

飛翔を始めたホログラフィー技術

加 藤 誠

ホログラフィーはD. Gabor (1900~1979) によって創始されてすでに半世紀を経る。1965年に筆者が初めて接した論文¹⁾には、電子顕微鏡の解像限界に挑んだ波面記録再生の原理が委曲を尽くして説かれてあった。その前年、レーザーホログラフィー^{2,3)}の華々しい成果が広く知られ、He-Ne ガスレーザーも入手できるようになっていた。1966年春からは応用物理学会にホログラフィーの新セッションが設けられる。ところが、当時大阪大学工学部の鈴木達朗教授の着眼点は、紫外線か、X線領域での高分解能ホログラフィー顕微鏡開発にあった。レーザーを使える可視域のホログラフィーは米国でもう大分進んでしまった。しかし、短波長領域でなら今から独創的な研究をやれる。師は真顔である。院生達は日頃、テーマが決まれば仕事の半分はできたと言っても過言ではないと聞かされている。畏れ入った筆者は、では紫外線のほうでホログラフィー顕微鏡なるものを模索したいと申し出た。学位論文テーマの選択に当たって、Gaborの論文熟読を勧められた恩師の心は「温故知新」であった。

1971年Gaborがノーベル賞を受賞する頃には応用面の研究も米国を中心にさかんになってきた。とくに1960年代後半から活発な提案がなされたホログラムメモリー⁴⁾、ホログラムスキャナー⁵⁾などレーザーと組み合わせ合わせたホログラム技術の可能性は、新たにエレクトロニクス企業の研究者から大きな注目を集める。すぐにもコンピューターメモリーや、ビデオプレーヤー⁶⁾が実現できるかもしれないと思わせた「フィーバー」は、しか

し、経済変動の波も被って10年と続かなかった。当時の技術水準は、期待されるホログラフィーの優れた特質からすれば、いずれもいまだ揺籃期にあるに過ぎなかった。

今日では安価、小型、高信頼性の半導体レーザーを始めとする各種レーザーが材料加工、医用、計測、光通信、バーコードスキャナー、レーザープリンター等に実用化されている。半導体レーザーの生産規模は、主に光ディスク装置用途として年間1億個に迫る。画像入力用にはCCDイメージセンサー、液晶デバイスが量産される。半導体技術とコンピューターが過去25年に遂げた巨大な進歩には呆れるほどである。ホログラフィー技術の周辺環境は劇的に変わり、応用への新展開が再び期待される。

「創造とは、歴史的な過去を受け継いで、これを新しい条件の下で、未来に向かって変換再構成してゆくことである」という⁷⁾。ホログラフィーの概念自体、一朝一夕では汲み尽くされない可能性を孕み、それ故、応用物理学、工学、医学、生物学、天文学等々広範な分野に関わりを深めつつ、これまで長い間探求され続けてきたものであろう。本稿では、この間に集積された幾百千編の文献を一跨ぎすることをお許し願ひ、ホログラフィー誕生当初の課題に立ち戻ってみたい。その歴史的課題の解決によって、期待された特質ははたしてどの程度まで発揮されるものであろうか。また、世の中のニーズに新しく適応できる道を見出した実用化例は、どのような経緯を辿ってブレイクスルーに至ったのであろうか。

松下電器産業(株)光ディスク開発センター (〒570 守口市八雲中町 3-1-1)
E-mail: mkato@ctmo.mei.co.jp

1. ホログラフィーの源流

1.1 波面の記録再生

物体波の位相と振幅を記録する「完全な写真」(ホログラム)へ至る道は、今なら半ダースも思いつく、と Leith は Gabor の業績を讃えた追悼論文⁹⁾の冒頭にいう。Leith 自身 1956 年に初めて Gabor の研究を知って、1951 年頃から開発してきたマイクロ波合成開口アンテナのデータ処理⁹⁾が実はホログラフィーと同じものであると気づく。通信理論に基づくレーダーの電気的信号処理システムが、見方を変えれば物理光学のシステムに等価であったとは、Gabor が、意外にも電子顕微鏡から出発し、最も深い普遍性に達した道筋に Leith は感嘆している。Fresnel zone plate が点物体のホログラムに相当すること、また参照光の導入は干渉光学系でなら容易だろうという至当な洞察は、後から言及されている¹⁾。

