

解説

光ディスクメモリー

宮岡千里

湘北短期大学 〒243 厚木市温水 428
ソニー(株) 〒141 東京都品川区北品川 6-7-35

(1995年4月5日受理)

Optical Disc Memories

Senri MIYAOKA

North Shore College of Sony Institute, 428, Nurumizu, Atsugi 243 &
Sony Corporation, 6-7-35, Kitashinagawa, Shinagawa-ku, Tokyo 141

1. はじめに

レーザーが発明された1960年代初頭、私たちにとってレーザーというものは、空想科学小説の中か大学の研究室でしか扱われることのない、遠い存在でした。しかしながら、今ではCD (compact disc) プレイヤーや、LD (laser disc) プレイヤーの光源として、ほとんどの家庭に入り込んでいます。中には、カバンやバッグの中に入れて通勤通学をしている人もいるでしょう。レーザーの普及と光メモリー産業の発展は切っても切れない関係にあります。SFに現れる「殺人光線」以外には馴染みのなかったレーザーですが、光ディスク産業の発展を通じて、「日常的な光」として広く普及されるに至っています。この光ディスク産業の発展は、実に多岐にわたる分野の研究者、技術者、製造関係者の総合力によって支えられたものであり、その発展過程は一大叙事詩の感を呈しています。

光ディスクを支える3大要素技術として、

1. 微細加工技術を中心とした媒体の量産技術
2. 信号・情報処理を中心とするドライブ技術
3. オプトメカトロニクスおよび制御技術

が挙げられます。光ディスク技術はこのように、材料・プロセス技術者、信号・情報処理技術者、光学技術者、メカトロニクス技術者といった、きわめて広範囲の専門家を巻き込んで発展を遂げてきました。つまり、異なった背景、カルチャーをもつ技術者たちが一致協力して、バランス良くブレイクスルーの負荷を受け持つことでは

じめて発展可能な新しい技術分野なのです。

表1に光ディスク技術発展の年表を示します。光ディスク技術の発展を時間的に追ってみますと、まず1970年代を通じてサーボエラーの検出方法、アクチュエーターの開発、ディスク基板の厚み決定、基板の大量複製方式等といった技術の骨格が確立されました。引き続き1980年代前半には半導体レーザーの出現により、CDやLD等の再生専用ディスクの商品化が実現しました。その後、1980年代後半には、磁気記録と同等の機能を実現するために、write once (WO) 型、消去可能型、オーバーライト型といった記録機能の追及が精力的に行われ、MO (magneto-optical disc) やMD (mini disc) というような記録ディスクが実現しました。1990年代に入って記録機能の追及が一段落すると、いよいよ高密度化への挑戦が始まりました。現在は、より高密度化された新製品群台頭の前夜といったところです。光ディスクの技術的側面については専門的解説¹⁾に委ねるとして、本稿ではソニーという企業の内側からみた、光ディスク技術のブレイクスルー、開発にまつわるエピソード等の紹介を試みたいと思います。

当社においても1970年代から1980年代に活躍した光ディスク技術者が少しずつ分散しつつあります。当時、ソニーディスク開発部においてCDのRed Bookをまとめた中心人物である、成瀬庸介氏も昨年他界されました。このようなときに光ディスク技術開発の経緯をまとめ、後世に残せるチャンスを与えていただいたことは大変タイムリーなことと考えております。

表1 光ディスク開発の歴史

1970	<ul style="list-style-type: none"> ● TED: 触針式 VDP 開発 (凹凸信号を圧電変換) ● Philips, MCA: 光学式 VDP 開発 ● Philips, Thomson, Zenith: 光学式 VDP 学会発表
1975	<ul style="list-style-type: none"> ● RCA: 静電容量型 VDP の開発
1980	<ul style="list-style-type: none"> ● Pioneer: He-Ne laser を用いた VDP 発売 ● Victor: 静電容量型 VDP 発表 (VHD) ● Philips, Sony: CD 標準化 ● Pioneer: 半導体 laser を用いた VDP 発売 ● Alliance 各社: CD 発売 ● KDD, Sony: 光磁気 drive 開発
1985	<ul style="list-style-type: none"> ● 東芝, 日立, Sony 他: write once 型 drive 発売 ● 松下: GeSbTe 相変化材料発表
1990	<ul style="list-style-type: none"> ● 5.25" MO drive 発売 ● 松下: 5.25" 相変化 drive 発売 ● 3.5" MO drive 発売 ● Sony: SHG green laser, IRISTER の学会発表 ● 松下: land/groove 記録の学会発表 ● Sony: 再生専用超解像ディスク (PSR) 学会発表
1995	<ul style="list-style-type: none"> ● Sony: 多値記録方式 (SCIPER) 学会発表

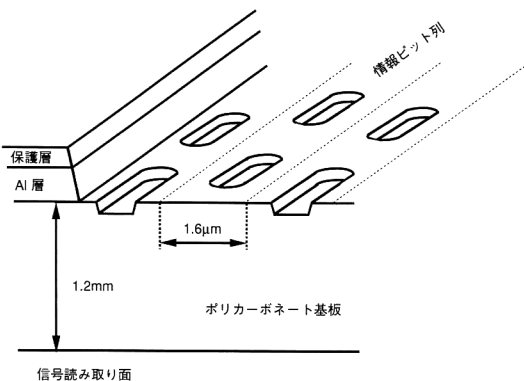


図1 光ディスク (CD) の断面図

2. 光ディスクとその要素技術^{1,2)}

ここでは光ディスク技術を構成しているいくつかの要素技術について、CDの例を用いて説明します。記述は、後続の章の理解の助けになることを目的として、簡単に行います。

2.1 光ディスク装置

図1に光ディスク (CD) の概略を示します。1.2 mm 厚の透明ポリカーボネート基板には、幅 0.5~0.8 μm 、深さ約 0.13 μm のピットと呼ばれる穴が 1.6 μm のピッチでスパイラル状に設けられています。この上に Al の反射膜が、さらにその上に保護膜が形成されています。光ディスク駆動装置は光ディスクを回転させながら、直径約 1 μm の微小レーザースポットを照射して情報を再生します。光学ピックアップは、戻り光に反映されるピットの凸凹を抛りどころに、レーザースポットの位置誤差を検出します。図2にはディスク駆動装置の概略を示します。制御系は、レーザースポットの位置誤差がゼロになるように各々の制御素子を動かして、スポットが常に情報ピットを追跡できるようにします。

