

コンパクトディスク(CD)の開発、実用化技術系統化調査

1

Systemized Survey on the Development and Practical Application of Compact Disc (CD) Technology

井橋 孝夫 Takao Ihashi

■ 要旨

技術史を俯瞰してみると、1970年代後半は、エジソンが「蝋管で再生音システム」を世に出してから100年目に当たり、新しい技術の勃興を待っていた時期であった。一方、デジタル通信技術を音声放送に利用する研究開発は、NHK技術研究所でスタートしていた。長い基礎研究の末、最初の試作デジタル録音機が一般公開されたのは1969年であり、「デジタルオーディオの夜明け」でもあったのである。この基礎研究の責任者は、当時のNHK放送科学基礎研究所長であった中島平太郎である。後に、中島はソニー(株)に招聘され、デジタルオーディオやCDの開発を進めるオーディオ事業の責任者になり、「CDの父」及び「CD-Rの父」と呼ばれる功績を残し、紫綬褒章にその名を刻んだのである。振り返って、当時は、デジタルオーディオの機運が広がっていたが、具体的に商品イメージを描いているメーカは皆無であった。そのようななか、オランダのフィリップス社がコンパクトディスクの原型となる試作機を持って来日したのは1979年3月の事であった。ソニーは大きな衝撃を受け、商品化を即座に決定して、フィリップスとの直接交渉等の俊敏な行動に移していき、翌年の6月までにコンパクトディスクの技術内容や商品コンセプトが煮詰められていった。この、ソニー/フィリップスが提案したコンパクトディスクシステムは、1981年4月にサルツブルグで音楽、レコード関係者に盛大に披露され、6月にはニューヨークで、10月には東京で発表された。商品化は、翌1982年秋からであったが、本格的な普及期を迎えたのは1985年以降である。一方、その10年も前から、デジタルオーディオの基礎技術開発は進み、マスター音源の確保・蓄積に大きな役割を果たしたのである。

本調査報告では、デジタルオーディオの黎明期の状況を中島平太郎の「次世代オーディオに挑む」や備忘録を参考にし、コンパクトディスクの誕生する経緯を、当時、ソニーの交渉団の一員であった水島昌洋の備忘録を参考にした。その技術の核になった光学技術やデジタル信号処理技術については、関係者の発表している論文、文献等を参考に記述した。その後、拡張を続けたCDファミリーの状況や、コンピュータとの親和性が良いCD-ROMが誕生して、民生用ゲームを含む広い応用の中で、「マルチメディアやインタラクティブ」の概念を確立して、実用化されていく状況についても記述した。一方、CD-ROMが登場すると、それを制作するために互換性のあるCD-Rの必要性が高まり、コピー商品に対する懸念はあったものの、急拡大して人類史上最大のCD-Rメディアが生産される実態についても記述した。最後に、CDによって引き起こされたと思われる文化的革命についても章を割いたが、この系統化調査は、学術論文ではなく、失われていく貴重な産業技術を記録に留めたものである。

ネットワーク全盛の現代社会においても、CD-DAはオーディオ配布メディアとして、未だに主役の座を演じている稀有なケースで、技術史から考えると、21世紀初頭には新しいメディアやシステムに取って代わられる運命であった。しかし、発売以来35年も経っているのに、CDに代わるメディアが出現してこない現実がある。CDの最大の理解者でありサポーターでもあった(故)カラヤンの鋭い視線の奥にどのような未来が映っていたのであろうか? 一方で、CDシステムは、20世紀最後の20年を駆け抜けた「風雲児」であった。幸運にも技術が市場と時代にマッチして、関連する巨大な産業群を作り史上最大のパッケージメディア・システムに育ったのである。その上で、そこで熟成された技術が、現代のネットワーク社会へ引き継がれた事は事実である。CDシステムは、概ねその使命を終えたが、難解な技術を産業レベルに構築した燦然と輝く技術史であったことを確認して要旨とする。

■ Abstract

Viewing the history of technology as a whole, the latter half of the 1970s had been one hundred years since Edison introduced a sound-reproducing system using a wax cylinder, and the world was awaiting the rise of a new technology. Meanwhile, NHK Science & Technology Research Laboratories had begun their research and development into using digital communication technology for audio broadcasting. After a long period of fundamental research, their first prototype of a digital recording device was presented to the public in 1969, heralding the dawn of digital audio. Heitaro Nakajima, then Director of NHK Broadcasting Science Research Laboratories, was the man responsible for this fundamental research. Nakajima later accepted an offer at Sony Corporation and became responsible for its audio business, developing digital audio and CD, achieving what led to him being called “the father of CD” and “the father of CD-R” and culminating in his name being engraved in a Medal of Honor with Purple Ribbon from the government of Japan. In retrospect, although the time was ripe for digital audio, no manufacturer had developed concrete product ideas. However, in March 1979, Philips, a company in The Netherlands, visited Japan with a prototype of what later became the compact disc. This made a great impact on Sony. It promptly agreed to negotiate directly with Philips and to commercialize the product, then followed this with agile action. The technical details and the product concept for the compact disc were determined by June of the following year. This compact disc system proposed by Sony and Philips was unveiled with ceremony to persons involved with music and recording at Salzburg in April 1981, followed by announcements in New York in June and in Tokyo in October. Commercialization began the following year, in the autumn of 1982, but its widespread adoption was in 1985 and beyond. On the other hand, the fundamental technology for digital audio had been in development for more than ten years, playing a large role in securing and storing master recordings.

The conditions at the dawn of digital audio in this survey report is based on *The Challenge for Next-Generation Audio* and memoranda by Heitaro Nakajima, and the sequence of events leading up to the birth of the compact disc is based on memoranda by Masahiro Mizushima, who was a member of Sony’s negotiation team at the time. Descriptions of optics and digital signal processing technologies forming the core of this technology are based on papers and documentation published by persons in the field. Also described are the CD “family” which followed and continued to grow, how the computer-friendly CD-ROM was born, and how the concepts of “multimedia” and “interactive” were established and came to be put to practical use across a broad scope of applications, including consumer games. Described, too, is how, once the CD-ROM (“read-only”) appeared on the scene, a compatible CD-R (“recordable”) became a necessity in order for consumers to create their own CDs, and, despite concerns about copyright violations, CD-R media production rapidly expanded, with the CD-R becoming the most mass-produced product in human history. Finally, a chapter is spent discussing the cultural revolution thought to have been triggered by the CD, however, this systemized survey is not an academic paper but a record of a valuable industrial technology on the decline.

Today, in which network reigns, CD-DA remains a rare case as it still plays the major role as an audio distribution medium. According to the history of technology, it had been destined to be replaced by new media or systems by the start of the 21st Century. However, the fact remains that, though 35 years have passed since its release, no medium has emerged to supplant the CD. What had the late Karajan, the one who had valued and supported the CD the most, seen in its future through his keen foresight? On the other hand, CD systems were heroes made by the times which sped fleetingly through the last 20 years of the 20th Century. They grew into the greatest packaged media system of all time as the technology was fortunate to match the market and the times, creating a large group of related industries. It is a fact that the technology which matured on this foundation was passed on to the current world of networks. CD systems have, for the large part, finished serving their purpose, but the brilliant history of its technology—formulating abstract technology to the level of industry—is affirmed to conclude this abstract.

■ Profile

井橋 孝夫 *Takao Ihashi*

国立科学博物館産業技術史資料情報センター主任調査員

1967年 埼玉大学工学部卒業
同年 ソニー（株）入社 中央研究所配属
1974～1988年 ディスク開発部門 研究統括
1988～1994年 オーディオビデオ事業部門
1994～1997年 マルチメディア推進部門 統括部長
1997～2002年 フォーマットセンター センター長
2002～2006年 (株) スタートラボ 代表取締役社長
2006年 ビフレステック（株）代表取締役社長
1989～1998年 オレンジフォーラム代表幹事
1999年 CDs21ソリューションズ代表幹事
1996～2001年 DVD FLLC（株）取締役

■ Contents

| | |
|-----------------------------|-----|
| 1. はじめに | 4 |
| 2. デジタルオーディオの黎明 | 7 |
| 3. CDの技術系統 | 19 |
| 4. ディスク製造方式の確立 | 40 |
| 5. CDファミリーの系統図 | 47 |
| 6. CD関連ビジネスの出現と規模 | 53 |
| 7. 記録型CDの登場 | 75 |
| 8. 光メディア寿命推定のISO規格の構築 | 91 |
| 9. CDがもたらした文化革命 | 95 |
| 10. おわりに | 100 |

1 | はじめに

コンパクトディスクは、ソニー（株）とフィリップス（株）（オランダ）のデファクトスタンダードである。1981年に発表されたコンパクト・ディスク・デジタルオーディオ（CD-DA）から始まったこの魅力的なシステムは、“素晴らしい音楽を、いつでも、だれにでも”をコンセプトに瞬く間に音楽産業を塗り替えて行った。丁度、エジソンが有名な蝋管から“メリーさんの羊”を再生してから100年目の1977年秋には、デジタルオーディオで新しい音楽の世界を創造すべきとの機運が高まってきて、ソニー（株）のみならず、三菱電機（株）/テアック（株）連合、日立製作所（株）/日本コロムビア（株）連合等で、技術的な提案や試作機の公開を開始していた。これを機会に“DAD（デジタルオーディオディスク）懇談会”が設立されデジタルオーディオディスクの標準化が議論されるようになったのである。1979年3月、フィリップスはコンパクトカセットの発展型として、当時、光ビデオディスク（VLP）の基本技術を応用したコンパクトディスクの原型を日本のメーカーに公開した。ソニーを除いた全てのメーカーは“Wait and See”の状態であった。しかし、ソニーは、元NHK基礎科学研究所長の中島平太郎（元ソニー常務、オーディオ事業本部長）がNHK時代に研究開発をしていたデジタルオーディオの系統的技術が温存されていて、開発が先行していた理由から、このコンセプトこそが新しい音楽コンテンツ配布に最適であると社内決断して、フィリップス社との間で急速に共同開発契約が結ばれた。1979年8月からアイントホーヘン（オランダ）と東京で隔月に会議を開催して技術詳細を詰めていった。詳細は後述するが、1980年夏ごろには、概略はまとめ“Philips and Sony agreed that contribution to modulation as well as error correction from Sony and Philips is equal”の有名な協同開発声明にサインして基本的な合意がなされた。音楽ソフト及びプレーヤの発売は1982年10月21日に決まり、ソニー（株）からはCDP101が発売され、音楽ソフトも数10タイトルが同時発売され、急激にコンパクトディスク時代が幕を開けることになったのである。

CDP101は価格が高価であったためか普及には程遠く、普及が加速されるのは、1984年に市場導入したポータブルCDプレーヤD-50が戦略価格の5万円以下で発売されたために爆発的な売れ行きを達成し、一挙に音楽ソフトが増加した。当時、音楽コンテンツ産業はLPレコードを中心としたビジネスであったが、販売枚数が1980

年を境に急減少している状況だった。ソニーはCBSソニー（株）、フィリップスはポリグラム（株）と世界を代表する音楽コンテンツ会社を傘下に持っている2社の危機感は大きく、早急にパラダイムシフトをせざるを得ない状況でもあったことが、コンパクトディスクデジタルオーディオの普及を技術投資のみならず、生産設備等のあらゆる分野で加速させた一因と考えている。第2章ではデジタルオーディオの黎明と題してCD-DA提案までの道程を記述し、デジタルオーディオの技術の系統化を記述し、どのような経路でCD-DAの基本技術が提案され、決定されてきたかを明らかにする。図1-1に日本におけるアナログレコード生産枚数を日本レコード協会資料から示したが、生産数量は1980年と比較して急激な減少が確認できる。図1-2に1981年4月、ザルツブルグで正式な音楽関係者へのコンパクトディスクお披露目会に、デジタルオーディオに造詣が深く、最大の協力者であったウィーンフィルのカラヤンが、ソニー/フィリップス両社の試作プレーヤを前に、当時ソニー会長の盛田昭夫氏とCD-DA再生を楽しんでいる貴重な写真を添付した。この写真のソニーの小型試作プレーヤは、筆者が設計プロジェクトを任されて完成した一機種である。

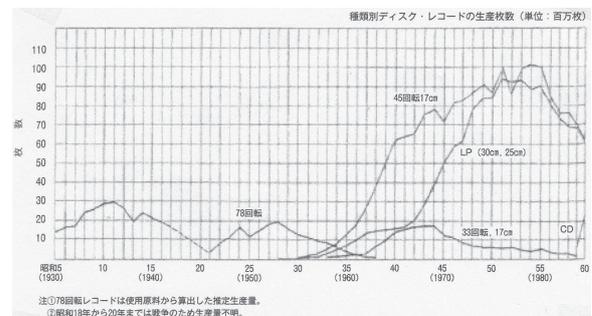


図1-1 アナログレコードの生産数量と生産金額の推移（日本/年間）
日本レコード協会資料より抜粋



図1-2 ザルツブルグでのCD発表会（オーストリア1981.4.15）

CDの技術系統化の中で、特徴的な、外形、デジタル信号処理、エラー訂正等の仕様は、CD-DA規格書として「レッドブック」と名づけられた。主要技術項目に関しては、ソニー/フィリップスの交渉過程を踏まえ、第3章でその詳細を記述し、第4章では、音楽コンテンツ配布の鍵を握っていたCDディスクの製造方式について記述する。

その後、CDは、急速に応用範囲を拡大して、1985年頃から、コンピュータとの親和性を取るためにCD-ROM規格が発表された。このCD-ROM規格書は「イエローブック」と名づけられた。このCD-ROMフォーマットを最も活用したのが、マイクロソフト(株)で、自社のPC(パーソナルコンピュータ)の取説から、アプリソフトまでCD-ROMで配布したのである。この状況が、他社にも広がりコンピュータの外部記録媒体の主役を占め、コンピュータ(PC)の進化、普及に合わせて、家庭用ゲーム機にまでCD-ROMが採用されるようになった。圧倒的な数のハードデバイス及び配布メディアが市場に投入されるようになり、それに伴い、ハードデバイスのコストは急速に下がり、ソフトウェアも安価になり、普及に拍車がかかったのである。

CD-ROMの出現のように、色々なCDファミリーが1986~7年を境に出現してきた。CDファミリーの系統図として、第5章にその背景を含めて記述した。一方、第6章には、CD関連ビジネスの出現と規模と題して、据え置き型CD-DAプレーヤのビジネスやCDを世に知らしめたCDウオークマン関連技術及び巨大なビジネスを形成したCD-ROM関連技術の実態について記述する。

その中で最も重要な、CD-DA/CD-ROMと再生互換が取れるコンパクトディスクレコーダブル(CD-R)については、リライタブルのCD-RWを含めて第7章に記述する。このCD-Rは、1989年に提案され、ソニー(株)フィリップス(株)に加えて、記録膜の特許をもつ太陽誘電(株)を内在させた記録型CDフォーマットで、「オレンジブック」と名づけられた。しかし、すべてのCD-DA/CD-ROMと再生互換をとることは、CD規格で信号の反射率が70%以上の規定しかなかったために、各社各様の記録材料の記録膜特性があることから、大きな懸案事項になったのである。唯一の解決方法は記録メディアにID番号を付け、ドライブがそのIDを読み取って最適な記録を行うメディア・アイデンティフィケーション・メソッドシステムを公開して厳密に管理する事であった。オレ

ンジブックになぞらえてオレンジフォーラム(任意業界団体)を結成してこのルールを守るための管理、指導をして、この危機を乗り越えたのである。今でも、各社のID番号は厳格に守られてドライブシステムと連動している。この試みは、業界として初めてのケースだったが、その後のDVD/BDでも同じようなシステムを取り入れているので、その先駆的役割を果たしたものと自負している。

CD-Rは、発表されると約1GB弱の記録容量の扱いやすさと、同期してコンピュータの外部記録媒体としての用途に拍車がかかり、殆どのPCは、CD-R/CD-ROMの記録再生ドライブを繋ぐ又は内蔵するようになっていったのである。最盛期には、ドライブはPCと同じ台数(約2億台/年)が出荷される状態まで発展し、CD-Rは、記録メディアとして、人類史上最多の約100億枚/年を突破する生産規模にまで成長した。各種データのやり取りから、写真や教育データの保存や配布、医療データの配布まで、産業としては2002年頃まで最盛期を迎えたのである。しかし、深刻な状況は、日本での生産は総量の10%程度で、その他はアジア圏が50%以上を占めるようになると、価格競争に拍車がかかり、その結果“安かろう悪かろう”のノンライセンス商品が市場に蔓延し、記録型光ディスクの信頼性が地に落ちたことである。業界としても、名誉挽回に努め、水際の輸入禁止や販売店の指導等を地道に行なった。しかし、自ら生産した高性能光ディスクに“歩留り”の概念のない海外の非合法生産者が、日本からの中古製造機械を輸入して、軒先で“CD-Rもどき”を作るバイタリティーには、驚きを超えて産業の先行きを真剣に懸念させられたのである。この状況が、第8章で記述するRメディアの寿命推定ISO規格の創設に発展することになり、安定したR記録ディスクの市場を形成することに繋がっていった。CD-R/RWは、2005~6年頃を境にして、半導体メモリーの高密度化やネット環境の向上によって、主役の座を明け渡すことになったが、今尚、根強い需要があり、最盛期の1/3程度の規模で色々な分野で活用されている。

コンパクトディスクは、再生デバイス機器、記録再生デバイス機器のみならず、その特殊な形状(直径120mm、厚さ1.2mm)の中に、約1GB弱もの情報を内在することができる記録媒体である。記録密度は1980年代初頭の半導体のリゾグラフと同等であり、プラスチックの上に、半導体のパターンを描くような技術を要求され、既存のレコード産業とは一線を画し

ていた。すべての生産はクリーンルーム内で行われ、生産設備に対する仕様も半導体生産と同じレベルにあった。生産機械はスタート時、手探りの状態だったが、一連のシステムの完成までは膨大な時間がかかった。しかし、CD-DA から CD-ROM を経て、CD-R の巨大な市場に対処するため約 1 億枚 / 月の生産ラインは、プレスから成膜、アニーリング、パッケージまで全自動で 24 時間生産の巨大な装置産業群を構成した

のである。

最後に、コンパクトディスクがこの 30 年にわたり、市場に導入され、人々の生活に浸透してきたことは紛れもない事実である。色々な思惑が交差する中で、CD が起こした文化革命と題してインタラクティブ文化やマルチメディア概念がネットワーク技術の基礎を作り、現代に繋がっていく状況について、第 9 章で持論を展開した。

カラヤンに怒られる？

1977 年秋、ベルリンフィルの公演で来日していたカラヤン氏が、合間をぬってソニー社長の盛田氏宅を訪問することになった。盛田は何か特別の趣向でカラヤンを歓迎したいとの意向があったので、デジタル録音を聞かせようということになった。技研所長であった中島平太郎に命じ、PCM1600 でデジタル録音してあったある音楽を聴いてもらう準備を周到にして当日を迎えた。

音楽が流れだすにつれて、マエストロの顔は、ムツとしたように不機嫌になっていった。耳に飛び込んでくるのが、つい少し前に自分が指揮した「トロヴァトーレ」の練習をしている光景が生々しく聞こえる音だったのである。ところどころに、オーケストラのメンバーを叱ったり、タクト台を激しく叩くところもあって、リアルで迫力満点であった。しかし芸術家にとって練習は恥部のようなものであり、そのことに血相をかえたのである。曲の途中で怒り出したカラヤンに、「練習を黙ってデジタル録音したこと、そして断りもなく流してしまった非礼の限りを平謝りに謝った」と中島は回顧している。

真相は、その年の夏休み前、ロンドンにある著名なレコード会社である EMI 社の録音スタジオにソニーのスタッフがデジタル録音システム (PCM1600 等) を持ち込んでいたところ、EMI のエンジニアから、次の週にザルツブルグでカラヤン指揮でオーケストラを取録するから、同じマイクでアナログのマスターテープと PCM1600 を並列に接続して、同一条件で比較テストをしてみないかと誘われたのである。願ってもない話なので、快諾してこっそりデジタル録音してしまった訳だが、いずれにしても盗み録りをしたのだから、怒られて当たり前であった。試作したデジタル録音機の音質テストをしたいばかりにやったことで他意はないとの釈明を聞いていたマエストロは次第に流れる音に耳をそばだて、驚きの表情をみせるようになっていた。

カラヤンは不機嫌な顔をしながらも、次第に「デジタルとは何だ」「どういう理屈か」などの質問をするようになり、やがて、初めて苦笑して「これは、全く新しい音だ。将来を聞く音だ」と称賛してくれるように変わったのである。ついには、「この録音システムを自分の仕事場に設置したい」とまで言い出し、盛田は快諾した。その後帰国したマエストロを追いかけ、中島は御礼方々手紙を描いた。その中で「技術というものは絶えず進歩する。どこまでも良い音を求めて研究開発をするのが私どもの性。立場は違うかもしれませんが、良い音を求めるという意味で、そのことは理解して頂けると幸いです」と記述したと回顧している。その後、この巨匠は、何かとデジタルオーディオの技術をバックアップしてくれて、最大の理解者及びエバンジャライザーとして CD 普及に尽力してくれることになる。

2 | デジタルオーディオの黎明

2.1 デジタルオーディオの研究

20世紀のオーディオの歴史は、より良い音を求めてきた歴史でもある。スタジオやホールで生演奏された音楽を収録して放送されるまでの放送システムも、1930年代の中波放送から1960年代にはFM放送やFMステレオ放送に進化して、1990年代にはPCM音楽放送が開始されて、現在は高音質なNet配信の時代になっている。録音は、電気増幅の記録から1960年代はテープレコーダの時代へ進化し、1980年代はDAT (Digital Audio Tape) の各種システムが登場してきた。一方レコードは、蝋管から円盤型のSPレコードに移行して、1950年代にLP (Long Play) レコードが登場してCD-DAディスクが登場するまで主役の座を占めていた。その意味では1970年代はデジタルオーディオの黎明期であり、その技術が開花するのは1980年代であり、その先駆けになった商品がCD-DAシステムであったのは、明白な事実である。図2-1-1に1920年ごろから2000年頃までの收音、放送、レコードの相関図を示した。図2-1-2にはCDが出現するまでのSP、LPレコード再生機の一例を挙げた。デジタルオーディオにたどり着く前までの技術系統化調査については、穴澤健明による「アナログレコード技術の系統化報告」(Vol. 21) に詳細が報告されているので、参照されたい。

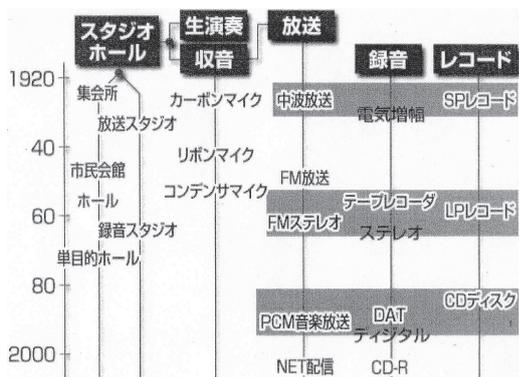


図 2-1-1 收音 放送 レコード相関図

元ソニー常務の中島平太郎の備忘録でもある著書「次世代オーディオに挑む」によると、生々しいデジタルオーディオの黎明期の記録が残っている。デジタルオーディオの研究は、中島が務めていたNHK技術研究所の音響研究部で開始された。FM放送の音質向

SPレコードプレーヤ

30cmφ SPレコード



ステレオLPプレーヤ

30cmφ ビニール盤



図 2-1-2 SP・LPレコードプレーヤ

上に腐心していた中島は1963年11月23日、日米テレビ宇宙中継にショックをうけ(放送はケネディ大統領暗殺事件)、この偉業がデジタル通信技術によってもたらされたことに感銘をうけ、デジタル化を音声放送の中で如何に応用できるかの勉強を開始したことに端を発している。FMステレオ放送の音の劣化は、主力として使われているテープレコーダに一因があると指摘されていた。そこで、キーテクノロジーの革新が必須との意見が出て、テープレコーダシステムをデジタル化してみようとの方向で動き始めた。当時はデジタル化とは、信号をPCM化(Pulse Code Modulation)するという意味合いがあり、通信の世界では、先行して用いられていた技術であった。PCM録音に使われる周波数帯域は1~2MHzであるから、ビデオレコーダが使えるとの予測で、この無謀なデジタルオーディオプロジェクトは動き出してしまった。しかし、FM放送の音質改善のためのデジタル・オーディオ・テープレコーダの研究は、当時の常識であるデジタル技術は宇宙通信や電話などの伝送系に利用される技術であって、高品位のオーディオ技術とは無縁であるとの見方が一般的で、技術研究所の中

では傍流以外のなにものでもなかった。それでも、プロジェクトの最初の提案者である林謙二及び研究者達の寝食を忘れた努力により、1966年になってバラックモデルの試作機が完成し、曲がりなりにもデジタル音声を再生できたと記録されている。図2-1-3に当時のNHK技術研究所で改良を重ね試作したステレオ仕様のPCM試作2号機の写真を添付した。

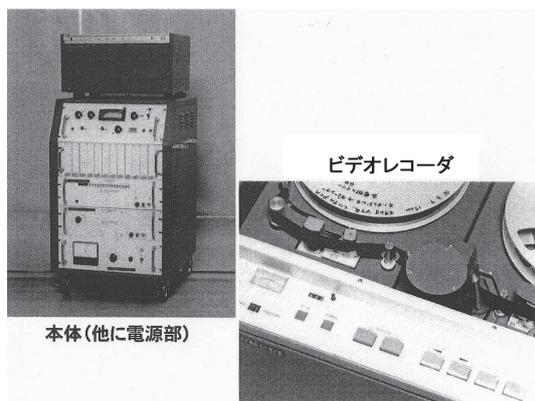


図2-1-3 NHK PCM 試作機（ステレオ）

1969年5月、NHK技術研究所公開日にPCM試作2号機は一般公開され、そこで再生された音楽はリムスキー・コルサコフの歌劇「金鶏」であった。前夜から調整に明け暮れていた研究者は、再生された鶏のトキの声に感涙し、その音質の良さは、一般の来訪者も魅了し大成功に終わった。“世界初のデジタル音”は、デジタルオーディオの夜明けであり、来るべきデジタルオーディオの世界を予言していると思われた。しかし、その後、中島の放送科学基礎研究所への移動や、カラー映像技術が中心となる音響技術の位置変化の中で、NHK技術研究所でのデジタルオーディオ技術開発の使命は終わり、関わった研究者は新たな天地での活躍の場を求めることになる。ここで培ったPCM技術は、関わった研究者と共に民間に引き継がれることになり、1972年頃から、音楽の収録分野でデジタルオーディオテープレコーダは実用化の段階を迎えた。CD-DAの発売の約10年前から、デジタルオーディオの収録での技術開発が脈々と実用化に向けて改良に改良を重ねて、収録の現場で活躍されていた事実は、改めてこの分野の技術開発が、日本人の適正に合致していたものと感心させられる。事実、デジタル録音した音楽は、日本コロムビア（株）から高音質LPレコードとして発売され、「DENON PCM デジタルレコード」として一世を風靡し評価された。この状況は前述した穴澤のアナログレコード技術の系統化調査に詳細が報告されている。

一方、中島平太郎はNHK放送科学基礎技術研究所長

を経て、1971年にソニー（株）に招聘されることになり、新設された技術研究所の所長として赴任した。オーディオ事業本部長も兼務したため、ソニー（株）のオーディオ分野は開発から事業までを中島の責任で運営されることとなった。しかし、当時のソニーは、業務用U-Maticや家庭用VTR事業に集中投資がなされ、デジタル技術には見向きもしない風潮があったのである。このような状況の中でも、1973年頃から、デジタルオーディオの開発がNHK時代の研究を基礎にしてソニー技術研究所で提案されていった。まず、中島が提案したのは、テープ巾2インチ、56個もの固定磁気ヘッド、テープスピード76センチ/秒、重量約300Kgものレコーダメカ部分と、別の筐体にPCMデジタルオーディオアダプターを持つシステムであった。

常識的には、連続した音声波形を直接記録するアナログテープレコーダの周波数帯域はせいぜい0.2MHz程度であるが、高品位のデジタルオーディオでは数百万ビット/秒即ち数MHz/秒が必要である。この課題を解決したのが、皮肉にもソニーが最も力を入れて事業化を推進しているビデオレコーダ業務用U-Maticと家庭用β-Maxであった。映像信号を扱うわけだから、数Mビットのパルス信号の記録は充分その仕様に入る。莫大な投資コストがかかるメカ部分を市場導入されるVCR（Video・Cassette・Recorder）を改良することにより安定供給できれば、開発はプロセッサ部のPCMデジタルオーディオアダプターに集中させれば良く、実現の可能性は一挙に高まって行ったのである。普段はTV番組の記録再生に使っているVCRが、プロセッサを付加することにより、デジタル・オーディオ・テープレコーダへと機能アップして、急成長を遂げている家庭用VCRの魅力的なフィーチャーの訴求に繋がるのではないかとの思惑も内在していたのであった。こうしてPCMデジタル・オーディオ・アダプターには2系列が生まれ、前述の家庭用VCR“β-Max”と組み合わせたPCM-1、もう一つは、業務用VCR“U-Matic”と組み合わせたPCM-1600である。図2-1-4にPCM-1と業務用U-Maticと組み合わせPCM-1600の写真を掲載した。

PCMアダプター、特にPCM1600の歴史的価値は極めて大きい。当時のアナログ用録音設備及びハードウェアしか無かった時代に、プロ用途とは言えデジタルオーディオレコーディングシステムPCM1600がソニーよりリリースされた衝撃は大きかった。これによりマスターテープのデジタル記録が可能になり、収録から編集、カッティングまですべてのプロセスをデジ



図 2-1-4 ソニーPCM-1 と PCM1600

タルで一貫するシステムの先駆けになったのである。又、膨大なアナログテープのデジタル化が急ピッチで始まり、新たな付加価値が与えられたこともデジタルシステム導入の追い風になった。以降、PCM1600は進化を重ね、1610、1620、1630が市場導入されて、CD-DA制作を支える大きな力となったことは事実である。

2.2 デジタルオーディオの原点

PCMアダプターの基本はサンプリング周波数である。これはCD-DAのサンプリング周波数と量子化ビット数にも大きな役割を果たした。このサンプリング周波数は44.1kHzで、アナログVCRから割り出された最適値である。これは、そのままスタジオのデジタルレコーディング規格で継承されることになり、後述するCD-DAのサンプリング周波数に発展していくことになる。その後、登場するマルチチャンネルレコーダにも採用されて、デジタルオーディオの基本的なサンプリング周波数となった。実用化の段階では、47.25kHzもあるが、収録、編集、マスター制作等のマスタリング分野では殆どが44.1kHzで処理されている。

後述するCD-DAの量子化ビット数は、14ビットか16ビットで商品形態を巡り大きな議論に発展するが、デジタルオーディオレコーダの初期である1971年ごろまでは、12ビット非直線であり、日本コロムビア(株)によるPCMデジタル録音の実用化の1972年頃は、13ビットを採用している。その後14ビットが検討されて、1979年頃、最終的に、プロフェッショナル

用途の観点からと技術的に可能なら「エンドユーザーにもプロと同じ最高の音質を届けたい」とのエンジニア魂の賜物で、16ビットが採用されたのである。その意味では、CD-DAが誕生する10年も前から、デジタルオーディオの録音の環境が整備されてきたことになり、CD-DAの登場は、導入タイミングに関しては、ベストな選択であったと言えよう。記録によれば、最初のデジタル録音は、1972年4月、折から来日中の、チェコの至宝“スメタナ弦楽四重奏団”を青山タワーホールに呼んでのモーツァルト弦楽四重奏曲第15番ニ単調KV421と第17番変ロ長調KV458「狩」の演奏であった。この録音は、後日演奏者による修正が依頼され、プラハで部分的な再録音が施され、1982年の第一回CD発売に合わせてリリースされた。奇しくもデジタルの最初の録音もCDの発売もモーツァルト弦楽四重奏となったのである。

もう一つPCMアダプターの果たした大きな役割は、光学式オーディオ専用デジタルディスク、即ちCDの実用化に多大な貢献を果たしたことである。1970年代の中頃は、家庭用のVCR(VHS、 β -max)がTV録画用のタイムシフト用途から映像の配布メディアとしての脚光浴び始めた時期でもあった。当然、ハリウッドに代表されるコンテンツホルダーは、レコードの様な配布メディアであるビデオディスクを要望してきた。それに対応して、世界の家電メーカーは技術的可能性を提示した。1977年、当時提案されたビデオディスクの概念は表2-2-1にまとめて示した。この中でフィリップスから提案され、VLP(Video Long Play)として市場導入された光学式ビデオディスク、巨艦RCA(株)が社運をかけて開発していた静電方式のCED、Telefunken(株)から提案された機械式のTEDなどの方式が未来技術として粗上に乗っていた。

表 2-2-1 ビデオディスク方式の比較 (1977)

| 信号検出方式 | 光方式 | 静電式 | 機械式 | |
|------------|---------------------|----------------------|--------------------|-------------------|
| 開発者-型名 | Philips-VLP | RCA-CED | Telefunken-TED | |
| カットティング | フォトレジスト (レーザー利用) | フォトレジスト (レーザー利用) | メカニカル (LPと同じ) | |
| ディスク | 材料 | 透明プラスチック (蒸着工程必要) | 導電プラスチック (歩留り?) | プラスチック (LPと同じ) |
| | 信号面 | 表面より1mm奥 (キャティ不要) | 表面 (キャティ必要) | 表面 (キャティ必要) |
| 信号の 読出し | センサー | レーザー反射光 | 電極付再生針 | 再生針→圧電素子 |
| | センサーと ディスクの関係 | 非接触 | 接触 | 接触 |
| コストプッシュの要因 | 光ビッカアップ? | ディスク? | 無し | |

光学式ビデオディスクは非接触で信号を読み取る方式で、他の接触式信号検出とは一線を画した技術であった。PCMアダプターからの信号は、VCRに記

録することを基本にしていたから、FM 変調で記録された。しかしソニーでの実験では、残念ながらまともなデジタル音声は再生できなかつたし、当然、エラー訂正の確認をしても完成度は低かつた。これらの実験から、ソニーが理解したのは、PCM アダプターからの信号はダイレクト記録方式を採用しなければならない事、及びエラー訂正能力を高め、未開の分野であるデジタルオーディオディスク専用の信号処理方式を開発することの2点であった。このダイレクト記録こそが光学式ビデオディスクの技術を活用する唯一の方式であったからで、これが後述する CD-DA の世界に繋がったのである。

PCM-1 が発売された 1977 年頃は、家庭用 VCR のシェア戦争に突入し始めた頃で、加えて世界最大のエレクトロニクスメーカーであった RCA は社運をかけて、ビデオディスク開発にのめり込んでいった時代でもあった。まさに、映像メディアビジネスが始まろうとしている前夜であり、ほとんどのメーカーは映像配布メディアとしてのビデオディスク市場の将来性を信じ、ビデオディスクとデジタルオーディオディスクの共用化で、その規格や商品化を考えており、オーディオ専用のデジタルディスクに舵を切るメーカーは皆無であった。1977 年秋の全日本オーディオフェアで、最先端機器が公開展示された中で、ソニー、日立/日本コロニア Gp、三菱電機/テアック/東京電化 Gp がデジタルオーディオディスクプレーヤの試作機を公開した。ソニーは、デジタルオーディオ専用機、他の 2Gp はビデオディスクとの互換性を意識したプロトタイプであったのは、当時の風向きを端的に表している。

この時の雰囲気は、デジタルオーディオという新風が吹き始めていたのは明確で、新しい技術が一斉に芽吹き始めたのも事実であった。翌 1978 年国内メーカ 15 社を中心にデジタルオーディオディスクの標準化を話し合う DAD (Digital Audio Disc) 懇談会が設立されたのである。約 2 年半の活動で 50 社が参加し 100 回もの会議を持ったにもかかわらず、最終的には他の複数の方式とともに、CD をデジタルオーディオの方式として推挙して解散した。結果的には、CD の仕様及びその作成には、DAD 懇談会は一切関与していない。又、デジタルオーディオ仕様の一本化も提言されていないが、DAD 懇談会の活動は、民間主導の世界に門戸が開かれた初めての標準化活動であったのである。

2.3 CD 発想提案

中島率いるソニー技術研究所では、その頃オーディオ信号のダイレクト記録の改善及びエラー訂正等の技術改善に没頭していた。その技術は記録密度の飛躍的向上にも役立ち、長時間記録の方向かまたは外形の小型化が話題になっていた。ちなみに、1978 年のオーディオフェアでは、30cm の外形に 2 時間のデジタル音声を記録した試作システムを展示している。又、翌年の 1979 年には、同じ外形で 13 時間を超える記録密度を可能にしたと発表している。記録密度向上の歩みは、当時の研究の成果でもあったのである。図 2-3-1 に 1976 年から 1979 年までの記録密度向上の基本技術の進歩をまとめてみた。当初 FM 記録で 30 分しか記録できなかった外径 30cm に 3 年後は 13 時間ものダイレクト記録が可能になった状況は、エンジニアの着想と努力以外の何物でもなかつたのである。図 2-3-2 に 1978 年にソニーが発表した光学式 30 センチ DAD 試作機 (13 時間再生機) の外観写真を示した。しかし、10 時間を超える収録時間は、業務用途としてなら考えられるが、家庭用には非現実との意見が多かつた。当然だが、この 30 センチの器をどのように製品化に結び付けていくかについての明確な答えはなかつた。

| | 回転数 | 変調方式 | 演奏時間 | 波形/符号 |
|----------|---------|---------------------------------|-------------|-------|
| 1976年 | 1800rpm | FM変調 ピテオフォーマット | 30分(片面) | |
| 1977年9月 | 900rpm | 直接記録 Delay Modulation | 1時間(片面) | |
| 1978年10月 | 450rpm | 直接記録 Run Length Limited Code | 2時間30分(片面) | |
| 1979年6月 | 64rpm | 直接記録 HDM-1 | 13時間20分(片面) | |

図 2-3-1 ソニーPCM オーディオディスク記録密度向上の歩み



図 2-3-2 ソニー光学式 30 センチ DAD 試作機

1979年、CD開発史上重要な年であると位置付けられている。オランダの世界に誇るエレクトロニクスメーカーのフィリップス社がCDの原型となる試作機を持って、日本にデモンストレーションのため来日したのである。来日したのはフィリップスオーディオ事業部開発担当本部長 Ottens、同事業部 Sinjou、同事業部チーフエンジニア Heemskaaik 等で、有力メーカーを一社ずつ訪問したと回顧している。意図は明確で、フィリップスは新しい規格を提案するときはグローバルスタンダードを考え、有力なエレクトロニクスメーカーが無く日本は最初のターゲットであった。このプロトタイプがソニーに与えた衝撃は途轍もなく大きく、中島は「まだ、商品の姿まで考えがおよんでいなかった我々は、目からウロコが落ちる思いがし、フィリップスの企業姿勢に感動さえ覚えた」と述べている。前述したが、ソニーを除くほとんどのメーカーの反応は Wait and See の状況であった。当時の日本のメーカーのほとんどは、ビデオディスクに幻惑されており、オーディオディスクだけを切り離して商品化することなど眼中になかったのである。また、殆どのメーカーは接触式で信号の読出し技術開発を続けていた中で、非接触光学方式に対する技術的信頼感の無さも、其の反応の一因であったと思われる。

一方、ソニーはデジタル記録やエラー訂正技術の改良によって実現させた高密度記録の成果による再生時間の長時間化を、「何時間もの音楽ソフトはどのように売れるのか」との、ソフトウェア販売からの強力な意見もあって、具体的な商品像を描き切れずにいた段階であった。そこに思いがけず素晴らしいプロポザルが飛び込んできた訳で、自分たちの鬱憤を晴らす様に、フィリップスに対してソニー提案をぶつけていたのである。この様に、フィリップスのオーディオ専用、小型ディスクのコンセプトに「目からウロコが落ちた」ソニーはフィリップスのプロトタイプを軸に、フィリップスと共に標準化を進めることで、社内のコンセンサスが急速に纏まり、その後8月から始まるフィリップス/ソニー技術会議に繋がっていったのである。

同時に、ソニーのトップの動きは速く、フィリップスのデモ来日の1か月後の1979年4月大賀典夫（ソニー副社長）/Zaiss（フィリップスVLP事業本部長）会談、同5月盛田昭夫（ソニー会長）/Van der Klugt（フィリップス副社長）会談、岩間和夫（ソニー社長）のアイントホーヘン/ハノーバーのポリグラム訪問等、矢継ぎ早で、経営トップ同士の俊敏な行動で、

この事業に対しての絆を深めていったことは、CD成功への最大の要因であったと思われる。

ここで、フィリップスのプロトタイプの仕様は下記の通りである。

デモ機の諸元

- ・ディスク外形： 115mm
- ・ディスク厚さ： 1.5mm
- ・標本化周波数： 44.3kHz
- ・量子化： 14bit
- ・回転数： 500～215rpm 内面スタート

開発コンセプト

- ・LPレコードの置き換え
- ・オーディオ専用
- ・小型化により応用範囲を広げる
- ・半導体レーザーの採用

これ以外の記録密度、変調方式、エラー訂正等の情報は、検討中とのことで一切公表されていない。図2-3-3にフィリップス社のデモ機の写真を示したが、テーブルの下には、山程のデジタル回路があったが、LSI化を進めており、小型プレーヤの中に収めるとの説明であった。フィリップスとソニーは家庭用ビデオカセットレコーダの分野で、ぎりぎりの交渉で合意が出来ず、ともに劣勢から惨敗に追い込まれた苦い経験を共有していたためと、音楽産業のシュリンクという現実に直面していたことが、両社の絆をより強いものにして、CD-DA という全く新しいコンセプトの商品を生み出させた原動力になったと類推している。



図 2-3-3 フィリップスのコンセプトモデル

2.4 ソニー/フィリップス会談備忘録

フィリップスからのコンパクトディスクの商品提案に「目からウロコが落ちた」ソニーは、約10年に亘るデジタルオーディオ技術の蓄積と過信から、フィリップスに対して、矢継ぎ早の質問、提案を行って

いった。社内にCBS ソニーという音楽会社（新しいフォーマットに対する抵抗勢力）を持っていたにも関わらず、光ディスク方式コンパクトディスクを基本にするという社内コンセンサスを、デモから一か月も経たないうちに確立させ、経営トップ同士の緊急会談を実施してその進め方の基本合意を得たことは、ソニーの歴史の中では初めての事であった。その合意に基づき、1979年8月から1980年6月まで、アイントホーヘン（オランダ）と東京で計6回の両社の実務担当者による仕様確立のための会議が開催された。両社の話し合いは、まずアイントホーヘンで始まり、約半年で基本合意を得て、約一年で暫定規格書のいわゆる“レッドブック”が纏められたのである。以下に述べるソニー/フィリップス交渉結果は、水島昌洋（元ソニーR&D部長）の詳細なレポート（備忘録）が残されていたものに加筆させて頂いたもので、当時、水島は全会議に出席した唯一のソニーメンバーであった。商品コンセプトは、既に両社経営トップ同士で合意していたので、デジタルオーディオディスク仕様に必要な議論すべき項目は、①ディスク外径、内径、厚さ等の物理形状 ②再生時間 ③標準化周波数と量子化ビット数 ④変調方式 ⑤エラー訂正方式 ⑥標準レーザーの波長（780nm 半導体レーザー）等であった。

・第1回会議（1979年8月27、28日 アイントホーヘン）

出席者は、ソニーからは中島平太郎、宮岡千里（ディスク開発部長）土井利忠（技術研究所次長）、水島昌洋、フィリップスからは、Boegels、Karraso（中研 光ディスク研究部長）、Sinjou、Heemskerkらが出席して、1982年～83年の商品導入に向け、年末までに仕様の概略を纏めることで合意した。議論された詳細は下記の通りである。

①ディスク外径

フィリップスがデモ来日時のディスク外径は115ミリだった。この外形は、当時オーディオで主流を占めていたコンパクトカセットの対角線の長さに等しい。

フィリップスは車載オーディオ事業を意識していたため、コンパクトカセットの横幅とディスクの直径を合わせることで社内におけるサイズの違和感をなくしたいとの思惑があり、事業担当者は「コンパクトカセットからコンパクトディスクへ」が共通の開発テーマであった。しかし、フィリップスは115ミリに拘っていた訳ではなく、DIN規格内にプレーヤーを収めることが条件で、105ミリ～125ミリのディスク外径であれば良かったのである。

②再生時間

再生時間は、この時期では、フィリップスが提案した45分～60分で、ソニーも合意し、ほぼ同じ意見であった。一方、この時期は、オーディオ業界全体に4チャンネルオーディオの余波が残っていた。ソニーは2チャンネルと双方向互換がとれる4チャンネルの必要性を主張した。周波数分割や時分割方式も討議されたが、いずれも問題がある所に、加えて4チャンネルの市場性に疑問があったために、突っ込んだ議論にならなかった。しかし、レッドブックでは、4チャンネル用途に一ビットを割り当て、市場からの要望があれば、再生時間を半分にして実現できるように規格化した。残念ながら、現在でも、4チャンネルオーディオコンテンツは、登場していない。

③標準化周波数及び量子化ビット数

ソニーは、当時、全米オーディオ協会（Audio Engineering Society）のデジタルオーディオ標準化委員会で議論されていた50.4kHzを最有力と考えていたので、「標準化周波数50.4kHz、量子化16ビット」を主張した。

しかし、フィリップスはオーディオの帯域は20kHzで十分なのだから冗長すぎると反論してきたし、量子化ビット数は、傘下の音楽会社ポリグラムを代弁して「業務用マスターが16ビットなので、民生用は14ビットで十分ではないか」と主張してきた。いずれにしても、両社の考えは「民生用は業務用より1レベル下でも良い」というのが一致した認識であった。

④変調方式

フィリップスは、この会議で初めてデモ機の変調方式はModified Miller Modulation方式、いわゆるM2方式を採用したことを明らかにした。そして、ビット（ディスク上に成形した信号の形状）の成型精度がジッターに影響する事及び変調信号の周波数の低域成分を制御することの重要性を主張した。

ソニーは、成型精度のジッター依存については合意したものの、低域成分の影響については、高密度記録時の最小反転間隔を重視すべきと主張して、ソニーで、実証していたFTM（Four to Twelve Modulation）変調方式のデータを次回に提出することを約束した。

⑤エラー訂正方式

フィリップスは自社で収集した大量のディスクエラーのデータを示して、その大部分は3ビット以内の

ランダムエラーであると主張したが、ソニーはランダムエラーだけでなくバーストエラー対策も重要であり、インターリーブ長を長くとりエラー信号訂正が重要であると主張し、考え方に大きな隔たりがあった。議論を進めていく中で、フィリップスはバーストエラー対策の重要性は認めたものの、バーストエラーの発生の原因はむしろハードウェアに起因するミストラッキングやデフォーカスであり、発生原因を徹底的に抑え込む手法が有効であると主張してきた。これに対して、ソニーは、長いバーストエラーが出現することを前提に、それに充分適応出来るエラー訂正方式を最初からシステムに組み込んでおくべきであるとの考えを繰り返し主張した。

加えて、サブコードの原型なる「Control & Display」のコンセプト及び実現方法についても議論された。

・第2回会議（1979年10月3日、4日、5日 東京）

冒頭に、両社の変調方式及びエラー訂正方式の提案と説明があった。ソニーは①FT変調方式 ②クロスインターリーブエラー訂正方式 フィリップスは①M2変調方式 ②(2,3) Convolution エラー訂正方式と相違した。双方の主張を技術的に比較、測定、検証することが合意されて、ディスク製作のために、エンジニアの相互派遣が合意され、データをベースにした議論を進められる素地が生まれたことは、共同開発の第一歩とはいえ、大きな進展であった。

今でも語り草になっているが、英語の片言しか喋れない生粋のエンジニアを受け入れたフィリップスから「あの時のソニーのエンジニアは勇気があった。技術のデスクッションには必ずしも流暢な英語は必要なく、万国共通語の“技術語”で十分な議論を重ねることができた。最後は、国やマネージメントの枠を超えて一つのチームになっていった」とチーフエンジニアのDr.Heemskerkは回顧している。我々が後世に残しておける成功事例として、あらゆる事象は、“案ずるより産むがやすし”と昔から言われている様に、どのような環境に対峙しても「飛び込んでいく勇気があるか」が決定的な勝因を作り出すという事実であろう。

本会議において、ソニーは、基本的に45分以上の記録時間が確保でき、125ミリ以下のディスク径が可能なら、標準化周波数は50.4kHzで量子化は16ビットにすべきであると主張している。フィリップスもまたディスク外径が115ミリ以下であればソニー提案で構わないとコメントしているのである。

しかし、CDはオーディオ専用システムとすること

の基本コンセプトは了解されていたのもかわらず、奇妙にも、ソニーはビデオディスクプレーヤとの共通部分を残すべきとの提案を行っている。当時の状況は、ビデオディスクシステムが、市場導入されていたことが影響したと思われるが、議論の俎上に乗ってきたのである。具体的にはディスクの厚さ、センターホール径、信号領域スタート径等をビデオディスクと同等にしようとするものであるが、余りのコンセプトの違いから実現不可能との結論が出て、ソニーも了承して、ここで初めてビデオディスクとの互換性問題は解決し、CDはオーディオ専用ディスクであると確定したのである。それから10年近く経った1990年頃からデジタルビデオディスクとして、MPEG1の映像信号処理技術を使ってビデオCDが出現するまで、CDはデジタルオーディオ専用システムとして発展を続けることになる。

・第3回会議（1979年12月17日、18日、19日 アイントホーヘン）

前回の合意に基づき作成された共同開発実験ディスクの測定結果が報告された。

変調方式については、ソニー提案のFT変換方式はフィリップス提案のM2方式に比べて、ビットエラーが3倍多く、加えてドロップアウト、指紋、ビット形状の非対称性の影響を受けやすいという弱点が報告された。ソニーはこの状況を予測しており、FT変調方式に代わる3PMを改良した新しい変調方式を開発していた。そこで、ソニーは、FT変調方式を即座に取り下げ、ASAP (As Soon As Possible) に新しい方式を提案すると主張して了解された。3PMを改良した変調方式は、後でEFM (Eight To Fourteen) 変調方式と名づけられてCDの基本技術の中核を成している。

一方エラー訂正については、ソニー、フィリップス提案共に正常なディスクでは問題がないと報告されたが、エラー率の低い帯域ではソニー方式が、エラー率の高い帯域ではフィリップス方式が優れているという結果が示された。唯、技術的な観点からは、ディスク上にスクラッチが発生したり、指紋が付着した場合や信号読みとりのトラッキングやフォーカスが外れた場合のエラー訂正能力には改善の余地があると報告された。

エンジニアの寝食を忘れた懸命な努力にもかかわらず、時間は残酷に過ぎ去り、1979年内に測定データを集約して、1980年3月頃に最終合意に達するとの経営トップからの厳命は、実行不可能になってしまった。しかし、3月に予定されている前述したDAD懇

談会までに、何としても、その主要仕様をソニー/フィリップスで纏め上げることもまたエンジニアの矜持だったのである。

その為に、出来ること、使える資源はなんでも使った。特にエラー訂正方式の開発は、ランダムエラーに起因する部分と、ディスク上の物理的な変形に起因するバーストエラー部を分けて徹底したコンピュータシミュレーションを実施した。この当時、ソニー本社のコンピュータはIBM1340一台しかなく、事務部門と共有していたが、給与計算していたIBMを強引に変更して夜中中シミュレーションに使ったため、給与計算が出来ず、給与の遅配を招き総務担当役員が怒鳴りこんでくる始末であった。このめちゃくちゃな一か月で、変調方式はウィンドウマージンを広げる方向でASAP方式をフィリップスに提案できたのは、この年の3月初めの事であった。又、ソニーの提案していたエラー訂正方式は、隣接している符号をリードソロモン符号に変更した方が、ハード構成が容易になるような示唆を得て、開発したCIRC (Cross Interleaved Reed Solomon Code) のエラー訂正方式である。

・第4回会議 (1980年3月17日、18日、19日 東京)

今回の会議の目標は、前述したDAD懇談会の提案期日の1980年3月末日にCDの基本規格の概要を間に合わせることにあった。合意した主な仕様は ①標準化周波数:44.1kHz ②量子化ビット数:16ビット ③エラー訂正方式:ソニーの新提案方式をベースに、隣接符号をリードソロモン符号に変更した方式 ④ディスク径と再生時間:フィリップスは外径115ミリ/60分を主張、ソニーは127ミリ/75分を主張した。但し、この件はマーケティング事項として、両社経営トップの判断に委ねることで合意した。残念ながら変調方式に関しては実験中であり、積み残しとなったのである。

①標準化周波数

当時、業務用途を含めてのデジタルオーディオの規格の中では、いくつかの標準化周波数が存在していた。一つは全米オーディオ協会(AES)が1978年にスタジオ規格として定めた50kHz、もう一つが前述したソニーのPCM-1やPCM-1600の流れを汲む44.1kHz ((525—30) x 3 x 30 NTSCビデオ信号からの由来)。その整数倍(8/7)の50.4kHz、そして3番目は、ヨーロッパの放送局やレコード会社で採用の検討をしていた電話のデジタル伝送(8kHz)の整数倍にあたる48kHz等であった。この中で、ソニーが当初主張していた50.4kHz、をとり下げて44.1kHz

に変更したのは、すでに1978年3月に発売されていたマスター録音機PCM-1600が44.1kHzを採用しており、この標準化周波数であればオーディオ帯域の20kHzの再生は理論上も十分満足できるレベルと判断していたのである。同時に、デジタルオーディオでは、標準化周波数を録音から編集、カッティング、ディスクと一元化することにより音質の劣化が生じない最大の利点があり、既に、PCM-1600で蓄積されている多数のマスター音源をスムーズに利用するための必要な条件であったのである。このことは、業務用から民生用に至るまで標準化周波数が一本化されたことを意味し、画期的な判断であった。

②量子化ビット数

フィリップスはCDを、車載機器を想定したイーザーリスニング用メディアとして位置づけていたので、量子化ビット数は14ビットあれば、理論上86dbのダイナミックレンジが得られ、民生用としては充分であると主張していた。事実、今までのアナログのカセットテープやLPレコードではせいぜい70db程度であり、14ビットで得られる86dbは遥かに高音質であった。さらに、当時16ビット用のキーデバイスをもっぱら軍需用や計測機用途のものが多く、民生用として使う場合は、コストが2けたも違っていたので、常軌を逸した提案であると感じていたのも事実である。この様な状況の中で、ソニーは、デジタルオーディオディスクは民生用といえども、クラシックやジャズに適用できる高音質システムにすべきとして、一貫して16ビットの重要性を主張していた。

「CDの使命は、それまでのLPレコードやカセットテープよりも遥かに優れた録音時と同じ音質を、そのまま家庭に送り届けることである」との主張が噛み合わなかったのである。当時ソニーは1チップ16ビットコンバータの開発の目途が立っていたし、コンピュータが8ビット単位の処理が一般的であり、その整数倍の処理は近いうちに到達する技術として認知されていた。中島の「CDオーディオ談義」によると「今後21世紀を展望するシステムとしては、たかだか10dbの改善では不十分であろうし、ここは将来を見越して、90db以上のダイナミックレンジを確保するためにも16ビットにすべき」と判断していた。

14ビット/16ビット論争は議論の蒸し返しを重ねながら、焦点の定まらない不毛な議論が続いた。そんな中で、エンジニア同志最後のテストを「トライアングルの音」を録音して比較することになった。チー

ンという金属質の余韻に全員が耳を逆立てていたが、Heemskark（フィリップス チーフエンジニア）の回顧によると、「違いがないようだが、ひょっとしたらあるのかも知れない」程度であった。しかし、フィリップス側もエンジニア集団だったので、技術が許せば高音質にしておくことは異存がなく、この実験を最後に、あっけなく標本化周波数は16ビットに決まってしまったのである。

③エラー訂正方式

対立のポイントは、バーストエラーに対しての見解の相違であった。一般的に、光ディスクは生産工程をどのように工夫してもディスクの欠陥をゼロにすることは不可能である。その上、ディスク上に傷、指紋やほこり等が付着する。これが不正常的な読み出しの要因になっていることから、何らかの方法でエラーを発見して正常な信号に復元できる手段を講じておかねばならないことは明白だった。ディスクの欠陥の大半は、1~2ビット程度の長さのランダムバースト（ショートバースト）と呼ばれるエラーである。発生頻度も数10回/秒と高いので、実験結果と数学的アプローチで効率的にエラー訂正するシステムをフィリップスは提案してきた。一方、ソニーは、発生頻度は高くないものの、ミストラッキングや後天的にできる盤面上の傷や指紋による、比較的大きな数10ビット単位のロングバーストと呼ばれるエラーに、訂正効率が高いように実践的なシミュレーションを通して設計したものを提案した。エラー訂正に対する基本的な考え方の違いが、両社の合意を阻んでいたのである。

最後の手段として、訂正能力を公開実験で評価することになった。最初は、良品のディスク、2回目はそれにほこりやごみを付着させディスクは双方のエラー訂正能力に違いは無かったが、3回目には人為的に机の上の砂で傷をつけたディスクは、当然ながらソニー方式が優れていたのである。この結果に対してフィリップスからは、自社の方式のインターリーブ長を長くするなどの改良を加えれば、ソニーと同等の性能になるとの異論も出て会議は紛糾した。

しかし、フィリップスはソニー提案の改良型が、冗長度が17%も改良されていることに注目して、自らソニー提案のLSIまでシミュレーションで推定してくれて、必ずしも懸念しているコストアップ要因にはならないなど、協力的に変化してくれた。ここでやっと両社は、ソニーの新しく提案した方式に基本合意したのである。更にこの方式に、当初用いられていた隣接符号をリードソロモン符号に変更する事も合意さ

れ、ソニーは、次回にエラー訂正の最終案をフィリップスに提示し合意されたのである。のちに、この方式はCIRC（Cross Interleaved Reed Solomon Code）と名づけられて、期待どりの性能を発揮した。ここで、幸運なことに、誤り訂正をバイト単位としたことで、後から決めた信号変調方式もやはりバイト単位であったことから、CDはコンピュータとの親和性が高まり、CD-ROMの爆発的な発展に繋がったのである。

④変調方式

本会議では、変調方式の合意には至らなかった。第3回会議で提案されたフィリップスのM3方式とソニーが新しく提案した方式の比較検討が話し合われた。ソニーの方式は、フィリップス方式に比較して高密度化に適しているが、指紋やスクラッチなどの外乱に対する安定性に疑問が残っていた。そこで、今会議では、ソニーの新方式でさらに20%の高密度化が達成されて、ビットのアシンメトリの影響も許容範囲内であることが確認されれば同方式を採用する、さもなければM3方式を採用することが合意された。しかし、会議後、フィリップスはソニーの新提案に類似した変調方式の開発に取り組んでいる。これは、低域成分の減小に更に取り組んだ方式で、のちのCDの変調方式になるEFM方式の原型となるBES方式であった。

この第4回会議までで、ソニー/フィリップスの規格化交渉は、大枠を基本合意しており、DAD懇談会の提出期限に間に合わせられる基本条件が整っていた。しかし、ソニー/フィリップスが共同開発を続けていたことは、DAD懇談会メンバーは誰も知らなかったのである。もちろん、ソニー、フィリップスが単独で提案すれば問題はないのだが、両社の共同開発となると、なぜソニーは、DAD懇談会に伏せてフィリップスとパートナーシップを結んだのかの説明をしなければならない。特定の企業との契約やアライアンスは経営戦略的行為で、何の問題もないと考えられるが、日本社会では、最も忌み嫌う行為として写り、大半のメンバーからは、怒りとそれを通り越した激高の嵐を頂いたと中島は回想している。そのメンバーをとりなした渡辺周（元日立製作所）、神尾健三（元松下電器）らは、「ソニーがフィリップスと組んでCDの開発者になっていたと当時の関係者は憤慨していたが、今ではこんなことは当たり前である。その後のDVDの乱戦ぶりをみていると、あの時代CDにかけたソニーの行動力は天晴というべきであろう」（JASジャーナル論文集）と回想を寄せている。

・第5回会議（1980年5月13日、14日、15日、ア
イントホーヘン）

前回の合意に基づき、ソニーが修正完成させたエ
ラー訂正方式が合意され、正式名称も CIRC（Cross
Interleaved Read Solomon Code）に決まった。

一方、前会議で両社トップに一任されていたディス
ク外径とディスク厚さについては、4月初旬にソニー
の大賀副社長とフィリップスの van Tilberg（オー
ディオ事業本部長）が合意した仕様どおり、ディスク
外径 120mm、ディスク厚さ 1.2mm で確認された。元
より、フィリップスの提案は、115mm で再生時間は
60分であった。この背景には、傘下のポリグラムの意
見が強く、①ディスクコストはディスク自身の製造コ
ストではなく、ソフトのコストであり、再生時間が長
くなることは、その分コストアップになる。②オペラ
を別にすれば、クラシック音楽であっても、その 90%
程度の曲目は 60分以内である等の主張であった。そ
れに対して、ソニーの大賀副社長は「有名な論陣」を
張った。日本ではベートーベンの第九番の人気の高
い。その演奏を一枚のディスクに収めてこそ新しいメ
ディアとしての意味がある。それも、75分あればどの
ようなテンポの指揮でも十分に収める事ができると主
張した。Tilberg は苦虫を噛みつぶしたような顔つき
であったというが、いたずらにポリグラムを刺激しな
いことを条件に合意した。（CD 規格の発表文の再生時
間は最大 75分ではなく、“60分”のままである。）

ディスク外径については、DIN 規格に適合した車載ブ
レーヤーの商品企画に端を発していると前述したが、ソ
ニーのエンジニアの検討では、最大 130mm までは可能
との結論がでたので、それを Tilberg に伝えたところ
「130mm は譲歩できないが 120mm なら OK」との事で、
大賀は「それで結構」と応じて 120mm にあっさり決ま
った。ちなみに、ディスク内径の 15mm はオランダの 10
セント硬貨と同一径である。設計上の駆動モーターとオ
プティカルピックアップの整合で、内周の再生スタート
径 25mm が決まり、ここから算出すると 10 数ミリが内
径として適合していたのである。オランダ人特有の“茶
目っ気”から“デュベルツェ”と呼ばれるこの硬貨は、
CD のセンターホールをすり抜けられる世界で唯一のコ
インとして忘れられないシンボルになっている。CD の
後に登場する DVD、Blu-Ray ディスクも全て内径 15mm
を継承している。これはひとえに各種のディスクを同じ
プレーヤー、レコーダで記録再生ができる互換性への配慮
であるが、別の意味で、この世界最小径を持つ 10 セント
硬貨の“DNA”が CD 以降の光ディスクに次々に遺伝し
ているようで“微笑ましい出来事”である。

・変調方式

この第5回会議の主要議題は、変調方式で、この交
渉は最大の山場であった。

フィリップスの提案している M3（Modified
Miller Modulation）方式は、DC フリーであるが、記
録密度に難点があり、一方、ソニーの提案の方式は
M3 に比べて低域成分が約 10db も多く、システムの
信頼性にも難点を抱えており、実用上どの程度の記
録密度を達成できるか懸念があった。そこで、ソニー
は、低域成分を減らした修正案を提案し、フィリップ
スは高密度記録に適した新しい変調方式を提案した。
両提案共に、性能上大きな違いは認められなかった
が、フィリップスは、ソニー方式のエラー伝搬を指摘
し、ソニーは、エラー伝搬はそれほど重要でないと主
張し、フィリップス提案のハードウェアコストを問題
にして、議論は平行線をたどり収束する気配はなかつ
たのである。その上、いったん合意していた CIRC の
破棄まで言い出したので、ソニーは帰国の準備に入
ってしまった。このままでは、いままで両社が築き上
げてきた成果をすべて失うことになり判断はマネー
メントに委ねられた。Boegels は会議を一日延長する事
を提案し、和やかな夕食会を設定した。その席上で、
改めて、両社の交渉の労をねぎらい、技術への尊敬と
敬慕を確認した。最終的に、中島が Boegels の提案を
受け入れることで、変調方式は実質上の合意を得たの
である。合意の内容は、フィリップスは BES 方式に
ついて、サーボ回路の同期乱れ回復時間、ピットアシ
ンメトリの影響などをさらに検討する。一方、ソニー
としては BES 方式のハード規模がリーズナブルな範
囲に収まれば BES 方式に同意するというものであ
った。この会議の両社の対立を和らげるかのように次の
有名なメモが添付されたのである。

Philips and Sony agreed that contribution to
modulation as well as error correction from Sony
and Philips is equal.

