

■ 要旨

本調査報告は磁気テープの数十年の歴史を製品と技術の二つの側面から系統的にまとめたものである。

19世紀最後の年である1900年、鋼線に音声信号を記録する最初の磁気記録のデモンストレーションが行われた。磁気テープへの最初の記録は1928年であった。第二次世界大戦後に磁気テープは米国で急速に技術開発が進み、1950年代に入ると音声記録だけでなく映像記録、黎明期のコンピュータのデータ記録用として実用化されるようになった。その後、現在に至る60年以上にわたり磁気テープは進化し続け、産業社会の発展に貢献し個人の生活を豊かなものにしてきた。光ディスクやフラッシュメモリの出現やハードディスクの進化は20世紀末であり、磁気テープはそれまでの約半世紀にわたり一般に広く普及した唯一の記録メディアと言っても過言ではない。

磁気テープと言えば、多くの人はVHSテープやコンパクトカセットテープを思い浮かべるであろう。これらは21世紀になると一般家庭からは徐々に姿を消したが、放送用やコンピュータ用で今も活躍している。半世紀以上の歴史の中で様々な磁気テープが生まれその種類は数十にも及ぶ。この間に磁気テープの面記録密度は10年で10倍のペースで向上し音声、映像記録システムの高品位化や小型化を実現し、IT時代の今日においても大容量データの保存を可能にし社会に貢献している。

本調査報告は主に磁気テープのメディア技術に主眼を置いたものだが、最初に比較的社会に馴染みのあるシステム製品の変遷を、次にそれを実現したメディア技術の進歩とハード技術との融合の経緯をまとめた。システムの歴史の重要な節目は、音声／映像用の分野では1970年代の民生用への展開と1990年代のアナログ記録からデジタル記録への転換であり、コンピュータ用の分野では1980年代のハードディスクとの競合の始まりと2000年代のビッグデータ時代への対応である。メディアの歴史の重要な節目は磁性体の進化と磁性層の薄層化である。

磁気テープシステムの製品と技術の多くは欧米発祥であるが、磁気テープの全盛期である1980年代、1990年代の民生用、放送用システムの発展には日本企業が大きく貢献した。一方でコンピュータ用システムは今日に至るまで一貫して米国企業が主導している。これに対し、メディアは黎明期を除き用途を問わず日本企業の独壇場であった。磁気テープの実用化には微細な領域での高度な摺り合わせ技術が必要であり、それが日本企業のもつ開発力の強みと合致していたことがその理由と考える。

21世紀になり競合メディアの台頭により、磁気テープシステムはデータのバックアップとアーカイブの用途に限定されるようになった。一方で、記録が必要な情報は膨張し続けている。情報化社会における磁気テープの今後の役割についても考察した。

■ Abstract

This research report systematically summarizes the several decades of history of magnetic tape from two aspects: product and technology.

In 1900, the last year of the 19th century, the first magnetic recording demonstration of audio signals on steel wires was performed. The first recording on magnetic tape was in 1928. After World War II, further, rapid development of magnetic tape took place in the United States, and in the 1950s, magnetic tape was put to practical use not only for audio recording but also for video recording, and data recording at what was then the dawn of the computer age. Since then, magnetic tape has continued to evolve over the past 60 years, contributing to the development of industry and enhancing the quality of people's lives. With optical disks and flash memory having emerged only at the end of the 20th century, along with the evolution of hard disks, it can safely be said that magnetic tape was the only recording medium generally used in the preceding half century or so.

Mention magnetic tape, and most people will think of VHS tapes and compact cassette tapes. These gradually disappeared from ordinary households in the 21st century, but are still actively used in broadcasting and computer applications. In the more than half-century-long history of magnetic tape, dozens of types of it were created. During this time, the areal recording density of magnetic tape increased ten-fold every ten years, allowing the achievement of high audio video recording quality and the miniaturization of recording systems. And it still makes a contribution in today's IT era by enabling the storage of large volumes of data.

This research report mainly focuses on the media technology of magnetic tape, but firstly summarizes the changes that have happened in relatively familiar system products, the progress of media technology that facilitated these changes, and how this media technology has merged with hardware technology. Important milestones in audio-video recording systems are their opening up for consumer use in the 1970s and the transition from analog recording to digital recording in the 1990s, and, in computers, the start of competition with tape from hard disks in the 1980s, and, as a result, the development of kinds of tape suitable for the big data era of the 2000s. Important milestones in media history are the evolution of magnetic materials and the thinning of magnetic layers.

Most magnetic tape and media technology originated in Europe and the United States, but Japanese companies contributed greatly to its development for consumer use and broadcast systems in the 1980s and 1990s, the heyday of magnetic tape. Meanwhile, computer system development has been consistently led by US companies to date. On the other hand, regardless of their use, Japanese companies have been at the forefront of media development except in the early days. This is thought to be because Japanese companies' development capabilities are fitted to the high level of skill needed to enable the fine integration of interfaces necessary for the practical application of magnetic tape.

In the 21st century, with the rise of competing media, magnetic tape systems have been limited to data backup and archive storage, but the amount of information that needs to be recorded continues to expand. The future role of magnetic tape in the information age was also discussed.

■ Profile

斉藤 真二 *Shinji Saito*

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

- 1981年 東京大学工学系大学院修了
富士写真フイルム入社 磁気記録研究所に配属
磁気テープを中心とした記録メディア開発に従事
- 1993年 磁気材料研究開発センター 主任研究員
- 2004年 記録メディア研究所 部長
- 2008年 記録メディア研究所 所長
- 2012年 知的財産本部 部長
全社事業の知財戦略立案に従事
- 2013年 市村産業賞 本賞受賞
- 2017年 富士フイルム退職

■ Contents

- 1. はじめに 110
- 2. システム製品からみた磁気テープの変遷 112
- 3. メディア技術からみた磁気テープの進歩 137
- 4. 磁気テープ技術における変革点 171
- 5. 磁気テープ産業の特徴と日本企業の貢献 179
- 6. 磁気テープの社会貢献 過去と将来 183
- 7. おわりに 186
- 8. 謝辞 188

1 はじめに

本調査報告は数十年にわたる磁気テープ技術の進歩の歴史を系統的にまとめたものである。磁気テープは1950年代に本格的な実用化が始まり、音声、映像、データの記録を可能にし広く普及した最初の媒体（メディア）である。磁気テープを用いた各種の記録再生システムの出現により、20世紀後半に業務用、放送用、家庭用のあらゆる分野において普及していった。

磁気テープが長年にわたり記録メディアとして存続しえたのは、磁気記録がもっとも重要な性能である高密度化、大容量化のポテンシャルを原理的にもっていたためである。また記録再生を高速で行えるだけでなく保存、消去、書換えの適性も併せもっていたためである。このような汎用性、応用性のあるメディアは、光ディスク、フラッシュメモリの登場を待つまで存在しなかった。磁気テープは20世紀における情報記録の主役として産業の発展、個人の生活向上に貢献してきたと言っても過言ではない。

競合メディアの台頭により21世紀になり磁気テープの市場は縮小、限定されるもバイト単価（1バイトのデータを記録するのに必要な記録コスト）の面で優位にあり、情報量が膨張し続ける現在においてコンピュータのデータバックアップや放送局の映像アーカイブなどに広く使用されている。

この数十年間で磁気テープを用いた様々なシステムが開発、製品化された。システムにおいてテープは一つの部品（パーツ）とみなす考え方もある。実際にハードとシステム全体の開発を主導する機器メーカーが要求する仕様をテープが実現してきた歴史がある。その一方で、テープの技術革新により新たなフォーマットの考案が可能になりシステム全体が進歩したという側面もある。

これらハード技術とテープ技術の融合により、磁気テープシステムの面記録密度は1950年代の1 kbps（1平方インチに1kビットのデータが記録できる）に対し、2010年代には10 Gbpsにまで増加、60年で1000万倍、10年で10倍以上の進歩を遂げてきた。同じく記録メディアとして使われる半導体分野における有名なムーア法則（集積度が5年で10倍の進歩）ほどではないが、60年以上の長期間にわたり記録密度という定量的な指標で進歩が継続し、かつそれが常に市場価値を持ち続けたことは、ある意味特殊な産業技術分野と言ってもよいだろう。

これは記録メディアでは記録密度の向上が市場ニ-

ズそのものであるという単純な関係があったためである。図1.1は2005年から2014年の日本国内におけるデータ流通量の推移を示したものであり、9年間で9.3倍に増加している。一方、図1.2は代表的なコンピュータ用のデータテープであるLTO（Linear Tape-Open）の同時期の製品の記録容量の推移であり、10年間で15倍とデータ流通量と同等以上の速度で増加している。むしろ流通するデータがすべて記録されるわけではないが、データの一定の割合は記録し保存されると考えると磁気テープは市場ニーズに対応してきたと言ってよい。

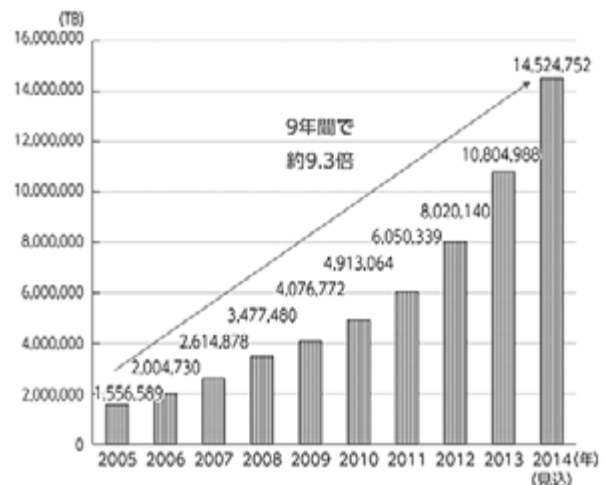


図 1.1 国内データ流通量^[1]

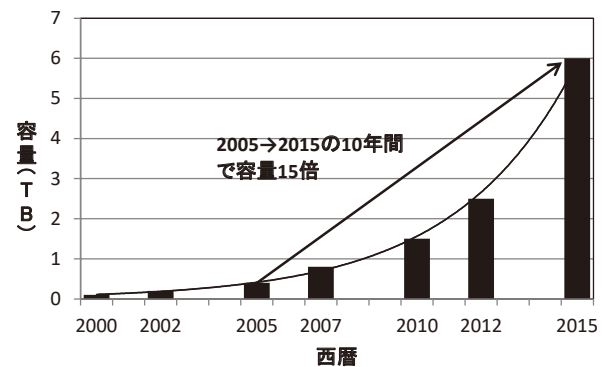


図 1.2 LTO テープ 1 巻の記録容量

磁気テープは広義にはテープを用いた記録再生システム全体を指し、狭義にはテープメディアそのものを指す。テープメディアは記録システムの重要な技術要素であり、独自に技術ロードマップを描き進歩しシステムの発展に貢献してきた。

昭和生まれの人にとって磁気テープと聞いて思い浮かぶのは、家庭用で1970年から1990年代にかけて広

く普及した録音用のカセットテープ、録画用の VHS ビデオテープ、8mm ビデオテープであろう。これらは 2000 年以降、徐々に一般市場から姿を消したが、業務用と言われる放送用、コンピュータ用では 1950 年代から現在に至るまで多種多様な磁気テープシステムが実用化され、その数は数十種類にのぼる。

本報告では磁気テープのメディアの視点からその技術の進歩をまとめることに主眼を置くが、一方で産業の発展に寄与し個人の生活を豊かにした磁気テープシステムの進歩と切り離すことはできない。最初に社会との繋がりを理解しやすいシステム製品の変遷の側面から整理を行った（第 2 章）。

次にシステムの進歩を支えた磁気テープのメディア技術の側面から系統的調査を行った（第 3 章）。磁性体を一つ一つに細かく分散しプラスチックのフィルム上に薄く塗布し表面を平滑にし所定の幅に裁断しリールに巻き込んで完成する磁気テープは、構造的にも製法的にも誕生以来大きな変化はない。この間の飛躍的な性能向上は、メディアとハードの技術要素の進歩とそれを的確に融合させる正に摺り合わせ技術によってなされたものである。

なお、磁気テープシステムのハードの技術開発の詳細については本報告の対象ではないので各々の専門の書籍、文献を参照されたい。国立科学博物館でも 2001 年に NHK、ソニー、松下電器（現パナソニック）など数社と協働で VTR 技術の系統化調査報告を行っている^[2]。

筆者が富士写真フィルム（現富士フィルム）に入社し磁気テープの研究開発に従事し始めた 1980 年代初頭は、VHS テープの台頭など磁気テープが隆盛期を迎えようとしていた時期であった。その後 2012 年まで 30 余年にわたり一貫して磁気テープ開発に携わってきたが、磁気テープが実用化されたのは 1950 年代、これは筆者が生まれた頃のことでありその当時の開発現場は知る由もない。従って、磁気テープ実用化の歴史の前半（1950 年～1980 年）については文献とし

て残された多くの先人の業績を参考にさせて頂いた。上述の VTR 技術の系統化調査でも、一部ではあるがテープ技術に関するテープメーカ各社の資料が掲載されている。これらも参考にしつつ、60 余年にわたる磁気テープ技術進歩の全体像をまとめることを目的とした。

富士フィルムは 1950 年代に磁気テープ開発に着手し、民生用、放送用、コンピュータ用のほぼすべての分野で製品を開発し現在に至っており、筆者も多くの技術に関わってきた。当時の開発現場の実態やその時々の個人としての思いなど、参考になると思われる点はエピソードの形でいくつか取り挙げた。なお、代表的なテープメーカであるソニー、TDK、マクセルの技術や製品についても文献や情報をもとに客観的な整理を行ったが、ノウハウや開発の実態などに踏み込むことには限界があり、不十分な点があるかもしれないことをご容赦願いたい。

一見して連続的な進歩を遂げたように見える磁気テープにも、いくつかの革新的な技術の出現がそのベースにあった。本調査報告では 4 つの技術を変革技術として取り上げた（第 4 章）。磁気テープシステムの技術はその黎明期において欧米が、そしてその発展期において日本の企業が大きな役割を果たした。特にメディア技術は日本企業の独壇場であった。技術や産業の特徴からその理由についても考察を試みた（第 5 章）。最後に、磁気テープが社会に果たした過去の貢献、現在の役割、将来の展望につき述べた（第 6 章）。

参考・引用文献

- [1] 平成 27 年版情報通信白書（総務省）より
<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h27/html/na000000.html>
（閲覧 2019-10-01）
- [2] 国立科学博物館 技術の系統化調査報告 [VTR 技術開発資料集] ①②③、2001

2 | システム製品からみた磁気テープの変遷

2.1 情報記録の歴史

記録の意味を辞書で調べると次のようなものがある。

「記録」の定義

- ・後々にまで残す必要のある事柄を書きしるしたり、映像や録音で残したりすること
また、その書きしるしたり、録音・録画したりしたもの（小学館 精選版日本国語大辞典）
- ・情報を記号や形象として何らかの物質に固定する行為、もしくはその行為による産物（丸善出版 図書館情報学辞典）

最初の意味は一般には理解しやすく多くの辞書で同様な表現がなされているが、筆者のような技術者にとっては2番目の定義がもっともしっくりする。これらを合わせると、「事柄（情報）を将来に残すために、それを何らかの形で物質（材料）に固定すること、または固定したもの」が記録の意味となる。

古代より人類は様々な方法で情報を伝え残してきた。今も世界各地の洞窟に残されている壁画は画像情報であり、文明が進み文字が発明されるとテキスト情報として粘土板、羊皮紙、パピルス、木簡などを経て紙に記録されるようになった。当初これらは人間の意志や感情の表現、人間同士の当座のコミュニケーションの手段として用いられたと考えられるが、次第に時間を越えた伝達の役割をもつようになり、後世に残すことを意図するものになっていった。長い間、記録を行う材料は紙がその主役を担い、印刷の発明により大量に複製することが可能になり情報を拡散することもできるようになった。

情報記録に新たな展開を生んだのは19世紀に発明された感光材料を用いた写真であろう。当初は肖像などの静止画であったが、連続するフィルムを用いることで映像（動画）の記録にも活用されるようになった。1894年の米国のエジソン（T.Edison）が最初の映写機キネトスコープ（Kinetoscope）を発明、現在のスクリーン投影方式は1895年のフランスのリュミエール（Lumière）兄弟によるシネマトグラフ（cinématographe）が最初であった。NHKの番組「

映像の世紀」によると、現存するもっとも古い映像フィルムは1895年にパリの工場の様子を写したものとされている。写真はハロゲン化銀を感光させることで像を形成するが、その名の通り真の姿をそのまま書き写すという点において、紙に描く絵や文字と同じく情報を直接記録する方式と言える。

1877年にエジソンは、真鍮の円筒に巻き付けた錫箔に音の空気振動の波形を針で記録するフォノグラフ（Phonograph）を発明した。1887年にはドイツのベルリナー（E.Berliner）が円盤式のグラモフォン（Gramophone）を発明、これが蓄音器やその後のアナログレコードの原型となった。これらは音声の空気振動を溝という材料の形状変化に置き換える変換記録である。

1888年には音声を電気信号に変換し、さらに電磁気作用を用い材料に磁化という物理的変化を生じさせて記録する磁気記録が発明された。その後誕生する光ディスク、フラッシュメモリも信号を屈折率（反射率）、電荷量といった材料の変化に変換して記録するものである。このように材料に物理的変化を残すことが「物質に固定する行為」すなわち記録となる。

記録のための材料と方式は、書き込みと読み出しが容易にできること、環境や経時の影響で変化しにくいことが実用面での必須条件であり、消去と書き換えができること、書き込みと読み出しが速いこと、複製が容易にできることが汎用面での十分条件となる。

1950年代から実用化された磁気記録は、光ディスクやフラッシュメモリが普及するまでのほぼ半世紀の間、これらの条件を満たす唯一の実用的な方式であり、20世紀の後半の産業、社会、文化の発展に大きく貢献したと言える。

2.2 磁気テープの誕生

磁気による音声記録は1888年に米国のスミス（O. Smith）が針金に記録したのが最初とされる。1898年にデンマークのプーlsen（V.Poulsen）が図2.1の磁気録音式ワイヤーレコーダ（Telegraphone）を完成させ、1900年のパリ万博で発表したことにより世界に広く知られるようになった。記録に用いた材料は真鍮製のドラムに螺旋状に巻かれた直径約1mmのピアノ鋼線で、ドラムを回転させながらこの鋼線を磁気

ヘッドで磁化した。鋼線の走行速度は2 m/sで録音時間は50秒であったとのことである。テレグラフォンという名が示す通り当初の目的は電話の音声の録音であった。

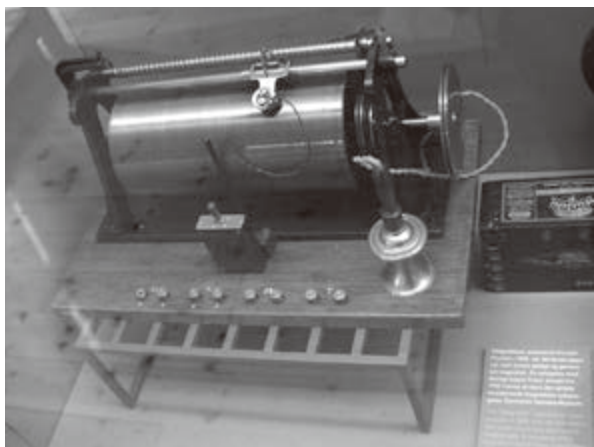


図 2.1 テレグラフォン^[1]

1928年にドイツのフロイメル (F.Pfleumer) はテープ状の紙やプラスチックの上に酸化鉄の磁性塗料を塗布したメディアを發明し、テープレコーダと磁気テープの原型を完成させた。

1933年にドイツの電気メーカ AEG (Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft) の技術者シューラー (E. Schüller) がリング型磁気ヘッドを發明、またドイツの化学メーカのバspf (BASF) は磁気テープ用にアセテート樹脂のベースフィルムを開発した。これらの成果をもとに図 2.2 のマグネトフォン (Magnetophone) が1935年に AEG によって世に出された。1940年にドイツのヴィーベル (W.Weber) が交流バイアス記録を發明し音質が飛躍的に向上した。



図 2.2 マグネトフォン^[2]

このように磁気記録、磁気テープは第二次世界大戦までの間にドイツで進化を続けた。戦時中はヒットラーの演説、フルトヴェングラー指揮ベルリンフィルの演奏のラジオ放送などに活用されたとのことであ

る。大戦後にドイツにおける磁気テープの技術は米国に渡り、スリーエム (3M : Minnesota Mining and Manufacturing Company) を中心とした米国企業で進展することになった。日本では、1934年に東北帝大 (現東北大学) が磁気記録の研究に着手、現在に至るまでの同分野を学術面でリードしてきた。東北帝大の永井健三は1938年に交流バイアスを發明したが、これはヴィーベルの發明より先で1940年に日本特許が成立している。

一方、音声の約100倍以上の周波数帯域の信号を記録する必要がある映像記録の研究も始まり、1951年に歌手のビングクロスビーの研究所 (Bing Crosby Enterprise) が白黒画面の録画再生に成功した。さらに1953年には同研究所と RCA (Radio Corporation of America) がカラー画像の録画再生に成功している。米国本土は3時間の時差がある。三大テレビ放送局にとって放映時差が問題であり、映像記録のニーズが高かったことが急速に開発が進んだ理由とされている。

2.3 アナログ音声記録はオープンリールからカセットへ

2.3.1 初期のテープは裸のオープンリール

米国でのアナログ音声記録用の磁気テープの本格的開発は1944年に3Mで始まった。3Mは独自に酸化鉄を開発し1948年に「Scotch 111」テープを発売、19 cm/sのテープ速度で人間の可聴域上限の15 kHzの音声記録を早くも実現していた。レコーダは同じく米国のアンペックス (AMPEX) が製品化した。

日本では東京通信工業 (現ソニー) がもっとも早く1949年に磁気テープとレコーダの開発に着手し、1950年に図 2.3 の最初の国産品である G 型テープレコーダ (国立科学博物館 未来技術遺産 登録 No.00152) を発売した。同レコーダは重量35kg、価格16万円で主に公的機関で用いられた。テープは酸



図 2.3 ソニー G 型テープレコーダとテープ^{[3][4]}

化鉄を紙ベースに塗布したものであった。1951年に東京電気化学工業（現 TDK）、1953年に日本コロムビア、1954年に富士写真フイルムと国内企業が次々と磁気テープ開発に着手した。

当時のテープレコーダは図 2.4 に示す機構で、リールに巻かれたテープを他方のリールに巻き取りながら記録再生する「オープンリール」と称され方式であった。オープンリールは、主に業務用として放送局の番組制作、レコード制作のマスターテープなどに用いられた。テープ幅は 1/4 インチから 2 インチ、トラック数は 1 から 24、テープ速度は 9.5 cm/s から 76 cm/s と様々の仕様のものがあった。この中で幅 1/4 インチで 2 トラック、4 トラックの仕様は、1960 年代からカセットテープに取って替わられる 1970 年代にかけて一般家庭にも普及した。

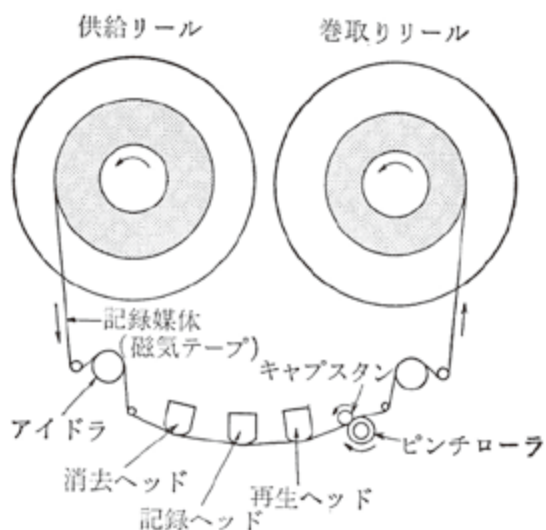


図 2.4 オープンリール方式^[5]

これら初期の磁気テープに用いられた磁性体は、マグヘマイト ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, γ 酸化鉄) やマグネタイト (Fe_3O_4) などの酸化鉄であった。オープンリール方式の音声用磁気テープは 1953 年の東京通信工業、東京電気化学工業の発売を皮切りに日本のテープメーカー各社から発売されるも、先行する 3M の「Scotch」テープが世界における磁気テープの代名詞となり事実上の標準テープであった。

1960 年代までの磁気テープは放送局など業務用であったため、テープの使用面積、レコーダの仕様などコスト面の制約が少なかった。そのためシステムとしての記録密度は着実に向上するも磁性体は一貫して酸化鉄系を用いており、1970 年代以降に比べると磁気テープのメディア技術が大きく進化したとは言えない。

2.3.2 完成された規格 コンパクトカセット

カセットとはフランス語で小さな小箱を意味する。磁気テープの一般家庭用への普及はコンパクトカセット（通称カセットテープ）の出現による。放送用、業務用のオープンリールテープは一般にも用いられていたが、取扱いが面倒で一部の音楽マニアに限定されていた。コンパクトカセットはオランダの電機メーカーであるフィリップス (Philips) が開発、提案した規格で 1962 年にテープとレコーダが発売された。

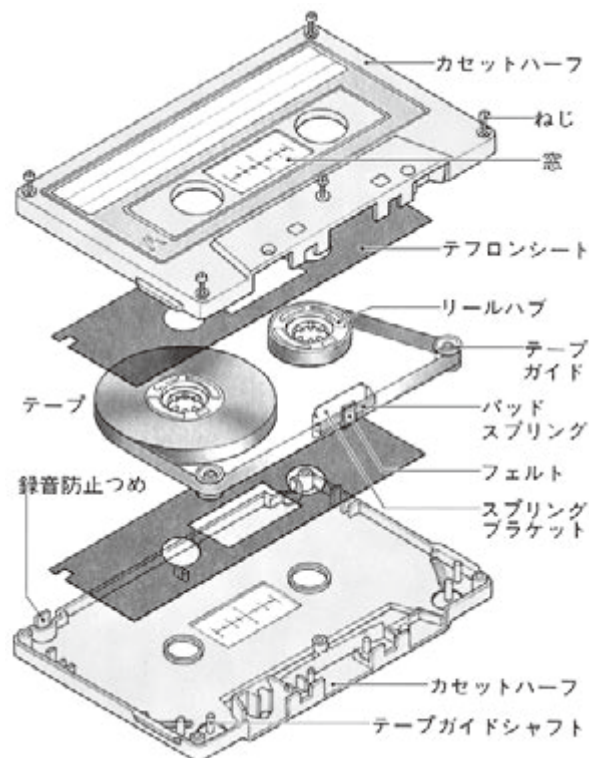


図 2.5 コンパクトカセットの構造^[6]

コンパクトカセットは図 2.5 に示す構造で小型で取扱いが簡単であった。互換性の順守と品質の維持を条件に、1965 年に基本特許を Philips が無償公開したことにより急速に普及した。日本では 1966 年に日立マクセル、東京電気化学工業、ソニーが、1968 年には富士写真フイルムがカセットテープを相次いで発売した。

小型のコンパクトカセットはテープ幅 3.81 mm、テープ速度 4.75 cm/s であり、テープ幅 1/4 インチ (6.35 mm)、テープ速度が通常 19~38 cm/s のオープンリールに比べ信号を記録するテープ面積が狭く音質が劣っていた。そのため本格的な音楽用としては満足のいくものではなく、最初は会話録音、語学学習、BGM 用といった限定的な使われ方であった。しかし、日本のテープメーカーがこのカセットテープを技術、市場の両面において大きく躍進させることになった。

(1) カセットテープは技術進化の舞台

詳細は第3章で述べるが、テープの性能を高める磁性材料の基本的な設計として以下の3つがある。

磁性材料の特性向上 3原則

- ①磁化を強くする
→ 記録した磁化が反転し減衰しないようテープの抗磁力(Hc)を高める
- ②磁化を大きくする
→ 出力を高めるためテープの磁化量(Ms)を大きくする
- ③磁化を細かくする
→ ノイズを下げるため磁性体を微粒子にする

音声のアナログ記録において、波長が短い高音特性の改善には①、波長が長い低音特性の改善には②、SN比(信号/ノイズ)の改善には③が効果的である。

1968年に東京電気化学工業は、微粒子の γ 酸化鉄を用いた高性能の「SD」カセットを発売しカセットテープの音楽用途拡大への口火を切った。その後、図2.6のソニーの「HF」、日立マクセルの「UD」など、カセットテープの時代を代表する音楽用テープの発売が相次いだ。これらはHiFi(High Fidelity)テープと呼ばれ、カセットテープの市場は活況を呈するようになった。1973年にTDKは磁性体にMsが大きいマグネタイトを用いた低音特性に優れた「ED」を発売した。

レコーダでは1969年に音声ノイズを低減させるドルビー方式が一般向けに実用化されたことも、カセットテープの音楽用としての普及を加速させた。



図2.6 1970年代の代表的な音楽用カセットテープ^[7]

1970年代にFMラジオ放送が本格化、ステレオで高音質の放送を録音するエアチェックのニーズが生まれた。さらにテープレコーダとラジオを一体化した通称ラジカセの普及と相まってカセットテープの需要は

急速に伸び始めた。ソニーから1973年に野外録音に適した携帯型レコーダ「カセットデンスケ」が発売されナマ録ブームを起こした。

1970年にドイツのBASFは、米国デュポン(DuPont)が開発した高いHcの二酸化クロム(CrO_2)磁性体を用いたカセットテープ「Chromdioxid」を発売した。信号の波長が短いと記録された磁化が互いに反発し反転しやすくなるため、それを防ぐ力であるHcが高い方が高音特性に優れる。Hcが高いと記録もしにくくなるため、記録電流を決めるバイアス、周波数特性を最適化するイコライザーなどレコーダの条件を変える必要がある。そのためHcの低い従来の γ 酸化鉄を用いたテープのポジションTYPE I(通称ノーマルポジション)に対しTYPE II(通称クロムポジション、後のハイポジション)が新たに加わった。1971年にソニー、日立マクセル、1972年にはTDK、富士写真フイルムと国産のテープメーカー各社からも二酸化クロムテープが相次いで発売された。

