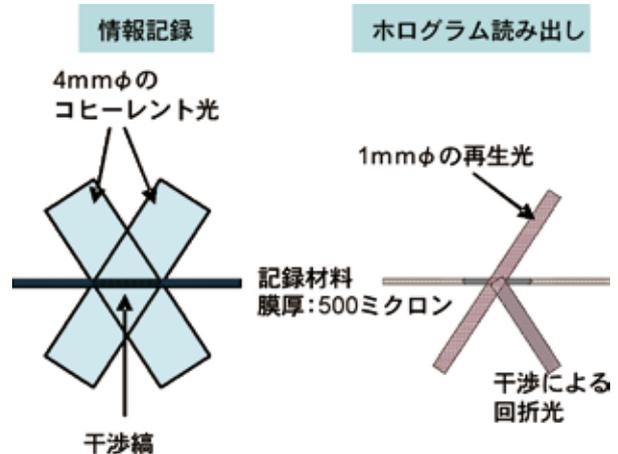
- ・記録媒体であるフォトポリマーの厚さは $500\mu$ であり、上下をガラス( $500\mu$ )により、サンドイッチされている。
- ・情報光と参照光は、それぞれ直径4mmのビーム光であり、その記録領域(干渉領域)は、簡便のため、4mmの円筒状とした。
- ・記録領域には、1~数個のホログラムが収縮の影響を受けることなく、「きれいに」記録されている。
- ・その後、記録領域全体が光重合することにより局所的な収縮が生じ、屈折率格子が変形する。
- ・再生光は、直径が1mmのビーム光である。
- ・再生光は、その通過領域において一定(変化しない)である。
- ・再生光と屈折率格子の相互作用により、回折光が発生する。

上記の条件における情報記録および読み出しの際の模式図をFig. 2に示した。

上記の假定に基づき、以下の手順により収縮の影響をシミュレートした。

- 1) 記録領域の局所的な収縮を、線形弾性体シミュレーターであるElastica<sup>4)</sup>によりシミュレートし、場の歪みを定量化した。
- 2) Elasticaのメッシュ点を利用して、記録領域を小さな四角形に分割し、その領域内における屈折率格子の変形(格子間隔および格子角度)を算出した。
- 3) Coupled Wave Theory<sup>5, 6)</sup>(CWT)をベースにした数値計算により、屈折率格子が変化した場合のその領域からの回折光

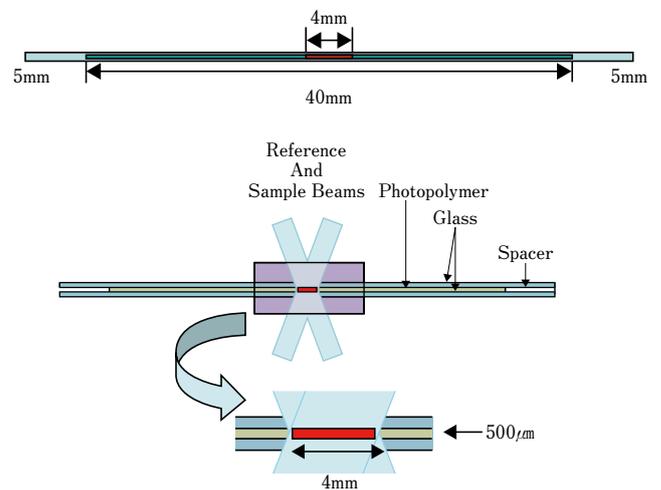
プロフィールを算出し、すべての領域からの回折光プロフィールを平均化し、全体の回折光をシミュレートした。



**Fig. 2 Geometries of recordings and readings**

### 2-2 Elasticaによる収縮シミュレーション

Elasticaとは、マルチスケール統合シミュレーターであるOCTAに含まれる線形弾性体シミュレーターであり、線形弾性体理論に基づき部分要素の収縮をシミュレートすることが可能である。今回の計算においては、Fig. 3に示したような、実際の記録媒体サイズに従った寸法比での二次元断面を設定し、その領域をメッシュ間隔が実空間サイズで $50\mu$ となるように、 $1000 \times 300$ のメッシュに分割した。