2.2 媒体の量産技術

光ディスクのように、大容量の情報を安価に大量複製できるメディアは他にはありません。このような特徴がいかにして実現されるのか概観してみましょう。図3はCDを例にとった光ディスクの製造プロセスの説明図です。まず、表面研磨されたガラスにフォトリソをスピンコートして、レーザによって情報ピットを露光記録します。次に、レジスト面を現像して原盤ができあがります。原盤に Ni メッキをして、これは刺すとスタンパーができます。このスタンパーを用いてプラスチックを射出成型することによって、大量複製が行われるわけです。

2.3 光学技術³⁾

図4にCDの光学ピックアップの基本構成を示しますが、光学ピックアップは光学系と駆動系からなっています。光学系は半導体レーザー、レンズ、プリズム、波長板および光検出器等で構成されており、光スポットの位置誤差検出や RF 信号の検出を行います。駆動系は通称 2 軸アクチュエーターと呼ばれ、マグネット、コイル、支持部から構成されていて、ディスク盤面に対するレーザー光の相対位置を補正します。光学系に含まれるグレーティングによって、スポットを3個に分離して、3スポット法でトラッキングエラーを検出します。偏光ビームスプリッターは 1/4 波長板との組合せで、ディスクからの反射光がレーザーに戻らずに 100% 受光素子に入るように機能します。

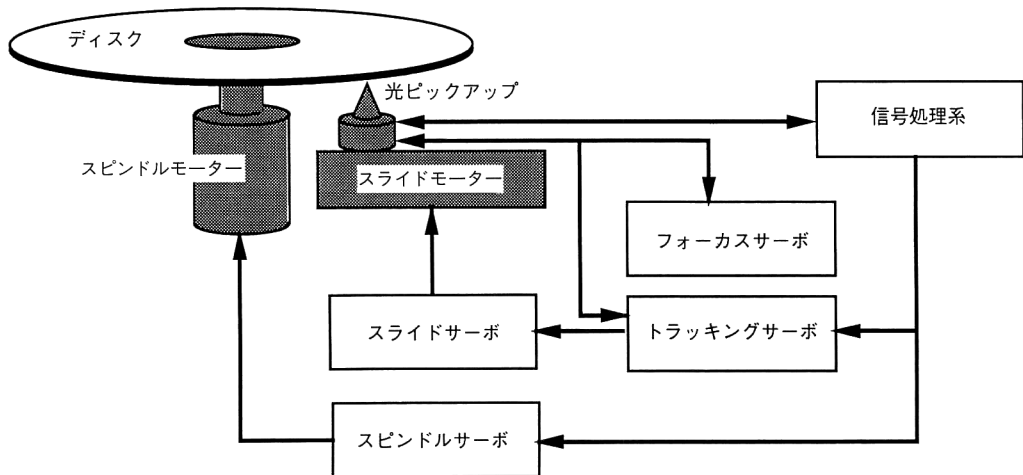


図2 光ディスク装置の概略図

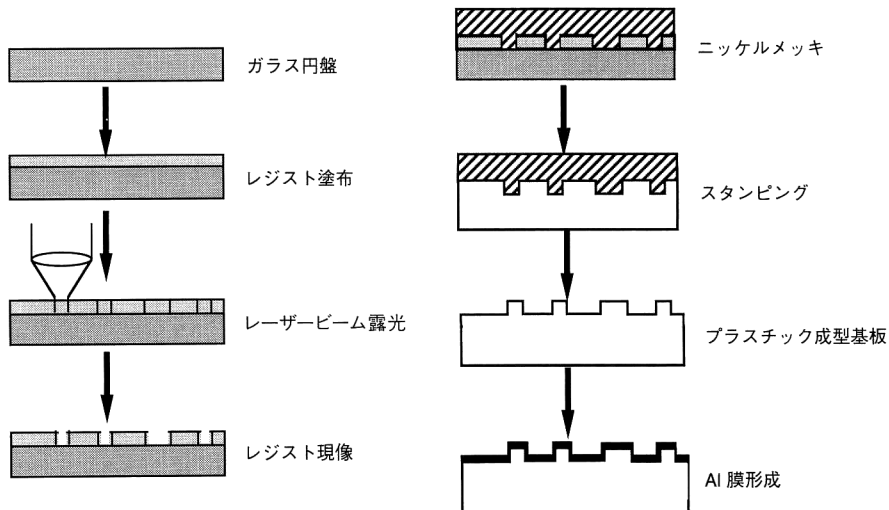


図3 光ディスクの製造工程

2.4 制御技術

ディスク上 $1.6 \mu\text{m}$ のピッチでスパイラルに並んだ情報ピット列を、およそ $1 \mu\text{m}$ に絞られたレーザースポットが正確に追跡するためには、いくつかの制御ループが必要になります。それらは、

- 1) フォーカスサーボ：レーザービームの焦点位置をディスクの情報記録面に保つ。
- 2) トラッキングサーボ：レーザービームの記録面内位置を情報ピット列上（トラック）に保つ。
- 3) スライドサーボ：レーザービームのディスク半径方向位置を制御する。
- 4) スピンドルサーボ：ディスクの回転数が所定の値になるようにモーターを制御する。