いまひとつのホログラフィーへの道は、Y. N. Denisyuk が 1958 年頃着想した(図 1)。コヒーレント光源 S によって照射される物体 O からの回折波は、S からの球面波を参照波にして定在波を作る。これを S と O の間におかれた分厚い写真乾板 V の乳剤中に層状に記録するのがボリュームホログラム¹⁰⁾のアイデアである。もし、物体の後方位置 H で記録すれば、Gabor の in-line holography になり、共役像 O' が発生する。また、H の下方部分で記録すれば Leith と Upatnieks の off-axis holography である。ところで、Denisyuk は G. Lippmann のカラー写真¹¹⁾の方法を深く考察していた。水銀の反射面を設けた白黒写真乳剤中に物体像を記録すると、波長成分が定在波の形でマッピ

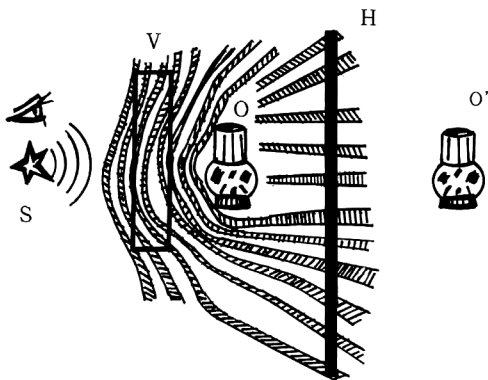


図 1 波面の記録再生原理を説明する概念図(Denisyuk の講義テキストによる)。S:光源, V:三次元記録媒体, H:記録媒体, O:物体, O':共役像。

ングされる。白色光照明によって元のカラー像を見事に再現する Lippmann のプロセスをひとつの契機として、Denisyuk はフルカラー三次元物体像を完全に再生できる新しい方法に到達し得たのであろう。

三者は三様に、しかもレーザー登場前夜のほとんど同時期に、波面の記録再生という像形成の基本課題を独立に発掘した。屈折によらない結像理論が確立した 1962 年は Abbe の顕微鏡理論から数えると 75 年(89 年)、Young と Fresnel の光波動説からは 140 年目に当たっている。

1.2 光源のコヒーレンス

1961 年のガスレーザー連続発振を待っていたように展開された初期のレーザーホログラフィー^{2,3)}研究についてはすでに述べた。電子線ホログラフィー¹²⁾はどうなったか。物体の大きさに対する制約をなくし、共役像の分離を可能にする off-axis holography (1968 年の Möllenstedt らによる電子線バイプリズムの導入)に加えて、コヒーレンス向上を桁違いに進めた外村ら¹³⁾の電界放射型電子顕微鏡が 1978 年に成功するまで、実に 30 年の歳月を要した。しかし、一度鮮明な波面記録ができれば、後は光学の世界に移る。再生光学系の位相差増幅を利用する干渉顕微鏡法¹⁴⁾が開発され、最近の発展はめざましい。一例として、ミクロな磁場が初めて観察可能となった。図 2(b)の干渉縞は磁束の流れに沿っており、磁気テープ内部の磁化パターンと、真空中に漏れている磁場(上部 3 分の 1)の様子が詳しく観察される¹⁴⁾。

筆者らの紫外線ホログラフィーは、白色干渉光学系の開発¹⁵⁾により、off-axis 型フーリエ変換ホログラムを実現した。光源の輝度とコヒーレンスの矛盾が大幅に緩和され、超高圧水銀灯を用いて記録したホログラムから、初期のレーザーホログラフィーに匹敵する鮮明な再生像