H. Nakajima Tr. P. W. Boegels

ここで合意された両技術の特許は、両社の技術者の
名前で出願された。その意味でも、CD に対する両社
の貢献度は平等なのである。

・第6回会議（1980年6月17日、18日 東京）

変調方式として、BES 方式を採用することとした
が、正式名称は再検討項目とし、その後 EFM（Eight
to Fourteen Modulation）方式と改めた。

又、正式なシステムの名称は Digital Compact Disc
と本会議で決まったが、商標上の懸念から Compact

Disc Digital Audio と改称されて正式名称とした。その他 DAD 懇談会にソニー/フィリップス連名で、CD システムのプレゼンテーションを実施することも同時に確認された。

以上の最終合意を持って、1979 年 8 月から始まったソニー/フィリップスの CD 標準化作業は、1980 年 6 月をもって、第一段階を終了して、ようやく全世界に披露できる運びとなった。まだこの時点で、決定しなければならないことは山程あり、ソニー/フィリップスは、引き続いて第 2 段階の交渉に入っていたのである。図 2-4-1 に第 6 回会議終了後の記念写真を掲載した。



図 2-4-1 ソニー/フィリップス第 6 回会議（東京、1981.6）

この一年後の 1981 年 4 月、ソニー/フィリップス、カラヤンの主催する CD のデモンストレーションが、ザルツブルグにおいて、音楽、レコード関係者を招いて盛大に開催された。これを皮切りに、6 月 27 日ニューヨークでの正式発表を果たして、日本には秋の全日本オーディオフェアに合わせて発表され、全世界デビューを果たしたのである。図 2-4-2 に日本での発表会の写真を掲載した。しかし、この時点では、未だ商品化に向けた半導体レーザー、光ピックアップ、信号処理 LSI 等のキーデバイスの目途は何一つ立っていなかったのである。



図 2-4-2 日本での CD 発表会（パレスホテル、1981.10）

ソニー/フィリップスで合意した CD-DA 規格概略

| | |
|------------|-----------|
| ・演奏時間 | 74 分 42 秒 |
| ・ディスク径 | 120mm |
| ・サンプリング周波数 | 44.1kHz |
| ・量子化数 | 16bit |
| ・誤り訂正符号 | CIRC |
| ・変調方式 | EFM |

参考文献

- 1) 「コンパクトディスク その 20 年の歩み」 CDs21 ソリューションズ (2005)
- 2) 「次世代オーディオに挑む」 中島平太郎 風雲舎 (1998)
- 3) 「ソニー/フィリップス会談備忘録」 水島昌洋
- 4) 「デジタル・オーディオの現状と将来の夢」 中島平太郎 JAS ジャーナル (1988.3)

人力扇風機

ようやくにして、1981年4月、CDデモ機をお披露目することとなった。場所はかのカラヤンの住むオーストラリアのザルツブルグでの発表会である。あの3年前に盛田社長宅で、盗み録りに怒り、そののち音質を絶賛した巨匠カラヤンからの自筆の手紙に「CDの最終デモが可能になった暁には、世のレコード業者、ジャーナリスト、音楽愛好家に対して、ザルツブルグにて実験展示する機会を設けることはやぶさかではない」とあった。その言を頼って発表会が開催されることになったが、主催者は、フィリップスであり、ソニーであり、もちろんカラヤンその人であった。巨匠は自らプレーヤのボタンを押した。それがCDデジタルオーディオの素晴らしい音を公式に世界に流した一瞬だった。そのうえで、この発表会に駆け付けた大勢の関係者に「これは音楽愛好者へのギフト」と紹介した。この発表会に馳せ参じたベルリンフィルの前で、彼らが演奏した曲がCDから流れた。皆、口々に「自分の演奏を、このCDほど美しい音で聞いたことは無い」と感激に咽んでいた。巨匠も「これに勝る何物もない」と呟いていたと中島は回顧している。

しかし、内情はこの期に及んでも、冷や汗の薄氷を踏む思いの披露パーティーであった。お披露目をするCDデモ機は、ほとんどの仕様を満足する実用機であったが、未だ手作りで、テーブルの下の白い布で隠された中にはラックに組み込まれた膨大なデジタル信号処理回路が置かれていた。LSI化するには間に合わず、数千個のIC、メモリー、抵抗、コンデンサーを基盤に配置してある代物であった。その回路基板から発生する熱はものすごく、風遠しの良い所では問題はないが、何しろ布で覆われたテーブルの下の空間での長い時間のデモでは、間違いなく温度が上昇してPLLのロックがはずれ、全体が作動しなくなる危険性ははらんでいた。

はじめは扇風機を回すことを考えてテストしてみると、扇風機のモーターから出る電磁ノイズが、膨大な電子回路にトラブルを招く恐れがあった。そこで背に腹は代えられず、“人力扇風機”即ち“うちわ”で回路基板を扇ぎ続けることにたどり着いた。しかしデモの最中なので、テーブルの下に皆に分らぬように身を隠して、扇ぎ続けることができるかは困難な状況であった。たまたま、ソニーから同行していた小柄なエンジニアに大役を命じ、デモの一時間ばかりをうちわで扇いでもらった。本人も汗みどろで苦行に耐えてくれたが、中島も脂汗が滲んでくるのを止められなかったと話している。全く綱渡りのお披露目であったが、何はともあれCDはこうして産声をあげたのである。ザルツブルグに続いて、ニューヨークはヒルトンホテルで、そして日本ではパレスホテルでと、メインイベントが続いたが、何はともあれ全世界に向けた“冷や汗もののデモンストレーション”は成功裏に終わったのである。

3 | CD の技術系統

3.1 光学方式の技術の系統

CD (約 0.7GB) を起点とした 12cm 光ディスクの世界は、その後の高密度化の開発で DVD (約 5GB, 10GB 弱 / 2 層) を経て、2000 年以降 BD (約 25GB / 片面、50GB / 2 層) まで到達した。応用範囲も多様化して、音楽のみならず、写真保存、映像分野からアーカイブデータの保存用途にまで拡大している。即ち、単純な光ディスクの記録密度の進展は、25 年 (1980~2005 年) で、約 25 倍の記録密度向上 (多層化技術を除く) を達成したことになる。その起点になった技術で最も重要な項目は、非接触信号検出の光学式ディスクを採用したことにある。ここでは CD に採用された光ディスクの物理的外形からその信号を読み取るための光学系の要素技術の系統を記述する。基本的には、CD で熟成された要素技術は、記録密度が大きくなった DVD、BD でもそのまま引き継がれ、12cm 光ディスク分野の技術の核をなし、今でも実用に供されて日々系統技術の発展が続いているのである。図 3-1-1 に CD を起点にした 12cm 光ディスクの世界を俯瞰した概念図を示した。

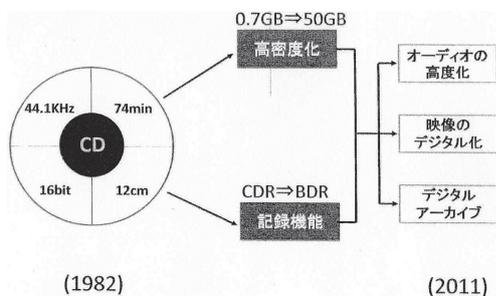


図 3-1-1 光ディスクの世界

3.1.1 光ディスクの形状

CD の外形図に関しては図 3-1-2 に示した通りで、直径 120mm、センターホール径は 15mm、厚さは 1.2mm である。コンテンツが入るプログラム領域は内径 50mm (半径 25mm) から始まり、外形 116mm 迄 (半径 58mm) である。その前後にリードイン (46mm~50mm)、リードアウト (116mm~117mm) と呼ばれるエリアがあり、光ディスクはこの信号を読み取りコントロールすることになる。又、クランピング領域も定められており、外形 26mm~33mm までは、ディスクを回転軸に固定する領域に使う。コンテンツの外形は 116mm 迄のため最外周の 2mm 程度は、結果的に

使用できないが、この部分はディスクの信頼性確保のために、重要で、特にディスク端面からの水分の侵入を防ぐ技術対策が施されている。もし、コンテンツが短く最外周に達しない場合は、そのすぐ後にリードアウト領域を置くことになっている。CD の場合、非接触光学系はディスク厚さを含んだトータル光学系として設計されるため、ディスク材料の光学的特性 (屈折率、複素屈折率等) を考慮する必要がある、殆どの材料は、ピット成形に最適な分子量の高機能プラスチックの光学用ポリカーボネートが用いられる。ちなみに、CD 以降の光ディスクは、CD と互換性を確保するためにディスクのパラメーターは基本的に同じで、光を透過させる層の厚さだけが違い、DVD は 0.6mm、BD は 0.1mm である。CD の場合、前章で記述した様に約 74 分のベートーベンの第九が入るように設計されているので、CD の記録容量は $0.783\text{GB} (44100 \times ((16 \times 2) / 8) \times 60 \times 74 \times 10^9)$ まで可能になる。

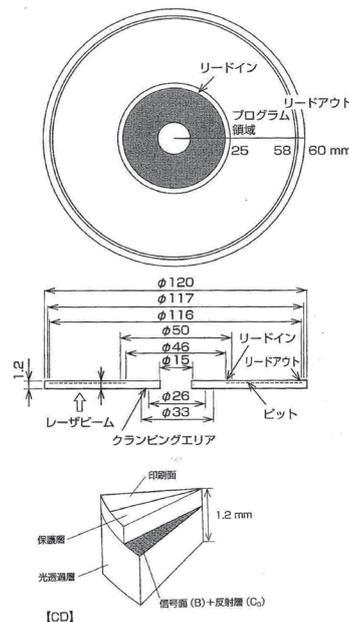


図 3-1-2 コンパクトディスク (CD) 外形図・断面図

光学式ディスクの原理についてその概念図を図 3-1-3 に示した。CD の場合その最大の特徴は、信号がディスクの表面にあるのではなく、ディスクの中にあることで、基本的に 3 層構造で出来ている。即ち、レーザー光が透過する基盤層、信号層 + 反射層、それに保護層である。これらのディスクの記録再生を行うには、特定のレーザービーム (CD は 782nm の半導体レーザー光) を図 3-1-3 のように下から照射して、信号面に集光させる。図の信号面の上部の反射層から

戻ってくる光が、信号面の物理変化により光の強度が変調されることを用いて光検出器に導き電気信号に直して、色々な信号処理を経て音楽信号や映像信号になる。実際の信号面の概略は図3-1-4に示した。ピットと呼ばれる穴がランダムに配列されている様子が見取れる。そのピットは長さ約0.9~3.3 μm (EFM変調のため)、巾約0.5 μm 、トラックピッチ約1.6 μm で成型されている。ピットの深さはサーボ用の信号との関係があり、基本的にはレーザー波長 λ の1/4程度でポリカ基盤の屈折率1.5を加味して、約100nm程度である。即ち、CDの表面には前述したピットが全面にわたって記録されていることになるが、各仕様には誤差が含まれているので、CDの開発は、この誤差をどのように補正して正確に信号を獲得するかが技術の鍵であった。具体的にディスク周りで発生する物理的な誤差(デビエーション)については図3-1-5にまとめてみた。その中で、大きな数値は、成形性を考慮したプラスチックの基盤で、ディスクのそり(Vertical deviation)は ± 0.6 度も許容されており、その数値は、ディスクが普通に平面において約1mmも反っているも良いという規定である。その上、偏心は回転軸の誤差を含めて70 μm もあり、焦点を合わせる誤差も $\pm 0.5\text{mm}$ もあり、当時の技術では、完璧なサーボシステムを完成させることは不可能に近い状況だったのである。幸運にも、ディスクの成型精度が徐々に上がってきたことで、据え置き型のハードウェアでは、何とか信号の検出は間に合わせる事ができた。しかし、2年後の1984年に発売したポータブルタイプのプレーヤでは、抜本的な音飛び対策を施す必要に迫られ、大変な努力と試行錯誤の連続があったのである。

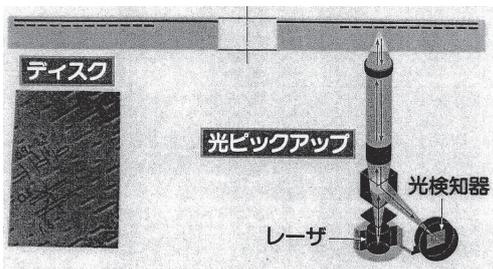


図3-1-3 光ディスクの原理図

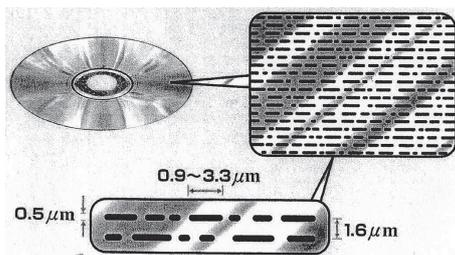


図3-1-4 光ディスク信号面概略図

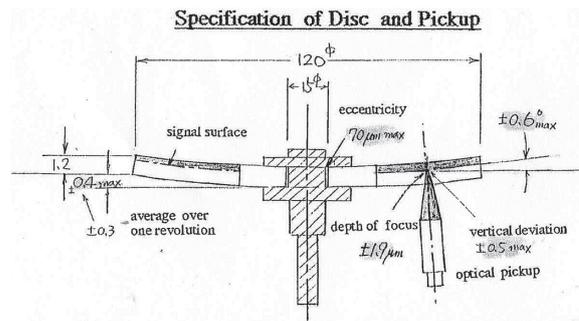


図3-1-5 光ディスクで発生する誤差

一方、CDでは、径により線速度が一定になるCLV (Constant Linear Velocity) という方式を採用している。基本的には、記録密度を上げるために採用した技術で、CDの場合線速度は1.2m/s~1.4m/s (代表的な値は1.25m/s) であり、回転数はおよそ200rpm (最外周) から600rpm (最内周) 程度である。従来のLPレコードは、CLVとは対にあるCAV (Constant Angular Velocity) で、33 1/3回転などの一定回転の系である。記録密度の観点からは、外周比を n とすると、CLVはCAVに比べて $(n + 1) / 2$ 倍になり、CDの場合 $n = 2.4$ ぐらいだから、1.7倍も記録密度が上がったことになり、74分の第九を一枚のCDに収める事が出来た。ちなみに、CDは、1~2曲の楽曲を入れるための外形が80mmのCDシングルが規格化された。特に日本の音楽マーケットで普及したが、外形を除いて他の仕様は、内径、音楽スタート径等すべて120mmCDと同一であり、互換性は完璧にとることが出来たのである。

3.1.2 非接触光信号系検出技術

CDの重要技術に、光を用いて「非接触で信号検出」を行うという大きな特徴がある。光ディスクの形状については前述した通りだが、そこに埋め込まれている信号をどのようにして検出するかについては技術の系統として重要な項目である。ここで用いる光は、次のような要件を満たす必要がある。

- ①集光光学系により、ディスク内の信号ピットと同じ程度の大きさのスポットまで、集光出来る干渉性の良い光であること
- ②小さなピックアップに搭載するため小さな発光体であること
- ③信号をS/Nよく読み出し、または書き込むために十分な光量が得られること

即ち、光学系は一点に小さく光を絞り、この光が、ディスクに刻まれたピットにより回折されることを利用して信号を読み出す方式である。この他に、光の性質を

表す要素に、コヒーレンスという言葉があるが、光の集光には空間的コヒーレンスが重要で、空間的コヒーレンスの良い波面のそろった光をレンズで集光させると、ほぼ一点に絞れるが、インコヒーレントな波は、異なった方向の波面が重なってやって来るので一点に絞ることは出来ない。これは発光源の選定に大きな要因で、例えば、発光ダイオードは、インコヒーレントな光源なので発光面以下の大きさにまで集光できない。しかし、半導体レーザー (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) は言葉通り誘導放出を利用した光で、空間的コヒーレンスが極めて良い光源であり、光ディスクにとっては理想的な光で①の条件を満たしている。又、半導体レーザーの結晶自体非常に小さいので、②の条件は十分に満たしている。③の条件のS/Nについては、再生信号系の信号対雑音比 (S/N) の要求から決まるが、一般的に、光ディスクのノイズはレーザーノイズ、ディスクノイズ、光検出器とプリアンプのノイズ等があり、設計上注意する必要がある。光ディスクに用いられた半導体レーザーの詳細については、後節 (オプティカルピックアップ) で記述する。

一方、光は波動であり、幾何光学では無限小の小さな一点に集光することはできるが、波動光学的観点からは、レンズの回折の影響により、集光した時のビーム径は有限の値を持つ。一様な強度分布を持つ平行ビームがレンズに入射した場合、その集光ビームは、エアリーディスク (Airy Disk) の形をすることは知られている。図 3-1-6 に概念図を示したが、中央スポットに全エネルギーの約 84% が集まっている。この中心円径は $1.22 \times \lambda / NA$ で表す。この NA は開口率 (Numerical Aperture) と呼ばれる数値で、 $NA = n \times \sin \theta$ で表され、 λ は光の波長、 n は通過する媒体の屈折率である。CD の場合、 $\lambda = 780\text{nm}$ 、 $NA = 0.45$ で、Airy Disk 径 = $1.22 \times 0.78/0.45 = 2.1\mu\text{m}$ 程度となる。この式から、光を小さなスポットに集光させるためには、 λ は小さい方が良く、NA は大きい方が良いことが分かる。

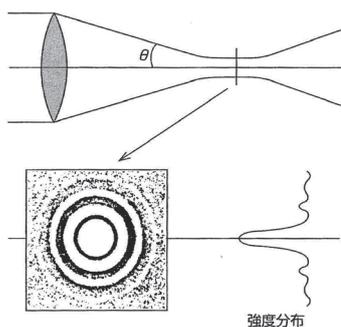
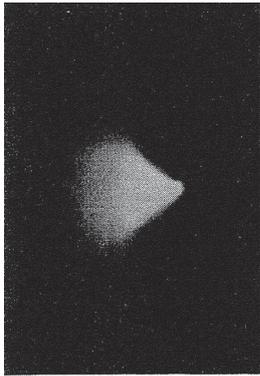


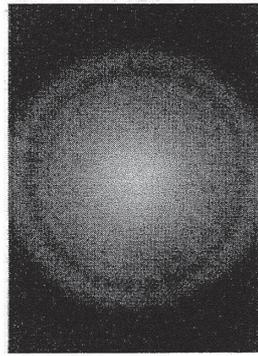
図 3-1-6 集光した光の強度分布

1982 年当時、半導体レーザーの波長 λ は 780nm がやっとで、試作品が非常に高価で調達が出来なかった。ようやく量産レベルに達した技術レベルでも 10k 個 / 月を作る能力は、シャープ (株) の天理工場が唯一の生産拠点だったのである。その後、CD プレーヤの生産が指数関数的に増加する 1985 年頃を境に、そのピックアップのキーデバイスとして増産軌道にのり、最盛期には約一億個 / 年以上もの生産量になり、ソニーも自社生産を開始した。半導体レーザーは、1996 年の DVD 導入で波長 λ は赤色の 650nm になり、2003 年の BD 導入で青色の約 400nm の短波長に発展して、現在でも数多く生産されて光ディスクのキーデバイスとして使用されている。

一方、レンズの NA については、半導体レーザーと同じで、その時代に量産可能なレンズを使用してきたが、この NA はビームスポット径を定めるだけでなく、光ディスクにおける重要なファクターを決定している。図 3-1-5 に示したように光ディスクの信号検出には、色々な誤差の補正が必要である。レンズ NA との関連では、①焦点深度 = λ / NA^2 ②ディスクの傾き許容度 $\propto \lambda / NA$ ③ディスクの光透過層の厚みむらに対する許容度 $\propto \lambda / NA^4$ となり、光学システムとしては NA が小さい方が設計は楽になる。①の焦点深度は $\lambda = 0.78$ 、 $NA = 0.45$ を入れると $\pm 1.9\mu\text{m}$ 程度になりフォーカスサーボの残差がこの中にはいってれば良い。②のディスクの傾きに関しては、ディスクの反りなどのためにディスクの信号面と光ピックアップの光軸が直行しなくなり、この結果光学系は色々な収差を発生するが、その一つはコマ収差で、もう一つが球面収差である。この収差の典型的な例を図 3-1-7 に示した。いずれも小さな点に集光された光が、コマ収差がある場合は彗星のような形になり、球面収差の場合は、右側の映像のように、中央の集光点の周りにたくさんの光が見え、ソフトフォーカスのようになると考えられている。使用している光を限界まで絞って、ビットという部分で干渉させる物理現象を使う信号の読み取り原理では、収差は記録再生の限界内に抑える設計をするか、補正されなければならない。CD の光学系はプラスチック基板の厚さを透過する光を含んだ光学系として設計されている。基本的な信号検出の原理は、CD の場合波長 $\lambda = 780\text{nm}$ のレーザー光はレンズ、ディスクを通して集光されてディスクの信号面のピットで回折されて、戻って来ない光と物理的に変化のない所から戻ってくる光が変調されることを用いた信号の検出が行われる。この状況を、図 3-1-8 に光ディスクの信号検出の概念図として示した。



コマ収差がある集光ビームの例
(彗星のように見える)



球面収差がある集光ビームの例
(ソフトフォーカスのようになる)

図 3-1-7 光学系のコマ収差と球面収差

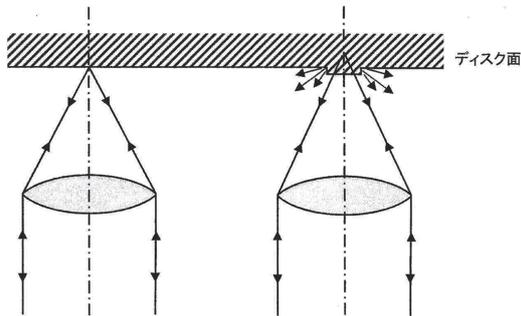


図 3-1-8 光ディスクの信号検出原理

もう一つ重要なパラメータの中に、光学系の持っている周波数特性がある。基本的には、カメラのレンズと同じで、光学系の伝達関数として OTF (Optical Transfer Function) と呼ばれるもので、一般的には複素数で表す。OTF の絶対値が MTF (Modulation Transfer Function) と呼ばれるもので、振幅の伝達関数を表す。一方、OTF の虚数分が PTF (Phase Transfer Function) と呼ばれ位相特性を表す。図 3-1-9 に一般的な光学系の伝達関数の概念を示したが、CD の様な光学系では、一つのレンズが光を集光してディスクの信号面を照射して、そのピットで変調されて戻ってきた光を同じレンズで集めるから、OTF は二つの円形開口の自己相関を求めれば良いことになる。一般に、空間周波数即ち光学系のカットオフ (x) は $x = 2NA/\lambda$ で表されるので、CD の場合は $\lambda = 0.78\mu\text{m}$ 、 $NA = 0.45$ を入れると $x = 1.154 \times 10^6$ になる。つまり、1154 本/mm の空間周波数が読み出せる限界ということになる。CD の場合は最小ピットの大きさは $0.87\mu\text{m}$ だからこのピット列の持つ基本空間周波数は $1/(1.87\mu\text{m} \times 2) = 0.581 \times 10^6$ となり、581 本/mm の密度になるので、 $1154/581 \approx 2$ となり、信号は 2 倍の周波数帯域で読み出していることになる。ちなみに同じような数値を入れた DVD の場合は、1846 本/mm が空間周波数の読み出せる限界で、ピット列 (最短ピット $0.4\mu\text{m}$) の持つ基本周波数は

1250 本/mm になり、 $1846/1250 \approx 1.48$ で、信号を 1.5 倍の周波数帯域で読み出していることになる。

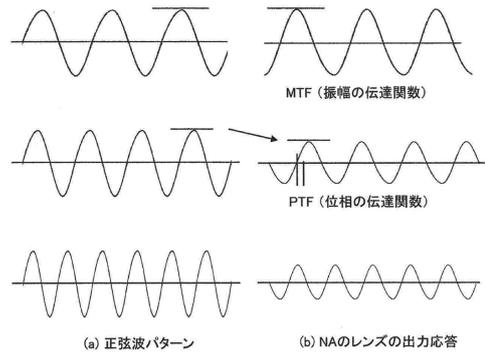


図 3-1-9 光ディスクの伝達関数概念図

当然、理想的な光学系と実際の光学系の間には、色々な要因で MTF、PTF 等が劣化する。①レンズ系そのものの収差 ②ディスクの厚さむらによる球面収差 ③ディスクの信号面と光軸の傾きによるコマ収差 ④フォーカサーボでとりきれない信号面の不完全さ等が主要な要因で、これらの項目に対して、マージン確保の設計をするか、または、積極的に補正機構をつける等の対策が必須になり、ハードウェアの安定性の鍵になる。

3.1.3 信号検出のためのサーボ技術

光ディスクの信号検出のためのサーボ技術は、大きく分けるとフォーカサーボとトラッキングサーボに分類される。前者は、回転しているディスクの上下の動きに追従するもので、常に信号面に焦点を合わせるための技術である。後者はディスクの回転に伴い真円との誤差が生じるので、常に一定の信号トラック上に光の焦点を固定させ、連続的に信号を取り出す技術である。光ピックアップの主要な技術で基本的に誤差信号をどのようにして検出するのかによって、いくつかのタイプがそれぞれのサーボ方式で存在する。このサーボ方式は、「LD の開発実用化に関する系統化調査」(Vol. 21) と一部重複するところがあるので、簡潔に記述する。

A) フォーカス誤差信号検出方法

大きく分類すると、フォーカサーボ方式は誤差信号の検出の方法で 3 種類に分類される。一番多く使用されている技術は、非点収差 (Astigma) による誤差信号検出機構である。図 3-1-10 にその概略図を示した。ディスクから戻ってきた光ビームを途中のビームスプリッターで分光して焦点を結ぶ面に 4 分割した光センサーを配置しておく。ビームスプリッターと光センサーの間にシリンドリカルレンズを配置して置くと、光センサー上の光ビームは、焦点が合ったときに

図のj点のように丸くなり、一方、ディスクの焦点がはずれた時は光センサー上のスポットは楕円形に縦横に変化する。4分割された光センサーからの信号を4つの出力差、 $\{(\textcircled{1}+\textcircled{3}) - (\textcircled{2}+\textcircled{4})\}$ の演算を行うとその結果は0になる。この演算結果がフォーカス誤差信号になる、即ち、ディスクがレンズに近づくと反射光の結像面は遠ざかることになるので、j点に置いた4分割センサー上の像は縦長の円になり、フォーカスの誤差信号はマイナスになる。又、ディスクがレンズから遠ざかると、逆に横長の円となるため、フォーカス誤差信号はプラスとなり両極性の誤差信号を得ることができる。その他の方式としてSSD (Spot Size Detection) 方式やフーコー方式があるが、基本的にディスク上の焦点の変化を光センサー上のスポットの形状の変化として捉え、増幅して誤差信号にする技術は同じである。

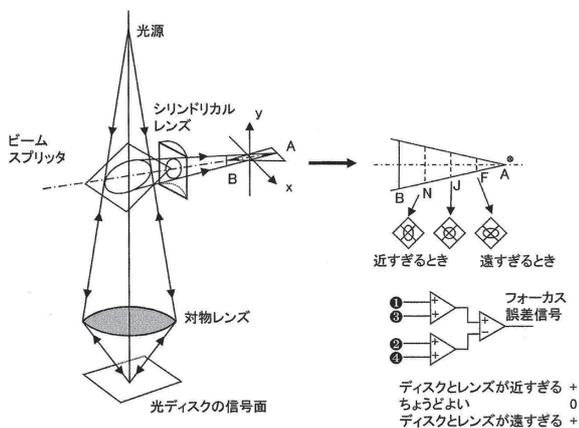


図 3-1-10 フォーカスサーボの原理

B) トラッキング誤差信号検出方式

信号を検出するために、トラック方向の誤差をどのように補正するかは技術は光ディスクの中では特に重要な技術である。CDでは3スポット方式、プッシュ・プル方式 (Push-Pull) 等が主に使われた。プッシュ・プル方を改良したトラッキング信号検出方はデファレンシャル・プッシュ・プル方式 (Differential Push-Pull) とデファレンシャル・フェーズ・デテクション方式 (Differential Phase Detection) とに分けられる。前者は主に CD-R 等のピットの無いグループのある記録メディアシステムに活用されて、後者は CD-DA/CD-ROM の様な再生専用システムに用いられた。

I) 3スポット方式

光ディスクは、前述したようにピット又はグループという信号が入った円盤を回転して信号を読み取る。当然その精度は、トラックピッチ約 $1.6\mu\text{m}$ に対し

て、センターホールの誤差は $15\text{mm} \pm 0.1$ で、最大で $100\mu\text{m}$ の大きさで、集光ビームを固定した場合約 70 本ものトラックを横切ることになる。その他にピットの成型誤差や真円との誤差が重なりこれより更に大きな値となる。図 3-1-11 にトラッキング補正の概念図を示した。3スポット方式は、光学式のビデオディスクに採用された方式と基本的に同じである。中央の信号を読み取るビームの前後で2つの副ビームを用意し、副ビーム A,B ともにわずかにトラックにかかっている程度に、主ビームスポットはトラックの真上に来るようにする。トラックが上下に動くとき副スポット A,B は回折により戻ってくる信号量が変化するので、両極性の誤差信号が得られる。すなわち、一本のトラックのどちら側にずれているかの情報と、ずれの量の情報が得られることになる。この方式は CD で最も多く使用されているトラッキング誤差補正方式だが、副スポットを発生させるために回折格子が必要になることや、主ビームの効率が良くない等の欠点があり、特に記録メディアである CD-R 等では、主ビームの利用効率を最大限にしなければならないので、DPP などの方式に移行していった。

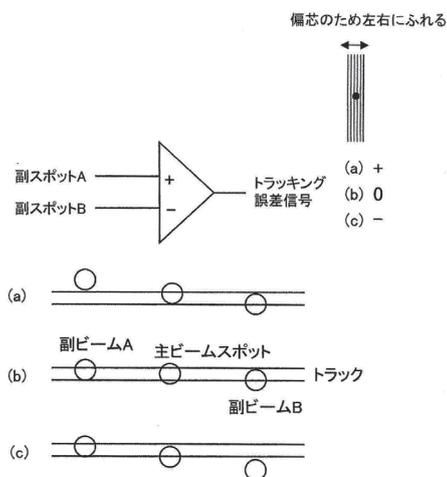


図 3-1-11 トラッキング補正の概念図

II) DPP 方式 & DPD 方式

両方式ともに、1 ビームで誤差信号を検出できる優れた方式である。これは、ピットにより回折反射されて、再び対物レンズに入射した光の強度分布が、ピットとスポットとの相対的な位置変化により変化することを利用して、対物レンズ以外の所でも回折されたパターンは観測できるので、光の強度分布をトラックの方向に沿って、2分割されたフォトデテクター (PD) で受ければトラッキングの誤差信号を検出することが出来る。図 3-1-12 にプッシュ・プル (Push-Pull) によるトラッキング誤差信号検出の概念図を示した。しか

し、トラッキング誤差信号を安定して検出するための技術的工夫は色々あり、RF信号が最も大きくなるピットやグループの深さが $\lambda/4$ では、検出する信号は小さくなってしまいますので、ピットの深さを $\lambda/4 \sim \lambda/8$ の間に設定して、誤差信号を出るようにしたり、オフセットの発生を抑える技術や、レーザーの戻ってきた光を発光しているレーザーにそのまま戻すとノイズが増加してしまうためのノイズキャンセリング技術等は、RF信号を正確に確保するための重要な技術である。

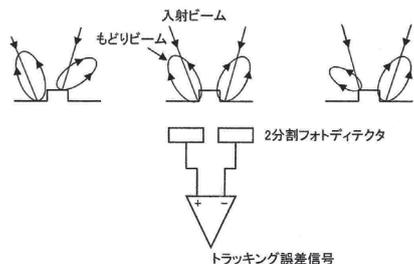


図 3-1-12 プッシュ・プル方式によるトラッキング誤差

3ビームを用いてこのオフセットを克服した技術がDPPと呼ばれる方式である。図 3-1-13 にDPPによるトラッキング誤差信号検出の概略を示したが、レーザーから放出された光は、回折格子で3つに分けられる。中心の強い光量ビームが記録用の溝にいるときに両サイドのビームは溝と溝の間に入るように回折格子を動かす。その上で、光検出器を3つのビームのそれぞれにトラッキング方向に分割し、それぞれの引き算をして中心ビームのPush-PullとサイドビームのPush-Pullをそれぞれ演算する。その後、サイドのPush-Pullのゲインを調整して足し合わせれば、グループとランドのそれぞれのオフセットが逆相になり、オフセットのないPush-Pull信号が得られ、主にCD-RやDVD-Rの記録システムに多く用いられている。記録系のCD-R/RW等については、グループの作り方が特殊で、再生系では読み取れない程度にグループをウォブルさせてアドレス信号を記録する方法等があるので、第7章の記録型CDの登場で記述する。

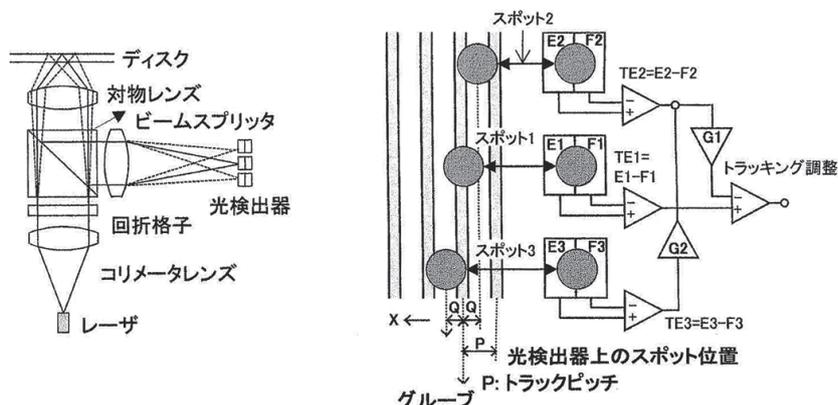


図 3-1-13 DPP方式によるトラッキング誤差信号検出

一方、DPD方式も Push-Pull方を改良した優れた方式である。図 3-1-14 にその概念図を示したが、大きな利点は①ピットの深さの影響をあまり受けない点 ②光検出器上でビームが動いてもあまり影響がないため、一体構造を持たない光ピックアップのトラッキング方式として適していることである。DPD方式では、基本的にビームとピットの相対的な位置変化による光の強度分布を、4分割した光検出器で検出し演算した信号をトラッキング誤差信号として使用する。即ち、HF信号は4分割した光検出器 ($a + b + c + d$) の和で表される高周波信号の意味で、プレーヤの光の周波数特性により帯域制限された変調の信号である。対角線誤差信号は $\{(a + c) - (b + d)\}$ で表され、トラックがビームの中央にある時は、対角線誤差信号はゼロで、ディスクの回転と共に図の矢印の方向にずれて進んだ場合には正弦波状の出力となるが、HF信号に対しては位相が 90° ずつ正・負にずれている。HF信号を基準にして対角線誤差信号の位相を検出すれば、両極性のトラッキング誤差信号を得ることができる。実際にはヘテロダイン検波法や位相差法が誤差信号の検出手段として用いられる。DPD方式はピットの存在している光ディスクが前提であり、CD-DAやCD-ROMに主に用いられ、記録光メディアのCD-R等には用いられず、DPP法を用いてトラッキング誤差信号を得ているケースが多くみられる。

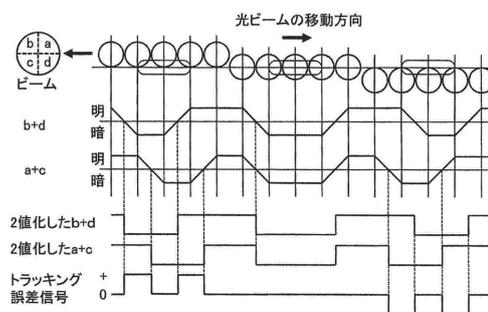


図 3-1-14 DPD方式によるトラッキング誤差信号検出

3.2 オプティカルピックアップ (OP) の技術系統

CDを構成する要素技術の中で最も重要なデバイスに、オプティカルピックアップ (Optical Pickup) という信号を検出するシステムがある。主な構成部品は、半導体レーザー (Laser Diode)、対物レンズ、フォトダイオード (Photo Diode) 及び各種光学素子などである。半導体レーザーの詳細は、3-2-1 で記述するが、光源として、光ディスクに記録された信号を読み取るためには、信号を記録したピットより少し大きめの径を持つ集光された光が必要である。いわゆる発光ダイオード (Light Emitting Diode) では、チップの発光部分が無限に小さな点ではなく、有限の大きさをもつため、光ディスクのピットと同じ大きさまで光を絞り込むことが出来ない。また、光ディスクの信号の読み出し原理は、ピットの表面とピットの底辺からの光の干渉で得られるので、ある程度のコヒーレンスが必要で、その意味でも半導体レーザーは最適である。

一方、対物レンズも重要なデバイスである。CD開発の初期の頃は、顕微鏡の対物レンズがその技術的な仕様を満足した唯一のレンズであり、顕微鏡と同じ複数枚のガラスレンズを使っていた。これは、当時のレーザーディスク (Laser Disc) に使われていたもので、非常に高価で量産にも不向きなデバイスであった。この大きな位置を占める対物レンズを、何とか安価に小型で量産性のあるデバイスを開発しなければ“CDの発展はない”との至上命令に、血のにじむような努力と試行錯誤が続けられる事となった。たどり着いた結果が、一枚構成の非球面成型レンズであった。これは、非球面の金型を加工するマシニングセンターの進化に依存するところが大きい、量産性、コスト面等、全てに理想的な対物レンズの実用化に成功したのである。直径わずか7mm強の非球面プラスチックレンズの開発には、苦難の開発史があるので、3-2-2に、その開発に携わった技術者に敬意を表して、その経緯を記述に残した。図3-2-1にCD用対物レンズの進化の状況を示したが、現在は外径、重量共に更なる小型化技術が取り入れられて、約3mm程度までの超小型非球面プラスチック対物レンズが実用になってきている。その上に、後のDVD/CDの互換性をとる技術では、780nmと680nmの2波長のレーザー用に、非球面プラスチックの表面にホログラムが作られて、0次光と1次回折光を作り、それぞれの互換性を取る技術まで発展している。

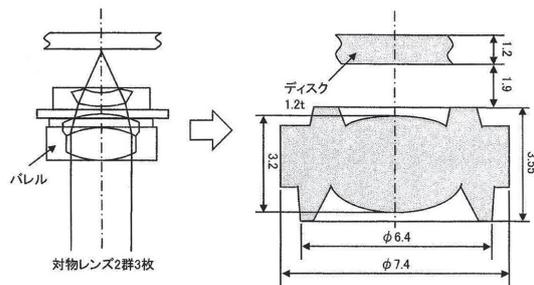


図3-2-1 CD用対物レンズの発展

さて、光ピックアップの形式は、大きく分類すると偏光型と無偏光型に分類される。図3-2-2に光ピックアップの構成を示したが、その中の (a) 偏光型は、光ピックアップの最も初期の形で、今でもディスクの信号面にレーザーパワーの必要な記録系のOPに用いられている。半導体レーザーの偏光方向は直線なので、それと合わせた方向を通過する偏光ビームスプリッター (Polarizing Beam Splitter) を配置する。半導体レーザーから出た光は1/4波長板 (Quarter Wave Plate) を通して円偏光になりディスク面に焦点を結ぶ。ディスクから戻って来た光は、再びQWPを通り直線偏光になるが、行きと違った偏光なのでPBSで90度折れ曲がりフォトダイオード (PD) の光検出器に集光する。この方式の問題点は、光の偏光を用いているため、ディスク上の偏光性の欠陥に対して、実際の欠陥長より大きく検出されてしまうことである。例えば、ディスクの成型時に異物が混入して、周辺の屈折率が変化したように見える場合は、実際の欠陥より数倍大きく検出してしまい、サーボ系の不安定さを助長してしまう。偏光系のOPはこのような欠点を持っているために、再生系のCDには、あまり使われなくなってきているが、記録面でのパワーを必要とする記録系のCD-Rシステム等は今でも主流である。

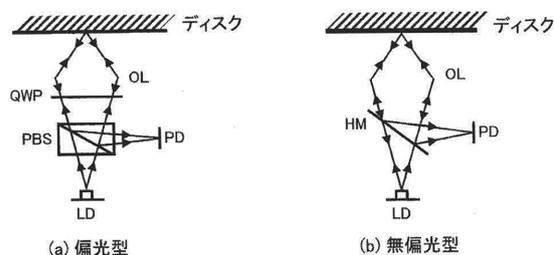


図3-2-2 光ピックアップの構成

(b) 無偏光型は偏光型のPBSをハーフミラー (Half Mirror) に置き換えて、QWPを取り去ったものである。この構造では、ディスクから反射した光がレーザーに戻ってしまいお互いに干渉してノイズ問題を起こしてしまう。半導体レーザーは、一般的にはいくつ

もの波長が混ざって発振しており、それぞれのスペクトルは発振しやすい波長の集合体と考えられている。パワーを上げていくと縦モードで単一モードに変化していくが、縦モードがマルチモードの方が、戻り光によるノイズの影響が少ないことは実験で確かめられている。近年、この戻り光に強い半導体レーザーが開発されたために、最も多く使用されている再生系の光ピックアップは、この無偏光型である。

もう一つ、光ピックアップの形式に、無限系と有限系の2方式がある。一般的に無限系とは、対物レンズに入射する光が平行に入る方式を言うが、初期のOPの光学系に良く使われた。しかし、OPを構成する光学部品が高価で多い等の欠点があり、これを改良して、最小の部品点数で成り立つ有限系の光学系が開発された。有限系方式は、対物レンズがフォーカサーボのために上下した時に発生する球面収差や、トラッキングサーボのためにラジアル方向に左右に動いた時も別の収差が発生するなどの、使いづらさはあるが、現在はほとんど有限系の光ピックアップで商品化されている。

この様な中で、最も多く光ディスクシステムを生産、発売したソニーは、OPもほとんど自社生産していたので、オプティカルピックアップの技術系統として調査し列記してみた。表3-2-1にソニーにおけるCD用光ピックアップを分類してみた。最も多く出荷されたOPは、有限系のKSS-210及びKSS-213で、最盛期には、月産500万個以上が海外で生産された。勿論、その設計は最小部品点数で、対物レンズは非球面プラスチックレンズを使って、光検出器もIC化して究極のディスクリート光ピックアップを完成させたもので、図3-2-3にその設計概略図を示した。この機種は、現在も主力機種として生産が続行されて、色々なブランドで市場導入されている。

表 3-2-1 CD用ピックアップの分類

| | 通常機種向け | 中級機種向け | 高級機種向け |
|--|---------|---------------------------------------|-----------------------|
| 無限光学系 PDIC Type (511 OPユニット化) | KSS-150 | KSS-151 | KSS-190 (ベースダイカスト) |
| 有限光学系 PDIC Type (上記のCDモデル) | KSS-210 | | |
| 有限光学系 OPS IC Type (RF Amp 3 VR Type) | KSS-240 | | |
| 無限光学系 OPS IC Type (RF Amp 3 VR Type) | | KSS-270 KSS-272 (アコースティックノイズ対策) | KSS-280 (ベースダイカスト) |
| 有限光学系 KSS-240 互換 LC Moving Mg Type | KSS-390 | | |
| 有限光学系 KSS-210 CDモデル 無調整化 | KSS-213 | | |

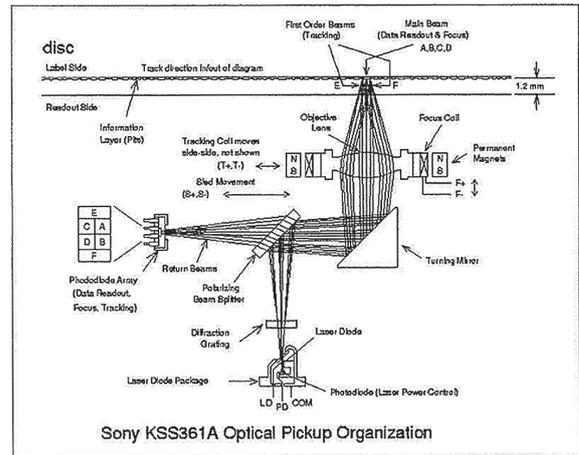


図 3-2-3 有限倍率光学系 (KSS-210, 213)

また、このような光ピックアップは実際どのようなハードウェアに使用され、技術史に名を残しているかについて調査してみた。これは、ソニーにおける一例に過ぎないが、技術の系統的な発展が明確に見えるので、1980年の試作段階から最盛期を迎える1993年までのOPとハードウェアの俯瞰図(一部)を図3-2-4(1~3)としてまとめた。この中で、1982年に発売したCDP-101に使われているOPは、無限光学系のKSS-100で、いかにも大きな対物レンズを内蔵していることが良く分る。其の仕様はKSS-150とほぼ同じであり、派生機種のKSS-151, KSS-190は当時のCDプレーヤのすべてに採用されているものである。部品点数を減らした有限系のOPが登場するのは、1990年頃からで、コストは劇的に下がり、プレーヤのビジネスが急拡大して行くことになる。その後、CD-ROMやCD-Rの発展に伴いコンピュータの端末デバイスとして不動の地位を確保して、それに伴い、光ピックアップの需要、生産は急激に拡大して、海外生産を含めて全世界で約2億台/年を超える一大産業になったのである。残念ながら、現在日本で生産しているOPは、業務用の高信頼性、高記録密度仕様の特種なものに限られる。その意味で、高付加価値な、多品種少量生産が日本の産業形態としては適しているのかもしれないが、技術の産業遺産としては、跡形もなく消え去っていて、過去の栄光だけが語り継がれているのである。

3.2.1 CD用半導体レーザー

半導体レーザーとは、文字通り「半導体」と「レーザー」を組み合わせた言葉である。英語表記で「LASER」と記し、Light Amplification by Stimulated Emission of Radiationの頭文字を取った合成語で、直訳すると「放射誘導放出による光増幅」となる。半導体レーザーが出現する以前(1970年代~1980年初頭)は、



図 3-2-4 CD 用ピックアップの系統 (1)



図 3-2-4 CD 用ピックアップの系統 (2)

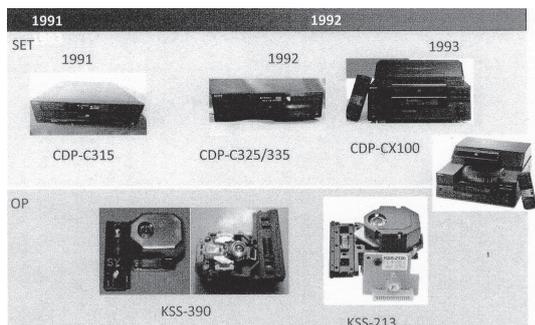


図 3-2-4 CD 用ピックアップの系統 (3)

小型のガスレーザーを用いていた。最も一般的なガスレーザーは He-Ne レーザーで波長が 632nm の赤色レーザーで、民生用には LD (レーザーディスク) 等で使用していた。しかし、外径が約 300 × 30mm もあり、その上、特殊な高圧電源を必要としていたため、CD の様な小型民生用の機器には向いていなかった。1980 年代に入り GaAs (ガリウム砒素) をベースにした赤外半導体レーザーの開発に目途がついて来たが、これを実用化し量産できたメーカーはシャープ (株) 唯一社であった。

半導体レーザーの発光の原理等については専門書が数多く出版されており、詳細は省略するが、シャープ (株) 技報によれば、半導体レーザーの研究開発は 1960 年代初頭に遡ると記述されている。実用化が始まるのが 1982 年のソニーの CDP101 に搭載された時とすると、その 20 年も前から、半導体レーザーの基礎開

発が始まっていたことになる。技術の成果は、偶然の産物ではなく、その先見性と地道な技術者の血のにじむような努力によって生み出されるものであるとの至近な証左であると心から敬意を表するものである。

シャープは独自の P 型 GaAs 基板を使用した VSIS (V-Channeled Substrate Inner Stripe) 構造の開発により、課題であった製品寿命を他社に先駆けて 4 万時間まで延ばすことに成功し、業界初めての CD プレーヤ用赤外半導体レーザーの量産に成功したのである。VSIS 構造とは、結晶内部に V 型の溝を作り、電流を流す領域を絞り込むことによって効率的にレーザー光を取り出せる方式である。図 3-2-5 にシャープで開発した VSIS 構造 (シャープ技報より) の実例を示した。

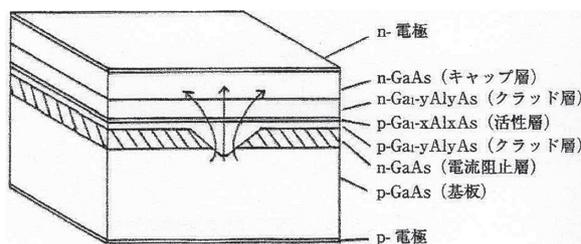


図 3-2-5 シャープの VSIS 構造

CD は、半導体レーザーの 780nm の波長をベースにシステムがすべて設計されている。この光は、一応可視光に分類されているが、実際は、暗い部屋で白い紙を用いてやっと確認できる程度の光である。CD の再生に用いられるのはディスク盤面で 0.5mW 程度、光ピックアップの利用効率から見ても、元パワーは 3~5mW もあれば十分である。しかし 1980 年代末ごろから、パソコン用の CD-ROM ドライブ、1995 年頃からは CD-R/RW ドライブが普及し始めると同時に、高倍速記録 / 再生競争が起こり始めた。それに伴い、CD-R/RW の記録速度を向上させるためには、半導体レーザーの光出力を向上させることが必須になってきた。記録するためには CD-R の最高速で基準速度の 16 倍位として、これに最適な記録波形で記録するときのピーク値は約 30mW 程度を必要とする。光学系の効率、記録波形 (Write Strategy) にも依存するが、2000 年代に入って半導体レーザーの高出力化の技術が進歩して、200mW を超えるようなレーザーが用いられるシステムも登場しはじめ、48 倍速用の CD-R 記録用の赤外高出力レーザーもシャープから実用化された。赤外半導体レーザーの宿命として、高出力化、高倍速記録、小型 (薄型)、低価格競争が起こり、これに勝ちぬくための対策が各メーカーの業務効率改善や開発スピード向上などを加速させ、体力を鍛えあげていったことにより、新たな DVD/BD 機器への継承となったのである。