これらの他に、レーザーパワーを一定に保つ APC (automatic power control) や、ディスクの反りに追従してレーザービームを記録面に垂直に保つスキューサーボなどがあります。

2.5 信号・情報処理を中心とするドライブ技術⁴⁾

光ピックアップで検出された RF 信号は、増幅、等化された後 2 値化されます。また RF 信号から PLL (phase locked loop) によって再生されたクロック信号の周波数が、ディスク装置内蔵の基準周波数に一致するようにスピンドルサーボがかけられます。2 値化された再生信号は復調されて誤り訂正を施された後、D/A 変換されてアナログのオーディオ信号になります。

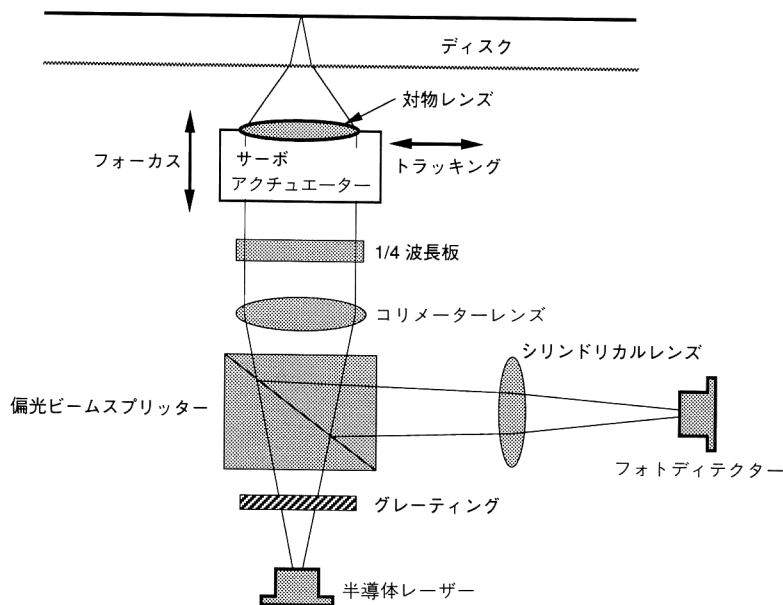


図4 光ピックアップの基本構成

3. LDの誕生 (1972~1982年)

3.1 光ビデオディスクの誕生

1970年代に各種ビデオディスクの技術発表が集中しました。その代表的な方式を表2に示します⁵⁻⁷⁾。その他にTED (Telefunken Decca), Thomson-CSF, Zenith, ソニー, 松下電器他が開発発表を行いました。すでに1963年にSRI (Stanford Research Institute)がビデオディスクの検討を行っていたようですが、1970~1980年がビデオディスクの黎明期といえます。

1970年6月TEDが発表したビデオディスクは、直径21 cm, 厚さ0.12 mmで、案内溝の中に凹凸で信号が

記録されたものでした⁸⁾。ダイヤモンド針が案内溝に沿ってトレースされ、この針に接着されたピエゾセラミックスにより針の振動が電気信号に変わります。その後このダイヤモンド針接触方式はCED (capacitance electronic disc) 方式, VHD (video high density disc system) 方式に継承されます。しかしこれらの2方式では静電容量変化を検出する再生方式が用いられました。これはディスクを電気的導体にしておき、針の電極と信号凹ピット間の距離変動による微小容量変化を電気信号として再生する方式です。

1972年にはフィリップス・MCAが光学方式を発表しまし

た。光ピックアップとディスクは非接触で両面60分の動画が再生できるようになり、静止、リバース、速送り等、ビデオディスクに求められる特殊再生が簡単に行うことができました。さらに、高画質の映像を再生するため、当時の放送用VTRと同じ、ダイレクトFM変調方式が採用されていました。

日本ではソニーとパイオニアが光学方式の優れた点と将来性に着目し、早い時期から開発を進めていました。この2社はプレイヤーのみでなく、ディスクの製造技術開発も同時に自社内で行い、光ディスクについて高い技術レベルと多くのノウハウを蓄積していました。両社がフィリップス・MCA方式に規格を合わせたことにより、

表2 ビデオディスク比較表 (代表例)

	フィリップス・MCA方式	ビクター方式	RCA方式
システム名	VLP (video long play)	VHD (video high density disc system)	CED (capacitance electronic disc)
ディスク再生方式	レーザー光学方式	ダイヤモンド針 溝なし方式	ダイヤモンド針 溝あり方式
記録方式	レーザー記録	レーザー記録	メカニカル記録 (電子ビーム記録)
信号検出	反射光強度変化	静電容量変化	静電容量変化
トラッキング	非接触光学検出	接触案内ピット電子検出	接触案内溝
ディスク回転数	CAV 1回転/1 TV フレーム CLV 665~1800 rpm	1回転/2 TV フレーム	1回転/4 TV フレーム
開発発表	1972年9月	1976年3月	1972年8月

その後光ディスクは大きく進展し、特にパイオニアは“レーザーディスク”の商品名で会社を挙げて市場の形成に努力し注目されました。ソニーは半導体レーザーがLED (light emitting diode) と同じように安くなると、当時としては非常に大胆な予言をしていましたが、現在その予言が現実のものとなり、感慨深いものがあります。

3.2 微細ピットの記録再生

光ディスクの技術開発は微細ピットの記録再生に始まり、その高密度化追求に向かいます。日本やアメリカの標準TV放送で使われるNTSC方式の場合、映像周波数帯域は4.5 MHzあります。これをFM変調してディスクに記録しようとする、高画質を保つためには8 MHz以上の中心周波数で変調する必要があります。特殊再生を行いやすくするために、1回転に1画面分の信号を記録することになると、1800 rpmで回転する30 cmディスクの最内周で1波長が約1.3 μm 、ピットはこの半分で約0.65 μm になります。またディスク1枚で1時間の絵を再生するためにはトラックピッチを1.7 μm 以下にする必要があります。同時代に開発されたVHS家庭用VTRは記録波長約1.32 μm 、トラックピッチ58 μm ですから、光ディスクはスタートからVTRの35倍の記録密度を達成していたこととなります。

