

波動光学の風景

ホログラム編

本宮佳典 著

試し読み



Advanced Communication Media
アドコム・メディア株式会社

この電子書籍は、月刊 O plus E 誌の連載チュートリアル記事「波動光学の風景」の、2012 年 4 月号から 2012 年 8 月号までに掲載された分をまとめたものである。ホログラムについて、基本的な原理と考え方、代表的な近似計算手法の基礎などを紹介する。

ホログラフィーは、1947年にガボールにより発明され、1960 年にレーザーが出現して以降、盛んに研究されるようになった。レーザー再生から白色光再生、透過型から反射型、モノクロからカラー化などを目指して方式が多様化してきた。また、量産が容易なエンボスホログラムなども実用に供されるようになった。近年では、計算機技術の発展を背景に、計算機ホログラムやホログラフィックメモリー、デジタルホログラフィーなどの研究開発も盛んになってきた。また、その用途も立体像の記録に留まらず、計測、情報処理、光学部品、セキュリティ等に及ぶ幅広いものになっている。

このようにホログラフィー技術は幅広く展開されているが、その原理は光の干渉による記録と、光の回折による再生である。近年では計算機技術の発展を背景に、ホログラムのパターンを計算機で生成する計算機ホログラムや、ホログラムパターンから計算機で像を再生するデジタルホログラフィーなどもあるが、原理的には光で起こる現象を計算機で模擬するところから始まったものと考えることができる。そこで本書では、光を使った記録再生の原理を解説する。

ホログラムには大きく分けて薄いホログラムと厚い

ホログラムがある。薄いホログラムは 2 次元の干渉縞パターンで入射光の振幅を変調するものである。したがって、再生の原理は既刊の回折編 (1), (2) で扱った現象と同様である。

これに対して厚いホログラムは 3 次元の干渉縞パターンによる回折によって再生像を得るものである。回折効率等を高精度に計算することは、必ずしも容易ではない。しかしながら、近似的なモデルでも現象のイメージを持つことはできて、有用な結果が得られる場合も多い。本書では、不均一な誘電率分布による散乱としての描像にボルン近似を適用する見方と、2 つの平面波を結合する構造としてホログラムを見る見方を紹介する。

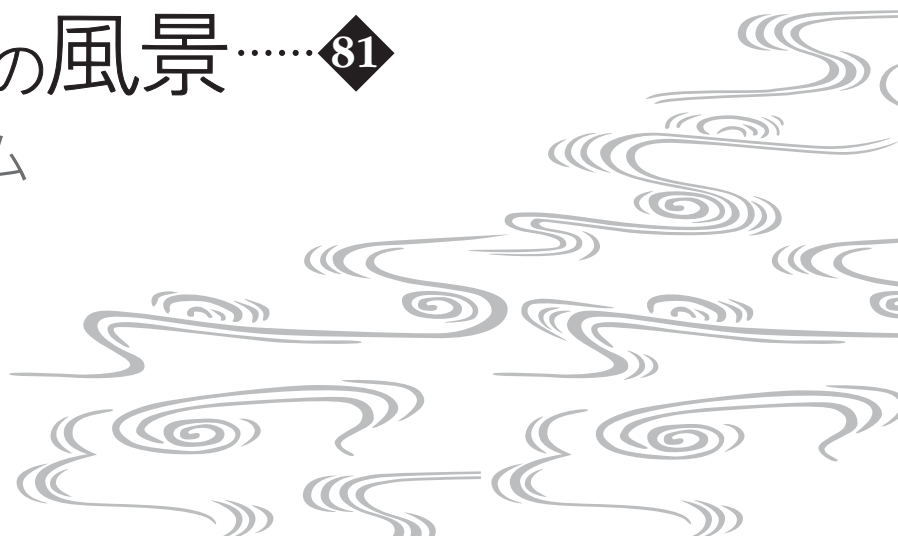
ホログラムは、光の「波としての性質」が巧みに利用され、特徴的な種々の性質を示す興味深い現象である。工学的にはそれを技術要素としてどう活用するかが繰り返し問われて来た。周辺技術や活用方法のアイデアに進展のあるたびに、新たな可能性を求めて発想を飛躍させたり、あるいは基礎に立ち返って実現性を再検討したり、色々な視点からのアプローチが活気づく。今後も光源、材料、デバイス、用途など関連する技術に様々な発展があるに違いない。

ホログラムに触れてその不思議さや興味深さを味わうとき、あるいは幅広い応用分野に想像を広げるとき、本書で紹介した基本的な見方や考え方を少しでも活かしていただければ幸いである。