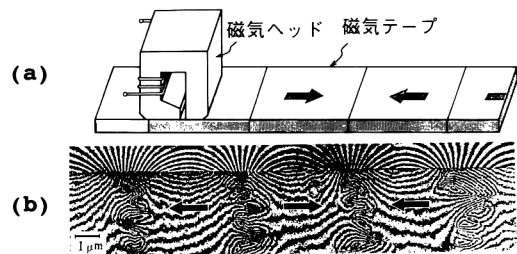


図 2 磁気テープの干渉顕微鏡像(N. Osakabe, et al.による)。(a)磁気テープ薄膜は、矢印で示されている方向に磁化される。(b)真空中に局在する磁場とともに現れた磁力線の像。

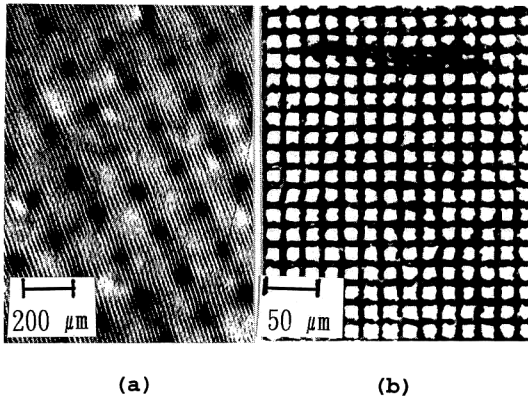


図3 準単色光源を用いたホログラフィー。(a)金属メッシュ状物体のホログラム, (b)再生像(部分)。

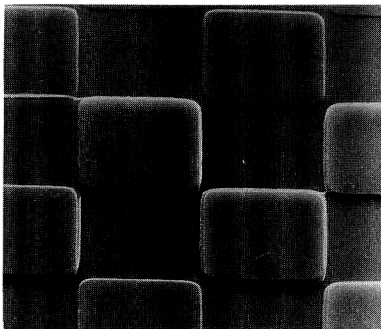


図4 擬似ランダム拡散板の拡大写真。二次元位相系列 $\{0, \pi/2, \pi, 3\pi/2\}$ を用い、隣接領域間の位相差が $\pm\pi/2$ のいずれかとして構成される。

が得られる(図3)。共役像, 記録材料の解像度, 物体の制約等, in-line holography での欠点は除かれた。

1.3 ホログラムメモリとスペクルノイズ抑圧¹⁶⁾

Gaborがホログラフィーの最大の敵と呼んだスペクルノイズ抑圧の課題には、十指に余る拡散板方式が提案された。擬似ランダム拡散板¹⁷⁾(図4)はホログラフィックビームスプリッターとして白色干渉光学系に組み込まれ、2書体1万6千文字を約 10^5 bit/mm^2 相当の密度で収容する漢字メモリ¹⁸⁾へ応用されている。この漢字メモリ装置は、He-Neガスレーザー, ガルバノミラー, 撮像管(図5)の道具立てで、急成長してきた半導体メモリをリフレッシュメモリに用いた漢字ディスプレイ, プリンターに接続された。米国で復活したホログラムメモリ¹⁹⁾は、ここ20数年来待たれた記録材料の進展に基づき、参照光の角度を変え、あるいは位相コードを用いてデジタル画像を多重記録する。ホログラムメモリ本来の特徴である空間並列処理によ