このピットを読み出すためには、当時プレイヤーに搭載することができた小型He-Neガスレーザー(波長=6328 Å)を用いた場合、対物レンズのNA (numerical aperture) は0.33以上必要となります。実際には1.7 MHzのデビエーションとプリエンファシスのために最小ピットが20%くらい小さくなりますので、NAは0.4に設定されました。

次に要求されたのが高精度なフォーカス、トラッキングサーボ技術です。フォーカス誤差 $\pm 0.3 \mu\text{m}$ 以内、トラッキング誤差 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 以内に収めるため、フォーカス用デバイス、トラッキング用ガルバノミラー、両方を同時に追従する2軸デバイス等、ゼロからの開発が必要でした。サーボ性能は誤差信号次第といわれます。フォーカス・トラッキングの誤差信号検出のいろいろな方法が考え出されました。ソニーは後にDPP(差動push-pull)方式という優れたトラッキング方式を開発し、サーボコントロールの安定性を非常に高めることに成功しました⁹⁾。

3.3 再生画質の改善

次の課題は画質の改善でした。再生信号のC/N (carrier to noise ratio)、残留ジッター、ドロップアウ

ト等が再生映像に影響を与えます。C/N、ドロップアウトはディスクの製造工程の改善と記録条件の最適化によって時間とともに改善されました。

当初ダイレクトFM変調で記録再生した場合、残留ジッターが多すぎたため、カラーの再生がうまくできませんでした。現在ではデジタル信号処理で大変綺麗な映像が再生されていますが、当時はまだビデオ用A/D変換ICが数十万円もしていましたのでとても使えませんでした。このジッター改善はTBC (time base correction)として、ガルバノミラーによりレーザービームをディスクの回転方向に振る方法や、CCD (charge coupled device) 遅延素子で補正する方法で行われました。この他にカラーに強い変調方式もいろいろ検討されました。Crossband方式、buried subcarrier方式がその主な方式です。NTSC方式ではカラー信号が3.58 MHzでAM変調されて輝度信号に重畳されていますが、この3.58 MHzを700 kHzや1.5 MHzに下げて記録する方式です。この方式では再生で3.58 MHzに戻すとき、ジッターで生じた周波数変動をPLLにより取り除き、安定した色再生を実現します。

以上、光ビデオディスクの開発初期に蓄積された技術の中から一部について紹介しましたが、これらの技術が土台になって、CD、WO、MO等が誕生していきます。

4. CDの誕生 (1978~1982年)²⁾

ビデオディスクが市場に登場する前の1975年頃から、光ディスクの次なる可能性を求めての研究が始まりました。それが、映像とアナログ音声の代りにデジタルオーディオ信号を記録しようとするDAD (digital audio disc) です。すでにVTRに映像信号の形で記録再生する方式が開発されていたので、30 cmのディスクにFM変調で30分の記録をすることから実験を始めました。その後回転数の低減、FM変調からデジタル信号の直接記録が行われ、1977年10月には1時間、1978年には2.5時間の記録が可能となりました。その後も変調方式の改善などで、技術陣は30 cmディスクでどこまで長時間記録が可能か高密度化をひたすら追求していました。そこに、1979年の春フィリップスが線速度一定、直径11.5 cm、片面60分の再生が可能なディスクプレイヤーの発表をしました。取扱いや音質の点で不満のあったLPが、高音質の片手で扱えるデジタルオーディオディスクに代る。しかも非接触で針やディスクの磨耗もない。光とデジタル信号の組合せが、新しい記録メディアの誕生を予感させました。

4.1 共同開発と標準化

1979年6月からソニーとフィリップスとの間でCDの共同開発が開始されました。日本と欧州の技術者が相互に行き来しながら、Red Book¹⁰⁾と呼ばれるCD規格の項目を一つ一つ決めていきます。ディスクの材料、製法、光学的特性、信号検出法、サーボ特性、デジタル信号の変調方式や誤り訂正方式などを、時間的制約の下で理論的実験的裏付けをとってそれぞれの意見を主張します。どちらが「高密度化とシステムの信頼性」にとって優れているかを決めていくことは、それぞれの技術者にとってまさに真剣勝負でした。また、トラッキング方式のように両社の手法が異なる場合には、ディスクのコンパチビリティが確保されるように工夫しました。こうしてまとめられたCD方式が1980年6月にビクターの静電式AHD (audio high density) 方式などとともにDAD懇談会に提案されました。

標準化を進めていく上では、Red Bookに規定された信号特性の再現性をどう確保するかが問題となります。同じディスクでも各社のプレーヤー間で異なる値が計測されるからです。このため、通称「神様プレーヤー」と「神様ディスク」といわれる標準器が定められ、問題が生ずるたびごとに基準として利用されました。

4.2 ディスクプロセスの開発

ディスクの製造プロセスは信号をレジストに記録し、スタンパーと呼ばれる金型を作製するマスタリング工程と、ディスクを成形するスタンピング工程に分けられます。基本的な工程はビデオディスクでほぼ確立していましたが、CD実現のためにいくつかの技術開発が行われました。マスタリングではレジストに記録するためのマスターコードカッター (信号記録露光装置) が新規に開発されました。信号ピットを高密度に精度良く記録していくために、波長が442 nmの低雑音He-Cdレーザーやデジタル信号の変調に適した音響光学変調素子が導入され、トラックピッチ精度確保のために送り機構も改善されました。LPではノイマンの記録装置が用いられていましたが、CDの普及に伴って新しい光記録装置が主流となりました。1982年発売時に50タイトルのソフトがリリースされましたが、そのマスタリングは開発部門が担当し、成形プロセスも含めた条件出しに苦労したことを思い出します。