一方ソニーは、1985年に、独自に開発を続けていたMOCVD技術（Metal Organic Chemical Deposition：有機金属気相成長法）を用いてCD用赤外半導体レーザーの生産を開始した。有機というのは炭素を意味し、例えば、ガリウムは $(\text{CH}_3)_3\text{Ga}$ （トリメチルガリウム）という有機金属にしたのち、キャリアガスで気体にして高温に加熱されたGaNやGaAs基板がある反応室に送られ基板上に薄い膜を成長させる。In、AlもあるいはP型、N型にするための不純物もこのような気体で供給されるため、高品質の薄膜の成長で多層構造を作る技術である。当時は、LPE（Liquid Phase Epitaxy：液相成長法）、MBE（Molecular Beam Epitaxy：分子線エピタキシー法）などの方式が各社で検討されていたが、量産性に富むMOCVDが業界の標準となり、その後、DVD読み取り用の650nm赤外半導体レーザーやBlu-Ray Disc読み取り用の450nm帯青紫色半導体レーザー生産にも応用されている。初期のレーザー製品は消費電力が大きかったために、排熱性確保の観点から直径9mmの大型パッケージを用いていたが、低消費電力化技術の開発により、現在もBlu-Ray Disc読み取りなどで用いられている直径5.6mmパッケージ製品に移行し、光ピックアップ、ハードウェアの小型化に貢献した。ソニーで、最も多く生産されたコンパクトディスク信号読み取り用半導体レーザー製品はSLD104U-Aであり、1989年から2007年までの間に累計7億本もの膨大な数量が生産された。ソニー全体では、コンパクトディスク信号読み取り用半導体レーザーに関して、DVD/CD双方の読み取り機能を備えた2波長半導体レーザー（780nm,660nmの双方を1パッケージ化）を含め、既に累計30億本の生産を行い、現在も継続生産中である。図3-2-6にソニーのCD用半導体レーザーを示した。

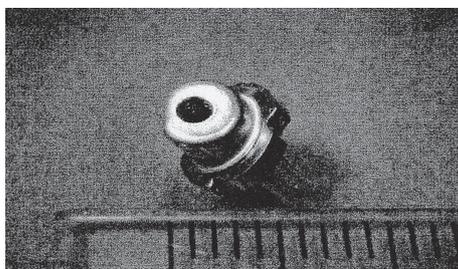


図3-2-6 ソニーCD用半導体レーザー

3.2.2 非球面プラスチック対物レンズ

前述したが、当初CDのピックアップに使われた対物レンズは、顕微鏡用対物レンズで、光学ガラスの2群3枚の仕様であり、これは当時の価格で約3000円も

した大変高価な部品であった。それでも顕微鏡メーカーとしては、大奮発した価格であったが、CDプレーヤを商品化する電機メーカーは、更に一桁も二けたも価格を切り下げたいと考えていた。電気メーカーの技術者の中に、物理や応用物理を専攻した有志が集まり、この課題に対処すべくレンズ設計に挑戦するプロジェクトが作られたのが、1984年頃のポータブルCDプレーヤを世に出した直後の事であった。勉強会を重ねコマ収差や球面収差の計算もできるようになり、実際に光学レンズを作って試行錯誤を積み上げていたので、その間に非球面レンズの可能性について、自身で設計できるレベルまで到達していた。CDで使われる光の波長は780nmのレーザー波長1本なので、レンズに色消しは不要であり、非球面を導入して設計すれば単レンズで可能であるとの結論は容易に推測がついたのである。まがりなりに設計を終了してみたものの、金型製作は試行錯誤の連続だった。しかし幸運にも恵まれて、無機のガラスを使用した非球面レンズを成型してみると、仕様合う非球面ガラス対物レンズは準備可能になっていたのである。しかし、パイロットプラントで流してみると、歩留まりの悪さやコストダウンの改善の必要に迫られた。その解決策として、このレンズをアクリル樹脂等で成型できるなら、コストダウンには最適であるとの方向が示された。しかし、やってみるとこれは一筋縄でいく仕事ではなかったのである。

オランダのアイントホーヘン市にあるフィリップスの光学研究室の棚には、プラスチック対物レンズの失敗作が大量に並んでいたという。フィリップスの担当技術者は訪れる日本人技術者にこう言ったという。「我々がこれほど努力しても完成できなかったのだから、日本人がやっても無理でしょう。悪いことは言わないから、ピックアップレンズのプラスチック化などという無駄な努力はおやめなさい。」サブミクロンの精度が要求されるCDのピックアップレンズは、メガネやファインダーのプラスチック化とは精度の次元が違い、空気中の湿度までもが大問題となっていたのである。数えきれない失敗が繰り返されて、多くの企業がピックアップレンズのプラスチック化から手を引き始めた中で、唯一、ソニーだけは諦めなかった。ソニーは自身の開発は続行する一方で、保険の意味もあったのか、レンズ設計に長年の技術蓄積のあるコニカに資金を提供し、かつて一眼レフ用のズームレンズの設計を率いていた小島忠グループにプロジェクトを継続してもらった。丁度、一眼レフカメラの方向転換を模索していた小島グループは、この業務に飛びついたものの、途轍もない試行錯誤を繰り返すことになったが、

努力が実り、CD用の非球面プラスチック対物レンズの開発について成功したのである。成功の背景には、昭和30年代、吉田正太郎による非球面レンズの研究、試作（東北大学化学計測研究報告）があった。小島グループは、吉田の研究にいち早く気づき、吉田の磨いた非球面アプラナートレンズ（球面収差とコマ収差の補正されたレンズ）を縮小させた相似形に発展させれば、非球面プラスチック対物レンズは可能であることを実証したのである。吉田のアプラナートレンズは、突然脚光を浴びて、30年も経っているにもかかわらず過酷な特許論争の中に呼び戻された。しかし、コニカの粘り勝ちの結果、日米で特許が成立し、コニカはCD用非球面プラスチック対物レンズで独占的なシェアを確保したのである。

やがて、世界的なブームを巻き起こしたソニーのCDドライブの全てに、コニカの開発した非球面プラスチック対物レンズが搭載されるようになった。月産100万個から200万個はあっという間に過ぎて、月産1000万個という膨大な数量を量産するようになった。生産量の増大につれ、レンズの単価は劇的に下がり、一個300円から始まり、100円、50円はとっくの昔に過ぎ去ったが、コニカの独占状態が続いていたのである。しかし、ソニーにとっては、このようなキーデバイスをコニカ社に握られてしまえば、「ビジネス上の禍根を残す（キーデバイスは2社購買が原則）」と考えるようになり、自社開発していた技術を復活させて、同時に、自社生産の可能性を検討し始めたのである。

もともと一眼レフ用ズームレンズの設計者であったコニカの小島忠は、コンパクトディスク用の非球面プラスチック対物レンズの開発が認められ藍綬褒章を受章した。コニカ製のCD用非球面プラスチック対物レンズの累積生産量は、5億個をはるかに超えるまでになった。その意味で、コニカの対物レンズなくして、今日のCDの普及は望めなかったであろうとも言われている。図3-2-7にコニカのCD用非球面プラスチック対物レンズを示した。

一方、ソニーの自社開発の非球面プラスチック対物レンズの開発は、難航していた。特に最後の工程である蒸着の段階で、“にっちもさっちも”いなくなっていた。既に、シンガポールに専用の新鋭工場を建設しており、時間との戦いを続けていたのである。非球面プラスチックレンズの製造工程の中で、最も重要な技術ノウハウに反射防止膜の蒸着工程がある。プラスチックレンズの表面から、自由に水蒸気が入り出りできるような複数の割れ目を伴ったコーティングをすると、レンズの内部には玉ねぎのような屈折率分布が生ずるが、結像性能は保たれる

というコニカの研究開発結果を知らなかったために、非球面プラスチックレンズ内部で屈折率に歪を生じて、結像性能が仕様に達しなかったのである。ソニー技術陣の昼夜をおかない奮闘によって、この無数に割れ目のある蒸着法が開発され、ソニーのシンガポール工場は何とか量産が立ちあがったのだが、その意味で、コニカの非球面プラスチック対物レンズの最大のノウハウは水蒸気の呼吸機構であったのである。

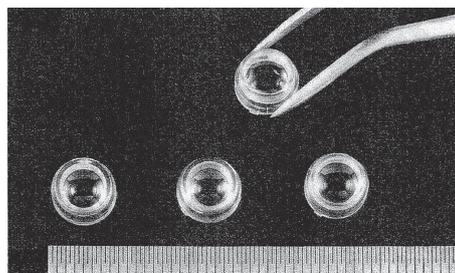


図3-2-7 コニカのCD用非球面プラスチックレンズ

3.3 デジタル信号処理方式の決定

基本的に、オーディオのデジタル化は1982年のCD-DAディスクの発売から始まった。広辞苑によると、デジタル化とは、ある量又はデータを、有限桁の数字列（例えば2進法）として表現する事と記述されている。一方、アナログとは、ある量又はデータを、連続して変化しうる物理量（電圧・電流など）で表現する事とも書かれている。温度、湿度、長さや重さなど、自然界に存在する物理量は、どれも連続したアナログ量である。それに対して、デジタルは、ある精度の範囲で、そのアナログ量に最も近い値を、数字で表したものと言える。数字で表された値は、コンピュータで扱うことが出来るために、その値を記録、保存することが出来て、その値は変化することはない。即ち、映像や音声デジタル方式で、記録・送信・配布・再生することによっても、データは変わらず何度でも同じ状態で、見たり聞いたりすることが出来るようになった訳で、アナログのように劣化したり、ノイズが入ってデータが変化するようなことはなくなるといって非常に大きな利点がある。オーディオの再生ではコンサートホールやスタジオでの録音から、音声を聞くユーザーまでの過程において、編集、複製、再生と数多くのプロセスがあり、従来のアナログオーディオでは、その工程ごとに少しずつではあるが音質の劣化を伴っていた。しかし、CDで始まるデジタルオーディオにおいては、最初に数値化の際の誤差はあるものの、以降のプロセスでは全く劣化が生じない構成が初めて可能になったのである。

一般的な、デジタルオーディオ録音再生機の構成については、図 3-3-1 に示したが、記録系に入ってきたアナログ信号は、ラインアンプ、LPF (Low Pass Filter) を経て、標本化回路 (サンプルホールド回路)、量子化回路 (A/D コンバータ) によってデジタル信号に変換される。その後、誤り訂正符号を付加して変調などのデジタル信号処理を行い、光ディスク等の記録媒体に記録される。一方、再生時は、記録媒体から検出した信号を、復調、誤り訂正、デジタルフィルタなどのデジタル信号処理を行った後に、D/A コンバータにてアナログ信号に変換する。

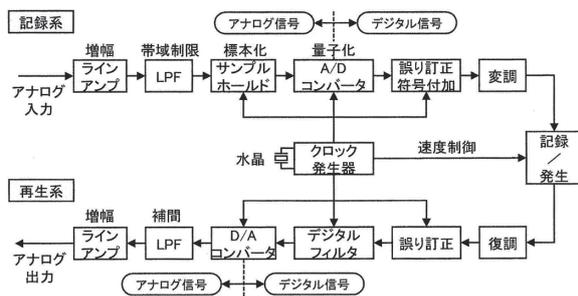


図 3-3-1 デジタルオーディオ録音・再生系の構成

元来、音は、大気圧の微妙な気圧変動であり、その振幅は、時間と共に連続的に変化するアナログ信号である。実際のアナログ記録では、記録媒体の S/N、周波数特性、非直線歪等の影響を直接受け、回転系や駆動系の回転ムラでワウ・フラッタや変調雑音が発生することや、記録媒体の機械的損傷により雑音が発生するなどの課題が多かった。これに対して、デジタル記録では、オーディオ信号を離散的数値に変換して記録するため、先述した問題を克服できるだけでなく、原理的にデジタルコピーによる劣化がなく、多少のエラーを訂正できる等の特徴を有しているのである。

この章では、デジタルオーディオ (PCM) の根幹をなす仕組みや量子化、サンプリング周波数に対して 3-3-1 で記述し、3-3-2 で CD の変調方式である EFM (Eight to Fourteen Modulation) について記述する。又、3-3-3 にエラー訂正方式である CIRC (Cross Interleave Reed Solomon Code) について、概略を記述する。

3.3.1 デジタルオーディオ (PCM) の仕組み

A) 量子化

デジタルオーディオの根幹をなす PCM (Pulse Code Modulation) とは、CD などで使われるデジタルの信号方式である。CD では量子化は 16 ビットであり、16 桁の 2 進数で 1 と 0 が 16 個集まったものになり、最大値は 1111111111111111、それを 10 進数で

表すと 65535 となる。デジタルの語源は、ラテン語の「指 (Digitus)」からと言われている。一般に、2 進数の桁数の事を「ビット」と呼ぶが、ちなみに、両方の手で扱うことのできる数は 2 進数で 10 桁 (10 ビット) だから、10 進数に換算 (1 + 2 + 4 + 8 + 16 + 32 + 64 + 128 + 256 + 512) すると 1023 になる。表 3-3-1 に 10 進数との対比として 2 進数と 16 進数の表を示したが、16 進数では、10 進数の 10 から 15 までを表す値も一桁の文字で表さねばならないので、足りない部分にはアルファベットが用いられて、10 進数の 10 は 16 進数で A、同様に 11 は B、12 は C、13 は D、14 は E、15 は F があてはめられて表に示したようになる。また、2 桁の 16 進数は FF の値まであって、それを 10 進数で表すと 255 である。この時の、繰り上がった時を“の位”と呼び、桁が上がったときの何倍になったかの数値を表す。デジタル機器では 2 進数が用いられており、2 進数は 16 進数との親和性が高く、繰り上がりのタイミングと桁数を比較すると、16 進数の 1 桁の数値 (最大値 F) は 2 進数では 1111 までの 4 桁 (4 ビット) で表せる。又、2 桁の数値 (最大値 FF) は 2 進数の 11111111 の 8 桁 (8 ビット) で表せる。以下、16 進数で 1 桁繰り上がる度に、2 進数では 4 桁 (4 ビット) ずつ増加していく。表 3-3-1 に 2 進数と 10 進数と 16 進数のテーブルを示した。

表 3-3-1 2 進数と 10 進数と 16 進数

| 10進数 | 2進数 | 16進数 |
|-------|------------------|-------|
| 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 1 |
| 2 | 10 | 2 |
| 3 | 11 | 3 |
| 4 | 100 | 4 |
| 5 | 101 | 5 |
| 6 | 110 | 6 |
| 7 | 111 | 7 |
| 8 | 1000 | 8 |
| 9 | 1001 | 9 |
| 10 | 1010 | A |
| 11 | 1011 | B |
| 12 | 1100 | C |
| 13 | 1101 | D |
| 14 | 1110 | E |
| 15 | 1111 | F |
| 16 | 10000 | 10 |
| 17 | 10001 | 11 |
| 18 | 10010 | 12 |
| 19 | 10011 | 13 |
| 20 | 10100 | 14 |
| 21 | 10101 | 15 |
| 22 | 10110 | 16 |
| 23 | 10111 | 17 |
| 24 | 11000 | 18 |
| 25 | 11001 | 19 |
| 26 | 11010 | 1A |
| 27 | 11011 | 1B |
| 28 | 11100 | 1C |
| 29 | 11101 | 1D |
| 30 | 11110 | 1E |
| 31 | 11111 | 1F |
| 32 | 100000 | 20 |
| 33 | 100001 | 21 |
| 63 | 111111 | 3F |
| 64 | 1000000 | 40 |
| 127 | 1111111 | 7F |
| 128 | 10000000 | 80 |
| 255 | 11111111 | FF |
| 256 | 100000000 | 100 |
| 1023 | 111111111 | 3FF |
| 1024 | 1000000000 | 400 |
| 4095 | 1111111111 | FFF |
| 4096 | 10000000000 | 1000 |
| 65535 | 1111111111111111 | FFFF |
| 65536 | 1000000000000000 | 10000 |

デジタルで動作している電子機器は、“有り (1)”か“無し (0)”の2つの数字しか使用しない2進数を用いて、それを高速に処理することにより大きな数値や文字情報、グラフィックスや動画、そして音楽等も表している。そもそも、音はモノや空気が振動する波である。波が大きくなると、0を中心として上下に動く。この上の部分をプラスの値、下の部分をマイナスの値で表す。2進数でマイナスの値を表すために「2の補数 (2's Complement)」という表現方法を用いる。即ち、2進数でマイナスの値の算出方法は“元のビットをすべて反転させて1を足す”ことで対応できる。“2の補数”の表し方でプラスの一番大きな値は、111111111111ではなく011111111111となり、10進数では32767となり、マイナスの一番小さな値は、100000000000となり、10進数では-32768になる。その意味で、CDに使われているPCMは16ビット (16桁)の2進数を用いて、0を中心として32767から-32768までの65536段階の値を持つデジタルデータとすることが出来る。

音の大きさは元々アナログ信号で、それをマイクでとると、電気信号に変換されて電圧の大小で表わされる。それをデジタルデータに変換することをAD変換 (Analog to Digital Conversion) と言いアナログ音の大きさ (電圧) を前述した16ビットの値の一番近い値に置き換えていく。この様な、音の大きさを捉えてデジタル化する工程を量子化と言う。

実際に、AD変換する際の音 (アナログ) の電圧値は使用する部品や回路構成によって異なるが、一般的には、5Vや3.3Vという値を使用するので、この値を65535段階に細かく分けると、一段階は $5/65535 = 0.076\text{mv}$ (76 μv) になる。76 μv の精度で、一番近いデジタルの値に置き換えることになるのである。

B) サンプリング周波数 (標本化)

時間と共に連続的に変化する信号を、一定時間間隔ごとの値で代表させる作業を標本化と呼ぶ。標本化により、連続信号は時間に関して不連続な離散信号となる。この離散信号を元の滑らかな信号に戻す操作を「補間」と言い、標本化列をLPFに通すことで達成する。一般に、人間の音が聞こえる可聴範囲 (帯域) は約20Hz~約20,000Hzと言われていて、20Hz以下の音を超低周波、20,000Hz以上の音を超音波と呼ぶ。標本化補完の過程において、信号は系の再現の条件として、有名な「シャノンの定理」がある。信号の帯域をB、標本化周波数をfとすると、 $B \text{ (Hz)} \leq f/2 \text{ (Hz)}$ が成立する範囲であれば、歪なく再生でき

るというものである。即ち、「元の信号の最大周波数の2倍より大きな周波数 (頻度) で取り込めば、元の信号の情報を漏れなくデジタル化できる」ということだが、実際は10%程度の余裕をみた周波数帯域を選択している。この原理から、人間の聞こえる周波数は最大で約20,000Hzなので、40,000Hzより大きな周波数で取り込めば良いことになる。CDで使われているPCMでは、前述したが、VTRとの親和性から44,100Hzという周波数が用いられており、一秒間に44,100回の頻度で信号が取り込まれている。この工程を標本化 (サンプリング) と呼び、その周波数を標本化周波数 (サンプリング周波数) と呼ぶ。図3-3-2に量子化とサンプリングの概念図を示したが、グラフの縦軸の細かさが、量子化数 (ビット数) で決まり、横軸の細かさは、サンプリング周波数で決まる。基本的には、縦方向と横方向の数がかともに大きく細かくなればなる程、高精度に表すことが出来る。CDで採用されている16ビット、44.1kHzという規格は、縦軸は65,536段階、横軸は一秒間に44,100段階という細かさになる。

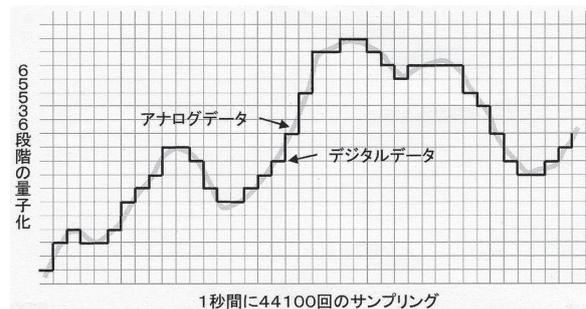


図3-3-2 量子化とサンプリングの概念図

量子化された標本値を、振幅に対して離散的に数値化すると、nビットの量子化で表現できるダイナミックレンジは、 $D \text{ (dB)} = 20\text{Log}2^n + 1.76 \text{ (dB)}$ で表されるので、CDではn = 16のため、 $D = 97.8 \text{ (dB)}$ が理論上のダイナミックレンジとなる。また、量子化に伴う誤差の量子化雑音や折り返し雑音等の処理は、デジタル信号処理技術では重要であると同時に、LPFの設計にも細心の注意が払われた。技術的には、LPFを20kHzから急峻に落とすのではなく、44.1kHzの8倍以上のオーバーサンプリングが施されて、その半分の周波数の176kHzまでなだらかな曲線を持つオーバーサンプリングLPFを取り込むことで、折り返し雑音や20kHz近傍の群遅延の発生を防ぎ、音質の変化を最小限にするような技術が取り込まれていた。

3.3.2 EFM (Eight to Fourteen Modulation) 変調方式

変調とは、与えられた周波数帯域で、与えられた情報を安定に記録再生できるように変換する事、即ち、与えられた周波数帯域と信号のマッチングを取ることである。具体的にいうと、CD プレーヤがデータを読み取っていく際に、データが記録されているトラックを見失わないようにするのが EFM (Eight to Fourteen Modulation) という技術のポイントである。

CD の盤面には渦巻き状にデータが刻まれている。2 進数のデジタルデータなので、データのあるビットが 1、何もないランドを 0 と読むことになる。CD プレーヤは、ビットを読み取りながら、アナログプレーヤで表現されている針飛びのないように、また、隣のトラックにジャンプしてしまわないようにトラックの位置を追いかける自動追尾制御 (サーボ) をかける。そこで、CD 盤面にビットが刻まれていれば、それを基準に自動追尾できるのだが、ビットが暫くないような区間があると、信号を追うことが出来なくなってしまう。端的にいうと、そのような状態を防ぐために開発されたのが EFM 技術である。

CD 盤面に記録されているデータは、本来は 8 ビット単位になっており、8 ビットのデータは、00000000 から 11111111 の 256 個の値を取る。例えば、その内の 00000000 がしばらく続いてしまうと、ビットがなくランドばかりの期間が出来てしまう。そこで、256 個の値を、14 ビットの適度に 1 と 0 が入った値に一度変換して、それを盤面に記録する。14 ビットの 163,384 個のデータの中から 8 ビットの 256 個分のデータを選んでいるので、適度に 1 と 0 が含まれるデータだけを用いることが出来る。これは表 3-3-2 に示した EFM 変換テーブルに基づいて対応され、8 ビット、1 シンボルが 14 ビットで表される特定のパターンに変換されるのである。8 ビットが 00000000 であれば、14 ビットの 01001000100000 に変換して記録し、そのデータが続いたとしても 1 が適度な割合で出現するようにしている。一方、CD プレーヤに読み込まれた 14 ビットの 01001000100000 は、変換テーブルから逆に変換されて、8 ビットの 00000000 に戻される。

EFM 変調されたデジタルデータは、光ピックアップの様な周波数特性を持ったシステムで書き込まれるが、8 ビット (256 通り) を 14 ビット (16,384 通り) へ変換するとき、ディスク上のビットがある程度の形状間隔になるように、チャンネルビットの "1" で反転、"0" で無反転とし 1 と 1 の間の 0 の数が 2 個以上 10 個以下の条件で選び、257 通りを得ている。そ

表 3-3-2 EFM 変換テーブルの例

| データ(10進数) | 8ビットデータ(2進数) | 14ビットに変換されたデータ |
|-----------|--------------|----------------|
| 0 | 00000000 | 01001000100000 |
| 1 | 00000001 | 10000100000000 |
| 2 | 00000010 | 10010000100000 |
| 3 | 00000011 | 10001000100000 |
| 4 | 00000100 | 01000100000000 |
| 5 | 00000101 | 00000100010000 |
| 6 | 00000110 | 00010000100000 |
| 7 | 00000111 | 00100100000000 |
| 8 | 00001000 | 01001001000000 |
| 9 | 00001001 | 10000001000000 |
| 10 | 00001010 | 10010001000000 |
| 11 | 00001011 | 10001001000000 |
| 12 | 00001100 | 01000001000000 |
| 13 | 00001101 | 00000001000000 |
| 14 | 00001110 | 00010001000000 |
| 15 | 00001111 | 00100001000000 |
| 16 | 00010000 | 10000000100000 |
| 17 | 00010001 | 10000010000000 |

うして得られた EFM 信号は、チャンネルビットの周期を T とすると最小周期 3T 最大周期 11T のパルス列となる。書き込まれたビットの長さは T min や T max として表現されるが、基準となるクロックの検出の観点からは、T min は長ければ長い方がよく、T max は短ければ短い方がシステムは安定する。実際の CD のビットの長さは、EFM 変調後、線速が 1.25 m/s の場合、0.87 μm、1.16 μm、1.45 μm、1.74 μm、2.02 μm、2.31μm、2.60 μm、2.89 μm、3.18 μm の 9 種類になる。

この様にしてできた EFM 信号に、サブコード (Sub Code) と呼ばれる音楽データ以外の制御信号 1B (8 ビット) と、フレーム同期信号を付加して、CD の記録信号が完成する。1 フレームは 588 チャンネルビットで構成され、14 ビットに変換された各シンボルの間に、"1" の連続や直流成分の発生を防ぐ目的で 3 ビット分のガードを設けて、データ生成時にリアルタイム処理を行っている。この様に、1 フレーム内のチャンネルビット数は、 $14 \times 33 + 24 = 588$ (bit/FRAME) となり、チャンネルビット周波数は、 $7.35\text{kHz} \times 588 = 4.3218 \text{ MHz}$ となる。これは、CD プレーヤで発生させる読み取りクロック周波数である。

3.3.3 エラー訂正方式 (CIRC)

CIRC は、Cross Interleaved Read Solomon Code とよび、「クロスインターリーブ」と「リードソロモン」という二つの方式を組み合わせたエラー訂正方式で、「Red Book」で初めて採用されたものである。エラー訂正は高度な数学理論をベースにしており、その部分は専門書にまかせるとして、ここではその概略について記述する。リードソロモン (符号化) というのは、データワード (情報ワード) とパリティワード (冗長ワードあるいは検査ワード) の組み合わせを行う誤

り訂正で、短く高頻度に発生するようなエラー（ランダムエラー）に対して、強力な訂正能力を持つ。一方、インターリーブとは、ディスクメディアに起こりやすい長いエラー（バーストエラー）の訂正に効果がある。インターリーブとは「織り込む」という意味で、インターリーブそのものは、データをばらばらにしてエラーが分散するように配置することである。そういう風に配置しておいて、そのデータブロックにリードソロモン符号化を組み合わせたものである。図 3-3-3 にインターリーブの例を示す。

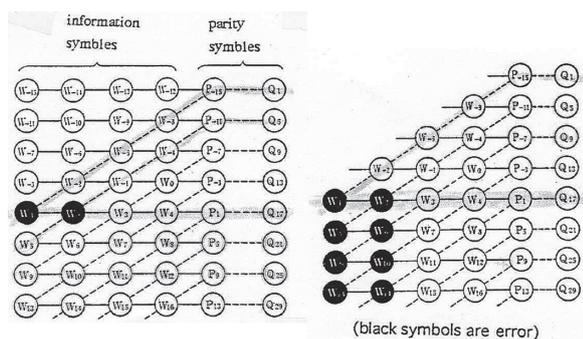


図 3-3-3 4ワードのインターリーブ

エラー訂正の概念については、スーパーマーケットのレシートを例にとって記述してみる。

スーパーで A = 200 円、B = 100 円、C = 400 円、D = 300 円の買い物をしてレシートは合計 1,000 円であった。このレシートが汚れたり、破けたりして読めなくなった場合に、どのようにして元のレシートを復元するかを想定してみる。

①読み取れない部分が特定できる場合

$$200 \text{ 円} + 「?」 + 400 \text{ 円} + 300 \text{ 円} = 1000 \text{ 円}$$

即ち、1行が読めないと判断できた場合（1ワード消失）は合計より合算して「?」は 100 円と算出でき、完全に復元できる（誤り訂正可能）。しかし、「1」を「2」と読んでしまう場合（1ワード誤り）には、どこが異常かは分からない（誤り検出可能）、又2行以上の誤りがあった場合は誤りの検出が不可能である。このレシートのデータは4ワード、検査1ワードなので、別の言い方をすれば、次のようなシステムと言える。

- i) 1ワード消失は訂正可能
- ii) 1ワード誤りは検出可能だが訂正不可能
- iii) 2ワード誤りは検出不可能

そこで、検査ワードを2ワード構成として、合計を P、新たに追加した重み付け和を Q として、 $P = A + B + C + D$ 、 $Q = A + 2B + 3C + 4D$ としてみる。

② 誤って読み取った場合（誤った部分が特定できない場合）

$$\text{a) } 200 \text{ 円} + 「200 \text{ 円}」 + 400 \text{ 円} + 300 \text{ 円} = 1100 \text{ 円} \text{ (P)}$$

（本来は 1000 円で差額が 100 円）

$$\text{b) } 200 \text{ 円} \times 1 + 「200」 \times 2 + 400 \text{ 円} \times 3 + 300 \text{ 円} \times 4 = 3000 \text{ 円} \text{ (Q)}$$

（本来は B ; 100×2 で $Q = 2800$ 円、読み取り差額 200 円）

ここから、 $\text{b} \div \text{a} = 2$ 、 $\text{b} - \text{a} = 100$ 円が得られて、2番目で正しい数値は 100 円ということが判る。即ち、以下のように検査ワード Q の追加が訂正能力を向上させたことになる。

- i) 2ワード消失は訂正可能
- ii) 1ワード誤りは訂正可能
- iii) 2ワード誤りは検出可能となり、

ここで追加した P、Q をパリティ（Parity）ワードと呼び、このような符号構成をリードソロモンの符号化と呼んでいる。

一方、インターリーブとクロスインターリーブ符号の概略について記述する。光ディスクのドロップアウトによるデータの欠落は、2ワード以上になる時もあり、前述の方法でも訂正不能に陥ることがある。このために、ワード配列を一度バラバラにして、同じブロックワードが隣同士にならぬように再配列してから記録すれば、2ワード誤りの確率を減らすことができる。ワード配列をばらばらにすることをインターリーブ（Interleave）と呼んでいる。CD の場合、エラーは、次のようなものが主な要因である。

- ①ディスクの製造過程で発生するもの
- ②ディスク表面についた傷や汚れ
- ③サーボ又は同期の乱れ等

①の場合は主にランダムエラー（短い欠陥）として高い頻度で発生し、②と③の場合はバーストエラー（長い欠陥）として、頻度は低い傾向にあり、誤り訂正方式としては、この分布に十分に配慮したランダムエラー訂正に強いリードソロモン符号と、バーストエラーに強いクロスインターリーブ方式を組み合わせたクロスインターリーブ・リードソロモン方式（CIRC）を採用した。

この CIRC を使ったエラー訂正能力のビット誤りが生じる確率は、「ディスク一枚につき一か所」と言われる程度である。むしろその場合は誤り訂正が働いて、正確な信号を得られるようになっているが、もし、ディスクに傷をつけたりなどして訂正範囲を超えたと

してもディスク上の最大長 2.4mm までの傷は消失訂正可能である。さらに CD-DA の出力は連続したアナログ信号であり、隣接するサンプルとの間に高い相関があるので、前後の正しいデータから類推して信号の補完が可能で、補完後も聴感上はほとんど気にならないレベルになる。

しかし、CD の本質が、DAD (Digital Audio Disc) だけではなく DDD (Digital Data Disc) であることは、「レッドブック」が規格化された時点で明確であり、すぐにコンピュータの大容量専用メモリーに応用するための規格作りがスタートした。後述するが、このコンピュータに利用するための CD-ROM 規格書は、「Yellow Book」と呼ばれている。オーディオディスクをコンピュータのメモリーに転用しようとするとき、一番問題になるのがエラー訂正である。コンピュータのデータは、1 ビットたりとも「誤り」は許されず、より強力なエラーの検出と訂正の仕組みが必要になってくる。そこで、CIRC に加えて「Yellow Book」に組み込まれたのが、EDC (Error Detection Code = エラー検出コード) と ECC (Error Correction Code = エラー訂正コード) と呼ばれるものである。EDC はチェックサムの様なものでエラーの有無をチェックして、もしエラーが見つかったら、ECC にある訂正コードを利用してコレクションするものである。両システムの効果は、ランダムエラーのビット誤り率が、CIRC だけの時より約 1000 倍も向上することである。このレベルはコンピュータデータを扱う「Yellow Book (CD-ROM)」には必要な性能であった。その為に、現在発売されているすべての PC 用 CD-R/RW ドライブ等には、エラー訂正の CIRC に加えて EDC と ECC システムが搭載されていて、CD-R や CD-RW コンテンツを作成 (データを書き込む) 時は、自動的にそのデータは、強力な誤り訂正が組み込まれるようになっている。

CIRC の構成は、データの流れを符号器に沿って説明すると、A/D から 12 ワード (L,R6 サンプル、1 サンプル = 2 ワード、1 ワード = 16 ビット) の入力があると、まずワードが、上位シンボル (A)・下位シンボル (B) の 2 シンボル (1 シンボル = 8 ビット) に分けられ、24 シンボルに変換される。次に 2 シンボル遅延とスクランブルが施され、C2 符号器にはいり、パリティが 4 シンボル生成されて、28 シンボルとなる。この 28 シンボルにインターリーブがかけられて、C1 符号器に入り、パリティがさらに 4 シンボル生成されて 32 シンボルになる。そして、1 シンボ

ルおきに 1 シンボル遅延がなされて、この 2 シンボルが 1 フレームのデータとして送出される。この送出された 8 ビットデータが EFM され、CD に記録 (実際のフレームは、これに同期信号、サブコードが付加されている) されるのである。図 3-3-4 に CIRC 符号器の概要を示したが、信号の復号の場合はこの逆の構成になる。

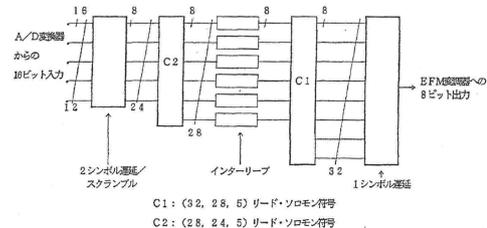


図 3-3-4 CIRC 符号器の概要

3.4 CD メディアの物理 (論理) フォーマット

記録メディアを汎用性のある現実のメディアとして利用するためには、様々な約束ごとが必要である。例えば、一枚の白紙があり、その紙のサイズが A4 で厚さが 0.1mm と指定されると、ようやく物理的な仕様が判明する。これが“物理フォーマット”である。一方、CD メディア (CD-ROM) にデータを書き込もうとした時には物理フォーマットは勿論の事、論理フォーマット (ファイルシステム) が決まっていなければ、何も書き込むことはできない。ここでは、基本的な CD メディアのサブコードやファイル構造から、ファイルシステムまでを記述する。尚、実際の書き込みの技術のファイル構造等については、第 7 章の「記録型 CD の登場」で記述する。図 3-4-1 に CD ファミリーのトラック構造とブロック構造について、図式化して表示した。

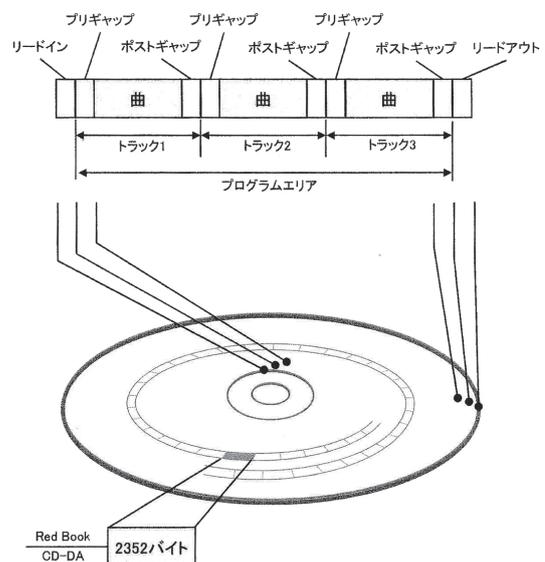


図 3-4-1 CD ファミリーのトラック構造とブロック構造

3.4.1 CD-DAのサブコード

CD-DAのディスクには楽曲は「トラック」という曲単位で記録されている。CDメディアに共通するのが、制御情報を記録したサブコードである。このサブコードの記録に必要な最小単位がフレーム（サブコード・フレーム）と呼ばれる。言い換えれば、CD-DAの音楽トラックは複数のフレームの集合である。CDメディアの再生と制御に必要な情報がサブコードであると規定してあるが、CD-DAでは、FFM変調されたデジタル音楽データは、98個のEFMフレームの集合で管理される。これがサブコードフレームである。図3-4-2に少し詳細だが、EFMフレームとサブコードフレームの関係を表示した。1個のEFMフレームには24バイト(Byte)のオーディオデータが記録されている。12バイトずつにC2、C1エラーコレクションパリティが付加されて1EFMフレームを構成する。この集合が98個纏まりEFMフレームを構成するのである。即ち、EFMフレーム×98=1サブコード、サブコードフレームの記録容量=24バイト×98=2352バイトになる。音楽トラックは、複数のサブコードフレームによって構成されるが、音楽の時間によってサブコー

ドの合計数が異なる。サブコード情報は全体で8ビットであるが、ディスクの再生によって、サブコードも連続して再生されるため、チャンネルという単位で管理されている。このサブコードチャンネルにはP~Wの8つで、そのうち、CD-DAメディアで使用されるのは、P,Qチャンネルである。R~WチャンネルはサブコードCD以外の他のCDファミリーには使用されていない。

Pチャンネルには、記録の開始を示すリードインエリアと終了を示すリードアウトエリア、及び音楽トラックの間隔が記録されている。Qチャンネルには、CDメディアに記録された楽曲を示すTOC (Table Of Contents)、音楽トラック番号、インデックス番号、トラックの時間、ディスクの時間などの情報が記録されている。図3-4-3にPQチャンネルの概略図を示したが、CD-DAプレーヤの主要な制御信号は、このチャンネルで表示され、すべてのシステムコントロールの基準として活用されている。又、ISRC (International Standard of Record Code) の記録にも利用されている。

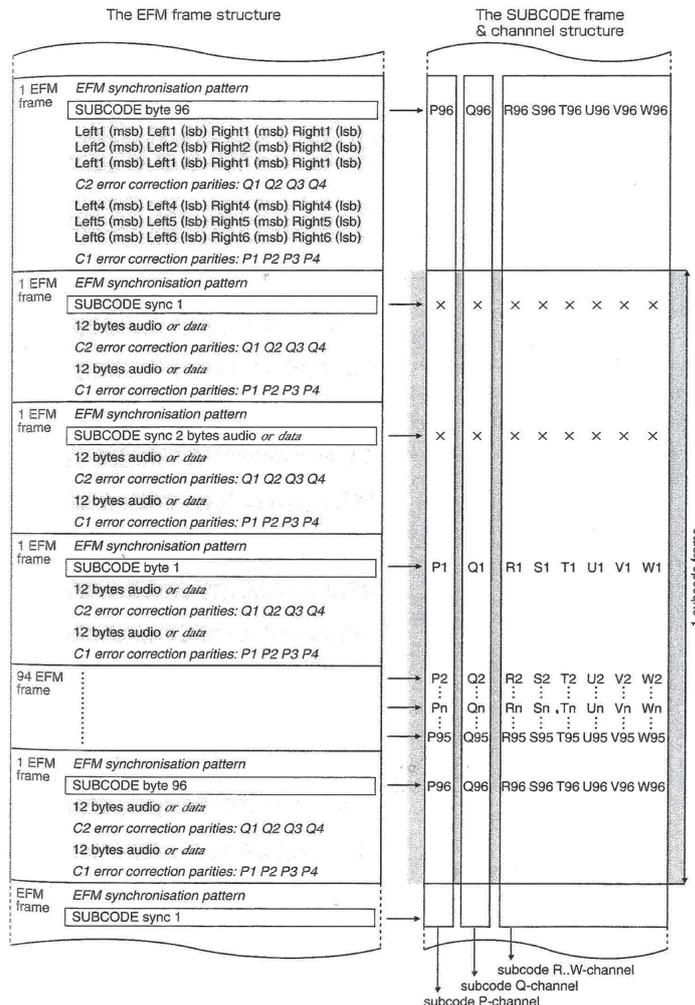


図3-4-2 EFMフレームとサブコードフレームの関係

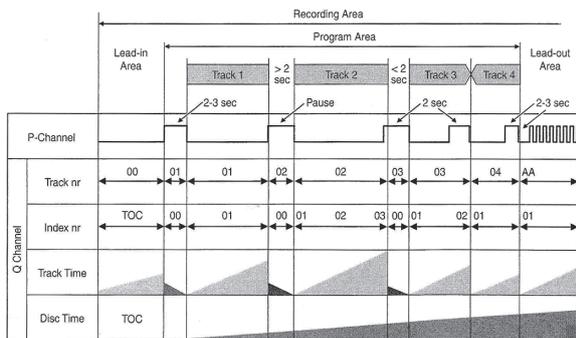


図 3-4-3 CD-DA のサブコード P, Q チャンネルの関係

これに対して、R～W チャンネルは、サブコード CD として規格化されて、CD-G (CD Graphic 静止画)、CD テキスト (テキスト情報)、CD-MIDI (MIDI 信号) 等として利用された。代表的な CD-G は CD-DA の音楽を再生しながら、同時に CD-G の楽曲の再生にシンクロしたカラオケ動画が再生できたため、一時はカラオケ業界で広く利用された。一方、CD テキストは CD-DA のディスクにアルバムのタイトル、楽曲名、アーティスト名、メッセージなどの情報を記録したもので、高付加価値 CD-DA ディスクとして期待されたが、オーサリングの苦勞が価格に反映できずに一部の普及に留まった。又、CD-MIDI は電子楽器の標準的なインターフェースである MIDI 形式のデータを記録したもので、MIDI 接続のできる電子楽器との合奏等に利用できたが、実際は、会場の照明や音楽機材のコントロールを MIDI で制御するような用途に使われ、一般的にはあまり普及しなかった。

3.4.2 CD-ROM の技術開発

最も普及した CD-ROM に代表される CD メディアでも、ディスク上のデータはサブコードによって制御されるので、CD-ROM のセクターフォーマットについて簡単に記述する。一般に CD-DA では 1 秒間に 75 フレームのデータが転送されるが、CD-ROM の場合このフレーム単位をセクターと呼んでいる。又、CD-ROM の場合、物理的には 1 フレーム 2352 バイトを最低単位として記録されているが、この 1 フレームに記録するデータの構造によって 2 種類のモードが存在する。

- ① モード (Mode) 1 は、セクターの一部にエラー訂正に必要なデータを記録するもので、ファイルやプログラムなど一般的なデータの記録に使うモードで、1 フレームあたりのユーザーデータの記録容量は 2048 バイトになる。これは $2048 \text{ バイト} = 2352 - 12 (\text{Sync}) - 4 (\text{Header}) - 288 (\text{Auxiliary, ECC を含む}) \text{ バイト}$ で算出される。

そのため、74 分のディスクを使用した CD-ROM の記録容量は約 650 メガバイトになる。殆どのデータ用の CD-ROM はこのモード 1 の構造をしている。

- ② モード 2 は、エラー訂正のデータを記録しないもので、ビデオやオーディオ信号など読み取りエラーが生じても影響の少ないデータの記録に適している。モード 2 のメリットは、モード 1 でエラー訂正用に使われていた領域もユーザーデータエリアとして使用できるために、記録容量は 2336 バイトと 15% 程度増量される。これは $2336 \text{ バイト} = 2352 - 12 (\text{Sync}) - 4 (\text{Header})$ で算出される。

一方、物理フォーマットの中で、同じディスク内にデータとオーディオ / ビデオデータは同じトラック内に混在してはならないという規定がある。これではいわゆるマルチメディアコンテンツは作れないことになってしまうので、提案されたのがモード 2 をフォーム (Form) 1 とフォーム 2 に分けてモード 2 のまま、データとオーディオ / ビデオデータを混在出来るようにしたものである。具体的には、図 3-4-4 に示したように、サブヘッダーを指定してフォームを指定させるもので、このサブヘッダーには、音や映像と同期をとって再生できる機能を組み込んだ点が大きな特徴である。又、この Mode2 Form2 のストラクチャーはユニークな変遷をたどり、CPU (モトローラ MC68000 系) と OS (リアルタイム OS, OS-9) を規定して、CD-I (CD-Interactive) としてまとめられ、一般的には「グリーンブック」と呼ばれた規格になっているのである。この技術の背景は、家電業界がコンピュータ技術を取り込まねばならない時代の中で、家電製品なるがゆえに起動はスイッチ一つで、その上にメディアは互換性を確保する技術を模索したものである。その為に、最新の CPU や OS を特定して、優位な地位を得たいとの思惑で規格化したものである。当時としては最先端のリアルタイム OS を備えて、マルチタスク機能もできる民生用としては最高速のモトローラ MC68000 系の CPU を準備したシステムであった。残念ながら、商品の高価格やソフト制作環境のインフラ不足等があって、大きなビジネスにならず、最終的にはマイクロソフトの牙城に飲み込まれていくことになった。しかし、CPU や OS が決まっていると、色々なコンピュータ (CPU や OS) がある業界では汎用的にならず、その部分の制限を外した規格が新たに策定されて、CD-ROM XA (Extended Architecture) と呼ばれて、PC 分野で普及していった。

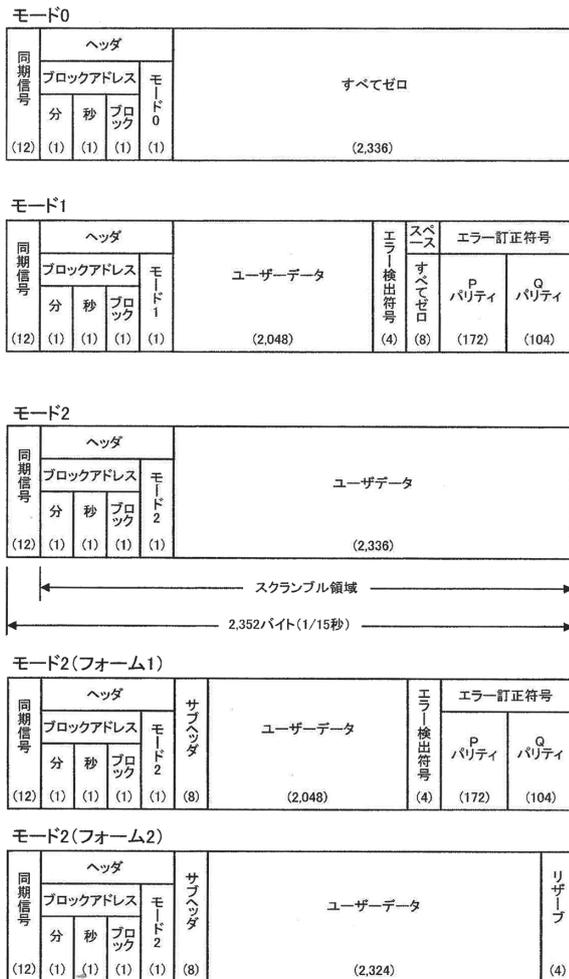


図 3-4-4 CD-ROM モードストラクチャー

CDメディアのオーディオ情報の代わりに、デジタルデータを記録するメディアとしてCD-ROMの技術開発が始まったのは、CD-DAが発売された直後の事である。パーソナルコンピュータ（Personal Computer）の原点は、1971年のマイクロコンピュータ用LSIチップの4004である。続く1972年に8ビットCPUの8008が登場したが、高級電卓用の部品に過ぎなかった。しかし、それが改良されて1974年に製品化された8ビットCPU8080の登場によって、その後の歴史を変える大きな転換点が訪れることになる。1975年、この8080チップを使用した初のマイコンキット「アルテア8800」が製品化されると、世界中に手作りマイコンブームが起り、そのアルテア8800で動作するプログラム言語である「BASIC」を、ビル・ゲーツ率いる大学生ベンチャー企業が開発したのである。この企業こそが、その後のCDメディアの発展に大きな影響を与え、世界的な大企業に成長したマイクロソフト社である。その後1980年代初頭にかけて、それまで“マイコン”と呼ばれていたシステムが、入力装置にキーボードを備え、結果をディスプレイに

出力し、ハードディスクを内蔵してBASICのプログラムを動作させることができる、いわゆる“パソコン”に進化しつつある状況にあった。しかし、この時代の“パソコン”は、依然高価なシステムであった。その主な原因は、内蔵メモリ（RAM）とハードディスクの価格にあった。何しろ、ハードディスク1メガバイトが1万円とも言われた時代であり、大容量で低価格の記録デバイスが渴望されていたのである。

PC用の記録メディアとしては、フロッピーディスクが8インチから1976年には5.25インチサイズが実用化されては来たものの、容量も小さく高価であり、手軽なメディアではなかった。PCはグラフィック表示機能やオーディオ機能を取りこみリーズナブルなフロッピーディスクを実用化して、大型の外付けデバイスが本体に内蔵されるようになっていくが、PCが低価格化して普及するには、ハードディスクに替わる低価格で大容量メディアが実現されなければならなかった。そこで、1984年にソニー/フィリップスがCD-ROM規格を策定したのである。マイクロソフトは、いち早くCD-ROMビジネスの立ち上げに動き出し、1985年には「CD-ROMニューパピルス」（アスキー、日本）という雑誌を刊行してCD-ROMビジネスの戦略を明らかにしていったのである。

CD-ROM規格は、CD-DAのオーディオデータに汎用的なデータを記録する規定について記述したものであり、物理フォーマットのみの規定であった。CD-ROMが実用的なメディアとして機能するためには、各種の論理フォーマットを規定しなければならないことは自明の理であった。先行して論理フォーマットを抑えることは市場に影響力を持つことになり、マイクロソフトはこの論理フォーマットの策定に積極的に乗り出していくことになったのである。その意味で、マイクロソフト社とCD-ROMは大きな相関関係があり、世界企業へと発展していく段階の中で、CD-ROMの果たした役割は極めて大きいのである。

3.4.3 CD-ROMの論理フォーマット

CD-ROM規格が策定されたことにより、ようやく汎用のデジタルデータの記録メディアとして利用できる道が開かれることになったが、CD-ROMシステムをコンピュータの外部記録装置として利用するには、論理フォーマットいわゆる「ファイルシステム」を決めなければならなかったのである。一般に、コンピュータのデータはファイルの塊として扱われるが、このファイルを管理するのがファイルシステムである。問題は、このファイルシステムが、コンピュー

タが使用する基本ソフト（OS）の種類によって仕様が異なる点である。即ち、CD-ROM上にデータとしては汎用性を有するファイルが記録されているとしても、そのCD-ROMが対応するファイルシステムが異なると、ディスクから記録されたデータを読み出すことができないという深刻な状態が生じることであった。実際に、CD-ROMの実用化の初期の頃は、どのレベルまでのファイルシステムを適用してソフトを開発するかについては、ソフト開発者の裁量に任されていたので、メーカーごとに独自の読み出しソフトが提供されて、殆ど互換性の概念すら無かったのである。

やっと出現した貴重な大容量、低価格のCD-ROMメディアは、データベース出版やマルチメディアソフトなど、従来にない新たな市場を開くと大きな期待があったこともあり、何とかPCでの互換性の確保という難題に、メディア業界とコンピュータ業界の垣根を超えた歩み寄りがなされた。即ち、CD-ROMを汎用のデータ交換メディアとして利用するために、必要なファイルシステムレベルでの論理フォーマットの標準化が強力に推し進められたのである。特に、独立独歩のコンピュータ業界で、市場を競っていたライバル社が協力体制で臨むなど、一刻も早いCD-ROMの実用化に向けて業界全体がサポートする、今までに見たことのないような体制が構築された。それほど、このCDメディア（CD-ROM）は魅力的だったのである。

互換性への第1歩は、CD-ROMの物理フォーマットが国際規格として採用されたことである。最初に国際標準化機構（ISO）と国際電気標準会議（IEC）が策定しISO/IE10149：1989が基本になり、ISO10149を基にしてヨーロッパ電子計算機工業会（ECMA）によるECMA-130、日本工業規格（JIS）によるJIS X6281：1992など、各国でも工業規格として採用されたのである。元々、CD-ROM規格は、あくまでも民間レベルのものであるが、それがISOで正式に規格化されたことによって、ISO10149に準拠するCD-ROMの物理フォーマットは国際標準の地位を得たのである。

互換性への第2歩は、論理フォーマットの統一である。1986年5月、フィリップス、ソニー及び錚々たるコンピュータメーカであるマイクロソフト、DEC、アップルコンピュータなどによって提案された論理フォーマットは、初めての会議の行われたホテルがカリフォルニア州レイク・タホのDel Webb's High Sierra Hotel and Casinoであったことから、ハイシェラフォーマットと呼ばれている。これは、基本的にプレス型の光ディスクを前提にしており、特定のハードウェアやOSに依存しない共通のファイルシ

テムの構築を目指したものであった。

技術的には、ポリュウムとよばれるファイルセットの概念を導入することで、一枚のタイトル内に複数のポリュウムを格納したり、逆に複数のCD-ROMタイトルで一つのポリュウム（マルチポリュウム）を実現したりできることが特徴である。後日、標準化されたISO9660のファイル構造は、「ルートディレクトリ→ディレクトリ→ファイル」になっており、ポリュウム記述子（Volume Descriptor）と呼ばれる「ファイルシステムに関する記述的情報を含む構造」で管理されているものである。又、CD-ROMドライブの特性を考慮して、ファイルシステム内のディレクトリやファイルへのポインタをバステーブルとしてあらかじめ作っておき、これを基本にオプティカルピックアップのシークなどを極力しなくても、ファイルアクセスができるなどの対応がなされている。このハイシェラフォーマットに改良を加えた論理フォーマットが1988年にISO9660として標準化され、それ以降のCDメディアの論理フォーマットの標準として広く使用され、現在に至っている。図3-4-5に基本的なISO9660の構造を図表化した。

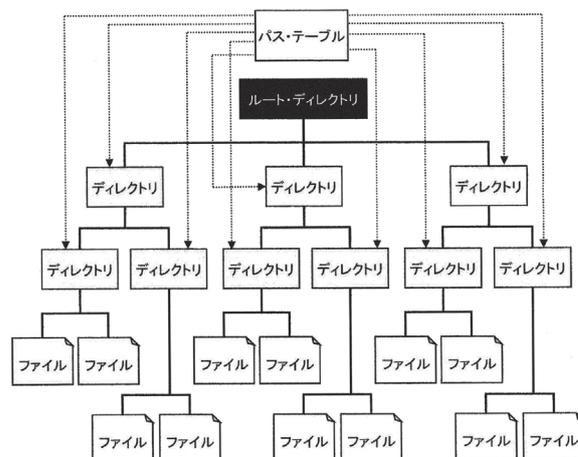


図3-4-5 ISO9660の基本ファイル構造

CD-ROMの国際標準論理フォーマットとしてISO9660が策定されたことにより、CD-ROMを利用したファイル交換は一気に現実化した。その後、新たにロングファイル名の表記等が問題になってきた。本来規格上は最大32文字のファイル名が使用できる仕様であるが、初期のCD-ROMがMS-DOS環境のPC周辺装置として普及したことから、実装上はMS-DOSの8.3形式（ファイル名8文字+拡張子3文字）のファイル名を使用するのが一般的となっていたのである。この問題を解決するために、様々な拡張仕様を加えられた論理フォーマットが提案されるようになっていった。その中で、マイクロソフトによって考案さ

れた Windows 環境で使用する CD-ROM の拡張論理フォーマットが「Joliet」である。Joliet は論理フォーマットとして ISO9660 との互換性を保ちながら、CD-ROM に記録するファイルに最大 64 文字のロングファイル名を可能にして、ディレクトリー構造も 8 階層から制限なしに拡張されている。しかし、CD-R や CD-ROM を読み出す機能も、Windows95 の CDFS (CD File System) で標準化されたため、Windows 環境下では問題ないが、非 Windows 環境下での互換性に課題があったのである。その為、アップルコンピュータの非サポート宣言や、e-Japan 戦略の下で進められている公共の電子申請制度でも、国土交通省に代表される官公庁は Joliet 対応の論理フォーマットを認めず、ISO9660 又は JIS0606 を推奨しているのである。この様に、互換性を確保しなければならない CD-ROM (CD-R/RW) 光ディスクの世界が、残念ながらコンピュータ業界の争いに巻き込まれた現実があったのである。

しかし、ISO9660 を基本として発展してきた光ディスクのファイルシステムは、MO (光磁気ディスク) のファイルシステムとして 1995 年に提案された米国の OSTA (Optical Storage Technology Association) UDF Ver1.0 (Universal Disc Format) を取り込み、DVD のファイルシステムとして採用され、CD-R /RW/ CD-ROM の互換性確保に大きく寄与しているのである。

参考文献

1) 「図解コンパクトディスク読本」中島平太郎、小川

- 博司共著 オーム社 (1996)
- 2) 「最新オーディオ技術」加銅、藤本、島田、君塚共編 オーム社 (1991)
 - 3) 「デジタルオーディオの全知識」柿崎景二 白夜書房 (2016)
 - 4) 「LD の開発実用化に関する系統化調査 (技術の系統化調査 21 集)」松村純孝 (2014)
 - 5) 「誤り訂正符号とその応用」(社)映像情報メディア学会編 オーム社 (1996)
 - 6) 「国産カメラ開発物語」小倉磐夫 朝日選書 684 (2001)
 - 7) 「半導体レーザー開発物語」片山忠則 シャープ技報第 99 号 (2009)
 - 8) 「DVD 読本」徳丸春樹、横川文彦、入江満共著 オーム社 (2003)
 - 9) 「CD の誤り訂正」佐古曜一郎 計測と制御 Vol.28, No.9 (1989 年 9 月)
 - 10) 「デジタルオーディオ辞典」(社)日本オーディオ協会 オーム社 (1989)
 - 11) 「光ディスクの将来展望」井橋孝夫 情報通信学会誌第 31 号 (1991.5)
 - 12) 「わかる半導体レーザーの基礎と応用」平田照二 QA 出版社 (2001)
 - 13) 「Compact Disc: System Aspect and Modulation」J.P.J. Heemskerk and K. A. Schouhamer Immink Philips Tech Rev.40-6 (1982) 157-164