**Fig. 3 2-Dimensional cross section of recording media, which is used in this simulation**

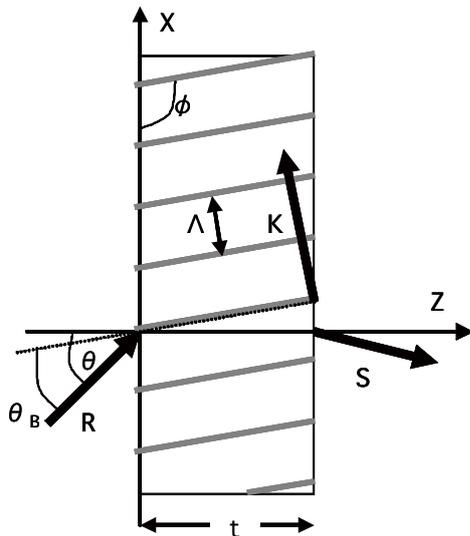
そして、Fig. 4に示したパラメータを用いて記録領域のみが等方的に収縮する二次元のシミュレーションを行い、その際のメッシュ点の位置の変位を算出した。なお、ID番号0がガラスであり、1および2が記録領域およびそれ以外のフォトポリマーである。ガラスには文献値を用い、フォトポリマーは実際に使用しているものと近い値を用いた。

physical_parameter[] (index)	value[] (index)	value[]:string
[0]:NUMBER_OF_COMPONENTS	[0]	3
[1]:MODULUS_ANISOTROPY_0	[0]	isotropic
[2]:MODULUS_ANISOTROPY_1	[0]	isotropic
[3]:MODULUS_ANISOTROPY_2	[0]	isotropic
[4]:BULK_MODULUS	[0]	3.7E10
[4]:BULK_MODULUS	[1]	1.0E9
[4]:BULK_MODULUS	[2]	1.0E9
[5]:SHEAR_MODULUS	[0]	2.3E10
[5]:SHEAR_MODULUS	[1]	1.0E6
[5]:SHEAR_MODULUS	[2]	1.0E6
[6]:EXPAND_RATIO	[0]	0.0
[6]:EXPAND_RATIO	[1]	-0.005
[6]:EXPAND_RATIO	[2]	-0.005

Fig. 4 Typical parameters used in this simulation

### 2-3 屈折率格子の変形の推定

Elasticaでのメッシュ点の四点から形成される正方形の微小領域(実空間サイズで $50\mu \times 50\mu$ )が収縮によりアフィン変形すると仮定して、再生光が通過する領域中の各微小領域における屈折率格子の間隔および格子の傾きの変化を求めた。



$$\beta = 2\pi n_{\text{mat}} / \lambda$$

$$K = 2\pi / \Lambda_V$$

$$C_R = \cos \Theta$$

$$C_S = \cos \Theta - K \cos(\phi) / \beta$$

$$\nu = \pi n_1 t / \lambda (C_R C_S)^{0.5}$$

$$\xi = \Delta \Theta K t \sin(\phi - \Theta_B) / 2 C_S$$

$$\eta = (\sin((\xi^2 + \nu^2)^{0.5})^2 / (1 + \xi^2 / \nu^2))$$

Fig. 5 Coupled wave theory and parameters used in numerical simulation of refractive light

### 2-4 Coupled Wave Theoryに基づく数値計算

Coupled Wave Theoryとは、元来、音響光学における回折の計算に使用されていた理論であり、Kogelnikにより厚いホログラムの解析に応用された<sup>5)</sup>。この理論によれば、Fig. 5に示した

ような厚さ(t)のホログラム中での屈折率格子により、図の左より入射した再生光(R)が屈折率格子のKベクトルにより、再生光(S)へと変換されるものとする。その場合、図中に示したようなパラメータを使用することにより、回折光のプロファイルを数値シミュレートすることが可能となる。なお、その詳細については、参考文献を参照していただきたい<sup>4,5)</sup>。