ソニーは1973年に上層に二酸化クロム、下層に γ 酸化鉄の二層構造とし高音、低音特性ともに優れる重層テープ「DuaD」を発売しTYPE III(通称フェリクロムポジション)を新たに規格化した。3M、BASFの海外メーカーも同様の重層テープを発売した。また富士写真フイルム、日本コロムビアはHcの異なる酸化鉄を重層にしたテープを発売した。波長の短い高音信号は磁性層の浅い部分に、波長の長い低音信号は磁性層の深い部分にまで記録されるという磁気記録の原理を巧みに利用した点で、音声記録において重層テープは理にかなった設計であった。実際の音もダイナミックであり「重層テープは高音質」というイメージが確立した。

TDKは γ 酸化鉄にCoを被着し二酸化クロム同等にまでHcを高めることに成功、この磁性体を用いたTYPE IIのカセットテープ「SA」を1975年に発売した。日立マクセルも同時期にCoの被着に成功、まず少量被着することでHcを少し高め音質を向上させたTYPE Iの「UD-XL」を1974年に発売、1976年にはTYPE IIの「UD-XL II」を発売した。「SA」と「UD-XL II」はTYPE IIを代表する製品となり、次第に欧米発祥の二酸化クロムテープを駆逐するようになった。

1978年に米国3M社からメタル磁性体を用いたカセットテープ「METAFINE」が発売された。メタル磁性体はFe、Niの合金で化学構造に酸素を含む酸化鉄よりMs、Hcとも約2倍と大きく、高音、低音特性ともに優れる理想的な磁性材料と言われていた。3Mに遅れること半年の1979年には日本メーカー各社もこれに続き、TYPE IV(メタルポジション)とし

て高音質を求めるユーザのニーズに応えた。

Hcが高いメタル磁性体に含まれる金属成分を変更しHcを下げることで、TYPE IIでも使えるメタルテープ（通称低Hcメタル）も一部のメーカーから発売され、TYPE IIの弱点と言われた低音特性にも優れるテープが誕生した。

このようにカセットテープでは基本的な性能向上と並行して、個人の嗜好にも応える製品ラインアップ展開が次々と行われるようになった。1970年代のカセットテープの市場シェアはソニー、TDK、日立マクセルがトップグループを形成、3M（プロダクトブランド名Scotch）、日本コロムビア（同DENON）、富士写真フイルムがこれに続いた。隆盛期を迎える1980年代に入ると、コニカ（現コニカミノルタ）がAMPEXと合併でmagnax、太陽誘電がThat'sのプロダクトブランド名でカセットテープ市場に参入し競争が激化した。

1980年代に入り、カセットテープは高音質訴求とイメージ戦略の二つの方向に向かう新たな時代に突入していった。屋内のオーディオシステムのコンポーネントとしてカセットデッキ（レコーダ）が浸透、音源のCD化もありカセットテープにより高音質が求められるようになった。一方でソニーのウォークマンの爆発的ヒットやカーステレオの普及などカセットテープの屋外での使用が急増、ライフスタイルの変化に伴いファッションの一部となり若いユーザ層を取り込む必要があった。

高音質化の路線では、1981年に発売されたソニーの「UCX-S」が角型比0.93と極めて高い性能のカセットテープを発売した。角型比とは磁性体が記録する方向に如何に配列しているかを示す特性で、0.93とは磁化量の93%が記録再生に有効であることを示している（従来のテープの角型比は0.80~0.90）。同じくソニーは1987年にHcの異なるメタル磁性体を重層構成とした「Metal Master」を発売、音質ではカセットテープの最高峰とも言える商品であった。1993年にはより上級の「Super Metal Master」を発売している。

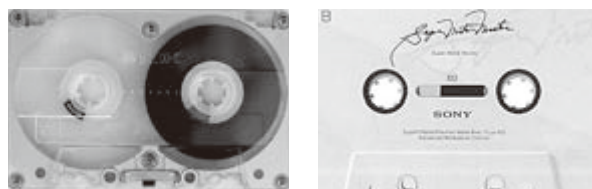
1991年に富士写真フイルムは独自の同時重層塗布技術を用いた重層テープ「PS-Ix」（TYPE I）、「PS-IIx」（TYPE II）を発売、低価格ラインアップの高音質化を実現した。

高音質化はテープの改良だけでなく、ハーフ（カセットは2枚の成型品を貼り合わせて作成するのでハーフと呼ばれた）の側面からも進んだ。ハーフ内の部材との摩擦によるテープの振動や走行ムラは変調ノイズとなり音質を劣化させるため、ハーフの設計はテープ同様に重要である。

ハーフの樹脂は一般には安価で加工しやすいポリス

チレンが使用されていたが、一体成型のためテープが接触するガイドピンも同じ材質であった。TDKは1979年発売の図2.7の最上級メタルテープ「MA-R」のハーフの内部構造に亜鉛ダイキャストフレームを採用した。ハーフ全体の剛性を高めることで振動を抑制し、ガイドピンを金属とすることで摩擦を低減し走行を安定化したとしている。当時の普及価格帯のC60の定価400円程度に対し「MA-R」は2000円と高価であったが、フラッグシップモデルとしてマニアの人気を博した。

ソニーはガイドピンをハーフ本体から独立した部品としセラミックコンポジット樹脂を用いることで、ガイドの高精度と低摩擦を実現し走行を安定化させたとしている。図2.7の「Metal Master」ではハーフ全体にセラミックを採用、ハーフを重くし剛性を高めることで振動を防ぎ音質に影響するテープ走行安定性を改良させたとしている。



TDK MA-R

ソニー Metal Master

図2.7 高性能ハーフを用いた高級カセットテープ^[8]

またカセットテープを屋外に持ち出すことが多くなり、使用環境を想定した商品企画もなされた。富士写真フイルムは1983年にカーステレオ用として「GTシリーズ」を発売した。米国のアリゾナ砂漠での実験では、真夏の自動車のダッシュボード上は104℃にまで温度が上昇することが分かった。小田原にある同社の磁気テープ工場の建物の屋上に日産スカイラインを置き調査したところ、日本でも夏場は90℃にまで容易に温度が上昇し、従来のカセットテープではテープやハーフが変形した。「GTシリーズ」の耐熱保証温度は110℃で、ハーフは耐熱性を高めたABS（アクリルニトリル-ブタジエン-スチレン共重合）樹脂を採用した。記録層に用いる結合剤は高温でも軟化しにくいグラフトポリマーを、ベースフイルムも高温で寸法変化しにくい材料を用いるなどの技術で耐熱性を向上させた。

カセットテープの長さは両面で60分録音できるC-60および当時のLPレコードが両面で録音できるC-45（またはC-46）、片面で録音できるC-90の3つが標準であったが、その後用途に合わせて様々な長さのテープが登場した。

カセットテープはミニディスク (MD) や CD-R などの光ディスク、さらにはフラッシュメモリに主役の座を譲るまで、20 世紀のスタンダードな音楽用記録メディアとして全世界に普及した。

カセットテープというひとつのフォーマットの歴史の中に、磁気テープの技術の進歩が集約されていると言ってもよい。磁性体では γ 酸化鉄に始まり、マグネタイト、二酸化クロム、Co 被着酸化鉄、メタル磁性体と 1970 年代の 10 年間で磁気テープの歴史における主要な磁性材料がほとんどすべて登場した。1984 年には松下電器が従来の酸化鉄磁性層の上に薄いコバルト (Co) 蒸着膜を設け優れた高音特性を実現した「オングローム」を発売している。

Co 被着酸化鉄の技術はその後の家庭用ビデオテープの躍進を支え、メタル磁性体の技術は放送用ビデオテープの発展へと繋がって行った。また磁性層の重層構成も一部のビデオテープで採用され、コンピュータ用テープでは磁性層と非磁性層の重層構成が標準となった。「オングローム」は音声テープではニッチな存在であったが、Co 蒸着の技術は 1990 年代に入り映像記録において Hi8 テープ、DVC テープを誕生させた。このようにカセットテープの 1970 年から 1980 年代にかけての十数年は、磁気テープのメディア技術が大きく進歩した時期と言ってよい。

カセットテープで多様な技術が生まれたひとつの理由は、一般ユーザー向けの民生用であったからである。放送用などの業務用は僅かな失敗も許されない世界であり、新たなシステムの導入、新たな技術の採用には慎重になる傾向がある。民生用は逆にユーザーが真新しいものへ飛びつく傾向があり、開発側も技術にチャレンジしやすい分野である。このことは映像用のビデオテープでも同じであり、民生用として開発したシステム、技術が実績を積んで業務用に展開されることが多い。

カセットテープの成功は、Philips の提案した規格が結果的に一般向けの音楽用として品質と利便性の両立の面で最適であったこと、初期の段階で特許を無償で公開することで標準化が進んだことによる。当初は本格的な音楽用を想定したものではなかったが、フォーマットの利便性が認知されれば、音楽用にまで高性能化するニーズが生まれたのは必然であった。その要求に応えるよう高密度化の技術開発が加速した時代であり、ウォークマンなど携帯用途 (今でいうモバイル用途) の新たな市場の創出を含め日本の企業がその主役であったと言えよう。

(2) カセットテープのイメージ戦略

業務用の磁気テープは品質が最優先されるが、民生用テープの売れ行きは品質以外の要素が大きく影響した。特に音楽用のカセットテープは映像用のビデオテープに比べ嗜好性の強い商品であった。映画、ドラマなどの映像では人は画質の良し悪しより筋書きなどより論理的なものに意識が向くが、音楽はメロディーや演奏の音そのものをより感覚的に捉えることに意識が向く。そこに人それぞれの多様な好みが生まれる。また、デジタル音声の記録再生ではメディアに大きな問題がない限り音質はハードの特性でほぼ決まってしまうのに対し、アナログ音声ではテープによっても音質が大きく変わることも多様な好みを満足させるものであった。このことはテープを開発する側にも当てはまるものであった。一部ではあるが今でもアナログの LP レコードやカセットテープを再評価する人たちが常に存在するのは、音声に対する感性の多様性によるものである。一方で映像のレーザーディスクやビデオテープを再評価する声を聞くことはあまりない。

また、当時は映像は室内で見ることがほとんどでユーザーも幅広い年齢に渡っていたのに対し、1980 年代に入ると音楽は屋外でも多く聴かれるようになりユーザーも若い世代が中心になった。そのためテープメーカー各社はカセットテープの基本的な音質の向上と嗜好に応じた「音づくり」とともに「デザインづくり」を進め、それが商品の人気を決める大きな要素になっていった。

図 2.8 にカセットのデザインの例を示した。1983 年発売のソニー「HF-S」、TDK「AD-S」では、各々のベストセラー商品に全面透明なクリスタルハーフが採用された。テープの回転による音楽再生を視覚的に捉えられるようになり、各社も同様な製品を発売するようになった。ティアック (TEAC) とトーレンス (THORENS) は金属リールにテープを巻いたカセットテープを発売した。ティアックはオープンリールデッキ、トーレンスはレコードプレーヤのターンテーブルのトップメーカーであり、回転するリールで視覚的にオープンリールを彷彿させるデザインは一部で人気を博したが、リール径の制約により録音時間が短いという欠点もあった。最上級のメタルテープのカセットにソニーはセラミックハーフ、TDK は金属ダイキャストハーフを採用したことは上述したが、音質の改善を目的とする一方で図 2.7 のように重厚感、高級感といったデザインの訴求を意図したのもでもあった。

富士写真フイルムは、カセットテープを保護するプラスチックケースを薄型化した図 2.9 に示すスリム



図 2.8 様々なカセットデザイン [8] [9]

ケースを製品に導入した。これはカセット本体とケースの間の無駄な空間を無くすように構造上の工夫を行うことで、従来のプラスチックケースの厚みを約 3/4



図 2.9 ケースのスリム化 (右:従来型、左:スリム型)

に薄くしたものである。スリムなデザインは瞬く間に市場に受け入れられ、他社もこれに追従するようになった。軽薄短小が言われた時代、単にデザイン面の訴求だけでなく保管の省スペース、ポケットに入る携帯性など機能面においても多くの長所があった。

エピソード 1 富士写真フィルムのカセットテープ AXIA ブランド戦略とスリムケース導入

筆者が富士写真フィルムに入社した 1980 年代初頭、最初に開発を担当したカセットテープの同社の市場シェアは数%にも満たなかった。ソニー、TDK、日立マクセルの国内 3 社が市場でトップシェアを争っていた。一方、ビデオテープではこれら国内 3 社と競争する高いシェアをもっていた。ビデオテープから同じ映像を扱う同社の 8mm フィルムを連想するためか定かではなかったが、「写真フィルムの会社のカセットテープから良い音のイメージが湧かない」、「デザインが洗練されていない」という市場の声も聞いていた。デビューしたのテクノポップの YMO をコマーシャルに起用するも、イメージアップには繋がらなかった。「同じ磁気テープなのにビデオテープは売れてカセットテープは売れない」と華やかなビデオテープ開発部門を横目で見ながら過ごしたものであった。このままでは事業撤退もあるとの憶測が出る中で事業部が大きな賭けに出た。カセットテープでは富士写真フィルムというコーポレートブランドを捨て、1985 年にアクシア (AXIA) という新しいプロダクトブランドを立ち上げたのである。これに合わせ音質を向上させ、デザインも一新し古いイメージを払拭させた新商品を開発、当時人気の斉藤由貴をコマーシャルに採用するなど広告も大々的に行った。営業、技術、宣伝が一体となった新たなブランド戦略により、5 年後には国内シェアでトップグループに躍り出ることができた。

カセットテープが苦戦していた頃、筆者は入社間もない 1982 年に当時の研究所長であった明石五郎に、カセットテープのイメージアップ戦略の活動を指示された。「カセットテープの明確な差別化とは何か。それは聴かないと、いや聴いても分からない音質の差ではなく、開けてみないと分からないカセットのデザインでもない。店頭での陳列棚で見るとすぐにわかる違いであり、それにはカセットを納めるケースを薄くする以外にない」。それまでのケースの構造にはカセットとの間には無駄な空間があった。「これを少なくすることでケースを薄くできないか。薄くすれば保管スペースも少なくなるし何より格好いい」これは筆者が入社当時にもっていたアイデアであった。薄いケースを手作りし研究所の何人かの人に見せると全員が「これは良い、絶対売れる」と好感も得ため、市場シェア挽回の切り札として事業部に採用を提言した。しかし、事業状況が思わしくない中で生産ラインへの投資が必要、またケースが割れやすいのではないかと、インデックスカードが入らないなどの粗探しもあり提言が受け入れられることはなかった。そこで発足したばかりの全社の商品企画提案制度を利用、丁度 AXIA ブランド戦略で事業部が攻めへの転換をはかった時期とも重なり採用がようやく実現した。このスリムケースの導入は AXIA ブランドのイメージアップを決定的なものにした。

2.3.3 重宝されたマイクロカセット

失敗だったエルカセット

マイクロカセットは1969年にオリンパスによって規格化され、各社よりレコーダ、テープが発売された。カセットテープをさらに小型化したものだが、テープ速度はコンパクトカセットの1/2と遅く音質で劣っていた。1978年には松下電器がCo蒸着層を設けたオングロームを発売するなど音楽用への普及も試みたが成功はしなかった。しかし、留守番電話録音、会議メモ録音などの用途ではICレコーダが登場するまで長く利用された。レコーダは2010年で生産中止となったがテープは今も発売されている。

エルカセットはオープンリールと同じ1/4インチ幅、テープ速度もコンパクトカセットの2倍で音質に優れるオープンリールをカセット化する発想から生まれた。1976年にソニー、松下電器、ティアックが規格を提唱し発売されたが、サイズが大きくコンパクトカセットの音質の進歩もあり3年後の1979年には早くも生産が終了し商品として短命に終わった。

マイクロカセット、エルカセットともにコンパクトカセットから派生した商品と言えるが、ともに大きな市場を形成することはできなかった。これはコンパクトカセットの基本仕様とその後の進歩が、顧客ニーズに如何にバランス良く対応していたかを逆に示すものでもある。図2.10にこれらカセットテープの外観を比較した。



図 2.10 オーディオカセットテープのサイズ比較

2.3.4 アイデイ商品の8トラックテープ

8トラックテープは主にカーステレオ用途を想定したもので1965年に米国のリアジェット (Lear Jet) から発売された。図2.11のように、1/4インチ幅のエンドレスのテープがカートリッジ内に収められ、テープ速度は9.5 cm/s、8トラックで2チャンネルのステレオ音声を4つ再生することができ基本的には再生専用であった。



図 2.11 8トラックテープ^[10]

当時の音声テープは大型のオープンリールが主流で発売して間もないカセットテープもまだ十分な音質ではなく、自動車で音楽を聴くニーズに適するものがなかった。そのためコンパクトなカートリッジに収められカセットテープの2倍の再生速度で音質も優れた8トラックテープは1970年代にカーステレオ用として普及した。エンドレスで繰り返し再生できる特徴は業務用の自動アナウンス用途としても使用された。1970年代後半からはカラオケ用としても広く使われるようになったが、コンパクトカセットの音質向上、さらにはレーザーディスク (LD)、コンパクトディスク (CD) の出現により衰退していった。

2.4 短命に終わったデジタルオーディオテープ

1980年代のコンパクトディスクの登場と普及は、記録メディアにおいてもデジタル化とディスク化という二つの潮流を生み出し、磁気テープの将来に大きな影響を与えることになった。それは記録に必要な容量の小さい音声用テープから始まりポストカセットテープの検討が始まった。デジタル化では1987年にDAT (Digital Audio Tape) が1992年にDCC (Digital Compact Cassette) が発売されたが、同じ1992年に発売されたミニディスク (MD) が急速に普及拡大したため、両者とも結局大きな市場を形成することができずシステムとしては短命に終わった。

一番の理由はアクセス性、編集性、携帯性などディスクの利便性にあった。またDATやDCCは高音質を訴求したがDATはコピー制約、DCCは高コストなどそれに伴う課題があったことも普及の妨げになった。なお、MDの普及は日本市場特有の現象であり、そのMDも2000年代に入るとデジタルオーディオプレイヤーに市場を奪われていった。

2.4.1 ニッチに終わった DAT

1980年代 CD により音声のデジタル化が進み、オーディオテープのデジタル化の検討を各社が進めた。1983年に規格統一のため DAT 懇談会が設置され、ビデオテープと同じ回転ヘッド方式の R-DAT、カセットテープと同じ固定ヘッド方式の S-DAT の2つの規格が提案された。多チャンネルの固定ヘッド方式の S-DAT は技術的に困難とされ、ビデオテープで実績のある回転ヘッド方式の R-DAT が 1987 年に商品化された。



図 2.12 DAT テープ^[11]

図 2.12 に DAT テープの外観を示したが、テープ幅はカセットテープとほぼ同じ幅 3.8 mm で、磁性体は 8 mm ビデオで使われたメタル磁性体を用いられた。このメタル磁性体の Hc は約 1500 Oe (エルステッド) で、カセットテープに用いられた約 1100 Oe のメタル磁性体より高く高密度記録に適するものであった。

しかし、DAT の標準サンプリング周波数 (時間方向の分解能) が 44.1 kHz、符号化ビット数 (振幅方向の分解能) が 16 bit と CD と同じで完全複製が可能であった。そのためレコード協会からの反発がありデジタル録音ができない、あるいは1世代のみデジタル録音が可能とするなど制約が付き普及の妨げとなった。また 1990 年代に入り MD さらには CD-R などの光ディスクが音声用として一般向けに普及したことで、早くも 1990 年代後半には DAT の市場は縮小に向かうことになった。

ただし、DAT は高音質であったため録音スタジオなど業務用ではその後も活用され、倍速化することでサンプリング周波数 96 kHz/24 bit のシステムも出現した。また一般用でもナマロク (生録音) の一部マニアには愛用された。

1991 年にはソニーから同じヘリカル方式で DAT をより小型化した図 2.13 に示すデジタルマイクロカセット「スクープマン」が発売された。蒸着テープを用いカセットの大きさは 3 cm の切手サイズで、位置決めトラッキング方式を取らず読み取り信号をメモリ上で構築するノントラッキング (NT) 方式を採用することで

超小型化を実現、NT カセットとも呼ばれた。その名が示す通り音質の良いボイスレコーダを意図するものであったが、IC レコーダの登場で活躍の場はあまりなかった。しかし、回転ヘッド方式でこのサイズを実現した技術は驚きであった。

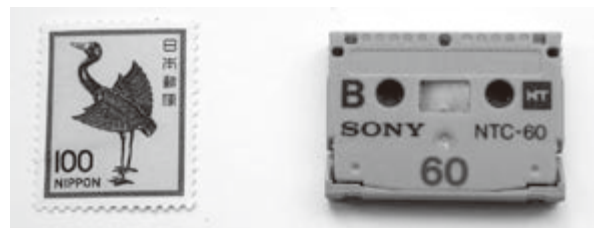


図 2.13 切手サイズのデジタルマイクロカセット

2.4.2 陽の目を見なかった DCC

DCC はオランダの Philips が提唱した固定ヘッド方式の規格であるが DAT 懇談会で提案された S-DAT とは異なる規格である。Philips、松下電器、日本マランツの3社が共同で開発し 1992 年に発売された。コンパクトカセットも再生可能な下位互換を取ることで、ユーザにとってはカセットテープ資産の継続利用、Philips にとっては自らが規格化したコンパクトカセットのフォーマット延命の狙いがあった。

テープ幅とテープ速度はコンパクトカセットと同じだが、デジタル信号 8トラックとコントロールトラックの計 9トラックの記録再生とアナログ信号 2トラックの再生のヘッドが必要であり専用の薄膜ヘッドを松下電器が開発した。テープはカセットテープの TYPE II 相当のものが用いられ、発売当初の製造メーカーである BASF は二酸化クロム磁性体を用いていた。

DCC はコンパクトカセットの再生互換を確保したこともあり、同じテープの競合であった DAT より価格と携帯性の面で劣っていた。また低品質のコンパクトカセットを再生した場合に DCC の記録再生にトラブルを起こすこともあった。MD より信号圧縮率が低く音質は優れるとの評価が多かったが、特に日本では利便性の高い MD が急速に普及したため 1997 年には松下電器も撤退しほとんど市場で見ることがなくなっていた。

2.5 一時代を築いたアナログ映像ビデオ

2.5.1 革新技術で実現した放送用ビデオ

1941年に白黒テレビの放送が開始された米国では、テレビ放映の時差対策から 1950年代に入り磁気テープによる映像記録の検討が活発化した。1951年に映像の録画に最初に成功したのは米国のビングク

ロスビー研究所とゼネラルエレクトリック（GE）であった。白黒画面で10チャンネルに分割した映像信号を、1/2インチ幅の磁気テープに2.54 m/sのテープ速度で10トラックに記録した。録画時間は12インチ（30 cm）径のリール巻きで16分の長さであった。1953年には同研究所とRCAがカラー映像の録画、再生にも成功、映像信号をRGB三色に分解し計6チャンネルで6.1 m/sのテープ速度で記録、録画時間は20インチ（50 cm）径のリール巻きのテープで15分であった。

音声信号の周波数が最大でも20 kHz程度であるのに対し、映像信号はMHzの周波数を持ち時間あたり音声の100倍以上の信号を記録する必要がある。そのため、1個のヘッドで記録しようとするると数十m/sの非現実的なテープ速度が必要となる。ヘッド数を増やすことでこれを補うも、録画時間は十数分にすぎず実用的ではなかった。

この問題を一気に解決したのが1956年にアンペックス（AMPEX）が発表した回転ヘッド方式のビデオテープレコーダ（VTR）であった。4つのヘッドを搭載したドラムを高速回転（14400 rpm）させることで、高周波数の映像信号の記録に必要なテープとの相対速度38 m/sを実現した。テープの送り速度を上げずに記録できるようになり、実用化に大きく前進し図2.14に示すVRX-1000が発売された。テープ幅は2インチでテープ速度は固定ヘッドより一桁遅くなり、12.5インチリールで1時間の番組を録画できるようになった。映像の1画面である1フレーム（2フィールド）の信号を32分割し、図2.15に示すように1フィールドの信号を高速回転する4つのヘッドでテープの幅方向の16トラックに記録するという斬新な方式であり、トランスバース回転4ヘッド方式とも呼ばれた。VRX-1000の出現によりそれまで検討されてきた固定ヘッド方式は瞬く間に陳腐化した。また映像信号を直接記録するのではなく低搬送波FM変調と呼ばれる

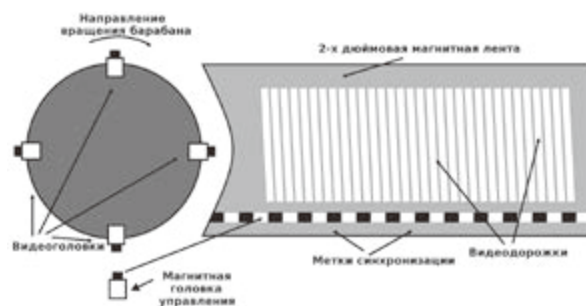


図 2.15 トランスバース回転4ヘッドの記録方式^[13]

方式をとっていた。信号をそのまま記録すると振幅の変動が直接映像の明暗に現れるが、振幅を周波数に変調することで振幅の変動が現われにくくなる効果があった。このFM変調記録はその後のアナログ映像記録の基本方式となった。1959年にはAMPEXとRCAが放送用カラーVTRを発売した。

このAMPEX方式のビデオテープレコーダ（VTR）は映像記録の当時唯一の選択肢となり、1956年に米国の放送局CBSが採用、日本でも1958年にNHK、TBSが導入した。

AMPEX方式は互換機の開発もあり多くの放送局で使用され、1964年の東京オリンピックでもNHKの標準機となった。またこの頃からテレビのカラー化が進み、カラー信号の品位を高めるため搬送波の周波数を上げるハイバンド化が行われた。これらの高性能化を経てAMPEX方式はその後も放送局で使われた。

使用されるテープはそれまでの音声用の酸化鉄の磁性体を使ったものであったが、映像信号を高速回転のヘッドで記録するためより高い耐久性が求められた。日本国内で放送用のビデオテープをいち早く開発し実用化したのが富士写真フイルムと東京電気化学工業（現TDK）であった。1959年に富士写真フイルムはNHKで初めての国産テープによる録画再生の実験を行い成功した。図2.16に示したこの時の2インチ幅テープの試作品は、「日本初のビデオ記録に成功したビデオテープ」として国立科学博物館の未来技術遺産



図 2.14 AMPEX VRX-1000^[12]



図 2.16 日本で初めてビデオテープ記録に成功した2インチテープ

エピソード2 富士写真フィルムの磁気テープ研究の始まり

日本の磁気テープ研究は1949年に東京通信工業（現ソニー）、1951年に東京電気化学工業（現TDK）が開始、筆者が在籍した富士写真フィルムも1952年に映像の磁気記録や電子写真（ゼロックスコピー）の研究開始を決定した。その背景には、同社の主力事業である銀塩を用いた写真フィルムや映画フィルムなど画像や映像を記録する手段が将来これらに代替される危惧があったからである。磁気テープは音声用から始まるが同社の目標は最初から映像用にあった。これらは銀を使う写真による記録に対し同社では非銀塩記録と言われた。最初の試験塗布機はNSM-1号機と命名されたが、代々の塗布機に受け継がれたこの名称はNon Silver Machineの略であった。

磁気記録の研究は1954年に入社した明石五郎が担当した。当時、開発で先行するソニーが磁気テープを既に発売していたが、同社にとっては材料や設備の準備の全くのゼロからのスタートであった。明石の下で研究に従事した藤山正昭によると、酸化鉄の作成から始め、乳鉢で磁性液を作成し、筆でフィルムに塗布し、ハサミでテープ状に切って評価したとのことである。高压の圧延処理（後述のカレンダ処理）の効果を確かめる方法がなかったため、近くの私鉄の許可を得て線路上に磁気テープを置いて電車で轆かせた、などの逸話が今も残っている。1958年には通商産業省から助成金を得て、小田原に磁性体の合成から始まる磁気テープ生産のパイロットプラントが完成した。ベースフィルムも写真フィルムで使われたTACを自社で調達することができた。1959年にNHKで国産テープで初めて映像の記録再生に成功したが、これに使用した当時のNHKのビデオレコーダの価格は助成金の数倍と高価なものであった。自社で事前確認をすることもできず、テスト当日NHKのレコーダを壊してしまうことを心配しながら固唾をのんでテストを見守ったとのことである。再生映像が映ったときの感激は話を聞いただけの筆者にとっても想像に難しくなく、技術者にとっての正に醍醐味を味わえた瞬間であったであろう。

として登録されている（登録No.00058）。

その後実用化に向けた開発が進んだが、当時の映像用テープは音声用テープ同様に3M製が事実上の標準テープであり、重要な品質であるドロップアウトは3M製に比べかなり多いのが実態であった。この原因を一つ一つ確認し改善していくことで3M同等以上の性能を達成し、1963年に富士写真フィルムはNHKに最初の製品納入を行った。1967年にはハイバンド化に対応したカラー放送用テープ「H700」を発売、同社の放送用テープのシェアは一時70%以上にも達した。これらの開発を通し、PETベースへの切り替え、接着層、バックコート層の導入、硬化系樹脂や脂肪酸エステル系潤滑剤の採用など、その後の多くの磁気テープに用いられた重要な技術が生み出された。東京電気化学工業も同時期に同様な開発を行い放送用ビデオテープの実用化に成功、同じ1963年にNHKに製品納入している。