4 | ディスク製造方式の確立

CD-DA の製造工程は、一般的に以下の6種類の作業工程が必要となる。

- ① プレマスター制作工程
- ② マスタリング工程
- ③ 基板形成工程
- ④ 成膜工程
- ⑤ 保護膜塗布工程
- ⑥ 印刷工程

1982年10月のCD-DA発売に向けたソフトタイトルの準備が急がれたが、生産設備は、ほとんどが手探りの状態で設計され、それまでのLPレコードの生産作業環境を一変させた。当時のCDディスクの製造も、また手探り状態であり、記録密度が当時の半導体リソグラフィとほぼ同じであったため、クリーンな環境での生産は必須だった。工程はほとんどがオフラインで、現在のオンライン工程での一貫生産と比較すると隔世の感があるが、当時の半導体の面密度と同等の記録密度を求めるCDメディアは、基本的に半導体製造のノウハウを吸収して成長していったのである。一方、デジタル情報を大量に配布する機能を求められているCDメディアの製造は、一枚を製造するのに必要とするタクトタイムも数秒/枚にまで高めた究極の生産効率を求めた大規模装置産業であった。それは、ぎりぎりまでの生産技術の効率向上との闘いでもあった。その為に、現在は80年代、90年代の生産設備は殆どが更新され、最新の設備で生産が続けられて、数千万枚/月の生産が可能な最新鋭の設備投資が、今日までの約30年に亘って続けられてきたのである。その意味で、残念ながら、系統化技術調査が求める過去の設備等は、ほとんど存在していない現状がある。図4-1に現在もCDメディア生産が続いているソニー DADC Japan (静岡) の最新の生産設備群の一例を示した。



図 4-1 DADC (J) の生産設備群

4.1 プレマスター工程

プレマスター制作工程とは、CD-DA や CD-ROM 等のオリジナルマスターを制作する工程をいう。CD の黎明期から 2000 年頃まではオリジナルマスターといえば、U-matic が主流だった。U-matic は、元々、主に業務用に使われていた 3/4 インチテープ幅のアナログのビデオカセットである。CD 規格が考えられていた 1980 年頃、CD の様な大容量のデータを扱うことのできるメディアは、このようなアナログのビデオ機器位しか存在しなかった。これはデジタル信号の 1 と 0 を映像信号として記録してしまおうというもので、その為には PCM プロセッサと呼ばれる機器を使ってデジタル信号の 1 と 0 を映像信号に変換し、それを VTR にデジタルデータとして記録していたのである。前述したが、CD のサンプリング周波数の 44.1kHz ($3 \times 254 \times 60 = 44100$) は、U-matic という映像機器をマスターテープの作成に使用することによって、映像信号から必然的に決まったものである。良い音を追及する CD レコード業界において、この U-matic はマスター機器として、あらゆるスタジオで活躍した。1982 年当時、使用可能な U-matic は BVU-800 で PCM-1600 という PCM プロセッサとペアになって活用された。

その後、マスター作成にパソコンをベースにした機材が導入され、書き込みが可能で、CD と再生互換性のある CD-R が出現したことにより、1990 年代前半から CD-R をマスターとして利用する PMCD (Pre Mastered CD) という方式が採用され始めた。これは、CD-R を CD-DA 形式で記録すると共に、リードアウト後の領域にマスター情報 (各トラックのスタート、エンド情報等) が CD-ROM 形式で書き込まれている CD-R を指す。重要な情報をエラー訂正能力の高い CD-ROM 形式で書き込むことにより、プレス工場での読み取りミスの低減を期待したものである。PMCD は、それに対応した専用の CD-R ドライブと書き込みのためのソフトウェアが必要だが、メディアに安価な CD-R が使えることから次第に定着していった。ところが、CD-DA の分野では、マスターである PMCD の音質とプレス工場で生産された CD の音質差が問題視されるようになった。そもそも、プレスされた CD と、CD-R では物理的な構造の違いがあり、全く同じ再生条件にはならないが、デジタル信号処理

をしているにもかかわらず、音質という定量的に評価できない定数をめぐって大きな議論になってしまったのである。マスターはスタジオで作った音源をプレス工場に運ぶための“入れ物”だが、PMCDは、米国のベンチャーSonic Solution社製のコンピュータを使って、マスターで発生する色々なノイズを補正するソフトが画期的にマスター制作効率を上げて行った。CD-Rに記録することが必須であったことは、完成したマスターディスクの状況のチェックができる等の利点があり、今でもPMCDを音源としたCDの製作は続いている。一方、データ量の大きいCD-ROMの場合は、PMCDの様なCD-Rを基本としたマスターディスクが必須である。個別の互換性を持ったデータディスクで内容のチェックを繰り返して作品を完成させるような（ゲームソフト等）用途のマスター制作には、Sonic Solution社製のソフトは非常に役立ち、CD-ROMタイトル普及の大きな役割を演じてくれたのである。図4-1-1に（株）スタートラボ（ソニーと太陽誘電の合弁会社）から発売されたマッキントッシュを使ったソニックシステムの写真を示した。

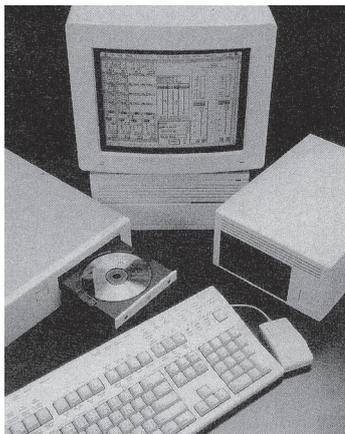


図4-1-1 ソニックソリューション（株）から発売されたPMCD

その後2000年代に入り、PCの進化により、パソコンベースのマスターリングシステムは、マスターデータをコンピュータのファイルの状態では保存できるようになった。その主流になったのがDDP形式（Disc Protection Protocol）である。これは、米国のDoug Carson & Associates Ink.が開発したマスターの形式で、元々プレス工場で使われている設備がDDP形式に対応しており、その後、スタジオのマスターリングシステムが次第にDDP形式の出力に対応していった、デファクトスタンダードになったものである。DDPはコンピュータで扱えるファイルであるため、ハードディスクやサーバ、CD-ROM形式のCD-Rなどへのデータの保存が可能で、また、インターネットを使って海外などの遠距離からのマスターデータの転送に利

用されて、現在はマスター制作の主流の座を占めるようになってきている。PMCDとは異なり、DDP形式はそのまま一般的なCDプレーヤーでは再生できないため、DDPマスター自体の音質云々という議論もほとんどなく、パソコンのファイルであるという扱い易さもあって、しばらくは、主流で使われるマスター形式となると予測している。図4-1-2に生産工場内の基本信号送出装置の写真を示したが、中央に鎮座しているのは、前述したU-maticマスター信号システムである。



図4-1-2 信号送出装置

4.2 マスタリング工程

マスタリング工程とは、以下の工程の総称であり、原盤作成までの最重要工程である。

- i) ガラス原盤へのレジスト塗布工程
- ii) カッティング工程
- iii) 現像・定着工程
- iv) 金属原盤作成工程（電解メッキ）
- v) 打ち抜き・洗浄工程

図4-2-1にCDの製造工程の概略を示した。

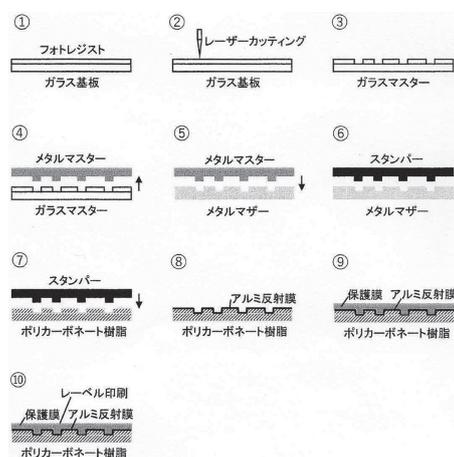


図4-2-1 CD製造工程

最初の工程が i) ガラス原盤へのレジスト塗布工程である。ディスクの原盤は良く研磨されたガラスの原盤が用いられる。マクロに見た平面度やマイクロに見た面粗度は、CD ディスクフォーマットに基づいて厳しく管理される。これにそれぞれの光に感光するフォトレジストを均一に塗布する。古い技術だが、スピナーコーティング法を用いて、回転している原盤に円周からレジスト液を注入し、高速回転させて振り切るもので、フォトレジストの厚さは、ほぼピットの深さに相当する。アナログ的な技術なので、波長の $\lambda/4$ である $0.1\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$ の膜厚を安定して作成するには、フォトレジスト濃度、溶剤濃度、回転速度制御、温湿度管理等の細心の注意が必須で、ゴミ、傷等の物理的欠陥が厳しく管理されたクリーンルームでの作業である。この原盤は、カッティング工程に送られるのだが、人を介するとゴミやほこりの付着が懸念されるため、すべてクリーンルーム内で全自動での搬送や LBR (Laser Beam Recording) への取り付け作業が行われている。図 4-2-2 に、現在の CD 生産に用いられている自動搬送ロボットと LBR の写真を示した。一方、図 4-2-3 に LBR の構成図を示した。

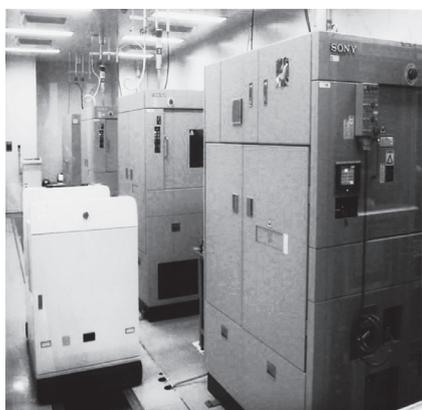


図 4-2-2 LBR (自動搬送ロボット付き)

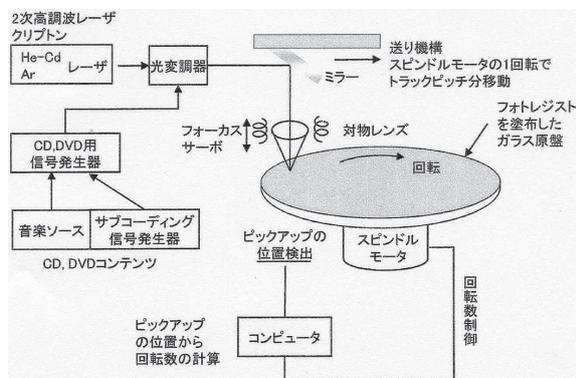


図 4-2-3 LBR 概念図

ii) カッティング工程とはレジストを露光する工程を言う。光源としては CD ファミリーの場合は、

Ar レーザー (波長 457.9nm)、He-Cd レーザー (波長 441.6nm) が用いられている。そのレーザー光が集光されて原盤に当たると、そこで、フォトレジストが感光するので、このレーザー光をオン・オフすれば、光が当たったところだけ感光することになり、信号を記録できたことになる。この様に CD 用の LBR では、ガスレーザーを使用するので、外部から光をオン・オフする光変調器という素子が必要になる。原理的に超音波を用いる AOM (Acoustic Optical Modulator) や電気光学効果を用いる EOM (Electro Optical Modulator) が用いられるが、高電圧が必要であることから、安定動作には細心の注意が必要である。又、光を集光させるために LBR の対物レンズは、 $NA = 0.9$ くらいの大きな値のものを用いる。基本的に、何もない所にトラックピッチ $1.6\mu\text{m}$ の長円形のピットを描く訳だから、その円周の精度は $1.6\mu\text{m}$ の $\pm 10\%$ である $\pm 0.16\mu\text{m}$ 程度を必要とする。当時はこのサブミクロンの真円を支えるための軸受けがなく、磁気流体軸受けや色々な試行錯誤を重ねた結果、現在では、もう一桁の精度向上を達成して、DVD や BD の原盤が作られている。また、CD の仲間たちは、すべて CLV (線速度一定) で記録されるので、マスタリング時にスピンドル軸の中心からのビームの位置を検出して、原盤の径により回転数を変えていく。このような技術は LBR という機器の設計におけるノウハウとして蓄積されて、高い精度の精密なメカニズムと精密な位置センサーとコンピュータの組み合わせで実現したものである。この超精密な LBR システムは、日本でしか完成できず、日本の光ディスクの産業の発展の礎になったものだが、産業構造の変化により、中古の LBR が海外市場に持ち出されて、ブーメラン現象を起こしているのも事実である。

一方、この技術が発展して 2000 年代の BD 時代の LBR は、PTM (Phase Transition Mastering) と呼ばれる新技術を導入して、光記録と熱記録を巧みに組み合わせたシステムとして完成した。この技術の系譜は、無機系の熱反応型レジストをシリコンウェハの上にスパッタすることにより均一薄膜を生成した原盤システムを使用するもので、それを波長約 400nm の青色半導体レーザーを用いた LBR システムとして完成させたものである。PTM の導入はディスク生産プロセスの簡素化にも大きく貢献した。その上に不可能と思われていた BD の $0.32\mu\text{m}$ のトラックピッチのピットにまで対応できる原盤を実用に供することに成功したのである。現在は、BD のアーカイブ用メディアとして、より高密度記録の開発が進んでいる。この

技術の特徴は、メカニズムとしては超高精度を要求するが、システム構成が半導体レーザーを用いているために、記録には半導体レーザーそのものを変調すれば良いので、AOMやEOMといった安定性に課題のあった機器類を排除でき、比較的容易にシステムが構成できることである。技術の流れは逆だが、生産性の向上を貪欲に追及していかざるを得ないCDメディアのマスタリングに、この技術を応用しようとする試みもあり、近いうちに実用化されると考えられている。PTM技術は、日本が生んだ光ディスクの高密度化に対して大きな貢献をした技術であり、この功績に対して2016年度の紫綬褒章が送られ、ソニーの柏木他が顕彰された。又、この技術を実用化したLBRは、超高精密機器として日本でしか生産できず、海外への輸出も行われている。

iii) 現像、定着工程とiv) 金属原盤作成工程（電解メッキ）及びv) 打ち抜き・洗浄工程は、一連の流れの中で同じ工程で行われる。基本的にはLDと同じであり、Vol.21の「LDの開発実用化に関する系統化調査」に詳細に記述されているので省略するが、外径の違いによる工程の相違点について記述する。現像、定着工程はLBRによるオン・オフによりできた0と1を現像処理すると、レーザー光が当たった所は感光材が溶け出したガラス面が現れる。レーザー光が当たらなかった部分は硬化して残り、それを「ガラスマスター」と呼んでいる。当然、ピットの精度に影響する現像条件の管理は重要なパラメータだが、現像後のガラス原盤はベーキングされてピットの凸凹が定着される。このガラスマスターから金属マスターが電解メッキ（電鍍）工程を経て生成される。銀の導電膜が付いたガラス原盤を電鍍液に浸して電流を流し、ガラス原盤表面にニッケルを析出させることによって、ガラス原盤上の凸凹をニッケル盤上に転写することができる。これを金属マスターと呼んでいて、付着しているレジストや電極用の銀を洗浄剥離して完成する。当然のことであるが、電解液の成分管理は金属マスターの品質に大きな影響を与えるので、成分のスルファミン酸ニッケル等の管理は重要である。

この金属マスターを用いて、同様の電解メッキ法で金属マスターが作られる。金属マスターは、金属マスターとはピットの凸凹が反転しているので、金属マスターから同じ技術でスタンパーを生成する。スタンパーは生産するCDの量で決められるが、短期間に何十万枚ものCDメディアを作らなければならないような場合は、複数枚のスタンパーが用意される。スタ

ンパーは、樹脂成型の金型として使用されるために、内、外径の加工と裏面研磨工程を経て完成される。特に、裏面研磨工程は重要で、裏面の凸凹は、成型した時、信号面の凸凹として転写されるので、鏡面状態になるまで研磨される。

完成したスタンパーは、物理的特性や電気的特性等の検査工程を経て、良品、不良品の厳格な判断をした後、プレス基板成型工程に送られる。図4-2-4に金属マスター自動製作装置、図4-2-5にスタンパーの内、外径打ち抜き作業工程を示した。又、図4-2-6にスタンパー製作工程を示し、ガラスマスターからスタンパーまでの形成過程を明確にした。当然であるが、作成されたスタンパーは、厳格に検査され基板成形工程に送られる。図4-2-7にスタンパー検査機の写真を示した。

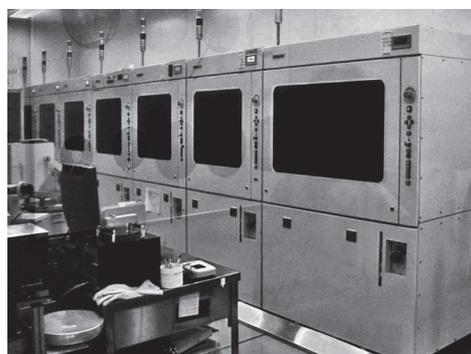


図 4-2-4 金属マスター自動製作装置



図 4-2-5 内・外径内抜き作業

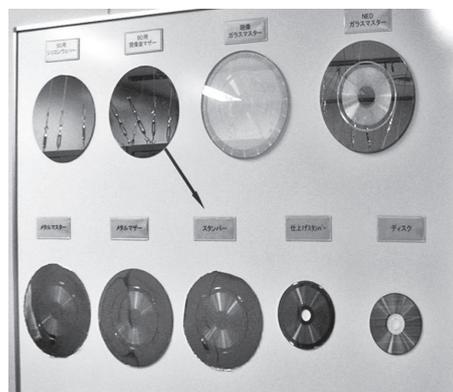


図 4-2-6 スタンパー製作工程



図 4-2-7 スタンパー検査機

4.3 プラスチック基板成型工程

プラスチック基板成型工程の中には、③基盤形成工程、④成膜工程、⑤保護膜塗布工程、⑥印刷工程が含まれる。光ディスクの生産は、一枚のスタンパーから大量のレプリカを成型する方式であり、長年にわたって技術改良を積み重ね現在の大量生産が達成できた貴重な技術分野である。その中で、最も重量な工程は④基板形成工程である。基板材料には CD メディアの場合、一般的に高機能プラスチックであるポリカーボネート樹脂が使われる。ポリカーボネート樹脂は、特性として①屈折率 1.58 ②光透過率 87% 以上 ③複屈折が光の位相差で 20% 以下 ④熱変形温度 130℃～140℃⑤吸湿率 0.15% 以下の光学ディスクグレードを使用する。光学ディスクグレードとは、サブミクロンレベルの異物低減、アルミ反射膜の劣化や変形を抑えた長期信頼性と、より高精度な転写性を達成するために開発された樹脂のグレードである。又、成型時の熔融流動性は、ピットの成型や配向性に関する重要なパラメータであり、メルトフローインデックス (MFI) は 20 以上が推奨されている。この様なポリカーボネート樹脂は開発が難しく、日本では、帝人化成、三菱化学エンジニアリング等限定されたメーカーしか開発、生産が出来なかった。このポリカーボネート樹脂は、異物混入を避けるために、工場から直接ペレットの状態、慎重にサイロに納入されるのである。昨今は、CD-DA の音質改善のために、ポリカーボネート樹脂の分子量をより高くした材料が求められており、HPCD 等の商品名で CD-DA ディスクが市販されているが、マーケット戦略から生み出された商品で、音質の改善の定量的な議論には至っていない。

基板成型機は、CD メディアの場合、一般的にスクリー式射出成型機を使うのが一般的である、図 4-3-1 に射出成型の概念図を示したが、射出成型機の動作は 1) 型締め 2) 射出 3) 保圧 4) 冷却 5) 離型の順に行われる。CD メディアの場合、現在は電動射出成型機で 50 トン程度の機器が使われている。長年の試行錯誤の末、この成型機は、油圧式から電動式に移行したことが、メンテナンス性に優れた量産システムを産み、CD メディアの生産性向上及び大量生産に繋がっていったのである、図 4-3-2 に、現在の Sony DADC Japan で使用されている射出成型機の写真を示した。主な、成形条件としては、①サイクルタイム ②金型温度 ③型締圧力 ④冷却時間 ⑤シリンダー温度 ⑥射出速度 ⑦射出圧力等であるが、生産性に直結するサイクルタイムを目標値に設定して、他のパラメータの最適条件を探し出す作業を繰り返すことにより、成形条件を決定していくのであるが、これは、エンジニアの熟練と経験の賜物以外の何物でもない。当然のことであるが、ディスク成型用金型は、形状、寸法が正確で成形能率が高く、耐久性が高いことが必須である。又、サイクルタイムやディスクの性能は金型の性能で決まるものであり、金型の構造、寸法精度、表面処理技術等がノウハウとして重要なファクターである。

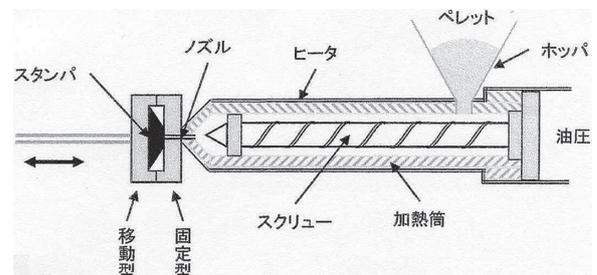


図 4-3-1 射出成型概念図



図 4-3-2 電動射出成型機

成膜工程とは、ディスク信号面にアルミの反射膜を成膜する工程を指す。ディスク規格では 70% の反射率を規定しているため、約 100nm 程度の膜厚をス

パッターリング法で成膜する。現在は一連の工程のなかで、インラインでスパッタが可能であり、生産効率は格段に向上している。図4-3-3に現在使用されているインラインのスパッタリング成膜機の写真を掲載した。この後の工程としては、保護膜塗布工程がある。これはUVレジンにスピナー又はスプレー方式で塗布（数ミクロン厚）して、紫外線（UV）で硬化させるものである。一方、保護膜のディスク端面処理には、細心の注意が必要である。端面からの水分の浸透等でアルミの反射膜が影響を受けて、ディスクの信頼性に影響を与えるからである。最後の工程として、レーベル面の印刷があるが、特にCD-DAの場合、音楽とマッチしたレーベルは芸術作品としての価値が高い。その為に、配色、色合い等は特別に配慮され、こだわった印刷が行われる。ユーザーの購買意欲や保存意欲に訴える印刷は、多色スクリーン印刷やオフセット印刷が使用されるケースが多いが、商品完成までの苦労は多く、課題は今でも模索中である。

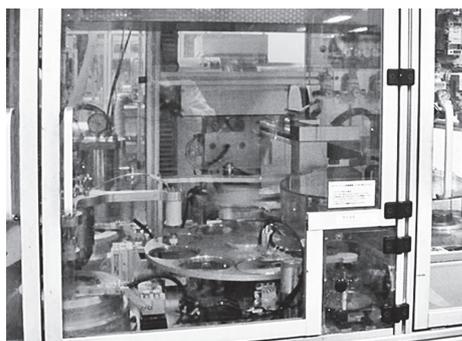


図4-3-3 インラインスパッタ成膜装置

実際の、ディスク成型時における信号（ピット）の形状の最適化はディスクの性能に大きく関係する。理想的なピットの形は矩形タイプであり、その深さは、反射率が最大になる $\lambda/4$ で、 $\lambda = 780\text{nm}$ 、ポリカーボネート屈折率1.5で算出すると約100nm程度になる。しかし、スタンパーがメッキで電鍍され、転写性を求められるので、実際はサッカースタジアムのようなエッジに傾斜がある。CDの場合は、ピット長さがEFM変調のために、前述したように9種類（ $0.87\sim 3.18\mu\text{m}$ /線速度1.25m/sの場合）あり、ピット幅は $0.8\mu\text{m}$ （トラックピッチ $1.6\mu\text{m}$ の場合）が指標になる。その上に、スタンパーはレジストの現像というアナログプロセスがあるので、ピットの長さは、ミクロに見ると、トラック方向に長くなったり、短くなったりしている。これは、読み出した信号の精度が変化していることを意味しており、アシンメトリの変化として補正する技術が必要としているが、今では、ピットの長さを意図的（約1.4倍）に長くするような技術的解が見つかり対処している。

完成したCD-DAディスクは検査装置で検査された後に出荷されるが、ソニー DADC Japanでは、今までに生産したすべてのディスクを原盤として保存しており、地震・防火対策をした専用の建物で厳重に管理されている。これは、究極のデータアーカイブのみならず、いつでもリピートオーダーに対処できる体制を確立しているのである。図4-3-4、図4-3-5に原盤保存の状況を示し、図4-3-6に1982年10月に日本で初めて発売されたCD-DAのディスクを示した。これは、DADC Japanの前身であるCBSソニーレコード（株）静岡工場で生産されたもので邦楽タイトルは「A LONG VACATION」。製品番号35DH1、35は価格で3500円、Dはデジタル、Hは邦楽、1はカタログ通し番号の一番を表している。35年前に、ここから始まった日本のCDの歴史に名を残したタイトルである。



図4-3-4 原盤保存建物内部



図4-3-5 マスター保存状況



図4-3-6 日本初のCD-DAディスク

参考・引用文献

- 1) 「図解コンパクトディスク読本」中島平太郎、小川博司共著 オーム社 (1996)
- 2) 「CDファミリー」中島平太郎、井橋孝夫、小川博司共著 オーム社 (1996)

5 | CD ファミリーの系統図

CD-DA はすべての CD メディアの原点になり、想定した技術ロードマップに沿って、CD メディアの規格である様々な“ブック”が策定され、CD ファミリーは順調に広がっていった。新しい技術が登場し、それが CD ファミリーに位置付けられる規格として承認されるまでは、かなりの紆余屈折あることは一般的である。即ち、CD ファミリーのブックの発展は、技術的に体系化されて計画されたものではなく、むしろ市場原理やメーカー間のパワーバランスの影響を受けて流動的に決定してきた例が多いのである。ブック、即ち規格が存在しても、製品は市場で見たことがないようなケースもあり、苦勞して策定した“ブック”であっても市場に受け入れられず、製品の発売やサービスの提供は既に終了してしまっているケースも珍しくないのである。まさに、“虎は死んでも皮を残す”の格言のように「CD メディアの製品は終了しても、CD ファミリーにブックを残す」ことで歴史にその名を留めているのである。

一口に“ブック”といっても、策定されるまでの経緯や背景などの性格が大きくことになっているし、何のために規格化されたかが解りづらくなっているものもある。つまり、CD ファミリーの歴史の体系を理解するには、技術的な“ブック”の中身を知るだけでなく、政治的な中身の測面を理解する必要がある。

CD ファミリーの規格書は〇〇ブックと色の名前前で呼称されているわけだが、ブックの色分けはどのような基準で行われたか、明確な定義が存在しない。但し、CD-DA の基本規格書である「レッドブック (Red Book)」だけは、「ソニー、フィリップスによる CD の仕様を検討する技術ミーティングを開催した際に、配布資料を閉じこんだ紙ファイルの表紙が偶々赤かったため、いつの間にか“レッドブック”と呼ばれるようになった」と言い伝えられている。このように、あくまで CD ブックの色は偶然の賜物であるが、後述するイエローブックやグリーンブックについては「赤以外で、分かりやすい色を選んだ」とのことが伝えられており、あくまでも実用本位であったのである。図 5-1 に CD 関連の主な規格書を示した。

5.1 CD ブックの分類

CD ファミリーのブックは大きく 3 種類のグループに分類される。



図 5-1 CD 関連の主な規格書

- ① 技術の基盤としてのブック。この分野には、「レッドブック (CD-DA)」「イエローブック (CD-ROM)」「グリーンブック (CD-I)」「スカーレットブック (SACD)」「パープルブック (DDCD)」などが該当する。このグループの特徴は、規格が先に存在するため比較的整理されている点にある。
- ② 仕様を整理・統合するためのブック。このグループのブックは、複数の会社で技術開発が先行して進められており、それを整理・統合するために策定されたものである。「ホワイトブック (ビデオ CD)」「オレンジブック (CD-R)」「ブルーブック (CD-EXTRA)」等がこれに該当する。このグループの特徴は、複数の CD メディアによる規格の関連性が扱われている点にある。
- ③ CD ファミリーに統合するためのブック。このグループは、既に新しい製品やサービスが開発されており、それを既存の CD ファミリーの体系に統合するために策定されたものである。そのために、ブックの拡張という形で扱われることが多い。ホワイトブックのスーパービデオ CD、フォト CD、CD-BGM などが該当する。このグループの特徴は既存の製品やサービスが先に存在し、マーケットへの配慮から後追いで“ブック”に追加された点にある。その為に、規格としては CD ファミリーに残っているながら、実際の製品やサービスは、既に終了して市場から消えているという現象が見られるのも特徴である。

又、最初のグループの派生として「ブリッジフォー

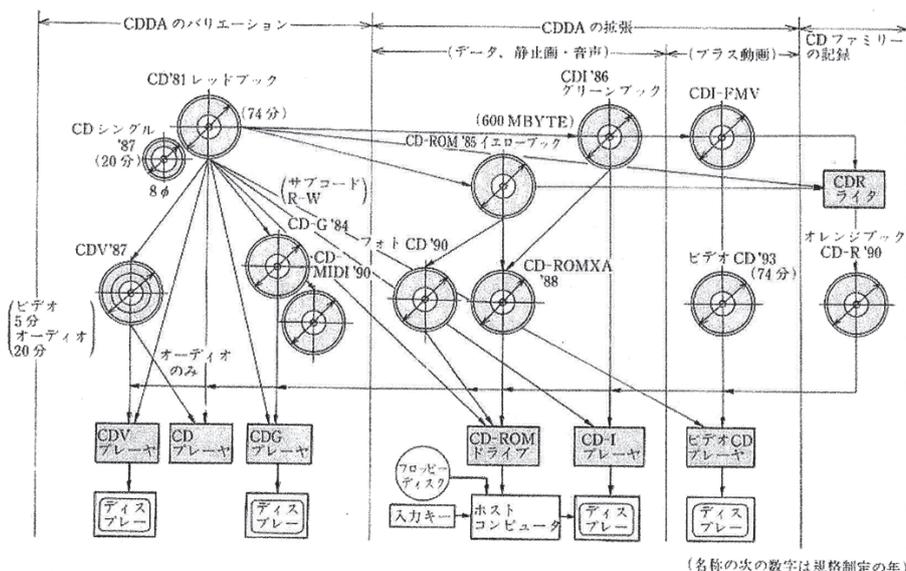


図 5-1-2 CD ファミリー相関図

① CD ファミリー導入期

CD ファミリーの導入期は、その後の CD メディアの基礎となるブックが策定された 1980 年から 1985 年までの時期である。1980 年のレッドブックが CD メディアの基本仕様を定め 1982 年のイエローブックがデータ記録の基本仕様を、1985 年のグリーンブックが“マルチメディア”“インタラクティブ”といったその後の CD メディアの使い勝手のコンセプトを示した。ここに共通する特徴は、規格が商品開発に先行して策定されたことである。CD ファミリーの製品化に向けて、まずインフラとしての規格が練られ整備されて、それに合わせて製品開発が進められたのである。

② CD ファミリーの成長期

“成長期”と呼べるのは、続く 1985 年から 1990 年頃である。導入期に策定された基本的なブックに基づいて、さまざまな CD ファミリーが登場し多様化した時期である。即ち、既存のブックを拡張し追加する形で規格が増えていったことが特徴である。レッドブックの拡張は、1985 年の CD-G と 1991 年の CD-EG、1987 年の CD-V、1990 年の CD シングル、CD-MIDI である。イエローブックの拡張は、1989 年の CD-ROMXA であり、グリーンブックの拡張が、1992 年の CD-IDV、CD-BGM である。これらに共通する特徴は、応用商品の開発が進められた結果、既存のブックではカバーしきれない製品が登場し、製品に合わせて仕様が追加されたことである。製品化と規格の策定が同時期に進められたため、初期の段階では互換性に問題が生じ、収拾までに大変な苦勞とコストがかかった例が多

い。(後に登場するオレンジブックも同様の問題があり、推進団体を巻き込んだ解決案を実施した)

③ CD ファミリーの成熟期

1990 年以降は、様々な仕様の CD メディアが先に商品化され、これ等を統合整理して、互換性を維持するために、後追いの形でブックが策定された時期を、CD ファミリーの成熟期と呼んでいる。

この時期は既に CD メディアの技術的基盤は確立しているために、それに基づいて企業が独自の開発を進めて商品化を行った結果、機能や外形は同じに見えても実態が異なる非互換の製品が乱立して、市場を混乱させることになった。この混乱を解決するための調停役としてブックが策定されたのである。

この時期に策定されたブックは、1990 年のオレンジブック (CD-R)、1993 年のホワイトブック (ビデオ CD, CD-IDV)、1996 年のブルーブック (CD-EXTRA) などがある。

少し時間軸は後になるが CD ファミリーは様々な多様化してきた。記録した音楽の品質そのものを改善すべきだとの要望に応える形で、次世代高音質オーディオシステム SA-CD (スーパーオーディオ CD, スカーレットブック) が 1999 年に策定された。基本的にはレッドブックの派生規格として、新しいオーディオの符号化にダイレクト・ストリーム・デジタル (DSD) 方式を採用したもので、サンプリング周波数は 2822.4kHz、再生可能周波数帯域は DC~100kHz 以上に向上したシステムであった。1996 年頃から DVD 規格が制定され、ビジネス化が始まっていた時期と

その他に、スーパービデオ CD やビデオ CD-ROM 等のマーケットロゴは制定されたが、大きなビジネスには発展せず限定的な使用に留まった。

5.2 主なブック（規格書）の系統

CD 発展の歴史的観点からみると、主なブック（規格書）は、「レッドブック（CD-DA）」、「イエローブック（CD-ROM）」、「オレンジブック（CD-R）」

の 3 冊である。この 3 種類の規格書は、それによってもたらされたビジネスの規模が圧倒的に大きく、世の中を大きく変革して、CD ファミリーの発展に大きく寄与したものである。

5.2.1 レッドブック（CD-DA）

一般的に“CD-DA の規格書”と呼ばれているレッドブックであるが、CD の仕様に関する情報としては大きく 2 種類の情報が規定されている。

第 1 に、音楽用 CD の固有の仕様を定めたものであり、CD-DA の規格書という側面である。即ち、デジタルオーディオディスクとして必要な、楽曲のサンプリング周波数やチャンネル数、記録できる周波数帯域などのシステム仕様を規定しているほかに、ディスクに記録されたデータのエラー訂正方式である CIRC（クロス・インターリーブ・リードソロモン・コード）や EFM 変調方式までを規定した規格書である。また、一枚のディスクに記録できる楽曲の上限（99 曲）や音楽トラックの間隔なども定められている。レッドブックがこうした仕様を厳密に規定することによって、商品としての CD-DA はメーカー間の互換性が確保され、現在の CD メディア普及の礎を築くことになったのである。

第 2 にレッドブックは、CD メディアに共通する仕様を定めたものであり、CD メディアの規格書という側面がある。ディスクの厚さや、使用できる材料といったディスクの物理的仕様や、ディスクの信号の記録方式として、1 フレーム（ブロック）が、2352B で構成され、データは内周から外周に書き込むなどに関して規定されている。この仕様は CD-DA に限らずすべての CD メディアに共通するものであり、互換性の基本になっている。例えば、ディスクの材料に関しては要求される仕様は記述しているが、材料を特定してはいないし、ディスクの製造方法の規定もされていないために、各社が競い合ってディスク材料の改善に取り組んだり、製造設備の革新に取り組んだ結果、CD メディアの製造コストは、低価格化が実現して、それ

が CD 市場の活性化につながり、主要な産業としての位置を占めるに至ったのである。

5.2.2 イエローブック（CD-ROM）

イエローブックは CD-DA でオーディオ情報を記録していた情報トラックに汎用的なデータを記録する CD-ROM について定めたものである。このイエローブックは CD-ROM の物理フォーマットのみを規定しており、論理フォーマットについての規定はない。その為に CD-ROM が実用的なメディアとして寄与するには、イエローブック上に各種の論理フォーマットを定める必要があったのである。イエローブックに規定されている CD-ROM のデータフォーマットは、ディスクの機械的特性、物理的特性、ディスクのサイズや材質、ディスクの記録特性、データトラックのフォーマット、誤り検出と誤り訂正の特性、情報のコード化、情報再生の光学的特性等である。

CD-ROM に記録されるデータは、元になるユーザーデータに CD-ROM 用のエラー訂正符号が付加された後にスクランブルされる。さらにそのデータにオーディオ用エラー訂正符号が付加され、この 2 段階処理によって、CD-ROM と CD-DA の互換性が実現されると同時に、データの記録に必要な高信頼性が確保されているのである。その後、CD-ROM の物理フォーマットはイエローブックの仕様を基にして、「120 ミリ再生専用型光ディスク（CD-ROM）」として国際規格に採用されることになり、前述したように、各国の工業規格として国際標準の地位を得た。

5.2.3 オレンジブック（CD-R）

正確に記述するとオレンジブックは、「Part1」と「Part2」に分かれている。

Part1 は CD-MO（CD とは非互換の光磁気記録メディア）であり、Part2 は CD-R（CD 互換の追記型メディア）である。CD-MO はソニーからミニディスク（MD）として、1992 年に発売された MD システムの基礎になった規格書である。一方、Part2 は一般に呼ばれている CD との互換性のある CD-R の規格書である。CD-R の技術的詳細については第 7 章で記述するので、ここではブック策定の状況についてのみの記述にとどめる。

ソニー、フィリップスによる CD-WO の基本合意のあと、電子部品メーカーの太陽誘電（株）からソニーに対して、彼らが開発中の「有機色素系の追記型記録メディアを CD-WO 規格に含めて貰えないだろうか」との相談があった。ソニーと太陽誘電をつないだのは、

デジタルオーディオの先駆者であった中島平太郎であり、当時アイワ（株）の社長を務めていた。中島の「CDとの互換をとることを開発の最優先事項とする」との要望を受けた太陽誘電の若きエンジニアの石黒、浜田は、「反射率70%の壁」を何とかクリアできる有機色素膜の記録層と新たに配置した金の反射膜を直付けする技術を開発した。一方で、記録膜の有機色素の最適化を行い、信号ピットのエッジの急峻な立ち上がりによるジッター成分を減少させる難題の解決に成功して、CDとの互換が達成されたのである。

CDとの互換性のあるメディアは、ソフトコンテンツ業界にとって「諸刃の剣」であって、不正コピーの防止を最優先に掲げる方々からは、「悪魔のメディア」として忌み嫌われた。しかし、急成長していたCD-ROMメディアのビジネスは、この互換性のあるCD-Rメディアなくしてソフトコンテンツが作れないような事態を生じて、1988年8月ソニーは、記録ドライブの開発とフィリップスに対しての標準化の働きかけを行うことを決定し事態は大幅に動いたのである。技術内容はフィリップスに伝えられ、検証実験が行われて、正式に1989年5月新しい仕様書として「オレンジブック Part2」が発行された。CD-Rのビジネス化は、紆余曲折を経て1989年6月からソニー/太陽誘電合弁会社「スタート・ラボ」(Sony

Taiyoyuden Advanced Recording Laboratory) が設置され、初代社長には中島平太郎が就任して、メディア、ハードウェアの販売及びサービスが開始された。皮肉にも、「悪魔のメディア」であるCD-Rを最も多く使ったのは、ゲームや出版ソフトのタイトル制作者であり、ソフト業界であった。課題として不正コピーは防げず、見方によってはソフト業界に塗炭の苦しみを与えたと指摘する方もいるが、その「いかがわしさ」をいかに発揮したのがCD-Rであった。この、スタートラボ（株）は、太陽誘電製の高品質（日本製）なRメディアの独占販売やRメディアの特殊なサービス事業までを手掛けたが、ネットワーク社会への急速な移行等により2016年3月に26年にわたる使命を終えたのである。

参考文献

- 1) 「コンパクトディスク その20年の歩み」CDs21ソリューションズ（2005）
- 2) 「CDファミリー」中島平太郎、井橋孝夫、小川博司共著 オーム社（1996）
- 3) 「音響技術史」森、亀川、君塚共著 東京藝術大学出版会（2011）
- 4) 「高密度光ディスクに関する研究」渡辺哲 東京大学博士論文（工学）（2007）

6 | CD 関連ビジネスの出現と規模

光ディスクシステムの変遷については、概略的に図6-1に表記してみたが、CD 関連ビジネスをどの範囲まで包含するかは難しい判断である。1980年代初めのLD（レーザーディスク）から始まった光ディスクシステムは、1982年秋のソニーからの民生用CD-DAプレーヤーの発売でCD 関連ビジネスが出現し、大きなマーケットを形成することになった。CDはランダムアクセス性の良さ等コンピュータとの親和性が非常に良かったことと、安価な記録媒体の要望が強かったために、コンピュータの外部記録メモリーとして、オーディオデータの代わりにデジタルデータを書き込んだCD-ROMが脚光を浴び、爆発的にハード、ソフトは増加していった。CD-ROMの約0.65GBの記録容量は、文字計算で新聞紙1.5年分にも相当する膨大なデータを数秒で複製できるなどの大きな特徴を持っていたため、印刷・出版業界にはグーテンベルク以来の「印刷革命」として強烈なインパクトを与え、巨大な産業が形成された。その一部はゲーム分野に使用されてソニーコンピュータエンタテインメントから1994年に「プレイステーション」として発売され民生用CD-ROMのビジネスが出現した。CD-ROMのビジネスの拡大はめざましく、ゲームから電子出版やGPSを取り込んだカーナビの世界まで多岐にわたるのである。

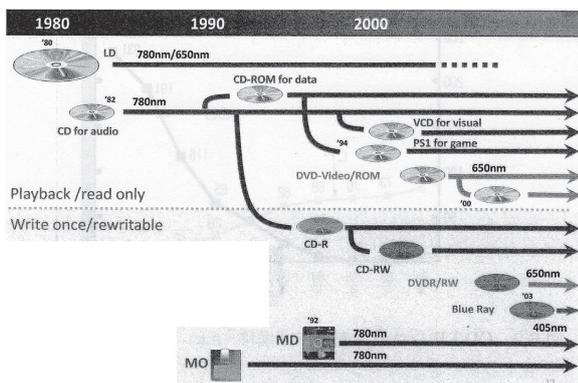


図6-1 光ディスクの変遷

6-1では、主に民生用光ディスクシステムのハードウェアの変遷及びビジネスについて記述して、6-2ではCDを世に知らしめたポータブルCDプレーヤーについて記述する。6-3でCD-ROM 関連ビジネスの出現についてまとめて、6-4では、その他のCD-ROMが開いたビジネスの概要について報告する。

6.1 光ディスクシステム（ハードウェア）の変遷

1980年代の初め頃より、光ディスクは、にわかに脚光を浴びるようになってきた。その背景は、ハリウッドを始めとする映像関連業者はVTRによる映像配信ビジネスの代わりにディスク（コピーが不可能）による映像配信ビジネスを熱望していた時期と重なり、30cmの外形を持ったレーザーディスク（LD）が発売されて、“絵の出るレコード”として、認知が始まった時期であった。しかし、LDはパイオニア（株）、フィリップス（株）等の努力にもかかわらず、映像ソフトビジネスの難しさや、VTRビジネスとの競合などのため、大きな市場を形成することができなかった。一方で、カラオケ業界や、教育業界ではそのランダムアクセス性の良さから、コンピュータとの親和性が良かったために色々な用途に使われて特殊な業務用マーケットを確立し、2000年の初めまでそのビジネスは続くことになる。1990年代の半ば頃からは、LDプレーヤーは、CDの再生が可能なシステムになり、LD、CD-DA 互換プレーヤーとして、コンシューマービジネスが続けられたのである。

6.1.1 据え置き型プレーヤーの変遷

CD-DA規格発表の6か月後の1982年10月、前述した経緯により、ソニーはCD-DA据え置き型プレーヤー CDP101の発売に踏み切り、CD-DAビジネスの幕がきて落とされた。価格が当時の値段で16.8万円もしたためやソフトタイトルの不足のため、購入できるユーザーは限定されたが、数千台の初期ロットはなんとか市場に受け入れられ、その後の参入メーカーの指標になった。このCDP101は、技術的には以下の特徴を備えた、完成度の高い機種であった。

- ①軸摺動型オプティカルピックアップの採用による安定した再生機能
- ②スライドローディングによるディスクの搬送機構の採用
- ③3チップLSIによる完成度の高い回路設計
- ④光源に世界初の780nm半導体レーザーの採用
- ⑤小型ミニコンボサイズの外形

さらに、この機種は各社の標準機として認知され、その後発売されたほとんどの据え置き型プレーヤーがスライドローディング機構を備えるなど、多大な影響を与えた。主要部品のオプティカル素子やデジタルLSIの各社に与えた影響は大きく、生産台数は多くはなかった

が、CDプレーヤの生産が量産レベルで開始された記念すべき技術の「マイルストーンモデル」であった。

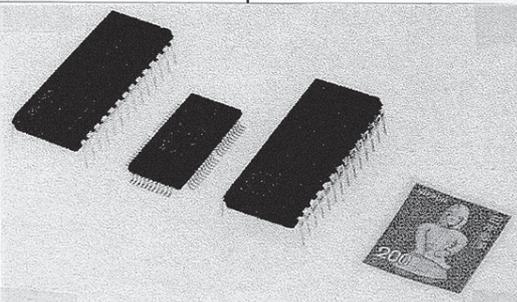
特に、この機種に採用された信号処理LSIは3チップ構成で、CX-7933はEFM復調回路用途に、CX-7934はRAMとのデータのやり取りを制御するデータ制御&補間用途に、CX-7935はCIRCエラー訂正用途であった。この当時、MOSのプロセス工程を持ち、約10,000ゲート近いLSIを生産可能であった先端企業は、唯一富士通(株)であった。N-MOSのプロセスを経て、チップサイズは4×6mm程度の大きさで、20~70ピンのDIPプラスチックモールドパッケージに完成させてくれた。試作品の不安定な大きな回路基板が、これだけのチップサイズに収まったことは、真に感動的であり、富士通(株)の技術力の高さを世に知らしめることになった。その他に、再生プレーヤのキーパーツとしては、DAコンバータがある。民生用16ビットのDAで、9次LPFを必要としていたため、その設計は難しく、高コストで約\$1000以上もする代物であった。しかし、1986年頃から始まる再生プレーヤの汎用化の流れに沿って、DAコンバータはデジタルフィルターの技術が導入されたり、LSIも世代を重ねて約30,000ゲートを1チップ化するなどの技術革

新が進み、コストも急速に低下して、ポータブルCDプレーヤに搭載されるようになり、市場は急拡大して行くことになった。この様に、光源の半導体レーザーの量産化の成功と共に、信号処理3チップLSIの量産化の成功は、CDプレーヤの量産の核になる技術革新であった。その意味で、CDP101の完成、発売は、ソニーだけの技術ではなく、当時の日本の技術力を集中した「賜物」であったと言って過言ではなく、CDの技術開発史に燦然と輝く大きな「金字塔」なのである。表6-1-1に当時、当時のDAD用3チップLSIの仕様を纏めて示した。

全てのCDプレーヤの生産技術は、ここからスタートしており、例えば、オプティカルピックアップ(OP)の光学部品の固定のための接着技術等は、接着剤の固着収縮の誤差を予測した精度が要求されて、長くノウハウとして蓄積されて、日本の企業だけが光学部品の高精度化もあって生産を可能にしていたのである。2000年降、OP等の一層の生産拡大に伴って、海外生産が拡大していくが、この分野の精密接着技術は、ノウハウの伝授が難しく現在でも日本企業の得意分野として残り、海外生産の場合でも技術指導をおこなっ

表 6-1-1 DAD用3チップLSIの仕様と写真

| 名 称 | CX-7933 | CX-7934 | CX-7935 |
|-----------|---|---|--|
| 用 途 | DADプレーヤー用復調回路 | DADプレーヤー用データ制御&補間 | DADプレーヤー用エラー訂正 |
| プ ロ セ ス | N-MOS | N-MOS | N-MOS |
| チップサイズ | 4.0mm×4.2mm | 6.0mm×5.3mm | 5.8mm×5.7mm |
| パ ッ ケ ー ジ | 28ピンDIPプラスチックモールド | 70ピンFPプラスチックモールド | 28ピンDIPプラスチックモールド |
| 動作スピード | 4.32MHz | 2.16MHz(原発振8.64MHz) | 2.16MHz |
| 電 源 電 圧 | 5V単一電源 | 5V単一電源 | 5V単一電源 |
| 消 費 電 力 | 350mW | 550mW | 720mW |
| 入出力レベル | TTLコンパチブル | TTLコンパチブル | TTLコンパチブル |
| 機 能 | <ul style="list-style-type: none"> EFMデータの復調 サブコード信号の復調 フレーム同期信号の検出とドロップアウトからの保護及び内挿 インターフェース用信号の発生 | <ul style="list-style-type: none"> RAMとのインターフェース RAMへのデータ書き込みとRAMからのデータ読み出し制御 平均値補間 CLV基準信号発生 D/Aコンバータへのインターフェース信号 | <ul style="list-style-type: none"> スーパーストラテジーによるCIRC復号(誤り検出と訂正) |



て生産を続けている状況にある。翌年、ヤマハ（株）から10万円を切る値段で据え置きタイプのプレーヤ（CDX-1）が発売され、市場の期待が益々広がっていき、各社が続いて据え置き型CDプレーヤを発売していった。この時期は、後述するポータブルCDプレーヤの発売と重なり、それまでの価格帯が一挙に半分以下になったことが功を奏して、当初の中高年向きのCDが、レコード市場の中核を構成する若者や女性ユーザーの獲得に大きな役割を演じたのである。

ソニーは、この分野のリーディングカンパニーとして、市場を切り開く役割を負っていた。その為に、商品企画の範囲を大幅に広げ、1983年には業務用のCDプレーヤ、CDP-5000S（約180万円）から、高級ESシリーズにも商品を投入して、CDP-701ES（26万円）やCDP-501ES（16.8万円）等を発売している。又、据え置き型プレーヤの後継機としては、CDP-111（14.5万）、CDP-11S（11.5万）を経て、1984年にCDP-102（8.98万）からCDP-103（8.48万）までをラインアップにして、1985年にはCDP-33（5.48万）を発売するに至った。わずか3年余りで、プレーヤ価格は1/3に急落してしまったのであるが、CDマーケットを活性化すべく、全社を挙げて取り組んでいたのである。

一方で、ソニーはカセットテープによる小型ポータブルテープコーダ“ウォークマン”で音楽を自由に持ち運べる商品コンセプトを確立していたこともあり、外形120mmの小型化CDは、最も重要なコンセプトとして注目していた。いつでも、どこでも、だれでもCDオーディオを楽しめる、ポータブル型CDプレーヤの商品化は待ち望まれていたものの、当時の技術レベルでは、持ち運びのできるCDプレーヤは「夢のまた夢」であったが、エンジニアは斬新なアイデアで難題を一つ一つ解決していったのである。

具体的には、次のような難題が山積していた。

- ① オプティカルピックアップの超小型化
- ② 消費電力の削減にPWM駆動方式の開発
- ③ 持ち歩くため、サーボ外乱が大きく音飛び対策の技術開発
- ④ 小型化及び省エネ化の第2世代LSIの開発
- ⑤ 電力供給のための特殊バッテリーの開発

商品化に当たっては、当時のソニー音響本部長であった大曾根幸三は、出来上がった試作品を水槽に沈め、泡が出なくなるまでの高密度、高集積化を求めてエンジニアを叱咤激励し、徹底した技術開発を要求した。その結果、完成までに約3年の時間を要し、開発から設計を巻き込んだ一大プロジェクトが実施された

のである。寝食を忘れたエンジニアの努力が実を結び何とか形が出来上がったが、原価を算出するコスト計算からは、目標を大幅に超えた価格しか提示できなく、技術陣は、皆、頭を抱え込んでしまった。

発売以来、多大の開発投資を抱えていたソニーとしては、このプロジェクトは何としても成功させなければならぬCDビジネスの最優先商品企画であった。当時の社長の盛田昭夫からは「ここでくじけてどうするのだ。値段は量産すれば下がる。最初の赤字はソニー全体で負うから販売価格は5万円以下にしろ」との厳命が下ったのである。多くの経験からコンシューマー商品は5万円を切ったところから爆発的に売れ出すという盛田の鋭い天才的マーケット感覚があり、1984年秋に、このポータブルCDプレーヤD-50「ディスクマン」（4.98万円）は世に出ることになる。盛田の予想どおり、D-50は爆発的な売り上げを記録して、ハードウェアコストも急速に下がり、それに伴いCDソフトのタイトルも急拡大して行き、CD-DAビジネスを世の中に定着させた記念すべき商品になったのである。又、ポータブルCDプレーヤは“ディスクマン”として世の中に認知されて、その後爆発的に機種を増やし、一層の小型化技術が施されて、CDの外形とほぼ同じ大きさで、バッテリーの容量改善や省電力技術の採用で、約100時間もの再生が可能になり、全世界に向けて導入されたのである。現在、D-50はCDP101と共に、ソニー博物館に大切に保管、展示されている。図6-1-1に1982年にソニーが発売開始したCDP101と1984年に発売したD-50の発表写真を掲載した。

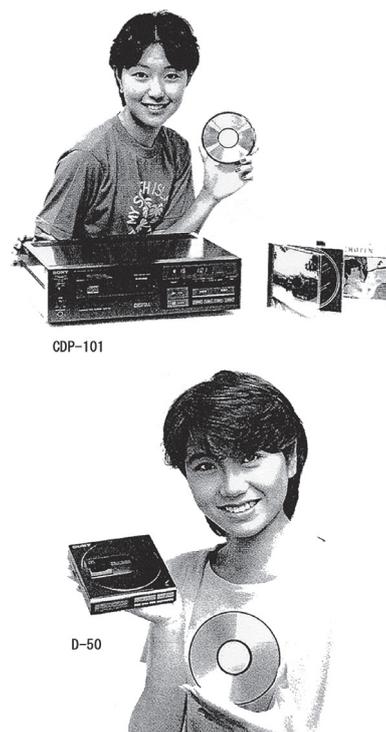


図 6-1-1 CDP-101 と D-50

この導入期におけるCDタイトルの生産は、1982年当時は先発4社（CBSソニー、ポリドール、日本コロムビア、東芝EMI）だけであったが、2年後の1984年には、約22社もが参入したと記録されている。発売当初は、CDタイトルの小売り価格は、デジタル録音のものが3800円、アナログ録音をデジタル変換したものが3500円、輸入盤が4000～4200円とCDプレーヤ同様に高価であった。一方、レコードメーカは親会社のほとんどが電機メーカであったので、デジタル化の流れにいち早く注目して、技術習得やタイトル制作技術を磨き、このCDという革新的新商品に積極投資をしたのである。その結果、1984年末には、生産能力が向上して約4000タイトルものCDソフトが市場に投入された。それと同時に、CDタイトル普及のための様々な施策がなされた。ブルーノ・ワルターやウィルヘルム・フルトベングラーに代表される過去の名盤のリマスターのCD化が好評を博したことなどから、「再販制度適応商品」でありながら1984年11月には小売価格が下げられたのである。これにより、クラシック市場ではアナログLPとの売り挙げ枚数の逆転現象が起り、名実ともにCDが市場に認知されたのである。1984年のCD生産実績は日本レコード協会の集計によると、約636万枚、金額で約144億に過ぎず、アナログLPとCDの金額ベースの比較は、88.6対11.4である。CDの急激な成長は1985年以降になり、日本における85年のCD生産量は2000万枚を超え、前年比約3倍もの急成長を果たしたのである。その勢いで、1986年には約4500万枚を超えてLPレコードと拮抗して、1987年に約6500万枚とLPレコードの倍以上の生産を達成して、完全に市場に定着していったのである。図6-1-2にCD/LPソフト売上げ推移を日本レコード協会資料から掲載した。

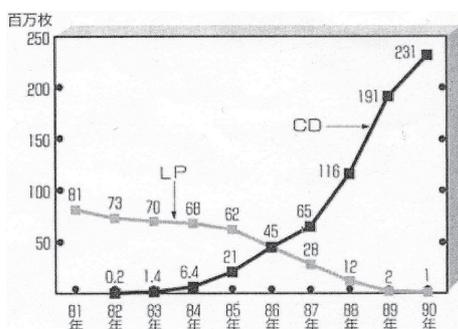


図6-1-2 CD/LPレコード売上げ推移
(日本レコード協会発表資料)

一方、世界に先駆けて投資した日本のCD生産技術は、その生産の拠点を海外に移して、日本コロムビアと日本ビクターは米国へ、CBSソニーは米国を含む

全世界へ進出し、東芝EMIは英国、米国でCD生産工場をサポートしている程、日本のCD生産技術は優れていたのである。

前述したようなポータブルCDプレーヤへの積極的な投資は、据え置き型プレーヤビジネスに多大の影響を与えた。据え置き型CDプレーヤは、オーディオ市場の全盛期であったためか1年に約5～10機種もの商品が企画された。しかし、コスト削減に手間取り、ソニーでは、D-50によってもたらされたLSI等の量産効果が波及してきた1985年頃から、やっと5万円近傍の価格設定が可能になって、前述したCDP-33や、CDP-510が発売されて、普及に拍車がかかってきたのである。1986年になると各社の競争は更に激しくなり、CDP-M30のように3万円台のプレーヤが発売されるようになり、価格競争は一層激しさを増して行くと同時に、市場は拡大していったのである。特に、1988年のCDシングルタイトルの発売が若者や女性市場への拡大に繋がっていった。この年の8センチCDシングル生産量は、日本レコード協会のまとめによれば、約2500万枚で、5年後の1992年には1億1000万枚で、最も多く生産されたのは1997年の約1億6800万枚である。このような現象は、CDプレーヤの低価格化と使い易さをもたらしたものであり、CDプレーヤは、従来の据え置き型から、ユーザーのパーソナル化に合わせたCDラジカセなどのゼネラルオーディオ分野の商品が爆発的に拡大したのである。相乗してCDソフトは、アルバムの生産枚数が約2億1000万枚という規模の市場を形成するに至って、CDは音楽産業の中心の地位を確保したのである。