収縮シミュレーションから算出された上記の屈折率格子の変形の計算結果を用いて、CWT数値シミュレーションより各微小領域における回折光プロファイルを算出し、その平均を収縮後の全体の回折光とした。

## 3 結果と考察

### 3-1 Elasticaでの収縮シミュレーション

実際のサンプル断面を想定した二次元の線形弾性体シミュレーションにより算出した、再生光の通過領域におけるメッシュ点の変位をベクトル表示した結果をFig. 6に示した。

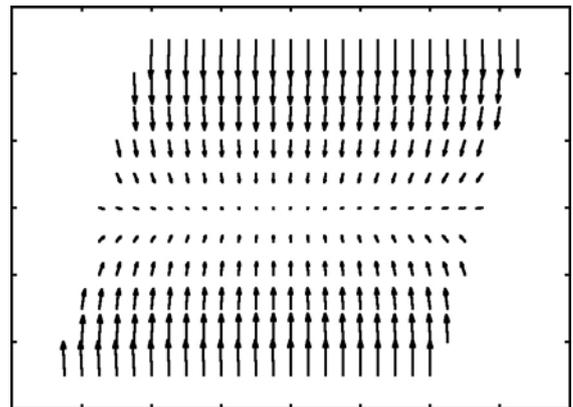


Fig. 6 Mesh point movement after shrinkage

厚さ方向(縦軸)に見た場合、ガラス近傍では中心部分に向かって変形しているが、中心部での変位は内側に向かっていくことがわかる。これは、記録領域の等方的な収縮により、左右に存在する未記録領域からフォトポリマーが引っ張られているためと考えられる。また、横軸方向に比較すると、中心部の変位はほとんど生じていないが、記録領域の周辺部での変位が相対的に大きいことも確認できた。この結果より、参照光の通過領域において不均一な収縮が生じていることが確認できた。

### 3-2 屈折率格子の変形

Elasticaでの収縮による変形がアフィン変形であると仮定して各四角形における屈折率格子の間隔および格子の傾きの変化を算出した。それぞれの変形パラメータを記録媒体のX軸方向の位置に応じてプロットした結果をFig. 7, 8に示した。

Fig. 7から、格子間隔は、正方メッシュのすべての位置で収縮していることが確認できた。一方、格子の角度は、増加するものと減少するものが混在していた(Fig. 8)。

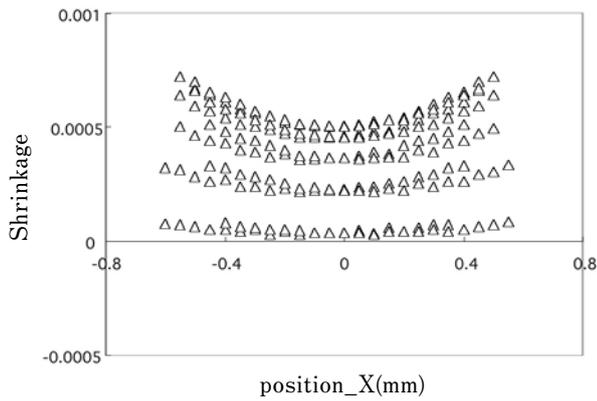


Fig. 7 Fringe spacing change at each region

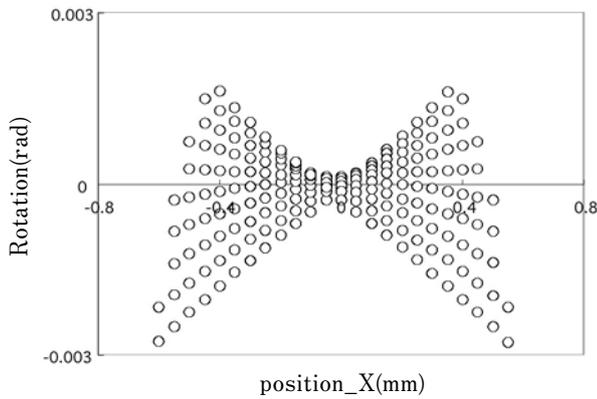


Fig. 8 Rotational change of fringe at each region

CWT 数値シミュレーションより、どちらの変形モードにおいても、回折光のピークはシフトすることが確認されている。したがって、屈折率格子の傾きにばらつきが生じた場合に、それぞれの微小領域からの回折光が左右にシフトしたものの平均となるため、回折光の半値幅が広がることが推定できた。