2.5.2 日本主導のヘリカル方式ビデオ

AMPEX方式は1フレーム信号を分割して4つのヘッドで記録再生するため、ヘッドの特性差が画面に

現われやすい、信号を合成する複雑な電子回路と高いヘッド取り付け精度が必要などの問題があった。

これに対し、ヘッドを斜めに走査し1フィールドの信号を一本のトラックに記録できるヘリカル方式

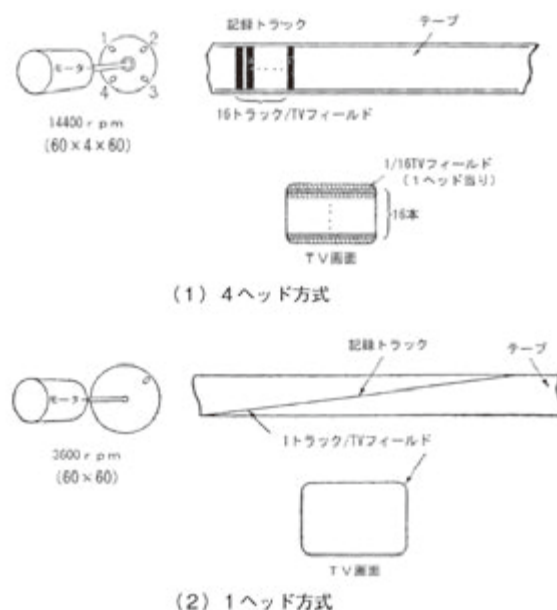


図 2.17 AMPEX方式(上図)とヘリカル方式(下図)^[14]

式が開発された。基本発明はRCAのマスターソン(E.Masterson)によるもので、AMPEXが2インチ幅テープに2ヘッドでヘリカル方式で記録する試作機を1956年に発表した。日本でも早くから研究を行った東芝が1959年に1ヘッド方式を開発、日本ビクターは1960年に2ヘッド方式の試作品を完成させた。AMPEX方式とヘリカル方式の比較を図2.17に示した。その後ソニー、松下電器も独自にヘリカル方式の開発を進め、システムの小型化の流れの中でヘリカル方式の技術は日本の電気メーカの中で進化していった。

AMPEX方式がすでに多くの放送局に導入されていたため、ヘリカル方式はすぐには普及せず機内での映画上映、教育現場での活用など業務用に限定されていた。一方で家庭用ビデオテープを視野に入れ、各社が個々に進めていたヘリカル方式の規格統一を目指す作業部会が日本電子機械工業会(EIAJ)で発足し1969年に規格を合意した。これは1/2インチ幅で統一I型ビデオテープとして発売もされたが、オープンリール方式であったこともあり普及しなかった。しかし、日本ビクターのカラー信号の低域変換の技術が採用され、松下電器からはアジマス記録の提案もありその後の家庭用VTRに繋がる技術が誕生した。統一I型のテープは従来のHc 300 Oeの酸化鉄を用いソニーと富士写真フィルムが最初に開発した。富士写真フィルムで開発を行った藤山正昭によると、ヘリカル方式の2ヘッドでは円筒ドラムのほぼ半周(1ヘッドでは1周)にテープを巻き付けて走行させるためテープに強い力が加わる、静止画のスチル再生では12 m/sの高速でヘッドが擦るなどテープにとっては過酷な条件であり耐久性の課題が多かったが、これらを解決することでテープ技術も大きく進歩したとのことである。

統一I型テープでの経験を踏まえ、普及にはテープのカートリッジ(カセット)化が必要との考えから、1971年にソニーが提唱し、松下電器、日本ビクターが参画した図2.18に示すカセット式の3/4インチ幅のU規格(Uマチック)ビデオテープが商品化された。



図 2.18 ソニーUマチック VTRとテープ^[15]

磁性体はそれまでの酸化鉄に対し約2倍のHc 550 Oeで既にかセットテープで実用化されていた二酸化クロ

ムが最初是用いられた。高価であったこともありUマチックも家庭用としては時期尚早であった。しかし、放送局では取材業務の効率化のため現象が必要なフィルムから電子媒体へ代替するENG(Electronic News Gathering)への動きが当時あり、小型で高性能なUマチックは放送用として注目されニュース番組用として次第に使われるようになった。

テープの狭幅化、カセット化など小型化の実現の背景には、二酸化クロム、Co被着酸化鉄など高いHcの磁性体の使用によるテープの高性能化がある。より短波長の信号が記録できることでテープと回転ヘッドの相対速度を遅くすることが可能になり、それにより回転ドラムの径、システムサイズを小さくすることができた。相対速度はAMPEX方式の38 m/sに対しU規格は10 m/sと低速であった。このようなテープ仕様の大きな変更は再生互換の点で従来のAMPEX方式ではできなかったため、放送用もその後ヘリカル方式へ転換していくことになった。

一方、従来のオープンリール型の放送用も1インチヘリカル方式の4タイプの規格が米国映画テレビ技術者協会(SMPTE:Society of Motion Picture and Television Engineers)で承認された。その中でソニーとAMPEXのCタイプが普及、1976年にソニー



図 2.19 放送局の1インチVTR^[16]



図 2.20 1インチ放送用ビデオテープ

がVTRを発売し図2.19に示すように多くの放送局に導入された。図2.20は1インチテープで磁性体はHc 500 OeのCo被着酸化鉄を用いていた。

取材用として3/4インチ幅のU規格VTRが普及したが、取材の機動性を高めるためカメラとVTRを一体化したタイプ（カムコーダ）が1/2インチ幅で開発された。1981年に松下電器からM規格（通称Mビジョン）、1982年にソニーからβカムが発売された。これらは同時期に開発が進んだ家庭用のVHSおよびβマックスの仕様を各々ベースにしているが、放送用の画質を得るため6倍速で記録、またカラー信号もUマチックの低域変換のコンポジット方式ではなく、輝度信号と分離し記録する高画質なコンポーネント方式を採用していた。

さらに1984年にはHc 1600 Oe程度のメタルテープを用いてより高解像化した松下電器のMII、続いてソニーのβカムSPが発売された。図2.21のようにβカムSPでは長時間録画のラージ（L）カセットも導入された。これにより、家庭用のVHSとβの覇権争いが放送用にも持ち込まれることになった。

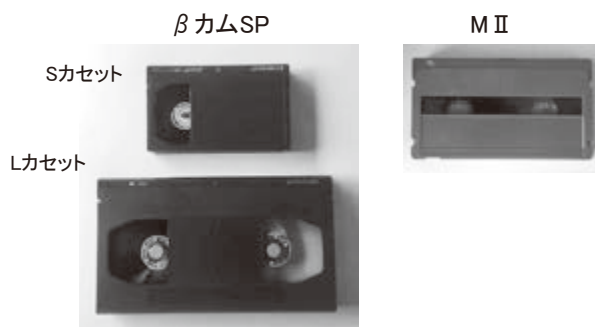


図 2.21 放送用アナログビデオテープ

MIIは1988年のソウル五輪の公式ビデオシステムとなり主にNHKで使用された。しかし、βカムが既に世界に広まっていたこと、MII規格に下位互換がなかったのに対しβカムSPはβカムと互換を維持したこともあり、家庭用とは逆にソニーのβカムが優勢で世界の放送局の事実上の標準システムとなった。Uマチック、1インチCフォーマット、βカムと放送用VTRはソニーの規格が主流を占めるようになった。

これらに使用される磁気テープの技術はVHSテープやメタル磁性体を用いた8mmビデオテープなど家庭用テープと共通する部分も多いが、テープ速度が数倍早く放送用は品質基準もより厳密なためテープ設計は家庭用より難易度が高いものであった。

富士写真フィルムは、放送用の最初のメタルテープ

である松下電器のMIIのテープ開発を担当した。メタル磁性体を用いたテープではヘッドに汚れが付着する「目詰まり」が発生しやすい、酸化による劣化を防止する必要があるなど酸化鉄テープより技術課題が多かったが、品質基準の厳しい放送用テープの要求性能を満たすことでメタルテープに対する放送局の信頼を得ることができた。ソニーおよび富士写真フィルムは「メタルテープ技術の開発による放送業界への功績」で、1990年に米国のテレビ業界のアカデミー賞といわれるエミー賞の技術賞を受賞している。

2.5.3 日本企業が席捲した家庭用ビデオ

(1) VHSとβマックスの覇権争い

家庭用VTRの最初の製品はソニーが1965年に発売した図2.22のCV-2000である（国立科学博物館未来技術遺産 登録No.00085）。1/2インチ幅のオープンリールテープで1時間の録画が可能であった。



図 2.22 最初の家庭用VTR ソニーCV2000^[17]

家庭用VTRのカセット化の試みは1970年に発表された前述のUマチック（U規格）であった。Uマチックはソニーが発案し松下電器、日本ビクターに規格統一を働きかけたもので、1971年に3社からVTRとテープが発売された。その手軽さから放送用として一部普及するも、レコーダが30～50万円、1時間録画のテープ1万円と高価で3/4インチテープ幅のカセットも大きかったため家庭用としては普及しなかった。その後、1/2インチ幅での開発が各社各様に行われ、松下電器のオートビジョン方式、1974年には松下寿電子のVX方式、東芝、三洋電機のVコード方式などがあつたがいずれも普及することはなかった。

1975年にU規格をベースに小型化したβマックスをソニーが、1976年にはVHSを日本ビクターが発表し、図2.23の初代VTRが発売された。これを機に家庭用VTRの業界を二分する規格競争が勃発するとともに、家庭用としての本格的な普及が始まった。当時

のVTR技術開発でリードしていたソニーがβマックスでの規格統一を働きかけたが成功しなかった。日本ビクターのVHSの迅速な開発の裏には、U規格でのクロスライセンスでソニー特許を使用できたことも寄与していると言われている。もっとも、家庭用の録画システムを小型化するための重要技術である日本ビクターの2ヘッドヘリカル方式やカラー信号低域変換方式、松下電器のアジマス記録方式などはVHS、βマックスの両方に採用されている。家庭用VTRの成功は日本の電気メーカーの英知の結集の賜物であると考えられる。

ソニー SL-6300

日本ビクター HR-3300



図 2.23 βマックスとVHSの第1号機^{[18][19]}

βマックスの記録再生の相対速度は7.0 m/sでVHSの5.8 m/sより速く画質では有利であった。また図 2.24 に示すようにテープのローディング方式も異なっていたが、VHSのMローディングは再生時のみテープが機器にローディングされるのに対し、βマックスのUローディング方式はテープが常に機器にローディングされているため巻戻し再生の動作が迅速であった。

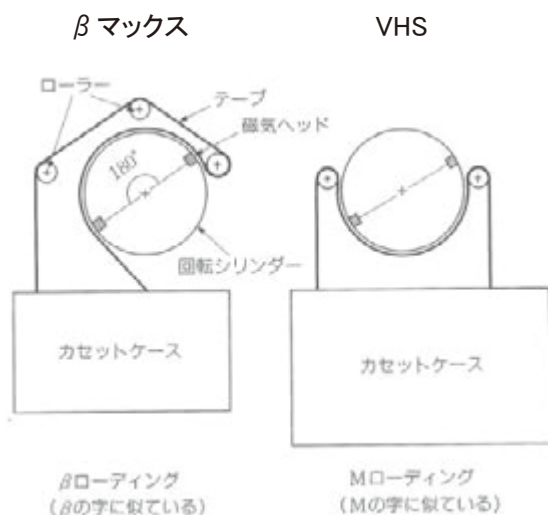


図 2.24 テープローディング方式の比較^[20]

その後のパイバンド化やHiFi音声記録もβマックスが先行しており、性能的、技術的にはβマックスの方が優れているとの評価も多かった。しかし、VHSと

βマックスのデファクト化の戦いは周知のとおりVHSの勝利に終わった^[21]。その理由については多くの書物で語られているが大きく分けると次の3点と思われる。

第一に、デファクト化におけるファミリー（賛同メーカー）の獲得である。日本ビクターの親会社でもある松下電器は独自に開発も行っていたため態度を鮮明にしなかったが、最終的に日本ビクターのVHSを選択したことが大きかった。これによりβマックス陣営は、ソニー、東芝、三洋電機、日本電気、パイオニア、VHS陣営は日本ビクター、松下電器、日立製作所、三菱電機、シャープと日本の電気メーカーが真っ二つに分かれた状態となったが、最大の販売網をもつ松下電器が入ったことでVHS優位に傾いた。松下電器の選択は、VHSがβマックスより部品点数が少なく生産コストを安くできるという相談役の松下幸之助の判断によるものと言われている。1984年には東芝、日本電気、三洋電機もVHS陣営に移っている。

第二に、長時間化でVHSが先行したことがある。VHSが2時間でβマックスが1時間と標準の録画時間でVHSが最初から優位にあったが、米国では2時間以上のスポーツ番組、特にアメリカンフットボールの録画ニーズが大きかった。米国の大手電機メーカーRCAの長時間化の要求に4時間の2倍（LP）モードで松下電器が迅速に対応し、GE含め大手電機メーカーのOEMを獲得することができた。βマックスも2時間化を行ったが、VHSは3倍（EP）モードによる6時間化を行い長時間化では常に先行していた。βマックスは図 2.25 のようにVHSより小型でありかつ高画質の設計であったが、そのコンセプトが録画時間での劣勢を招いてしまった。



図2.25 VHSテープとβマックステープ^[22]

第三に、高画質より耐久性や互換性を重視することでセルソフトやレンタルソフトの市場を創造したことがある。そのために標準原器の配布、定期監査の実施

などファミリー企業の VTR の互換性を確保する仕組みを機能させていた。

VHS 用のテープは 1976 年に TDK、富士写真フイルム、1978 年には日立マクセルから発売された。富士写真フイルムのテープは各電気メーカの VTR 開発に用いられ、VHS システムの最初のリファレンス（標準）テープにもなった。VHS と β マックスのテープには多くのメーカが参入、ソニー、TDK、日立マクセル、富士写真フイルム、3M に加え VTR を開発する松下電器、日本ビクターも VHS のテープ事業に参入するようになった。テープ専門メーカは VHS、 β マックスの両方のテープを開発生産していたが、VHS と β マックスはローディング方式が異なるため、テープ設計は各々に適したものにする必要があった。

VHS と β マックスのテープでは 1979 年に各社から高画質のハイグレード（HG）タイプが開発された。これは VHS の 3 倍モードなど長時間化にも呼応するものでもあった。VHS の 3 倍モードは記録トラック幅が 1/3 になるため画質が低下するが、HG タイプはそれまでのスタンダードタイプより SN が数 dB 高く長時間モードでも高画質を実現できた。またバックコート層を設けることで走行性もより改善された。さらに 1983 年にはプロ用と銘打った最高画質を謳った最上級テープも各社より発売された。これらの性能進歩は Co 被着酸化鉄の微粒子化、磁性体の高配向化、磁性層表面の平滑化などによる SN 比の向上とともに、実用耐久性を両立させる技術によってはじめて達成できたものであった。

特徴的な製品としては、富士写真フイルムがビデオテープでは初めて重層構成とした「AXIA DC」を 1989 年に発売している。重層構成は磁気テープの性能向上の有力な技術で音声用カセットテープでは既に製品があったが、記録波長の短い映像用ではその効果を出すには上層の厚みを $0.5\mu\text{m}$ 程度にまで薄くする必要があった。従来の塗布方式では生産が難しかったが、液相状態で二層を重ねて塗布する同時重層塗布の技術でそれを可能にした。輝度信号に適する上層、カラー信号と HiFi 音声信号に適する下層を分離して設計することで高性能を実現した。

1989 年に日立マクセルは磁性体として Co 被着のマグネタイトを用いた「HGX BLACK」を発売した。マグネタイトは γ 酸化鉄より磁化量が大きく高い出力が得られた。

家庭用 VTR の音声は固定ヘッドで記録再生されるが、テープ速度は標準モードでも 3.3 cm/s とカセットテープより遅く 3 倍モードでは著しく音質が低下し

た。そのため 1983 年に回転ヘッドで音声信号を記録する HiFi 記録が VHS と β マックスに導入され音質の向上が図られた。

1990 年代に入り VHS の生産はピークを迎えコモディティ化し韓国メーカの参入で価格が下落、テープメーカは新たな開発より海外生産、コストダウンに向かうことになった。1976 年に登場した VHS は、DVD 等の光ディスクが普及する 2000 年代半ばまでの 30 年間、一般の録画用メディアの主役として君臨した。その間販売されたビデオデッキは推定 9 億台、ビデオテープは 300 億本と言われている。VHS テープは現在も販売されているが、VTR は 2016 年に船井電機の撤退をもって国内メーカの生産は終了した。1976 年に発売された日本ビクターの初代 VHS レコーダ HR-3300 は、「全世界に普及した家庭用ビデオの原点」として国立科学博物館の未来技術遺産に登録されている（登録 No.00020）。

(2) 家庭用ビデオのハイバンド化

家庭用ビデオは VHS、 β マックスの普及が進むと、次に高画質化のため搬送波の周波数を高くするハイバンド化へと向かった。日本ビクターは 1987 年に VHS をハイバンド化し高画質にした S-VHS を開発した。搬送波の周波数は VHS の 3.2 MHz に対し 5 MHz と高く、水平解像度は VHS の 250 本に対し 400 本、この仕様は当時の放送用 1 インチより優れたものであり画質は VHS より鮮明になった。

1980 年代中頃、各社は Co 被着酸化鉄に替わる次世代の磁性体を模索していた。当時候補となった磁性体は、①高 Hc の Co 被着酸化鉄、②メタル、③窒化鉄、④バリウムフェライト（Ba フェライト）の 4 種類であった。ハイバンド化には磁気テープの高性能化、特に高密度記録を可能にする高 Hc 化が必要であり、S-VHS では Hc を 900 Oe 程度まで高めることができた①の Co 被着酸化鉄が採用された。②のメタル磁性体は Hc、Bm とも高く磁気エネルギーで一番優れその後の多くのシステムで採用されたが、Hc を低くしないとヘッドで記録しにくく S-VHS では採用されなかった。③④は特徴のある磁性体ではあったが当時のシステムでは性能を十分発揮するには至らなかった。

S-VHS テープは各テープメーカが発売し VHS 同様 HG タイプも誕生した。代表的なテープは図 2.26 の富士写真フイルムの「DC pro」、TDK の「XP HiFi」である。共に高 Hc の上層と低 Hc の下層の重層構成のテープであった。「DC pro」は上層 Hc 1000 Oe、Bm 2000 G と高い磁気エネルギーをもち輝度信号の特性に



図2.26 代表的なS-VHSテープ

優れ高解像度で鮮明な映像、TDKの「XP-HiFi」はカラー信号の特性に優れノイズが少なく深い色合いの映像、と各々重層化の効果を発揮したものであった。

β マックスでもVHSに先行して1985年にハイバンド化(Hi-Band β)が行われ、さらに1987年にソニーはメタル磁性体を用いたEDベータを発売した。EDベータは水平解像度500本とS-VHSより高解像度であったが水平解像度が330本のアナログテレビ放送の当時としては過剰品質であり、テープも高価であったため顧客は一部のマニア層にとどまった。

1980年代半ばにはVHS優位は決定的となり、1988年にはソニー自らがVHSに参入、 β マックスのVTRは2002年に生産を完了した。VTR開発の歴史の上で β マックスの意義は大きく、同フォーマットは放送用として世界的なデファクト標準となった β カムの元にもなっている。ソニーの β マックスVTRの第一号であるSL-6300は「VHS方式VTRとの技術競争を通じて、世界の記録技術の進歩に大きく貢献した機種として重要である。」として国立科学博物館の未来技術遺産に登録されている(登録No.00038)。

なお、VHSではS-VHSに続き1993年にアナログハイビジョン放送の録画が可能なW-VHSを日本ビクターが発売した。図2.27の示したテープは開発したばかりの薄層メタル技術を用い富士写真フイルムが生産したが、同放送を受信できるテレビが高価で放送もその後デジタルハイビジョンになったこともあり普及は僅かであった。



図2.27 アナログハイビジョン用のW-VHSテープ

(3) モバイル映像の先駆者 8mmビデオとVHS-C
VHS、 β マックスの家庭用ビデオの覇権争いが始

まった1970年代後半には、より小型化した次世代の家庭用ビデオの構想作りがすでに始まっていた。ソニーでは小型化に必要なテープの高密度化のためカセットテープで実用化が始まっていたメタル磁性体を使用、さらにCCD(個体撮像素子)を用いカメラと一体化したVTRの開発を着想していた。そして1980年に世界初のカメラ一体型VTRとして「ビデオムービー」の試作品を発表した。その直後に日立製作所が同様なコンセプトの「マグカメラ」を、翌年には松下電器がCo蒸着テープを用いた「マイクロビデオ」を発表した。これらは小型でカメラと一体化したカムコーダと呼ばれ家庭用でも屋外で撮影するニーズに対応、すなわち録画のモバイル化を可能にするものであった。

なお、カメラ一体型は1983年にソニーが β マックスを用いた β ムービーBMC100(国立科学博物館 未来技術遺産 登録No.00160)を、1985年には松下電器がVHSを用いたマックロードムービーを発売した。これらはフルカセットムービーと呼ばれ携帯用としては大きく重い日本ではあまり普及しなかったが、大柄な欧米人にとってはその後の小型システムより扱いやすかったようで海外では普及した。

VHS対 β マックス抗争の二の舞を防ぐため、ソニー、松下電器、日立製作所の3社に日本ビクター、Philipsを加えた5社で規格統一に向けた次世代ビデオの協議が開始された。1982年に5社を中心とした「8mmビデオ懇談会」が発足し、1984年に8mmビデオ規格が発表された。

8mmビデオの商品化を率先して推進したのは β マックスで劣勢にあったソニーであった。8mmビデオは小型化のためCo被着酸化鉄では特性が不十分でありソニーは微粒子化したメタル磁性体、一方で松下電器はマイクロカセットやコンパクトカセットで実用化したCo蒸着膜の使用を検討していた。ビデオ用のメタル磁性体はHcが高くフェライトヘッドでは十分な記録ができず画質が劣っていた。Hcが低くても高い特性を示す蒸着テープは当時主流のフェライトヘッ



図2.28 ソニー 8mmビデオ CCD-V8^[23]

ドで記録することが可能であったが、高速で摺動する回転ヘッドのビデオ用としては耐久性に課題があった。ソニーは高い記録能力をもつアモルファスヘッド、さらにセンダストスパッタヘッドの開発でHcの高いメタル磁性体の使用を可能にし、1985年に図2.28のカメラ一体型の8mmビデオCCD-V8（国立科学博物館 未来技術遺産 登録No.00161）を発売した。

一方で8mm懇談会のメンバーの日本ビクターは、ポストVHSの位置づけでもあった8mmビデオに対して積極的ではなかった。VHSカセットを小型化し20分（その後テープ薄手化で40分）録画が可能な独自のVHS-C（VHS-Compact）カセットを開発し、1983年に図2.29のカメラ一体型ビデオムービーGR-C1（国立科学博物館 未来技術遺産 登録No.00169）を発売した。



図2.29 ビクターのカメラ一体型ビデオムービーGR-C1^[24]

また、図2.30に示すようにアダプターを用いることで、広く普及していたVHSレコーダで再生できるようにした。2時間の8mmに対し録画時間で大きく劣る仕様が当初は疑問視されたが、一般家庭での撮影ニーズの実態は短時間であること、3倍モード化で1時間録画を可能としたことで普及が始まった。その後ハイバンド仕様で高画質のS-VHS-Cも発売された。



図2.30 VHS-Cとアダプター^[25]

同じ8mmビデオの開発を進めていた松下電器、日立製作所もVHS-Cの販売に踏み切ったが、これにはVHSの普及があまりにも拡大していたという背景があった。VHS-Cはカムコーダとして市場で一定の地位を得るようになった。

8mmビデオは当初VHSやβマックスに替わる次世代ビデオの思惑もあったため据置型VTRも発売された。しかし、VHSが普及しすぎ大きな市場であるレンタルビデオもVHSが独占する状況にあり、8mmビデオはレコーダ、テープとも割高であったため小型軽量だけの訴求ではVHSに替わることはできなかった。

しかし、その小型軽量の訴求は1989年にソニーが発売した図2.31の「パスポートサイズ・ハンディカム」CCD-TR55で結実し爆発的な売れ行きを示した。



図2.31 パスポートサイズハンディカムCCD-TR55^[26]

さらに1992年にシャープが発売した液晶モニター一体型の液晶ビューカムVL-HL1（国立科学博物館 未来登録遺産 登録No.00167）により、VHS-Cに対する8mmビデオの優勢が決定的なものになった。VHS-C陣営であった東芝、日立製作所も8mmビデオを発売するようになった。

8mmビデオはその後1989年にハイバンド化したHi8、さらにデジタル記録が可能なDigital-8へと進化するも、1995年に登場したより小型のDVC（Digital Video Cassette）に次第に置き換わっていった。

8mmビデオ用のテープはHc 1500~1600 Oeのメタル磁性体が用いられていたが、Hi8では蒸着テープも使用されるようになり、メタルテープ用と蒸着テープ用の二つのポジションが設定された。

2.6 放送局で活躍するデジタルビデオ

2.6.1 放送用ビデオのデジタル化とHD対応

デジタル化による高画質化の検討も1980年代から各社で進められた。アナログ記録ではダビング時に画質が劣化するため、特に編集作業を行う放送局にデジタル化のニーズが強かった。NHKとSMPTEが規格化作業を進めD1フォーマットが最初の規格として承認され1987年にソニーがVTRを商品化した。テープ幅は3/4インチで磁性体はHc 850 OeのCo被着酸化鉄であった。D1フォーマットは映像の輝度信号と

色信号を分離したコンポーネント信号でデジタル化しているため高転送レートで録画時間が短く、また放送局内で使用される輝度と色信号を複合したコンポジット信号への変換も必要になるため主に番組制作で使用された。

コンポジット信号をデジタル化したD2が1988年に規格化されソニーとAMPEXがVTRを開発した。テープ幅はD1と同じ3/4インチだが磁性体はHc 1500 Oeのメタル磁性体を使用、放送用としては初めてアジマス記録が採用され高密度化が図られた。これにより録画時間も最大200分と約3倍と長くなった。この頃から新規の放送用VTRのテープにはメタル磁性体が用いられるようになった。

1/2インチ幅テープのデジタルVTRは、NHKと松下電器により開発されたD3がSMPTE規格として承認され1991年に発売された。バルセロナ五輪の公式記録用となり主にNHKの番組制作や番組送り出しに使用された。D3をベースにコンポーネント信号記録のD5も開発された。図2.32にこれらテープの外観を示した。なお、これらは映像信号をそのまま記録する非圧縮方式である。



図2.32 非圧縮方式の放送用デジタルビデオテープ

高能率符号化方式を用い画質劣化がほとんどない圧縮記録方式で、コンポーネント信号を1/2圧縮したデジタルβカムがソニーから1993年に発売された。その後ソニーはMPEG2圧縮を採用したβカムSXを1996年にMPEG-IMXを2000年に導入した。

放送のハイビジョン化は日本独自のアナログ方式でNHK中心に進められた。1985年の筑波科学博で1インチCフォーマットをベースにソニーが開発したVTRを用いたハイビジョンシステムが出品された。1989年にはNHKと松下電器、日立製作所が開発したUNIHI規格のVTRが登場し1990年代のNHKのハイビジョン番組制作に使用されたが、ハイビジョンのデジタル化に伴い使用されなくなった。

ハイビジョンのデジタル録画ではD5フォーマットに圧縮記録を行うことでハイビジョン記録を可能にしたHD-D5が1996年に松下電器より発売され、NHKの番組制作や送り出しのマスターVTRとして使用された。

東芝とドイツのBTSはD2フォーマットをベース

に非圧縮でハイビジョンを記録するD6を開発したが、高価であったため使用は一部に限られた。

ソニーはデジタルβカムのハイビジョン版として図2.33に示す1/7圧縮のHDCAMを1997年に、さらに2003年には1/2.3圧縮でより高品位のHDCAM SRを導入した。HDCAMはハイビジョン用としてはもっとも普及したシステムとなった。



図2.33 HDCAMのレコーダ、カムコーダとテープ^{[27][28]}

これらデジタル&ハイビジョン記録の放送用ビデオのテープには1990年代に著しく進歩したメタル磁性体がいられ、ソニーだけでなくテープ専門メーカーも開發生産を行った。1985年のソニーのアナログ記録のβカムSPの面記録密度9Mbps（最短記録波長の1/2を1ビットに換算）に対し、1997年のハイビジョンデジタル記録のHDCAMの面記録密度は132Mbpsでこの間に約15倍の高密度化を実現している。メディア技術では、メタル磁性体のHcを約1.5倍高くするとともに粒子体積では約1/10に微粒子化したことが高密度化に大きく寄与している。

AMPEX方式から始まった放送用ビデオの長い歴史の中で、主流はUマチック、1インチCタイプ、βカム（SP）、デジタルβカム、HD-CAMとソニーのシステムであった。βカムシリーズは、デジタル化、ハイビジョン化、あるいは酸化鉄からメタルへの磁性体の変更に際しても、常に再生互換を確保し放送局の過去の映像資産の活用を可能にしてきた。カセットサイズは同じだが区別しやすいように色分けするなど工夫がなされている。その長い歴史の中で、ある意味で保守的な放送局の信頼をソニーは勝ち取ることができた。1982年のアナログ放送用ビデオに始まるβカムシリーズは、20年間で全世界に20億巻出荷された^[29]。ソニーは1995年にデジタルβカムのメタルテープ技術で2度目のエミー賞の技術賞を受賞している。

放送用VTRおよびテープは現在も放送局で使用されるも新規開発は2000年半ばで終了した。これはデ

デジタル化が完了するとともに、放送局内で取材やノンリニア編集にHDD、光ディスク（XD-CAM）、フラッシュメモリ（P2）が、映像アーカイブにはLTOなど大容量化が進むコンピュータ用テープが使用されるようになったためである。

2.6.2 家庭用ビデオのデジタル化と放送用への展開

家庭用の映像デジタル記録は1995年に発売されたDVC（Digital Video Cassette）に始まる。1994年に家庭用のデジタルビデオ規格として発表されたDV規格に基づくテープである。テープ幅は1/4インチでテープは蒸着テープが使用された。カムコーダ用でサイズの小さいDVminiと据置用の標準DVがあったが普及したのは前者であった。家庭用のカムコーダとして1990年代に普及した8mmビデオに対しDVCはより小型で高画質であったため、2000年頃からカムコーダはDVCにシフトするようになった。図2.34はソニーの最初の家庭用デジタルビデオカメラDCR-VX1000で国立科学博物館の未来技術遺産として登録されている（登録No.00164）。なお、2001年にはカセット容積がDVCの30%の超小型カムコーダMICROMVがソニーから発売されたが独自規格であり普及はしなかった。