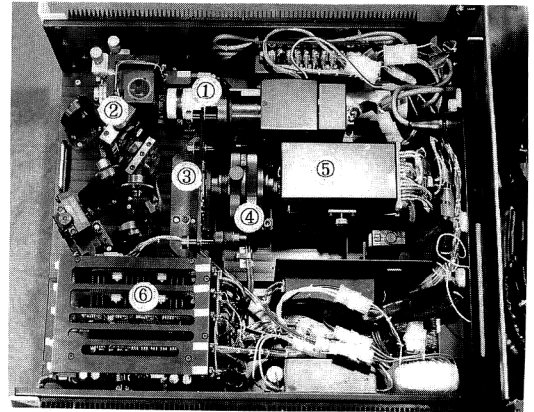


図5 漢字発生装置の外観写真。①2mW He-Neレーザー, ②光偏向光学系, ③ホログラムメモリ板, ④フーリエ変換レンズ, ⑤撮像管, ⑥信号処理回路部。

て、例えば、64チャンネル並列読出しにより、毎秒1 Gbit以上の高転送レートが狙われる。極低温動作のホールバーニング効果²⁰⁾を利用した波長多重方式では、機械的可動部がない単純な光学系で1000万フレームの静止画容量、またナノ秒の超高速動画記録再生が可能とみられている。連想メモリ²¹⁾としての応用も含めて、将来の本格的進展が期待される。

2. ホログラム素子の産業応用

2.1 バーコードスキャナー

安価大量複製が容易なホログラム素子の実用化は、光偏向と集光機能を1枚の回転円盤上に集積化したバーコードスキャナーによって開始された²²⁾。正確な直線走査が必要なポリゴンミラーの代替には課題を残す²³⁾。すでに市場にでた製品機能の一部を代替するには、コスト、性能等への総合寄与で、1桁以上の改善が求められる。部品コストが半分になっても生産ラインの大きな変更を伴う場合には厳しい評価となり、変革は起こりにくい。

2.2 集積化光ヘッド

1982年に登場したCDにはコンパクトな半導体レーザーと非球面成型レンズが使われる。しかし、フォーカスとトラッキング用のサーボ信号を検出する従来光学系は、1985年頃には簡素化の限界に達していた。そこでホログラム素子を用いる再生専用光ヘッドの簡素化が1980年代後半に始まった²⁴⁻³¹⁾。現在、年間数千万個のホログラムヘッドがCD, CD-ROM用に生産されている。図6はホログラム素子の一例³⁰⁾を示す。