CDのディスク素材としては、ビデオディスクで用いられたアクリル材料の代りに、ポリカーボネートが用いられました。アクリルでは温湿度による変形が単板であるCD規格を満足できなかったからです。今では普通に

使われているポリカーボネート材料も、当時は射出成形法で複屈折の少ない円盤を作製することは非常に困難でした。材料の流動性を高めたり金型などの成形条件を工夫することにより、所定の特性のディスクメディアが作れるようになりました。

4.3 目標を定めた研究開発

CD開発のプロジェクトは、Red Bookで仕様を定め1982年10月1日に発売するという目標でスタートしました。前節でディスクプロセスの開発課題を簡単に述べましたが、光学系や信号系のシステムにとっても実用化のための技術課題が山積していました。半導体レーザーはまだ研究室レベルで1個20万円以上の価格でしたし、レンズは組レンズが使われていました。信号処理に必要なD/Aコンバーターも大変高価なICでした。

このようにCDプロジェクトは、広範な技術分野を巻き込み、きわめて困難な日程の中で商品化へ向けて、緊急体制で開発が進められました。この結果、後に光ディスクにとってキーエレメントとなる半導体レーザーやプラスチック非球面レンズの実用化が達成され、次世代につながる光ディスク技術の基本が確立されました。後から考えると、幸運な時代背景の恩恵を蒙っていたとはいえ、目標を定めて集中的に開発を行ったときに技術者が発揮する能力の高さに感嘆せざるを得ません。

4.4 CDの発展

発売後のCDの普及はめざましく、1987~1988年にはLPの売上を超越し、現在ではどの家庭でも手軽にCDを楽しめるようになりました。新しい光技術が短期間でこれほどまでに広く親しまれるようになったのは他に例がありません。オーディオの世界で始まったCD技術は、1985年にCD-ROM、1989年にCD-I (CD interruptive)、1987年に8 cm直径のCDシングルとして相次いで規格化され、コンピューターや電子ブックにも広く使われ、マルチメディア時代には欠かせないメディアになっています。

世界統一フォーマットを作り、光とデジタル技術を世に広めたこと、片手で扱える針のないレコードを実現したこと、将来の光ディスクの基礎技術を確立したこと等、CDが光技術の中で果たした役割はきわめて大きいといえます。CD後の光ディスクの技術開発は記録可能ディスクの実現を目指してさらに発展していきます。

5. WOからrewritableへ (~1994年)

5.1 記録可能な光ディスク (WO) の開発

CDの開発がたけなわの頃 (1980年前後)、次の目標

であるWOディスクの開発が始まりました。この当時、記録用光源である高出力半導体レーザーはまだ開発途上でありました。そこで記録材料の開発にあたり、記録感度を重視してTe系の低融点金属薄膜に的を絞りました¹¹⁾。具体的には、 Sb_2Se_3 、 Bi_3Te_2 の積層膜が記録感度と反射率変化量の点で有望でした¹²⁾。しかしこれらの膜は透過率が高く、密着張り合せ構造にすると接着剤の影響が再生反射光にノイズとなって現れ、S/Nが著しく低下しました。そこでこれに代るいくつかの記録材料の検討を行いました。信頼性を含めて商品化可能と思われるものが見いだせないまま、商品開発の期限が押し迫ってきました。そんなある日「 Sb_2Se_3 で Bi_3Te_2 をサンドイッチにしてみたらどうだろう」という案が出されました。早速試作を行って評価したところ、予想をはるかに上回るきわめて高いS/Nが得られました。さらに反射膜としてAl膜を加え、合金化モード4層構造WOディスクとして完成をみました(図5)。

一方CDやLDで採用された3スポット法というトラック方式は、記録時に後行サイドスポットが反射率変化の影響を受けるため、WOには適しません。そこで私どもは3スポット法と同じ光学系で3つのスポットを作り、サイドスポットをメインスポットに対してトラックピッチの半分だけ傾けて配置するDPP法を開発しました。DPPによって、より安定で高線速な記録再生が可能になりました⁹⁾。

以上の開発の成果として高S/Nでかつ高信頼性(記録済みの情報が100年間再生可能)なWOディスクの商品化に成功し、現在に至るまで、各種企業、学校、放送局等で文書、画像のファイリング媒体として利用され

ています。

5.2 消去可能な光ディスクの開発

記録可能な光ディスクとほぼ並行して消去可能な光ディスクの開発が進んでいました。記録方式としては、記録消去に際して物質移動を伴わない光磁気方式が繰返し使用の点で有望であると考えられました。特に、記録材料としてTeFeCo等のアモルファス希土類遷移金属薄膜が有力でした¹³⁾。光磁気ディスクの記録再生原理については専門の解説書¹⁴⁾に譲りますが、実用化のための課題は、基板の複屈折の改良と記録膜の保存安定性でした。

磁性膜および金属反射膜は腐食しやすい材料です。基板内の不純物が原因となって腐食が発生しますが、基板材料の選定や、磁性膜にCrを添加するなどの改良を行いました。また反射膜についても純Alを使用すると、マイグレーションに起因するピンホールが発生します。これに対しては、Ti、Cr等を微量添加することによって解決することができました。このような例も含めて種々の改良を重ね、保存寿命で20年以上の耐久性能を達成しました。

成型ポリカーボネート基板の複屈折は、時としてKerr回転角の数倍から数十倍の偏光面回転を起こし、信号を劣化させる原因となりました。これについては、成型条件を繰り返し改良し、基板の残留応力をうまくコントロールすることによって、信号品質上の問題はないレベルにまで達することができました。しかしその後、光学ピックアップの焦点検出に關係する問題がみつかりました。基板の厚み方向の屈折率異方性は、偏光面検波された戻り光の強度分布に影響します。この現象は、結晶光学でアイソジャイア¹⁵⁾としてよく知られています。