図2.34 ソニー デジタルビデオカメラDCR-VX1000とDVテープ^[30]

据置型の標準DVはテレビ放送が当時まだアナログでハイビジョンも普及していなかったため、家庭用としては明らかなオーバースペックであり一部の業務用には使用は限られた。しかし、同規格は放送用として展開され、松下電器が1996年にDVC-PRO、2000年にはハイビジョンに対応のDVC-PRO HDを発売、図2.35に示したテープは薄層メタル技術を用い富士写真フイルムが開発した。また、ソニーは同年に蒸着テープを用いたDVCAMを発売した。

家庭用のハイビジョンデジタル記録を可能にしたシステムとしてD-VHSがある。VHSフォーマットを



図2.35 DVC-pro テープ（Lカセット、Mカセット）

基本に日本ビクターが1995年に規格発表し、1999年から日本ビクター、松下電器、日立製作所がVTRを発売した。テープはS-VHSをベースにさらに高Hc化し特性を改善したものであった。D-VHSはアナログ映像のデジタル録画だけでなく、2000年に始まったBSハイビジョンデジタル放送の録画が可能な当時唯一のシステムであった。しかし、普及は僅かでBlu-rayが台頭し始めた2000年代後半に販売も終了した。

家庭用VTRの歴史は磁気テープシステムの高密度化による高画質化&小型化の歴史でもあった。図2.36に各カセットの大きさの比較を行った。サイズが小さくなっただけでなく映像の品位も格段に向上した。

2000年代後半になると映像はハイビジョン化が進み、カムコーダも記録はテープから光ディスク、小型HDDを経てフラッシュメモリにシフトしていくことになる。

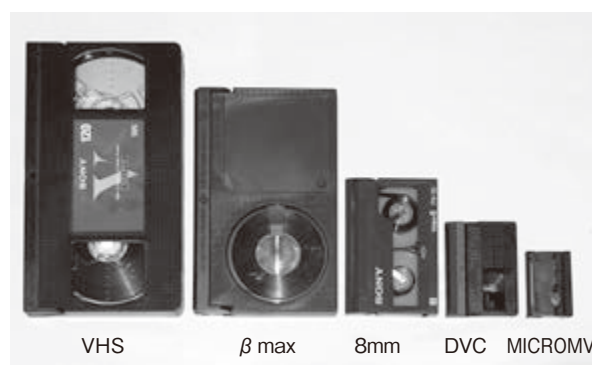


図2.36 家庭用ビデオ カセットサイズの小型化

2.7 コンピュータ時代を支えるデータテープ

2.7.1 電子計算機用の記録装置の始まり

コンピュータ（当時日本では電子計算機と呼ばれた）の研究は1940年代から始まり、1951年にUNIVACの研究は1940年代から始まり、1951年にUNIVACが最初の商用コンピュータであるUNIVAC1を発売した。その記憶装置としてそれまでのパンチカード方式を金属テープに置き換えたのがテープストレージの始まりである。

その後のコンピュータ分野をリードすることになる

アイビーエム（IBM）が商用コンピュータ IBM701 を発売したのは 1953 年であった。それに接続する補助記憶装置として発売されたのが図 2.37 の磁気テープシステム IBM726 であった。テープは 3M が開発し磁性体は γ 酸化鉄が用いられた。テープは幅 1/2 インチで線記録密度は 100 bpi、トラック数 7 でありこの面記録密度は 1.4 kbps で転送レートは 7.5 kbps であった。これは処理能力としては当時のパンチカードに対し 50 倍であり記憶装置は磁気テープに置き換わっていった。IBM726 以降、容量の増加が進むとともに、書き込みされたデータを直後に再生して確認するデュアルギャップヘッド、高強度の PET ベースフィルムの採用、誤り訂正機能の強化などによりコンピュータ用としての信頼性を高めていった。



図 2.37 IBM726 磁気テープ装置^[31]

それから現在に至るまでのコンピュータの進歩は著しく、データ量も膨大となりコンピュータ用磁気テープも大きく進歩した。2018 年発売の最新の IBM の 3592-G6（第 6 世代）の面記録密度は 11.8 Gbps、転送レートは 3.2 Gbps であり、65 年で記録密度は 830 万倍高く、転送レートは 43 万倍速くなったことになる。

コンピュータ用の磁気テープは各々の時代における対象ユーザ、相対的な容量の大きさなどから、①ハイエンド、②ミッドレンジ、③ローエンドの 3 つに分類される。

ハイエンドはメインフレームやエンタープライズとも呼ばれ、企業や公的機関などで使用される大型コンピュータ用で扱うデータ量が多い。高い信頼性とセキュリティの確保、充実した保守サービス体制などに特徴がある。代表的なものとして IBM3480、IBM3592 がある。

ミッドレンジはオフィスコンピュータ、ミニコンピュータなど中規模のデータを扱うシステム用で 1980 年代後半から需要が拡大してきた。代表的なも

のとして DLT、LTO がある。

ローエンドはパーソナルコンピュータの普及により小規模なデータの保存を行うもので 1990 年代から需要が拡大してきた。代表的なものとして QIC、D8、DDS がある。

磁気テープの歴史の中で常に競合となったハードディスク（HDD）は 1950 年代半ばにすでに登場するも、1970 年代までは記録層は磁気テープと同じ酸化鉄を塗布したもので使われ方は限定的であった。しかし、1980 年代に入り HDD の記録層は現在のような薄膜型に移行し技術は急速に進歩することになった。コンピュータの扱うデータ量が増えるとともにデータ処理のアクセス性が重視されるオンラインは HDD が主役になり、磁気テープはバックアップ、アーカイブ、リムーバブル用途にシフトしていくことになった。

2.7.2 企業で活躍する大容量ハイエンド

メインフレームと呼ばれるハイエンドは、IBM726 に始まる IBM 社のコンピュータ用記憶装置が事実上の標準となっていった。20 年後の 1973 年の IBM3420-8 の面記録密度は 112.5 kbps で IBM726 の 80 倍、転送速度は 1250 kbps で 167 倍とコンピュータ用テープは着実に進歩を遂げていった。

当時のコンピュータ用テープは米国の 3M 製で占められていたが、1965 年には富士写真フイルムが「メモリーテープ」と呼ばれる国産初のコンピュータ用テープを市場導入、国内メーカーのテープが次第に市場に浸透していくようになった。同社の開発担当者によると、デジタル記録であるためドロップアウトとなる欠陥の除去、多トラックのリニア記録でデータの読み取りの位置決め精度を保つためのテープエッジ品質の確保に注力したとのことである。

1974 年に IBM 社は初めてのテープとディスクのハイブリッド製品である IBM3850 を発売、MSS（Mass Storage System）と呼ばれた最初の製品であった。図 2.38 に示すようにシリンダ状の容量 100 MB のカートリッジを 7000 個格納できるテープオートメーションでありディスクをキャッシュとして扱った。カートリッジに内包されたテープは幅 68.6 mm の幅広でドラムに巻き付けられていて記録再生は回転ヘッドで行う斬新な設計であった。位置決めサーボ信号も予め記録されていた。人手を必要とするテープの不便性の解消とディスクのランダムアクセス性を併せもつ画期的なシステムであった。技術的に未完成的な部分があり市場ニーズからみても時期尚早かつ高価であったため普及はしなかったが、これはディスク上でテー

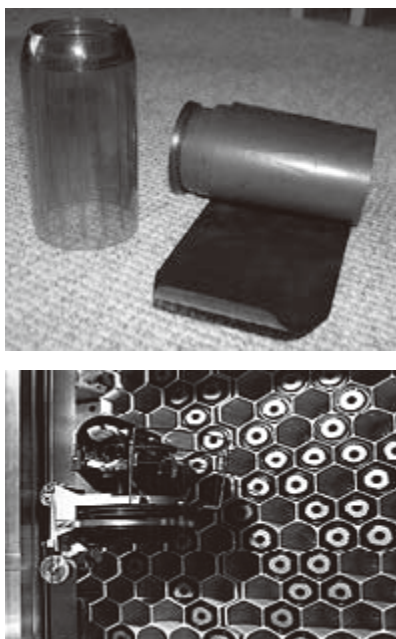


図2.38 IBM3850カートリッジ^[32]と格納システム^[33]

プライブラリーを仮想的に扱う現在のバーチャルテープストレージの原型と見ることができる。

HDDの進歩により磁気テープはバックアップやアーカイブに用いられるようになると、それまでのデータブロック毎に記録再生する Start-stop モードと異なり連続的に記録や再生を行うストリーミングモードの IBM8809 が1979年に発売された。

1984年に発売された IBM3480 は、①半導体技術を用いた薄膜記録ヘッド、②磁気抵抗効果を用いた MR 再生ヘッド、③シングルリールのカートリッジ、④高 Hc 二酸化クロムテープなど多くの技術を用いた革新的なテープストレージであった。

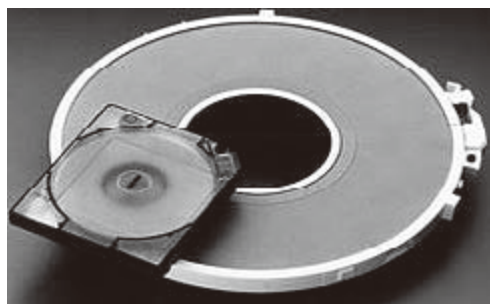


図2.39 IBM3480カートリッジとオープンリールの比較^[34]

これにより記録密度が大幅に向上し図 2.39 に示すように、それまでの 10.5 インチ径のオープンリールに記録した 200 MB のデータが 1/2 インチシングルリールカートリッジに収まるようになった。さらにこれを活用するテープオートメーションシステムも登場し利便性も高まった。

IBM3480 のシングルリールカートリッジは図 2.40 の構造をもち、テープをドライブ内で巻き込むことでカートリッジの小型化が図られた。その後の多くのコンピュータ用テープがこの構造を採用した。

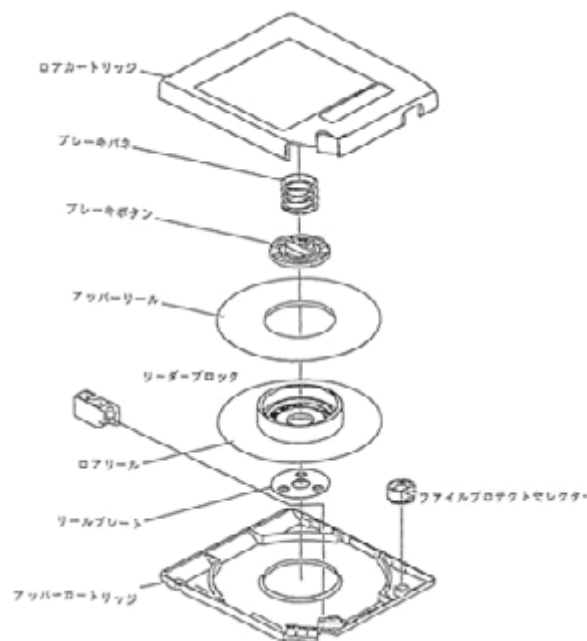


図 2.40 IBM3480 のシングルリールカートリッジ構造

IBM3480 は体積あたりの容量は当時の HDD よりも大きく低コストであり、大容量のストレージとして市場は再び拡大した。1991年には容量 800 MB の 3490E が、1998年に 40 GB の IBM 3590E が発売され大容量化が進んだ。しかし、1990年代後半の HDD はそれをはるかに上回る勢いで急速に大容量化し、バックアップ用途含めテープ市場は浸食されるようになった。

2000年代に入り IBM 社は 2003年に容量 300 GB の IBM3592 を発売、IBM3592-G3 (第3世代) から GMR ヘッドを搭載し初めて容量 1 TB を達成した。表 2.1 に IBM3592 の仕様の進歩を示した。テープの主たる市場はアーカイブやバックアップであり、市場の競合である HDD に対し常にバイト単価で優位性を保ち続けるよう大容量化が進んでいる。

IBM3592 のテープは G3 までは薄層メタル構成を

表 2.1 IBM3592 システムの大容量化

	G1	G2	G3	G4	G5	G6
発売(年)	2003	2005	2008	2011	2014	2018
容量(TB)	0.3	0.7	1	4	10	20
転送速度(MB/s)	40	100	160	250	360	400
線記録密度(kbpi)	282	282	321	500	510	555
トラック数(本)	512	896	1152	2560	5120	8704
磁性体	メタル			Baフェライト		

用いて富士フィルムが開発、G4以降は磁性体にBaフェライトを用いることで最新のIBM3592-G6では20TBの大容量を達成している。

StorageTekはヘリカル方式の放送用ビデオシステムD3をベースにデータ用に改良した容量50GBの「Redwood」を1995年に発売、2000年代に入りT9840、T9940などリニア方式のシステムを市場導入した。StorageTekのテープシステム事業は買収により2005年にSun Microsystemsに、さらに2009年にはOracleに移りハイエンドでIBMと競合するシステムとなった。表2.2に示すように2006年に容量500GBのT10000を発売、2013年には容量8.5TBのT10000Dを発売しIBM3592と市場を二分した。T10000のテープのタイプBまでは薄層メタルテープが用いられImationと富士フィルムが供給したが、タイプCからは富士フィルムのBaフェライトテープを用いることでIBM3592同様に大容量化を実現した。

表2.2 T10000システムの大容量化

	T10000	T10000B	T10000C	T10000D
発売(年)	2006	2008	2011	2013
容量(TB)	0.5	1	5	8.5
転送速度(MB/s)	120	120	252	252
トラック数(本)	768	1152	3584	4608
磁性体	メタル		Baフェライト	

図2.41に示したIBM3592、T10000は図2.42のようなオートメーションのテープライブラリーシステムの形で主に使用されている。

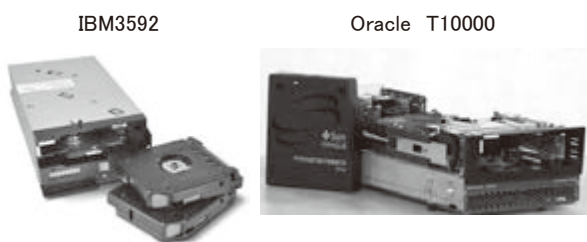


図2.41 ハイエンドシステムのドライブとカートリッジ

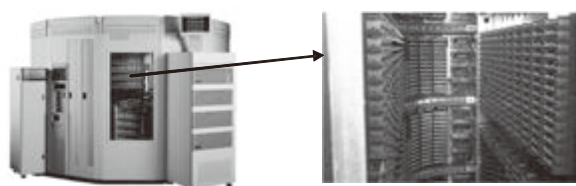


図2.42 テープライブラリーシステム

2.7.3 データテープの主役ミッドレンジ

オフィスコンピュータなど中規模データの保存用として用いられる磁気テープシステムはミッドレンジと呼ばれている。

米国のコンピュータメーカDEC (Digital Equipment Corporation)は1984年に同社のワークステーションの記憶装置として容量94MBのTK50を、1989年に容量2.6GBのTK85を発売しミッドレンジ分野の市場を拡大した。TK85はその後DLT260と呼ばれ1990年代後半のミッドレンジ分野を席捲するDLT (Digital Linear Tape)の最初のシステムとなった。

1994年にDECのテープ事業はクァンタム (Quantum)に買収され同社はすぐにDLT4000を発表した。容量は20GBと当時トップクラスの大きさでミッドレンジの市場においてシェアを伸ばした。その後DLTは表2.3に示すように大容量化が進んだ。DLT4000用のテープDLT IVは富士フィルムの薄層メタル技術を用いた最初のコンピュータ用テープであった。S-DLTではトラッキングのためのサーボ信号に一般的な磁気サーボ方式ではなくテープ裏面に位置決めのためのピットを形成し光ヘッドで読み取る光サーボ方式を採用している。

表2.3 DLTシステムの大容量化

	TK85	DLT4000	DLT8000	S-DLT	S-DLT2	DLT-S4
発売(年)	1989	1994	1999	2001	2003	2006
容量(GB)	2.6	20	40	110	300	800
転送速度(MB/s)	1.1	1.5	6	11	36	60
トラック数(本)	48	128	208	448	640	1280
磁性体	メタル					

図2.43のAIT (Advanced Intelligent Tape)は1996年にソニーが開発したシステムでテープ幅は8mmの蒸着テープである。カートリッジは従来の2リールタイプでドライブはヘリカル方式である。

AITはデータの位置情報や使用履歴を記録する2KBのメモリ (EEPROM)によりデータを高速で検索するMIC (Memory In Cartridge)を内蔵している。AITは表2.4に示すよう大容量化、データ圧縮により



図2.43 ソニーのAITドライブとテープ^[35]

表 2.4 AIT システムの大容量化

	AIT-1	AIT-2	AIT-3	AIT-4	AIT-5	SAIT-1	SAIT-2
テープ幅	8mm					1/2インチ	
容量(GB)	25	50	100	200	400	500	800
転送速度(MB/s)	3.4	6	12	24	24	30	45
磁性体	Co蒸着						

容量は最大 2.6 倍とすることができた。磁性膜は Co 蒸着で S-AIT ではテープ幅を 1/2 インチに広くした。

ミッドレンジ市場は 1990 年代後半に急速に拡大したが DLT、AIT ともシステムは 1 社による独占であったため、ミッドレンジ業界共通のオープンフォーマットを確立しようという動きが起こった。2000 年に IBM、ヒューレットパッカード (HP)、Seagate (現 Quantum) が共同でオープン規格の LTO (Linear Tape-Open) を策定した。表 2.5 に示すように容量 100 MB から始まった LTO はその後大容量化が着実に進みシェアを拡大、2000 年代末までに DLT に取って代わりミッドレンジ市場を制するようになった。

LTO では一部の例外を除き 2 世代前の再生と 1 世代前の記録の下位互換性を保証することで、データ保管や活用の利便性を確保している。容量は圧縮することで 2~2.5 倍にすることができる。また AIT の MIC と同様な機能を果たす CM (Cartridge Memory) を搭載、LTO-3 からは WORM (Write Once Read Many) 機能を、LTO-5 からは LTFS (Linear Tape File System) を導入し利便性を高めている。WORM はデータの改竄や消去を防止しセキュリティ強化やコンプライアンス対応に有用である。LTFS はデータとメタデータをテープの 2 つのパーティションに別々に記録、ディレクトリ構造をもたせることでユーザからみて見かけ上 HDD や USB メモリと同様な操作を可能にしたものである。

LTO テープには G5 までは薄層メタルテープが使用されていたが、G6 では磁性体として Ba フェライトとメタルの両方が、図 2.44 の LTO-7 では Ba フェ

ライトが用いられている。

LTO はオープン規格でありドライブもテープも数社が参入、技術と価格の競争によりテープ市場拡大に貢献したシステムであるが、IBM、HP、Quantum の 3 社が TPC (Technology Provider Companies) としてライセンスを握る米国企業主導の事業モデルである。特に Quantum は DEC を買収し DLT を、LTO 優勢と見るや Seagate のテープ部門を買収し LTO の TPC になるなど行動はしたたかであった。テープメーカーは富士フィルム、ソニー、マクセル、TDK、Imation の 5 社が生産していたが、2019 年の時点では富士フィルム、ソニーの 2 社のみである。



図 2.44 LTO7 のテープとドライブ

2.7.4 小規模、個人向けのローエンド

ワークステーション、さらにパーソナルコンピュータの世界でも小規模データのバックアップやアーカイブ目的に磁気テープが使われるようになり、多種多様なシステムが登場した。

1970 年代に入ると Philips のコンパクトカセットをデータ記録用に改良したデジタルカセットが小規模データのコンピュータの入出力装置、ファイル装置として用いられ標準化も行われた。しかし、1970 年代半ばのフロッピーディスクの登場で使用されなくなった。

1972 年に 3M とタンベルグ (Tandberg) は図 2.45 の容量 20 MB の QIC (Quarter Inch Cartridge) を発売、プログラムローダ、ワークステーションの標準バックアップ用として使われた。QIC はその後 1.35 GB まで大容量化が進んだ。より小型の QIC ミニカートリッジはパソコンの 3.5 インチベイに収まるサイズで

表 2.5 LTO システムの大容量化

	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
発売(年)	2000	2002	2005	2007	2010	2012	2015	2017
容量(TB)	0.1	0.2	0.4	0.8	1.5	2.5	6	12
転送速度(MB/s)	20	40	80	120	140	160	300	360
線記録密度(Gbpi)	124	188	250	328	368	385	485	524
トラック数(本)	384	512	704	896	1280	2176	3584	6656
チャンネル数(個)	8	8	16	16	16	16	32	32
磁性体	メタル					メタル/Ba フェライト	Baフェライト	

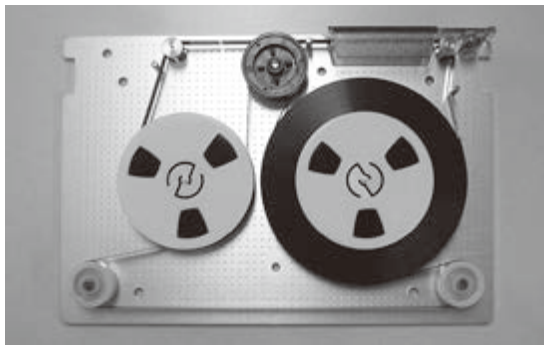


図2.45 QICカートリッジの内部構造^[36]

120 MB の記録が可能であった。

1980 年代後半になると、Exabyte から家庭用 8 mm ビデオをもとにしたデータテープ（通称 D8）が発売された。2.5～7 GB と当時としては大容量で普及した。1996 年には 20 GB の mammoth、1999 年には 60 GB 容量の mammoth2 が発売された。

1989 年にソニーと HP が、音声用に開発された 3.8 mm 幅の DAT テープをデータ用に用いる DDS (Digital Data Storage) 規格を発表、最初の DDS-1 の容量は 2 GB で圧縮時 4 GB の記録が行うことができた。その後 DDS は表 2.6 に示すように大容量化が進み、ローエンドで最も普及したシステムとなった。

表 2.6 DDS システムの大容量化

	DDS1	DDS2	DDS3	DDS4	DAT72	DAT160	DAT320
発売(年)	1989	1993	1996	1999	2003	2007	2009
テープ幅	3.8mm					8mm	
容量(GB)	2	4	12	20	36	80	160
転送速度(MB/s)	20	40	80	120	140	160	300

DDS-2 からベースフィルムは高強度のアラミドを用い、DDS-3 から信号処理 PRML を採用するなど、記録密度を高める先端の技術が導入された。第 6 世代に相当する 2007 年の DAT 160 よりテープの幅が 3.8 mm から 8 mm となったが DAT320 が最終製品となった。DDS のテープは単層または薄層のメタルテープが用いられた。

参考・引用文献

[1] Wikipedia
<https://ja.wikipedia.org/wiki/鋼線式磁気録音機>
 (閲覧 2019-10-01)

[2] Wikipedia
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:AEG_Magnetophon_K4_1939.jpg
 (閲覧 2019-10-01)

[3] <http://sts.kahaku.go.jp/material/2014pdf/no152.pdf>
 (閲覧 2019-10-01)

[4] ソニーHP
<https://www.sony.co.jp/SonyInfo/CorporateInfo/History/SonyHistory/1-02.html>
https://www.sony.jp/products/Professional/ProMedia/tec/tec0104_contents.html (閲覧 2019-10-01)

[5] 西川正明：磁気記録の理論、朝倉書店、1991

[6] <https://kotobank.jp/word/コンパクトカセット-506542> (閲覧 2019-10-01)

[7] 澤村信：カセットテープ. コンプリートブック, ネコパブリッシング, 2017 (HF の写真は「懐かしのカセットテープ博物館」からの提供)

[8] 澤村信：カセットテープ. コンプリートブック, ネコパブリッシング, 2017

[9] カセットテープ時代 2018, シーディージャーナル, 2018

[10] Wikipedia
<https://ja.wikipedia.org/wiki/8トラック> (閲覧 2019-10-01)

[11] Wikipedia
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dat_cartridge.jpg (閲覧 2020-02-05)

[12] Wikipedia
<https://en.wikipedia.org/wiki/Ampex> (閲覧 2019-10-01)

[13] Wikipedia
https://en.wikipedia.org/wiki/Quadruplex_vid-eotape (閲覧 2019-10-01)

[14] 川村俊明：国立科学博物館 技術の系統化調査報告第 1 集「VTR 産業技術史の考察と現存資料の状況」、2001

[15] Wikipedia
<https://en.wikipedia.org/wiki/U-matic> (閲覧 2019-10-01)

[16] ソニーHP
<https://www.sony.co.jp/SonyInfo/CorporateInfo/History/SonyHistory/2-03.html>
 (閲覧 2019-10-01)

[17] ソニー提供

[18] 国立科学博物館 未来技術遺産
<http://sts.kahaku.go.jp/material/2009pdf/no38.pdf>
 (閲覧 2019-10-01)

[19] 国立科学博物館 未来技術遺産
<http://sts.kahaku.go.jp/material/imgs/no20.pdf>
 (閲覧 2019-10-01)

[20] 高尾正敏：ビデオレコーディングの話、裳華房、

- 1989
- [21] 菅谷 汎：「VHS がなぜ世界を制覇したか」、J.IEE JAPAN, Vol.115, No.3
- [22] Wikipedia
<https://ja.wikipedia.org/wiki/ベータマックス> (閲覧 2019-10-01)
- [23] 国立科学博物館 未来技術遺産
<http://sts.kahaku.go.jp/material/2014pdf/no161.pdf> (閲覧 2019-10-01)
- [24] 国立科学博物館 未来技術遺産
<http://sts.kahaku.go.jp/material/2014pdf/no169.pdf> (閲覧 2019-10-01)
- [25] Wikipedia
<https://ja.wikipedia.org/wiki/VHS-C> (閲覧 2019-10-01)
- [26] ソニーHP
<https://www.sony.co.jp/SonyInfo/CorporateInfo/History/SonyHistory/2-03.html> (閲覧 2019-10-01)
- [27] ソニーHP
<https://www.sony.jp/pro/products/HDW-1800/>
<https://www.sony.jp/pro/products/HDW-790/> (閲覧 2019-10-01)
- [28] Wikipedia
<https://ja.wikipedia.org/wiki/HDCAM> (閲覧 2019-10-01)
- [29] ソニーHP
<https://www.sony.jp/products/Professional/ProMedia/oth/2million/2million.html> (閲覧日 2020-01-17)
- [30] 国立科学博物館 未来技術遺産
<http://sts.kahaku.go.jp/material/2014pdf/no164.pdf> (閲覧 2019-10-01)
- [31] IBM の HP
https://www.ibm.com/ibm/history/exhibits/701/701_coi63.html (閲覧 2019-10-01)
- [32] Wikimedia
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:IBM_3850_MSS_Cartridge_open.01.jpg (閲覧 2019-10-01)
- [33] IBM の HP
https://www.ibm.com/ibm/history/exhibits/tucson/tucson_products.html (閲覧 2019-10-01)
- [34] IBM の HP
https://www.ibm.com/ibm/history/exhibits/storage/storage_3480.html (閲覧 2019-10-01)
- [35] ソニーHP
https://www.sony.co.jp/SonyInfo/News/Press_Archive/199805/98-042/?_ga=2.96871647.1706296341.1570070046-1271579733.1563413359 (閲覧 2019-10-01)
- [36] Wikipedia
https://ja.wikipedia.org/wiki/Quarter_Inch_Cartridge (閲覧 2019-10-01)

3 | メディア技術からみた磁気テープの進歩

3.1 磁気記録のしくみ

磁気記録は電磁変換の物理現象を利用するものである。図3.1に示すようにリング状のコアとなる磁性材料にコイルを巻いた磁気ヘッドに信号電流を流し、電磁誘導によってコア内に磁束を発生させ、コアの隙間（ギャップ）からの漏れ磁界で磁気テープ中の磁性体を磁化し信号を記録する。再生時は逆に磁気テープの記録磁化から発生する磁界をヘッドギャップ部で検知し、コイルを通る磁束の時間変化を信号電圧に変換している。

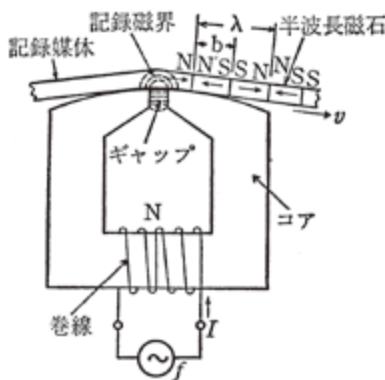


図3.1 磁気記録のしくみ^[1]

磁気記録に用いられる磁性材料は大きな磁性をもつことができる強磁性体であり、強磁性体は硬磁性体、軟磁性体に分類される。

磁性材料の特徴を示す基本特性として、飽和磁化 M_s (Saturation Magnetization)、抗磁力 H_c (Coersivity) がある。 M_s は材料に外部から磁界をかけたときに現れる磁極がもつ最大の磁化で「磁化の大きさ」を示す。磁化の最大の大きさは磁極から発生する磁束密度を示す記号である B を用い B_m (または B_s) で表す場合もある。 H_c は磁化した磁性材料に外部から磁化とは逆方向に磁界をかけたときに材料の磁化が反転する磁界の大きさで「磁化の強さ」に相当する。

図3.2は磁界 H に対する磁束密度 B の変化を示す履歴（ヒステリシス）曲線と呼ばれるもので、磁性材料の特徴を示すものである。磁気テープに用いるのは硬磁性体で十分に磁化するには外部から一定の強さの磁界をかける必要があるが、一度磁化されると外部磁界を取り去っても一定の割合でその磁化を保持する性質をもつ。これは記録材料に必要な基本的な性質であ