一方、同じ頃に筆者の周辺では、記録再生用光ヘッドの簡素化をこそ目指さなければならぬとする声が聞かれ

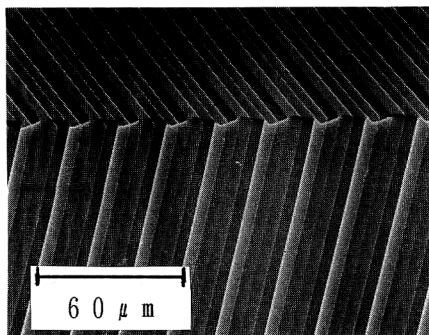


図6 SSDサーボ検出方式ホログラム素子の電子顕微鏡写真。計算機合成マスクパターンにより、ガラス板上に4レベルのプレズ化を実現。

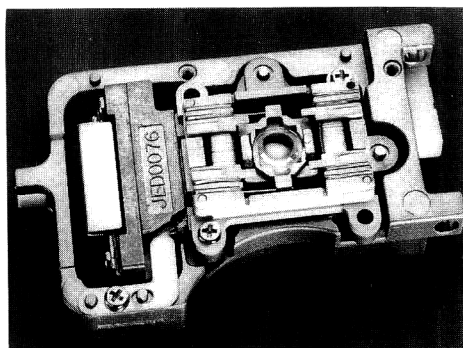


図7 偏光性ホログラム素子実装の録再型光ヘッドの外観写真。ヘッド寸法は、41 mm×31 mm×11.2 mm。

た。当時、録再ヘッドのコストは、光ディスクドライブ装置全体のコストの1/3~1/4を占め、プリズム等光学研磨を要する部品コストの大幅な低減は期待薄であった。このままでは、光ディスクの普及が危ぶまれる。再生専用光ヘッド簡素化は、上記のホログラム素子導入による往復光路型光学系で完成されそうであったが、録再生にはなお4項目以上の要求水準が満たされなければならない。主な開発課題は、①サーボ検出光学系の簡素化、②組立て精度（従来は1ミクロン程度の調整精度）の1桁緩和、③トラック溝をビームが横断するときには不可避なノイズの抑圧、④再生専用と比べて1桁大きい光源の波長変動の影響回避、および⑤高光利用効率（光ディスク盤面上に低損失でレーザービームを収束）の実現等であった。好都合にも上記①の課題には、③の唯一解と思われた spot size detection (SSD) フォーカスサーボ方式を集積化ホログラムヘッド系に「等価変換」すればよく³²⁾、半導体レーザー・光検出素子一体化モジュール³³⁾に組み合わせることによって、②、④もともに解決されそうに思われた。1石3鳥の指針は、バルク型録再ヘッドの課題に長年取り組んできた仲間に、筆者がちょうどその時期再会して得られた結論であった。筆者が1986年に事業部から戻ってきた当時の所属先が、機器開発部門でなく、光半導体関連の研究部門であったことが大いに幸いした。ホログラム素子パターンをコンピューター合成ホログラムとして設計、出力し、半導体リソグラフィ技術で製作する基盤技術が提案され、短期間で確立された³⁴⁾。⑤の課題も、偏光性ホログラム素子と四分の一波長板³⁵⁾を用いて解決される見通しが間もなく得られる。そこでは、ニオブ酸リチウムのプロトン交換プロセス³⁶⁾が、第2次高調波発生技術として開発されていた。

録再生ホログラムヘッドの基礎技術は、こうして1991年までに準備された。しかし、実際に録再生ヘッド設計が着手されたのは、事業部門からCD-ROM互換可能な相変化光ディスクドライブ³⁷⁾、PDの商品企画が上がってきた翌年からである。言われてみれば、CD-ROMがパソコンに標準装備される時代が目前まで来ていた。光学部品点数は11個が4個に、調整箇所も11から4箇所へ削減され、大幅なコスト低減と、小型化が図られた。実用化された記録再生用光ヘッド³⁸⁾ (図7)の生産性と信頼性は、従来のバルク型光学系のものに比べて桁違いに良く、自動化ラインによる作りやすさが最も歓迎された。製造現場の意気込みと研究所の支援により、新機軸の録再生光ヘッド量産ラインは1995年春から順調に本働稼働、生産台数は初年度50万台を軽く越えた。こんな前例は今までになかった、とは量産のトラブルをいつも嫌というほど味わってきた事業部門関係者に共通する実感であろう。なお特筆されるのは、レーザーパワー以外はCD用とほぼ同じモジュール部品^{29,33)}を用いて録再生ホログラムヘッドが作られ、製品不良も皆無とってよいことである。

ホログラフィーの源流から実用化に至る50年の流れを概観した。当初、特殊な方法と思われた波面記録再生技術は、コヒーレントソース（レーザー、マイクロ波、電子線、X線、音波等）他の課題が長年の弛まぬ努力で解決されるに伴ってホログラフィーの本領を發揮し始める。実用化は、一方で基盤となる周辺技術の成熟とともに可能性が高まり、他方、ニーズの切実さによって遂に実現されてゆく例をみた。

最後に、今後は企業で技術「研究」が何の様に有用であるのか、あらかじめ宜しく説明するとしても、肝心の

研究「評価」はどの道いつも遅れて来たるのである。同じ技術の世界にありながら、研究と開発とでは時にその性格が全く異なるように見える。あたかも「光子」が「波動性」と「粒子性」の二様に振舞うごとくである。研究・開発が都合よく連続的に展開できるためには、いうまでもなくその研究がいまだ不確定な早期にテーマ起案されるほかはあるまい。そうして始めて「有効な知的財産権の創出期間」にも恵まれ、新たなシーズを準備し得るといえる。他方、世の中のニーズの底流を逸早く掴むことによって開発目標を明らかにし、実用化を推進する開発の立場からは、その研究がで上がった姿における事前「評価」が必要不可欠とされる。かような技術の二重性は、哲学における理論と現実の関係を深く洞察したヘーゲルにでも扱って、論じられるべき問題であろうか。有名な「ミネルヴァの梟は、迫り来る薄暮と共にその飛翔を始める（『法哲学要綱』序文，1821年）」という表現は、哲学的見解が一定の形をとるのは、現実が一定の成熟をして、そこに問題を提出することによってである、と解される。研究におけるアイディアの先見性といい、また哲学の理念 (Idee) といい、裏を返せば人はその時代になって解けるようになった課題をこそ、正しく提出してきたことが知られるのではなからうか。