しかしそのような中で、ソニーの場合は高級オーディオ分野にも、前述したESシリーズの様な商品が投入されて、特殊なマーケットを形成した。1983年のCDP-701ESから始まった高級オーディオプレーヤは、最高級音質を追及して、約10万円以上の高付加価値を伴った機種であったが、より高音質のSACD（スーパーオーディオCD）が発売される1999年にはSACD対応プレーヤSCD-1（50万）、SCD-777ES（35万）、翌年のDVP-S9000ES（20万）、SCD-555ES（18万）として、市場に投入された。これは、その後続く、海外の専門メーカーによる数10万～数100万円/一台のCDプレーヤのモデルになった機種である。SACDディスクは0.6mmの厚さのディスクを貼り合わせた2層技術を使用していたため、「スカーレットブック」としてCDファミリーの中に括られているが、純粋な意味でのCD規格とは相違する。専用の再生プレーヤが必要で、既存のCDプレーヤでは

再生できなかったので、一部の領域での普及に止まり、高音質CDの普及は残念ながら実現できなかった。しかし、その基本となった1ビットサンプリングのDSD（ダイレクト・ストリーム・デジタル）技術は、その後の高音質ネット音楽配信等の先行技術として認知されている。

6.1.2 チェンジャータイププレーヤの出現

1986年の後半になって、CDソフトタイトルが豊富に出回り、所有が多くなったこともあり、CDチェンジャーが初めて登場するようになった。CDP-C10（11万円）はソニーが発売した初めてのCDチェンジャーで10連奏が可能な設計になっている。5連奏が可能なCDP-C50（4.48万円）も市場に導入されて、特に北米で人気を博し、新しいマーケットに位置付けられた。

CDチェンジャーのタイプは大別すると①マガジントイプ、②ルーレットタイプ、③収納タイプに分類できる。

①マガジントイプは5～12枚のCDを一つのマガジンに格納したもので、ディスクの取り扱いが容易であることが注目されて、当初は、据え置きプレーヤで実装された。1988年のCDP-C100（7.98万）やCDP-C900（4.98万）、CDP-C910（4.98万）でその技術は頂点に達した。その後カーオーディオの分野で防振技術や音飛び対策用のメモリーを備えた機器として実用化されて、高級カーオーディオの世界で大きな市場を築いていった。現在でも、ナビを一体化したオーディオサーバーの様な進化はあるが、未だにカーオーディオの分野では、車載用CDプレーヤ又はマガジントイプのチェンジャーが搭載されている。図6-1-3にマガジントイプCDプレーヤと車載用マガジントイププレーヤの写真を掲載した。

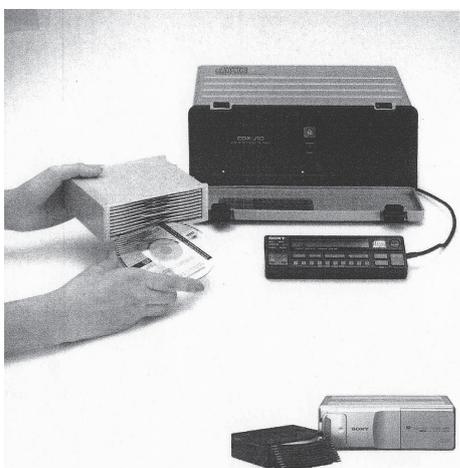


図6-1-3 マガジントイプCDプレーヤと車載用のCDプレーヤ

②ルーレットタイプは3～5枚のCDをルーレット盤の上に配置して、チェンジャー機能を可能にしたもので、ディスクの交換が簡単に行え、そのうえでディスクを目視で確認できる等の利点があったため、据え置き型プレーヤでは主力を占めた。1987年のCDP-C5M（5.48万）で初めて市場導入されて、1993年のCDP-C535（4.98万）まで、数機種が設計されて、据え置き型プレーヤとして市場導入され、現在でも少量であるが生産が続いている。一方、技術的にはディスクの固定チャック機構、特に、海外には砂漠地帯や特別の気候地帯が多く、その環境対策として剥離を促すディスク剥がし機構やごみや埃からOPを保護するための防塵対策シャッター機構等、何枚ものディスクを安定に再生するため、日本ならではの技術の創意工夫が備えられている。図6-1-4に5枚ルーレットタイププレーヤの概略例を示した。また、図6-1-5にディスク剥がし機構や防塵対策シャッターの一例を示した。

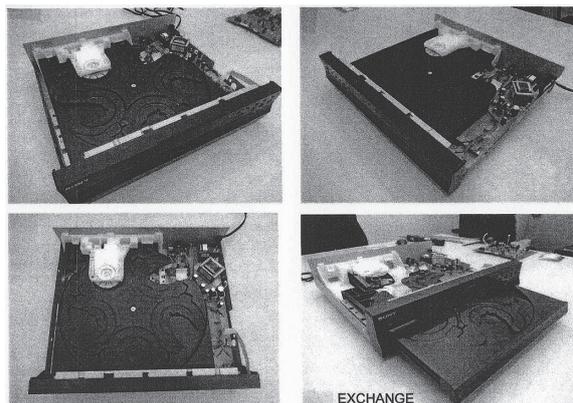


図6-1-4 5枚ルーレットタイププレーヤ

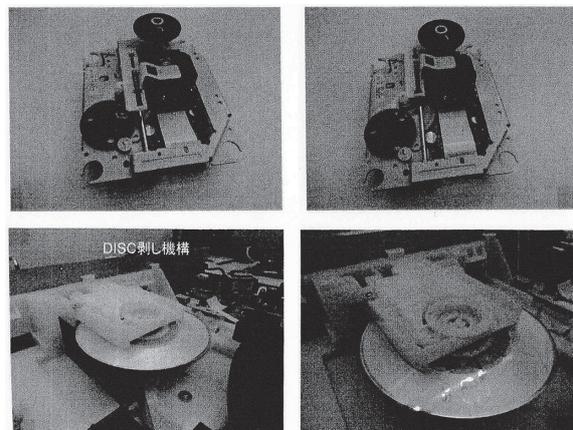


図6-1-5 粉塵対策シャッター機構とディスク剥がし機構

③収納タイプのチェンジャーは、1993年頃から導入されたもので、約100枚～400枚のCDを収納できる構造に設計されている。CDを円形状の収

納庫に一枚ずつ立てて格納して、収納スペースを最小にする工夫を施すなど、日本ならではの技術の集大成であった。CDP-CX100（10万）は初めて100枚チェンジャーとして導入されて、主に、北米市場等で好評を博した。その後1995年にCDP-CX100Fとして改良されて発売され、1996年にはCDP-CX200F（5.98万）に発展してCD200枚の格納・チェンジャーが可能になった。最終的にはCDM62として400枚ものCDが格納・チェンジャーが可能になって大きな話題になった。

このチェンジャータイプのメカニズムは、日本独自の技術として発展し、パイオニア（株）もこの分野に商品を導入しており、最大400枚ものCDが格納でき、選んだCDが直ぐに再生できるなどのデュアルデッキ機構を配置するなど、非常に精密なメカ設計がなされたチェンジャー機能が完成している。図6-1-6に400枚CDチェンジャーの概略例を示した。

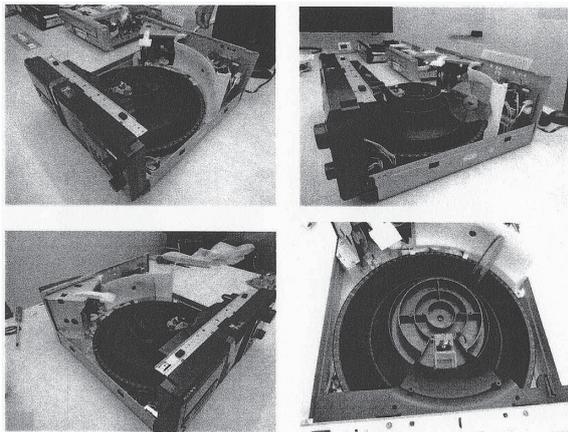


図6-1-6 400枚CDチェンジャー

この分野は技術的に日本の独断場であり、特許番号3541515号及び特許番号3951500号などが登録されている。あまりに複雑な機構のため、説明は難しいが、ロボットアームもどきの腕が、400枚のディスクから一枚を取り出して、CDドライブにディスクをチャックさせて再生させるまでの機構が特許として成立しているのである。その一部を特許3951500より抜粋した図面を、後世の系統化技術の参考として図6-1-7に掲示した。

6.2 CDを世に知らしめたCDウォークマン

コンパクトディスクが登場してから2年後の1984年、当時はまだまだCDプレーヤー自体が嗜好品の域にあった。そんな中、CDケース4枚分という驚異的な

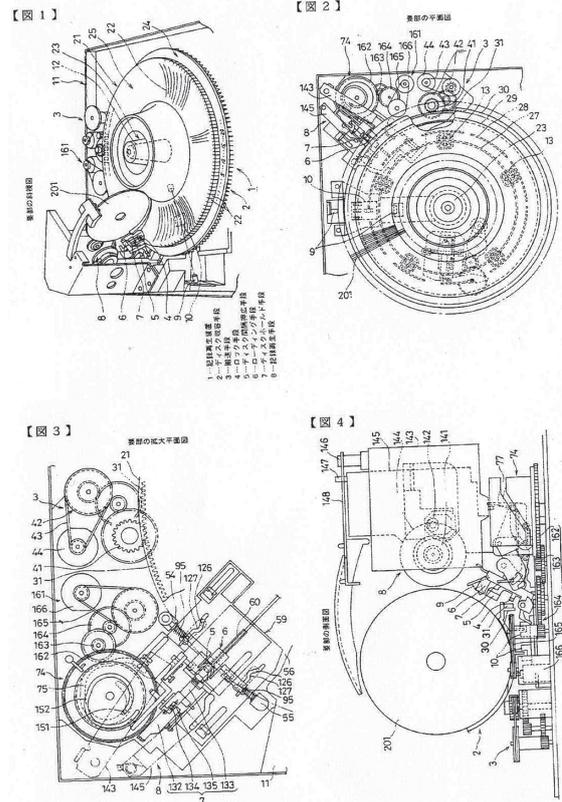


図6-1-7 特許3951500の400枚チェンジャー機構

薄さとサイズで高音質を持ち歩けるポータブル機として登場し、センセーショナルを巻き起こしたのがソニーから発売された「D-50」である。ソニーは、カセットテープのウォークマンで培った高密度実装技術を駆使し、据え置き型のCDプレーヤーと遜色のない高音質再生を誇りながら、軽量小型化を実現した。機能的にも現在演奏中の曲数や演奏時間が液晶パネルで確認できるといった、CDならではの利便性を実感できるだけでなく、アンプやラジオカセットに接続して音声を出力できるなど、ユーザー目線の仕様も盛り込まれていたのである。

それらの高機能に加えて、当時の人々を驚かせたのが4万9800円という破格の価格設定であった。大幅なIC化、低消費電力化、部品点数の削減など、それまでに蓄積した様々な技術を昇華させることで、これまでに、CDプレーヤーの購入をあきらめていた人々を一気に引き寄せたのである。サイズ感や使い勝手と、その後に多くのフォロワーを生んだ上質なデザインと共に、オーディオマニアのみならず幅広い音楽ファンの誰もが、デジタルサウンドを手軽に楽しめるその完成度の高さは、CDという新しいメディアを世間に認知させる大きな起爆剤となったのである。この章では、「CDウォークマン」を誕生させた技術の系譜について記述するが、その開発の主目標になったのはオ

プティカルピックアップ (OP) で、CD ウォークマンの歴史は OP の超小型化、超軽量化の歴史と言っても過言ではないのである。図 6-2-1 に、1980 年頃の半導体レーザー出現前、He-Ne ガスレーザーを使って CD プレーヤを開発設計した歴史的な OP から 1990 年代初頭の小型化された OP の推移の写真を示した。

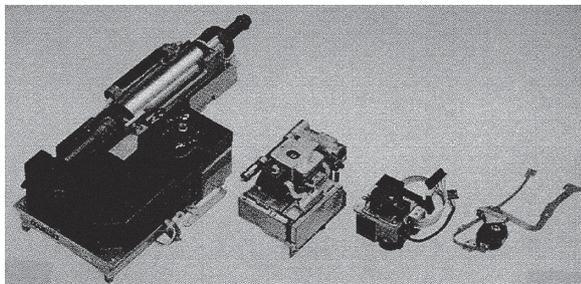


図 6-2-1 オプティカルピックアップ (OP) の推移

6.2.1 ポータブル CD プレーヤ用光ピックアップの開発

この「D-50」の登場によって、各社の CD プレーヤの価格が下がり、ソフトタイトルも一斉に発売されて、業界全体の CD ビジネスも本格的に立ち上がった。しかし「D-50」は、持ち運ぶ場合、大きなアダプターを必要とし、その上に重量もあったため、ポータブルとして気軽に持ち運べるというには未だ遠い製品であった。

「D-50」の光ピックアップは、いわゆる汎用品といわれる、様々な用途に使用可能な仕様で設計されていたので、より小型軽量化を図る場合は、まずこの光ピックアップを「CD ウォークマン」に最適化する必要に迫られたのである。CD ウォークマン専用の光ピックアップを作るために、事業部の設計部隊が、見よう見まねで技術開発を進めてみたものの、完成までに約 3 年もの歳月がかかった。その上、量産するにはさらに数々の難題を解決する必要がある、結局 5～6 種類もの光ピックアップを試作する羽目になってしまったが、何とか、第一世代の重量 8g の光ディスクピックアップユニットが完成した。光ピックアップユニットの最重要デバイスは、半導体レーザーと対物レンズ (ガラスレンズから非球面プラスチックレンズ) だが、双方ともに別の事業部が責任をもって事業化を進めていたために、この開発は、OP ユニットの軽量化を大きな目標にして、汎用品の OP のスライドベースに使われていた亜鉛ダイキャスト部品を、樹脂に置き換えようとの試みからスタートした。金属に対して、樹脂にすれば軽量化のみならず成形性や 2 次加工の削減により、コストにも寄与するのではと考えられたからである。この結果、第一世代では OP のス

ライドベースに「ガラス強化ポリカーボネート」が採用された。一方、軽量化は、多くのメリットを生みだし、応答性はよくなり、省電力にまでメリットがあったので、この樹脂化は必須であった。また、アクチュエータのボビンは熱を発生するので、耐熱性の高い樹脂が要求されて、軽薄短小化に伴う精密成型性も考慮して、「フォートロン®」を採用した。この結果、ボビンの共振特性は改善されて、2 軸アクチュエータの部品点数の削減につながった。「フォートロン®」は、耐熱性、難燃性、耐薬品性に優れ、イオン性不純物が少なくハンダ耐熱性にも優れているために、厳しいエレクトロニクス関連部品を中心に色々な所で採用が増えている。図 6-2-2 に第一世代光ピックアップの概略と部品構成を示したが、中心部にあるのがメカニカルユニットで、ディスク回転のためのモーター、下部に示した樹脂製の OP ユニット及び OP ユニットのスライドベース等で構成されている。



図 6-2-2 第一世代ピックアップの部品構成

第二世代光ピックアップは、第一世代に続いて開発がすすめられた光ピックアップで、性能面の向上と、更なる小型軽量化を進めた。性能面では、スタミナ化 (低消費電力) と高速読み込みに対応して、音飛びし難くすることを目標にした。そのために、第二世代は ① OP スライドベースはそれまで使用していたガラス繊維強化ポリカーボネートと金属製の「ベクトラアロイ」製の 2 種類が製品化された。② ボビンは、「フォートロン®」から、より優れた機械的特性と振動吸収特性を持つ「ベクトラ®」へと変化したが、ホルダーは引き続き「フォートロン®」を採用した。この結果、OP ユニット重量は OP スライドベースが金属性の場合には約 8 g、「ベクトラ材」の場合は約 4.5g と、さらなる軽量化が達成された。ボビンに「ベクトラ®」が採用された理由は、ヤング率が高かったことにあり、ほかの樹脂材料 (PPS 樹脂等) では、ヤング率は高いが、内部損失があまりないので、共振特性が十分ではなく、「ベクトラ®」ならではの特性が効果的であった。第二

世代では、OP スライドベースが薄い金属性と多少厚みのある樹脂製が用意されたが、「CD ウォークマン」の形態や機種によって適材適所に使い分けられた。第一世代に比較して、高速読み込みを可能にするために各部品固有の共振周波数を上げたり、ディスク回転モーターの高速回転に伴う振動の増加等の影響を最小にするために、各部品のより高いグレードが要求されたのである。OP のスライドベースに「ベクトラアロイ材」が採用された大きな理由は、剛性、耐熱特性、耐薬品性が非常に高かったことにある。又、樹脂自身が難燃性を持ち、すべてのグレードでV-0レベルの特性を持っているのと、バリが少ない薄肉成形性に優れていた点が評価されて、使用されたものだが、材料選択には、ここまで到達するための多大の労力と技術的裏付けが必要で、試行錯誤の連続であったのである。それは単体部品の特性だけでなく、他の部品との組み合わせで、部品の接着特性をも加味したピックアップ全体として、高い共振特性を獲得した最適解を得たものであった。図6-2-3に第二世代ピックアップユニットを搭載した「CD ウォークマン」とピックアップユニットを構成するOP スライドベース、ホルダー（フォートロン®）及びボビン（ベクトラ®）等の部品を示した。

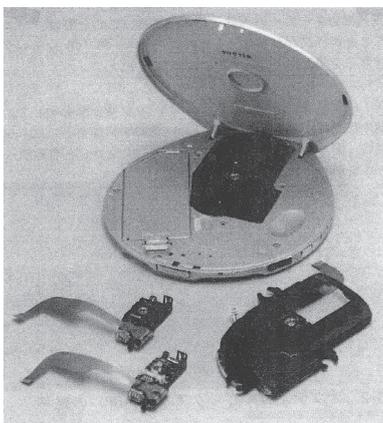


写真 6-2-3 第二世代 OP を搭載した CD ウォークマン

第三世代のピックアップは、2001年夏頃に登場して、性能的にも、コスト的にも「CD ウォークマン」用としては完成型といえる OP である。それにより、「CD ウォークマン」本体の最薄部は従来の15.5mmから13.4mmの薄さに、又ピックアップ重量はわずか3gの軽さを実現した。構成材料は、振動解析を徹底して行った結果、ボビンの材料に振動特性の異方性の少ない「ベクトラ®特殊グレード」を使用することで、性能向上をはかった。OP スライドベースは、第二世代と同様に単体での振動や強度だけでなく、接着材との相性や他の部品とのレイアウトのバランスをと

ることなどを考慮して、軽くて、共振特性が良い「ベクトラアロイ材」を採用した。この結果、第三世代のOPは、薄く、小型軽量で振動にも強く、コストも安いものを作ることに成功した。究極の理想型が実現できたため、すべてのスライドベースは「ベクトラアロイ材」に統一され、現在も生産が続いている。ピックアップの開発だけでなく、「CD ウォークマン」はサイズ、消費電力（スタミナ）及び音飛び問題を徹底的に追及して進化してきた。特に、音飛びに関しては「CD ウォークマン」の死命を制する程の重要な機能なので、技術開発が続けられ、完成した音飛びガード機能“G-PROTECTION”を採用した結果、現在は、持ち歩きやジョギングなどで振動が起きても、ほとんど心配なく音楽が楽しめるシステムが完成したのである。この技術の特徴は、CD-DAの音声再生に、数秒間のバッファ・メモリを持つことで、音が飛んでもオプティカルピックアップが元のトラックに戻るまでの時間を、バッファ・メモリからの音声データで再生するものである。当然、システムのサーボ特性は、音飛びに対応するようにゲインが強められているが、それでも何らかの原因で、トラック又はフォーカスがジャンプして、元信号が欠落してしまうケースがあるので、このようなバッファメモリシステムを開発したのである。これは音声のディレイラインだと考えられる技術だが、ユーザーには、音飛びを感知させず何も起こらなかったように再生する技術としての完成度を極めたものである。図6-2-4に第三世代ピックアップを採用した「CD ウォークマン」を示した。また、図6-2-5に第三世代光ピックアップを構成する部品類を示した。

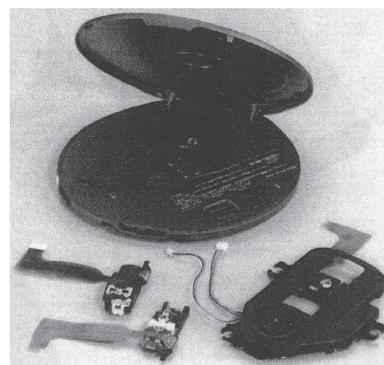


写真 6-2-4 第三世代 OP を搭載した CD ウォークマン

6.2.2 「CD ウォークマン」の発展

ポータブル CD プレーヤ「ディスクマン」の歴史は1984年秋の「D-50」の発売から始まった。その意味で、ポータブル CD プレーヤの歴史は、ソニーの「CD ウォークマン」の歴史そのものである。その後の技術システムを調査してみると、この分野に先鞭をつけたソ

ニーの場合、おそらく、日本の家電メーカーも同様と思われるが、発展の過程は大きく分けて4期間に分類できる。それは、オプティカルピックアップの世代交代と大きく轍を同一にするものである。即ち、前述した汎用ピックアップを使用して「ディスクマン」を商品化していた1985～1990年代初頭をディスクマン「黎明期」、第一世代のOPの開発が成功して商品化が始まった1990年代初頭から1996年頃までをディスクマン「成長期」、第2世代OPの導入が始まった1996年～2000年初頭にかけてはディスクマンから「CDウォークマン」に名称統一を経て「成熟期」、そして、究極の第三世代のOPが完成して導入が始まり、他のメディアへの変換を考慮した2000年頃から2005.6年にかけての「変換期」、この4期間、約20年の時間軸を経て、ポータブルタイプの音楽再生機器は、次世代のメディア（ICメモリー、インターネット等）に移行して行き、使命を全うした歴史を持っている。現在でも、おもちゃ同様のポータブルCDプレーヤが海外で生産されて、10～20ドルで販売されているが、時代の変遷を否応なしに見せつけられる思いである。

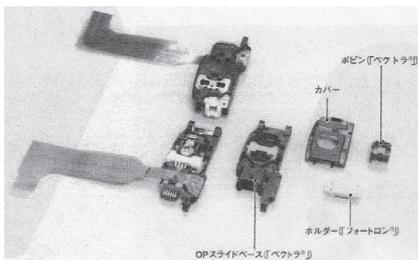


図 6-2-5 第三世代ピックアップの構成部品

①黎明期のポータブルプレーヤは基本的に「D-50」からの派生モデルであり、カラーバリエーションを増やしたり、再生時間を増加したりしたモデルが多かった。その中で、1985年のD-50MK-IIはデザインを変更してより小型軽量化を達成したのから、1987年に発売されたD-30、1988年のD-20、D-40は普及価格他意の3万円台のモデルとして導入され、6時間以上の再生も実現できるようになった。また、音質重視の車に搭載される用途が広がり、ソニーではD-600という車仕様のモデルを1987年に発売している。これは、機能や操作性も車載用を考慮して設計されたものであり、シガーソケットから電源を供給し、これまでにない斬新なデザインが特徴であった。また、50Wアンプを内蔵した高品位モデルD-2001や、日本では特に「8cmシングルCD」が多く受け入れられたために、1988年には8cmCDサイズ

専用CDポータブルプレーヤD-88を発売している。これは12cmのCDを再生する場合は、本体からはみ出してディスクを回転させるなどの特異な形状と操作性を強調したデザインである。ちょうど1987年には、CD-DAのディスク生産が従来のLPレコードを上回ったこともあり、それに合わせて普及価格帯モデル、8cmCD対応モデルや高機能モデルなどのバリエーション、特に、DSP機能を搭載した高音質機種や、TV/FM/AMシンセチューナー付きの重低音再生機能をコンセプトにした機種等が揃い始めてきた黎明期であった。

②成長期のディスクマンは、前述したように1990年から1996年頃に発売されたモデルを指して、第二世代光ピックアップの搭載を大きな特徴にしている。大幅な、小型、軽量化を達成した新開発OPを搭載したために、1991年に発売されたD-J50は、機器の厚さがわずか14.8mmという、CDケース（10mm）をわずかに上回るものの、ジャケットサイズCDプレーヤとして、かつてないリジッド感を打ち出したフォルムに仕上がっている。一方、この形をベースに、CDディスクの外形に限りなく近づけようとするデザインを試みているが、この時期の技術では達成できず、前面はCDディスクの様な円形で、後部は矩形の混合したデザインのモデルが多いのが、この時期の特徴である。1992年のD-111から1993年にかけてのD-321、又、1995年には、D-777のように外形は同じデザインであるが、カーボンファイバー素材を使用して、一層の軽量化を図り、厚さ18.5mm、重さ175gを実現して、音飛び対策もスポーツ仕様の10秒ESP（Electronic Shock Protection）機能まで強化されたモデルが発売されている。一方、この時期の特徴として、使用する電池が大きな課題であったが、省電力の技術開発が進み、1996年頃には単3アルカリ電池で約10時間の再生が実現できるレベルまで到達している。しかし、ポータブル機器の省電力の技術開発は永遠の課題で、この後もあくなき開発を続けることになる。また、この時期の特徴として、1992年から発売されたMD（Mini Disc）との接続が可能な「MD Link」機能が強化されて、他の製品とつながる機能を強化し、ポータブルCDの世界を広げていこうとする試みがあった。一方、1995年に発売された「カーディスクマン」のD-848Kは、電動トレイ開閉や15種類の音響効果を誇る「DSP」を搭載して、充実した付属品に加え音飛び対策を講じて

車載用モデルの決定版として人気を博した。その他、普及価格の「ディスクマン」D-131は1995年に、13,000円程度で発売されて人気を博したほか、D-140、D-153、D-155、D-330、D-340、D-365と続々市場に投入されて成長期を支えたのである。

- ③成熟期のポータブルCDプレーヤーは、1997年、今までの通称「ディスクマン」から「CDウォークマン」に名称が統一され、第二世代OPを搭載して、新開発連続音飛びキャンセラー「ESP2」を採用し、機能、デザインともにリニューアルして新しい時代の幕開けとなった。

CDウォークマンの最初の機種はD-E500で、単3電池4本で約40時間の連続再生が可能で、「MD Link」に対応しており、デザインは前面丸形、後部矩形のままであるが、すっきりした高品位アルミ合金パネルを使用した、厚さ24.8mmのCDジュエルケース2枚分の大きさのモデルであった。その後、このモデルは、D-E700、D-E800に発展して、「CDウォークマン」ブランドの推進の母体を築いたのである。この間に、1998年に新ブランド「WIDDIT」シリーズが提案されて、持ち歩くことにとことん拘ったモデルのD-5WDが発売され、新しい分野への展開が進められたのである。同時に、D-E900は厚さ20.1mm、重さ175gまでを極めたモデルでCDウォークマンならではのポータビリティを実現している。変わったモデルとして、1998年には、音楽もVideo CDも楽しめる多機能型のD-V8000が発売されて、成熟期のラインアップに花を添えている。

- ④変換期は、1999年の「ウォークマン」誕生20周年（カセットテープ時代から）を記念して発売されたD-E01からである。このモデルは、“CDウォークマンの形は、究極にはCDディスクの形の真円になる”の思想を実現したモデルである。このモデルには、新開発の音飛びガード“G-PROTECTION”や“Slide-in Disc Loading”、ラウンドシェイプデザインなど後継モデルに影響を与える仕様が盛り込まれた。オプティカルピックアップは第三世代の最小、最軽量のものを使用して、厚さ19mm、重さ167.5g、外径130mmまでシェーブアップされた美しい形状である。この形状は2002年のD-EJ2000でさらに極められて、ボディ接合部にスキマレス構造を採用し、厚さ13.4mm、重さ115gを実現したフルマグネシウムボディの超薄型モデルとして発売され、その後の設計に大きな影響を与えたのである。技術的には、省電力開発及びバッテリー

開発が大きく発展して、ガム型専用ニッケル水素充電電池（NH-10WM）が導入されて、2003年に発売されたD-NE800では、約130時間もの連続再生が実現した。これは、2005年のD-EJ720の高音質モデルでも継承技術として採用されているが、この間、ATRAC3やMP-3等の音声圧縮技術に対応して再生できる仕様やCD-R/RWの再生が可能な仕様実用化されて、更に良い音を、便利に、スマートに再生するモデルが増加していった。しかし、ポータブル「CDウォークマン」としての使命は、2005～6年頃を境に終了して、この分野の商品及び技術は、ICメモリーに取って代われ、より小型、軽量の音楽再生機器として、又は携帯電話の一機能として残存しているのである。その意味で、「CDウォークマン」からCDの名前がなくなり、再度「ウォークマン」に戻り、次世代のメディアへの移行を余儀なくされて行ったのである。

本来、技術の系統化調査は、日本の各社資料を公平に収集すべきであるが、日本の電気機器メーカーの再編、離散により、この分野ではソニー以外の資料を集めることが出来なかった。一方的に、ソニーの「CDウォークマン」を中心に記述せざるを得なかったことをご容赦頂きたい。

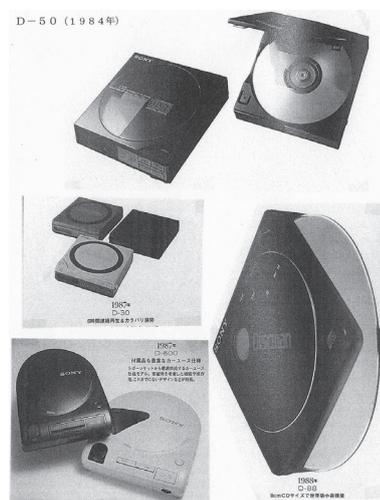


図 6-2-6 黎明期のポータブルCDプレーヤー

図 6-2-6 に黎明期の代表的なポータブルCDプレーヤーを示した、又、図 6-2-7 に成長期の代表的なポータブルCDプレーヤーのモデルを示した。一方、図 6-2-8 に成熟期の、図 6-2-9 に変換期の「CDウォークマン」と名称統一した後の代表的なモデルを示した。

6.3 CD-ROMの登場

新しい記録媒体としてのCD-ROMの登場は、ソフト開発者にとっては黒船の襲来であり、ソフト業界にとっては、ある種のルネッサンスともいえる大きな出来事であった。従来、1~1.4MBしかないフロッピーディスクにソフト開発者は自分の開発したプログラムや、FM音源データやグラフィックデータを、どう格納して表現するか悩んでいたところに、フロッピーディスクの約540倍もの容量を持つCD-ROMが登場した訳だから、その戸惑いは大きく、気の遠くなるような巨大な容量に、一体何を格納して、どういうプログラムを開発したらユーザーを満足させられるかという、考えてもみなかった難題に直面したのである。

当時、富士通が仕掛けたCD-ROM標準搭載のFM-TOWNS向けのマルチメディアタイトルの開発要請は、ソフト業界にとっては、何をすればよいのか右往左往していた所に、マルチメディアの概念までをぶつけられて大きな衝撃であった。富士通は、CD-ROMの可能性を信じ、独自に「ハイパーメディアセンター」を東京とサンフランシスコに開設して、CD-ROMタイトルの開発情報を提供しタイトル制作を支援したのである。今では簡単に自作できるCD-ROMタイトルも、この当時は1000万円以上もする専用機材が必要であったため、この「ハイパーメディアセンター」の果たした役割は極めて大きく、CD-ROMタイトル作成に拍車をかけた最大の功労者である。ここでは、ゲーム分野はもとより、様々なタイトル開発が行われ、中でも膨大な星のデータと写真とBGMを組み合わせ、プラネタリウムを体験できる「ハイパープラネット」というCD-ROMタイトルは、今でも語り草になっている優れた作品で、初めて「デジタルコンテンツグランプリ」で通産大臣賞を受賞して、多くの学校の補助教材として活用された。

この様に、巨大な容量を持った新しい記録媒体のCD-ROMの登場は、音声データ、グラフィック、写真、動画等を取り込んだ初めてのマルチメディアタイトルとして認知されたのである。また、今までと違う開発スタイル（映画制作と同等の）をソフト業界に持ち込み、PC市場、ゲーム市場、カーナビ市場、映像市場、教育市場、電子出版市場等で活用されて、膨大なタイトルが1990年代初頭から制作され、市場に導入されて、21世紀にかけて、いわゆるCD-ROMルネッサンスを起こしたのである。



図 6-2-7 成長期のポータブルCDプレーヤ



図 6-2-8 成熟期の「CDウォークマン」



図 6-2-9 変換期の「CDウォークマン」

6.3.1 マルチメディア PC への応用

かつて PC は、音声や静止画像、映像などの、いわゆるマルチメディア情報の表現は得意ではなかった。その理由としては以下の要因が考えられる。

- ① CPU の処理速度が遅い
- ② 内蔵のメモリー容量が少ない
- ③ マルチメディアデータの形式が確立していなかった
- ④ OS に標準的なマルチメディア機能が実装されていなかった

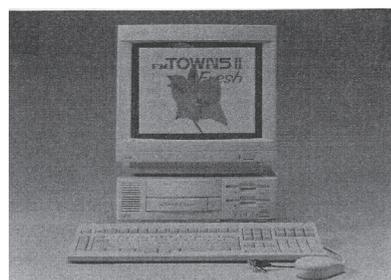
さらにマルチメディアデータは容量が大きく、PC でハンドリングするには、コスト面でも適当な記録メディアが存在しなかったことが大きな要因であった。それが、CD-ROM をデリバリーメディアとして利用することにより、ようやく製品レベルで“マルチメディアタイトル”と呼ばれるソフトウェアが実現できるようになった。また、CD-ROM タイトルの流通が、電子出版ビジネスの拡大と相まって整備されたことが追い風となって、PC のマルチメディア化は CD-ROM 市場の成長につながり、良い意味で“マルチメディア PC”の普及に繋がったのである。

CD-ROM ドライブを標準搭載したマルチメディア PC は、1989 年 2 月に富士通から発売された FM-TOWNS、1991 年の日本電気の PC-98 マルチ、1991 年のアップルコンピュータの Quadra900 などがあるが、その後も 1994 年の日本 IBM の PS/V シリーズなど、各社のマルチメディア PC が出揃ったことで、一気に市場は拡大した。

また、マルチメディア CD-ROM タイトルの普及の背景には、PC ハードメーカーが CD-ROM タイトル制作をするソフトメーカーに、様々なリスクヘッジをしたり、マルチメディア制作スタジオを開設して、安価に貸し出したりしたために、CD-ROM タイトルは急激に増加して多様化していった。図 6-3-1 に CD-ROM ドライブを搭載した各社のマルチメディア PC の写真を掲載した。図 6-3-2 には、当時 NEC が開設したマルチメディア工場の写真を掲載した。

一方、それまでのマルチメディアパソコンが、CD-ROM ドライブを内蔵しただけで、外見上は従来のパソコンの延長線に位置づけられるハードであったのに対して、CD-ROM ドライブを内蔵しているのは同じだが、“プレーヤ型 PC”というハードの形が存在した。操作はキーボードを排して、ゲームパッドなどで行い、モニターでなく家庭用 TV に接続して画面表示をするために“TV トップパソコン”とも呼ばれたものである。海外では、コモドールが 1991 年に発売

した「コモドールダイナミックトータルビジョン」いわゆる CDTV や、タンディ社 1992 年に発売した VIS 「ビデオ・インフォメーション・システム」等があるが、いずれも普及せずに数年で市場から姿を消した。日本での“TV トップパソコン”の代表格は、1993 年に富士通が発売した「TOWNS-MARTY」である。基本的にはマルチメディアパソコン FM-TOWNS の互換機であるが、利用可能なタイトルは制限があった。図 6-3-3 に TOWNS-MARTY の写真を掲載したが、当時の CD-ROM ゲーム機に外形が酷似している。その後、MARTY 互換機のカーナビである CAR-MARTY が富士通テンから商品化されている。



FM-TOWNS (富士通)



PC98マルチ (日本電気)



Quadra840AV (アップルコンピュータ)



PS/V Vision (日本IBM)

図 6-3-1 各社のマルチメディアパソコン (CD-ROM 搭載)



図 6-3-2 NEC マルチメディア工房



図 6-3-3 TOWNS-MARTY (富士通)

CD-ROM ドライブが低価格化し、PC 本体に標準搭載されたことに加えて、CPU 高速化と AV 機能を実現するハードの製品化に伴って、1990 年代後半には、PC そのもののマルチメディア化が急速に進んだ。ところが、PC メーカーがそれぞれ固有の設計によるマルチメディア化を進めたため、CD-ROM ソフトの互換性が確保できないという問題が浮上してきてしまったのである。この様な背景の中で、Windows 環境下でマルチメディアソフトを動作させるための PC の標準仕様策定することで、CD-ROM ソフトの互換性を実現しようとしたのが「MPC (Multi Media PC) 仕様」である。MPC はマルチメディアソフトを動作させるために必要な IBM の AT 互換機のガイドラインである。MPC を普及させるために、マイクロソフトが中心となって MPC 推進団体である「MPCMC」(MPC マーケティングカウンシル) が設立された。

仕様としての MPC は、1990 年にマイクロソフトが発表し、これを発展させた Level2 を 1993 年に MPCMC が発表したものであり、仕様は次のようなものである。

- ① CPU:80486SX (25MHz) 以上
- ② メモリー: 4MB 以上
- ③ ハードディスク: 160MB 以上
- ④ オーディオ: 16 ビット・デジタル・サウンド/MIDI
- ⑤ グラフィックス: 640 × 480 ドット、6 万 5536 色
- ⑥ インターフェース: シリアル・パラレル・ジョイスティック

1995 年には、MPEG-1 の動画再生に対応した MPC Level3 が発表された。こうして、MPC 仕様が強力にプロモートされた結果、動作に独自のハードウェア環境を要するマルチメディア CD-ROM は淘汰されていったのである。その後、PC に CD-ROM ドライブが標準搭載となり、現在では「マルチメディア」という言葉は必要ない程にマルチメディアは完全に定着することになった。さらに CD メディアのレコーダブル/リライタブル化の定着によって、フロッピーディスクが CD メディアに置き換えられるなど PC にとって CD メディアは、日常的なメディアとしての万全の位置を確保したのである。

マルチメディア PC はデスクトップ型 PC の他にラップトップ型 PC もあり、2000 年代の前半の最盛時は約 2 億台/年間もの膨大な PC が生産された。そのほとんどに搭載された CD-ROM ドライブ (CD-R/RW ドライブ) は、小型化され、再生時の信号読み取り速度の高速化が施された。ユーザーの要望もあったが、4 倍速から始まった高速化競争は、最終的には 48 倍速を表示する製品が 2005 年頃に登場し、ドライブ制御技術も頂点に達したのである。

一般的な CD 規格では、最外周は CLV (線速一定) のために約 200rpm 程度で回転しているが、例えば、半径 50mm の外周で 48 倍速で信号を読み取る場合は、回転数が約 9600rpm で、その速度は $2 \times \pi \times 50 \times 9600 \times 60 \approx 180\text{km/時}$ になり、新幹線並みのスピードでピットを追尾していく必要があるので、技術的な難易度は極めて高かった。CD 規格は一倍速の時、平均して約 1.2Mbps がデータの読み出しスピードで、48 倍速では約 60Mbps 程度になる。現在の技術では読み出せないことはないが、当時の技術レベルでは難しく、読み取れない場合は、自動的に回転数を落として読み出せるような保護回路を追加する等の工夫が施してあった。この速度競争は CD-R/RW ドライブでも同様に起こり、記録パワーの不足や最適なライトストラテジーの設定ミスを誘発した。特に、24 倍速以上の書き込み速度は、安定した書き込みをするための技術は投入されているが、商品仕様の様には書き込めなかったのである。現実的には 16 倍速程度が最も安定した書き込み速度で、CD-R/RW メディアもこの範囲で安定した書き込み (約 30Mbps 程度) ができるような記録膜が採用されて、大量生産が可能になっていた。CD-ROM/CD-R/CD-RW ドライブの速度競争は、現実との乖離が大きく、その上に、PC メーカーのコスト要求があまりに厳しく、コスト競争だけが残ったためか、ドライブメー

カが疲弊して開発意欲を喪失し、終息に向かうことになったのである。ドライブメカは、当時、数多くあり、主な会社は、ソニー（NECと合弁会社オプティアークを設立）、NEC、パイオニア、松下（三洋）、ミツミ、テアック等の日本勢から東芝-サムソン、日立-LGなどの韓国勢、ライトオンの様な台湾勢まで多岐に亘っていた。しかし、現存してこのビジネスを展開しているのは、パイオニア（業務用）、ライトオンの2社しかない。いかにこの分野の“コストプレッシャー”が厳しかったかを如術に表している。図6-3-4に、当時のビジネスの主役であったCD-ROMドライブユニット及びブロック図を掲載した。ここから読み取れるように、中心に回転モーター、オプティカルピックアップ及びその駆動系とコントロールICを付加した構造で、あらゆるPCに内蔵（外付け）されたために最盛期には約2億ユニット/年の生産を誇った大産業であった。しかし、技術の変遷とデータ記録媒体の変化という時代の波に対応できず、ビジネスが収束していることは残念でならない。一方、昨今は、インターネットの急速な普及とブロードバンド化によりかなりの容量のソフトでも、パッケージメディアによらずインターネットを利用して流通されるようになってきている。その意味で、適材適所の使い方が進み、根強いCD-ROM利用分野との共存共生の可能性を模索している現状がある。

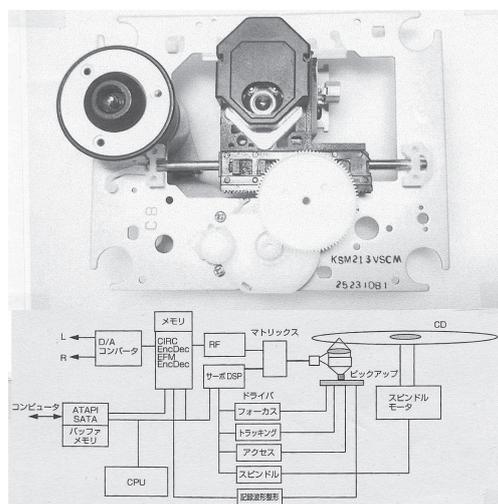


図6-3-4 CD-ROMドライブユニット（ソニー提供）

6.3.2 CD-ROMを支えた家庭用ゲーム機

家庭用ゲーム機市場は8ビットCPU時代に米国アタリ社のVCSに始まり、その後、任天堂のファミコンが卓越したマーケット戦略で世界的な市場を確立した。一方、PCの世界でも、ゲームソフトは娯楽分野で市場を形成していった。特に、PC用ゲームソフトは自由に開発、発売ができたので新しいジャンルの

ゲームソフトが次々と生み出されることとなった。その際、ストーリー内容が複雑になるにつれて、ソフト開発者はデータを格納するメモリー不足に悩まされるようになっていた。

その中で、CD-ROMを配布メディアに採用した最初の家庭用ゲーム機は、1988年にNECホームエレクトロニクスが開発したPCエンジンCD-ROMである。当時NECは、ファミコンとMSXパソコンの出現で脅かされていた市場で、このPCエンジンCD-ROMをゲーム機とゲームPCの対抗馬に育てるとの戦略であった。CD-ROMの採用によつての利点は、次のような点である。

- ①記録できるプログラム、データのサイズが飛躍的に増加し、ゲームに音声、写真、アニメ動画等を効果的に利用できる
- ②従来の半導体ROMに比べてCD-ROMは低コストである
- ③CD-ROMの大量生産の期間が短い
- ④半導体ROMに比べて少量生産に向いている

しかし、ゲームユーザーからは厳しい指摘が相次いだ。特に、データの伝送レートが遅いとこの指摘に対しては、①CD-ROMドライブ自体の進歩で対応できるとの予測の基に ②内蔵RAMコストの劇的な低下で、大きな先読みバッファを実装し解決できる ③圧縮音声、画像の再生回路をチップ化して実装すれば、ゲームの展開に合わせて自由に再生できる ④PCの急速な進歩により、優れた開発環境が提供され、複雑なゲームも容易に開発できるようになった等の理由によって、家庭用ゲーム機の市場は、一気にCD-ROMにシフトしていった。この様に、CD-ROMは、様々な欠点を克服して、家庭用のゲーム機の中で、デリバリーメディアとして主役の座を占めていったのである。図6-3-5にPC-Engine CD-ROM² SYSTEM（NECホームエレクトロニクス）の写真を掲載した。

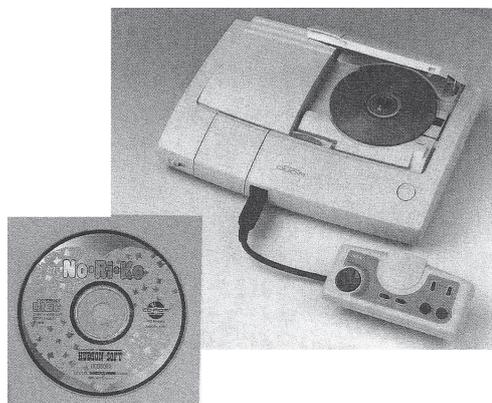


図6-3-5 PC-Engine CD-ROM² SYSTEM

家庭用のゲーム機のデリバリーメディアは、CD-ROM 登場以前は、数メガバイトの半導体 ROM カートリッジが主流であった。これは、ゲーム業界特有のビジネスモデルとしてゲームメーカーの最大の収益減であった。即ち、ゲームメーカーのライセンス契約で、ソフトの ROM カートリッジの生産はゲームメーカーにコントロールされて、製造数やコストから在庫までゲームメーカーの了承がなければ動かす事が出来ず、すべての情報はゲームメーカーのコントロール下に置かれていた。この仕組みによってゲームメーカーと呼ばれる一部の会社は、莫大な利益を得ていたのである。こうした状況の中で、ROM カートリッジに変わるデリバリーメディアが注目を集めたのは当然の帰着であって、家庭用のゲーム機に外付け CD-ROM ドライブが商品化されたのである。ゲームメーカーにとっても CD-ROM は、短期製造が可能で、小型軽量なために運搬や保管のコストが軽減できるだけでなく、少量生産が可能のため市場ニーズに迅速に対応して増刷できるなど、様々なメリットがあり、双方の思惑が一致して家庭用ゲームソフト市場のデリバリーメディアは ROM カートリッジから急速に CD-ROM に移行していったのである。

一方、CD メディアの互換性とマルチメディア性を生かして、家庭用 CD-ROM ゲーム機をホームエンターテインメント向けの汎用プレーヤとする動きがあった。その代表的なプラットフォームが、1994 年 11 月に「セガ」から発売された「セガサターン」である。このパートナーには CPU 製造を担当した当時の日立製作所や、メガドライブを担当した日本ビクター、ヤマハなど家電系のサードパーティが製造販売ライセンスを得て、幅広いホームエンターテインメントを構想したのである。これは海外でも同様で、米国のコモドル社は、各種 CD メディアに対応した「CD32」（マルチメディアパソコン Amiga を利用）を発売して、ヨーロッパを中心に高いシェアを得ていた。同時に、マルチメディア全般に向けたマルチプレーヤと位置付けられたのは、1990 年に米国で設立された、「3DO」のインタラクティブ・マルチプレーヤ「3DO」である。日本では松下電器が「3DO REAL」として、更に当時の三洋電機が「3DO TRY」の名称で 1994 年に発売している。この様に家庭用のマルチメディアプレーヤを目指した CD-ROM ゲーム機は様々なハードウェア規格が乱立して、主流となるプラットフォームは生まれなかったのである。図 6-3-6 に CD-ROM 一体型家庭用ゲーム機「3DO REAL」（松下電器）の写真を掲載した。

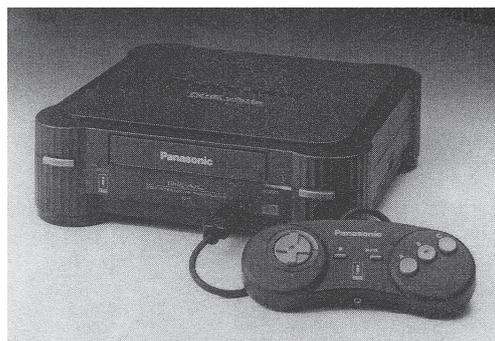


図 6-3-6 3DO REAL（松下電器）

家庭用の CD ゲーム機と同時期に普及期に入ったのが、前述した CD-ROM 内蔵のマルチメディアパソコンである。この普及のための切り札に「キラーコンテンツ」をゲーム分野に求め、反対に家庭用ゲーム機陣営はマルチメディアタイトルの確保に走った。この結果、どちらでも利用できるために、ハードウェアプラットフォームとしての特色は失われていくことになった。又、マルチメディア化に伴ってゲームタイトルの製作費が高騰したため、製作費の回収が急がれ、ゲームソフトメーカーが新作ソフトを、複数のハードメーカーに提供したこともハードの差別化を困難にした大きな要因であった。こうした状況のターニングポイントになったのが、いわゆる次世代ゲーム機の登場である。1994 年 12 月に発売されたソニー・コンピュータエンターテインメント（SCE）の「プレイステーション」（PS）と 1998 年に発売されたセガの「ドリームキャスト」の登場により、家庭用ゲーム市場は急速にこれらのハードウェアに収束することになったのである。これらのプラットフォームは、原則としてゲームソフトの“囲い込み”を行い、他のハードでは提供されない「専用ゲーム」の開発に注力することによって、固定的なユーザー層の確保に成功したのである。その後、CD-ROM ゲームタイトルは、2000 年 3 月の「プレイステーション 2」の発売と、2001 年のマイクロソフトの「Xbox」の発売により、よりデータ容量の大きな DVD-ROM を使用したプラットフォームに変わり、デリバリーメディアは、CD-ROM から DVD-ROM に移行し始めた。しかし、内蔵 ROM ドライブは下位互換があるため、特に海外市場では、現在でも CD-ROM ゲームの人気は高く、ディスク生産工場は CD-ROM ゲームタイトルのフル生産が続いているのである。図 6-3-7 に「プレイステーション 2」（SCE）の写真を掲載した。

6.3.3 CD-ROM と電子出版

CD メディアによる電子出版が可能になった背景に

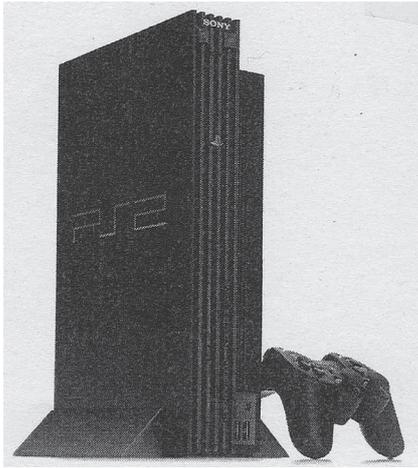


図 6-3-7 「プレイステーション 2」(ソニーコンピュータエンタテインメント)

は、書籍の出版・印刷プロセスがデジタル化されていたことがある。それまでの書籍の出版は、原稿から写真、植字機などで印刷原稿としての版下が作成され、版下から製版フィルムを作成して更に印刷用の版が作成され、その版を基に印刷されるのが通常の作業であった。そこで、版下の作成・修正などの作業プロセスを電子化して効率化しようと開発されたのが「CTS」(コンピュータ組版システム)である。この当時は既に、編集作業に日本語ワープロやパソコンが使用され始めていたことにより、電子データで入稿された原稿を CTS データに変換し、迅速に印刷・製本を行うことが可能になっていた。互換性等に問題はあったが、CTS データが出版社や印刷会社に蓄積されるようになったことで、このデータを加工して、電子出版に再利用しようという企画が出てきたことは当然の事であった。同時に、複製が簡単で量産効果高い CD メディアへの移行は、期待されていたのである。しかし、現実にはいくつかの技術的な壁があり、以下のような課題の解決は容易ではなかったのである。

- ① CD-ROM ドライブのスピードが遅く、データの読み出しに時間がかかってしまう
- ② CD 出版物に特化した論理フォーマットが確立されておらず、個別読み出しソフトが必要である
- ③ 電子出版物の知的所有権の処理が明確でない

CD-ROM のイエローブックの規格化を機に、1986 年に、出版社を中心とした日本電子出版協会 (JEPA) が設立されて、CD-ROM 出版を前提とした電子出版の標準フォーマットである「和同開珎」(日本語対応 CD-ROM 論理書式)を制定して、CD-ROM 出版の導入に尽力した。また CD-ROM 出版普及の“きっかけ”になったのは、1987 年 7 月の岩波社書店・ソニー・

富士通の共同開発による「広辞苑 CD-ROM 版」の製品化である。「広辞苑 CD-ROM 版」は、富士通の「日本語ワープロのオアシス」にソニーの CD-ROM ドライブを外付けにして、広辞苑データを参照できるようにしたシステムである。この「CD-ROM 広辞苑版」は、それ以降の CD-ROM 出版の基盤を形成した技術として高く評価されている。図 6-3-8 に「和同開珎」と「模範六法 CD-ROM 版」(岩波書店)を示した。

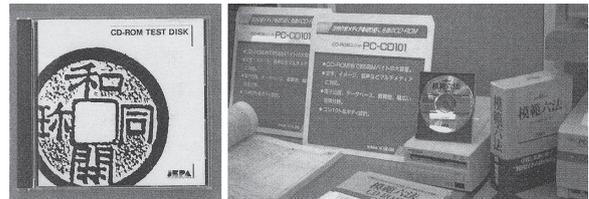


図 6-3-8 「和銅開珎」「模範六法 CD-ROM 版」(岩波書店) PC-98 版

当時は、CD-ROM ドライブが低速であったため、CD メディアに特化した論理フォーマットが必要とされ、それを「WING」フォーマットと呼んでいる。この「WING」フォーマットを基に、その後の CD-ROM 出版の基本となる 2 種類の論理フォーマットが制定された。それが、電子ブックの「EB」フォーマットと「EPWING」フォーマットである。電子ブック (EB) は、ソニーが提唱した電子書籍フォーマットで、ケース入りの 8cm 径の CD-ROM で、液晶を内蔵した専用のポータブルプレーヤで再生するシステムである。電子ブックフォーマットは文字と画像を記録する EB, ADPCM 圧縮音声対応の EBXA, カラー画像表示に拡張された S-EBXA などが導入された。図 6-3-9 にソニーの EB プレーヤと XA オーディオによる旅行英会話文例の利用例を示した。電子ブック対応プレーヤはソニーの他に松下電器や家電各社で発売された専用のビューアーはあるが、FM-TOWNS や日本語ワープロでの再生も可能なソフトが発売されて、再生環境は徐々に増えて行った。しかし、2000 年代初頭には IC メモリーの大容量化や低価格化による技術変革が起こり、携帯型の CD-ROM 電子辞書は役目を終えることになった。



図 6-3-9 EB プレーヤ“Pelala”(ソニー)

一方、EPWINGは“EPWINGコンソーシアム”が提唱する電子辞書の標準フォーマットである。PCやワープロ、ワークステーション等の異なるハード上で、12cmCD-ROMの電子書籍を共通に使用するための業界標準として、1991年に「EPWING規約 第一版」が発行され1996年7月にJIS X4081の「日本語電子出版検索データ構造」として登録されたものである。EPWINGは、本来PC上でEPWING対応検索ソフトによって利用することを想定しており、データの形式は文字や図形以外に音声、動画データをサポートしているほか、コンテンツをハードディスクにコピーして利用できるように仕様が拡張されて、今でも利用されている。

この様に、CD-ROM電子出版市場は、辞書や年鑑などのレファレンスブックや写真集などを中心に市場を拡大していったが、何と云ってもCD-ROMドライブを標準装備したマルチメディアPCなどによる再生環境の拡充によることが大きかった。こうした再生環境の拡充を受けて、1993年には郵政省（当時）の「通信白書」にCD-ROMが付属されるなど、大きな変化が起こったのである。同時に、既存書籍をCD-ROMに置き換えたものが主であったCD出版物に、音声や映像などのマルチメディア性を生かした趣味や実用分野のタイトルも急増していった。さらにCD-ROMの製造コストの低価格化により、雑誌の付録として利用することが可能になったため、CD-ROM出版物は、一気に日用品化し、今でも色々な書籍の付録として添付されて販売されている。この電子出版で養われたデジタルコンテンツは、2000年頃よりダウンロード型の電子出版に変化したり、オンデマンド出版の方向に変化しているが、CD-ROMなどの「パッケージ系電子出版物」は2000年3月31日に成立した新しい納本制度により、国立国会図書館への納入が義務づけられている。

6.4 CDメディアが開いたインタラクティブの扉 (VIDEO-CD/ CD-I/ GPS等の映像市場)

光ディスクの映像記録は、最初にアナログビデオディスクとして実現された。ビデオディスクは、1981年にパイオニアが商品化した「レーザーディスク」(LD)が主流となった。映画やアニメ、音楽分野などの市販ソフトを中心にマニア向けの映像コンテンツビジネスの輪を広げ、又、業務用としてカラオケを主に博物館等の展示映像機器としても使用された。しかし、LDはアナログ記録であるためにディスク径が30cmと大きく、機材の小型化には限界があった。そこで、ディスク径の小さなCDメディアに映像を記録して商品化しようとの企画が生まれてきた。

最初に登場したのが1987年に規格化されたCD-Vである。CD-VはCDファミリーに位置付けられる規格で、CD-DAを拡張して、アナログの映像記録を可能にしたものである。基本的には、内周にCD-DAのオーディオデータ、外周にアナログの映像データ(5分程度)を記録したハイブリッドCDメディアを指す。CD-Vを再生するプレーヤはLDとの互換性を持たせることも可能であり、実際にパイオニアからLDとCD-Vを再生する通称CLDプレーヤも発売された。CD-Vは、音楽ソフトにアーティストのプロモーション映像を一緒にして販売するような用途に使用されたが、本格的な普及には至らなかった。なお、このCD-Vの音声フォーマットが基本となって音声記録20分のCDシングルが生まれたのである。