る。その値は残留磁化 M_r (Residual Magnetization) または残留磁束密度 B_r で表される。一方、磁気ヘッドのコアは軟磁性体で、傾き B/H で表される磁化のしやすさの特性である透磁率 μ が高く、小さな外部磁界で内部に大きな磁束を発生させることができる。また H_c が非常に小さく容易に磁化反転するため、磁界に対する磁束の追従性が良い。これは磁気ヘッドとして必要な基本的な性質である。

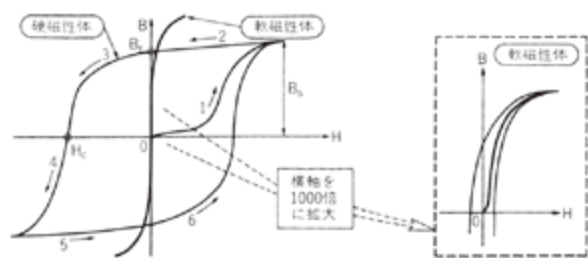


図3.2 強磁性体のヒステリシス曲線^[2]

磁気テープのヒステリシス曲線が囲む領域の面積は磁気エネルギー積とも呼ばれ、大きいほど高い性能を実現しやすい。一般的に縦軸の最大値である B_m が大きいと特に低周波数（長ビット、長波長）の信号の出力が高くなり、横軸との交点である H_c が高いと高周波数（短ビット、短波長）の信号の出力が高くなる。これを H_c の高いテープ A と B_m の高いテープ B を比較した図3.3で説明する。磁化の反転間隔が十分に広い長波長の記録では磁化を弱める作用である減磁界がほとんど発生しないため、記録として残る B_r は B 軸との交点となり B_m の高いテープ B が大きくなる。反転間隔が短い短波長の記録では記録とは逆方向の減磁界が発生するため、減磁動作ラインと呼ばれる線と

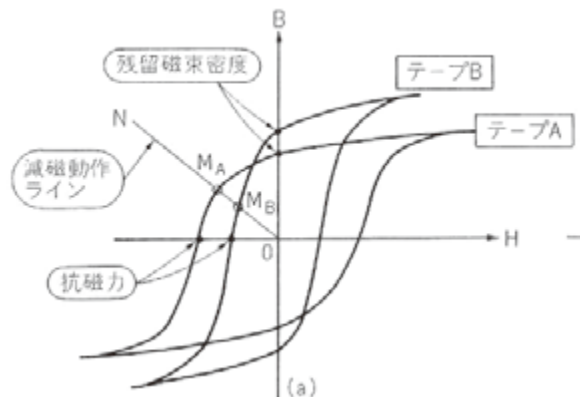


図3.3 テープのヒステリシス曲線と残留磁化^[3]

の交点が記録として残る B_r となり H_c の高いテープ A が大きくなる。減磁動作ラインの傾きは波長が短くなるほど小さくなり B_r は小さくなる。

一方、ヘッド材質は縦軸の B_m (B_s) が大きいほどヘッドギャップからの漏れ磁界が大きくなり記録能力が高くなる。

テープに実際に記録する信号は様々な周波数成分をもつが、単周波数で連続的な正弦波のアナログ信号の場合、出力（再生電圧）の時間変化は以下のように周波数に比例した関数になる。これは出力が磁束の時間変化である微分値に比例するからである。

$$\text{出力}(t) \propto \text{周波数} \times \sin(2\pi \times \text{周波数} \times t)$$

従って周波数が高く波長が短い信号ほど出力が高くなることになるが、短波長では様々な損失が発生するため実際は図 3.4 のような周波数特性を示すようになる。

磁気記録の信号は連続的に変化するアナログ信号と不連続に変化するデジタル信号がある。図 3.5 に記録

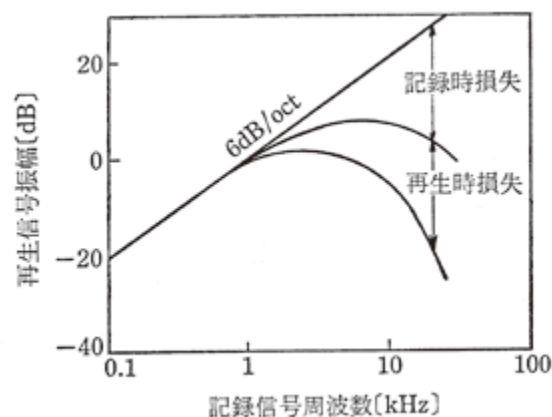


図3.4 磁気記録の周波数特性^[4]

信号のパターンと記録磁化のパターンを微粒子の磁性体で現像し可視化した図を示した。

入力が0と1の不連続なデジタル信号では理想的には磁化反転も不連続となり再生波形はパルス状になる。しかし、急峻な磁化反転では減磁界が発生し反転の遷移領域を押し広げるため再生パルスも一定の幅をもつことになる。有限の長さをもつ再生ヘッドの

エピソード3 電気は主役で磁気は脇役？

電磁気学という学問があるように電気と磁気は表裏一体の関係にあり、電気があるところに磁気があると言ってよい。本報告では磁界のエルステッド (Oe) など磁気分野で今も慣例的に用いられている cgs 系の磁気単位を用いているが、磁界を国際単位である SI 系で示すとアンペア／メートル (A/m) となる。これは高校で物理を習った人なら知っている右ねじの法則、アンペアの法則、すなわち電流の周囲にはその方向に対し右回転の磁界が発生、その磁界を円周方向に距離で積分すると電流になるという電磁気学の法則から来ている。電気と磁気は物理の世界では等価と言ってもよいが、磁気は電気 비해私たちの生活にあまり利用されていないという印象があるのではないだろうか。

電気がないと現代社会そのものが成り立たないことは無論、今日の社会の発展そのものがなかったと言えよう。電気エネルギーは様々なエネルギーに変換できそれが私たちの生活を豊かにしている。例えば、光エネルギーに変換して照明に、運動エネルギーに変換し電車やEVに、熱エネルギーに変換し暖房機やホットプレートに、化学エネルギーに変換し電気分解に、など数え上げるときりがなくその恩恵を私たちは直接感じることができる。これに比較し磁気は一般の人たちにとって馴染みが薄い。まず思い浮かぶのは磁石だが、直接目にする日常の製品ではマグネットクリップやステッカー、磁気ネックレス、コンパスくらいであろう。もう少し範囲を広めてもカード（茶色のストライプ）や切符（茶色の裏面部分）、そして磁気テープといったところであろう。

しかし、磁気は生活の隠れた部分では重要な役割を果たしている。発電機など回転するモータ類、IHヒータや電子レンジなど家電製品、ステレオやヘッドフォンのスピーカ、MRIなどの医療機器、など入力は電気エネルギーだがその機能を果たす途中段階で磁気エネルギーが大きな役割を果たしている。リニアモーターカーも同様である。電気と比べると地味で目立たず磁気は脇役のイメージは拭えない。また磁気の影響、地磁気と磁気嵐などミステリアスな部分も多い。磁気記録に携わった筆者としては磁気をもっと多くの分野で活用できるのではないかと感じているが、その中で磁気テープは磁気の恩恵を直接感じることができる数少ない製品であると言える。

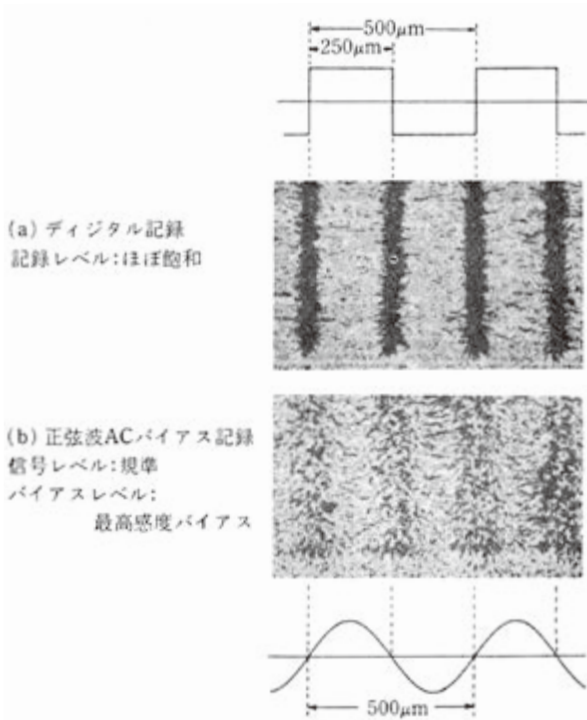


図3.5 記録の磁気現象パターン^[5]

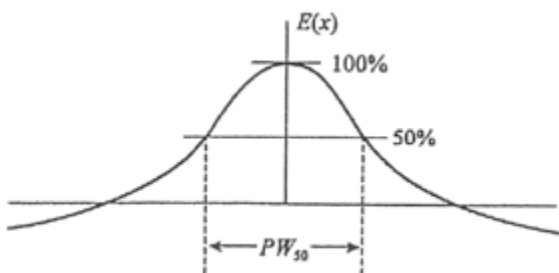


図3.6 デジタル信号の孤立反転波形

ギャップ間隔やメディアとヘッド間のスペースも再生パルスの幅を広げる要因となる。これらの結果として、孤立反転波と呼ばれるデジタル記録の基本波の再生信号は図3.6で示すような波形となる。PW₅₀はピーク半値幅と呼ばれ、狭いほど信号の分離が良くなるためデジタル記録において重要な特性である。

アナログとデジタルの記録再生の理論は異なるが、記録密度を高めるとアナログ再生の正弦波も急峻になり、デジタルの孤立反転の再生波形は重なり合うようになるため、高密度記録の領域では類似の挙動を示すようになる。

3.2 テープ上の記録パターン

磁気テープでは磁性層上に定められたパターンで各種信号が記録されるが、そのパターンは各システムに

よって異なる。記録される信号には、オーディオの音声信号、HiFi信号、ビデオの輝度信号、カラー（クロマ）信号などのアナログ信号、デジタル信号、サーボ信号、コントロール信号などがある。アナログ信号ではテープ上の個別のトラックに記録する場合と複数の信号を重畳（複合し一つの信号とする）し同じトラックに記録する場合がある。

図3.7は代表的なテープ上の記録パターンを示す。生産された磁気テープは位置決めを行うサーボ信号を予め記録する場合を除き、基本的には何も記録されていないブランクテープである。そういう意味では生の磁気テープは真っ白なキャンパスのようなものであり、その上に記録信号という絵をどのように描くかはシステムの重要な設計要因である。

カセットテープは音声信号をテープ走行方向のトラックに固定ヘッドで記録するリニア方式でもっとも単純なパターンである。またトラック間にはヘッドの位置ずれによる信号の干渉を防ぐためガードバンドと呼ばれる未記録部分を設けている。コンピュータ用テープも同様だが初期のテープのデータトラック数は7本に過ぎなかった。一方で近年のコンピュータ用テープはマルチ固定ヘッドの技術で同じリニア記録で

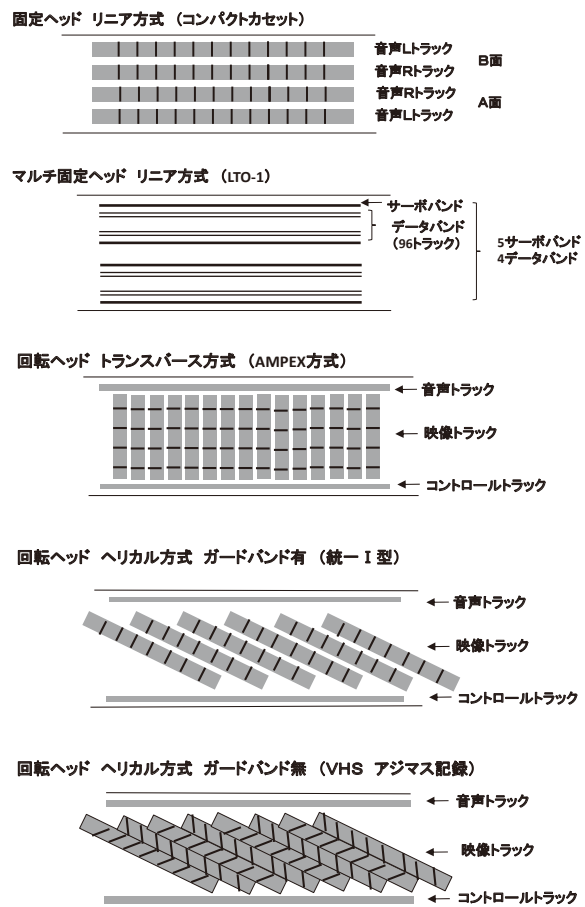


図3.7 代表的な記録パターン

も最新の LTO-8 ではトラック数は 6656 本にも及ぶ。そのため狭いトラック上を正確にヘッドが走行できるよう位置決め用のサーボ信号が記録されている。

回転ヘッドを用いることで映像信号の高速記録を可能にした AMPEX の初期の VTR の記録パターンはテープ幅方向に記録するものであったが、その後の放送用の各システムはテープ斜め方向に記録するヘリカル方式が主流となった。放送用はガードバンドを有していたが、同じヘリカル方式でも民生用の VHS、 β マックス方式では隣接するトラックで記録方向に角度をつけトラック間の信号の干渉を低減するアジマス記録を採用しガードバンドレスを実現している。これによって高密度化による小型化が実現、アジマス記録は放送用でも後に採用された。

このようにテープ上の記録パターンは多種多様であり、また各トラック幅や記録する信号のビット長や波長も異なるが、以下の 2 点が共通の課題である。

記録パターン設計の共通の課題

- ・記録しにくいもっとも短いビット、波長の信号を如何に高い SN 比と分解能で記録、再生できるようにするか
- ・狭くなる記録トラック上にヘッドを如何に正確にトレースさせ再生信号の品位低下を抑えるか

むしろ各パターン特有に発生する課題がある場合は対処が必要になってくる。例えば、VHS の音声信号のトラックはテープ端部にあるため品質が不安定になりやすく、テープ裁断における端部形状の制御技術が重要であった。

3.3 記録密度の進歩と高速化

図 3.8 はコンピュータ用磁気テープシステムが登場した以降の体積記録密度の進歩を示したものであり、60 年間に渡り 12 倍/10 年のほぼ一定の割合で増加している。また図 3.9 は放送用、民生用を含めた 1975 年以降の面記録密度の推移である（アナログ記録システムでは最短記録波長の 1/2 を 1 ビットに換算してプロットした）。方式によっても異なるが、面記録密度は概ね 10 年で 10 倍程度の進歩を遂げてきた。体積記録密度の増加が面記録密度よりやや速いのは、テープの薄手化の効果によるものである。記録密度を高めることでより大容量、高品位、小型のシステムの実現が

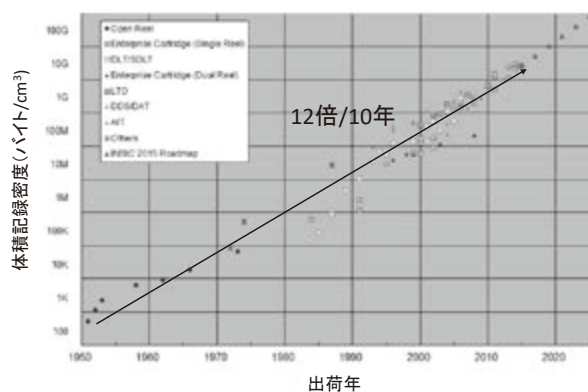


図3.8 コンピュータ用テープ 体積記録密度の推移^[6]

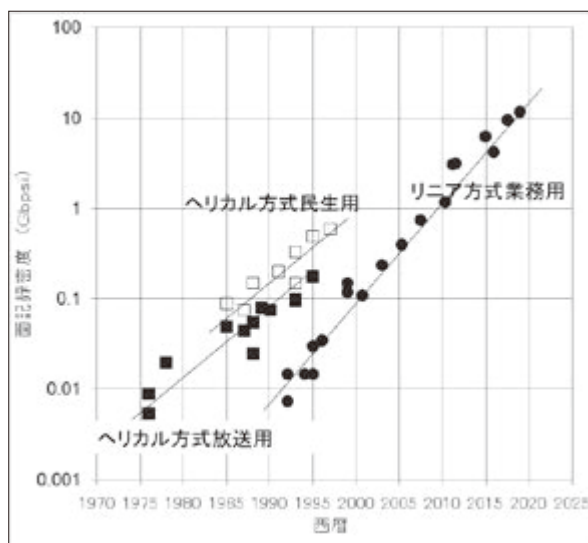


図3.9 磁気テープ面記録密度の推移

可能になった。

面記録密度は以下の式で表わされる。

$$\begin{aligned} \text{面記録密度 (bps)} \\ &= \text{線記録密度 (bpi)} \times \text{トラック密度 (tpi)} \end{aligned}$$

線記録密度はデジタル記録において最短ビットの信号を走行方向 1 インチ当たり何個記録できるかであり、トラック密度はテープ幅方向 1 インチあたりに何本のトラックを書けるかである。信号が記録されたトラック上をヘッドが正確に走行することをトラッキングと言う。記録と再生でテープの幅方向の走行位置にずれがあると再生信号を損失するだけでなく、隣接するトラックにかかる信号が干渉し合うクロストークが発生し品位が大きく損なわれる。

そのため多くの磁気テープシステムでは、データ信号とは別に位置補正を行うためのコントロール信号、サーボ信号をテープ上に記録している。またデータ信号も再生ヘッドで読み取る幅より広く記録する、トラック間にガードバンドと呼ばれる未記録領域を設け

るなどの工夫をしている。従って、磁気テープの幅方向は必ずしも全領域を記録に使っているわけではなく、その分トラック密度は低くなる。

記録密度と同様に重要な特性である転送速度は、単位時間あたり記録再生できるデータ量である。転送速度は以下の式で表わされる。

$$\text{転送速度(bps)} = \text{線記録密度(bpi)} \times \text{チャンネル数} \times \text{テープ相対速度(ips)}$$

記録容量の増大とともに記録再生に要する時間も速くしないと実用的なシステムとは言えない。テープの線記録密度を高めることで転送速度は速くなるが、トラック密度を高めるだけでは転送レートは変わらない。同時に記録再生するチャンネル数を増やすことで転送速度を高くすることができる。そのためにはヘッド数を増やす必要がある。

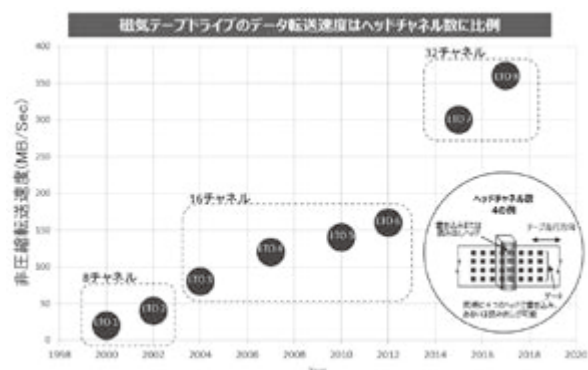


図3.10 コンピュータ用テープ 転送速度の推移^[7]

図 3.10 は 2000 年以降におけるミッドレンジテープ LTO の転送速度の推移である。確実に高速化が進んでいるが高密度化（大容量化）のペースよりは遅くなる傾向がある。テープの線記録密度の向上による高転送化は、その技術的難易度が年々高くなってきている。これは単に短ビット化でビット当たりの記録面積が減り SN が低下するだけでなく、ヘッドとテープ間の距離による出力の低下（スペース損失）や記録プロセスによる磁化の損失（記録減磁損失）が短ビット化で大きくなるためである。そのため高密度化にはトラック密度の向上が不可欠であるが、転送速度向上のためには同時に記録再生するヘッド数を増やす必要がある。システム側の特に狭トラックのマルチ固定ヘッドを作製する高度な技術が不可欠である。

3.4 基本特性向上の技術要素

磁気テープシステムの体積記録密度は概ね一定の速度で進歩し 60 年で約 1000 万倍にもなった。しかし、磁気テープは磁性体をバインダで均一に分散しベースフィルム上に均一に塗布、表面を平滑に処理しテープ幅に裁断する、という基本となる構成と製法は誕生以来ほとんど変わっていないと言ってよい。

記録密度の向上はテープおよびシステム（ハード）の個々の技術要素の進歩とともに、それを融合することで初めて実現できたと言える。また初期性能が維持される、すなわち耐久性や保存性を伴う設計が必要であることは言うまでもない。

本節では、磁気テープ設計の技術の全体につき俯瞰、各技術の詳細については次節以降で述べる。磁気テープの最終品質として重要なのはアナログ記録では画質や音質、デジタル記録ではエラーレートである。これらを決める設計要素は以下の 4 つである。

磁気テープシステム性能を決める要素

- ① システムの記録再生方式とテープ層構成
- ② システムの位置決め機構とテープ形状制御
- ③ テープおよびシステムの SN 比
- ④ テープの欠陥とシステムの誤り訂正能力

記録システムの設計として最初に必要なのはテープへの記録再生方式を決めることである。電気信号をそのまま磁気に変換して記録するのではなく、磁気記録の特徴と記録信号の周波数帯域などを考慮し最適な形に信号を加工して記録再生される。アナログ記録では交流バイアス方式、FM 変調方式、デジタル記録ではパルス符号変調方式などである。垂直記録方式もあるが磁気テープシステムではまだ実現していない。テープも記録再生方式に合うように層構成を最適化する。アナログ記録では磁性層の多層化で深さ方向の磁気特性を記録方式に合わせる、デジタル記録では薄層化で高密度記録を可能にするなどである。

コントロール信号やサーボ信号など記録と再生の位置を一致させる機構は、主にシステム側の重要な設計要因である。一方でテープ側も温湿度に対する寸度安定性、テープの幅精度や直線性を高めるなど形状制御の技術が不可欠になる。

記録再生方式と位置決め機構が決まると次は SN 比と欠陥である。SN 比はシステムの平均的な信号品位

を表し、デジタル記録ではランダムエラーの発生率、アナログ記録では解像度など映像や音声の品位に影響を及ぼす。

SN比は出力とノイズに分離することができ、出力はさらに利得と損失に分離することができる。利得はテープの残留磁化 (Br)、すなわち個々の磁性体がつもつ磁化量 (Ms) とその充填度、配向度によって決まる。一方でヘッド磁界が磁性体を十分に磁化できる大きさをもつことも必要であり、テープの高 Hc 化に伴い Bs の大きな記録ヘッドが開発された。充填度や配向度を高めるためには磁性体を単粒子にまで分散し並べる処方技術、プロセス技術が不可欠である。磁性体以外の非磁性部分の比率を少なくすることで充填度は高まるが、結合剤や添加剤は分散性向上や耐久性確保に必要で、相反する現象を解決する技術が必要になる。

損失は様々な原因で発生する。テープ設計上で特に重要なのは記録減磁損失、自己減磁損失、スペース損失でありともに短波長、高密度記録で顕著となる。詳細はここでは省くがその他に厚み損失、粒子長損失、ギャップ損失、アジマス損失などがある。

記録減磁損失は高周波信号の記録プロセスにおいて発生する。高周波記録ではテープで磁化された部分がまだヘッド出口近傍にあるとき、高周波で反転するヘッド磁界の影響を受け記録磁化が減衰する現象である。ヘッド磁界の尾引き効果と呼ばれヘッド磁界の分布も影響を与える。自己減磁は短波長の記録で発生する減磁界によって記録磁化が減衰する現象であり、磁性層の Br が大きく磁性層が厚いと大きくなる。ともにテープの Hc を高くすることで損失を小さくすることができるが Hc の分布も重要な特性である。平均 Hc が高くても Hc の分布が広いと低い Hc 成分は記録減磁や自己減磁を受けやすく、高い Hc 成分はヘッドで十分記録できず出力が低くなるからである。なお、テープの Br が大きいと利得は大きくなるが減磁損失も大きくなるため、高密度記録においては出力に対する Br の寄与は相対的に小さくなり損失を小さくする Hc の寄与が大きくなる。

スペース損失は分離損失とも呼ばれる。テープとヘッド間の距離によりテープからの磁界が減衰し以下の式で再生信号が低下する現象であり、短波長記録でその影響が顕著になってくる。

$$\text{スペース損失 (dB)} = -54.6 \times \text{距離/波長}$$

主にテープの表面粗さが影響し平滑にすることで損失を少なくすることができる。しかし、平滑化すると

摩擦の上昇など弊害も多く発生する。そのためトライボロジーの課題解決のための技術開発に多くの時間が費やされた。

ノイズも様々な要因で発生する。高周波磁界で磁化を消去したときに発生する AC ノイズ、直流磁界で一方向に磁化したときに発生する DC ノイズからその原因が考察されている。AC ノイズは主に磁性体の個数密度、DC ノイズは主に磁性層の不均一性によって発生し、AC ノイズは塗布型<薄膜型、DC ノイズは薄膜型<塗布型の傾向がある。

実際に信号を記録した場合、これらのノイズの原因は再生信号の大きさ (縦方向) の変動である振幅ノイズ、信号の時間方向 (横方向) のずれである位相ノイズを発生させる。再生信号をフーリエ変換すると図 3.11 のように変調ノイズと呼ばれる広い周波数帯域でのノイズを含んでいることが分かる。

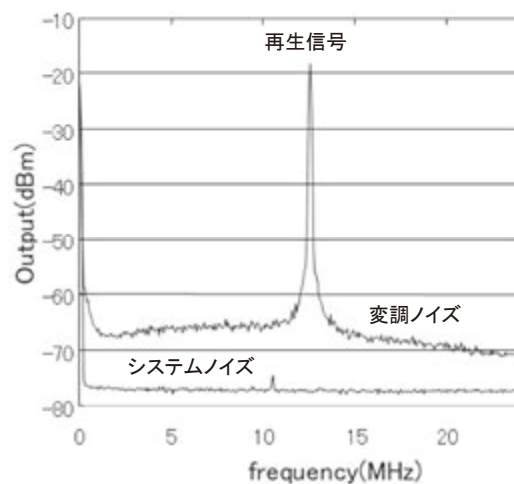


図3.11 変調ノイズスペクトル

振幅ノイズは磁性体の有限な粒子密度と記録層の不均一性などによって発生する。粒子密度を高めるには磁性体を微粒子にし粒子体積を小さくすることが基本である。Ms や Hc などの磁気特性を向上させつつ磁性体を微粒子化することは、磁性体の技術開発の歴史の中で常に最大の課題であった。充填度を上げることは粒子密度を高めるためにも有効である。記録層の均一性で重要なのは磁性層の厚み変動と表面粗さの変動を抑えることであり、高精度の塗布技術やテープ平滑化の技術がそれを実現してきた。振幅変動はアナログ記録では音声や映像の変動、デジタル記録では SN 比の低下によるエラー発生の原因となる。

位相ノイズはジッターとも呼ばれ、テープとシステムのノイズ以外にヘッドとの摺動摩擦によるテープ振動やシステムの速度変動などによっても発生する。位相ノイズはアナログ記録では音声の揺れや映像の乱

れ、デジタル記録では誤検出によるエラー発生の原因となる。

テープ上の欠陥はドロップアウトと呼ばれる信号欠落を発生させる。未分散の磁性体凝集物、ベースフィルムの表面突起などに起因するテープ上の局所的な欠陥、さらにはテープ上の傷や塵埃などが原因となる。これらはアナログ記録では音飛びや映像抜けになり、デジタル記録では大きなバーストエラーとなる。

ピーク幅はデジタル記録で重要な特性であり、孤立反転再生波形の半値幅である PW_{50} が指標となる。高密度のデジタル記録では孤立反転の再生波形の幅が広いと図 3.12 のように再生波形が重なり合うようになり、出力の変動やピークの位置がずれるピークシフトを起こしエラーとなる。高密度化には PW_{50} を狭くすることが基本設計となる。

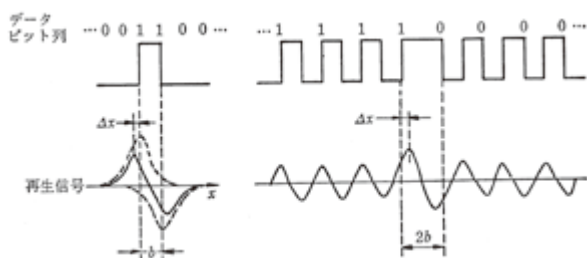


図3.12 波形の重なりによる出力変動とピークシフト^[8]

ヘッドギャップ長の影響を無視できる場合、 PW_{50} は以下の近似式で求められる^[9]。

$$PW_{50} = 2\sqrt{(a + \text{スペース})(a + \text{スペース} + \text{磁性層厚})}$$

a は磁化反転の急峻さの度合いを示す値で B_m/H_c が小さいと小さくなる。従って PW_{50} を狭くするには磁性層を薄く平滑にし、 H_c を高く B_m を小さくすることが効果的である。

図 3.13 に磁気テープの高密度化を設計する上での技術要素を整理した。また磁性層の構造の進化を理解しやすいようにイラストでも示した。

3.5 保存性、耐久性は記録メディアの命

記録メディアの使命はデータを長期間残すことであり、磁気テープにおいても保存性と耐久性の確保は常に重要な課題であった。特に今日テープはアーカイブ用途に用いられることが多くなったため、その性能はより注目されるようになった。実際の開発では基本特

性、初期特性の向上以上に保存性、耐久性の改善に時間を費やすといっても過言ではない。検討すべき現象は以下の3つである。

耐久性、保存性の劣化現象と原因

- ・記録特性の長期保存での劣化
 - ➔ 構成材料の劣化
- ・再生特性の長期保存での劣化
 - ➔ 記録磁化の減衰
- ・耐久走行での記録再生特性の劣化
 - ➔ 記録媒体の損傷