図2の写真提供を快諾された日立基礎研の外村彰氏に厚くお礼を申し上げます。

文 献

- 1) D. Gabor: "Microscopy by reconstructed wave-fronts," Proc. R. Soc. London, **A197** (1949) 454-487.
- 2) E. N. Leith and J. Upatnieks: "Reconstructed wave fronts and communication theory," J. Opt. Soc. Am., **52** (1962) 1123-1130.
- 3) E. N. Leith and J. Upatnieks: "Wavefront reconstruction with diffused illumination and three-dimensional object," J. Opt. Soc., **54** (1964) 1295-1301.
- 4) F. M. Smits and L. E. Gallaher: "Design considerations for a semipermanent optical memory," Bell Syst. Tech. J., **46**, (1967) 1267-1278.
- 5) O. Bryngdahl and W. H. Lee: "Laser beam scanning using computer-generated holograms," Appl. Opt., **15** (1976) 183-194.
- 6) R. Bartolini, W. J. Hannan, D. Carlsons and M. Lurie: "Embossed hologram motion pictures for television playback," Appl. Opt., **9** (1970) 2283-2290.
- 7) 市川亀久彌: 創造性の科学 (日本放送出版協会, 1970) p. 104.
- 8) E. N. Leith: "The legacy of Dennis Gabor," Opt. Eng., **19** (1980) 633-635.
- 9) A. Kozuma, E. N. Leith and N. G. Massey: "Tilted-plane optical processor," Appl. Opt., **11** (1972) 1766-1777.
- 10) Y. N. Denisyuk: "Photographic reconstruction of the optical properties of an object in its own scattered radiation field," Sov. Phys. Dokl. Engl. Transl., **7** (1962) 543;