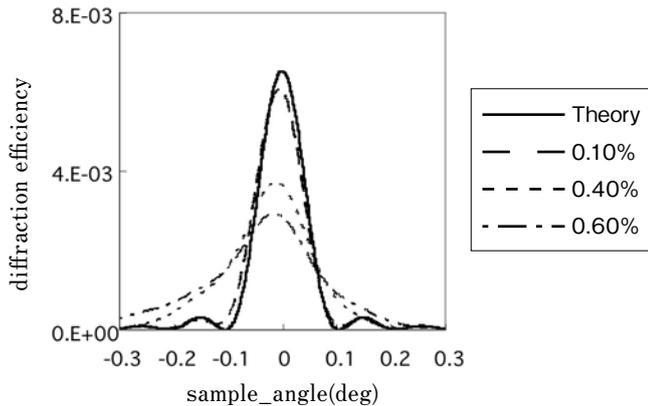


Fig. 9 Simulation results for different shrinkage

### 3-3 回折光シミュレーション

0.1 ~ 0.6 % の収縮率の場合の収縮シミュレーションの結果を用いて、上記の屈折率格子の変形パラメータに応じた収縮後の回

折光をCWT 数値シミュレーションにより算出した結果を、理論的な回折光と合わせて、Fig. 9に示した。フォトポリマーの収縮が低い場合(0.1 %)には、若干のピークのシフトが見られるだけであるが、収縮率の増加に伴い、記録領域の局所的な収縮による屈折率格子の変形が大きくなり回折光の半値幅が広がり、ピーク高さの低下に伴い、1st\_nullが不明瞭になることが確認できた。

また、収縮が大きくなるにつれて、ピークトップのシフト量も大きくなっていった。

### 3-4 実事象との比較

光記録時の収縮が0.5%のフォトポリマーを用いて、場の乱れが最小となるように微弱な光照射により一つのホログラム記録を行った後に、多重記録の代わりに記録範囲に垂直にレーザー照射(4mm φ)を行い、光重合での局所的な収縮を行った。メディア内の記録材料に影響を与えない赤色レーザーにより、記録された屈折率格子からの回折光をモニターした場合の、回折光の実測値を示した(Fig. 10)。30秒間の後照射により、再生される回折光の半値幅が広がり、ピークトップもシフトすることが確認できた。

