



ホログラフィックメモリーの昨今

東京大学 生産技術研究所 光物質ナノ科学研究センター 教授

志村 努 SHIMURA, Tsutomu

(当協会「光応用技術研修会」及び

「相関とフーリエ変換で理解できる光学機器」講師)

いつまでたっても実用化されないという意味で、永遠の次世代メモリーと揶揄されるホログラフィックメモリー（以下ホロメモと略す）の研究開発は、現状、低迷期に入っている。これからホロメモはどこへ向かうのであろうか。

ホロメモは、2次元のデジタル画像を記録媒体の同一空間に多重記録することにより、大容量のメモリーを実現するものである。同一空間に記録された複数の2次元データをクロストークなしに読み出すには、Bragg回折等の体積型ホログラムの性質をうまく利用している。また一般には見逃されがちだが、2次元デジタルデータを一気に読み書きできるため、データ転送レートが大きいという特徴も持っている。昨今のハードディスクや半導体メモリーの高密度化、大容量化の進展により、ホロメモはかつてのように記録密度的な優位はさほどアピールできなくなっている。近年はデータ転送レートの大きさを活用した使い方の方が強調されている。実はホロメモは1963年のvan Heerdenによる最初の提案¹⁾から、その原理はほとんど変わっていない。今使われているほとんどの概念、原理はこの論文ですでに提案されている。変わったのは空間光変調器、撮像素子、レーザー、記録材料、制御系、計算機的能力といった要素技術の著しい進歩だろう。

これまでにホロメモは3度の研究・開発ブームを経験している。第1期が1960~70年代で、日本の電気メーカー各社も含めて、多くの企業がこぞって研究・開発を進めた。今から思うと驚きだが、最初はコンピューターの一次メモリーとして考えられていたという。もちろんこの用途の開発競争ではD-RAMに敗れ、次には外部メモリーを目指すこととなった。著者はこの時期の状況を直接は知らないが、各社から様々なシステムやアイデアの発表があったことから、かなり力が入った開発が行われたことがうかがわれるが、結局実用化には至らなかった。

第2期は1990年代にアメリカを中心として起こり、記録材料としてフォトリフラクティブ効果を持つ LiNbO_3 （ニオブ酸リチウム）結晶が主に使われた。筆者はこの時期、メインの研究テーマがフォトリフラクティブ効果だったが、ホロメモの研究は行っていなかった。また第1期ブームにかかわった何人かの方から、開発の過程でホロメモの問題点はすでに抽出されており、実現の可能性は低い、というようなお話を伺っており、ホロメモの将来にあまり明るいものは感じていなかった。ただ、2年に一度のフォトリフラクティブ効果の国際会議に出席すると、ホロメモのセッションがあり、スタンフォード大学のHesselink先生、カリフォルニア工科大学のPsaltis先生などのグループから活発な発表があり、アメリカ勢の本気度と、日本でのホロメモに対する冷めた見方とのギャップを、不思議に感じていた。発表の中では、 LiNbO_3 結晶を使ったシステムで動画を再生している様子を、Hesselink先生がビデオで見せていたのが今でも印象深い。ただし、この第2次ブームもアメリカで走っていた大型プロジェクトの終了とともに収束してしまった。

第3次ブームが起こったのが、2000年を過ぎたあたりからで、以前のAT&T Bell Lab, のちのLucent TechnologiesからスピンアウトしたInPhaseというベンチャーが、ホロメモの記録材料として高い性

能を持つ、新しいフォトポリマーを開発して、ホロメモ開発に取り組み始めたことに端を発している。第2次ブームの時に使われていた記録材料は上記のフォトリフラクティブ結晶、 LiNbO_3 単結晶が主流で、この材料には、(1) 記録感度が低く、記録に時間がかかりすぎる、(2) 記録保持時間が有限であり冷暗所で1年程度、(3) 読み出し時の光照射により、記録がわずかなずつ消えてしまう、というような問題点があった。フォトポリマーは記録の書き換えはできないものの、フォトリフラクティブ結晶と比べて記録感度が格段に高く、高速な書き込みが可能であるというのが特徴である。感度が高い要因は、重合反応が連鎖反応であり、光子一つが開始剤分子一つを励起、解離すると、連鎖的に多数のモノマーが反応してポリマーとして成長していくという点にある。フォトリフラクティブ効果では、光子1個につきキャリア（電子または正孔）が1個励起され、少し動いて再結合する。しかも1回の励起と再結合による電荷の動きはほんのわずかなので、多数回の光励起と再結合が繰り返されて初めて結晶内に大きな電荷の分布が生じるため、応答時間が極めて長い。干渉縞を照射してから回折格子が書き込まれるまでに数秒程度かかるのは当たり前で、これでは書き込み速度は上がらない。実は書き込み速度は光強度に比例するのだが（照射光子数と励起されるキャリア数が比例することに由来する。）光照射強度には限界があり、高速化にも限界がある。

InPhase 社の開発したフォトポリマーの優れたところは、重合化反応により効率よくホログラムが書き込まれるというだけでなく、ポリマー化反応に伴う体積収縮が非常に小さい、という点にある。熱重合により作られたポリマーマトリクスが、ヘチマの筋、あるいは金属たわしの繊維のような骨組みとなり、体積的にはスカスカでありながらその強度により形状を保つ役割をしており、隙間を小さなモノマーが自由に動き回れる構造になっている。光重合によりモノマーがポリマー化し、ある程度以上の大きさになると隙間を動くことはできなくなり、ポリマーの空間分布が固定される。もしポリマー化反応の前後で体積変化があると、照射された干渉縞のピッチと書かれた回折格子のピッチが異なってしまう、Bragg 条件を満たす参照光の角度あるいは光の波長が変化し、書き込んだホログラムが正しく再生されなくなる。その意味で書き込み前後での体積変化を抑えることは非常に重要で、ホロメモ用フォトポリマーのスペックでは「収縮率」の数字は注目ポイントの一つである。経験的には0.3%以下は必須で、0.1%以下ならさらに良いと言われている。