第 81 回	83. ホログラム
第 82 回	84. 厚いホログラム
第 83 回	85. ボルン近似
第 84 回	86. 結合波
第 85 回	87. 透過型と反射型のホログラム

波動光学の風景……◆81

83. ホログラム



単色光で記録と再生をする薄い濃淡ホログラムの原理について説明する。ホログラムには、白色光で再生するものや、厚いホログラムと呼ばれるものなど色々あるが、薄いホログラムが理解しやすい。薄いホログラムは、振幅透過率が面内座標の関数として与えられる薄いフィルムと考えることができる。主に光の振幅が変調される場合は濃淡ホログラム、位相が変調される場合は位相ホログラムなどと呼ばれる。

図 83-1 に典型的なホログラムの記録と再生のレイアウトを示す。

まず記録に際しては(a)のように、レーザー光をビームスプリッターで2系統に分け、一方の光は感光材の薄く塗布された透明基板に（なるべく均一に）照射する。この光は参照光と呼ばれる。もう一方の光は物体を照明し、物体からの反射光がその透明基板に当たるようにする。こちらの光は物体光と呼ばれる。参照光と物体光は、レーザー光を分岐して得られた光であり、互いに干渉する。すなわち、空間的に光の場の強度を強め合う位置と、弱め合う位置が細かい干渉パターンを形成する。光の場の強弱が感光材に記録される。こうして記録されたものがホログラムである。以下では濃淡として記録されたものを想定して、像の再生される原理を説明する。

再生には、記録時の参照光と同等の光をホログラムに照射する。その光は、干渉パターンによって回折され、物体からの反射光を再現するように射出される。したがって、その射出光を観察すると、物体から反射して来た光と同じように見える。すなわち、立体像が得られる。

通常の写真では、一枚の写真の一部分には、被写体の一部の情報しか記録されず、一部分からは、全体像を知ることができない。これに対してホログラムでは、一部分からだけでも被写体の全体像を再生することができる。ホログラムのホロはギリシア語で「全体」を表す語で、このような意味で全体が記録されていることに因む。また、ホログラムを作製する写真術はホログラフィーと呼ばれる。

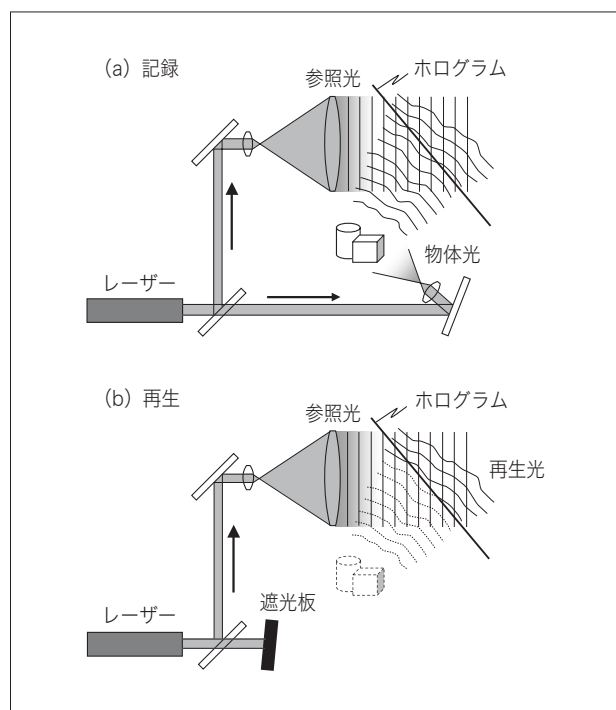
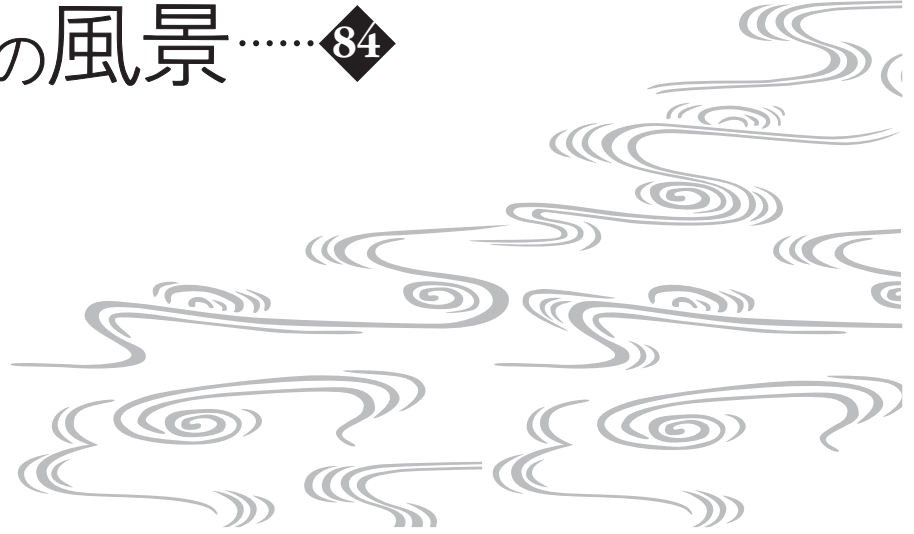