このアイソジャイアパターンが焦点検出用四分割フォトダイオード上に発生して焦点誤差信号にオフセットとして重畳され、焦点サーボが誤動作したのです。解決法として偏光面検波器を透過、反射するビームを各々独立に受光し、誤差信号を作って合成する方法をとりました。2つのフォトダイオード上ではアイソジャイアパター

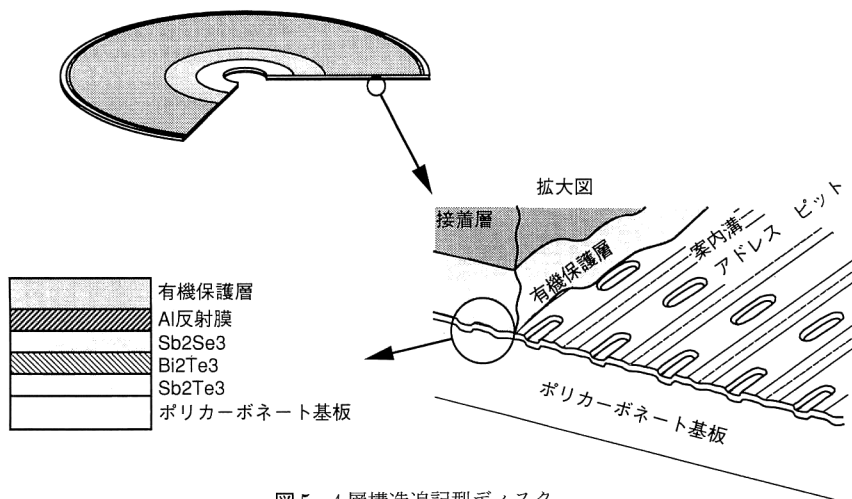


図5 4層構造追記型ディスク

ンがポジとネガの関係にあり、合成することによりそのパターン異方性が補償されます。この方式は、5.25 インチ光磁気ディスク用光学ピックアップで実用化されています。

5.3 ダイレクトオーバーライト光ディスク

次の2種類の書換え可能型光ディスクで、ダイレクトオーバーライト機能(上書き機能)が実用化されました。

- 1) 光磁気ディスク (磁界変調記録)
- 2) 相変化記録材料 (光変調記録)

磁界変調記録の課題は、高周波数帯の強い交流磁場を発生できる小型磁気ヘッドの開発と、ディスク記録膜の磁界感度向上でした。磁気ヘッドは、VTR やハードディスク等で培われたノウハウが生かされました。また記録磁性膜の外部磁界感度は、成膜後の酸化処理を行う方法が開発されそれまでの半分以下の外部磁界で記録可能となりました。その成果がMDに盛り込まれています。

相変化記録の基本的なアイディアは、1968年にECD (エナジーコンバージョンデバイス) 社より特許出願されています¹⁶⁾。この特許の内容は、半導体材料を使用してアモルファスと結晶の可逆変化を記録に利用するという非常にベーシックなものです。国内では1987年に松下電器より、現在実用化されているGeSbTe記録材料の発表があり¹⁷⁾、これを契機に各社で相変化記録ディスクの開発が盛んになりました。

急熱急冷によりアモルファスマークを記録し、固相結晶化によりマーク消去を行います。オーバーライトを1つのレーザースポットの光強度変調によって行うため、光磁気記録に必要な外部磁場が不要です。ただ開発当初、記録時の膜溶融に起因する繰返し記録耐久性や、粗大結晶成長による消残りの課題がありました。その後記録膜組成および膜構造の改良が進み、現在では実用上問題がないようです。

5.4 高密度化の試み

光ディスクの密度限界を決めているのは光学系のMTF (modulation transfer function) です。高密度化しようとするれば、レーザーの波長を短くするかNAを大きくするかして、このMTFを伸ばそうと考えるのが普通のアプローチです。実際1990年代に入り、SHG (second harmonic generation) を用いた短波長光源の開発が各社で盛んに行われました¹⁸⁾。と同時に、ソニーでは光磁気ディスクの特徴をうまく利用した「超解像」の開発による高密度化を目指したのです。読み出しスポットの中に複数の記録マークがあると、光学的な分解能を越えてしまっても再生することができません。そこで、

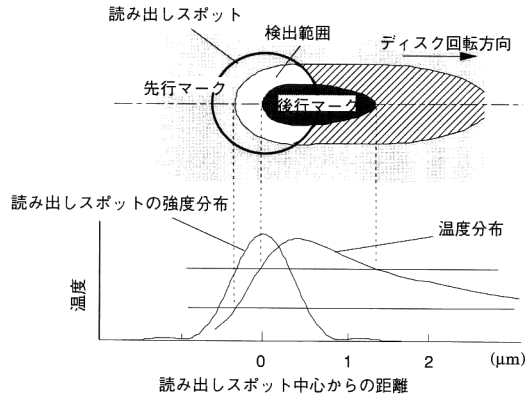


図6 IRISTER 読み出し

読み出しスポット自身が作り出す温度分布を利用して、スポット内の一部でのみマークが現れる機能を光磁気多層膜に付与すれば、「超解像」読み出し (iris thermal eclipse reading—アイリスター) が可能になるわけです。この機能により光スポットを実効的に小さくすることができ、光学系の遮断空間周波数 ($2NA/\lambda$) を超えた周波数応答を得ることができました¹⁹⁾。