構成材料の劣化は、温湿度（熱、水分）、空気、ガス、圧力、光、磁場といった環境要因によって発生する。中でも記録材料である磁性体には特に注意が払われた。当初の Co 含有酸化鉄は熱や圧力により H_c などの磁気特性が変化しやすい欠点があったが、Co 固溶型から Co 被着型へ改良することでこれらの課題が解決された。もっとも注意が必要なのは空気中の酸素、水分や微量のガス (SO_x , NO_x など) による酸化、腐蝕である。 γ 酸化鉄や Ba フェライトなどの酸化物は安定でこれらの環境要因でほとんど劣化しないが、メタル粉末や Co 蒸着など金属磁性材料の実用化には安定化の技術が必須であった。メタル粉末は表面に薄い酸化被膜を形成することで、Co 蒸着膜は CoO 層を導入することで実用レベルに改良することができた。表 3.1 は各磁性材料の環境安定性の比較を示す。製品では磁性材料の変化は適切な範囲に抑えられていることは言うまでもなく、◎は数値上の変化がほとんどない、○は多少変化するが実用上は問題ない、→は技術的に改良したことを示す。

表 3.1 磁性材料の環境安定性

磁性材料	熱	酸素		圧力
		水分	腐食性 ガス	
γ 酸化鉄	◎	◎	◎	◎
マグネタイト	△→○	◎	◎	△→○
二酸化クロム	◎	◎	◎	◎
Co変性酸化鉄	x→○	◎	◎	△→○
メタル合金	◎	x→○	x→○	◎
Baフェライト	◎	◎	◎	◎
Co蒸着	◎	x→○	x→○	◎

磁性体以外の構成材料としてはベースフィルム、結合剤、添加剤がある。初期に使用された TAC は加水分解の課題があったが PET、PEN、アラミドは保存による劣化の懸念はないと考えてよい。結合剤ではポリウレタンを加水分解しにくい構造にする、硬化剤の

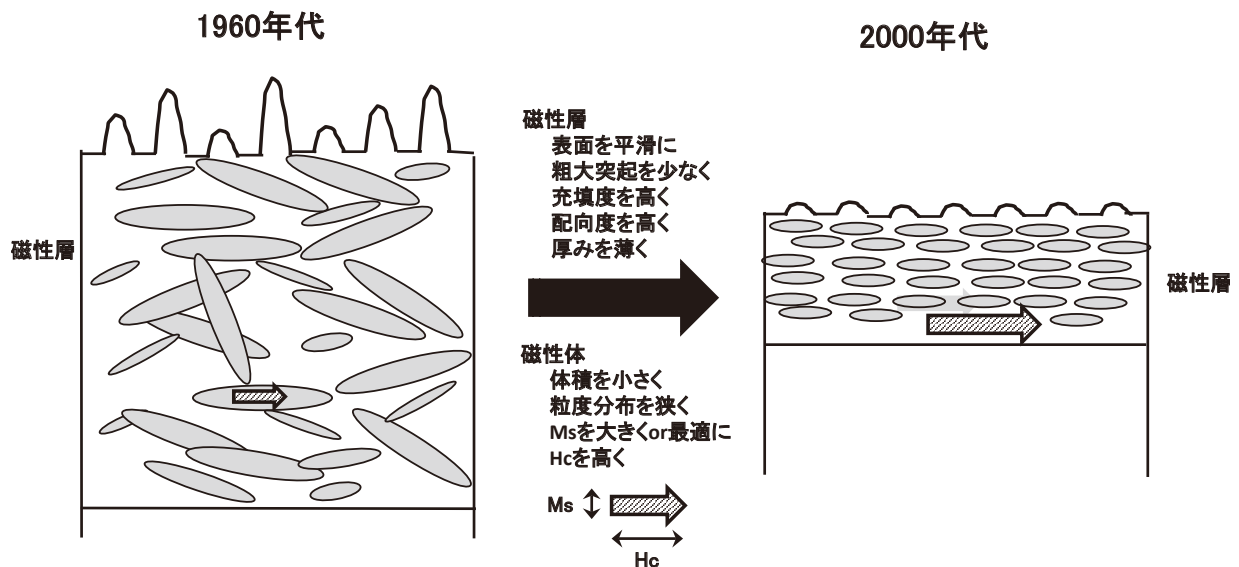
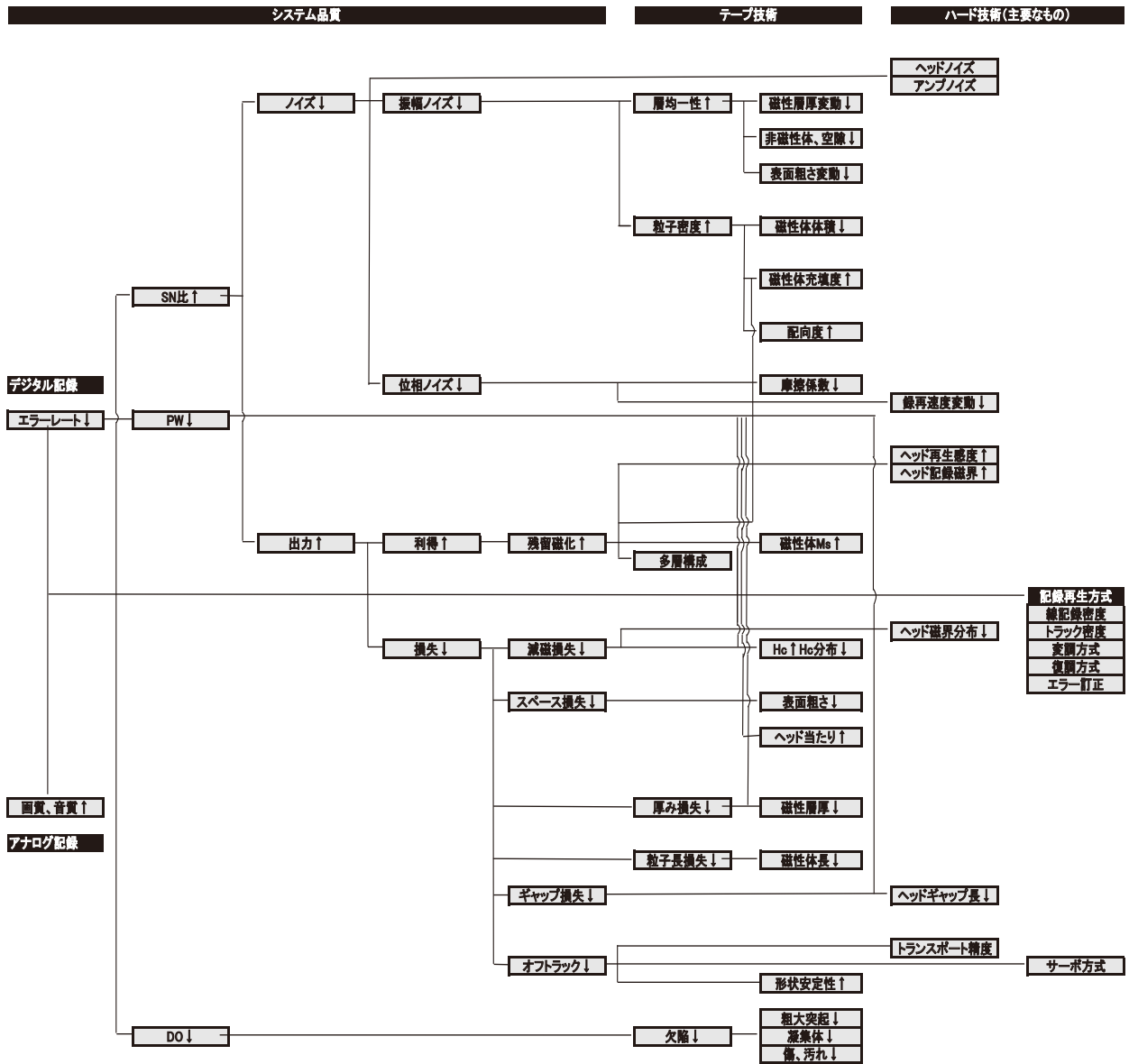


図3.13 磁気テープの設計要素と磁性層のイメージ図

使用により結合剤を架橋させるなどにより保存性を確保している。添加剤は特に低分子量の脂肪酸エステルなど液状で蒸気圧の低い材料の挙動解析が必要である。これら有機材料の化学的、物理的变化についても詳細に検討されている^{[10][11][12]}。

記録磁化の減衰は磁性体自体の変質によっても発生するが、安定な磁性体では強い磁石に近づけるなどしない限り従来の磁気テープでは記録磁化は半永久的である。しかし、高密度化が進み磁性体を微粒子化してくると、熱揺らぎと呼ばれる現象により時間とともに磁化が減衰するという原理的な新たな課題に直面してくる。磁性体が小さくなりある限界の体積に近づくと、環境の熱エネルギーによって磁化の源となつてい電子スピンの振動で揺らぎ徐々に反転し磁化が減衰、最終的には消滅するという現象である。

磁化を担うスピンの安定性の指標である磁気異方性エネルギーは体積が小さくなると低下していく。これが熱によるスピンの振動エネルギーと等しくなる体積を臨界体積と呼び以下の式で表される。

$$\text{臨界体積} = \frac{\text{ボルツマン定数} \times \text{絶対温度}}{2 \times \text{磁気異方性定数}}$$

Msが大きくHcが高いと磁気異方性定数が大きくなり臨界体積を小さくすることができる。この値は磁性体によって異なるが、テープ用の磁性体の典型的な数値を用いると常温での臨界体積は20 nm³程度となる^[13]。臨界体積以下での磁性体の挙動は超常磁性と呼ばれ、外部磁界で磁化するが磁界を取り去ると熱エネルギーにより磁化が消滅するため記録材料として使用することができない。最新の磁気テープの磁性体の体積は2000 nm³程度であり臨界体積より十分大きい。しかし、臨界体積に近づくと従い確率的に発生する熱ゆらぎが無視できなくなる。また、体積分布が広いと微粒子成分が熱揺らぎの影響を受け、高密度記録で大きくなる減磁界は熱揺らぎを加速させるため、磁化の時間減衰が顕在化し始める。従って、微粒子化に当たっては実験的な確認が必要になる。臨界体積に対する磁性体体積の比率を表す以下の値を磁化安定性の指標として用いることがあり、60以上が目安とされている^[14]。

$$\text{磁化安定性指数} = \frac{\text{磁気異方性定数} \times \text{粒子体積}}{\text{ボルツマン定数} \times \text{絶対温度}}$$

なお、この課題は同じ磁気記録であり高密度化で先

行するHDDが先に直面した。HDDでは磁化を安定化させる反強磁性層を磁性層の下地に設ける、原理的に高密度で磁化が安定する垂直記録方式を採用するなどの技術によりこの障壁を乗り越えている。

磁性材料および記録再生特性の保存性については多くの実験報告があり、JEITA（電子情報技術産業協会）では、LTOテープを用い高温多湿（70℃ 80%）の加速試験でMsと再生信号、エラーレートの変化を求めると、磁気テープの長期保存の安定性に関する調査を行っている。

図3.14に示すようにメタル磁性体を用いたLTO-5は、常温保存で20年に相当する時間でMsは約10%減少すると推定される。これは磁性体の酸化によるものと考えられるが、図3.15に示すとおりエラーレートの上昇はエラー訂正の限界より十分に低く実用上は問題なく20年以上の寿命があると結論づけている。

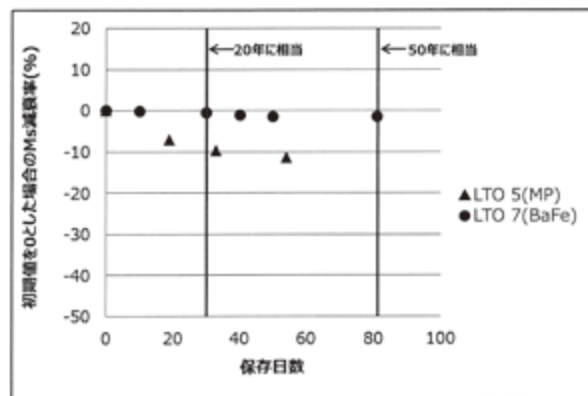


図3.14 LTOテープ 磁化の経時変化^[15]

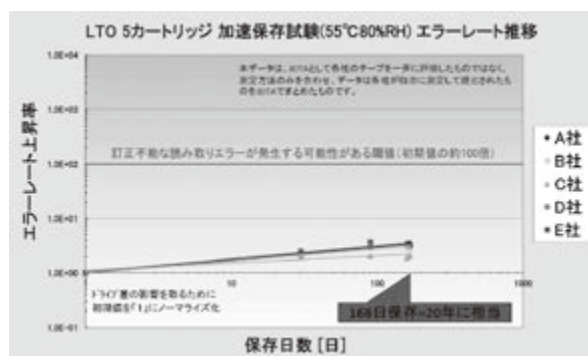


図3.15 LTO5のエラーレート経時劣化予測^[16]

酸化物でより安定なBaフェライト磁性体を用いたLTO-7では、図3.14に示すように50年相当の経時でもMsの減少はほとんどない。熱揺らぎなどの影響によるエラーレート悪化の問題もないことが確認され寿命は50年以上と推定されている^{[17][18]}。

記録媒体の損傷には、磁性層やテープエッジの損傷、テープの変形、デブリ（磁性層の削れ屑などの蓄

積物)の発生とヘッド付着など様々な現象がある。各現象を観察し発生メカニズムを調べ個々に対策するのが開発の実態であるが、基本的な設計の考え方は、①摩擦係数を下げる、②力学強度を高めるの二つである。

耐久性の多くの問題はテープとヘッドなど走行系の部材との摺動により発生するため、磁性層の摩擦係数を低くし接触により発生するエネルギーを小さくすることが基本設計となる。しかし、高密度化に向け磁性層表面を平滑にすると摩擦係数が上昇するためそれを解決する技術が必要になる。具体的には表面形状の設計、潤滑剤の選定などである。図3.16は磁気テープの表面形状の設計により平滑化と摩擦低減の両立を実現した例である。試験サンプルは巨視的にみた表面は平滑化しているが、微視的にみると微細な突起を有するため摩擦係数は低下している。

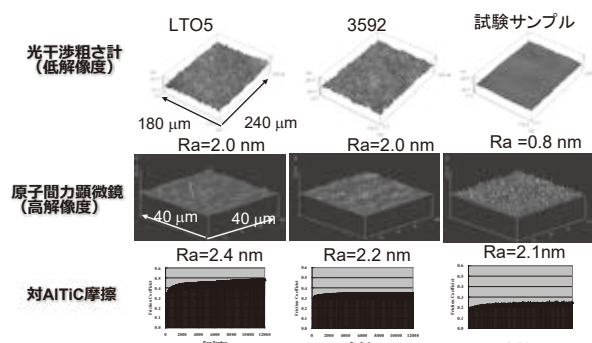


図3.16 平滑化の表面設計と摩擦係数

潤滑剤は境界潤滑剤と流体潤滑材を併用することで最適化している。潤滑剤の挙動を磁性層内で制御できることが理想であり、例えば磁性層表面に偏在化させることで効果を最大化する、層内部に含有させることで補給効果をもたせるなどの試みがなされている。潤滑剤をオーバーコートし表面に偏在化する手法はCo蒸着テープで用いられている。

塗膜強度の向上はヘッドとの摺動により生じるダメージやデブリの発生を抑止するとともに、塗膜表面の流動により平滑化し摩擦係数が上昇することを抑制する効果がある。具体的には高強度の結合剤の採用、硬化剤による塗膜の架橋、分散向上による磁性体と結合剤の接着強化、研磨剤による磁性層の保護、カレンダー処理による表面硬質化などの手法がとられる。ヘッドの摺動によって起こる現象に対してはテープの極表面の特性が特に重要である。例えば分子量分布をもつ結合剤で低分子量の成分は表面に存在しやすい傾向があり、これらは粘着性があるためデブリ発生の原因となる場合がある。このようなときは表面処理によって除去するなどの施策をとっている。なお、塗膜強度が

強すぎるとヘッド摩耗が加速するため、特に塗膜を保護しかつヘッド汚れを除去する効果をもつ研磨剤処方ではヘッド材質も考慮し最適化している。

3.6 テープを構成する材料技術

3.6.1 磁性体は記録のかなめ

(1) 強磁性を示す材料とは

あらゆる物質は原子や化合物単位で何らかの磁性をもち表3.2に示すように分類される。磁気テープに用いられる強磁性体は磁性の中で特殊な磁性とすることができる。強磁性体は記録素子そのものであり、磁気テープにおいてもっとも重要な技術要素である。反磁性、常磁性、反強磁性の3種の磁性は磁界によって磁化するが僅かなため実質的には非磁性として扱われることが多い。

表3.2 磁性の種類

磁性の種類	不対電子	自発磁化	
		大きさ(向き)	物質例
常磁性	有	小(正)	O_2, Al, Pt, Mn
強磁性(フェロ磁性)	有	大(正)	Fe, Ni, Co
強磁性(フェリ磁性)	有	大(正>逆)	$Fe_2O_3, BaO \cdot 6Fe_2O_3$
反磁性	無	小(逆)	Cu, Ag, Au, Zn
反強磁性	有	無(正=逆)	FeO, CoO

材料が強磁性を示すかは以下の4つの要因で決まる。

強磁性発現の要因

- ・不対電子
- ・スピン相互作用
- ・結晶構造
- ・材料形状

強磁性の発現は原子核に不対電子があり、その相互作用(電子スピンの同じ方向に並ぼうとする力)が強くと同じ方向に向きやすい場合であり、電子のスピンおよび軌道運動によって大きな磁性が発現する。原子の3d軌道の不対電子が4個の遷移金属である鉄(Fe)、3個のコバルト(Co)、2個のニッケル(Ni)が強磁性を示す代表的な原子である。これらの金属、およびそれらを含む合金や化合物が強磁性を示し永久磁石の原料となっている。また4f軌道に不対電子をもつサマリウム(Sm)、ネオジウム(Nd)もその化合物が強磁性を示し高性能の永久磁石として広く利用されている。

不対電子をもつが電子スピンの相互作用が小さい原子は常磁性を示し、磁界によって同方向に磁化される

がその値は小さい。電子殻に不対電子をもたない原子は反磁性を示し磁界をかけると逆方向に僅かに磁化されるがその値は小さい。

以上のように原子の強磁性は電子配列に由来するが、材料としての磁性は結晶構造や形状にも大きく依存する。原子が不対電子をもつが結晶構造において正方向と逆方向の数が同じ物質は、電子スピンの磁性が相殺され自発磁化をもたない反強磁性を示し、磁界によって磁化されるがその値は小さい。

金属原子や金属化合物はいくつかのタイプの結晶構造をもつ。それによって電子スピンの配置や向きが決まるだけでなく、結晶内では電子スピンの挙動も変わってくるため、物質全体としては結晶構造が磁性に大きな影響を及ぼす。結晶内でもスピンの相互作用が強く同方向に配列して強い磁性を示すものをフェロ磁性体（狭義の強磁性体）と呼び、金属の Fe, Co, Ni がこれに分類される。磁性の源である不対電子が5個のマンガン (Mn) がほとんど磁性を示さないのは、Mn 結晶ではスピンの相互作用が弱く同方向に揃わないためである。

スピンの正逆両方向に存在し一部の磁化が相殺されるが、差分の電子スピンの強磁性を発生する材料をフェリ磁性体（広義の強磁性体）と呼ぶ。多くの酸化物系の磁性体がこれに分類される。このような結晶構造で発現する磁性は結晶磁気異方性と呼ばれ、磁化しやすい軸方向をもつことが多い。

物質としての磁性はその形状によっても変わってくる。棒状の長い形状の方が磁化しやすいが、これはN極とS極が離れているほうが安定で磁化が残りやすいからである。このように物質の形状により発現する磁性を形状磁気異方性と呼んでいる。

磁気テープで用いられる磁性体は磁化しやすい方向（磁化容易軸）と磁化しにくい方向（磁化困難軸）、すなわち磁気異方性をもち、その異方性は結晶構造と粒子形状に由来している。

(1) テープ用磁性体の進化は4段階

強磁性材料は粒子または薄膜とすることで磁気テープ用の材料として使用できる。材料の選択や設計は構成原子、結晶構造、物質形状の観点でなされるが、実際に実用化された粒子型の磁性体はγ酸化鉄（マグネタイト）、マグネタイト、Co酸化鉄（Coフェライト）、二酸化クロム、金属合金粉末、バリウムフェライト（以下Baフェライトと略す）の6種である。これに薄膜型のCo蒸着を加えると合計7種である。

既述のとおり磁性体のグレードを決める重要な基本

特性はMs、Hc、および粒子サイズである。表3.3に実用化された磁性体のMsとHcの大まかな比較を行った。Ms、Hcは実用レベルの上限値でありシステムに合わせて調整されるが、大きく分けると4つの世代に分類することができる（単位は磁気分野で現在も慣用的に用いられている cgs 系を用いている）。

表 3.3 磁気テープ用磁性体の特性比較

	磁性体	実用時期	Ms	Hc
		(年)	(G·cm ³ /g)	(Oe)
第1世代	γ酸化鉄	1936	~75	~400
	マグネタイト	1936	~90	~400
第2世代	二酸化クロム	1967	~100	~800
	Co被着酸化鉄	1974	~90	~1000
第3世代	メタル	1978	~150	~2700
	コバルト蒸着	1984	~150	~1600
第4世代	Baフェライト	2011	~60	~3500

第一世代は磁性をもつことが古くから知られていたγ酸化鉄やマグネタイトであり、1960年代までの磁性体はすべて酸化鉄系が使われたがHcは最大でも400 Oe程度であった。

その後、記録の高密度化に伴いHcの高い材料が用いられるようになり、第二世代として1970年代に入り二酸化クロム、Co被着酸化鉄が登場した。特にCo被着酸化鉄は1000 Oe程度までが実用化され、1970時年代後半から1980年代にかけてのほとんどの磁気テープシステムで採用された。

第三世代はMs、Hcとも高いメタル磁性体とCo蒸着である。メタル磁性体はコンパクトカセット、Co蒸着はマイクロカセットで1970年代の後半にはすでに実用化されていたが、本格的な応用は1980年代の後半からであった。メタル磁性体はその後20年にわたり磁性材料の主役となった。Co蒸着は金属薄膜で記録材料としてはメタル磁性体の競合であり、一部の民生用、業務用システムで採用された。

第四世代のBaフェライトは、Msは小さいがHcと微粒子化の両立が可能で、その形状と異方性から垂直方向に磁化成分をもちやすい。超高密度の記録に適する材料であり最新のコンピュータ用テープに採用されている。

HcとMsを高めることが全周波数領域で出力を高めるための基本的な設計であるが、ノイズを下げSN比を高めるためには粒子サイズを小さくすることが必要である。これはノイズが記録領域に含まれる粒子数の平方根に反比例するからである。

しかし、微粒子化では単に粒子形成の難易度が高いだけでなく、MsやHcなどの重要な磁気特性を保持しにくくなるという課題が生じてくる。微粒子化する

と単位体積当たりの表面積が増加するが、磁性体の表面は磁性を持ちにくく、特に表面に酸化防止のための保護層が必要なメタル磁性体ではその影響が顕著である。また保存性、耐久性などの実用特性も微粒子化で低下しやすい傾向がある。磁気特性を高めつつかつ磁性体の粒子サイズを小さくしていくことが磁性体技術の普遍的な課題である。

(2) 磁性体のスタンダード 酸化鉄

酸化鉄は磁気テープの歴史の前半における唯一の磁性体であり、 γ 酸化鉄 (γ - Fe_2O_3) とマグネタイト (Fe_3O_4) がある。各々磁赤鉄鉱、磁鉄鉱として自然界の鉱物としても存在し、磁性をもつ材料として早くから知られ磁石として使われていた。酸化鉄は Fe 原子の不対電子に由来する磁性をもつことができるが、材料としての磁性の強さはその結晶構造と粒子形状によって決まる。同じ Fe_2O_3 の化学式でも赤鉄鉱と呼ばれ赤色の塗料としても使われる α 酸化鉄 (α - Fe_2O_3 、ヘマタイト、通称ベンガラ) は γ 酸化鉄とは異なる結晶構造でスピンの向きが反平行 (逆向き) になる反強磁性体であり強磁性は発現しない。

マグネタイトは 2 価と 3 価の Fe を含む $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ で示され、図 3.17 のスピネル型と呼ばれる構造をとる。3 価の Fe のスピンの半分が反平行であるため磁性は 2 価の Fe から発現し M_s の理論値は $96.5 \text{ G} \cdot \text{cm}^3/\text{g}$ である。

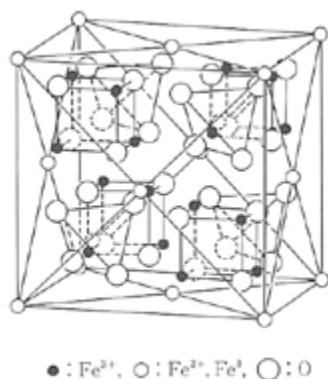


図3.17 マグネタイトのスピネル構造^[19]

γ 酸化鉄はマグネタイトと同じスピネル構造だが、3 価 Fe のみで構造の一部のサイトが空位であるため平行と反平行のスピンの数が同数にならない。その差分が磁性として発現し M_s の理論値は $86.3 \text{ G} \cdot \text{cm}^3/\text{g}$ である。マグネタイトの M_s は γ 酸化鉄より大きく基本特性は優れているが、当初は磁気特性が温度で変化しやすいという課題があったため主に γ 酸化鉄が用いられた。

酸化鉄を磁気テープに用いるためには、細長い形状

の微粒子の粉体にし形状磁気異方性による H_c を発現させる必要がある。製法には蓚酸第一鉄の熱分解、カルボニル鉄粉の酸化などがあったが、ゲーサイト (α - FeOOH) を出発原料とした湿式法を 1940 年代に確立したのが米国のカムラス (M.Camras) であった。得られた H_c は 250 Oe であった。その後の酸化鉄の製法は同方式がベースとなっている。

図 3.18 は磁性酸化鉄の代表的な製法を示したものであり、 γ 酸化鉄はマグネタイトを酸化することで得られる。酸化鉄に限らず磁性体は①粒子を小さくする、②粒子分布を狭くする、③高い針状比を得る、④粒子の欠陥 (空孔や枝分かれ) をなくす、⑤粒子同士の焼結を防止する、などが製法の技術開発の重要なポイントである。磁性体の M_s は構成元素によって概ね決まるため、微粒子化と高 H_c 化を両立させる形状制御の技術、特に粒子形状が決まるゲーサイトの生成条件が重要である。添加元素、焼結防止剤、反応条件などの様々な技術開発により酸化鉄の高性能化が進んだが、生産プロセス全体に渡るものであり各社ノウハウの部分も多い。

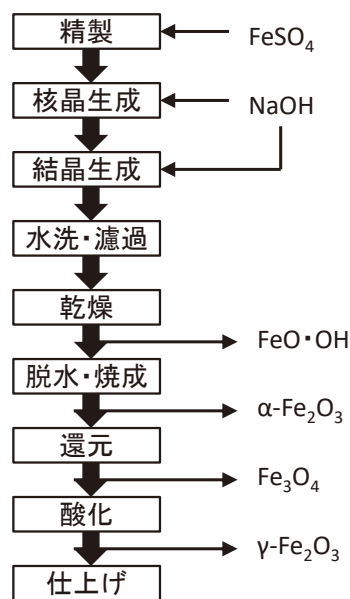


図3.18 磁性酸化鉄の製法

米国では 3M が磁気テープ用酸化鉄を開発し 1948 年に録音テープ「Scotch 111」を発売、その後も磁性体の自社での開発を進めた。またファイザー (Pfizer) は MO2228 というその時代の代表的な酸化鉄を生み出している。しかし、1970 年代に入り更なる微粒子化による高性能化が求められると日本メーカが技術開発を先導するようになった。

日本では 1949 年に磁気テープ開発を始めたソニー

を皮切りに、テープメーカー各社が1950年代から独自に酸化鉄の開発を進めた。1960年代に入ると粉末メーカーでも磁気テープ用酸化鉄の開発、生産が始まった。米国からスクラップ法という水溶液反応の技術を導入し、酸化チタン製造の副生成物である硫酸鉄を原料にした着色顔料用の酸化鉄を生産していたチタン工業は、同法で合成した黄色顔料のゲーサイトを出発原料とした磁性酸化鉄の生産を開始した。戸田工業は水溶液反応による種々の酸化鉄の合成法について共同研究を大学と行っているが、湿式法と呼ばれる方法で合成したゲーサイトの形状制御の技術を詳細に検討し、それを出発原料とした磁性酸化鉄の生産を開始した。湿式法で特にアルカリ側で反応させたゲーサイトを出発原料として磁性酸化鉄を合成すると、スクラップ法に比べ針状比が高くかつ粒度が揃った微粒子酸化鉄を制御して得ることができた。戸田工業によって開発されたこの磁性体は、海外のメモリテープメーカーから「Super Delux」と称賛されたため「SD 磁性体」と命名された。共同開発先のTDKの柘原重三はこの磁性体を用いたカセットテープ「SD」を1968年に発売した^[21]。この名は「Super Dynamic」の略で、同テープはコンパクトカセットが初めて音楽用として認知されるきっかけとなり、その後の高音質化に向けた磁性体開発を加速させることになった。最も開発が盛んであった1980年代には石原産業、堺化学など数社が磁気テープ用酸化鉄に参入した。テープメーカーも磁性体を開発生産していたが、VHSなど磁気テープが大量生産の時代になると、生産はこれら専門メーカーにシフトして行くようになった。

1970頃までのオープンリール方式のすべての磁気テープシステムは酸化鉄を用いており、酸化鉄を用いたカセットテープのTYPE I (ノーマルポジション) は今日でも市販されている。Hcは400 Oe程度が上限であるためその後の新規システムでは使われなくなったが、酸化鉄の技術は製法が類似する第二世代のCo被着酸化鉄、第三世代のメタル磁性体へと受け継がれていった。

(4) 突如現れた黒船 二酸化クロム

Cr金属結晶は反強磁性体だが、酸化物の結晶構造では電子スピンの交換作用が働き強磁性を示すようになる。米国のDuPont社は1961年に二酸化クロム(CrO₂)磁性体の針状微粒子化に成功し、従来の酸化鉄に比べ2倍近い高いHc(500~600 Oe)を実現した。