図 83-1 ホログラムの原理

波動光学の風景……◆84

86. 結合波



厚いホログラムの作用を理解するために、前章ではボルン近似を紹介した。入射光が不均一な屈折率分布を持つ媒質を通過するときに、分極の振動が誘起されて散乱波の源になることが分かった。

ブラッグ条件が満たされていると、入射平面波のエネルギーは回折波のモードに移ってゆく。ボルン近似では、入射平面波の変化が小さいことが仮定された。また、回折波がさらに格子の影響を受けて別のモードを励振する効果も無視した。したがって、入射波から回折波に移るエネルギーが少ない状況ではよい近似になるが、回折波が強くなると妥当な近似ではなくなる。

厚いホログラムで回折波の強度が増大する場合、回折波がその先にどうなるかを考えることが必要になる。屈折率格子の形成された領域がある程度広くて厚い場合を考えると、ブラッグ条件の制約が厳しいため、さらに励振できる別のモードは見当たらない。したがって、元の入射波のモードにエネルギーが戻る。すなわち、入射波と回折波の二つのモードが、屈折率格子によって結合し、相互にエネルギーをやり取りする形の波動場が形成される¹⁾。このような場合、入射波と回折波の各々の振幅をパラメータとすると扱いやすい。ボルン近似と比べて一般性を失う部分もあるが、回折効率の高いホログラムに適用できるため、よく用いられるモデルである。本章ではその概要を紹介する。

周期的に振動する電磁場に対するマクスウェル方程式は

$$\text{rot} \mathbf{H} = -i\omega \epsilon \mathbf{E} \quad (86-1)$$

$$\text{rot} \mathbf{E} = i\omega \mu_0 \mathbf{H} \quad (86-2)$$

$$\text{div}(\epsilon \mathbf{E}) = 0 \quad (86-3)$$

$$\text{div} \mathbf{H} = 0 \quad (86-4)$$

となる。ただし、時間発展を表す位相因子は $\exp(-i\omega t)$ とした。また、誘電率 ϵ は位置の関数であるとする。前章で見たように、式(86-1)、(86-2)から $\mathbf{H}$ を消去すると、

$$\text{grad}(\text{div} \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E} = \omega^2 \mu_0 \epsilon \mathbf{E} \quad (86-5)$$

となる。一方、式(86-3)から

$$\text{div} \mathbf{E} = -\frac{\text{grad} \epsilon}{\epsilon} \cdot \mathbf{E} \quad (86-6)$$

の関係式が導かれ [必要なら第 85 章、式(85-15)参照]、式(86-5)に代入すると、

$$\nabla^2 \mathbf{E} + \omega^2 \mu_0 \epsilon \mathbf{E} = -\text{grad} \left(\frac{\text{grad} \epsilon}{\epsilon} \cdot \mathbf{E} \right) \quad (86-7)$$

の表式が得られる。

媒質の誘電率は格子ベクトル $\mathbf{K}_g$ を有する周期的な変調があるとして、

$$\epsilon(\mathbf{r}) = \epsilon_A + \epsilon' \cos(\mathbf{K}_g \cdot \mathbf{r}) = \epsilon_A + \frac{\epsilon'}{2} (e^{i\mathbf{K}_g \cdot \mathbf{r}} + e^{-i\mathbf{K}_g \cdot \mathbf{r}}) \quad (86-8)$$