こうした動きとは別に、デジタルによる動画記録の開発は進められていった。初期のデジタル動画圧縮伸張技術としては、DVI(Digital Video Interactive)がある。DVIは、1984年頃からRCAデビッドサーノフ研究所が研究開発を続け、1987年に開催された第2回CD-ROM国際会議(マイクロソフト主催)で発表したものである。その部門をGEが買収して、更に1988年にインテルに買収され、DVIとCD-ROMを融合した商品として製品化されたものである。動画圧縮技術は、MPEGとは異なり圧縮可変型であり、圧縮アルゴリズムは2種類あり、「PLV」と「RTV」と呼ばれた。特に「PLV」は圧縮率160対1の高画質で、718×480ピクセルのJPEG画像の表示まで可能であった。又、DVI技術の特徴として、OSやCPUを限定しないことがあり、MS-DOS、Windows3.0、OS/2環境などでの動作や記録媒体の制限はなかった。その為にDVIは、CD-ROMに72分の自然画像と音声を記録する技術として世に知られるようになったのである。DVIは、CDファミリーとしてはイエローブックに準拠したCD-ROMであり、特に論理フォーマットを拡張しているわけでもない。しかし、再生には専用のデコードボードを必要とし、30コマ/秒のフルフレーム映像をフルカラーで再生できるという特徴を持っていた。

DVIの作成は、使用する画像圧縮技術の特殊性により、インテルの設備又はインテルが許可した設備で行う必要があったために、日本では1989年9月には旧丸ビルにインテルDVIスタジオが開設され、ソフト制作に利用された。その後もDVI技術の普及促進団体「DAVIS」が設立され、1991年10月にはDVI再生専用機の規格仕様書を発表している。最も利用された

のがカラオケ分野で、1992年には日本コロムビアから「DVIカラオケ」が発売されている。その後、画像圧縮技術MPEG2等の開発が進み、当時としては最先端技術であったDVIは汎用化されて1992年には画像圧縮フォーマットINDEOに統一されたのである。また、この当時は、各社から独自のデジタル画像圧縮フォーマットが開発され発表された。1991年にはアップルコンピュータが「Quick Time1.0」を開発し、翌1992年にはマイクロソフトが「Video For Windows」を発表したり、パソコンの世界でも自然画のデジタル動画表示できるようになったが、ハードの制約があり、部分動画のコマ落として表示するのが「やっと」のレベルであった。図6-4-1にDVI共同展示（1990年マルチメディア国際会議）の写真を示した。この章では、主にCDメディアの映像分野への応用として、VIDEO-CD（6-4-1）と業務用途のインタラクティブ機能を利用したCD-I（CD-Interactive）（6-4-2）及び、CDメディアとGPS（6-4-3）について記述する。

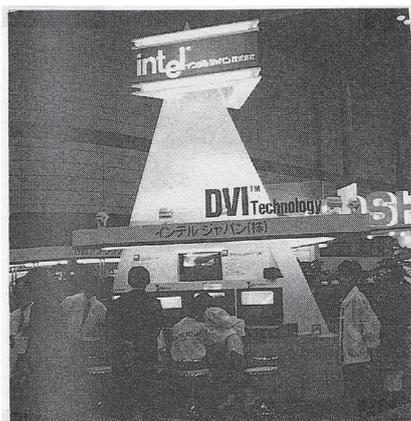


図 6-4-1 DVI 共同展示会場

6.4.1 VIDEO-CD (MPEG1) の登場

CDの歴史は改めて言うまでもなく「互換性の歴史」である。言い方を変えれば、「きっちりとした系譜の歴史」である。そしてCDのビジネスは常にそういう「秩序」の上に乗って進められてきた。1990年代に入っすぐ、後述するCD-I（CD-Interactive）のビジネスが大きな曲がり角に差し掛かった時に、このCD-Iを分岐点とする新しい系譜が生まれた。それがビデオCD（VCD）である。VCDの具体的な特徴は、CD-Iの論理フォーマットを継承しつつも、高度なインタラクティブ機能を抑えた「MPEG1デジタルビデオディスク」であるということが出来る。この当時、既に開発は次世代デジタル映像配布メディア（DVD）に焦点が絞られていた。その開発の状況を十分に承知していた中で、DVD普及までには時間がかかるだろ

うし、その間に展開すべきビジネスはある、との予測のもとに生まれたのがビデオCD（VCD）であった。VCDのライセンサーはソニー/フィリップスに加えて、松下電器と日本ビクター（JVC）の4社（4C）である。前3社はCD-Iの推進メーカーであり、JVCは、CDとMPEG-1を融合したカラオケシステムを開発しており、その技術により4Cに加わったもので、VCDはこうした「きっちりした系譜」のなかに明確に位置付けられていったのである。

デジタル動画の規格乱立に終止符を打ったのが、国際標準規格のMPEGの策定である。MPEGとは、ISO（国際標準化機構）とIEC（国際電気標準会議）が設立した標準化組織「Motion Picture Expert Group」の頭文字で、転じてこの組織が作成したデジタル動画の標準規格がMPEGと呼ばれるようになったのである。MPEGには解像度と符号化レートにより、MPEG-1、MPEG-2、MPEG-4、MPEG-7の規格が存在している。1993年3月に最終案が策定されたMPEG-1形式は、デジタル動画をCDメディアに記録することを想定してフォーマットが決められた。ところが、MPEG-1はあくまでもデジタル動画の圧縮符号化方式であり、実際にどのような商品に使えるかは規定していないので、互換性のない様々なCD-ROM応用製品が提案され混乱が生じてしまった。この混乱を取束するために、「ホワイトブック」という規格が策定され、VIDEO-CDとして正式にCDファミリーに組み込まれたのである。

MPEG-1対応のCD-ROM応用製品で最初に登場したのは、業務用のカラオケシステムだった。ホワイトブックが策定されたことにより、カラオケ分野のデジタル動画はVIDEO-CDが主流になるが、その後の通信カラオケの普及に伴い、VIDEO-CDは背景画像の供給メディアとしての位置付けになってしまった。これに対して、家電分野におけるデジタル映像コンテンツのデリバリーメディアとして位置付けようとの動きもあった。当初のビデオCDはエンコード技術が貧弱で、画質が悪く、動画もコマ落ちしてブロックノイズを生ずる（信号伝送速度が1.2Mbpsのため）等の問題があり、特に、高画質志向の日本では不向きであった。その後、日本での映像コンテンツの配信メディアは、DVDやインターネットのブロードバンド配信に移行していった。

しかし、アジアの一部や中近東のような、国土が広く通信放送インフラの未整備な国々では、パッケージメディアしか映像コンテンツを楽しむことが出来ない

地域が多い。その為、VTRより小型軽量で、設備投資にコストがかからず、物流に適したビデオCDは大きな人気を博し、中国やインドを中心に大きな市場を形成し、映像配布メディアの主流の座を占めたのである。特に、中国には映像マーケットが無かったことが大きな魅力であり、経済成長に伴う新たなエンターテインメントとして流行する兆しがあった。同時に、中国への進出は、CD-DAでも正しく認知されていなかったライセンスやパテント、ロイヤリティーといった考え方やルールを、中国政府並びにローカルメーカに認知してもらい“遵法”の仕組みを理解させようとした試みでもあった。1997年から1999年にかけて、中国政府の窓口である工業技術院及び情報産業部等との折衝は10数回に及んだのである。当時の中国との窓口役は「中国が当面世界の生産基地として充分な役割を果たしていくのは間違いない。その際、自分たちのブランドを世界のマーケットに出していくためには、中国政府は、国内のメーカに対し、ライセンスやパテントを重視する指導を徹底する必要がある。そうでないと、中国メーカはいつまでたっても中国国内のドメスティックなメーカであって、WTOへの加盟すらかなわず、また、海賊版やイミテーションが蔓延る特殊なマーケットという汚名を返上することはできない」と説得を続けたと回顧している。そうした「糠に釘」のような折衝やマーケット戦略が功を奏し、中国におけるVCDプレーヤマーケットは急速に立ち上がり、1996年の約500万台弱が、1997年には一気に3倍の約1500万台に迫る規模へと急成長していったのである。一方、VCDをベースとした中国特有のドメスティックなデファクトスタンダードが次々と出現して、市場が大きく混乱してしまった。こうした混乱を収束するために、中国政府は「超級ビデオCD」(1998年10月)の制定を画策したが、IEC規格にも提案したいとの含みもあったのである。

「超級ビデオCD」(Chauji VCD)とは、ビデオCDより高品質な映像、音声記録を実現するために、CDメディアにMPEG-2形式で圧縮した映像、音声データを記録する規格である。この規格はCDの規格体系とは異なり、中国独自のガイドラインを含んでいたこともあり、4Cとしては対応に苦慮した。しかし結果として、4Cは1998年12月に発表していたスーパーVCD規格Ver0.9(通称4C/SVCD規格)と超級VCD規格を統一し、IEC化の方向で中国政府と協議を進めた。1998年12月、北京で開催されたIEC総会で承認されて「スーパーVCD(通称IEC/SVCD規格)」として国際規格になったのである。このIEC/SVCD規格

は、超級VCDと4C/SVCDの共通のサブセットの関係にある。又、「Chauji VCD」規格のソフトタイトルは、中国から諸外国に輸出されたときのライセンス問題等が懸念されたため、2000年にホワイトブックの拡張として「Super Video CD」という名称で正式にCDファミリーとして扱うようにした。SVCDのベースになったVIDEO CD 2.0は再生環境としてCD-ROMドライブを想定しているために、データの伝送速度は約1.5Mbps(CD規格の最大伝送速度)に制限してあるので、VHSビデオ程度の画質しか実現できなかった。それに対して、SVCDは、映像はMPEG2形式で圧縮しており、伝送レートも倍速CD並みの2.6Mbpsに高められていたので、再生時間は35分程度であるが、DVDに比較して低価格であることが強みのブリッジフォーマットと呼べるものであった。しかし4Cからの製品化はなく、その意味ではスーパービデオCDはファイナルドラフトを作成しただけのフォーマットであり、映像コンテンツ配布メディアとしては不十分な仕様であった。同時期に登場したDVDの急速な低価格化に、存在意義をなくし収束したのである。この折衝を通して、担当者は、中国政府との交渉がいかに変であったかを体験させられたと回顧している。図6-4-2にビデオCDが民生用途に使われたビデオCD対応ミニコンボ(松下電器)の写真を掲載した。

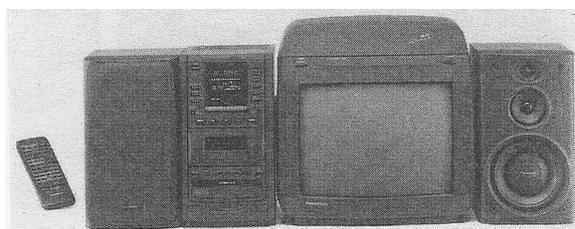


図6-4-2 ビデオCDミニコンボ(松下電器)

6.4.2 業務用インタラクティブへの活用(CD-I等)

CDメディアは、業務用カラオケの在り方を一変させた。1982年頃から、LDやVHDのアナログビデオディスクを利用した「絵の出るカラオケ」は、楽曲と歌詞を連動して表示することが可能になったために急速に普及した。しかし、直径30cmに近いビデオディスクを利用していたために、保管場所が大きく、小規模の店には普及しなかった。そこでCDメディアを利用したコンパクトなカラオケシステムの登場が待たれていた。

最初に実用化されたCDメディアの業務用カラオケシステムは、1986年頃から導入されたCD-G(CDグラフィック)によるものである。背景のCG(コンピュータグラフィック)の静止画と、歌詞を曲にシン



図 6-4-3 ビデオ CD カラオケシステム
(日本ビクター KX-DV100)

クロして画面に同期表示する CD-G カラオケは、小型で多くの曲を内蔵できることから小規模店舗で人気を博し、新たなマーケットを産みだした。しかし、カラオケ文化が成熟にするに従って、動画表示が可能なシステムが要求され、数千曲のカラオケの収納が可能になった「CD-I カラオケシステム」が完成した翌年の 1992 年には、ようやく標準化された MPEG-1 規格を利用した「CD 動画カラオケシステム」が、各社より発表された。大規模のオートチェンジャーや集中管理システムが製品化されたが、各社の詳細スペックが微妙に異なっていたため、ソフトタイトルの互換性がなかった。互換性がないと新譜の供給などで混乱が起きることが懸念されて、1993 年には CD-I エクステンション、CD-ROM XA、ビデオ CD 等の相互互換性を確保するための「ホワイトブック」が策定され混乱を収拾したのである。その後、CD メディアによるカラオケフォーマットはビデオ CD が業界標準になり、ビジネスは拡大していった。ビデオ CD はディスクのオートチェンジャーシステムと同期して発展していったが、1995 年頃からは、背景の映像はビデオ CD で、曲や歌詞は通信 (ISDN) で配信するという「通信カラオケ」が登場して急速に普及していった。その後のネットワーク環境の急速な進化により、現在はブロードバンド接続など 100% 通信によるものが主流になり、インタラクティブな CD メディアは役割を終えたのである。図 6-4-3 に業務用のビデオ CD カラオケシステムの写真を提示した。

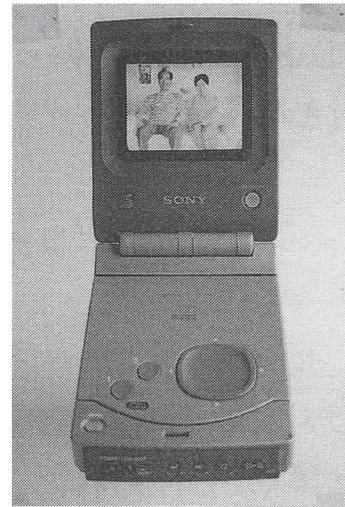


図 6-4-4 ポータブル CD-I
(ソニー IVO-V10)

一方、セールスプロモーションなどの分野で、映像情報を提供する試みは、早くから行われていた。1979 年には、ランダムアクセス性が良く、動画を再生できる LD を使ったセールスプロモーションで米国の自動車会社が先鞭をつけた。日本でも 1984 年頃からパソコンと LD による検索図鑑が発表されたり、電子カタログや各種ガイドの端末としての利用が始まり、このようなパソコン (PC) とビデオディスク (VD) を組み合わせたシステムを IVD (インタラクティブ・ビデオディスク) と呼んでいた。その後、この分野は CD メディアを利用するようになり、CD-I (CD インタラクティブ) や DVI などの新しいマルチメディア CD の登場により、対話性 (インタラクティブ) を活かした情報提供が行われるようになっていった。一例として、1989 年頃よりヨーロッパでは CD-I のマルチリンガル機能を生かして、フィアット、ルノー、プジョーなどの自動車整備教育ソフトが制作されたが、これは、1992 年の EU 統合に向けたインタラクティブな多言語教育のニーズにフィットした好例であるし、同様の試みは各国の観光ガイド等に活用されたのである。

日本においては、1991 年 8 月にフィリップスが業務用の据え置き型 CD-I プレーヤの発売に踏み切り、翌年にはソニーから携帯型 CD-I プレーヤの IVO-V10 が発売され、京セラからも CD-I200 が発売された。業務用のプレーヤは RS-232C などのポートを備えており、タッチパネルやカードリーダー、プリンター、通信ネットワーク、その他のシステムに接続利用が可能な仕様になっていた。又、NEC は 1991 年 10 月に独自の NID 動画をサポートした「MM-P1」を、日本ビクターも MPEG-1 動画をサポートした「マルチ

メディア・プレゼンター：DM-P10」を発売して、プロモーション領域のビジネスを広げていった。この様に、ノート型PCがまだ高価で普及していない時期に、インタラクティブな対応が可能なマルチメディアCD機器は、機動性に富み、操作も簡単なため、プレゼンテーションなどのビジネスの分野で活躍の場を広げていった。図6-44にソニーのポータブルCD-IプレーヤIVO-V10の写真を示した。

このCD-I (CDインタラクティブ) は、1986年のCD-ROM国際会議の場で発表されたCD-Iの規格である「グリーンブック」が発表されたことに端を発している。前述したが「グリーンブック」とは、CD-ROMにどのような情報(デジタルコンテンツ)をどう収容して管理し、どういうシステムで、どうやって制御(操作)していくかを詳細に定めた規格である。CD-Iは16ビットのPCを用いた情報家電の走りであり、家電メーカーからのCD-ROMへのアプローチであった。家電であるがゆえに、操作は簡単で、PCの様にフリーズなどはあってはならず、その為に細かな仕様が決められたのであるが、この仕様の厳格さが制作環境の自由さを制限して、CD-Iの発展を疎外してしまったことは容易に想像できる。しかし、CD-Iが他に先んじて実現しようとしたのは、マルチメディアの世界観であって、このCD-Iをマルチメディアの「先駆け」と位置付ける方々は、今でも非常に多いのである。マルチメディアを引っ張ってきた先人は「CD-Iは、今言われているマルチメディアやITのコンセプトのほとんどを作ったと思う。あの時点と現在で何が違うのかというと、CPUが進んで処理スピードが高速になったこと、それに記憶容量が格段に大きくなったことで、それ以外のコンセプトは、CD-Iで既にほとんど出来上がっていて、現在はその延長線上にある。」と主張している。また、マルチメディアソフトタイトルについては「本来の“売り”であるはずの推論の部分は20%程度しかなく、残りの80%は、マンマシンインターフェース、つまりインタラクティブ性の設計である」と述べている。1980年代後半から沸き起こったマルチメディアの議論は、揺籃期から成長期へ向かうCDメディアと密接に係わっていた。今でも優れたソフトタイトルが数多く眠っている現状があり、インターネットとITの陰に隠れてしまっているが、今こそCD-Iで先鞭をつけた優れたマルチメディアコンテンツの活用を、各方面で期待したい。

CD-Iは、家電メーカー(ソニー、フィリップス、松下等)が、マルチメディア時代を予測して、PC陣営

に「OSの覇権」をめぐるの挑戦でもあった。当時としては、最新技術のリアルタイムOSでマルチタスクが可能な「OS-9」を家庭用の機器の中心において、操作や機能をPCの様な複雑さを持たないシステムを構築したいとの野望を持った挑戦であった。その為に、民生用のソフトタイトルも用意されて、フィリップスからは民生用プレーヤ「CDI505」を発売しているが、最終的にマイクロソフト等のPCメーカー(米国防政府PC戦略)に敗れ、ビジネスは収束していったのである。

6.4.3 CD-ROMとGPS(カーナビ市場)

カーナビゲーション市場は、CDメディアとGPSにより開花したといわれている。GPSは言うまでもなく「Global Positioning System: 全地球測位システム」で、カーナビゲーションシステムの基幹をなす技術である。上空21,000kmの衛星軌道にある米国の軍事衛星の4個以上から発信される電波を受信して、三角測量の原理で自車の経度と緯度を測定する。カーナビは、このGPSで得られた自車の位置情報を、デジタル地図情報と照合して、モニター画面に表示し、ドライバーを目的地まで誘導するシステムである。

このカーナビの基本技術であるデジタル地図データを、低コストかつ小型に記録、配布できる大容量メディアには、CD-ROMが最適であった。一方で、CD-ROMメディアがカーナビシステムに採用された理由としては、自動車マーケットの高付加価値化がある。即ち、導入が始まったばかりのカーCDと兼用できるカーナビシステムを市場投入して、一気に需要を喚起したいとの思惑があったために、当初のカーナビシステムは、自動車メーカーやカーオーディオメーカーが中心となって開発を進めたのである。そのため、CD-ROMメディアに記録するデジタル地図データも自動車メーカーやカーオーディオメーカーが主導する形で進められたが、それぞれの形式は、地図データ形式に互換性がないことが問題となって浮き出してきた。その状況を改善するために、ソニー、ケンウッドなどのカーオーディオメーカー各社と、ゼンリンなどの地図データ提供会社が「ナビゲーションシステム研究会」を充足させて制定した「CD-ROM地図統一フォーマット」(ナビ研統一規格)が、幅広いメンバーの賛同を得て業界標準フォーマットになったのである。しかし、トヨタ、日産、昭文社等は「CD CRAFT」(CD and CRT Applied Format)を提案し、又、パイオニアも独自の「カロツェリアフォーマット」の提案と独自の商品化は続いたのである。

自動車に搭載するジャイロセンサーの高性能化による位置ずれの減少と、量産によるシステム価格の低価格化が進んだことにより、カーナビの普及が始まったが、そのきっかけとなった要因は「アフターマーケット」の成長と「道路地図データの標準化」が進んだことである。これに合わせて、一部の CD-ROM 道路地図のフォーマットが開示されたために、CD メディアの互換性を生かして、様々なプラットフォームが登場してくるようになった。即ち、CD (CD-ROM) ドライブが搭載されているプラットフォーム上で、カーナビソフトを実行すると、CD-ROM 道路地図を利用したカーナビシステムが実現できることとなり、主要な CD プラットホームメーカは、高付加価値を実現するためのカーナビシステム機能を開発したのである。

一例として、CD-I カーナビシステムは、1989 年 8 月に、いち早く富士通テンが東京モーターショーに試作機を発表して、1993 年 10 月にマスプロ電工から商品化された。CD-I が規格化された 1986 年当時、日本にはインタラクティブな素材を扱う風土はなかったが、CD-I 技術は様々なデータをインタラクティブに、同時に民生用機器でコンテンツを扱えるという特徴もっていたために、富士通テンはこの CD-I 技術を次世代のカーナビゲーションに応用すべきとの方向性を決めたのである。

CD-ROM パソコンを利用したカーナビとして、富士通の FM-TOWNS 互換機の MARTY をさらにカーナビ専用カスタマイズした「CAR MARTY」は、富士通テン/富士通から 1994 年に発売された。また、ビデオ CD のカーナビもあり、船井電機のポータブルビデオ CD プレーヤ「デルーガミニ」は専用の GPS アンテナと電子マップにより、ナビゲーション装置としても活用された。こうした CD カーナビのプラットフォームの広がり、道路地図以外のアプリケーションの充実につながったのである。単なる位置情報のみを提供するカーナビ機能を基本にして、音声ガイドを付加したり、観光情報やグルメ情報から各種お店情報までのコンテンツを提供して「地図情報の高付

加価値化」を図ったものから、CD プラットホームのマルチメディア性を生かして、カラオケやゲームを車内で楽しむエンターテインメントを充実したソフトまで多様化していった。この結果、当然の帰着としてデータ量はますます肥大化していき、CD メディアの記録容量では限界が生じて、2005 年頃から次第に容量の大きな DVD メディアに移行していくことになったのは当然の流れであった。さらに、カーナビは渋滞情報や交通規制情報などのリアルタイム情報（日本では VICS）との連携で進化していくことになる。交通情報がリアルタイムに利用できるようになると、地図情報の最新データへの更新が必要になってくる。CD メディアでも DVD メディアでも、地図情報のデリバリーにパッケージメディアを使用する限り更新頻度は自ずから限られてくる。そこで、低価格化したハードディスクを利用したカーナビシステムが実現されてきた。更なる利点は、インターネットの普及により、カーナビとインターネットを統合することにより、最新の地図情報をオンラインでダウンロードして更新し、そこに最新の交通情報を照合するなどの進化が続いた。しかし、CD-ROM メディアが開花させたナビゲーションの世界は、今でも燦然とした光を放っているのである。。

参考文献

- 1) 「コンパクトディスク その 20 年の歩み」 CDs21 ソリューションズ (2005)
- 2) 「CESA ゲーム白書」 (社) コンピュータエンターテインメントソフトウエア協会
- 3) 「マルチメディア市場に関する調査研究報告」(財) マルチメディアソフト振興協会
- 4) 「ウォークマンクロニクル」 ソニーマガジズ (2009)
- 5) 「ビデオ CD 規格 (動画や静止画を使って対話型ソフト実現)」 井橋孝夫 日経エレクトロニクス (No594) (1993.11)
- 6) 「DVD 解体新書」 ジム・テイラー、ネクサスインターコム訳 星雲社 (2003)

7 | 記録型 CD の登場

CD-DA 関連ビジネスが立ち上がってきた 1983 年頃を境にして、次の目標をどこにするかの議論は活発化していった。その一つは、650MB という当時としては画期的な大容量の CD というこのメディアを、コンピュータの読み出し専用メモリー (CD-ROM) として利用するための仕様を策定することだった。量子化サイズを 14 ビットではなく 8 ビットの整数倍の 16 ビットにしたこと、データの読み出し単位を 8 ビットにしておいたことが、コンピュータメモリーとして好適性をもたらしていたからでもある。

もう一つの目標は記録型 CD ディスクの研究である。CD という文字どおり小型のディスクに、自分たちの音楽やデジタルコンテンツを記録することに、開発者たちは夢と希望を託したのである。CD の開発リーダーであった中島は当時の事をこんな風に記述している。「ソニーで CD を開発し、いよいよ世の中に出すにあたって、私は“CD の次の夢”を見た。初めて開発した CD システムは、プロが作ったソフトをディスクに記録し、それをプレーヤーと共に販売するというビジネス形態であるので、かなりの高音質をユーザーに提供することができたと思う。しかし、唯、プロの演奏する音楽を聴いて楽しむだけが「オーディオ」というのだろうかという疑問がその頃の自分の中に芽生えていた。本当にオーディオを楽しみたい人は、自分で音を作ってみたい、それも最高のものを欲するようになるのではないか。普通のテープレコーダで何かを録音し、そして再生するように、例えば、自分の好みの歌手の歌や好きな演奏曲だけ集めた CD のアルバム作りや、サークルで演奏した音楽をその人達のためだけ CD 化するような、そんなシステムができたらよいと考えたのである。」(中島平太郎「次世代オーディオに挑む」風雲舎刊より)

1980 年代初頭から記録ディスクの開発は各社で始まっていたが、その方式は大きく分類すると 3 種類になる。第一の方式は、ダイレクトカッティング方式と呼ばれ、低融点金属膜をレーザーで穿孔する方式で、最も一般的であった。第 2 の方式は DRAW と呼ばれている方式で、アモルファス系の記録膜 (GeTeSb 系材料) にレーザーを照射することにより、光の照射されたところを結晶状態からアモルファス状態に変化させ、相の変化による反射率の差を光ヘッドで検出する方式である。高反射率は期待できないが、安定した信

号を得られる優れたシステムであった。第 3 の方式は光磁気 (Magneto Optical) と呼ばれる方式で、レーザー光の照射による熱とフェリ磁気記録層の磁気特性の組み合わせで記録する方式で、記録膜には TeFeCo 系の材料が使われた。厳密に分類すると光変調方式と磁界変調方式があるが、実用化されたのは磁界変調方式である。これは、一定強度のレーザー光であらかじめ記録膜 (垂直磁化膜) の磁化方向が反転できる温度迄温めておき、磁気ヘッドに流す電流の方向に従って磁界を反転させて記録する方式である。信号の読み出しは、弱いレーザー光を記録面に照射すると、カー (Kerr) 効果によって磁化の向きに応じて反射光の偏光面が回転するため、反射光の強弱を生じ信号として検出できるのである。

余談になるが、記録膜の開発は、主に物理、応用物理又は化学、化学工学を専攻したエンジニアの専任事項である。金属系薄膜を得意とするエンジニアは、半導体製造等に欠かせないために主に電気、機械メーカーに多い。一方、アモルファス材料や有機色素材料の扱いを得意とするエンジニアは化学会社や部品メーカーに多い。この、各社における記録膜開発の方向性を決める大きなファクターになったのが、エンジニア又は研究者の“哲学”であった。ソニーは、スパッタや蒸着技術を得意としていた研究者及び磁気記録技術の長い伝統があったため、あくまでも光磁気記録にこだわり、5.25 インチや 3.5 インチ MO の商品化から光磁気技術を使ったミニ・ディスク (MD) にまで商品を発展させていくことになった。一方、有機色素材料を得意としている三菱化学や太陽誘電の化学材料 / 部品メーカーは、色素材料を見事に使いこなし、後述する CD-R 技術を発展させて巨大なマーケットを構築していったのである。この様に各社が持っているエンジニアの特性が、別々の市場を形成し成功させた例は、極めて稀なケースとして関係者の間に長い間言い伝えられている。

7.1 有機色素と CD-R (CD レコーダブル)

光ディスクにデジタルデータを記録する試みは各所で始まっていたが、当初は、記録層に金属薄膜を採用して、この金属膜にレーザーで穴をあけてピットを形成する方式が主流であった。この方式は現像処理が不要なばかりか、記録したすぐ後に再生できるという優

れた特徴を持っていた。この記録膜には、高融点、高熱伝導の金属を採用するのが一般的であったが、1977年にフィリップスは低融点、低熱伝導の金属テルル (Te) を記録膜に採用した DRAW (Direct Read After Write) というシステムを実用化した。このフィリップスの DRAW は単に業務用のデジタルデータ記録システムとしてではなく、民生用“低出力レーザー+光ディスク”を先取りし、CD に繋がる半導体レーザーの出現を予測していると同時に、フィリップスのレコーダブル光ディスクの方向性を決定づけたものとしても意義深いのである。

フィリップスの DRAW を契機に、高融点金属から低融点金属に変わった追記型光ディスクの記録膜は、金属の代わりに、現在の光ディスクで主流である有機色素に注目が集まっていった。有機色素の追記型光ディスク記録層への展開は、文書光ファイリングの需要増への期待（実際は大きな市場にならなかった）に伴い、CD-R が開発される以前から、コンピュータメーカやメディアメーカ及び化学メーカ等で、様々な基礎研究が重ねられていた。1988年、太陽誘電 (株) がシアニン系の有機色素を使って CD-R メディアを完成させたのであるが、その後まもなくメディアメーカや化学材料メーカが CD-R 市場へ一斉参入することを可能にしたのは、各社が追記型光ディスクの記録膜の一材料として有機色素の研究に取り組んでいたからに他ならない。CD-R メディアにはいくつかの歴史的なブレイクスルーがある。例えば、従来の記録層にレーザー等の光で穿孔するのではなく、全く異質な発想として、有機色素膜を記録層として使い、金の反射膜（初期の頃）や非エアサンドイッチ構造にしたことなど（詳細は後述する）である。この様な大きな技術転換により、そのころ絶望視されていた CD-DA 互換の要件である信号の反射率 70% を何とかクリアしたのである。

当初、その CD-R はソニー、フィリップスのどちらの正統的なロードマップにも書かれていない“意外な技術”であった。それ以前に、ソニー、フィリップスの両ライセンサーは、レコーダブル CD に対しては、全く異なる道を模索していた。DRAW を起点としていたフィリップスの場合、記録層は、金属膜で、用途を CD-ROM の制作や利用を想定した追記型 CD (CD-WO, 商品名 CD-PROM (CD Program ROM)) だったのに対して、ソニーは光磁気を使用する書き換え型 CD (CD-MO)、並びにその延長線上にある MD (Mini Disc) を商品としてイメージしていた。両社の開発の方向性には、大きな齟齬があったばかりか、それ以上に深刻な課題として、これらの CD-WO, CD-PROM,

CD-MO が CD 互換を実現することの技術的難易度は相当高く、ほぼ不可能と考えられていたのである。その上、レコーダブル CD が CD 互換を実現してしまうとアーティストやレコード会社 (CD-ROM の場合はコンテンツホルダ) の著作権の権利侵害の危険性があり、「CD を超えて、オーディオの新たな夢を託す」はずのレコーダブル CD の開発や標準化、そして CD-R の誕生もまた一筋縄ではいかず、技術のみならず、政治、権利、文化、市場等の問題が山積みされていたのである。

7.1.1 レコーダブル CD の標準化経緯

レコーダブル CD の技術会議を提案したのはソニーからであった。CD が商品化されて以降、記録型光ディスクは各所で研究開発や実用化がすすめられており、その成果としてメディアの記録密度、性能が急速に向上して、製品化の実現性が高まったとの判断があったのである。1986年6月、ソニー/フィリップスのレコーダブル CD に関する会議が、フィリップス本社 (アイントホーヘン) で開催された。この会議は、両社の開発状況を交換することが目的であったが、この時点で、両社のレコーダブル CD の開発目標は全く異なっていた。

フィリップスの当面の目標は、イエローブックとして規格化された CD-ROM メディア向けのレコーダの開発であり、ROM ドライブとの互換性の確保し易さから、記録メディアは追記型相変化メディア (CD-WO) を想定していた。一方、ソニーは、社内で 2 グループが研究開発に着手していた。一つは、プロオーディオグループで、CD や CD-ROM のプルーフェディスク作成用レコーダや業務用アーカイブディスクレコーダへの展開を考えていた。もう一方は民生用のオーディオディスクレコーダの商品化を目標にして、光磁気ディスク (CD-MO) 技術を採用したレコーダを開発していたのである。

両社の思惑の違いの上で、第一回会議で議論された項目は、①ディスクの回転数情報及び位置情報をどのようにディスク上に掲載するか ②ランドとグループのどちらに情報を書き込むか ③メディアとしては何が適当か等であった。しかし、あくまでも意見交換の場であって、お互いの顔を憶測していたのであった。

第 2 回会議は、その年の 9 月 30 日と 10 月 1 日に東京で開催された。この席上ソニーは、開発を急ピッチで進めていた CD-MO のデータを示して、CD-MO メディアはグループ記録に適さないことを考慮したうえ

で、回転数や位置情報をランドの上にピットで形成する“エンボス”方式を提案した。それに対して、フィリップスは、トラックを若干蛇行させることでディスクの回転数を検知する“ウォブル”（蛇行）方式を提案した。ウォブルとは、ATIP（Absolute Time In Pre-groove）とも呼ばれ、最大振幅60 μ m、22.05kHzの周波数でトラックを蛇行させ、その際、CDで採用されている絶対時間のデジタル情報をデビエーション1kHzのFM変調をかけて記録する方式である。双方のディスクを交換して、ランド、ウォブルの信号を評価することが合意された。その他、両社ともにレコーダブルCDに関する一致点は“追記型ディスクだけではなく書き換え型ディスク”に焦点が当たっていたのである。しかし、ソニーはCD-MOで一気呵成に商品化を目指したいとの戦略であったのに対して、一方のフィリップスは、当分の間、既存のCDとの互換性の確保し易さを最重視し、CD-WOを推進し、技術の進化を待っていずれ書き換え型の相変化メディアを登場させていくロードマップを描いていたのである。いずれにせよ、フィリップスは相変化型ディスクをレコーダブルCDの中核的技術として捉えていたのである。

相変化型ディスクは、記録部分の反射率が記録部分に比べて ①高くなる“L to H型”メディア ②低くなる“H to L型”メディアに分類できる。両社の見解は ①L to H型にはグルーブ記録が好適 ②H to L型メディアにはランド記録が好適で統一されていた。しかし、フィリップスはCDプレーヤとの互換性の取りやすさから、L to H型メディアとグルーブ/ウォブル記録を組み合わせたCD-WOを強く提唱していた。ところが、ソニーのCD-MOを軸に民生用レコーダの開発を進めていたグループにとって、フィリップス案はとてども同意できるものではなかった。当時、光磁気は将来性、市場性ともに非常に有望視されていたメディアで、CD-MOはその技術の直系であり、既に記録密度、オーバーライト回数、メディア寿命などの点でCD並みの特性を獲得したCD-MO技術を確立しつつあったからである。改めて、ウォブルとエンボスの2つのアドレス方式を比較すると、下記のように分析された。

- ①ウォブル方式は、ドライブの変更が少ないが、グルーブの形状、記録信号、サーボそれぞれに最適化が必要
- ②エンボス方式は、アドレス部分と記録部分が分離できるが、ドライブが複雑でCDフォーマットとは異質である。

これまでの議論からはCD-WOを規格化する限り、技術の正統性はウォブル方式にあるのだが、書き換え型を想定していたソニーには全く合意できる内容ではなかったのである。

しかし、フィリップスの意思是「誰でもが気軽に、自分の音楽をCDプレーヤで再生できれば」という中島の考え方と同じであり、手軽に録音した音楽が広く普及しているCDプレーヤで再生できなければ、記録メディアフォーマットとしてのレコーダブルCDは無価値に等しいと考えていたのである。中島の描いた「CDの次」とは何よりCDとの互換だったが、この時点でCD-WOは既存のCDと完全なコンパチビリティが得られたわけではなく、「ライタブルCDとはCD互換であるべき」という思想が示された点において、CD-WOの果たした役割は非常に大きな意義があったのである。

この様にレコーダブルCD、とりわけCD-WOをめぐっては、ソニーとフィリップの間には、技術的にも方向性でも大きな隔たりはあったが、その隔たりは、双方の知恵とグルーブの形状や書き込みスポット形状の最適化等の技術改良によって埋められていくことになる。その結果から、CD-WOに関するアドレスはウォブル方式で合意できる状況になり、主要な仕様は1987年2月の会議で確定したのである。その後の半年ほどは、主要仕様の実験的検証に費やされて1987年11月、両社の基本合意を内外に向けて発表、翌1988年2月、ライセンサーに向けて仕様書が送付された。この段階で、フィリップスはCD-WOに「CD-PROM」というネーミングをあたえ、コンピュータ関係へのセールスを開始している。一方ソニーは、開発資源の制約からCD-WOの開発中止の決定を下したが、CD-MOについては、開発で培った基本技術を発展させ音声圧縮技術であるATRACと組み合わせてMD（Mini Disc）として、1992年に商品化することになったのである。

7.1.2 CD-R以前のレコーダブルディスク

CD-Rが誕生する約4年前に、ヤマハ（株）は、CD互換記録システム（PDS：プログラマブル・ディスク・システム）の開発をスタートさせていた。1984年当時は記録系のシステムは、未だアナログテープが主流であり、デジタル記録システムの登場が期待されていた時期でもあった。CD互換記録システムのキーテクノロジーは、①CD互換記録ディスク ②記録用光ピックアップ ③LSIであり、記録用光ピックアップとLSIの技術を持つヤマハは、富士写真フィルムに

最重要技術である CD 互換ディスクの開発を持ちかけた。CD と互換が取れる高い反射率と線速度 1.2m/秒での記録品位との両立が非常に困難であったが、約 3 年の時間をかけて目途がついた。基本的に、記録膜にレーザーを照射して穴をあけてピットを生成するもので、ダイレクトカッティングの一種でライトワンスディスクであった。しかし、CD 互換記録ディスクの規格がなかったために、CD 互換性を確認するため世の中の CD-ROM ドライブや CD プレーヤを買い集めて、できる限りの互換性試験を実施したとの苦労が伝わっている。例えば、第一世代は、記録層側にキズ、埃対策のため保護シートを付けた構造だったので、対気圧特性を確認せざるを得なくなり、試験環境がなかったために、富士山五合目まで PDS 機器を運び込み、記録試験を実施したりする大変な苦労を伴う実験を重ねたのである。

PDS の利用方法としては、CD-ROM、CD-DA のデバッグ用や少量多品種の電子出版を主としていたが、更に、カーナビゲーション用地図のオンデマンド書き込みサービスまでも検討していたのである。この PDS は CD 記録互換システムとして、1987 年 4 月の「第一回電子出版システム展」で発表され、世界初の CD 互換システムの発表とあって、CD 業界に大きな衝撃を与えた。発表から約半年後の 1988 年初めに PSD は発売され、当時の価格は、システム価格 230 万、ディスク価格 7000 円/枚で、ドライブユニット、エンコーダユニットで構成され、エンコーダユニット一台に対して複数のドライブユニットが接続でき、同時に同じディスクを複数枚作成可能であった。しかし、PCM レコーダやエンコーダの周辺機器を含めると約 1000 万を超えるシステム価格になり、一般のユーザーより、あくまでもパブリッシャー向けに焦点を当てた記録機器であった。

PDS の発売によって、電子出版におけるデバッグ時間は飛躍的に短縮され、CD-ROM の発展に大きく寄与したのである。どの位の改善になったかは、具体的な費用から算出できるが、当時、CD-ROM のデバッグは、その都度 CD-ROM ディスクを工場で作ってデバッグをせざるを得ず、一回の試作費用約 50 万円、平均デバッグ回数 5 回計 250 万円もかかり、更に一回の試作期間が 2 週間で計 2 か月半近く掛かっていたのである。それに比べ、PDS を使用すると、ディスク代 7000 円と約一時間で CD-ROM 互換ディスクが作成できるので、CD-ROM ソフト制作業界には画期的ツールとして大歓迎されたのである。この PDS が電子メディアサービスで最も活躍したのは、1991 年 12

月に日光堂（現 BMB）から発売された CD-I カラオケ「CDI-A500」及びカラオケソフト「CDI シリーズ」の開発時であった。CD-I カラオケは音声に加え静止画の連続再生も可能で、信号の配分率にもよるが、一枚のディスクに最大 50 曲程度の楽曲と約 7200 枚の静止画像の記録が可能な画期的なシステムであった。このシリーズのディスク約 70 枚を一年間という短期間に完成させたことは、PDS 無しでは実現できなかったし、今でも語り草になっている程 CD 互換機能が高く評価されたのである。PDS ライター 6 台を連動させたスタジオの装置は、CD-ROM、ビデオ CD や CD-I など様々なタイトル制作に 2002 年頃まで活用され、その貢献は計り知れないほど大きいものであった。PDS は 1992 年に 2 倍速記録対応機を発売し、インターフェイスも SCSI に対応して、よりユーザーに使いやすいシステムとして進化し、また、業務用オーディオレコーダにも進化していった。

PDS は CD-R 誕生の以前に開発された CD 互換システムであり、業務用に特化したため一般的ではなかったが、PDS があったからこそ、その後続く CD-R が生まれたといっても過言ではないほどの貴重な光ディスクシステムであった。産業の遺産として感謝の意を添えて、図 7-1-1 にヤマハ（株）のプログラマブルディスクシステム（PDS）の写真を掲載した。



図 7-1-1 ヤマハのプログラマブルディスクシステム (PDS)

7.1.3 CD-R の出現

ソニーとフィリップスによる CD-WO の基本合意の発表後、電子デバイスメーカーの太陽誘電（株）からソニーに対して、彼らの開発している有機色素型の追記メディアを CD-WO に含めて貰えないだろうかとの申し入れがあった。太陽誘電とソニーを結びつけたのは、当時のアイワ（株）社長であった中島であった。中島は CD の次にレコーダブル CD の可能性と将来に賭け、記録可能ディスクを試作している各社へ「CD コンパチブル（互換）な資料を提供して欲しい」と依頼していたのである。（前出、次世代オーディオに挑

む)しかし、各社からの回答は必ずしも中島の意図に答えるものではなかった。記録可能ディスクを試作している各社は、「CDで定めた光の反射率70%をクリア出来ない。その上、記録膜を光が通過している間に吸収されてしまう、そもそも目標設定がおかしい」や「光の技術の素人には付き合ってもらえない」等と否定的な回答が多く、ほとんどの会社は相手にしてくれなくなっていた。

そのような状況にも拘わらず、太陽誘電だけはCDとの互換という目的を達成するために、有機色素を使ったWORM型の開発にこだわったメーカーであった。同社は、1985年頃よりCD-R開発に着手しており、中島の意を受けたCD互換の追記型CDの開発に注力していたのである。開発の成功には常に“偶然の産物”が存在する。この産物は一般的には目に見えないし誰も気づかない。当時のアイワ本社は台東区池之端にあり、一方、太陽誘電の研究所の一部が歩いて5分程の黒門町に残っていた。中島は、忙しい社長業の合間を縫って黒門町の研究所をしばしば訪問し、若いエンジニアとの会話を楽しみにして開発の進行状況を確認し、適切な指示をしていたのである。近くに双方の居場所があったという“偶然の産物”が、このプロジェクトを成功に導いたのである。前述したように、当時の追記型の光ディスクは、CD-WO的な方法、ディスクにレーザー光を照射するダイレクトカッティング、つまり記録膜そのものに穴を穿孔する方式が一般的であった。記録層をレーザー光で穿孔することは、“エアサンドイッチ方式”と呼ばれるが、レーザーによる記録層の破壊、溶解、膨張、収縮等の記録膜の物理的変化で生じた空気の逃げ道をあらかじめ設けておく特殊なディスク構造が必要であった。だが、この場合CD仕様の要件である70%以上の反射率と、1.2mmのディスク厚さを両立するのは極めて困難な開発であった。しかし、太陽誘電一社だけは、若きエンジニアの石黒隆、浜田恵美子が“中島の夢”を追いかけた実験を、黒門町の研究所で繰り返してくれたのである。

太陽誘電が画期的であったのは、この「常識の壁」をあっさり打ち破ってしまったことにある。追記型光ディスクの要とされていた空気層を省き、有機色素の記録層と新たに配置した金の(その後銀合金)反射層を“直付け”してしまったのである。シンプルで、今までのテクノロジーとは次元を異にするブレークスルーであった。技術的には、ディスクにレーザー光が照射されると、その部分の温度が上昇して、有機色素

は溶解して分解する。その場合、単純に溶けるのではなく、一瞬“爆縮”が生じ、その影響はポリカーボネート基板にまで達して、その基板を変形させてしまう。つまり、CD-R反射率達成のメカニズムは、有機色素の物理的な変化のみならず基板の変形までを設計に取り込み、要求される70%以上の反射率の変化(変調度)を実現しているのである。ここが、CD-R記録再生の原理の重要なポイントで、基板の変形という予測していなかった偶然の産物によって、その変形によりできた位相差(反射信号の強弱は位相差)がより高い反射率を得る要因になったのは、コロンプスの卵以外の何物でもなかったのである。

一方、書き込まれたピット形状は、ディスクに記録された信号の品質に影響する。一般的にはピット立上り、立下りの光学的な明瞭さが、読み出した信号のS/Nやジッターに効いてくる。小型の半導体レーザーで記録するので、エッジの分明さに欠ける課題があるが、屈折率の高い有機色素を選択することにより、書き込まれたピットは光学的に、実距離以上にエッジは急峻に立ち上がって(立ち下がって)いる様に工夫されている。CD-Rに記録される信号はデジタルであるが、有機色素の特性、膜厚、ポリカーボネート基板上のブリグリーブの精度等は、極めて多くのアナログ的なファクターによって成り立っている。この開発された方式のディスクの大量生産性は極めてよく、量産設備の開発に伴い1990年当時約100ドル/枚もしていたメディアは2000年頃には、約1ドル/枚まで急速に下落して、生産枚数は急拡大して大産業に成長して行くことになったのである。また、WO(Wright Once)機能は、ディスクコストが安くなれば最大の効果を生み、紙と同様に消去して再使用する必要はなく、記録の短時間で記録メディアの主流の座を占めるに至ったのである。

太陽誘電の石黒、浜田両名には全国発明表彰科学技術長官発明賞(2000年発明協会)及び中島記念賞(CDs21ソリューションズ)が贈られ、記念すべき業績を称えられた。又、浜田は応用物理学会への貢献が認められ宅間宏賞(2002年)が贈られて顕彰されている。一方、特許番号2134979、2137118及び2135363としてCD-Rの原理発明が登録されている。図7-1-2に、技術史に残る世界初の太陽誘電製のCD-Rディスク(1988年)の写真を掲載した。

7.1.4 CD-Rの構造と記録/再生原理

太陽誘電によって提案されたCD-Rの構造をCDと比較した図を7-1-3に示したが、プレス型のディスク

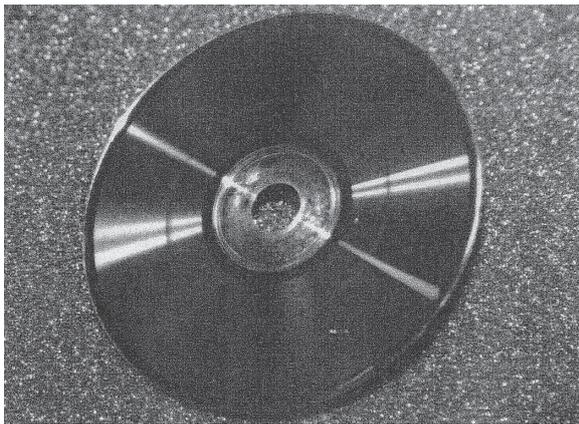


図 7-1-2 世界初の CD-R ディスク (1988 年)

との大きな違いは、CD-R の記録・再生面が暗緑色や緑色、またはブルーといった色彩を帯びている事である。CD-DA や CD-ROM の様なプレスされたディスクのシルバー色に輝くディスクとは、余りに異なっている。単純に言うと、レーザーのオン/オフによって緑色の記録面を物理的に変化させて、マーク（焼いて組織を破壊）を与えて、そのオン/オフを 0 と 1 のデジタルデータとしてディスクに記録しているのである。

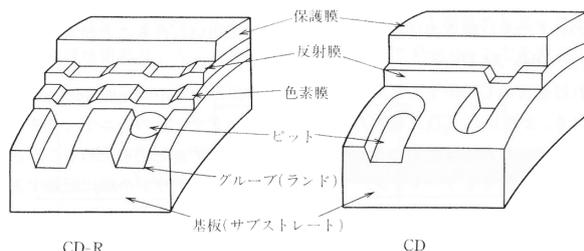


図 7-1-3 CD と CD-R ディスクの構造

CD-R の構造は、次の 4 層から成り立っている。

- ①ポリカーボネート基板
- ②有機色素膜
- ③反射膜
- ④オーバーコート（保護膜）

ディスクによっては、商品的な魅力を高めるためにさらに機能保護層を追加したものもある。CD-R というと、記録層の有機色素の材料に関心が集まるが、ディスクの基板となる 1.2mm のポリカーボネート基板の成型精度は、CD-R 全体の特性を大きく左右する。透明の基板には、プリグループというミクロンオーダーの微細な案内溝が刻まれており、プリグループは FM 変調されて緩やかに蛇行し、レーザーはこの溝に沿って記録していく。図 7-1-4 に CD-R ディスクのレイアウトと図 7-1-5 に CD-R のイメージを示した。ディスクのレイアウトからは最内周のリードインの内側に PCA (Power Calibration Area) または PMA (Program Memory Area) とよばれる記録データのキャリブレーション

ションエリアが設けられて、後述するパワーキャリブレーションが行われ最適記録を行うようになっている。また、CD-R イメージ図からは、記録前のグループだけの状態から、記録ピットがグループ上に形成された状況が理解できよう。

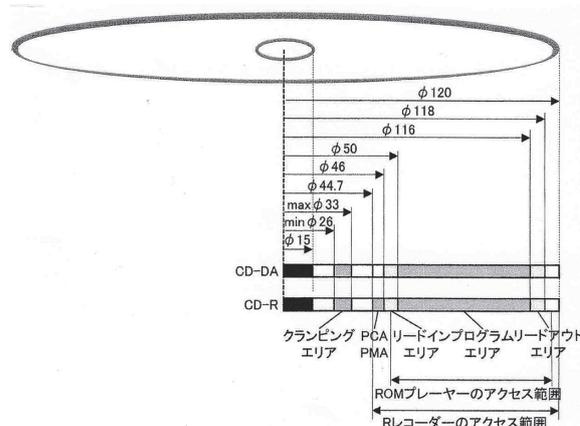


図 7-1-4 CD-DA/CD-R ディスクのレイアウト

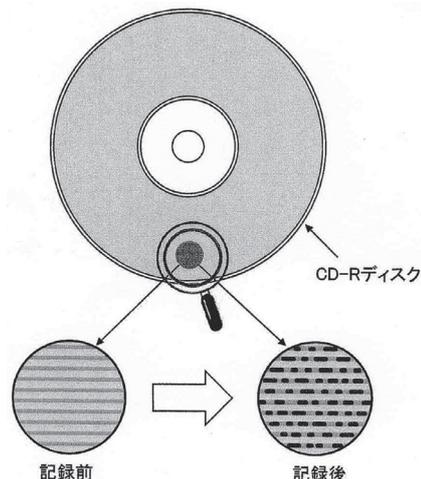


図 7-1-5 CD-R のイメージ図

このプリグループの精度と形状は、CD-R の能力を大きく左右するが、さらに CD-R の場合、プリグループの溝に溜まった色素の「溜まり方」まで記録に生かしてしまう工夫が施されている。CD-R の特徴である有機色素は、ポリカーボネート基板上にスピコート（回転膜生成方法）という方式によって塗布される。スピコートで生成された膜厚は溝の内と外では均一ではなく、あえて色素が溝（グループ）の部分に「溜まる」様な成膜の手法を取っている。これは即ち、ランドとグループの膜厚の違い、「溜まり方」の差を利用して反射率を CD 並みに高くしているのである。この差は記録特性に大きな影響を与えることになり、例えば、プリグループの外の膜厚を薄くし、記録感度を落とすことで記録ピットの幅を抑え、記録品質を改善するようになる。その意味で、CD-R の記録特性は膜厚やプリグループの形状のみで決定するものでは

なく、採用する有機色素の物性、溶剤の特性、工程管理、スピコート仕様の仕様など極めてアナログ的なファクターによって総合的に決定されるのである。高品質なCD-Rディスクの生産は、大変な経験とノウハウの積み重ねが必要で、日本企業が市場を牽引して発展させたのである。図7-1-6にCD-Rディスク製造工程図を示した。基板成型から有機色素塗布工程に至り、反射膜形成工程までは、極めてノウハウが多く、技術の積み上げによってなされた製造工程であったが、大量生産は装置産業であるの言葉とうり、生産コストの削減に伴いそのノウハウは機械と共に海外へ輸出・移転され、生産拠点が次第に海外に移っていくことになってしまった。

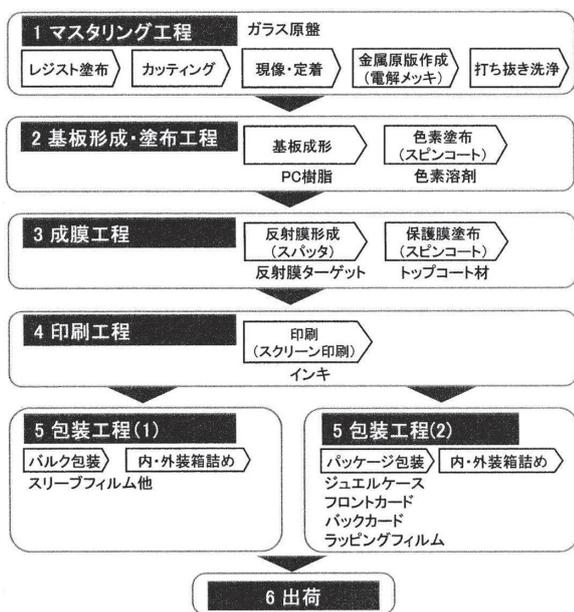


図 7-1-6 CD-R ディスク製造工程

一方、CD-Rの反射膜も重要な構成要素の一部だが、1990年代前半のCD-R生産量が少なかった頃の反射膜は、ほとんどが金の薄膜であった。当初は、有機色素膜の屈折率や反射率、記録波長等のかね合いから金が選定されたが、現在はほとんどが銀合金の薄膜である。最大の理由は、大量生産時のコストの削減であり、もう一つの理由は、剥離強度の向上のためである。当初のCD-Rメディアは保護面にテープを貼ってそれを剥がすと金の反射膜までも一緒にはがれてしまい、剥離に弱い、扱いにくいメディアだった。しかし、実用に耐えなかった剥離強度は、銀合金を採用することにより大幅に強化され、メディアのトータルな信頼性が高まった。

余談になるが、この弱い剥離特性を生かして、高価な金の薄膜材料を回収するプロジェクトが実際に起こされた。佐渡の“金山のわらじ”からの金回収にヒン

トを得て、化学エンジニアは嬉々とした試行錯誤を続けたが、いざ、本格的に回収を始めようとした1996年暮れになると、生産量が急増して、CD-Rディスク価格が急落する予兆が見えてきた。1997年になると、ディスクの材料費の見直しが徹底されて高価な金の反射膜は銀合金に変更され、実際に約1000円/枚から約300円/枚の1/3にまで急落してしまった。本当に“幻の金取り物語”になってしまったが、実験で回収した数百グラムの金は、「中島平太郎の金印」として鑄造され、今でも大切に保管され実用に供されている。これを機に、材料の再活用の機運が起こり、高価な材料である基板のポリカーボネートの回収方法の開発は、その後も続けられた。しかし回収された基板が中国等に高価で売却されてしまうようなことが起こり、回収構想は頓挫してしましたが、CD-Rに書き込んだ情報を安全に破壊するシュレッダーの様な通称「がりがり君」は商品となった。図7-1-7に金取り物語の残照として「中島平太郎の金印」を示した。



印影

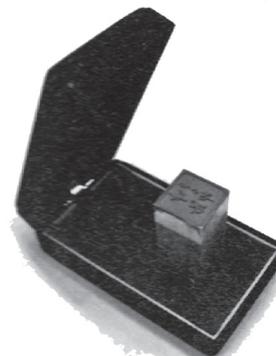


図 7-1-7 中島平太郎の金印

CD-Rの色素は、屈折率1.59の基板と780nmのレーザーに対応した波長領域において、反射率が最も大きくなる様な光学定数を有し、なおかつ溶剤との相性が良いという条件の中で、世界初のCD-Rである太陽誘電製のディスクは、たまたまシアニンという有機物を使って実現した。有機色素がシアニンだけであったなら、CD-Rの世界は、もう少し平和的な技術論争であったかも知れない(Orange Book Part II Ver1.1はシアニン系色素を対象とした仕様)が、無機物とは異なり、有機物は分子構造をコントロールすることで、特性を少しずつ変化させられる可能性があり、メディアメー

カや化学メーカーは、特許に縛られることを嫌い、自社でハンドリングしやすい材料の中から CD-R に適した有機色素を開発して商品化した。それが、フタロシアニンやアゾといった有機色素である。図 7-1-8 に CD-R の有機色素の分子構造を図解してみた。