1960年代当時の磁気テープはオープンリール方式

で記録面積が広くHcが300 Oe程度の従来の酸化鉄でも十分な性能を実現できたため、二酸化クロムの必要性がすぐに高まったわけではなかった。しかし、カセットテープの時代になりテープが小型化すると、優れた音質を得るには高密度での記録が必要になり高いHcの材料が求められるようになった。さらに音声信号よりはるかに高密度の映像信号を記録する小型のVTRの開発が始まり、二酸化クロムは次世代の有力な磁性体と見られるようになった。実際に1970年に入りカセットテープのクロムポジションTYPE IIとして実用化され、映像記録でもソニーが二酸化クロムを用いて家庭用ビデオの開発を進めた。コンピュータ用テープでもIBMは3480で二酸化クロムを用いた。

二酸化クロムはCr₂O₃とCrO₃を高温高压化で処理することで得られる。オートクレーブを用い直接針状結晶が生成され、熱処理による結晶変態を伴わないため粒子の空孔が生じないなど形状制御を行う上で有利な製法であった。そのため酸化鉄とは異なるいくつかの特徴をもっていた。高いHcは形状磁気異方性に由来するが、これは大きな針状比の実現によるものである。針状比が大きいとHcが高くなるだけでなく、磁場配向で磁性体が一定方向に並びやすくなるため角型比も高くなる。例えばカタログ値の比較ではあるがTDKが1975年に発売したTYPE IIカセットテープでCo被着酸化鉄を用いた「SA」の角型比は82%であるのに対し、同じTDKが1972年に発売した二酸化クロムを用いた「KR」の角型比は90%と高い値を示していた。また磁性体の粒子内の空孔が無いという特徴もありMsも酸化鉄より大きかった。

強磁性体はある温度以上になると常磁性を示すようになる。これは熱エネルギーが電子スピンを平行に保とうとする相互作用のエネルギーより大きくなるためでありこの温度をキュリー温度という。酸化鉄のキュリー温度は500℃以上と高いが二酸化クロムは約120℃と低い。この温度は磁気テープの使用環境を考えると実用上の問題にはならないが、一方でその特徴を逆に活かし転写テープとする試みもなされた。キュリー点の高い磁気テープをマスターテープとし、二酸化クロムのスレーブテープを高温下で接触させ、マスターテープの記録信号から発生する磁界で信号を転写させる熱転写と呼ばれる方式である。熱転写は高速で行うことができるので、レコーダを用いたダビングより効率的なソフトの複製が可能になるとの期待もあった。

以上のように二酸化クロムは当時としては画期的な磁性体であったが、次節で述べるCo被着酸化鉄の登場によりその座は奪われ、市場と開発の現場から姿を

消すようになった。二酸化クロムが磁気テープ用として衰退した理由としては以下がある。

二酸化クロムが衰退した理由

- ・DuPont がソニー1社に国内ビデオテープに限定した独占実施権を与えた
- ・使用には高額なサブライセンス料が必要なため他メーカは代替技術の開発を選択した
- ・対抗技術のCo酸化鉄が急速に進歩し、性能上の優位性がなくなった
- ・酸化鉄より硬質なためヘッド摩耗が多いなど品質上の課題があった
- ・「六価クロム問題」が発生し、クロムの環境や健康への影響懸念の風評があった（二酸化クロムは4価クロム）

その後、先に述べた針状の酸化鉄の基本製法であるカムラスのゲーサイト法の原料に数%のCo化合物を添加、針状ゲーサイトにCoを含有させることでCoフェライトを作成する多くの試みがなされた。適度な高Hcは得られたが以下のような問題が発生し技術的な解決ができず実用には至らなかった。

Co酸化鉄の実用化を阻んだ現象

- ・Hcが経時によって変化する
- ・熱によって結晶内でCoが拡散しMsが不可逆に低下する（加熱減磁）
- ・機械的な力で結晶に歪が発生し磁気特性が変化するため繰り返し再生で出力が低下する（加圧減磁）
- ・巻かれた状態で保存するとテープ間で磁気信号の写り（転写）が発生する

(5) ライバルを駆逐した日本のCo酸化鉄

$MO \cdot Fe_2O_3$ (Mは2価金属)の化学式をもつ物質はフェライトと総称され、1930年代初頭、東京工業大学の加藤与五郎、武井武によって発明がなされた極めて重要な工業材料である。フェライトは金属Mの種類によって様々な磁性を示し、大別すればMn-Znフェライトなどが示す軟磁性とCoフェライトなどが示す硬磁性に分かれる。前者はフェライトヘッドと呼ばれる磁気ヘッドの材料として用いられ、後者は永久磁石の材料として用いられている。

磁気テープで使用されたマグネタイトの化学式は $FeO \cdot Fe_2O_3$ で、これもフェライトの1種であり強いて言うなら鉄フェライトであるが、Mを他の金属に置き換えることでより高いHcを実現できる。その代表がCoフェライトであり磁気テープ用材料としての検討も行われた。

磁気テープ用にDuPontが開発したHcの高い二酸化クロムの登場に対し、その対抗技術として日本企業が開発し1970年中頃に実用化した磁性体がCo被着型の酸化鉄である。

Coフェライトは結晶磁気異方性が強く、そのままではHcが4000 Oeにも達し記録材料には使えないため、酸化鉄へCoを少量添加する検討が早くから行われた。1950年頃に西ドイツのアグファ（AGFA）はCo添加の酸化鉄を用いたテープを開発した。しかし、粒状であったためかHcは300 Oeと当時の酸化鉄250 Oeに比べ若干高い程度で特性が経時で劣化することもあり注目されなかった。

これらの現象の原因は、CoとFeと原子構造が似ており（元素番号の違いは1）結晶内でCoが拡散しやすく磁気異方性が変化するためであった。特に γ 酸化鉄の場合は結晶格子に空位のサイトがあるためCoがさらに拡散しやすくなった。

これに対し1971年にW.P.Hallerが γ 酸化鉄の表面にCoを被着することでHcを1800 Oeまで高めたとの報告を行ったが実用レベルのものではなかった。3Mは微量のCoを固溶させることでHcを若干高めたカセットテープを発売したが本質的な問題を解決したものではなかった。

酸化鉄へCoを表面に被着し内部への拡散を防ぐ方式をより詳細に検討し、実用レベルに発展させたのが日本企業であった¹²⁰⁾。TDKは「AVILYN磁性体」を戸田工業とともに開発、ほぼ同じ時期に日立マクセルは「EPITAXIAL磁性体」を開発した。また富士写真フイルムは γ 酸化鉄とマグネタイトの中間体にCo添加した「BERIDOX」を開発した。これらによりAGFAの検討開始から十数年、実用化が断念されていたCo添加による高Hc化がようやく日の目を見るに至った。Coを表面にのみ存在させたCo被着酸化鉄に対し、結晶内にCoを含む従来のものをCo固溶（ドーピング）酸化鉄、総称してCo変成酸化鉄と呼んでいる。これらの技術については第4章でさらに解説する。

日本のメーカによって開発されたCo被着酸化鉄が最初に実用化されたのは1970年代中頃のカセットテープのTYPE IIである。その後にはVHS、 β マック

ス、放送用のβカムなど、1980年代中頃までに開発された磁気テープシステムのほとんどがCo被着酸化鉄を用いるようになった。磁性体Hcは当初は500～700 Oe程度であったが、1987年に発売されたS-VHSでは900～1000 OeのCo被着酸化鉄が用いられた。HcはCo量で決まり実験的には当時のメタル磁性体と同じ1500 Oe程度まで高めることができた。

Co被着をマグネタイトに行うことでMsを大きくし性能向上を図ることも行われた。VHSはテープ終端を光透過率で検出していたためテープの遮光性を高める必要があった。光透過率の低いCo被着マグネタイトは厚みを薄くすることができるため、コストと性能を両立させるテープ設計上も有利であった。磁性体は戸田工業が開発し日立マクセルが1989年に発売したVHSテープのHGタイプ「HGX BLACK」は、ブラックマグネタイトと称しマグネタイト使用を前面に打ち出した商品であった。命名はγ酸化鉄が褐色であるのに対しマグネタイトは黒色であったところからきている。

1980年代の磁気テープ最盛期を支えたのが日本発のCo被着酸化鉄であった。しかし、1980年代後半に第三世代メタル磁性体が台頭し、1990年代以降は新規の磁気テープシステムに採用されることはなくなった。

(6) 磁性体の優等生 メタル(合金)粉末

1978年の3Mの発表を発端に、1979年にかけて各テープメーカーから一斉にメタルカセットテープが発売された。メタル磁性体はFeを主体としNiなどを含む合金粉末であり、酸素を含む酸化鉄系の磁性体に比べMs、Hcとも約2倍と高く極めて高い磁気エネルギーをもつ。いよいよ本命登場といったところであった。

その商用化を可能にするメタル磁性体の量産化に初めて成功したのは日本の関東電化工業であった。関東電化工業60年史によると、同社がメタル磁性体の研究開発を開始したのは1974年であり、日立マクセル、日本コロムビアと共同研究が始まった。メタル磁性体は記録材料としては優れるもHcが1000 Oe以上で、当時の磁気ヘッドの主流であったフェライトヘッドではヘッド磁界が弱く十分に記録することができなかった。そのため実用化にはヘッドの技術進歩を待つ必要があった。

1978年に日本ビクターがセンダストヘッドを搭載したメタルポジションTYPE IV対応のカセットデッキを発売するに至り、メタルカセットテープの実用化が可能になった。量産化の準備をいち早く進めていた関東電化工業は「MAP」(Magnetic Alloy Powder)

の商品名でメタル磁性体生産の先陣を切った。メタルテープを最初に発売した3Mの磁性体は実験設備によるものであり、量産の準備は立ち遅れていた。そのためカセットテープ用メタル磁性体の供給は、関東電化工業がほぼ独占することになった。

VHSテープの後継として期待された8mmビデオなどその後のメタル磁性体の需要拡大が期待されたため、関東電化工業以外に戸田工業、三井東圧化学(現三井化学)、日産化学、後にメタル磁性体の最大の供給メーカーとなる同和鉱業(現DOWAエレクトロニクス)など多くの企業が開発に乗り出した。

実際にシステムの高密度記録化が進むと、1980年代後半から磁性体はそれまでの酸化鉄系からメタル磁性体に移行し、8mmビデオ、放送用ビデオ、コンピュータ用テープでその需要は急激に拡大、近年に至るまで磁気テープ用磁性体の主役の座にあった。1990年代に入ると磁性体の技術開発は同和鉱業が主導するようになり、供給も同社の磁性体を中心となっていた。

メタル磁性体は金属であるため酸化鉄にはない多くの技術課題があった。一番大きな問題は酸化しやすい、すなわち錆び易いことである。メタル磁性体の主成分はFeであり特に微粒子の粉末では空気に触れる表面積が大きくそのまま放置すると発火してしまう。そのためメタル磁性体の表面には薄い酸化被膜が形成されている。

テープの状態では磁性体はさらに表面がポリマーで被覆されているので製品としての安全性に問題はないが、高温高湿の環境下に長期間置かれると緩やかに酸化が進みMsが低下するため実用上問題のない範囲に酸化を抑える必要があった。また粉体として扱う製造工程では表面に酸化被膜をもっているメタル磁性体は発火の危険があり、空気を遮断するなど細心の注意が必要であった。開発初期の頃は分散や乾燥のプロセスで発火するといったトラブルも頻繁に発生したと言われている。

メタル磁性体の表面の酸化被膜の厚みはnmオーダーと極めて薄い、高密度化に伴い微粒子化が進むと表面積が増加するため磁性をもつ金属コアの体積が小さくなり磁気特性が急激に低下する。例えば、お饅頭の皮は中の餡子が出ない程度に薄いほうが美味しいが、皮の厚さが同じでお饅頭をどんどん小さしていくと中の餡子が占める割合が急に小さくなってしまい、お菓子として魅力がなくなるのと同じである。従って、如何に薄い酸化被膜で安定性を確保するかがメタル磁性体の微粒子化における重要な技術ポイントであった。

メタル磁性体の製法は数種類あるが、図 3.19 に実用化された代表的なメタル磁性体の製法の例を示した。

前半の工程は γ 酸化鉄の製法と類似しており、酸化鉄を還元することでメタル磁性体を生成している。ゲーサイトの形状制御が重要であることは酸化鉄と同じである。焼結防止のため Si や Al などをゲーサイトに固溶または被着させている。



図3.19 メタル磁性体の製造プロセス^[21]

オーディオ用メタル磁性体 (1980年代初期) ビデオ、データ用メタル磁性体 (1990年代中期)

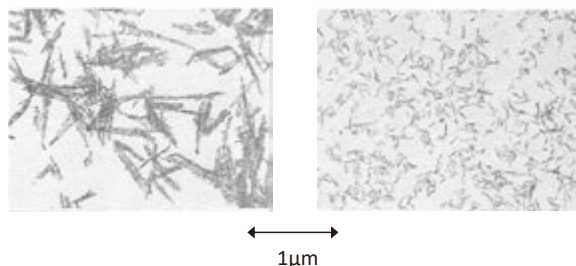


図3.20 メタル磁性体の微粒子化^[22]

メタル磁性体は 1990 年代に入り高 Hc 化を行いつつ図 3.20 のように微粒子化が進んだ。詳細は第 4 章で述べるが Co の導入による Fe-Co 合金化、紡錘型の形状の実現、焼結防止剤としての酸化イットリウム (Y_2O_3) 導入などの新たな技術により実現できたものである。これらにより微粒子化しても高い Hc が可能になっただけでなく酸化による Ms の低下も改善し、メタル磁性体は磁気テープシステムの高密度化に大きく貢献することになった。

図 3.21 に主要なデータテープに用いられたメタル磁性体の Hc を、図 3.22 にはその粒子体積の推移を示した。10 年以上に渡り高 Hc 化と微粒子化を両立し続けたメタル磁性体だが、2005 年頃から Hc の向上に

飽和傾向が表れるようになった。これは微粒子化によってコアが小さくなり磁気特性を維持しにくくなったためである。そのため 2010 年代に入り新規のシステムは次に述べる Ba フェライトにとって替わられるようになった。

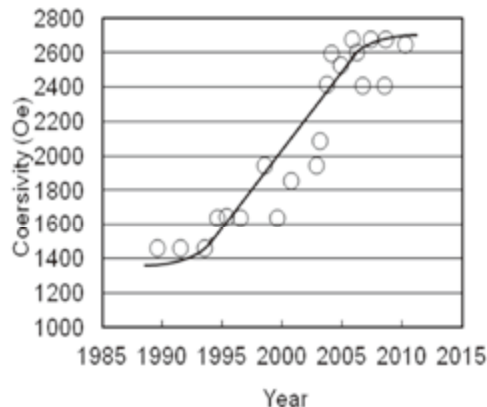


図3.21 メタル磁性体のHc推移

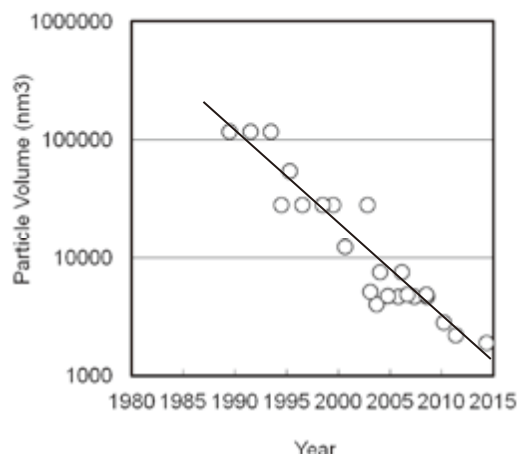


図3.22 メタル磁性体の粒子体積推移

(7) 磁性体の異端児 Ba フェライト

$BaFe_{12}O_{19}$ の化学式で示されるバリウムフェライト (以下 Ba フェライト) は強磁性を示し、1952 年にオランダの Philips が永久磁石として実用化した。Ba をストロンチウム (Sr) や鉛 (Pb) に置き換えてもよくこれらは六方晶フェライトと総称されている。少し複雑ではあるが図 3.23 に示すように Fe と O からなるスピネル構造の S 層と Ba, Fe, O からなる六方晶構造の R 層を交互に重ねたマグネトプランバイト型と呼ばれる結晶構造をもっている。

Ba フェライトを微粒子化し磁気テープ用材料として用いる研究をもっとも早くから熱心に行っていたのは東芝であった。最初の特許は東芝から 1978 年に出願されている^[23]。粉体メーカーでは戸田工業が積極的に行っていた。

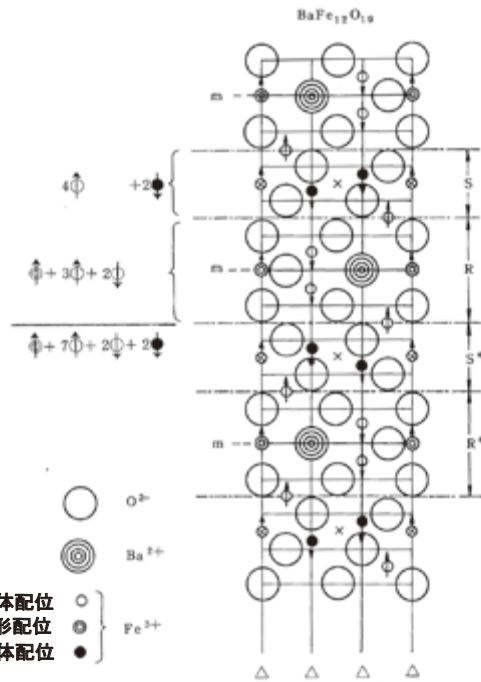


図3.23 Baフェライトの結晶構造^[24]

図 3.24 に示すように酸化鉄、二酸化クロム、メタル磁性体など磁気テープ用の他の磁性体は細長い針状で、主に形状磁気異方で強磁性を示し針状の方向に磁化容易軸がある。これに対し Ba フェライトは結晶磁気異方が強く薄い六角板状で板面に垂直方向に磁化容易軸がある。その特徴は大きく異なる。

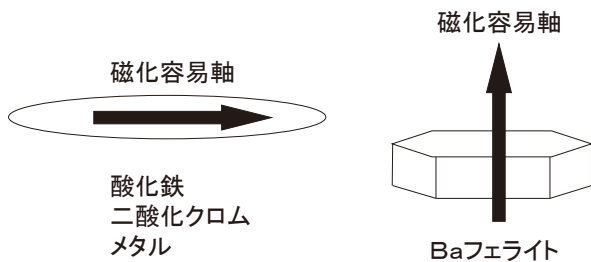


図3.24 磁性体の形状と磁気異方性の比較

代表的な製法は東芝のガラス結晶化法と戸田工業の水熱法である。ガラス結晶化法の製法の流れを図 3.25 に示した。Ba フェライトの原料となる BaO、Fe₂O₃ およびガラス形成物質である B₂O₃ の混合物を白金ルツボ中で溶融させ急冷することでガラス（非晶質体）を作成する。次にガラス結晶化温度より高い温度で再加熱しガラスマトリクス中に微粒子の Ba フェライトを結晶成長させる。最後に希薄酸溶液でマトリクスの B₂O₃ を除去し Ba フェライト磁性体を得る方法である。

水熱法は、Ba イオンと Fe イオンを溶解したアル

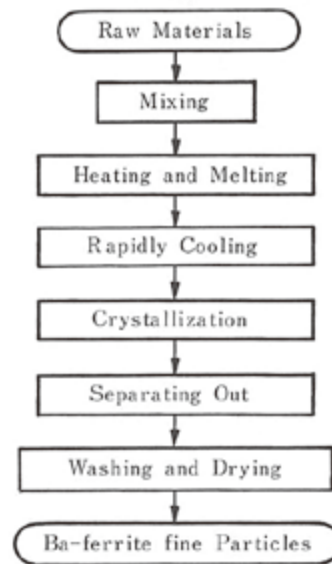


図3.25 Baフェライトのガラス結晶化法^[25]

カリ水溶液をオートクレーブ中で臨界温度以下の高温高圧下で反応させ Ba フェライト粒子を生成させる方法である。

純粋な Ba フェライトは結晶磁気異方性が高く Hc は 6000 Oe 以上になり、そのままでは磁気ヘッドで記録ができなため 3 価の Fe を種々の元素で置換することで Hc を下げていた。置換元素として Co、Ti、Zn、Ni、Nb などが用いられるが、これらの磁気特性は東芝によって詳細に研究された^[26]。

Ba フェライトは酸化鉄であり、その構造から Ms は最大でも 60 G·cm³/g 程度でメタル磁性体の約半分、他の酸化物系の磁性体に比べてやや小さくこの点は磁気記録用の磁性体として当初は弱点であった。それにも拘わらず 1980 年代に将来の磁性体として注目されたのは以下の特徴を有していたためである。

Ba フェライトの注目された特徴

- ・結晶磁気異方性のため磁性体を微粒子にしても高い Hc を維持しやすい
- ・板形状で垂直方向に磁化容易軸をもつため磁性体が上向きに配列しやすく垂直磁気記録の可能性をもつ
- ・Hc の分布を反映する SFD (switching field distribution) が小さく急峻な磁化反転が期待できる
- ・メタルや蒸着の金属系に比較し酸化物のため化学的に安定で経時による磁気特性の劣化がない

8 mm ビデオや S-VHS など磁気テープの高密度化が検討された 1980 年代半ば、Co 被着酸化鉄に替わる次世代の磁性体候補としてメタル合金、窒化鉄、Co 薄膜とともに Ba フェライトも候補となりテープメーカー各社が検討を行った。

しかし、Ms, Hc がともに高く磁気エネルギーに優れたメタル磁性体が次世代材料として選ばれた。S-VHS では Co 被着酸化鉄が Hc を 600 Oe から 900 Oe に高めることができたため、VHS と同じ酸化鉄系が引き続き採用された。

Ba フェライトはその特徴に注目されたにも関わらず選ばれなかったのはテープ化したときの特性が劣っていたからに他ならない。板状で磁性体同士が凝集しやすく分散や配向が針状の磁性体より難しい。また当時のアナログシステムの記録波長や磁気ヘッドでは高い Hc と微粒子の効果を引き出すことができず、一方で Ms が小さいためアナログ記録に必要な長波長の信号品質が劣っていた。

このような課題に対し、各種の元素を添加することで Hc を下げたり表面にスピネル層を形成し複合化することで Ms を大きくしたりする試みも行われたが、効果は中途半端であり逆に Ba フェライトの特徴を失わせることになった。

1990 年に東芝はテープではなく Ba フェライトを用いた 3.5 インチフロッピーディスク 2ED を発表した。容量 2.88 MB はそれまでの 2HD の 2 倍に過ぎずほとんど市場には出回らなかった。当時はメタル磁性体を用い 10 MB クラスのディスクが検討されていた時期であり Ba フェライトの実用化を焦った感は否めなかった。

以上のことは、当時のシステムや周辺技術が Ba フェライトの特徴を活かす状況にはなかったからとも言える。しかし、このような多くのネガティブな結果は Ba フェライトに対しマイナスの先入観をテープメーカー、システムメーカーに深く植え付けることになってしまった。メタル磁性体の急速な進歩もあり、その後の十数年間で Ba フェライトはほとんど忘れ去られた磁性体となっていた。

しかし、2006 年に富士フイルムと IBM が Ba フェライトを用いた記録密度 6.7 Gbps テープの技術発表を行い再び脚光を浴びることになった^[27]。記録容量にすると 8 TB であり、当時のメタル磁性体を使った LTO-G3 (容量 400GB) の 20 倍で業界の予想を覆すものであった。次世代磁性体の有力候補として再浮上し 2011 年に IBM と Sun Microsystems のハイエンドのコンピュータテープで Ba フェライトは実用化された。主力商品である LTO でも第 6 世代から採用され

ポストメタル磁性体を決定的なものにした。

再登場までの十数年間 Ba フェライトの種火を絶やさなかった富士フイルムの技術開発の経緯については第 4 章で詳細に述べる。

(8) 高度な芸術品 Co 蒸着膜

磁性体の粒子をポリマー中に分散し記録膜を形成する塗布型に比べ、薄膜型の磁気メディアは記録に寄与する磁性体の充填率を高くすることができる。さらにデジタル記録に有利な磁性層の薄層化も塗布型に比べると容易なため、磁気記録材料の究極の姿と言われてきた。実際に HDD は当初は塗布型であったが早くから薄膜型に切り替わり、現在はスパッタ成膜により高い記録密度を実現している。

磁気テープではポリエチレンテレフタレートなどプラスチック性のベースフィルムを用いるため、スパッタ法より低温で成膜できかつ成膜速度が速い真空蒸着法が検討されてきた。磁性膜は結晶磁気異方性が強い Co または Ni 等を含む Co 合金が主に用いられた。日本で早くから開発を進めたのは篠原統一を中心とした松下電器 (現パナソニック) であった^{[28][29]}。最初の実用化は 1978 年に松下電器がオングロームの商品名で発売したマイクロカセットであった。磁性膜の厚みは $0.3\ \mu\text{m}$ (300 nm) であり正にナノテクノロジーの世界に足を踏み入れた商品であった。商品名オングロームは $0.3\ \mu\text{m} = 3000\ \text{\AA}$ (オングストローム) から来ており命名自体は先取りしすぎた感はあるが、当時の塗布型の厚みである $3\sim 6\ \mu\text{m}$ に対し一桁以上薄くその後の磁気テープの薄層化を予感させるものであった。1984 年には塗布層の上に薄い蒸着膜を設ける構成のカセットテープも発売された。蒸着テープは ME (Metal Evaporated) テープとも呼ばれている。1990 年代に入りより高密度記録の映像用として ME テープの応用検討が活発化、民生用の Hi8、DVC、MICROMV、放送用の DVCAM、コンピュータ用の AIT などで実用化された。

蒸着テープの課題は、磁気異方性の向上と実用耐久性の確保であり、斜め蒸着と酸素の導入がブレークスルー技術となった。電子ビームで金属を気化しベースフィルム上に蒸着させると膜が柱状に成長しカラムを形成するが、高密度の磁気記録を行うにはこれらのカラムが磁氣的に独立しかつ十分な磁気異方性をもつことが必要になる。しかし、垂直方向に成膜すると成長した柱状カラム同士がくっ付き連続膜となってしまう十分な磁気異方性を得ることができなかった。

パーマロイ (Fe-Ni) を斜めに蒸着すると磁気異方

性が得られることを1959年にスミス (D.O.Smith) らが発見、1965年にはIBMのベイト (G.Bate)、スペリオテス (D.E.Speliotis) らがCo蒸着膜で系統的な研究を行っている。1970年代半ばに連続して入射角を変化させることで高い磁気異方性を実現し、斜め蒸着法を実用レベルに進化させたのが松下電器であった。

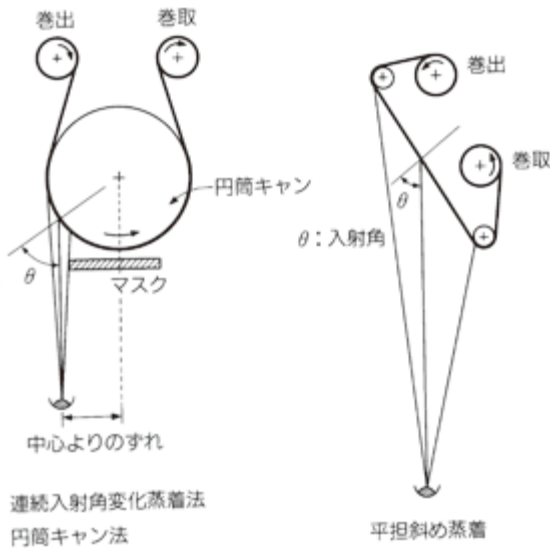


図3.26 斜め蒸着法の比較^[30]

図3.26は従来の方法と比較した松下電器による斜め蒸着法の概略図である。この方法は電子ビームにより蒸着したCo合金を冷却ドラム上で回転するベースフィルム上に積層していく方法である。入射角が0度附近から90度に向かいマスクングで規制される位置まで蒸着膜の角度が連続的に変化していくため、蒸着膜は図3.27のような斜めのカラム構造をとる。斜めに蒸着することでカラム間に適度な空隙が発生し、磁気的な結合を遮断することで磁気異方性を発現している。さらに蒸着源をドラム中心からずらし蒸着効率の低い高入射角(ベースフィルムに平行に近い角度)の蒸着量を多くすることで磁気異方性を高めている。また蒸着を酸素ガス中で行うことで反強磁性の酸化コバルト (CoO) が発生しこれもカラム間の結合を防ぐ効果があるとしている。

蒸着膜は金属なので環境の水分やガスに対する耐腐蝕性、ヘッドとの接触に対する耐摩耗性を付与することが必要となる。耐腐蝕性はNiとの合金化およ

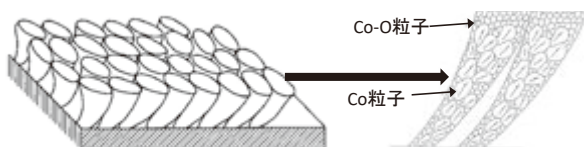


図3.27 斜め蒸着膜の構造^[31]

びCoOの導入によって向上した。耐摩耗性はパーフルオロポリエーテル (PFPE) などのフッ素系潤滑剤を蒸着膜にオーバーコートすることで確保している。HDDと同様にDLC (diamond-like carbon) の保護膜を設けることも効果的である。

MEテープは塗布型のメタルテープに対しMsが高くより薄膜化も可能であったためデジタルの高密度記録に適していた。また比較的低いHcでも高性能で薄膜化と合わせて磁界の弱いヘッドでも記録できるという長所があり、1990年代に数種のシステムでMEテープが採用された。しかし、同時期に開発された塗布型の薄層メタルはMEテープに匹敵する特性を示し、製膜速度などの生産性でMEテープより有利であったため、コンピュータ用など大面積を必要とするテープは塗布型が主流となった。

2000年代に入りソニーはMEテープのさらなる高密度化の検討を進め、2002年には記録密度11.5 Gbps、2007年には23 Gbps達成の技術報告を行った^{[32][33]}。これらの報告によると磁性膜の組成はCo-CoOで柱状のCoがCoOのマトリクス中に粒状で存在するグラニューラー構造をとり、磁性膜の厚みは28~35 nm、Hcは1280~1670 Oeである。