読み出しスポット内の温度勾配は、スポットとディスクの相対運動に起因して、スポット後方にピークをもちます (図6)。当初まず、スポット内の低温領域で転写が保持され、高温領域で転写機能を失うタイプの開発に成功しました。これは光スポットの前半分でマークを再生するので、FAD (front aperture detection) と呼ばれています。図6でもわかるように、高温領域で再生すればトラックピッチを狭めることができます。そこで、FADとは逆の動作をする、高温領域でのみ転写機能が働くタイプRAD (rear aperture detection) の開発に着

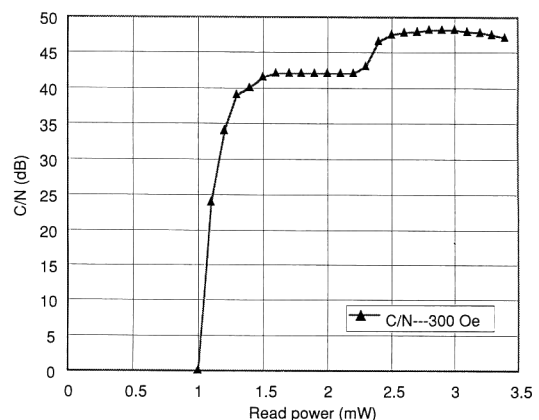


図7 RAD 再生

手しました。初めての試作ディスクに対する実験では、光学系の遮断空間周波数以上の信号を記録して、再生時にレーザー出力を徐々に上げながら信号レベルを測定しました。そのときのデータを図7に示します。レーザー出力の上昇に対して階段状の信号の変化が観測され、RADの動作を確認できました。微小な光スポットの中で、マークが現れて消えるという動作を安定に行うことができるとわかったときは大きな感動を覚えました(図7)。この超解像技術は現在では信号面上を非線形膜で覆った再生専用ディスク等にも応用され、実用化に向けて盛んに研究開発されております²⁰⁾。

6. 今後の動向

1980年代に次々と実用化された光ディスクは、この1990年代に入ってCD-ROM, MD等によって、新しい需要の開拓に乗り出しました。しかしながら、他の記録媒体との競争も激しく、特にメモリー装置としてみたときのパフォーマンスはhard disk driveに比べて必ずしも高いとはいえません。もちろん、光ディスクはメモリーとしての側面以外にも、ROMディスクに代表されるように情報の大量複製/伝達、さらには長期保存という機能を併せもっています。この点に着目すれば、特に書換え可能な光ディスクの市場拡大には、リムーバブル媒体でかつ、ROM互換という特長を活かした用途発掘が必要と考えられます。

また、CD, MDによりデジタルオーディオ信号の記録再生が容易となった今、次なる目標はデジタル化された動画データを扱うことでしょう。動画のデータ圧縮方法であるMPEG (moving picture image experts group) を用いてNTSC放送品質以上の画像を実現しようとする、4~6 Mbpsの転送速度が必要といわれています。仮に転送速度5 Mbpsで1時間記録しようとするれば、CDのサイズでも2 Gbit/inch²に近い記録密度を実現しなければならないこととなります(図8)。これは、ISO規格化作業が進められている4倍容量5.25インチMOフォーマットの約2倍に相当し、それを実用的なレベルまで高めることが当面の開発課題となっています。高品位な動画を記録再生できる十分なデータ容量と、先に述べた光ディスクの機能との融合によって様々なアプリケーションが創造され、新たな光ディスク世代の到来することが期待されます。以下、この高密度化に向けた重要技術の動向について概観します。

光ディスクシステムの課題を記録と再生に分けて考えますと、まず記録過程での課題は、種々の外乱による記

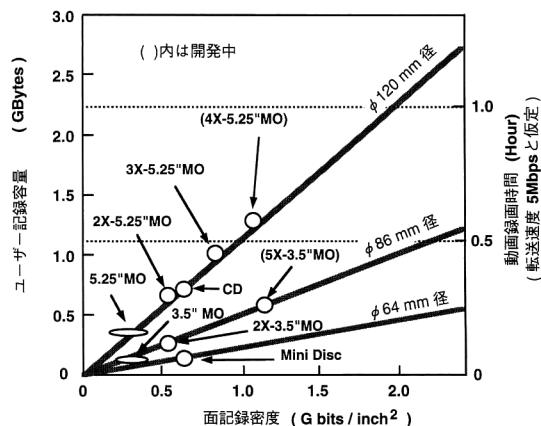


図8 面記録密度と動画記録時間

録条件の変動に対抗しながら、いかに理想的な形状のマークを書き込めるかという点に尽きます。光ディスクでは集光されたレーザー光の熱エネルギーを利用して記録することから、高密度化するほど記録膜中での熱拡散の影響が無視できなくなります。とりわけ、記録マークの長さを変調するマークエッジ記録方式では、熱的な干渉によるエッジ変動を極力抑制しなければなりません。ここでは、照射レーザー光の発光パターンを制御する記録補償、記録層における熱応答特性の最適設計が成否をにぎると思われます。一方、MDのような磁界変調記録方式では、マークの長さは記録磁界の反転間隔でほぼ決まりますから、マークエッジ方式に適した記録方法であり、熱拡散の限界を越えた線記録密度が実現できます。

次に、信号再生系での記録密度を情報理論の立場から考えてみましょう。白色雑音をもつ帯域 W [Hz] の通信路容量 C [bits/s] は次の式で与えられます。

$$C = W \log_2(1 + S/N) \quad [\text{bits/s}] \quad (1)$$

この定理を光ディスクの信号再生系に置き換えますと、信号帯域は再生光学系の遮断空間周波数とディスク線速度の積で表されます。また、 S/N は再生信号の信号対雑音比に相当し、この対数にほぼ比例して通信路容量、つまり再生可能な信号密度が増加することになります。C. E. Shannon の通信路符号化定理によって、この通信路容量に限りなく近づけられる符号化法の存在が保証されています。実際には白色雑音からのずれ、その他さまざまな外乱に対するマージン確保の必要性から、式(1)に近い密度を達成することは困難ではありますが、光ディスクの記録再生伝送路特性により適した符号化が模索されています。その中でもPRML (partial response maximum likelihood) と呼ばれるパーシャルレスポン