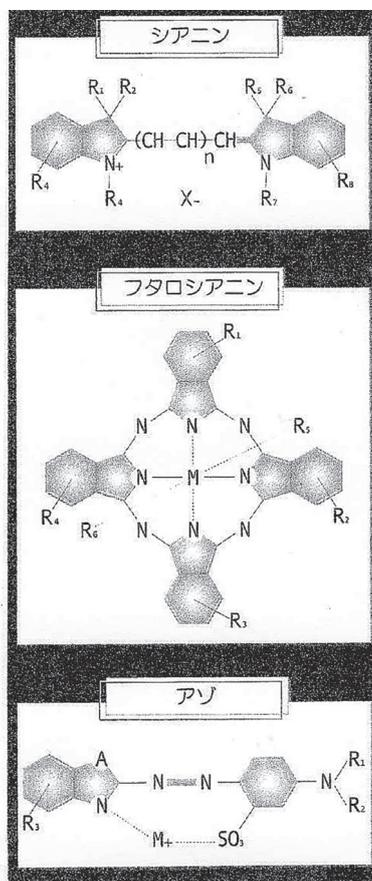


図 7-1-8 CD-R の有機色素
(シアニン、フタロシアニン、アゾ) の分子構造

CD-R の特性は必ずしも色素だけで決定できるものではないが、この 3 種類の有機色素（シアニン、フタロシアニン、アゾ系）は、光に対する応答速度に微妙な違いが認められる。ディスクにレーザーを照射した際に生ずるマークの形状やエッジの立ち上がりや立下り方は、色素ごとに微妙に違い、特に書き込み速度の高速化に伴い顕在化してくることになる。ターゲットとする位置、形状、深さ方向にマークして正しく記録されなければ、信号としては破綻し、エラーレートに直接効いてくるジッターやデビエーションの劣化を起こす。ちなみに、記録したマークの位置の理論値に対する長さのばらつきをジッターと呼び、分布の偏りをデビエーションと言い、この数値は、再生信号の物理的な基本仕様として Red Book に規定されている。

この当時の CD-R ドライブに搭載されたオプティカルピックアップ（OP）の特性が各社ばらばらで、例えばスポットサイズの形状やライトストラテジー（信

号を書き込む時のパルスパターン）の未完成などが表面化し、それにメディアメーカーごとの有機色素が異なっていたことなどの要素が重なり、記録できたり、再生できなかったりという実用上の“大問題”が発生することになってしまった。本質的に CD との互換性をうたっていた CD-R にもかかわらず、互換性が取れないという、目も当てられない状況を生んでしまったのである。この深刻な状況を解決するために、ドライブメーカー、メディアメーカーは、CD-R の技術仕様を検討する「オレンジ研究会」を発展させて、オレンジフォーラム（規格書の色にちなんだ関連約 50 社の任意団体、代表幹事ソニー井橋）を作り、この深刻な CD-R 特有の互換性問題の解決を委ねたのである。

7.1.5 ディスク・アイデンティフィケーション・メソッド

オレンジフォーラム発足の 2 年ほど前から、オレンジ研究会というドライブ、メディアメーカー同志の意見交換のための研究会は存在していた。その当時から、各社の CD-R の担当技術者は個性の強い人が多く、それぞれに苦勞を重ね各社内の抵抗勢力に打ち勝って、この事業を進めた極めて稀な集団であった。各社の CD-R 担当者が新規事業化を提案しても、「今さらライト・ワンスメディアではないだろう」「著作権の問題は解はあるのか」などの意見が強く、各社、各様に「CD-R の開発などを中止してしまえ」「事業化などもってのほかだ」との声が大きく、全く前進できない状況が続いていた。その上に、この互換性問題が発生してきたので、抵抗勢力は「それ見たことか」と更に勢いを増していた。

ソニーにおいてさえ、CD-MO を進めていたこともあり、「CD-R は国賊だ」から「ソフトメーカーをつぶす気か」等のいわれなき中傷を浴びせられたのだから、他社の担当者の状況はそれ以上に厳しかったと想像できる。しかし、このオレンジフォーラム会員の先見性と団結力は、社内で反抗された分強く、何としても互換性問題を解決し、ビジネスへ繋ぎたいという気力で溢れていた。CD-R ビジネスが大きく発展することになった“きっかけ”は、各社内での大きな抵抗勢力があったが故に、優秀なエンジニアの先見性と反骨精神に火をつけて、社外での強固な団結を生んでビジネス推進の足場を作ったことにあった。市場が待ち望んでいた等の幸運な状況はあったものの、これだけ大きな抵抗があった CD-R がビジネス化されたことは、日本における産業の発展史の中でも、極めて稀有なケースであったと考えられるのである。余談にな

るが、当時の各社のメンバーはことのほか仲が良く、今でも「CD-R マフィアの会」が開催されている。ソニー、松下、パイオニア、TDK、リコー、太陽誘電、三菱化学、三井化学、JVC、フィリップス、三菱電機等錚々たる「いじめられメンバー」であった。

オレンジフォーラムの設立の目的は、CD-R 関連メーカー同士の交流と情報交流を活発化し、いわゆるディスクとドライブとの相性や、互換性問題の解決をはかり、エンドユーザーに多くのベネフィットを提供することであった。そのために、理論面、物理面、論理面での相性や互換性問題の解消はオレンジフォーラムの責務であり、重要な研究テーマの一つだった。具体的な活動としては「ディスク・アイデンティフィケーション・メソッド (Disc Identification Method)」のような“準規格”を策定し、参加各社が製品に反映することであった。

ディスク・アイデンティフィケーション・メソッドとは、いわゆるディスクの“素性”を明確にしたものである。この素性をあらかじめディスクに刻み込んでおき、ドライブ側がその素性の意味を理解できるようになっていれば、ドライブは、現在書き込もうとしているディスクがどのような特性を持っているかを認識できる。特に色素膜特性は重要で、シアニン系の有機色素膜で最適化して書き込んだ場合の定数では、フタロシアニン系の有機色素膜に記録すると記録後の品質が悪く、再生互換が取れないような現象には、あらかじめ“素性”が分かっているならば、それに合わせた「最適記録条件」で記録すれば良いわけで画期的な提案であった。図7-1-9にディスクID使用時の効果を表したが、記録パワーに対してエラーレートが大きく広がって安定している状況が確認できる。また、表7-1-1に「Disc ID Code List (サンプル)」を示した。表からは、各社の情報がどこに入っているかを理解出来る。例えば、Start Time Of Lead-In: 97;23;00 (9a:bc:de) で9a:bc:d →メディアメーカーを表し、e →有機色素材料を表すように決めてある。

表 7-1-1 Disk ID Code List

| | Prohibited to use | | Tentative Code | | Permanent Code | |
|--------|-------------------|-----------|----------------|-----------|----------------|-----------|
| 97m15s | Company A | Company B | Company C | | Company D | |
| 97m16s | | | Company E | | Company F | |
| 97m17s | Company G | | | Company H | | |
| 97m18s | | Company J | | Company K | | Company L |
| 97m19s | | | | | | |

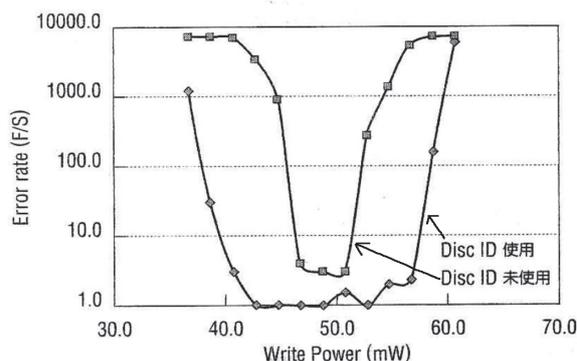


図 7-1-9 Disc ID 使用効果

「ドライブがメディアを認識できる」というディスク・アイデンティフィケーション・メソッドに盛り込まれたこの考え方は、狭義のディスク・ドライブの相性や互換性問題にとどまらず、2倍速、4倍速及び8倍速（さらにそれ以上）といった書き込み速度の高速化や、更に色素の変更に伴って生じるディスクの記録特性の大幅な変更等のケースにおける、最適記録の保証などにも利用できる。「技術の進化に柔軟に対応することが出来る」という思想を実現したもので、複数の有機色素膜や、複数の記録用オプティカルヘッドが存在してしまったことから編み出されたCD-R独自の仕組みであった。

その後、ドライブは実際にレーザーをディスクの一部 (OPC や PMA) に照射して「OPC (Optimum Power Control)」という技術を用いレーザーパワーを決定する。次に実際の信号を書き込んでゆくが、書き込みには、最初に設定した OPC の値をそのまま全周に適応させる方法と、「ランニング OPC」といって、微弱レーザーを照射して記録面の状態（ごみの付着や有機色素の塗布むらによる反射率の変化等）を検出しながら、レーザーパワーを随時制御して、本記録をしていく2つの方式がある。現在はランニング OPC が主流になっていて、メディアの個々のばらつきまでも吸収し、そのメディアの特性を最大限引き出せるような書き込みが可能になった。

Disc ID の登録メーカーは1995年当初7社ほどであったが、1997年頃には急激に増加して、2003年には約73社になった。現在、全世界のほとんどのメディアメーカーが Disc ID を登録して、すべてのドライブメーカーがこの Disc ID を利用している。また、1998年には最外周のアドレス情報をディスク種類の判別を使うという拡張仕様が策定された。これにより、今までメディアメーカー社で使用可能な Disc ID は10種類であったのが、この拡張仕様により原理的には無制限になった。Disc ID は CD-R の記録再生互換性確保のために、なくてはならない規格になり、世界中のドライ

ブメーカー、メディアメーカーが採用したため、ユーザーも安心してCD-Rを使用できるようになったのである。

Disc IDは、オレンジフォーラムで誕生し、その後CDs21ソリューションズ（オレンジフォーラムの後継任意団体）で管理されている。最も心に残る残念な出来事は、この「Disc ID Method」を“特許申請”しなかったことである。完全な互換性確保のため、ディスクにIDをつけて記録膜特性等の必須情報をあらかじめ記録しておき、それを基にして最適記録を行うという記録ディスクの世界でたぐい稀な発明が権利化されなかったことを、今でも悔いている。その当時は、オレンジフォーラムの発案であり、皆で発明したもので、発明者を特定できなかったこともあったし、オレンジフォーラムは任意団体で特許の所有権の課題もあった。又、この技術はCD-R互換性救済の貴重な技術であったため、多くの会社に公開して使ってもらいたいとの思惑があった。それが、関係者の共通した認識であったため、特許出願をためらう雰囲気があったのも事実であるが、CD-Rだけで約100億枚/年も使われて、その後に登場するDVD-RやBD-Rも互換性の確保のために、全く同じ技術が使われていることを考えると、巨額の特許料収入が見込めたことも考えられる。振り返ってみると、なぜ強引にでも特許申請に踏み切らなかったかについては、ひとえに当時の代表幹事（井橋）の人間性によるところが大きいかもしれない。光ディスク産業史に残る貴重な技術だけに、未だに“寝覚めの悪い”出来事ではある。

7.1.6 互換性確保のための施策

ドライブメーカーやメディアメーカーの丸となった取り組みや、関連技術の向上により、市場で最大の課題であったディスクとドライブの相性や互換性の問題は確実に過去の話になりつつあった。とはいえ、CD-Rの成長ぶりは凄まじく、ディスクメーカーもドライブの数も物凄い勢いで増えて行き、それに拍車をかけるように、ドライブの書き込み速度も2倍速、4倍速、16倍速と劇的な進化を遂げていった。この様に、CD-Rの進歩があまりに急激であることから、ディスクとドライブの組み合わせによっては、どうしてもうまく対応できないケースが出てきてしまう。こうした不都合ができるだけ起こらないように、CD-Rドライブは、内蔵のPROMのファームウェアのバージョンアップで対応できるようになっている。CD-Rドライブのファームウェアとは、PC（パーソナルコンピュータ）からの命令を受けて実際の記録動作をつかさどるコントロールソフトウェアを指し、ドラ

イブはバージョンアップによって、ディスク・アイデンティフィケーション・メソッドやライトストラテジーなどを最新の情報にリフレッシュできる。こうした手法は、PCのアップロードプログラムと同じで、ドライブメーカーのHPにファームウェアがアップされているので、それをダウンロードして、CD-Rドライブにインストールすれば良い。この様に、互換性に端を発した様々な技術は、ディスク・アイデンティフィケーション・メソッドを核にして、エンドユーザーに最良の書込み環境を提供するようになっていき、CD-R最大の互換性問題を解決に向かわせたのである。

一方、互換性問題に新たな課題が生まれたのは、エンドユーザーの書き込み速度の高速化への期待であった。安定した高速書き込みの実現には、メディアとドライブに極めて高い技術が要求される。一般論として、CD-Rにおける高速化への対応技術としては、メディアの高感度化と機械精度の向上の2点がある。メディアの高感度化は、単に光に対する応答性を速くしただけでは記録されたビットマークが不安定になり、あまり感度を上げすぎるとディスクの記録膜が壊れやすくなる。また高速化とは、信号を書き込んだら今まで以上に速く次の記録に移る訳だから、その分、書き込んだ部分と新しい書き込み部分が干渉しやすくなる。メディアの熱の管理が指数関数的に難しくなり、記録されたビットの形状が変わってしまうと、波形歪を起こし、歪の大きさによっては記録すらできなくなってしまう状態を引き起こす。CD-Rの記録速度は、8倍速から、16倍、32倍と早くなっていったが、必ずしもドライブが正確に対応しているわけではなく、ドライブによっては、速度を落として記録するなどの自動制御技術を発展させて、最適な記録速度で信号を記録しており、ドライブとメディアの双方の努力の積み上げで、互換性を確保しているのである。

7.1.7 CD-Rの実用例

CD-Rは、当初の発想にあった様に、だれでも簡単にオーディオCDが作れることが第一の夢であった。高音質で、イージーオペレーション（ランダムアクセスの容易さ）で、耐久性があるCD-Rは音楽の記録に最適である。音楽を大切にする人にとって、「CDはステータス」であると言われているが、プロとかアマチュアや上手い下手の関係はなく、CD-Rは本当に音楽を愛する人々にとって「CD-Rはステータス」であると同時に、自分たちで録音できるという意味で、最も親しみやすいメディアである。ここではCD-Rを実用化している代表的な実施例を紹介する。

第1に、最も多く使用されるオーディオCDへのCD-Rの実施例は多岐にわたっている。その一例として、自分で簡単に記録できるので、ピアノや音楽の発表会の記録のみならず、音楽を学んでいる学生の提出レポート代わりに、実際の演奏や音声をCD-Rに記録して提出させる例は非常に多い。卑近な応用例として、カラオケボックスがある。今までカラオケボックスは、歌を歌ってもらう事でビジネスが成り立ってきたが、昨今はシステムの中に音声を記録できる仕組みが取り込まれている。そこでは、自分で歌った音声を記録して、上手さを自慢する自己顕示欲のためか、又は練習した成果を確かめるためかは不明だが、その成果をCD-Rで知人に配布するようなことが一般的に行われている。既に、カラオケ業界はビジネスのターゲットを会議室利用や個人用途等の分野に焦点を合わせていることもあり、カラオケBOXは音楽学生の練習場になったりもしているのである。そこで演奏された音楽や練習の成果はCD-Rに記録されて、配布や提出用に使われるのである。この様に音楽を愛する方々にとって、CD-Rはかけがえのない記録メディアとしての地位を確保してきた。

第2に、デジタルフォトと大容量メディアとの関係の中で、CD-Rが注目されてきた時期があった。デジタルカメラが普及し始めた1990年代から、その撮影したデータの保存、保管には膨大な量のCD-Rが使われてきた。人間の感性として、1GB弱のCD-Rは丁度良い使い勝手であったとの意見が多い。最近ではデジタルフォトの解像度が極端に大きくなり、それに伴い記録するデータがCD-Rの1GB弱の記録容量では不足するようになってきて、DVD-RやBD-Rへの移行も起っているが、未だにCD-Rを手放さない一般的なユーザーは多い。専門のデジタルフォトを扱う方々の中には、単に撮影したデータを保管管理するだけではなく、撮影した複数のデータを幾重にも重ねデジタル合成や特殊効果を自由に加えられる技術を持つ“ビジュアルクリエイター”と呼ばれる専門家がいる。このような専門家は「撮影したすべてのカットを効率良く抽出したり、ソートできるデータベースの構築が必須の技術である」との認識が高い。その意味で独自にCD-R/CD-ROMを使った最大500枚程度のCD-ROMチェンジャーを所有して、自身のデータベースを管理しているのである。そこで保存される撮影データはオリジナル画像であることから、改竄されたりウイルスに侵されたり、あるいは消失してしまうメディア（システム）は使えず、CD-R/CD-ROMが最適であった。

特にCD-Rは、「どこでも再生出来て交換メディアとしては秀逸である」と評価されている。CD-RWやDVD-R等も必要に応じて使い分けられているが、納品の場合は、第三者が改竄のできないCD-Rを必ず使うというように信頼されているのである。

第3に業務用分野で、特に医療用途に使われているCD-Rがあり、現在では、患者が画像データを欲しいと医者に要求すると、CD-Rでデータが手渡されるほど、一般的になっている。その先駆的な役割を果たした医療機関として、財団法人心臓血管研究所（心研）があり、循環器疾患の専門研究機関として国内外に広く知られている。この付属病院には、DICOM Ver3.0（医学界におけるデジタル画像の標準フォーマット）に準拠したSiemens社のコンピュータネットワークサーバシステム及びCD-Rを使った心臓診断システム（通称ACOM）が、1998年に設置された。今までのフィルム（X線等）に代わって、最近のデジタル画像は、医療用途に対応できるまで改良が進んで実用になり、撮影されたデータはサーバに送られ、そのデータは1.7TBのMOジュークボックスで管理されて、必要に応じてCD-Rに落とされる。CD-Rは規格が統一されていて安価で、DICOMフォーマットで書き込んでおけば、世界中のどこでもPCからデータを読み出せることは重要な利点だったのである。このシステムが基準になり、日本の医療機関に同様なデジタルサーバシステムの導入が始まり、CD-Rは医療データの交換に無くてならない存在になったのである。データを安定して保存でき、再生互換が全世界で可能なCD-Rは医学界にとっても貴重な存在で、その後、医学界におけるデジタル化の進展に拍車がかかり、今では、ほとんどの病院内はデジタルデータベース化しており、配布メディアにCD-Rが使われている。

その他の業務用の分野での利用例としては、財団法人日本特許情報機構（JAPIO）が1996年からCD-RとCD-ROMによるシステムを構築して、顧客の要求に応じて膨大な特許情報の中から必要な情報を抽出・提供する業務に使用して、迅速で信頼性の高いサービスを提供している。写真7-1-10に、そこで使われている500枚CD-R/CD-ROMチェンジャー群の写真を示したが、この一ユニットを写真家が小規模用途に使用する例もある。

最後に、CD-Rは、配布メディアとしてネットワーク社会にもかかわらずあらゆる所で使われている。図7-1-11に示したのは、21世紀初頭に起こったイラン／



写真 7-1-10 日本特許情報機構の CD-R/CD-ROM チェンジャー群

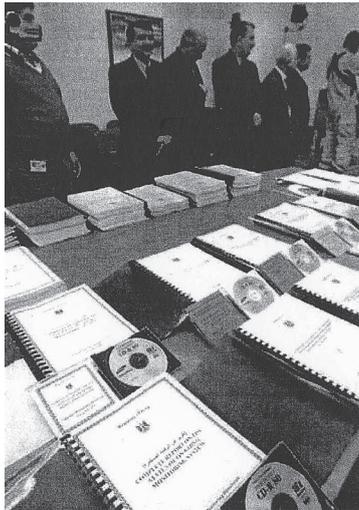


図 7-1-11 イラン/イラク紛争時の CD-R

イラク戦争の時に、その状況を説明するための膨大な資料（データ）を CD-R に格納して、搬送した時の新聞報道の写真である。その文章の中に、当該資料は機密データなので、最も安全に送る方法は「手渡すこと」であるとのコメントが付け加えられていた。膨大な紙の資料から小さく軽い CD-R にデータを格納すれば、途中で改竄されることや消される心配もなく、安心して機密情報のやり取りができるとのコメントに、改めて CD-R の利点を再認識したものである。現在は、ネットワーク全盛の社会であるが、書き込んだデータのセキュリティー対策のため、書き換えられないデータの必要性は高く、機密性の高いデータの保存や配布用途にこそ、CD-R が使用され続けてその使命を全うするのではないかと悦んでいる。

7.2 CD-RW の出現

CD-RW は書き換えできる“Rewritable”の意味で、正式には“Compact Disc Rewritable”と呼ばれて、CD ファミリーとしては初めての書き換えを実現した。CD-RW はよく「CD-R/RW」と、CD-R と

同じようなものと括られてしまう。CD-R の場合レーザー光を利用してディスク盤面に塗布された有機色素の“物理的変化”をデジタルの情報として記録する方式であるのに対して、CD-RW は同じレーザー光を使いながら、記録材料の結晶質、非晶質の変化を記録／再生に応用する相変化記録（Phase Change 方式）を採用しており、記録層の状態変化を利用していることから書き換えが可能になっている。また、CD-R と CD-RW では、技術的にも使い勝手の面でも、全く違った部分があるので本章では CD-RW の技術とその特徴について記述する。

7.2.1 CD-RW の相変化記録の原理

CD-RW のリライタブル機能は、その名の通り、“Phase Change”という“相”の変化を応用して信号を記録している。ちなみに“相”とは、「物質の系の中で、均一でかつ明確な境界を持ち、他と区別される領域」、または「物質系の一部がその内部で物理的・化学的に全く同一性質を示すとき、その部分が同じ相にある」ことを意味する。具体的には、CD-RW は結晶質（クリスタル）と非結晶質（非晶質、アモルファス）の物理的転移を利用して信号を記録している。アモルファスとは、結晶構造でない物質状態を表す。一部の合金には、個体であるにもかかわらず原子が液体状態の配列のままの性質をもったものがあり、相変化記録とは、このような特殊な合金の結晶・非晶双方への物理的転移をレーザーによって引き起こし、一方再生時は、やはりレーザーを使って両者の反射率の違いを読み出す仕組みである。具体的な相変化材料には例えば Ag-In-Sb-Te（銀・インジウム・アンチモン・テルル）等の 4 元素の合金がある。図 7-2-1 に CD-RW ディスクの構造を示したが、基本的な構造は CD-R と同じで、プリグループのある基板に、記録層は上下保護層にサンドイッチされた形で形成されている。その上に、保護膜の UV コートが施されているものである。

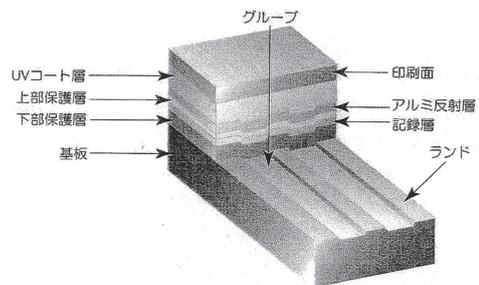


図 7-2-1 CD-RW ディスク構造

この相変化記録の原理は 1968 年に Ovshinsky らによって提案されたものである。それぞれの状態は

屈折率などの光学特性、あるいは誘電率等の電気特性が異なるカルコゲナイド系材料で検討されてきたが、具体的な実用化は、松下電器の山下等の研究による、酸化テルル系の材料を用いたのが始まりである。Ovshinskyの特許使用許諾料が高額であったために、各社がこの技術検討をあきらめる中で、松下電器、リコー、日立等は技術開発を続けて、CD-RWやPD（コンピュータ専用ディスク・松下電器）という商品に繋げていったと同時に、次世代のDVD-RW、RAMといった商品群が誕生する機会を作ったのである。

相変化材料は、当初は結晶の状態になっており、記録時はプリグループに沿い、EFM変調された信号をレーザーで照射していく。図7-2-2に相変化記録の原理を示したが、CD-RWの記録の原理は、その温度的なプロファイルから説明することができる。まず、結晶相を一気に融点まで昇温して、不規則な原子のアモルファス状態を作り出す。このアモルファス状態を急速に冷却すると原子の組み換えが十分に起きない内だと、ばらばらな状態でフリーズされたアモルファス状態になる。これがアモルファス相の記録メカニズムである。一方、融点には至らない、やや中間的なレベルにまで昇温しておいて、比較的ゆっくり冷えるように温度管理をしてみると、原子は元の状態に組み変わる時間が与えられ、結晶相ができる。この様に、相変化記録は、基本的にはCD-Rと同様に昇温とクーリングを非常に高度に制御して、それによってアモルファス相を生成していき、結果として、結晶は反射率が高く非晶の方は低反射率になるので、その差分を信号として検出するのである。最も、いくら結晶相の反射率が高いとは言え、CD-RWの反射率は、780nmの波長領域においてCDやCD-R（65%以上）には到底及ばず、わずかに約10%~15%程度なので、ドライブ側で何らかの対策が必要となる。このCD-RWを導入するにあ

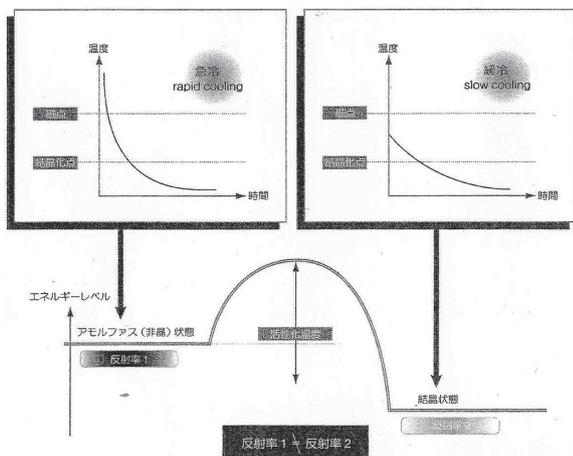


図 7-2-2 相変化記録の原理

たっては、後述するマルチリードという規格を提案することになった。

CD-RWの記録したデータの消去は、いわゆるワンビーム・ダイレクト・オーバーライト方式という技術を使用する。これは、相変化材料には“溶融はしないのだけれども結晶化するには十分”という温度（イレースパワーレベル・約200度C）があり、そのレベルになるように微弱にレーザーを照射して昇温し、そこから徐々に冷却することで、アモルファス相は結晶相に戻り、新しい記録が可能になる。

7.2.2 CD-RWの記録方式（ライトストラテジ）

ライトストラテジとは、記録時におけるレーザーパワーの制御の事を言う。記録原理もディスクの特性も違うので、CD-RにはCD-Rに最適な、又、CD-RWにはCD-RWに最適な制御方法が存在する。ディスクに記録されるEFM信号は、前述したように「3T」から「11T」までの物理的な長さやスペースから成り立っている。本来レーザーのオン/オフは、このEFM信号に対応していれば良いはずだが、昇温とクーリングを微妙に、かつ精密に制御しなければならないCD-RWでは、“EFMのまま”レーザーを照射してもうまく記録することはできない。“EFMのまま”記録してしまうと、本来、急冷の制御をしなければ成らないところが徐冷になってしまって、ピットマークの形状やエッジに歪が生じ、ジッタやデビエーションの低下をまねいてしまい、似ても似つかない信号になってしまうことがある。この信号の正確さは、ピットとランドのエッジのシャープさというよりも、むしろエッジの位置により決まり、CD-RW特有のものである。即ち、CD-RWの記録においては、エッジを急峻に立ち上げて、その中心部はできるだけ凸凹のない書き込みが求められることになる。

図7-2-3にCD-RWのライトストラテジ（レーザーパワーの制御）の一例を示したが、これは、CD-RWのマルチパルス記録方式である。例えば、「4T」のEFM信号を記録する場合、初めに融点に至るレーザーパワーを「1T」の間に与えて急冷し、続いて「0.5T→急冷→0.5T」を繰り返す。4Tでは合計3回、3では2回というように、「nT」信号に対して「nT-1」のパルスを与えて記録する。最初の「1T」分の時間は記録材料が冷えているために融点に達する時間を要するが、結晶相をアモルファス相にして、次の瞬間にレーザーをオフにしてこのアモルファス状態を急冷しフリーズさせてしまうのである。このレーザーパワーの非常に精密な制御がCD-RWの記録には必須である。

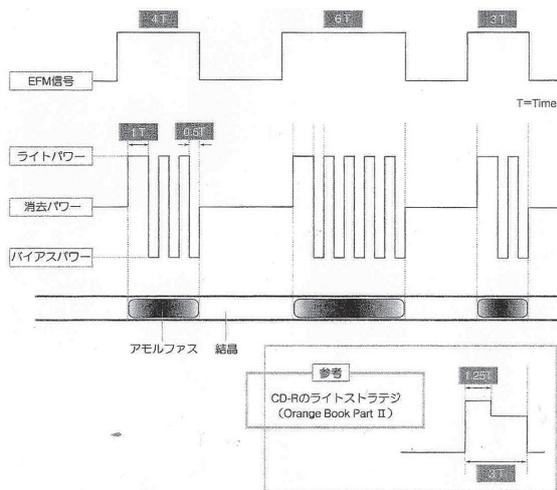


図 7-2-3 CD-RW のライストラテジ

記録時のレーザーパワーを比較してみると、CD-R が4~11mw (Orange Book Part II)、一方、CD-RW は8~14mw (Orange Book Part III) になっている。規格上からは、CD-RW の方が高出力レーザーパワーが必要となっているが、実際はCD-R の8倍速では、20mw を超えるパワーを要求されるようになってきた(高感度メディアでは8倍速で約18mw 程度)。CD-RW は約14mw 程度で記録できるので、データの書き換えが低パワーで実現出来ることは、システムとして好条件である。高いレーザーパワーを使うと、当然ドライブのコストが上がり、コンシューマ中心のCD システムにはなじまず、また、記録層の物理的な変化のサイクル(サイクラビリティ)が低下して実用に耐えなくなるなどの技術的な懸念もあり、低レーザーパワーはCD システムの宿命でもある。図7-24にCD-RW ディスクに記録された信号の電子顕微鏡写真(リコー提供)を示した。

CD-RW の用途は、大容量のフロッピーディスク、オーディオコンパクトカセットの代替えやCD オーサリングのプルーフ、バックアップ/ストレージであり、ハードディスクの代替えではない。そのため、記録層のサイクラビリティはせいぜい1000 回程度もあれば十

分であると考えられているが、CD-RW には“代替セクター”の概念が導入されており、もしあるセクターが記録に不適格になったら、CD-RW のファイルシステム(UDF)は、自動的に不適格のセクターに代わる新しいセクターを割り当て、実用上は問題のないシステムになっている。一方、CD-RW の課題としては、相変化記録が、原理的に“超高速記録”に対応しづらい所であり、CD-R より書き込み速度は遅くなる。

7.2.3 マルチリードで再生互換

光ディスクの再生は、基本的にレーザー光の反射率の差によって信号を読み取っており、所定の反射率が得られて、物理フォーマットと論理フォーマットが同じであれば、再生互換は確保されることになる。しかし、CD-R と CD-RW では反射率に大きな開きがあり、CD-R が約65%以上の反射率が確保されるのに対して、CD-RW の反射率は約15~20%程度しか確保できない。Red Book に準拠したCD フォーマットで再生互換を保証している反射率は約65%以上なので、この問題を解決しないと、CD と同一の信号を記録していながら、CD と全く無縁の記録メディアになってしまう。CD-RW の反射率を一気に65%以上に持つことは、現在の技術では不可能で、レーザー光を強力にして反射率を高めることは記録膜を破損してしまう。そこで考え出された方法がドライブ側のアンプのゲイン(感度)を上げる方法である。この場合いたずらにゲインを稼ごうとすると、ノイズも一緒に上がってしまいS/Nの低下を招いてしまうが、アンプを丁寧に設計し、回路のS/Nを十分に確保すれば実用化出来る。この方法をドライブ側に付加したことを“マルチリード”と呼び、製品化も比較的容易であったため、“マルチリードCD-ROM ドライブ”として市場に導入された。実際には、多くのCD-ROM ドライブがマルチリードの基準を満たし、特に16倍速以上のドライブは、ほとんどが“マルチリードCD-ROM ドライブ”になった。

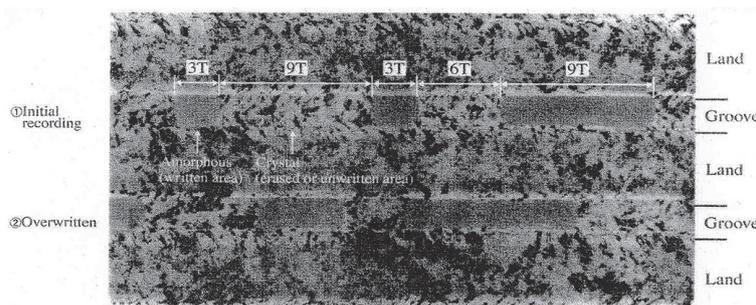


図 7-2-4 CD-RW ディスクに記録された信号

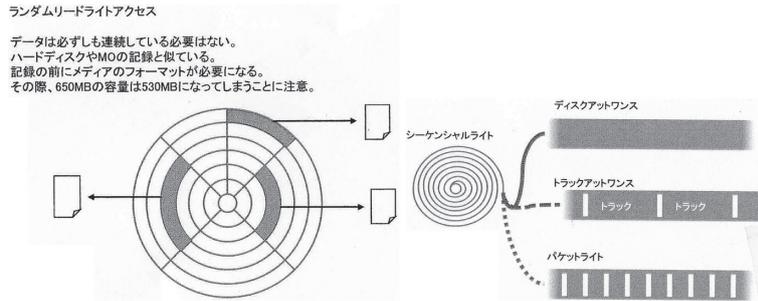


図 7-2-5 CD-R の記録方式

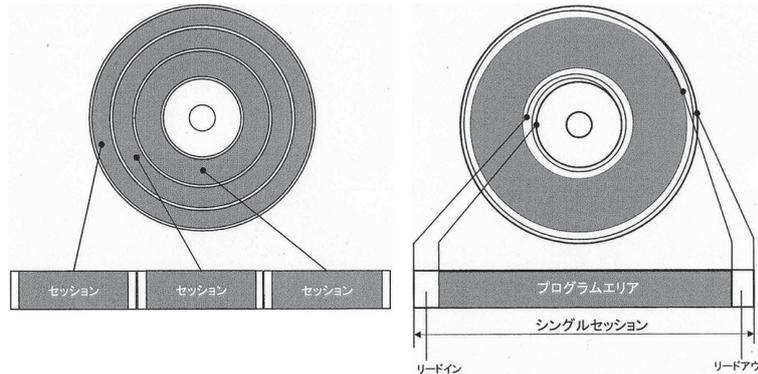


図 7-2-6 シングルセッションとマルチセッション

CD-RW が商品として登場したのが1997年だが、再生環境は急速に整ってきており、国内の場合、買い替えが進んでいる家庭用PCでは、2000年初めの時点で約70%のPCがマルチリードCD-ROMドライブを搭載していたと予測されている。一方、家庭用のCD-DAプレーヤがマルチリードにどれだけ対応しているかのデータは存在しないが、コンシューマ向けのオーディオ用CD-R/CD-RWレコーダであれば、PC用のCD-RWドライブで書き込んだCD-DAのデータは再生することが出来る。また、既に発売されているDVDプレーヤの一部やDVD-ROMドライブがCD-RWディスクの再生に対応しており、DVDドライブはマルチリード対応の一翼を担っている訳で、CD-RWはDVDとのブリッジという意味でも重要な位置を占めている。

7.2.4 CD-RWのファイルフォーマット

CD-RW特有の技術に、ディスクへの書き込み方法があり、ハードディスクの様なランダムリードライトアクセス（厳密には全く同じではない）に対応している点がある。CDはオーディオディスクを基本にしているため、この時の記録方式は“シーケンシャルライト（一筆描き）”である。CD-RもCDを踏襲しており、記録時にはディスクの内側から外側に向け、スパイラルに記録していく。CD-Rのシーケンシャルライトには次の3方式があるが、書き込んでしまったデータの一部だけを変更するのは不可能という点で共通している。

- ① ディスク一枚分のデータを一気に書き込み、後から、いわゆる追記が出来ない（Disc At Once）方式
- ② 曲（トラック）単位で書き込んで、継ぎ書き可能な（Track At Once）方式
- ③ パケット（音楽の小節等）単位で記録可能なパケットライト方式

図7-2-5に①～③までの方式を図解して示した。ここでのランイン、ランアウトとはデータの“継ぎ目”のことで、誤り訂正が出来ない部分を、しっかりとガードする目的の緩衝材として設けられたガードエリアである。②のTAO方式は、最初にデータを記録して、それからリードイン、リードアウトを書き込むようになっているのが特徴で①のDAO方式とは大きく異なる。また“マルチセッション”という記録方式と深く結びついている。セッションというのは、「リードイン、ユーザデータ、リードアウト」までをひとまとめでした単位を言い、マルチセッションとは、そのセッションがディスク内に複数存在するという意味である。このマルチセッションのディスクを制作する際に使われる記録方式がTAOである。図7-2-6にシングルセッションとマルチセッションの概念図を示した。マルチセッションの概念を最初にシステム商品としたのは米国コダック社のPhoto CDで、Photo CDはOrange Book Part IIのマルチセッション対応フォーマットとして広く知られている。

CD-RW もこの①～③までの CD-R 型の記録は可能だが、書き換えできるという CD-RW の特徴を生かすとする、パケット単位のリライタブルということになる。これを可能にするためには、ハードディスクや MO (光磁気ディスク) の様なファイルシステムが必要になる。リライタブルの CD-RW がその特徴を最大限に活かすとする、あるブロックが何らかの理由で書き込み・読み出しが不適格となった場合、そのようなブロックを使用禁止にして、別のブロックにデータを書き込むというインテリジェントなデータ管理ができるようになる。パケットごとにデータの書き込みと消去ができることを、CD-RW の“ランダムリードライト”と呼んでおり、このランダムリードライトを実現するために CD-RW で採用したファイルシステムが、米国の OSTA (Optical Storage Technology Association) が標準化に取り組んでいる UDF (Universal Disc Format) という方式であった。

参考文献

1) 「新規光記録媒体-CD-R- (その材料開発と記録機

構の解明)」 浜田恵美子 東京大学博士論文 (工学) (1998)

- 2) 「相変化ディスク技術の現状と将来展望」 横森清 日本応用磁気学会 98-6 (1997) 29-36
- 3) 「Optical Information Encoding In Amorphous Semiconductor」 S. R. Ovshinsky, Topical Meeting On Optical Data Storage (1973) MB5-1
- 4) 「光磁気ディスク装置とその応用システム」 井橋孝夫、矢沢猛 映像情報 (1987 Vol19 No15)
- 5) 「A Writable Compact Disc Digital Audio System」 K.Nakagawa, K.Osato, K.Urayama and T.Ihashi AES preprint #2174 (G-3) (1989 March 7)
- 6) 「CD-R/RW オフィシャルガイドブック」 オレンジフォーラム エクシードプレス (1999)
- 7) 「CD-R Interchangeability Test Report」 A.Inoue, J.G.F.Kablau, J.P.J.Heemskark,H.Ogawa and H.Yamauchi, Topical Meeting on Optical Data Storage Technical Digest (1992)
- 8) 「O plus E 第 365 号 アーカイブ光ストレージ特集」 アドコムメディア (株) (2010)

8 | 光メディア寿命推定の ISO 規格の構築

CD-R/DVD-R などの光ディスクは、テキストなどの各種データやデジタルカメラなどの静止画保存、デジタルテレビの動画保存の手段であるために、その需要は拡大してきた。しかし、品質が規格を満たさないうえに、寿命の短いメディアが市場に数多く参入している現状や、寿命に関する具体的な基準や正しい情報がなかったことから、その信頼性が国内外で懸念されていた。

デジタルデータを長期間保存するデジタルアーカイブに向けた記録媒体は、長寿命、大容量、高データ転送レート、低価格な媒体が適するが、光ディスクは大容量で安価、さらに記録再生機器が全世界に普及していることから有望視されてきた。光ディスクを長期保存用記録媒体として推奨していくには、品質評価方法を国際規格として構築し、その国際規格に基づき評価された光ディスクに長期保存するのが有効であるとの認識は、関係者が共有していた命題であった。

この様な状況の中で、光ディスクの信頼性に対する取り組みは、日本では、1990年代前半に当時の通商産業省（現経済産業省）の働きかけにより、光ディスク媒体を測定するシステムの標準化に関する研究会が発足したことに端を発している。その後有力企業も参加して標準化の研究が進められた。一方、米国では、NIST（National Institute of Standard and Technology）を中心に、画像を電子的に保存する目的で、光ディスクを使用した場合の研究が行われ、その成果は ISO の Technical Committee 42 により「CD-R 等の温度相対湿度の影響による期待寿命値の推定に関する方法」として準備され、2002年に ISO18927 として制定され、規格化された。

2002年以降、光ディスク関連企業で構成された任意団体「CDs21 ソリューションズ」（中島平太郎会長）は、市場での品質や寿命に関する混乱を解決すべきとの要望に、市場で発売された CD-R の寿命試験を独自に行い、ここで得られた知識を生かして、2005年以降、米国の光ディスク関連の任意団体である OSTA や NIST と協力して光ディスク寿命推定試験方法を開発した。2006年 ECMA（European Computer Manufacturer Association）に提案して、審議を経て ECMA-379 として規格制定された。その後 ECMA-379 は、ISO に規格提案され、国際的な試験方法「ISO/IEC 10995」として 2007年に正式制定されたの

である。ここまで到達するのに約5年の歳月がかかったが、関係者の、何度も国際会議に出席して技術論を展開した努力に対して、高く敬意を表する。活動の相関図は図8-1に示したが、NIST等のサポートがあったとはいえ、任意団体が提案してISO規格が制定された極めてまれなケースであった。同時に、光ディスク生産が全世界に広がって、品質の悪い製品が「グローバル化」の名のもとに、どこからでも市場に導入されてしまう現実、一矢を報い、今まで統一できなかった光ディスクの寿命推定の基準を決めたことは、極めて有意義なことであった。今では、国内外メーカーからの依頼で、後述する NPO 法人「ADTC」（Archive Disc Test Center）で、第三者の立場で、ISO10995/18927 に則った公平な寿命推定テストが行われており、その結果はユーザーから大きな信頼を得ている。

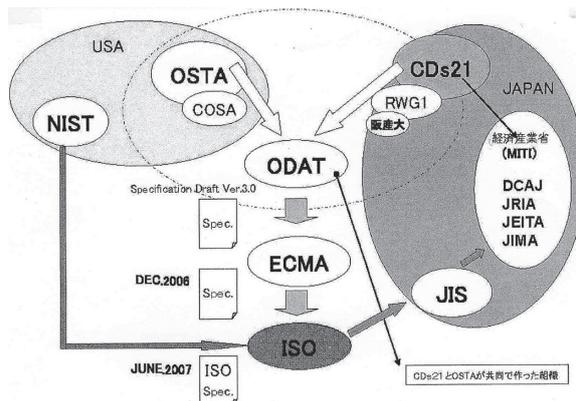


図 8-1 ISO 規格成立の活動相関図

8.1 光ディスクの故障要因と寿命推定

光ディスクの故障は、「一般保存環境下で長期保存されている間に、記録膜等の特性が経年劣化して生じる物理的要因により、再生信号よりデジタルデータが修復できない欠落が生じた時点」と規定されている。一般的な製品寿命を表す平均呼称時間 MTTF（Mean Time To Failure）は、JIS Z8115 に「非修理アイテムの故障寿命の平均値」として定義してある。非修理アイテムとは、「故障が起こっても修理しないか又は修理不可能なアイテム」をいう。光ディスクの故障時間は、記録保存されたデータの再生不能を回避するために MTTF ではなく、故障率 5%（生存確率 5%）の動作時間として規定している。これは、環境温度を変えた加速度試験で、故障率 5%の時間を推定し、その

データを統計処理することにより寿命を推定するものである。図8-2に寿命推定のための概念図を示した。

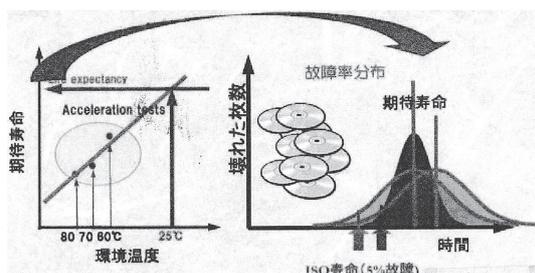


図8-2 寿命推定概念図

経年変化を起こす前の光ディスクの初期品質は、ROMはディスクの製造時、Rなどの記録系ディスクは記録後のジッター値を規定することによって維持している。ジッター値とデータのエラーレートは相関があり、復調の信号処理を行わなくても、ディスク上に記録されたデータ品質を知ることが出来る。前述したように、CDにはエラー訂正用の符号が付加されており、初期エラー、劣化によるエラーやディスクの表面の傷や汚れなどのディフェクトによるエラーに対応して、安定してデータが再生できるように規格化されている。これにより、光ディスクにおける故障とは、エラーの訂正が不能になった状態と考えられる。CDの場合は、C2エラーが220以下で、DVDの場合はPI (Parity of Inner-Code) の数が280以下と規定されており、この数値で故障になったかどうかの判断を行うのである。光ディスクの物理的要因による寿命の劣化は、主に記録層を構成する記録膜や反射膜などの機能性薄膜の特性が、外部や基板などからの水分の拡散による化学反応で変化することにより生じると考えられている。この様に劣化原因が反応速度論に従う場合は、与えられたストレスと反応速度の関係をアレニウスモデルやアイリングモデルとして扱い、温度湿度ストレスによる加速試験で寿命推定試験を行うことが出来るのである。

S. アレニウスは、1859 スウェーデン生まれで反応速度定数の温度依存性を活性化エネルギーを使って表すアレニウスの式によって広く世に知られている。1903年には、解離の電解質理論でノーベル化学賞を受賞した。

$$t = A e^{-\Delta h/kT} \quad (1)$$

ここで、 t は速度定数、 A は前指数因子、 Δh は活性化エネルギー、 k はボルツマン定数 (8.617×10^{-5} eV/k)、 T は絶対温度 ($273.15 + \text{degree Celsius}$) である。アレニウスのモデルは多くの化学反応の速度定数の温度依存性が式 (1) で表わされ、これに基づき

反応がどのように進むのかについて一般的なモデルを構築したのである

H. アイリングは1901年メキシコ生まれで、活性錯合対理論 (遷移状態理論) を発展させたアメリカの化学者である。活性錯合対理論は、反応の活性化障害の頂上付近における過渡的な化学種に注目したもので、この過渡的な化学種を活性錯合体又は遷移状態という。活性錯合対理論では、反応物と活性錯合体はお互いに平衡状態にあるとして反応を2段階過程と考える。



ここで、 A, B は反応物、 $AB \ddagger$ は活性錯合体、 P は生成物である。図8-3に活性錯合対理論における反応断面図を示した。アイリング式は以下のとおりである。

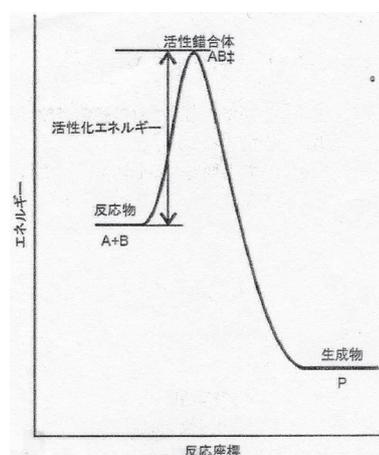


図8-3 反応断面図

$$t = A T^a e^{-\Delta h/kT} e^{-(B+C/T)} \times RH \quad (3)$$

ここで、 t は速度定数、 A は前指数因子、 T^a は前指数湿度因子、 ΔH は活性化エネルギー、 K はボルツマン定数、 T は絶対温度、 B, C は相対湿度の指数定数、 RH は相対湿度である。

後述べる ISO/IEC10995 では簡易型のアイリング式を用いる。

$$t = A e^{-\Delta H/kT} e^{B \times RH} \quad (4)$$

一般に、アイリング式は、以下のように拡張可能である。

$$t = A T^a \exp \left\{ \Delta H/kT + (B + C/T) \times S_1 + (D + E/T) \times S_2 + \dots \right\} \quad (5)$$

温度以外の関連するストレスを付け加えていくことが可能である。

8.2 ISO/IEC 10995

ISO/IEC 10995 (以下10995と略す) は、CD-R/RWの他に、DVD-R/-RW/-RAM/+R/+RWを対象とした寿命推定の評価方法を規定してある。ここで推

定される寿命とは、周囲温度 25℃、相対湿度 50% の保管状態で、残存確立が 95% の時、95% 信頼区間の下限値で予想される寿命をいう。寿命とは、DVD-R/RW の場合は、再生不能となる P1 エラー数に達するまでの時間である。

簡易アイリング式を、以下のように自然対数をとってみる。

$$\ln(t) = \ln(A) + \Delta H/KT + B \times RH \quad (6)$$

これをさらに変形して、 $\ln(t)$ を y とおき、 $\ln(A)$ を a_0 、 $\Delta H/k$ を a_1 、 $1/T$ を x_1 、 B を a_2 、 RH を x_2 と置くと、

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 \quad (7)$$

の様に表すことが出来る。これは、説明変数 2 の重回帰式と考えることが出来る。重回帰分析を行う際必要となる個体数は、説明変数が (7) 式より 2 であることから下記の式 (8) より 4 以上であることが分る。
個体数 - 説明変数 - 1 = 個体数 - 2 - 1 > 0 \quad (8)

これより、アイリングモデルにおける加速試験では、最低 4 つの温度湿度条件での結果が必要となる。10995 では、85℃ 85% RH, 85℃ 70% RH, 65℃ 85% RH, 70℃ 75% RH の 4 条件で故障時間の対数平均値を求めている。図 8-4 にアイリングモデルにおける寿命推定の概要を示した。

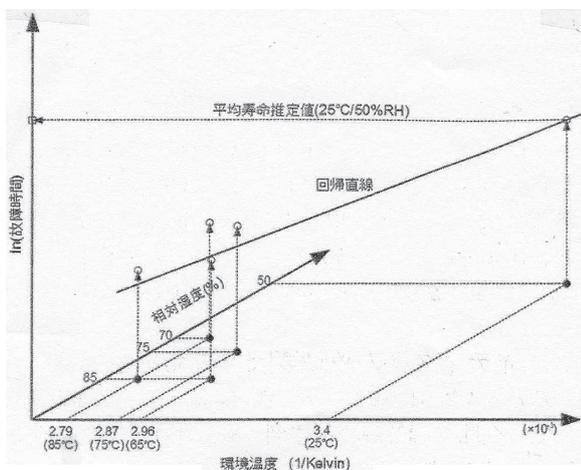


図 8-4 アイリングモデルの寿命推定概要

10995 では、寿命データ分布は対数正規分布に従うと仮定して、寿命推定値を求めるための解析手順を示している。上記 4 条件で光ディスクサンプルの加速試験を行い、回帰式より故障に到達した時間を求める。故障データの累積分布には、順序統計量の median rank 法を用いて、各条件での故障データの累計分布として対数正規グラフを用いて、仮定内であるかどうかの確認を行う。

もう少し具体的にいうと、各条件での寿命データは、対数正規グラフ上で直線となり、その傾きで表される対数標準偏差は、同じ母集団からとってきたサンプル

との過程より等しくなる。これを確認することによって、各条件での故障が 10995 のモデル内であることが検証できる。図 8-5 に累積故障分布の実例を示した。

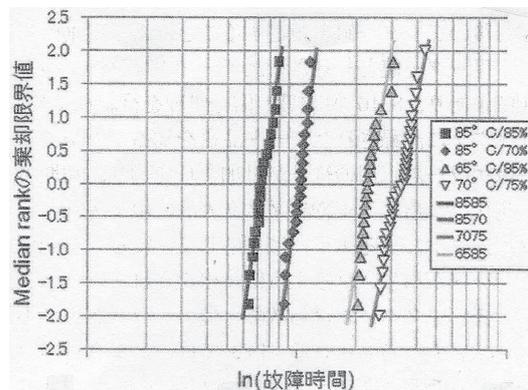


図 8-5 累積故障分布

対数正規グラフから、各条件での故障データの対数平均値を求め、重回帰分析により定数項及び、偏回帰係数、即ち、簡易アイリング式の $\ln(A)$ 、 $\Delta H/k$ 、 B を求める。求められた定数項及び係数を簡易アイリング式に用いて、絶対温度 298.15K (25℃) 50% RH の値を代入することで、補完条件の寿命推定平均値が求められる。

各条件ごとに、故障データの加速係数（加速試験での平均寿命推定値と保管条件での平均寿命推定値の比）を算出して、補完条件での寿命データの正規化を行う。信頼区間 90% とした場合の 25℃ 50% RH において、残存確率 95% 信頼水準で予想される寿命が推定される。図 8-6 に加速係数を用いて正規化された寿命推定の実例を示した。

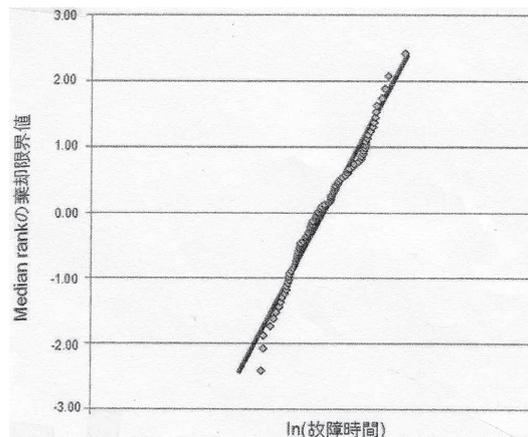


図 8-6 加速度係数で正規化された推定寿命

8.3 Archive Disc Test Center (ADTC)

光ディスクを記録保管に利用しようとするユーザーに対して、長期保存に適しているディスクであるかどうかの判断を手助けするために、光ディスクの寿命推

定を行い、長期保存が可能なディスクあるかの判定を行う、独立した第三者機関の非営利活動法人（NPO）アーカイブディスクテストセンター（ADTC）が2008年8月に設立され、ADTCセンターラボで2009年3月より、活動が開始された。ADTCセンターラボでは、CD-R/RWのみならずDVD-R/RW/RAM等の寿命推定のためISO/IEC 10995を拡張したISO/IEC 18926に準拠した加速度試験を行なっている。順次試験対象ディスクを増やしていく計画である。アーカイバルグレード（寿命が30年以上）と認定された光ディスクには、図8-8に示したような認定証及びロゴマークを発行している。又、認定した光ディスクが市場で正常に販売されているかを確認するために、市場からロゴマーク付きのディスクをピックアップして、寿命テストをする等の監視機能も備えた活動をする事になっている。違反した状態が発見された場合は、販売の中止の勧告やロゴマークの剥奪を含む処置を行うことを契約している。図8-7にADTCセンターラボの外観を示したが、加速度試験を行うための複数台の恒温槽や、エラー測定器が設置されて、前述したデータから寿命推定を算出する業務を第三者機関として行っている。

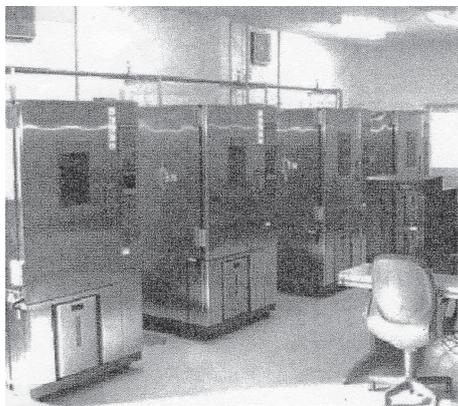


図8-7 ADTCセンターラボ外観



図8-8 ADTCが発行する認定マーク

しかし、一般的にはデジタルデータが記録された記録媒体には寿命があり、デジタルデータを長期間保存する場合は、数年ごとに記録状態を確認して、劣化状態によっては新しい記録媒体に記録保存することが必要である。光ディスクに関する媒体移動（マイグレーション）に関しては、ISO/IEC 29121やJIS Z 6017等が制定されており、連続性の維持や記録した光ディスクの劣化程度を確認して、必要に応じてデータの書き替えを行う手法も推奨されている。

ADTCの活動は、2017年現在も続けられている。そのテストセンターラボは、この寿命推定のISO規格化に多大の貢献を頂いた大阪産業大学入江（満）教授の研究室内に設置しており、年間に5～6種類の光ディスクをISO/IEC10995（18926）に準拠した寿命推定業務を行って、光ディスクのアーカイバルグレード品質の向上に役立っている。この様な、地味なADTCの活動は、光ディスクが長期保存媒体としての地位を確保して、品質の安定した光ディスクが一層広く普及することの礎になったと確信している。昨今は、自社内の評価結果より、公平な第三者機関が評価した結果が認められてADTCを活用したいとの要望が多い。その背景には、政府機関や大学などのアーカイブ事業に「公平な第三者機関の評価を得た記録メディアを使用する事」等の項目が入札条件として明記されたことが大きい。

参考文献

- 1) 「コンパクトディスク その20年の歩み」CDs21ソリューションズ（2005）
- 2) 「長期保存媒体としての光ディスクの品質評価と寿命推定」井橋孝夫、鈴木敏夫 東京都市大学情報メディアセンタージャーナル 第12号（2011.3）
- 3) 「O plus E 第365号 アーカイブ光ストレージ特集」アドコムメディア（株）（2010）
- 4) ISO/IEC10995、ISO/IEC18927

9 | CD がもたらした文化革命

CDメディアやCDファミリーが市場導入されていった実態や、様々な機能化による製品の登場を振り返りながら、いかに市場に定着していったかについては、第6章のCDビジネスの出現と規模に記述してきた。その意味で、CDメディアの普及の実態そのものが、文化革命であったといっても過言ではない。ここでは、主にCDメディアによって引き起こされた文化革命を、3つに分類した。即ち、①デジタル文化、②インタラクティブ文化、③R（レコーダブル）文化と三つの領域に整理して記述してみた。