- "On the reproduction of the optical properties of an object by the wave field of its scattered radiation. II," Opt. Spectrosc. Engl. Transl., **18** (1965) 152-157.
- 11) G. Lippman: J. Phys. Theor. Appl. **3** (1894) 97.
 - 12) 外村 彰: "電子線ホログラフィーによる磁束量子ダイナミクスの観測", 応用物理, **63** (1994) 222-231.
 - 13) A. Tonomura, T. Matsuda and T. Komoda: "Two beam interference with field emission electron beam," Jpn. J. Appl. Phys., **17** (1978) 1137-1138.
 - 14) N. Osakabe, K. Yoshida, Y. Horiuchi, T. Matsuda, H. Tanabe, T. Okuwaki, J. Endo, H. Fujiwara and A. Tonomura: "Observation of recorded magnetization pattern by electron holography," Appl. Phys. Lett., **42** (1983) 746-748.
 - 15) M. Kato and T. Suzuki: "Fourier-transform holograms by Fresnel zone-plate achromatic-fringe interferometer," J. Opt. Soc. Am., **59** (1969) 303-307.
 - 16) 加藤 誠: "ホログラフィーにおけるスペックル抑圧", 光学, **4** (1975) 263-277.
 - 17) Y. Nakayama and M. Kato: "Image quality in holography with a pseudorandom diffuser," Appl. Opt., **20** (1981) 2178-2180.
 - 18) I. Satoh, M. Kato, K. Fujito and F. Tateishi: "Holographic memory system for kanji character generation," Appl. Opt., **28** (1989) 2634-2640.
 - 19) J. Heanue, M. Bashaw and L. Heeselink: "Volume holographic storage and retrieval of digital data," Science, **265** (1994) 749-752.
 - 20) 光永正治, 上杉 直, 佐々木浩子, 唐木幸一: "ホールバーニングによるホログラフィック動画記録", 応用物理, **63** (1995) 250-254.
 - 21) S. V. Pappu: "Holographic memories; a critical review," Intern. J. Optoelectronics, **5** (3) (1990) 251-292; See also G. T. Sincerbox: "Selected papers on holographic storage," SPIE Milestone Series MS 95 (1994) pp.1-637.
 - 22) Y. Ono and N. Nishida: "Holographic laser scanners using generalized zone plates," Appl. Opt., **21** (1982) 4542-4548.
 - 23) 長谷川信也, 山岸文雄: "半導体レーザを用いた直線走査ホログラムスキャナー", 光学, **22** (1993) 135-136.
 - 24) Y. Kimura, S. Sugama and Y. Ono: "Compact optical head using a holographic optical element for CD players," Appl. Opt., **27** (1987) 668-671.
 - 25) H. Jacobs: U. S. Patent No. 4665310 (1987).
 - 26) W. H. Lee: "Holographic optical head for compact disk applications," Opt. Eng., **28** (1989) 650-653.
 - 27) Y. Kurata, H. Yamaoka, T. Ishikawa, P. Coops, A. Duijvestijn and P. de Zoeten: "CD optical pickup using a computer generated holographic optical element," Optical Storage and Scanning Technology, ed. T. Wilson, Proc. SPIE **1139** (1989) 161-168.
 - 28) S. Kadowaki, Y. Komma, S. Nishino, Y. Hori and M. Kato: "A very small holographic optical pick-up head with a movable single-assembly optical system," Jpn. J. Appl. Phys., **31** (1992) 542-543.
 - 29) A. Yoshikawa, H. Nakanishi, K. Itoh, T. Yamazaki, T. Komino and T. Musha: "laser-detector-hologram unit for thin optical pick-up head of a CD player," IEEE Trans. Compon. Packag. & Manuf. Technol. Part B, **18** (1995) 245-249.
 - 30) M. Kato, S. Kadowaki, Y. Komma and Y. Hori: "Recent advances in optical pickup head with holographic optical elements," Holographic Optics III: Principles and Appli-

- cations, *ECO4*, Proc. SPIE, **1507** (1991) 36-44.
- 31) Y. Kurata and T. Ishikawa: "CD pickup using a holographic optical element," *Int. J. Jpn. Soc. Prec. Eng.*, **25** (1991) 89-92.
- 32) M. Kato, T. Saimi, S. Kadowaki and Y. Komma: "Holographic servo signal detection stabilized to the wavelength fluctuation and the mechanical misalignment in the optical heads," *Optical Data Storage, Tech. Digest Ser.*, 1 (Opt. Soc. of Am., 1989) pp. 82-85/Proc. SPIE, **1078** (1989) 122-126.
- 33) 山本博昭, 堀 義和, 芹澤皓元: 特願昭 62-309056 (登録 No. 2088843).
- 34) Y. Komma, S. Kadowaki, S. Nishino, Y. Hori and M. Kato: "A holographic optical element for an integrated optical head," *Opt. Rev.*, **3** (1996) 251-257.
- 35) 堀 義和, 金馬慶明, 十川文博, 加藤 誠: "偏光異方性を用いたホログラムヘッドの検討(1)", 第 36 回応用物理学関係連合講演会予稿集, 2p-ZB-2 (1989).
- 36) 山本和久, 谷内哲夫: 特願昭 60-30964 (登録 No. 1898849).
- 37) R. Imanaka, T. Saimi, Y. Okazaki and I. Kawamura: "PD" (powerful optical disk system) for multimedia," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **35** (1996) 490-494 Pt. 1, No. 1B.
- 38) S. Nishino, H. Yamamoto, K. Kasazumi, H. Wada and K. Sano: "Application of a polarizing holographic optical element to a recordable optical head," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **35** (1996) 357-361, Pt. 1, No. 1B.

(1997 年 1 月 6 日 受理)