で与えられるものとする。ただし、 ϵ_A 、 ϵ' は複素定数で、 ϵ' は ϵ_A と比べて絶対値が十分小さいとする。このとき、

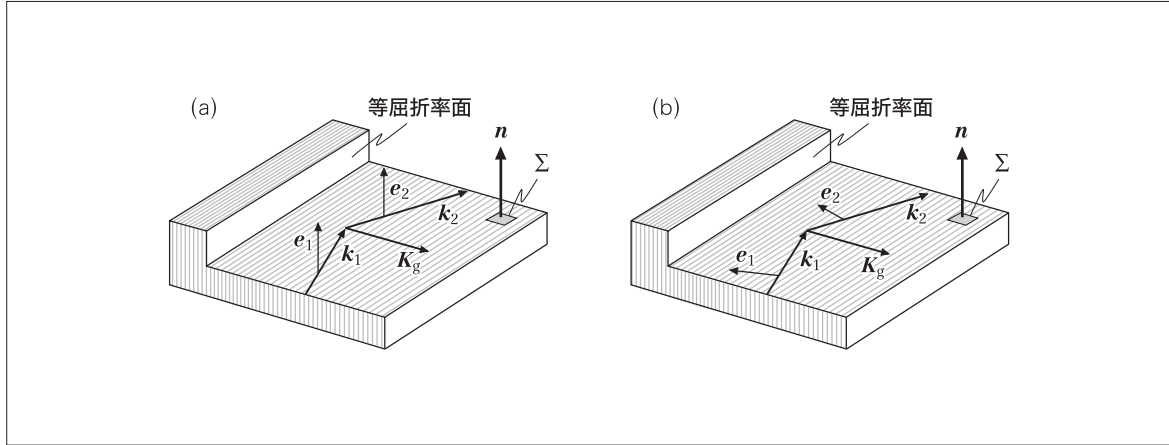


図 87-1 固有モードを構成する 2 つの偏光状態

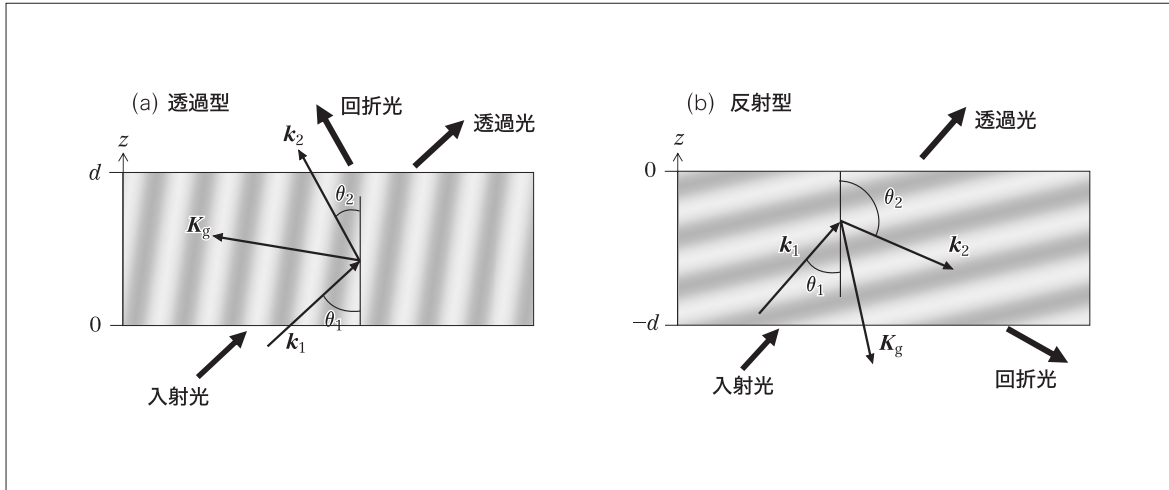


図 87-2 透過型と反射型のレイアウト

で定義すると、関数 $a_1(z)$, $a_2(z)$ に対する連立微分方程式はいずれも

$$2ik_{1z}a_1' = -\beta k^2 a_2 \quad (87-9)$$

$$2ik_{2z}a_2' - [(\mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{k}_2) - k^2]a_2 = -\beta k^2 a_1 \quad (87-10)$$

となる。ただし、 a の肩のプライム「 $'$ 」は z についての導関数を表す。また、 k_{1z} , k_{2z} はそれぞれ $\mathbf{k}_1$, $\mathbf{k}_2$ の z 成分とする。

式(87-9), (87-10)を導出する際に想定した系のレイアウトを図 87-2 に示す。面 $z = 0$ を境界面として厚さ d の屈折率格子が形成され、前後の領域は誘電率 ϵ_A の一