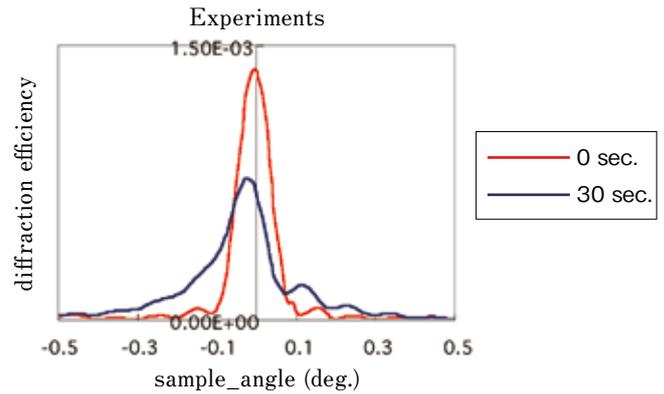


Fig. 10 Experimental result for local shrinkage effect on original recording

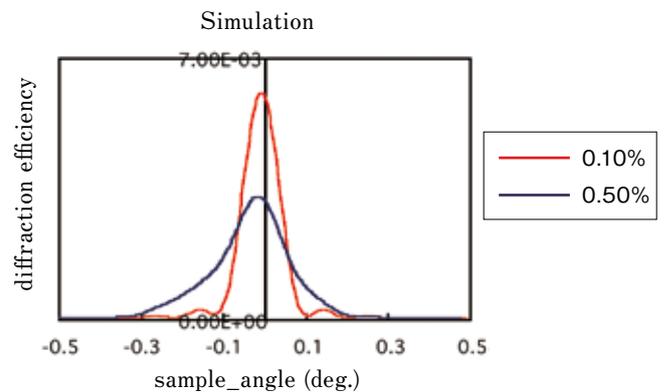


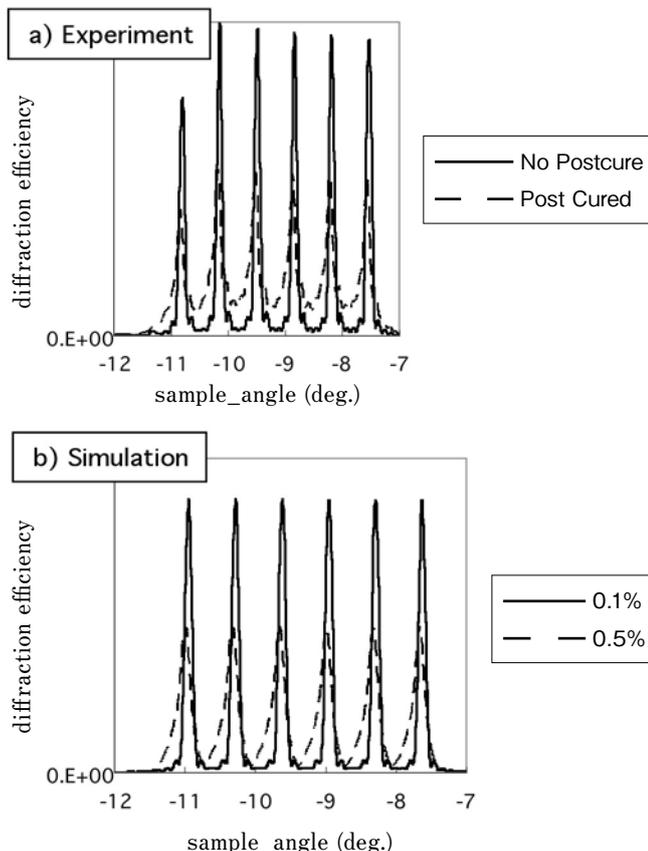
Fig. 11 Simulational result for local shrinkage effect on original recording

Fig. 11に同様な条件でシミュレーションを行った結果を示した。0.5 % の収縮が生じた場合の半値幅の広がりが非常によく再現できることが確認できた。

上記の実験と同様に、6多重した実験も行い、その場合の収縮シミュレーションを行った結果を合わせて、**Fig. 12**に示した。若干の角度ずれ等の違いはあるが、定性的には裾野ノイズが再現できることが確認できた。

## 引用文献

- 1) H. J. Coufal, D. Psaltis and G. T. Sincerbox, eds., *Holographic Data Storage*, Springer, Berlin (2000).
- 2) ホログラフィックメモリーのシステムと材料, シーエムシー出版 (2006).
- 3) L. Dhar et. al., *Appl. Phys. Let.*, **73**, 10 (1998).
- 4) <http://octa.jp>.
- 5) H. Kogelnik, *Bell Sys. Tech. J.*, **48**, 2909 (1978).
- 6) 辻内順平、ホログラフィー、裳華房 (1997).



**Fig. 12 Comparison of experimental (a) and simulation (b) results for multiple recordings**

## 4 まとめ

本稿では、光記録可能なフォトポリマー材料を利用した体積ホログラム記録における光重合時の体積収縮による屈折率格子の変形が回折光プロファイルに及ぼす影響について検討を行った。

実際のサンプル断面を想定した二次元の線形弾性体シミュレーションから、参照光の通過領域において不均一な収縮が生じていることが確認できた。

その結果に基づき、記録領域の局所的な収縮により回折光の半値幅が広がり、ベースラインが浮き上がってくる現象を再現できた。また、光記録時の収縮が比較的大きいフォトポリマーを用いて、シミュレーションで想定したものと類似の実験を行った結果、定性的には裾野ノイズが再現できることも確認できた。

これらの検討結果は、今後のホログラム記録材料の開発に役立つものと期待している。