このフォトポリマー材料の出現で、第3次ホロメモブームともいえるべき動きが起こり、今度はアメリカだけでなく日本の企業も多数がブームに加わった。多くの光ディスクドライブメーカー、光ディスクメディアメーカーに加え、化学材料メーカー、光ディスク関連機器メーカーもホロメモ開発に参入した。中でも特に目立っていたのは、堀米秀嘉氏の始められたソニーからのスピンアウトベンチャー「オプトウェア」のコリニア方式のホログラフィックメモリー、コリニア方式を採用して実用に近づけたソニーのプロジェクトなどだ。また大学でも、堀米氏も加わった豊橋技術科学大学の井上光輝先生を中心とするプロジェクトが立ち上がった。筆者もこのような動きの中で、堀米氏との共同研究の形で、2005年ごろからコリニア方式ホログラフィックメモリーのモデル化と、記録再生過程の解析に関する研究をスタートさせた。また、そのころに、応用物理学会分科会日本光学会（現(一社)日本光学会）傘下のボリュームホログラフィックメモリー技術研究グループが立ち上がり、研究会には毎回100人を超える参加者があり、またその下に設けられたワーキンググループでも活発な議論が行われた。フォトポリマー材料の特性評価項目、評価測定法の標準化も行われた。

第3次ブームが起こった要因には、上記のフォトポリマー材料の出現に加えて、冒頭に述べた要素技術の著しい進展があると思われる。第1次ブームのころとは、周辺環境が激変していた。しかしながらブームはそれほど長くは続かず、ちょうど2008年に起きたリーマンショックの影響もあり、徐々に退場する企業が増えていった。現状はブームは去ったが、地道に研究を継続している大学、企業は国内に10程度あり、また、宇都宮大学の谷田貝豊彦先生をリーダーとするJSTプロジェクトも10年継続されて、ある意味、地に足の着いたともいえる着実なホロメモ研究が続いている。

第3次ブームでも製品化まではたどり着かなかった要因はいくつかあるだろうが、個人的な感想としてはフォトポリマーの難しい特性を扱いきれなかったという面があるのではないかと思う。実はフォ

トポリマーの反応で光が関係するのは、最初に開始剤が光を吸収してラジカルを発生する部分だけで、あとの重合反応に光は関与しない。光は反応のトリガーの役割しか持たないのである。どこまで反応が続くかは、モノマーやラジカル分子の密度のみで決まる。発生するラジカルの密度分布はホログラムの干渉縞の光強度分布に比例するが、重合反応が進み、最終的に反応が停止した段階で作られる高分子の分布と、それによる屈折率分布が書き込み時の光強度分布に比例する保証はない。むしろ、かなり非線形かつ非局所的な複雑な過程によって屈折率分布が決まる。このような事情が、ホログラム記録材料としてのフォトポリマーの扱いにくさの由来のような気がする。

また、QRコードに似た2次元デジタルデータの信号処理技術の未熟さもあり、記録密度が思ったほど上がらないという問題もある。Blu-ray discの記録面密度は片面1層33GBとして、記録密度は $28 \text{ bit}/\mu\text{m}^2$ であり、1 bitあたりの専有面積は、 $0.035 \mu\text{m}^2$ となる。ページデータ方式のホロメモの単一ホログラムあたりの記録密度は光の波長を $\lambda = 405 \text{ nm}$ とすると、 $\lambda^2 = 0.16 \mu\text{m}^2$ のオーダーであり、多重記録で容量を稼げるのがホロメモの特徴であるとは言え、Blu-rayが両面3層でトータル6層としてディスク1枚当たり200 GB程度の記録密度が実現できるのと比べて、容量の面で優位に立つにはかなりの多重度が必要となる。多重度を増やすと、記録媒体への負担が大きくなる。この単層あたりの記録密度の違いは、コーディング方法などのデータ処理技術の違いから来ている。時系列信号を扱うデータ処理技術は長い歴史を持ち、さらに現在も進化を続けている。これに比べて、2次元データを扱う技術はいまだ未熟で、そのために記録密度の差が出ている。

したがって、ホロメモの記録密度向上のためには、(1) 2次元データを扱うデータ処理技術の発達、(2) ホロメモへの時系列信号の導入、のいずれかが必要になると考えている。われわれは、現在後者の方法を選択し、研究を進めている。

現状のホロメモの問題点をまとめると、(a) 記録媒体としてのフォトポリマーの扱いにくさ、と(b) データ処理技術の未熟さ、の2点が特に重要であると考えている。今のところ企業の立場ではホロメモを実用化しようという動きは活発ではないが、われわれは大学という自由な立場で、ホロメモの問題点を洗い出し、その解決策を見出していきたいと考えている。

参考文献

- 1) P. J. van Heerden, Appl. Opt., Vol. 2, No. 4, 393 (1996).
- 2) H. Horimai, X.-D. Tan, and J. Li, Appl. Opt. Vol. 44, No. 13, 2575 (2005).