様な媒質で満たされているとする。入射光と回折光の波数ベクトルの関係は式(87-4)で記述されるもので、透過型、反射型で区別はないが、図 87-2 のような系での解の具体的な様態は異なる。透過型ではホログラム領域に入った時点では回折光が 0 であり、手前で回折した光は奥の場に影響を及ぼす。これに対して反射型ではホログラム領域の最奥部で回折光が 0 であり、奥で回折した光は手前の場に影響を及ぼす。図 87-2 の(a), (b)いずれの場合も k_{1z} は正だが、 k_{2z} が正の場合は(a)の透過型、負の場合は(b)の反射型になる。

以下では基本的な振舞いを眺めるために、媒質は透明

■ 事項

	頁	カラム	行		頁	カラム	行
厚いホログラム	7	左	1	体積ホログラム	7	左	1
位相関数	4	右	下 7	DOE	4	右	10
位相伝達関数	4	右	下 6	透過型ホログラム	29	右	15
位相ホログラム	1	左	7	等高線	4	右	下 10
薄いホログラム	1	左	4	濃淡ホログラム	1	左	7
HOE	4	左	下 8	白色光再生ホログラム	9	右	5
X 線回折	9	右	下 7	反射型ホログラム	30	左	下 1
OTF	4	右	下 5	PTF	4	右	下 3
回折型光学素子	4	右	11	光の渦	5	右	下 6
球面波のワイルの表現	14	右	1	物体光	1	左	16
共役光	3	右	8	ブラッグ回折	10	左	下 10
結合定数	23	左	12	ブラッグ条件	10	左	下 11
結合定数	26	右	下 4	ブラッグの法則	10	左	2
結合波	20	右	下 11	ブラッグ反射	10	左	下 9
光学伝達関数	4	右	下 5	フレネルゾーンプレート	5	右	6
高次のボルン近似	14	左	2	ボルン近似	13	右	下 1
格子ベクトル	2	右	下 7	ホログラフィー	1	右	7
格子ベクトル	8	右	14	ホログラム	1	左	2
参照光	1	左	14	誘電体多層膜反射鏡	9	右	12
CGH	4	左	下 10	リップマンホログラム	7	左	3
積分方程式	13	左	下 13	連立微分方程式	23	左	9
体積型ホログラム	7	左	2				

■ 人名

	頁	カラム	行
Born	18	人物	1
Gabor	10	右	8
Helmholtz	10	人物	14
Hilbert	18	人物	16
Kirchhoff	10	人物	14
Klein	18	人物	16
Kogelnik	25	人物	1
Laguerre	6	人物	1
Lippmann	10	人物	1
Minkowski	18	人物	16
Olivia Newton-John	18	人物	下 4
Oppenheimer	18	人物	下 3
Runge	18	人物	16
Schwarzschild	18	人物	16
Shank	25	人物	16
Wolf	18	人物	下 1

著者略歴

本宮佳典 (ほんぐう・よしのり), Yoshinori Hongu



1956年 神奈川県藤沢市生まれ
1975年 神奈川県立湘南高等学校卒業
1979年 東京大学理学部物理学科卒業
1984年 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻博士課程修了 理学博士
同年, 株式会社東芝入社 光応用機器の研究開発に従事
2012年 東芝リサーチ・コンサルティング株式会社 シニアフェロー
2018年 株式会社東芝 研究開発センター (2021.10退職)
法政大学理工学部 (兼任講師) (2018.4~)

第20回 (2019年度) 応用物理学会業績賞 (教育業績) 受賞

「波動光学の風景」の情報は以下のURLで公開しています。 <https://www.adcom-media.co.jp/opluse/wave/>

波動光学の風景 ホログラム編

2014年5月25日初版発行

2023年2月1日第2版発行

著者 本宮 佳典
発行者 喜多 野乃子
発行所 アドコム・メディア株式会社

〒169-0073 東京都新宿区百人町2-21-27
電話 (03)3367-0571(代)

Advanced Communication Media Co. Ltd., Tokyo, Japan, 2014

ISBN978-4-910636-17-7 C3042 ¥1800E

© Yoshinori Hongu 2014

印刷/製本 ㈱ブックフロント

Printed in Japan

・本書に掲載する著作物の複製権・翻訳権・上映権・譲渡権・公衆送信権
(送信可能化権を含む) はアドコム・メディアが保有します。

・**JCOPY** <出版者著作権管理機構 委託出版物>

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつど事前に、
出版者著作権管理機構 (電話 03-5244-5088, FAX 03-5244-5089, E-mail info@jcopy.or.jp) の
許諾を得てください。