9.1 デジタル文化とCD-DA

その影響力の大きさから、“デジタル文化の大衆化”はCD-DAの功績が筆頭に挙げられるであろう。1980年代の“デジタル”という用語を具現化した製品の代表選手は“CD”であり、CDの普及に合わせて“デジタル”という用語が多用されている。図9-1は、日本経済新聞社が発行する「日本経済新聞」、「日経金融新聞」、「日経産業新聞」、「日経流通新聞」の4紙に掲載された“CD”、“デジタル”、“マルチメディア”、“IT”というワードが使用されている記事の数を表したものである。このデータは、これらの言葉や概念が経済的や産業的にどのくらい話題になったかを示している。1980年代初頭から、CDやデジタルのワードが記事中に登場してきたのは理解できるが、1980年代半ばまで、CDとデジタルの記事量が同様な増加傾向（現象①）を示している。このことは、デジタルの話

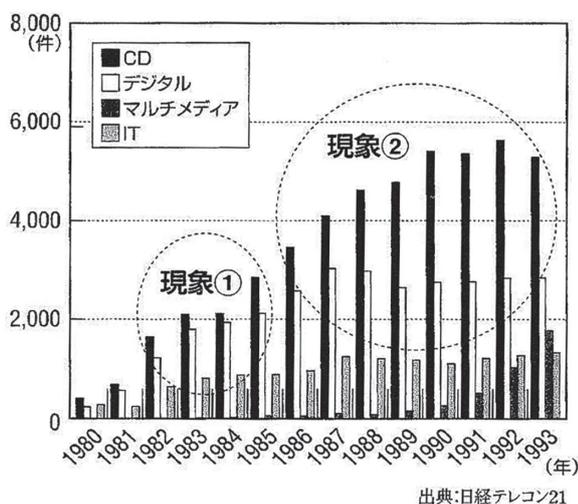


図9-1 日本経済新聞社4紙に掲載された4ワードに関する記事数（1980～1993年）

題の中心はCDであるため、記事中に二つのワードが関連して登場しているからで、まさしく“CDはデジタルの象徴”として取り扱われていたことを表していると考えられる。CDがデジタルの象徴的製品として取り扱われる一方で、“アナログ”というそれまでの技術を表現する用語の普及にもつながった。時計などもデジタル製品として登場してきたが、それは表記上の“数字表示”のみが取り上げられ、それ以上のデジタル社会を創造していくような本質に繋がる展開は少なかったといえよう。

CDによる音のデジタル化は、文字通り“デジタル文化の洗礼、大衆化”のきっかけになったが、その音のデジタル化のおかげで、生活者の生活時間にも微妙な変化があったとNHKの5年ごとに行う「NHK国民生活調査」で報告されている。その中では「CD等音楽鑑賞時間の変化」という項目があり、20代、30代の音楽接触時間は、平日は1990年を頂点に減少傾向だが、土日は1995年までは増加傾向を示して、CD登場の影響が伺えると示唆されている。この要因としては、とりわけ若者世代においては「CDから始まったデジタル化の波が彼らの生活空間に影響を与え、その結果生活の変化を生み出した」と想像できるのである。

前述したように、音の世界であったCDが機能的にそれぞれのCDファミリーとして発展していき、1985年にCD-ROMが、1986年にCD-Iが、そして1989年にはCD-Rが登場する。そのために、1980年代後半にはCDに関する記事がさらに多くなり、具体的な「デジタル文化」の具現化としてのCDメディアの各種製品が話題となった。この時期には既に“デジタル”というワードは完全に市民権を得ており、概念ワードとしても活用されて、人格表現まで「デジタル的な性格」とか「デジタル人間」というような造語までもが登場している。音以外のテキスト、画像、データがデジタル化されるにつれ、“デジタル”という概念が一般的になったからで、記事中には、CDの記事の増加に比べてさほどの増加傾向（現象②）は見られない。図9-2に1984年から2004年までの20年にわたる音楽用メディア生産金額の推移の図を示したが、2000年の約5000億をピークにCD-DAのディスクの生産金額（国内）は毎年約4000億を超える金額が前後の約10年続いている程のビジネス規模を示しており、デジタル文化がCD-DAディスクを通して浸透し

ていった証左を示している。一方、CDプレーヤの国内生産台数の推移は、図9-3に示したが、同じく2000年の1864万台をピークにその前後の5年間は1500万台ものCDプレーヤが生産されて、生産金額は1998年の時点の2760億円に上る。約2000億円以上のビジネス規模は約10年に亘って続く巨大な産業になり、デジタル文化の一端を担ったのである。

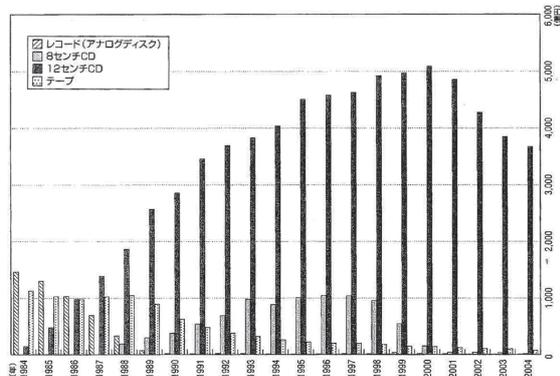


図9-2 音楽用メディア生産金額の推移

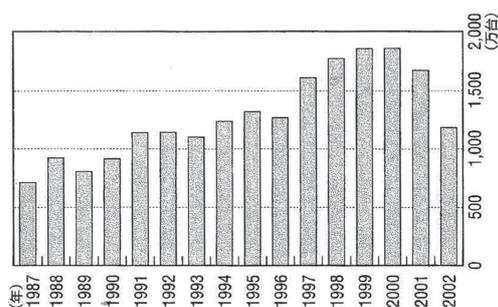


図9-3 CDプレーヤ国内生産台数の推移

この様にデジタル化が進行すると、音以外の素材も取り扱われ、様々な表現が可能になっていった。CDファミリーの発展により、いわゆる“マルチメディア”という概念が登場してきたのである。その為、“マルチメディア”というワードも新聞記事中に1990年代初頭から登場し始め、そのワードの出現により、“デジタル”というワードが再度記事中に頻繁に登場してくる(現象③/図9-4)。図9-4に1994年から2003年までの10年間の日本経済新聞社4紙に掲載された4ワード(CD、デジタル、マルチメディア、IT)に関する記事数を示した。即ち、マルチメディアはデジタルを基盤とする新しい概念として、1990年代の産業の象徴として使用されて、その具現化にCDファミリーが大きな役割を果たしたのである。要は、デジタル化の波は音声情報から始まり、文字や画像にも浸透し、それ故、それらのデジタル化された情報を統合して取り扱う“マルチメディア”は必然的な流れだったのである。しかし時代は移り、最近では「CDを持っている」と話すと、「昭和臭い匂いがする」といわれ

ることも多い。ネット社会は実体のない社会で、あらゆる情報がクラウドの名のもとに後方に隠れて見えない時代になってしまった。この様な状況の中で、実態の見えるCDで培った文化は何であったのか、感性を研ぎ澄まし人間の五感に訴えようとした、デジタル技術とは一体何であったのかなど、今一度振り返ってみる必要があると考えている。

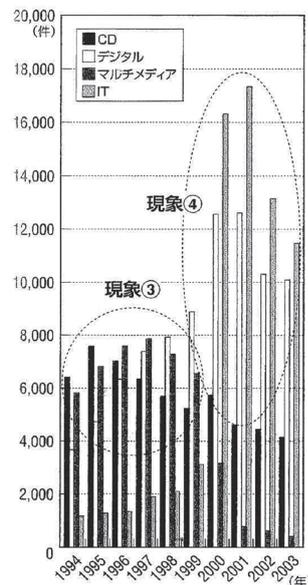


図9-4 日本経済新聞社4紙に掲載された4ワードに関する記事数(1994~2003年)

9.2 インタラクティブ文化とCD-ROM、CD-I

6章で触れたが、CD-ROM、CD-Iの登場は、マルチな情報=マルチメディアを取り扱うことで、マルチメディアのインフラとしても、様々な機能を持ったCD製品を登場・普及させていった。これらは“マルチメディアCD”とも称されて情報家電の基礎となった。マルチメディアCDは、マルチな情報を取り扱う一方で“インタラクティブ”という機能を装備し、新たな操作性や楽しさを提供することでさらに浸透していった。元々、その機能はCD-DAにあった“選曲機能”から発展して検索という機能へ受け継がれ、様々なソフトや製品の機能として、あたかも機械と“対話(インタラクティブ)”しているような双方向的な操作性を提供していった。その機能を総称して“インタラクティブ・マルチメディア”という概念が登場した。

もちろん、コンピュータの世界では、検索機能は標準機能としてそれ以前から存在していた。しかし、パソコンは今ほど家庭に普及しておらず、インタラクティブな機能を体験することはあまり無く、一般には、フォトCD、CD-G、CD-ROM、CD-IやビデオCDなどの“マルチメディアCD”から体験すること

になった。特に、家庭用のゲームにおいては、それまでアーケードゲームとして、専門的な場所ではしか楽しむことが出来なかったものが、家庭内で可能になり、双方向の対応がアーケードゲームのように反応し、ソフトの作り方も工夫されていて楽しい体験を提供したので、瞬く間に一大産業として発展していった。又、この時期は、検索機能を駆使した電子辞書、電子辞典などの電子出版、GPSの開放により進展していったカーナビゲーション、あるいは教育ソフトなどのCD-ROMや家庭用カラオケなどの、様々なインタラクティブ・マルチメディア機能を生かした製品が次々と登場していった。これらのマルチメディアCDは、大きな意味で、新たな文明社会や“インタラクティブ文化”と呼ぶに相応しい新しい展開を見せたのである。その発展の一端を担った機器に、マルチメディアPCと呼ばれたCD-ROMドライブ内蔵型パソコンがある。1990年頃から、8センチCDシングルの発売やCD-ROMタイトルの雑誌への付属化など、ソフトの商品寿命が短いものが出てきて、大量生産、消費、廃棄等の現象が起り、“文化の消耗品化”が進んでいったのである。デジタル文化=お手軽文化になり、知的好奇心を満足した後、その役割が終わったら手軽に廃棄してしまうような日常性を育ててしまうことになったのは、余りに大量のコンテンツがCD-ROM等で配布された副作用であった。しかし、CD-ROMのハードウェア市場は図9-5に示したように、1994年頃から急激に市場規模を拡大して、あらゆるPCにCD-ROMドライブが付き、合計1.8兆円(PC価格を含む)もの巨大な市場を形成したのである。

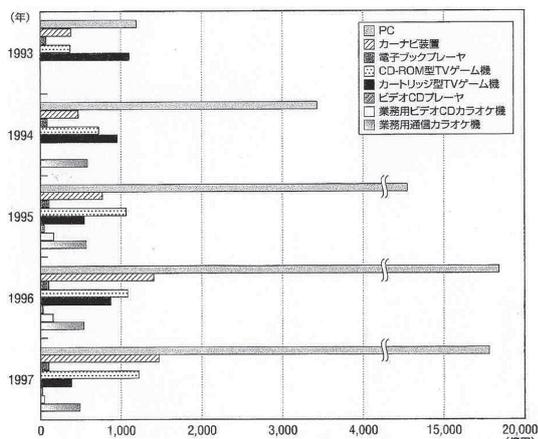


図9-5 CD-ROMハードウェア市場の推移

一方、このインタラクティブな機能性は、その機能を生かして制作されるソフトにおいて、表現上大きな可能性を与え、様々な実験や挑戦が行われ、市場で評価される体制が出来たことで、新しいタイプのソフト

クリエイターを輩出するきっかけになった。6.4.2でも触れたが、このような動向はその後のネットワーク社会でのWEBやコンテンツ制作などに生かされることになり、ここでクリエイター達のネットワーク社会への予行演習が行われていたのである。その意味で、マルチメディアCDなどのパッケージメディアが、その機能性において、今日の“ネットワーク社会の基礎づくり”を行ったといっても過言ではない。徐々にではあるが、このような文化革命の進行に伴い、2000年以降、マルチメディアに変わり“IT (Information Technology)”と呼ばれる概念が急速に市民権を得るようになったのである。これは図9-4の現象④に示したが、まさに文化革命の一つの結果と考えている。

9.3 R (レコーダブル) 文化と史上最大のメディア

パソコンの記録メディアとしてはFD (フロッピーディスク) やMO (光磁気ディスク) が普及していたが、其の後継としてCD-Rが登場したのは1989年秋の事である。技術的詳細は7章の「記録型CDの登場」で記述したが、かつて文化論を専門とする学者から「今まで、人類が考案して普及したメディアは、すべて“いかがわしさ”を持っていた。その意味でCDファミリーの中に、“いかがわしさ”を持ったメディア (CD-R) が誕生したことは、この上なく嬉しい」と挨拶されたことがあった。その上で、「CD-Rのおかげで、山師的な人たちが活躍できるようになったわけで、ようやく本物のメディアが出てきましたね!」とおだてられて、念を押されたことがある。中島平太郎の備忘録に、CD-Rの開発に成功して、日本レコード協会に説明に出かけたところ、「悪魔のメディア」と名指して酷評されたと記述されている。それだけに著作権を守らなければならない方々にとっては、最も「いかがわしいメディア」と映ったであろうことは容易に想像できる。開発の一端を担ったソニーでさえ、当時CBSソニー (株) というレコード会社を傘下に持っていたため、ソフトを違法コピーされる可能性を懸念して、全面的な商品化は太陽誘電との合弁会社「スタート・ラボ (株) (Sony Taiyo yuden Advanced Recording Laboratory)」に任せたように、最初から“いかがわしさ”を漂わせていたのである。

冒頭の文化論学者の指摘「いかがわしいものほど、本当のメディアになる」の言葉どおり、CD-Rは次の様な背景の元に急速に普及していった。

- ① CDファミリーとの互換性が確保されたこと
- ② WindowsやMacintosh、UNIXなどの環境下で

データのやりとりが可能になった事

- ③ 1997年頃から実現した“低価格化”
- ④ 48倍速までメディア及びドライブが果たした“高速化”
- ⑤ CD-R対応ドライブの普及による“インフラ整備”

それまではFDなどの代用品的な用途が主であったが、IT社会を迎えると、各種のアプリケーションの普及やデジタルカメラの普及、個人で楽しむ音楽用途、PCデータの保存や配布用途など、また、公的機関での電子ファイル指定など、その使用用途の拡大が図られた。発売から約10年後の2000年には世界総生産量が100億枚を突破し、記録メディアやデリバリーメディアとしては、アナログ媒体である“紙”に次ぐ地位を確保したのである。一重に、追記型記録メディアとして強固な「互換性と標準化」を果たした結果である。図9-6に主な記録メディアの世界年間市場規模（調査会社ふじわらロスタイルドを参考）を1993年から2003年までの10年の推移を示したが、いかに急速に普及していったかの状況を端的に示している。1998年頃からCD-Rの市場規模は急激に増加して、人類史上初めて100億枚の大台を突破したのである。この統計は、ある程度の誤差があり、調査会社からの報告では、90億枚から110億枚に分散していたが、CDs21ソリューションズが補正して国内外に発表した数量である。又、これは生産者が判別している表に出ている数量で、実際はこの30%増近くが、裏の分野のアジアの軒先メーカーで作られた低品質のCD-Rを含めた推定値になり、最盛期には約140億枚を超えたと

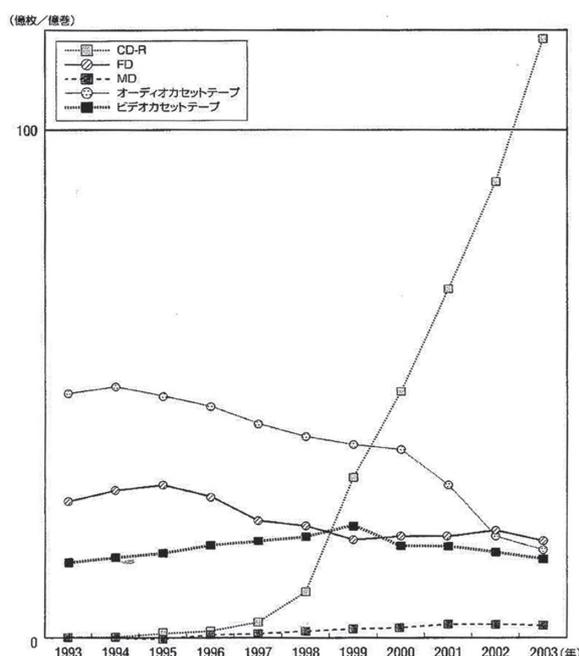


図9-6 記録メディアの世界市場規模の推移

の報告もある。一方、2003年の世界生産量の地域別構成比は、アジア約89%（日本8%、台湾52%、インド11%、その他18%）、ヨーロッパ9%、アメリカ2%であり、圧倒的にアジア、特に台湾が多い。台湾は国家戦略として、この光ディスク生産に乗り出して生産設備を拡充して、中古の日本製を多数購入し、独自の生産体制を作り上げた。その結果、装置産業の宿命として、2006年をピークに生産コストは劇的に下がり、日本メーカーは価格競争に耐えられず、2015年の太陽誘電の生産停止を最後に、日本製CD-Rの生産は終了して産業そのものが消滅してしまったのである。しかし、高品質の日本製CD-Rは根強い需要があり、コストより高品質の要望のあるビジネス分野（データアーカイブ用途等）での活用が期待されている。

図9-7にCD-Rシステムのもたらした功罪(1)として、いかに多くのCD-R/RWの再生環境が構築されたかについて示した。2001年の全世界予測で、CD-R/RWドライブは約5000万台がマルチメディアPCに内蔵又は接続されており、その再生環境はCDプレーヤー約10億台、CD-ROMドライブ約10億台、その他ゲーム機やDVDプレーヤーなど約3億台の合計約20億台以上ものシステムが再生可能な状況にあった。この膨大な数量のシステム類が2003年の100億枚突破の基盤になったのである。また、図9-8にCD-Rシステムの功罪(2)として、不正コピーと海賊盤横行の実態について示した。資料はIFPIパイラシーレポートを基にしているが、全世界で、CDパッケージの販売は約28億枚に対して、一般ユーザーの不正CD-Rコピーは、実に約38億枚もあると報告されている。これが懸念された「いかがわしさ」の実態であり、CD-Rシステムがもたらした功罪で、本物のメディアになった正体でもあったのである。

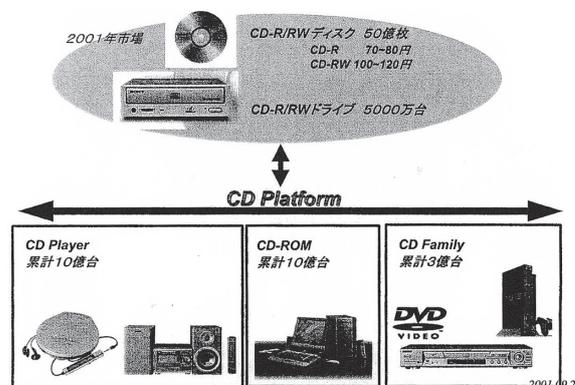


図9-7 CD-Rシステムの効果 1

CD-R需要の第一段階は、このCD-Rは単なる記録メディアとしての機能ではなく、マルチメディア

不正コピー&海賊盤横行の実情

CDパッケージセールス、業者による海賊盤CD、及び一般ユーザーによる不正CD-Rの予想数

資料：IFPIバイラシーレポート
ヤングラボ(AV-ITアルマナック)

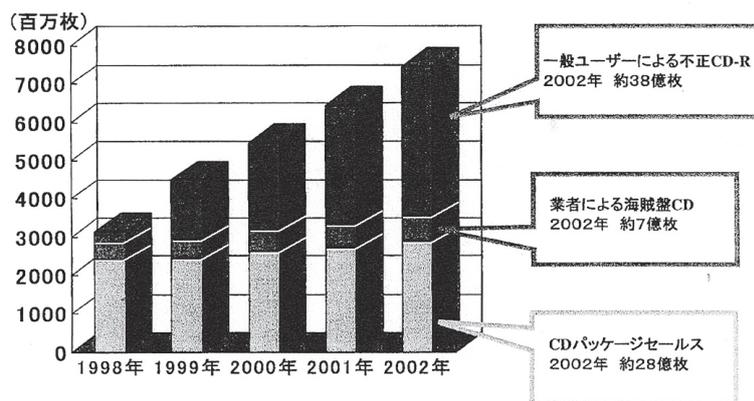


図 9-8 CD-R システムの効果 2

CD のソフト制作の現場に大きな足跡を残した。7.1.2でも触れた内容だが、1990年代の初頭、マルチメディアCDソフト制作において、試作段階での検証、チェックの工程にかかる膨大な時間とコストをCD-Rが大幅に削減した。CD-RはCDファミリーとの互換性があるため、ソフトを試作してすぐに検証、チェックでき、完成したディスクを予測できる体制を実現したことが、マルチメディアCDの製作に“革命的な便利さ”を提供したのである。CD-Rなくして、その後一世を風靡するCD-ROMゲームは生まれなかったといわれるほど、大量のCD-Rがゲームソフト制作に使われた。事実、初期のCD-Rのビジネスはゲームソフト制作で立ち上がったと言われている。その普

及過程の中で、人々がデジタルに親しみ、インタラクティブを体験し、デジタルアーカイブしながら情報を自由に取り扱っていく基礎学習は、その後のIT・ネットワーク社会への移行をスムーズに行うことの文化的要因になったとも考えられるのである。

参考文献

- 1) 「音楽メディアの生産金額の推移」(社)日本レコード協会
- 2) 「CDプレーヤーの生産推移」機械統計年報 (財)経済産業調査会
- 3) 「コンパクトディスク その20年の歩み」CDs21ソリューションズ (2005)

10 | おわりに

早いもので、CDがこの世に誕生したのが1982年の秋であるから、今年で35年の歳月が流れた。20年の長きに亘って改良が加えられて、CDファミリーを増やし続けて成長し、巨大なビジネスを作り上げた稀有なシステムである。今までの技術史に照らすと、民生用のメディアの寿命は一世代（約25年）程度である。その意味で、CDは2000年の初め頃、新しい次世代のメディアに交替される運命にあった。しかし、音楽を配布するパッケージメディアで次世代音楽メディアは、現時点では登場していない。一方、オーディオの世界では、現在のネットワークやIT時代にもかかわらず、未だにビジネスの中心にCD-DAがあり、音楽アーティストのアルバムはCD-DAで発売されることが多い。一体、なぜこのような長寿命のメディアになっているのかは、明確な答えは今のところない。音楽コンテンツは、パッケージで配布する方式が最適であったのか、又は、35年も前の技術で決められた音質やシステムが、今でも十分に評価されているのかは、全く不明である。しかし、この35年の間には技術の進化により、もっと高音質の光ディスクが欲しいとの要望に応じてSACD（スーパーオーディオCD）なるシステムが提案されたのが1999年であった。DSD（ダイレクト・ストリーム・デジタル）コーディング技術を用い、デジタルノイズを小さくした究極のA/D変換技術で、大幅な高音質オーディオの提案であったが、上位互換のために再生環境の少なさが原因したのか、大きな普及には至らなかった。

35年の時間軸は、技術的に高密度記録を大きく進展させた。この間に記録容量は1996年のDVDで約6倍の片面約5GBまで拡大されて、2003年に提案されたBD（Blu-ray Disc）では、更に5倍の片面約25GBまで拡大された。更に、多層化が規格化されて、DVDで約10GB弱、BDで約50GBもの記録容量を持つことが可能になった。その上、更なる多層化技術が進化して、3層、4層までも可能にして片面100GB以上の記録容量も可能になってきた。図10-1にその技術比較図を示した。これほどの容量は高画質映画コンテンツの配布メディアに最適で、音楽コンテンツは、高音質の192kHzサンプリングで24ビット標本化のデータも十分に格納できる高音質のDVDオーディオやBDオーディオの規格は制定されているものの、音楽を配布する専用メディアとしては普及していない。この様な高音質オーディオの分野は、“ハイレ

ゾ（High Resolution）音楽”として、ネットからのダウンロードが主体の「コンピュータオーディオ」というジャンルに限定されている。そして、現在の音楽は、「スマホ」で大量の音楽データの中から好きな曲をダウンロードして、「それなりの音質」で楽しむことが主になっているのである。

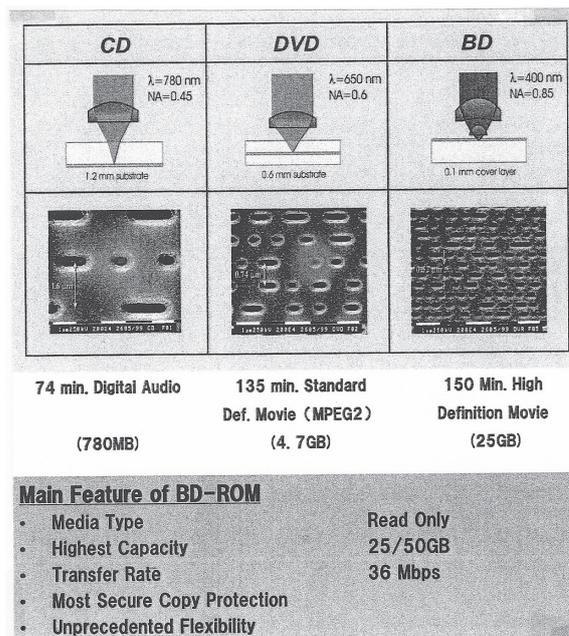


図 10-1 記録密度の技術比較

一方、CD-DAの世界では、良い音を求める意見も多くあり、「音が硬い」とか、「低音が出ない」とかの意見があったことは事実である。現在では、CDではなく往年のLPレコードを楽しむファンも出てきて、アナログ回帰現象が見られるようになってきた。しかし「良い音とは何か」を定量的に表現することは極めて難しく、先人がこの命題の解決のために様々な形で挑戦しているが、人間の深層心理までもを数値化した例は存在せず、「永遠のテーマ」である。CD-DAで遣り残した課題があるとすれば、第一に、「人間の状態の研究」を加速すべきと考えている。即ち、「良い音」とは何かの唯一の判断基準は、視聴者の感じ方で、一体、視聴者はどのように「良い音を良い音」として捉えているかのメカニズムが判別しないと、不毛な議論を続けることになる。残念ながら、人間の感性（感じ方）を計測するシステムは存在していない。昔から、実験的に脳波を測定したり、脈波を測定したりして、その「ゆらぎ」成分を検出して、スペクトル成分が1/fの傾斜に乗っていることが、精神状態が安定して、快適を感じている状態である等の試み

は行われているが確証はない。又、この状態を、交感神経と副交感神経の動きに結び付け精神状態の測定に使用するなどの試みも報告されているが、確たる結果は出ていない。一方、この技術は、ワインや酒のうまみ成分を増加させるための隠れた醸造技術に使われたりしているが、人間の状態の把握に、どこまで応用できるかは明確ではない。昨今の新提案として、耳から脈波（脳波）等を検出する新技術が開発されている。人間の体内にセンサーを装着できる唯一のポイントは耳の中で、脳に近いこともあり、今まで分からなかった色々な情報が検出できる可能性があり、実験的には安定した信号を得ている。限定したヘッドフォンで音楽を聴きながら、脈波（脳波）等がセンシング出来れば、医療分野のみならず、人間の状態の研究開発が飛躍的に発展すると期待され、技術の完成が待たれる。

第2に「聞こえない音」への配慮を考えたい。CDでは、人間の聴感上の上限を医学的な一般例を基に約20kHzとして、サンプリング周波数を決めた。しかし、人間の聴覚は人によっては30k~100kHzの超音波が聞こえる方も存在している現実がある。又、下限は10Hz程度以下は、超低周波振動で、動物にしか聞こえないことが前提でCDシステムが構成されている。しかし、昨今の研究で、この「聞こえない音」をどのように取り扱おうかが大きなテーマとなってきた。聞こえない音にこそ重要な情報が隠されているのとの仮説があり、高音質分野の鍵になる技術解明ができる可能性があるとして期待されているのである。図10-2に「人に関わる音・振動の分布」を示した。音圧にもよるが、10Hz以下の超低周波や30kHz近い超音波にも人間の可聴帯域があることが分る。その上、楽曲には100kHz以上に振動帯域が存在し、超低周波分野は生体音（心拍、呼吸音等）と重なり騒音として認識される可能性がある。この様な状態の中で、「聞こえない音」をどのように数値化して、体系した技術に展開できるかは今後の研究、開発の成果を期待したい。

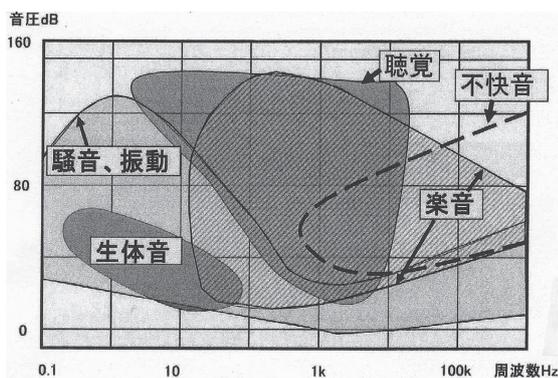
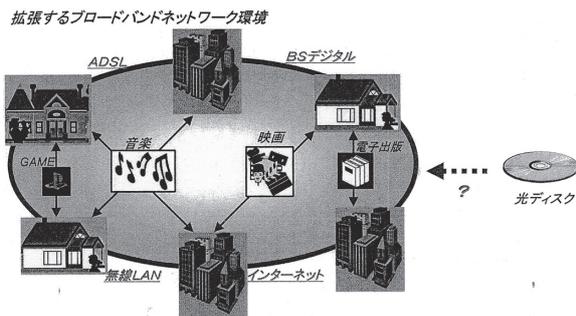


図 10-2 “ひと”にかかわる音・振動の分布

第3に、拡張するブロードバンドネットワーク環境の中で、光ディスクのポジションはどのように変化していくのかを見極めたい。現在すでに、光ディスクはPC等のコンピュータの記録デバイスとしては主役の座を降りて、半導体メモリーにその席を明け渡している。昨今は、2006年頃まで一世を風靡したCD-ROMでの情報のやりとりが激減し、PCに標準装備されていたCD-R/RWドライブやCD-ROMドライブは、外付けデバイスの一部としての位置付けになっている。電子出版に関連する分野は、前述したように、光ディスクはマルチメディアの高速出版物であるとの理由で、今でも書籍や雑誌の付録情報提供媒体としての地位は守っているが、今後の情報はブロードバンドネットワークでやり取りされて、そのデータはクラウドシステムの中に取り込まれ、媒体としては全く見えない状態に置かれるのである。この様な状況の中で、音楽コンテンツでも、映画コンテンツでも、電子出版分野でも、1~100GB程度の記録容量の光ディスクは、どのような役割を果たしていき、そのポジションは、これからの存在するのかが議論のあるところである。しかし、CD等のパッケージメディアは実態のあるメディアである。音楽には感性が埋め込まれており、アルバムのライナーノーツには、制作者の作品に対する意図と想いが込められ、同時に“匂い”さえ感じられる商品である。その意味で、音楽アーティストが今でもアルバムはCDでパブリッシュするように、感性を商品にする分野は、実態のある光ディスクが、当分の間主役の座を占める可能性はある。一例として、ヨーロッパ等では、第一世代のCD-ROMゲームソフトの人気の高い。その為に、CD-DAの生産工場がCD-ROMゲームソフト一辺倒になって操業をしている事例がある。なぜゲーム愛好家が、CD-ROMゲームを未だに楽しんでいるのかの明確な答えは聞こえてこない。類推するに、実体のないネットゲームより、より実態（製作者の感性の感じられる）のあるゲームを手元に置いて楽しんでいるのではないかと予測できる。一方、米国等では、DVD映画コンテンツが、安売りの目玉商品になり、十把一絡げで投げ売りされているような“感性のかけら”も感じられない分野は、ネットフリックス等に代表される映像配信サービスが主流になっている傾向にある。いずれにしても、今後、CDの様な賞味期限が切れた光ディスクシステムが、どのような利用価値を維持していくかについては注視していきたいと考えている。図10-3に光ディスクとネットワークの関係の概念図を示した。



ネットワーク時代に光ディスクのポジションはあるのか？

図 10-3 ネットワークと光ディスク

最後に、ネットワーク時代の切り札のデータセンタに、光ディスクを利用しようとしている動向を注視している。いわゆるコールドデータという、使用頻度は極めて少ないが膨大なデータを、データセンタ運用者がハードディスクシステムで常時保存しておく経済的損失に目覚めたことに端を発している。約 100GB 以上の光ディスク (BDR 等) を 10 枚にまとめ、数テラバイトのカートリッジとして扱うシステムで、必要な時に、必要なデータを瞬時に取り出せるロボシステムの構築を模索し始めたのである。最大の比較ポイントは、ハードディスクの消費電力やメンテナンスコスト等を含めた単位ビットコストとの比較である。普段は利用頻度の少ないデータだけに、一度記録したデータの寿命も重要なパラメータで、前述した ISO 寿命試験をパスした光ディスクを使用するような要望が出ている。光ディスクの業務用分野に分類できるが、産業規模は非常に大きいと期待されている。報告によると、データセンタで蓄積されている全てのデータの約 80% は、コールドデータともいわれており、爆発的に増加する膨大なデータの貯蔵、蓄積に対する光ディスクの新たな挑戦であり、成果を期待したい。

CD は、20 世紀の最後の 20 年を駆け抜けた“風雲児”であった。ファミリーを増やし、巨大な産業 (ビジネス) を構築して、駆け抜けた後に、新しいネットワークや IT 社会を「置き土産」にしていったのである。しかし、現在でも、音楽の世界では「CD の前に CD なく、CD の後に CD 無し」で、CD に代わる新しいメディアは登場していない。今なお、日本で CD-DA (CD-ROM) 等を生産している企業は、Sony DADC Japan、メモリーテック、JVC/KENWOOD の大手 3 社で、引き続き生産に意欲を燃やしている。

一方、CD の技術に対する顕彰として、IEEE のマイルストーン賞が 2009 年にフィリップスに贈られた。これは、CD が国際規格の ISO/IEC908 [Compact

Disc Digital Audio] に制定されたことを顕彰したものである。図 10-4 にフィリップスに贈られたマイルストーン賞の写真を示した。国内規格としては、JIS8605「コンパクト ディスク デジタルオーディオシステム」として制定されている他、CD に関しての業界規格は RIAJ (日本レコード協会) 規格として、RIS204「オーディオ CD の表示事項及び表示方法」、RIS203「コンパクトディスク用付属品」等があり、寿命推定規格 ISO/IEC10995 や ISO/IEC18926 も JIS 化されている。

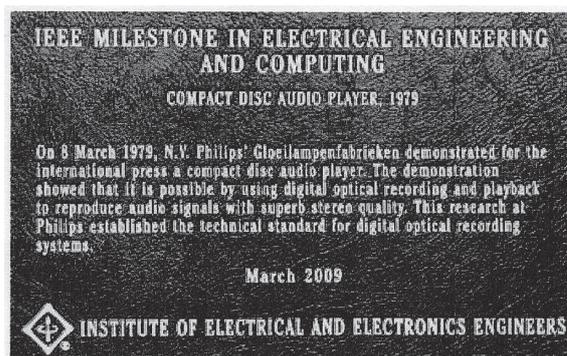


図 10-4 フィリップスに贈られた IEEE マイルストーン賞

CD の技術系統化調査報告という命題には、多くの記述漏れがあると思われる。系統化調査の観点からは、多くの CD 関連企業の状況を調査、記述しなければならないが、約 30 年も前の技術や携わった各社の組織や技術者および資料は、厳しかった電機業界再編の中で霧散して何一つ発見できなかった。唯一、ソニー/フィリップスにしろうじて痕跡が残っていて、その資料を参考にしたため、報告の内容がやや偏った技術系統になってしまった点をご容赦願いたい。その他に参考にした資料は、既に役割を終えて活動を休止している CDs21 ソリューションズ (代表幹事 井橋) が、CD 誕生 20 周年を記念してまとめた「コンパクトディスクその 20 年の歩み」である。その内容や年表等は非常に緻密で正確に記述されており、当時の編集関係者に心から感謝するものである。又、CDs21 ソリューションズ発足前に筆者が代表を務めていたオレンジフォーラムが発行した「CD-R/RW OFFICIAL GUIDE BOOK」は、第 7 章 (記録型 CD の登場) の記述の参考にさせて頂いた。非常に綿密的を得た記述内容に、改めて編集関係者に敬意を表したい。

一筋の光に魅せられて、約 30 年近い歳月を CD 関連業務の中で過ごさせて頂いた事に、改めて感謝して、「CD の技術系統化調査」の報告とする。

参考文献

- 1) 「図解コンパクトディスク読本」中島平太郎、小川博司共著 オーム社 (1996)

謝辞

この調査報告書執筆も終盤に差し掛かった、2017年12月9日、日本のオーディオ界に大きな功績を残して、元日本オーディオ協会会長であった中島平太郎氏が逝去した。

筆者のソニー時代の長年に亘る師であり、この調査報告書の完成を待ち望んでくれたであろう最も尊敬していた指導者であり、多くの薫陶を受けた大先輩であった。中島平太郎氏の残されたオーディオ分野、取り分けデジタルオーディオ（CD）の発展に対しての功績は言葉に尽くせない程大きく、心からご冥福を祈り、哀悼の意を表するものである。同時に、この調査報告書の色々な場面で出てくる中島備忘録や著書が、大変参考になり引用させて頂き報告書が完成したことに、厚く御礼を申し上げる次第である。完成の暁には真っ先に墓前に報告し、捧げるつもりである。

第2章の、ソニー/フィリップス会談の詳細な備忘録を残して頂いた元ソニー R & D 部長の水島昌洋氏に感謝の意を表するものである。これだけ詳細な記録は、当時の状況を再現できるほど貴重なもので、後世に伝えたいと考えて大いに参考にさせて頂いた。第4章の資料の提供及び説明は、Sony DADC Japan の石原社長、安田洋一氏及び岡村康博氏に多大の協力を頂いた。無理を言って最新設備の写真を提供して頂いた事に厚く御礼を申し上げる。

第6章の CD 関連ビジネスの出現については、主にソニーのビジネス展開について記述せざるを得なかったために、ソニー V&S 事本部松本義典部門長、関根和浩氏、蓮利弥氏及び O B の福山豊氏に、資料の提供のほかに多大のアドバイスを頂き厚く御礼を申し上げる。

第7章の記述には、太陽誘電の知財部門の新井亨氏に多くの資料を提供して頂いた。電子部品メーカーが記録メディアの生産に挑戦する50年史や技術資料の提供は大変役に立ち、感謝の意を表す。第8章の寿命推定規格作成当初から熱心な指導を賜り、ISO規格の制定に多大の貢献をして頂いた大阪産業大学の入江満教授には、ADTCの運営にまで携わって頂いており、重ねて御礼を申し上げる。

多くを引用させて頂いた CDs21 ソリューションズがまとめた「コンパクトディスクその20年の歩み」は、大変参考になった。非売品であり筆者もかかわったので、この調査報告書でその意思を少しでも残したいと工夫してみたもので、協力してくれた多くの企業や編集に携わった多くの関係者及び中心的に活動してくれた西沢利治氏、谷口攻氏等の出版事業編集委員会のメンバーに、心から感謝の意を表す。

最後に、筆者の親友である（元）フィリップス社の Dr. Heemskerck は、CD 開発当初からチーフエンジニアとして技術的な分野のリーダーであった。「Japanese English」をよく理解してくれて、CD-DA から CD-R まであらゆる規格の作成にかかわった類まれな技術者であった。この系統化技術をまとめるにあたって、フィリップス社内に残っている資料を調べて提供して頂いた事に、心から御礼を申し上げる次第である。



中島平太郎 博士



Dr. J. Heemskerck と筆者

CD 関連年表

| | |
|----------------|--|
| 1877 (明治 10 年) | 12 月 エジソン (USA), フォノグラム (錫箔円筒式蓄音機) 発明 |
| 1937 (昭和 12 年) | リーブス (英国) パルス符号変調方式 (PCM) の原理発明 |
| 1951 (昭和 26 年) | LP レコード発売 (日本) |
| 1952 (昭和 27 年) | 10 月 日本オーディオ学会創設 1953 年に日本オーディオ協会 (JAS) に改称 |
| 1953 (昭和 28 年) | 2 月 NHK テレビ放送開始 |
| 1956 (昭和 31 年) | シャネル (ドイツ) ポリカーボネート発明 |
| 1958 (昭和 33 年) | タウンズ, ショウロウ (USA) 光メーザー (レーザー) の論文発表 |
| 1960 (昭和 35 年) | 7 月 メイマン (USA) 個体 (ルビー) レーザー発振に成功 |
| 1961 (昭和 36 年) | ポリカーボネートの工業化開始 日本電気 日本初のルビーレーザー発振に成功 |
| 1962 (昭和 37 年) | 半導体レーザーの作動に成功 (USA) |
| 1963 (昭和 38 年) | SP レコードの生産終了 |
| 1964 (昭和 39 年) | フィリップス (オランダ) コンパクトカセットテープ開発 |
| 1969 (昭和 44 年) | NHK 放送技術研究所 世界初の業務用デジタルオーディオテープレコーダ公開 |
| 1970 (昭和 45 年) | テルデック (ドイツ) 他 TED 方式ビデオディスク発表 |
| 1972 (昭和 47 年) | 3 月 日本コロムビア PCM デジタル録音機開発 9 月 フィリップス光学式ビデオディスク (VLP 方式) 発表 |
| 1974 (昭和 49 年) | ヨーロッパで初めての PCM デジタル録音 フィリップス/MCA 光学式ビデオディスクの規格統一発表 |
| 1975 (昭和 50 年) | PCM デジタル録音、米国で初の商業化デジタル録音開始 ソニー ベータマックス発売 |
| 1976 (昭和 51 年) | ソニー、PCM プロセッサの試作機公開 シングル盤レコード (EP) 一億枚突破 日本ビクター VHS 発売 |
| 1977 (昭和 52 年) | ソニー PCM プロセッサ PCM-1 を発売 10 月 ソニー、日立/日本コロムビア、三菱電機/テイアック/東京電化 3 グループ、 光学式 DAD 試作機を全日本オーディオフエアで展示 フィリップス 光学式 DAD (ALP 方式) 開発 |
| 1978 (昭和 53 年) | 3 月 ソニー、PCM プロセッサ PCM-1600 発売 4 月 DAD 懇談会発足 (15 社) 9 月 日本ビクター 静電式ビデオディスク VHD 方式、及び静電式 DAD (AHD 方式) 発表 |
| 1979 (昭和 54 年) | 3 月 フィリップス 光学式 DAD (外径 115mm のコンセプトモデル) デモンストレーション 5 月 民生用 PCM プロセッサの標準化成立 8 月 ソニー/フィリップス CD の仕様策定に向けて交渉開始 10 月 ソニー 13 時間 20 分の再生可能な 30cm DAD 発表 |
| 1980 (昭和 55 年) | 5 月 ソニー/フィリップス CD 方式の仕様基本合意 6 月 パイオニア USA で家庭用 LD プレーヤー VP-1000 発売 6 月 DAD 懇談会に CD, AHD, MD の 3 方式提案 |
| 1981 (昭和 56 年) | 1 月 レッドブック (CD-DA) 規格提案 4 月 DAD 懇談会、3 方式の評価終了 (51 社参加) 4 月 ソニー/フィリップス、ザルツブルグにて CD のデモンストレーション開催 6 月 ソニー/フィリップス ニューヨークにて CD 正式発表 10 月 全日本オーディオフエアで CD 方式、AHD 方式試作機展示 10 月 パイオニア家庭用 LD プレーヤー日本で発売 |
| 1982 (昭和 57 年) | 8 月 レッドブック (CD-DA) 発表 9 月 レッドブック公開 10 月 ソニー据置き型 CD プレーヤー CDP-101 発売、続いて各社より CD プレーヤー発売 10 月 CD 方式を IEC に標準化提案 |
| 1983 (昭和 58 年) | 5 月 レッドブック、サブコードチャンネル R~W 規格化 10 月 イエローブック (CD-ROM 規格) 提案 車載用 CD プレーヤー、高級車に搭載開始 |
| 1984 (昭和 59 年) | 4 月 CD-G 規格提案 9 月 パイオニア LD/CD コンパチブルプレーヤー発表 11 月 ソニー、低価格ポータブル CD プレーヤー D-50 発売 (CD プレーヤー本格的普及の先 駆けとなる) 第一興商、日光堂、業務用 CD カラオケ発売 |

| | |
|-----------------------|--|
| 1985 (昭和 60 年) | 1 月 フィリップス / ソニー / マイクロウェアシステムズ、CD-I の規格化に合意 5 月 DEC、初の CD-ROM ドライブ製造 ソニー / フィリップス、イエローブック (CD-ROM 規格) 発表 ビクター音楽産業、業務用 CD-G カラオケ発売 |
| 1986 (昭和 61 年) | 5 月 ハイシェラグループ、ハイシェラフォーマット提案 5 月 フィリップス / ソニー、グリーンブック (CD-I 規格) 暫定版発表 6 月 ソニー / フィリップス、第一回レコーダブル CD 標準化会議開催 マイクロソフト 第一回 CD-ROM 国際会議開催 (USA) ISO 国際レコーディングコード (ISRC) 制定 |
| 1987 (昭和 62 年) | ソニー / フィリップス CD-V 規格、レッドブックに追加 ソニー / フィリップス CD- シングル仕様、レッドブックに追加 2 月 ソニー / フィリップス CD-WO 仕様確定 3 月 GE (USA)、第 2 回 CD-ROM 国際会議で DVI 技術発表 6 月 グリーンブック (CD-I 規格) 提案 10 月 CD-V プレーヤー発売開始 11 月 ソニー / フィリップス CD-WO 規格の基本合意を発表 |
| 1988 (昭和 63 年) | 2 月 ソニー / フィリップス ブルーブック (CD-WO 規格) 提案 2 月 CD シングルのタイトル発売 4 月 ISO ISO9660 標準化 8 月 ソニー / フィリップス / マイクロソフト、CD-ROMXA 開発に合意 8 月 ソニー / 太陽誘電 レコーダブル CD の標準化に合意し、フィリップスに提案 9 月 太陽誘電 レコーダブル CD 発表 9 月 ソニー / フィリップス 8cmCD-ROM 及びカートリッジ提案 10 月 グリーンブック仕様確定、CD-I プレーヤーの試作品公開 |
| 1989 (昭和 64 年 / 平成元年) | 3 月 ソニー / フィリップス / マイクロソフト CD-ROMXA 規格提案 4 月 ソニー / フィリップス オレンジブックの暫定仕様書を配布 6 月 ソニー / 太陽誘電合弁会社「スタート・ラボ」設立、CD-R 制作サービス開始 10 月 ソニー / フィリップス グリーンブック第 1 版発表 12 月 DVI 普及推進団体、DAVIS 設立 |
| 1990 (平成 2 年) | 1 月 CD-MIDI 規格、レッドブックに追加 6 月 第 1 回 CD-I 国際会議開催 (ロンドン) 7 月 オレンジブック Part1 (CD-MO 規格) 及び Part2 (CD-WO 規格) 公開 7 月 ソニー データディスクマン発売 9 月 フィリップス / コダック フォト CD システム発表 9 月 CD シングル規格、CD-V シングル規格、レッドブックに追加 11 月 日本規格協会 JIS X0606-1990 制定 マイクロソフト MPC 基本仕様策定 トヨタ、日産、日本電装、住友電工、カーナビシステム (ナビ研フォーマット) 公開 ソニー / フィリップス / マイクロソフト 第 1 回「The Multimedia Conference on Interactive CD」開催 |
| 1991 (平成 3 年) | 3 月 CD-ROMXA 規格、イエローブックに追加 3 月 CD-I コンソーシアム ジャパン設立 10 月 アメリカで家庭用 CD-I プレーヤー / ソフトタイトル発売 10 月 第 1 回「International CD-I Publishing & Developers Conference & Exposition」開催 11 月 CD-MIDI の運用基準制定 (EIAJ) 12 月 日光堂 業務用 CD-I カラオケシステム発売 12 月 アメリカレコード会社、新譜 CD のレンタル禁止を通告 ハードメーカー各社 CD-R ドライブとメディアの互換性実現に向けて協力 |
| 1992 (平成 4 年) | 4 月 日本フィリップス 民生用 CD-I プレーヤー CDI205 と、ソフトタイトル発売 7 月 オレンジブック Part2 (CD-R 規格) 公開 9 月 日本コダック 国内でフォト CD サービス開始 10 月 パイオニア世界初の 4 倍速 CD-ROM チェンジャー発売 10 月 第一興商、日本ビクターなど業務用 CD 動画カラオケ発売 アメリカの光ディスク推進業界団体 OSTA 設立 ソニー 業務用ポータブル CD-I プレーヤー「インテリジェント・ディスクマン」発売 |
| 1993 (平成 5 年) | 3 月 ホワイトブック Ver1.0 (カラオケ CD 規格) 発表 8 月 ホワイトブック Ver1.1 (ビデオ CD 規格) 発表 10 月 ホワイトブック Ver1.1 (ビデオ CD 規格) 規格書配布 ISO MPEG-1 規格 (ISO11172) 公開 |
| 1994 (平成 6 年) | 1 月 オレンジブック Part2 Ver2.0 (倍速モード規格) 標準化 6 月 ホワイトブック Ver2.0 (PBC 機能付きビデオ CD 規格) 発表 11 月 CD-R ドライブ / メディアメーカー 13 社 互換性確保の技術・規格検討のため、「オレンジ研究会」発足 12 月 ソニー・コンピュータエンターテイメント プレイステーション発売 |

| | |
|----------------|--|
| 1995 (平成 7 年) | 1 月 東芝、松下電器、パイオニアなど7社次世代光ディスク「SD方式」発表 1 月 定期刊行雑誌の付録にCD-ROM認可 5 月 オレンジ研究会 互換性確保のため「Disc Identification Method」規格化 8 月 ソニー/フィリップス/HP/三菱化学/リコー CD-E (CD-RW) 発表 12 月 松下/東芝、ソニー/フィリップスなど9社 次世代光ディスク DVD 規格統一合意。同時に、規格推進団体「DVD フォーラム」を設立 |
| 1996 (平成 8 年) | 3 月 オレンジ研究会を改称、メーカ 24 社でオレンジフォーラム設立 6 月 Open MPEG ウィンドウズフォーラム ビデオ CD-ROM 規格提案 9 月 CD テキスト規格、レッドブックに追加 10 月 オレンジブック Part3 (CD-RW 規格) 公開 11 月 松下電器、東芝から DVD プレーヤ発売 |
| 1997 (平成 9 年) | 4 月 ライセンサー4社と日立「Video CD Internet Guidelines Version 1.0 1997」公開 4 月 松下電器、ソニーなど10社 DVD-RAM の統一規格発表 10 月 パイオニア 世界初のDVD-Rドライブ発売 12 月 CCC DVD ハードウェア/ソフトウェアのレンタル開始 |
| 1998 (平成 10 年) | 8 月 オレンジブック Part3 Ver2.0 (CD-RW4 倍速モード規格) 公開 12 月 ソニー/フィリップス、松下電器、日本ビクター、スーパーVCD 規格 Ver0.9 発表 12 月 オレンジブック Part2 Ver3.1 (CD-R4 倍速モード規格) 公開 |
| 1999 (平成 11 年) | 2 月 DVD フォーラム DVD オーディオフォーマット確立 3 月 ソニー/フィリップス スカーレットブック (Super Audio CD 規格) 発表 5 月 ソニー SA-CD プレーヤ発売 10 月 パイオニア DVD オーディオプレーヤ発売 11 月 IEC スーパーVCD を国際規格として承認 (IEC/SVCD 規格) |
| 2000 (平成 12 年) | 5 月 オレンジブック Part3 Vol2 Ver1.0 (CD-RW ハイスピードモード規格) 公開 6 月 松下電器 世界初のDVD-RAM ビデオレコーダ発売 7 月 ソニー/フィリップス パープルブック (Double Density CD 規格) 発表 |
| 2001 (平成 13 年) | 3 月 CDs21 ソリューションズ (オレンジフォーラムとMMCDを統合) 設立 5 月 オレンジブック Part2 Vol2 Ver1.0 (CD-R ハイスピードモード規格) 公開 DVD ビデオ、ビデオカセットの売り上げを上回る |
| 2002 (平成 14 年) | 2 月 Blu-ray Disc の標準化推進団体BDF (Blu-ray Disc Founders) 設立 (ソニー/フィリップス、松下電器、日立、パイオニア、サムソン、LG電子、トムソン参加) 3 月 コピーコントロールCD (CCCD) タイトル発売 9 月 オレンジブック Part3 Vol3 Ver1.0 (CD-RW ウルトラスピードモード規格) 公開 |
| 2003 (平成 15 年) | 4 月 ソニー Blu-ray 規格のビデオレコーダー (BDZ-S77) 発売 4 月 CDs21 ソリューションズ オプティカルカード (カード型CD-R) 推奨規格公表 |
| 2004 (平成 16 年) | 5 月 CDs21 ソリューションズ 2003 年度CD-Rディスクの全世界生産量が100億枚突破と発表 |

コンパクトディスク(CD) 産業技術史資料 所在確認

| 番号 | 名称 | 製作年 | 製作者 | 資料種類 | 資料現状 | 所在 | 選定理由 |
|----|-------------------------------|-------|---------|------|------|-----------------------|--|
| 1 | CDプレーヤー CDP-101 | 1982年 | ソニー株式会社 | 量産品 | 展示 | 東京都品川区北品川 ソニー歴史資料館 | 業界の先陣を切って発売されたソニー初のCDプレーヤー。CBS・ソニーからの世界初のCDソフト50タイトルと共に発売された。スライドローターイングなどCDプレーヤーの基本形を確立し、その後のCDの歴史はこの機種から始まったと言える記念碑的機種。 |
| 2 | CDコンパクトプレーヤー D-50 | 1984年 | ソニー株式会社 | 量産品 | 展示 | 東京都品川区北品川 ソニー歴史資料館 | CDの普及を一気に加速するきっかけとなったポータブル型CDプレーヤー。驚異的な小型化を実現し、思い切った価格での販売が奏功し、マーケットの大幅な拡大を牽引してCDを音楽メディアの主流に押し上げた。 |
| 3 | スーパーオーディオCD プレーヤー SCD-1 | 1999年 | ソニー株式会社 | 量産品 | 展示 | 東京都品川区北品川 ソニー歴史資料館 | CDの次を担うべく高音質を追求して開発されたSACD(スーパーオーディオCD)プレーヤーの第1号機。SACD自体は広く普及しなかったものの、要素技術であるDSD(ダイレクトストリーミングデジタル)方式コーデックは、音質面で高い評価を得てハイレゾオーディオへの技術進化の先駆けとなった。 |

コンパクトディスク(CD)の開発、実用化技術系統化調査 正誤表

| ページ | 段落 | 行 | 技術の系統化調査報告 第25集 2018年3月 (誤) | 全文PDF版 2018年8月 (正) |
|-----|----|-------|-----------------------------------|--------------------------|
| 4 | 右 | 図1-1 | 清算金悪 | 生産金額 |
| 4 | 右 | 図1-2 | オーストラリア | オーストリア |
| 11 | 右 | 7 | ディスク暑さ | ディスク厚さ |
| 12 | 左 | 8 | 基ずき | 基づき |
| 12 | 右 | 下から1 | 大分部 | 大部分 |
| 33 | 右 | 26 | 確立 | 確率 |
| 38 | 左 | 下から8 | 蒼々たる | 錚々たる |
| 52 | 左 | 下から2 | 紆余屈折 | 紆余曲折 |
| 59 | 右 | 下から8 | フォートン | フォートロン |
| 60 | 左 | 3 | 適才適所 | 適材適所 |
| 64 | 左 | 6 | 内臓 | 内蔵 |
| 66 | 右 | 23 | 内臓RAM | 内蔵RAM |
| 67 | 右 | 2 | CD-ROM内臓 | CD-ROM内蔵 |
| 67 | 右 | 下から8 | 内臓ROM | 内蔵ROM |
| 68 | 左 | 下から4 | 和同開珍 | 和同開珎 |
| 68 | 右 | 7 | 和同開珍 | 和同開珎 |
| 75 | 左 | 下から14 | アルバムズ | アルバム |
| 78 | 左 | 下から13 | デバッグ | デバグ |
| 83 | 左 | 5 | 蒼々たる | 錚々たる |
| 84 | 左 | 下から5 | 内臓 | 内蔵 |
| 84 | 左 | 下から4 | バージョンアップ | バージョンアップ |
| 84 | 右 | 1 | バージョンアップ | バージョンアップ |
| 85 | 右 | 2 | 秀悦 | 秀逸 |
| 92 | 左 | 下から2 | アレニウス | アレニウス |
| 92 | 左 | 下から1 | 基ずき | 基づき |
| 92 | 右 | 12 | 理論における | 理論における |
| 93 | 右 | 図8-5 | 累積胡椒分布 | 累積故障分布 |
| 93 | 右 | 下から7 | 残存確立 | 残存確率 |
| 94 | 左 | 下から6 | ロゴマーム | ロゴマーク |
| 97 | 右 | 12 | 図9-2 | 図9-4 |
| 97 | 右 | 下から8 | Taiyouyuden | Taiyo yuden |
| 100 | 左 | 下から15 | 記録密度 | 記録容量 |
| 100 | 左 | 下から14 | 約5倍 | 約6倍 |
| 102 | 右 | 下から8 | ソリューションズ | ソリューションズ |
| 103 | 右 | 10 | Dr.Heemskark | Dr.Heemskerk |
| 106 | | 12 | Versinj | Version |