ス方式と最尤復号との組合せによる再生法が最近注目されています。これは従来衛星通信などの限られた分野で利用されていましたが、LSI (large scale integrated circuit) chip 上で最尤復号の Viterbi アルゴリズムを高速かつ手軽に処理できるようになり、光記録および磁気記録の領域にも積極的に応用されつつあります。

ところで、通信伝送路とは異なって、記録媒体の再生伝送系はダイナミックな変化を受けやすい特徴があります。具体的には、基板の傾きにより発生する収差の影響が大きく、適応型の光学的補正あるいは電気的な波形等価回路による改良も試みられています。これらの補償技術も今後必須なものとなるでしょう。

最後に、光源波長を短くすることは、帯域の拡大を意味し、直接的かつ有効な高密度化の手段となります。第一世代の光磁気ディスク用半導体レーザーは CD system と同様、780 nm 付近の発振波長をもつ GaAlAs 系材料が用いられました。同じ III-V 族化合物系半導体結晶で、670~690 nm の発振波長をもつ InGaAlP 系レーザーダイオードは 1985 年に室温連続発振に成功しました。以来、光ディスク再生用としてはすでに実用化され、光記録装置の開発でもこの赤色光源の利用が前提となっています。また、1991 年に II-IV 族化合物の ZnSe 系材料によって、初めて低温での発振が報告された blue-green レーザーは、現在、室温連続発振にも成功しており、光記録用光源として使われる日も近いと思われます。

ただし、光源を短波長化して思惑どおりの記録密度を得るには、少なくとも再生信号の S/N を現状維持しなければなりません。再生系の分解能が高くなる点を考慮すると、基板と記録媒体に起因するメディアノイズの大幅な抑制、光検出器等の周辺技術改良も不可欠なものとなるでしょう。

早ければ、1996 年末には 2.5~3 Gbit/inch² の面記録密度をもつ digital video disc が商品化されるでしょう。その 2~3 年後には同等な密度を有する書換え可能な光ディスクも登場すると予想されています。これらは動画の記録再生に留まらず、数 GByte の容量を武器に多様なコンピューターアプリケーションへの展開も期待されています。これまで磁気記録ディスクに比べれば緩やかな歩みではありましたが、ディスク開発の現場は“身を削りながら”記録密度を高めてきました。もちろん、これには周辺技術の進展の支えもありました。しかし、このあたりでもう一度研究開発レベルに立ち返って、基板、記録膜等の材料面、さらにはディスクの製造

方法も含めて見直す時期に来ているのではないのでしょうか。そして、それをさらなる飛躍の原動力として、光ディスクを来たるべき“マルチメディア”時代の主役媒体にまで育てていきたいと考えます。

なお本文をまとめるにあたって、五十嵐修一、大木裕、川久保伸、高橋宏雄、福本 敦、牧野 宏、そして山本真伸の各氏の協力をいただきました。開発当初から光ディスクのプロジェクトに加わった方々も含めて、ここに心から感謝の意を表します。

文 献

- 1) 尾上守夫監修：光ディスク技術 (ラジオ技術社, 1990).
- 2) 中島平太郎, ほか：図解 コンパクトディスク読本 (オーム社, 1982).
- 3) 宮岡千里：“光ディスクの中で活躍する物理”，日本物理学会誌, **44**, No. 3 (1980) 169-173.
- 4) 土井利忠, 伊賀 章：ディジタルオーディオ (ラジオ技術社).
- 5) P. W. Bogels: “System coding parameters, mechanics and electronics of the reflective video disc player,” IEEE Consumer Electronics Group, June, 1976.
- 6) 平田渥美：“VHD 方式ビデオディスク技術”，エレクトロニクス, 4~12月号 (1981).
- 7) J. K. Clemens: “Capacitive pickup and the buried subcarrier encoding system for the RCA video disc,” RCA Rev., **39** (1978) 33.
- 8) W. Bruck: “A color video-disc system,” J. SMPTE, **81** (1972) 303.
- 9) 大里 潔：“新しいトラッキングサーボ方式”，光メモリーシンポジウム '86 論文集 (1986) pp. 127-132.
- 10) Red Book (System Description Compact Disc Digital Audio, N.V. Philips and Sony Corporation), IEC908 (1982).
- 11) A. Huijser: “Optical recording,” Physica, **127**, B90 (1984).
- 12) 中根靖章, ほか：特開昭 60-28045.
- 13) N. Imamura and C. Ota: Jpn. J. Appl. Phys., **19** (1980) L731.
- 14) 松本光功, ほか：磁気記録工学 (共立出版, 1990) pp. 118-125.
- 15) M. Born and E. Wolf: *Principles of Optics* (Pergamon Press, New York, 1959).
- 16) S. R. Ovshinsky: USP 3530441 (1970).
- 17) N. Yamada, E. Ohno, N. Aihara, M. Takenaga and M. Takao: “High speed overwriteable phasechange optical disk materials,” Proc. ISOM, **61** (1987) pp. 61-66.
- 18) M. Oka and S. Kubota: “A shot noise-limited SHG green laser for higher density optical disks,” ISOM '91, Technical Digest, 1B-2 (1991) pp. 15-16.
- 19) K. Aratani, A. Fukumoto, M. Ohta, M. Kaneko and K. Watanabe: “Magnetically induced super resolution in novel magneto-optical disk,” Proc. SPIE, **1449**, Optical Data Storage (1991) 209-215.
- 20) M. Ono, K. Yasuda, A. Fukumoto and M. Kaneko: “A high density read-only optical disk system using super-resolution with an SHG green laser,” Technical Digest, SOM '94, Mo C1 (1994).