MEテープはその薄膜構造から斜め方向に磁化容易軸をもっている。そのためリングヘッドによる記録に対し長手方向に磁化容易軸をもつ塗布型とは異なる挙動を示す。長手方向に磁化容易軸をもつ塗布型テープの場合は、出口側のヘッド磁界で記録されたあとヘッドの尾引き磁界による記録減磁の影響を受ける。一方、MEテープでは斜めに向いた磁化容易軸とヘッド磁化の方向が一致する入口側で記録磁化が決まり、ヘッド磁界が磁化困難軸と一致する出口側では記録減磁の影響をあまり受けない。また磁化容易軸が斜め方向なので垂直磁化成分をもつことができる。これらはMEテープが高密度記録で優れた特性を示す理由の一つである。

なお、成膜速度が遅いため量産性や生産コストの点で実用化に課題はあるが、スパッタ成膜による磁気テープの高密度化研究も近年マクセル、ソニーによってなされている^{[34][35]}。

エピソード4 塗布と薄膜、有機と無機の争い

機能性材料の設計において、材料では無機と有機、製法では薄膜（スパッタや蒸着などドライ方式）と塗布（コーティングや印刷などウェット方式）の選択がしばしば発生する。硫化亜鉛などの金属化合物を用いた無機ELと炭素化合物を用いた有機EL、半導体材料を用いた無機太陽電池と色素などを用いた有機太陽電池、無機金属を用いたDVD-RWと有機色素を用いたDVD-R、二硫化モリブデン等の無機潤滑剤とフッ素系等の有機潤滑剤など例を挙げると意外と多い。また、製法において無機材料は薄膜、有機材料は塗布が用いられる場合が多いが必ずしも無機＝薄膜、有機＝塗布ではない。

磁気テープは複合材料であり有機と無機の両方の材料を用いる。また生産方法は塗布型と薄膜型の二つがある。塗布型の磁性粒子は無機材料だが記録層の基体は結合剤など有機材料である。一方、薄膜型は潤滑剤など有機材料も用いるが基体は蒸着やスパッタによる無機材料である。

磁気テープの歴史は塗布型と薄膜型の争いでもあり、各々が長所を伸ばし短所を補うことで双方が大きな進歩を遂げた。塗布型は粒子型でもあり異方性の確保や磁化の分離が容易だが、薄膜型はそのままでは連続膜になりやすいため、磁化を分離するグレイン構造を形成する技術を進歩させてきた。薄膜型は薄く均一に製膜できるが、塗布型は膜厚が厚くそのままでは高密度記録に不利であったため、塗布技術で薄層化を可能にしてきた。一般的な傾向としては、薄膜型は微細で緻密な構造を形成しやすく基本性能で勝り、塗布型は高速製膜が可能で量産性や生産コストに優れる。実用性の面では薄膜型は耐衝撃性や耐腐蝕性、塗布型は耐候性を付与する技術開発が必要になる。

磁気記録においても記録密度を重視するHDDは早くから塗布型から薄膜型に切り替わったが、使用面積が多く信頼性を重視する磁気テープは常に塗布型が主流であった。相対する材料と製法の技術競争はお互いを切磋琢磨する。塗布型の磁気テープの記録密度がここまで進歩したのも、薄膜型がお手本にあったからと筆者は感じている。

3.6.2 強度と寸度を決めるベースフィルム

ベースフィルムは塗膜を設ける基板であるが、一般的に塗膜の数倍の厚みをもつため磁気テープ全体の特性に大きな影響を与える。具体的には力学強度と形状制御に関わる以下のような性能が求められる。

ベースフィルムに求められる性能

- ・高い力学強度（弾性率、破断強度、残留歪）
- ・少ない寸度の湿熱変化
- ・制御された表面形状
- ・薄層化と小さい厚み変動
- ・良好な磁性層との接着性

当初、磁気テープはクラフト紙をベースとして用いその上に磁性層を形成していたが、その後より強度が高いプラスチックフィルムに置き換わった。1943年にBASFがアセチルセルロース（TAC）を磁気テープに使用、国内では富士写真フィルムが1957年に磁気テープ用にTACの生産を開始した。1960年

代前半までの磁気テープのベースフィルムはほとんどがTACであった。一方、ポリエチレンテレフタレート（PET）は米国DuPontと英国のICI（Imperial Chemical Industries）が1953年にフィルム化を行い上市、日本では1957年に東洋レーヨン（現東レ）がICIより技術を導入し1959年に「ルミラー」の商標で生産を開始した。その後富士写真フィルム、帝人、小西六写真工業（現コニカミノルタ）、三菱化成（現三菱ケミカル）がこれに続いた。PETは機械的強度、耐吸湿性、耐溶剤性、寸度安定性に優れており、その後TACに替わり磁気テープの標準的なベースフィルムとなった。

厚みは家庭用のカセットテープでは薄いPETベースが早くから使用され、1970年代に長時間テープC120用に6 μ mのPETベース、1980年代のVHSでは長時間テープT160に12 μ mのPETベースが使用された。

放送用、コンピュータ用などの業務用は高い信頼性が求められるため25 μ m程度の厚いベースフィルムが用いられていたが、図3.28に示すように1990年代に入り大容量化のニーズが高まり磁気テープの強みで

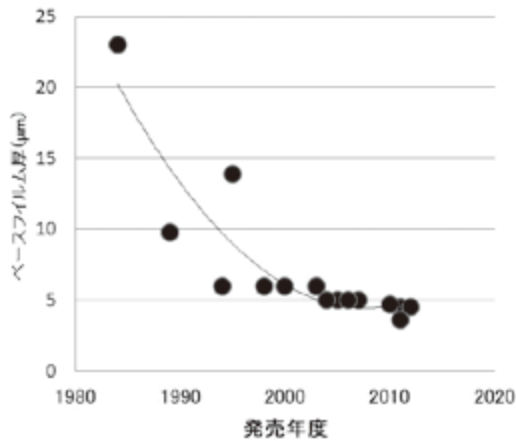


図3.28 コンピュータ用テープのベース厚みの推移

もある体積記録密度の向上のため、ベースフィルムの厚みは急速に薄くなっていった。

ベースフィルムの薄手化に伴い機械的強度を維持する必要が生じ、新たな素材として弾性率の高い帝人のポリエチレンナフタレート（PEN、商標名「テオネックス」）、東レのアラミド（商標名「ミクトロン」）が実用化された。図 3.29 にこれらベースフィルムの構造式を、図 3.30 に弾性率の比較を示した。ベースフィルムは縦横の延伸倍率によって長手（MD）方向と

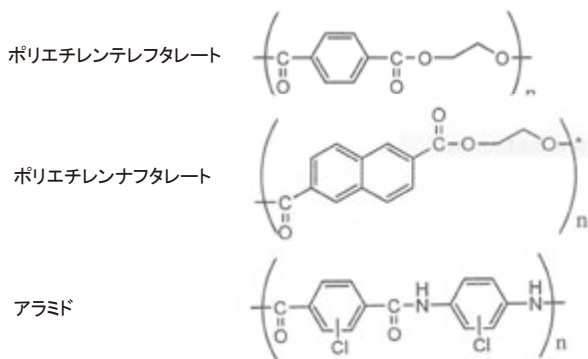


図3.29 磁気テープ用ベースの構造式

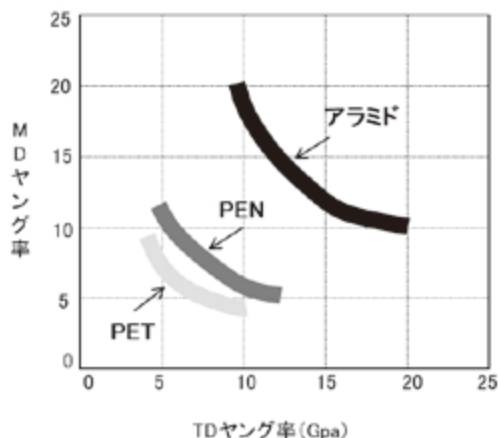


図3.30 ベースフィルムの弾性率比較

幅（TD）方向の弾性率の比率を変えることが可能だが、その合計の値はほぼ材料によって決まりアラミド >> PEN > PET である。

PENはS-VHSの長時間テープST-180、ローエンドコンピュータ用のDDS、放送用D5などで実用化されたあと、ミッドレンジコンピュータ用のLTOに用いられたことでPETに替わり主流のベースフィルムとなった。またアラミドはDDS2から採用され、民生用のMICROMV、ハイエンドコンピュータ用T10000Cなどに用いられた。5μm程度のベースフィルムの多くはPENかアラミドであるが、PETも東レがポリエーテルイミドの微粒子を複合化することで力学特性を強化したタイプを開発し一部の商品で実用化されている^[36]。

磁気テープではレコーダ、ドライブで走行方向に一定のテンションがかかり、またカートリッジとレコーダ内のガイドなどとの接触でテープ端部にも応力がかかる。そのためテープが伸びたままになったりワカメ状に変形したりすることがある。これらを防ぐためにはテープ全体に占める体積が大きいベースフィルムの剛性が高いことが必要で、一般的には弾性率が高い方が好ましい。特に元に戻らない塑性変形である残留ひずみを小さくする必要がある。またイレギュラーな力がかかったときのテープの切断を防止するため、破断強度や引裂強度も高いフィルムが好ましい。ただし、弾性率が高すぎると磁気ヘッドとの接触は不安定になることがありシステムによって適切な範囲がある。

磁気テープは環境の温湿度でもわずかな寸度変化を起こすが、これを一定範囲内に抑えないと信号の記録と再生で位置ずれを起こし品質トラブルを起こす。寸度変化には可逆である温湿度膨張と非可逆な熱収縮がある。これらの変化が許容値を超えると、アナログの映像記録では画面が歪むスキューと呼ばれる現象やトラックずれによる画面ノイズといったトラブルが発生しデジタル記録ではエラーとなる。高密度デジタル記録のリニアデータテープではトラック幅が狭く、ヘッドで再生するときの位置決め精度が極めて重要になってくる。後述のようにサーボ技術によりシステム側で位置補正を行う機能があるが、磁気テープ構造の大半を占めるベースフィルムの温湿度による変化も極力抑える必要がある。

温度膨張係数はヘッド素材等の膨張係数に近い値が良く、湿度膨張係数はゼロであることが理想である。PETやPENの温湿度膨張係数は $10^{-5} \sim 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ オーダーで、温度膨張は製膜条件である程度調整できるが湿度膨張は材料で決まる傾向がある。不可逆な熱収縮も材

料と製膜条件である程度制御できるが、テープメーカーの製造プロセスで受ける熱履歴も影響することを考慮して設計する必要がある。アラミドはPET、PENに対し残留ひずみを除き温度膨張、湿度膨張、熱収縮とも小さく高密度記録に基本的に有利である。

磁気テープの基本設計で述べたように、表面が粗くヘッドとテープの距離が大きくなると出力が小さくなる。逆に表面が平滑すぎると摩擦が高くなり走行性、耐久性などに悪影響を与える。磁気テープの表面性はベースの表面形状が反映されるため、その表面性は磁気テープの性能を決める重要な設計因子である。ベースフィルムはサブミクロンのシリカやアルミナなどの粒子を添加することで表面性を制御している。ベースフィルムの表と裏（磁性層側とバック層側）で表面粗さを変えることでテープ設計の自由度は大きくなる。より表面性を制御しやすいよう共押出しにより図 3.31 のようにベースを多層化することもある。

ベースの表面性はベースメーカーでの製膜時、テープメーカーでのテープ製造時の生産性にも影響を与える。基本的には平滑な方向に進むため、安定した搬送、巻き取りを行うためのウェブハンドリングの技術が求められる。

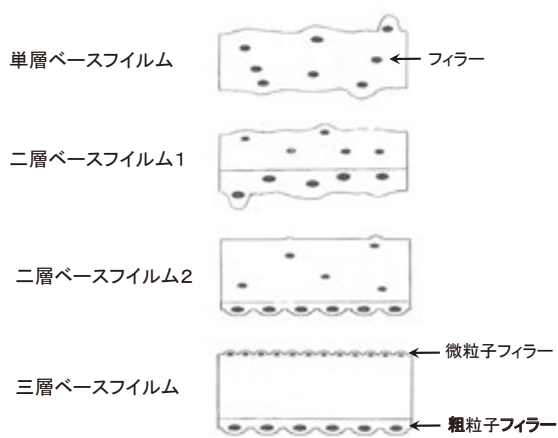


図3.31 ベースフィルムの多層化

ベースフィルムの平均的な表面粗さはテープのSN比に影響を与える一方で、フィッシュアイとも呼ばれるイレギュラーに発生する粗大突起はアナログ記録では映像や音声飛びドロップアウトになり、デジタル記録では大きなエラーとなる。主な原因はポリエステルの重合や製膜で発生する低分子のオリゴマーでありこれを極力なくす工夫がなされている。

現在、磁気テープで使用されているベースはPET、PEN、アラミドの3種であり、実用化された順に機械強度は高くなるがコストも高くなるため、必要性に応じこれらのフィルムは使い分けられている。

図 3.32 にベースフィルムの製造プロセスの概略を示す。縦延伸、横延伸の倍率によってベースの長手方向と幅方向の強度を調整することができるが、これはベースフィルム内で配向と部分的な結晶化が起こるためである。延伸倍率を大きくするとベース強度は高くなるが、一方で温膨張係数や熱収縮率にも影響を与えるため熱固定の工程を含め条件を最適化している。その他ベースに求められる性質として磁性層との接着性がある。テープメーカーで接着層を塗布する人が多いがベースメーカーでベースに接着層を設ける場合もある。

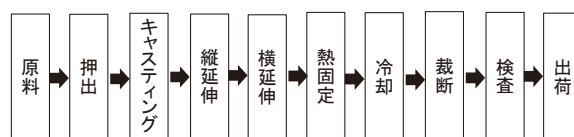


図3.32 ベースフィルムの製膜プロセス

3.6.3 実用性を付与する結合剤と添加剤

磁気テープの磁性層を構成する材料は、磁性体以外に結合剤（バインダ）と各種添加剤がある。磁気テープの技術者はその組み合わせの妙を「処方技術」と呼んでいるが、「処方」の元々の意味は医師が患者の「症状に合わせ薬を調合する」ことである。筆者は「処方」は材料の混ぜ方であり技術を感じないためこの言葉が好きではなかった。しかし、実際に磁気テープの開発を行うと様々な課題が発生し、かつ各々の課題が複雑に関連しあっている場合が多く、あちらを立てればこちらが立たずのモグラ叩きの繰り返しになりがちであった。また一つのシステムで好結果をもたらしても他のシステムでは逆効果であったりすることも頻繁に起こった。そのため一つ一つの現象で何が起きているかを丹念に調べ、材料の選択や組み合わせで最適解をもとめる、すなわち「症状に合わせ調合する」がテープ開発の実態を表す一側面であることは否定できなかった。敢えてこれを「処方技術」と呼ぶなら各テープメーカーで解決のアプローチが異なり、多くの場合ノウハウとしてその内容は明らかにされていない。テープを分析すれば材料が何かはある程度分かるが、どのように機能させ性能に繋げたかのメカニズムや設計思想までは分からない。この点において磁気テープはインテグラル型商品と言える。

もっとも、薬も個々の物質が有効でなければ調合する意味はない。磁気テープにおいても磁性体など個々の材料技術がテープ全体の進歩のベースにあったこと

は言うまでもない。

処方ではまず重要なのは結合剤（バインダ）である。バインダはその名のとおりに磁性体をつなげ塗膜を形成する役割をもつ。以下のような多くの機能が求められる材料である。

バインダに求められる機能

- ・ 磁性体をよく分散し磁氣的凝集をなくす
- ・ 磁性体の充填性、配向性を高める
- ・ 塗膜の強度を高め耐久性を付与する
- ・ 塗膜の表面を平滑にする
- ・ 塗膜をベースフィルムによく接着させる
- ・ 塗膜に適度な柔軟性をもたらす
- ・ 経時による劣化が少ない

磁性体が記録を担う基本素材とすると、バインダは磁性体をもつ本来の記録性能を発揮させる役割をもつ。バインダは塗膜に必要な強度や平滑性を実現する重要な機能ももっている。磁気テープ用のバインダは各社各様の検討が行われたが、筆者が考える重要な技術は、①硬化系樹脂の採用、②樹脂への極性基の導入の2点である。

磁気テープでは複数のバインダを組み合わせる場合が多い。当初よく用いられるのは塩化ビニルに適度な柔軟性をもたせた塩化ビニル酢酸ビニル共重合体であった。塗膜は硬質なほど耐久性に有利であるが、一方で脆くなったりヘッドとの接触が不安定になったりするため適度な柔軟性を付与する必要がある。そのため塩化ビニル系樹脂にさらにウレタン樹脂を併用する場合が多い。その他、塩化ビニリデン樹脂、アクリル樹脂、セルロース系樹脂、フェノキシ樹脂、ビニルブチラール樹脂などが検討されてきた。

一方、より塗膜強度を向上させるため硬化系樹脂を用いることが次に検討された。固定ヘッドのオーディオテープではテープがヘッドと接触する速度は数 cm/s から数十 cm/s 程度だが、回転ヘッドのビデオテープではその速度は数 m/s～数十 m/s で約 100 倍の速度でヘッドに接触するためテープがダメージを受けやすい。特に一時停止し静止画像とするスチルモードでは、テープの同じ個所を数分にわたりヘッドが高速で接触し局所的に温度があがり磁性層の強度も低下するためさらにダメージを受けやすくなる。このような課題に対し、反応性の高いイソシアネート基（N=C=O）をもつ化合物を磁性塗料に添加し、塗布後に高温で処理し熱硬化させ塗膜強度と軟化温度を高めることで、テープの耐久性を大きく改善させるこ

とができた。代表的なものとして、ジフェニルメタンジイソシアネート、トルエンジイソシアネート、イソホロンジイソシアネートなどがある。イソシアネートは添加時点では低分子で塗膜を軟化させるため、後述する圧延（カレンダー）工程での成形性が良くなり表面を平滑にすることができるという一石二鳥の効果がある。その他の熱硬化樹脂としてはエポキシ樹脂がある。また TDK は電子線硬化樹脂を用いた製品を発売している。最初はフロッピーディスクに耐久性向上の目的で使用したが、その後データテープ LTO に用いている。電子線硬化は熱硬化と異なり瞬時に硬化するためテープの生産性の向上にも効果がある。

以上のようにバインダは塗膜の強度を保つ役割を果たすが、一方でバインダは磁性体を分散するもう一つの重要な機能がある。磁性体の表面はその種類や製法によって酸性とアルカリ性など異なる性質をもっている。バインダはその磁性体表面によく吸着することが必要であるが極性基を導入することで分散性が大きく改善した。このような極性基は多くのが検討されたが、-OH、-COOH、SO₃Na などが代表的なものである。特に SO₃Na を導入した塩化ビニル樹脂は分散性に優れ、代表的な日本ゼオンの塩化ビニル「MR110」は多くの磁気テープで使われるようになった。極性基導入により分散性が高まることで磁気特性が改善されるだけでなく磁性層の表面も平滑になる。さらに磁性体との吸着が高まることで塗膜の強度も向上し、言ってみれば一石三鳥の効果をもたらした。

磁気テープに含まれる添加剤には、潤滑剤、研磨剤、帯電防止剤、分散剤などがある。磁気テープはヘッドと接触するためテープ、ヘッド界面で発生する様々な現象、すなわちトライボロジーの課題を解決することが記録密度の向上と同じ重要な技術課題である。ヘッドおよびドライブやカートリッジの部材との接触で以下のような問題が発生する。

磁気テープのトライボロジー課題

- ・ 磁性層の損傷
- ・ テープエッジの損傷
- ・ 走行の不安定化（蛇行、振動）
- ・ ヘッド汚れの付着
- ・ ヘッドの摩耗

テープの高密度化を進めると、一つの信号を記録する面積が小さくなるためこれらの現象の品質への悪影響は大きくなる。さらに高密度化の手段である表面の平

滑化や磁性体の微粒子化がこれらの現象をより悪化させる傾向があるため、記録密度向上と走行耐久性の両立は常に技術者の頭を悩ませるものであった。

このような課題に対する基本的な施策は摩擦係数の低減であり、そのため多くの潤滑剤が検討された。大別すれば低速の接触状態で効果を示す境界潤滑材、高速で効果を示す流体潤滑剤であり、前者の代表はステアリン酸などの脂肪酸、後者の代表はステアリン酸ブチルなどの脂肪酸エステルであり多くの磁気テープで用いられている。これら潤滑剤は摩擦を下げる効果がある一方で塗膜を可塑化するため最適な量とする必要がある。また固定ヘッドと回転ヘッドのシステムがありヘッドや部材の形状や材質、接触速度も様々なためテープメーカー各社が各々のノウハウをもとに処方を決めているのが実態である。

多くの磁気テープには研磨剤、カーボンブラックなどの粉体が使われている。研磨剤は粒径が100 nm程度でモース硬度が高いアルミナ (Al_2O_3)、酸化クロム (Cr_2O_3) などが主に用いられる。研磨剤はヘッドとの接触で磁性層を保護するとともに、ヘッドに付着する汚れを除去する効果がある。しかし、多すぎるとヘッドを摩耗させるためこれも最適化されている。粒径が100 nmレベルの比較的大きなカーボンブラックは、テープ表面に適度な突起を形成させることでヘッドとの摩擦を下げる効果がある。粒径10 nmレベルの微粒子でストラクチャー構造をとるカーボンブラックは、テープの導電性を高め静電気の発生を防止する効果がある。

分散剤は磁性体の表面に吸着しバインダによる分散効果を高めるために使われる。

3.7 記録方式に最適な層構成

高性能の磁性体を高充填で緻密に配置させることが磁気テープの基本特性の向上に繋がるが、システムの記録方式によって記録層、塗布層の構成を最適化することも重要な設計要因である。塗膜の構成は図3.33に示すように、①単層磁性層、②重層磁性層、③磁性薄膜+保護層、④薄層磁性層+非磁性磁性層の大きく4つに類別される。

磁気テープ実用化の歴史の最初の20年はもっとも単純な①の単層磁性層の時代であり、その厚みは数 μ mと厚いものであった。音声の周波数特性は20 Hz~20 kHzで示されることが多いが人間の聴力もこの範囲内にある(若い人には高音の10~15 kHzが聴こえ

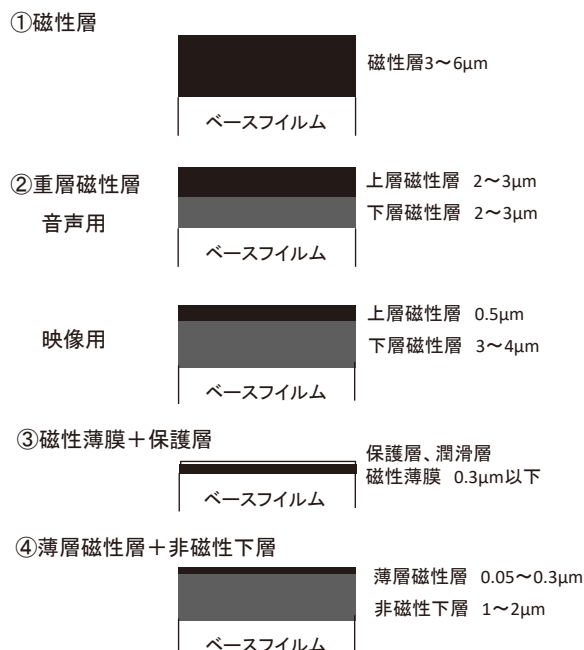


図3.33 磁気テープの基本的層構成

るが、年をとると聴こえなくなる)。一般に音声のアナログ記録において記録の深さは波長の1/4程度と言われている。これに当てはめると、例えば走行速度4.75 cm/sのコンパクトカセットでは10 kHzの高音の信号の記録の深さは1.2 μ mとなり、中音や低音はさらに深いところまで記録される。磁気記録で用いられる信号の波長は多様であり磁化される深さが異なることから、記録システムによって深さ方向に磁気特性を最適化する考えが当然のごとく生まれる。1970年代に入りまず音声記録において②の磁性層の重層化が検討され、1973年にソニーが発売したカセットテープ「Duad」がその最初の製品であった。コンパクトカセットの章で述べた通り「Duad」は従来の γ 酸化鉄の磁性層の上にHcが高く高音特性に優れる二酸化クロムの磁性層を設けたもので、中音域の特性がやや落ち込むため所謂ドンシャリ傾向の音であったが帯域の広さを感じさせる製品であった。スピーカで言えば低音用のウーハーと高音用のツイータの2ウェイ方式である。音声用での磁性層の重層化は記録原理にかなった設計であり、その後各社から多くの重層テープが発売された。磁性層の厚みは上層、下層とも2~3 μ m程度であったと推測される。

映像記録の家庭用ビデオでは、カラー信号を低域変換し輝度信号のFM変調信号に重畳して記録されている。これらの信号の波長は音声信号より短く、映像信号は磁気テープのより浅い部分に記録される。1989年に富士写真フイルムは同時に二層を形成する重層塗布技術を開発、ビデオテープでは初めて重層の構成

の VHS テープを発売した。短波長で映像の明るさを示す輝度信号が記録される上層、長波長で色合いを示すカラー信号と HiFi オーディオ信号が記録される下層の磁気特性を各々最適になるように設計したのだが、波長の短い輝度信号を記録する上層は $0.5 \mu\text{m}$ と音声記録用の重層テープより薄い設計になっている。同社はその後 S-VHS、8 mm ビデオテープの磁性層も重層構造とした。TDK は S-VHS で重層構成の「XP-HiFi」を、Konica（現コニカミノルタ）も同様な構成の S-VHS を発売した^[37]。

③は塗布型テープでは実用化が難しく、蒸着テープなどの金属薄膜がこのタイプに相当する。高密度記録に適するサブミクロンの磁性膜に耐久性を付与する保護膜の形成技術が実用化を可能にした。

④はデジタル記録に適するよう塗布型でサブミクロンの磁性層を非磁性層上に形成した構成であり、現在のコンピュータ用テープの基本構成となっている。均一で薄い磁性層を形成する塗布技術がこれを可能にした。

記録に関わる層構成は以上であるが、その他に磁性層とベースフィルムの間には接着層を、磁性層の反対側に走行安定性を付与するバックコート層を設けることが多い。バックコート層はカーボンブラック等を結合剤に分散させたもので、カートリッジやドライブ内のガイド等と接触するときの摩擦係数を下げ、テープ走行や巻きを安定化させる効果がある。また導電性を付与することで帯電防止の効果も付与している。バックコート層は当初は耐久性が重視される放送用ビデオテープに適用されたが、その後 VHS の HG タイプや長時間の薄手タイプにも採用されるようになった。

3.8 微細構造を精密に造り上げるプロセス

磁気テープ生産プロセスの概要を図 3.34 に示した。磁性体やベースフィルムなどの材料技術が磁気テープの基本性能を高めるため重要であることは当然であるが、プロセス技術は同じように磁気テープの性能を大きく左右する。

最先端の磁気テープで用いられている Ba フェライト磁性体の粒径は 20 nm 以下であり厚みは数 nm である。一方、記録システムの最短ビット長は約 50 nm であり、良好な記録特性を得るには磁性体を単粒子にまで分散し磁気的に分離しかつ均一に配列させる必要がある。また磁性層の厚みは数十 nm であり、この変動を $\pm 10\%$ の数 nm 以下に抑えないと出力変動が大きくなり SN 比が低下する。まさにナノテクノロジー

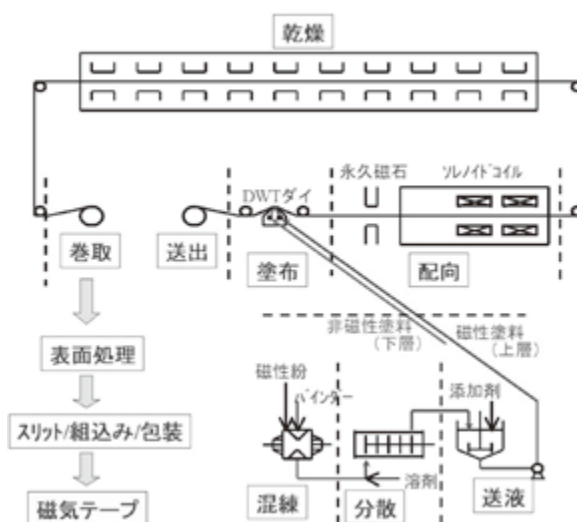


図3.34 磁気テープ生産プロセスの概要

の世界であり、微細な構造を如何に造り上げるかが品質を大きく左右する。第二章の冒頭で筆者は記録を「材料に物理的変化を固定すること」と定義したが、それを高い分解能で行うためには高度なプロセス技術が不可欠であった。

高密度化によってテープの幅、厚みといった寸度、粗さなどの表面の制御にもますます高い精度が求められるようになった。構造の制御は材料だけでは実現することはできず、そこに磁気テープにおけるプロセス技術の重要性がある。実際の開発では個々の課題に対し材料、処方技術で解決するかプロセス技術で解決するか、これは開発およびその後の生産におけるコストパフォーマンスで決めるべきであり、開発マネージメントのポイントにもなっている。

プロセス技術は磁気テープメーカー各社の中でノウハウを含めた独自の形で技術が進化していったのが実態である。各装置メーカーの汎用品を用いることは少なく、個別の仕様を提示しながら自社でさらにカスタマイズしていくことが多い。そのため近年のプロセス技術についてはテープメーカー各社の機密事項であることが多く、ここでは公開情報や一般情報の域を出ないことを承知願いたい。

3.8.1 磁性体を解きほぐす分散

磁性体は粉体では凝集しているため、良好な記録を行うためには個々の磁性体に分離させる必要がある。また近年の磁性体の大きさは数十 nm と小さくかつ磁気的な結合による凝集も起こるため、通常の顔料に比べ分散は厄介であると言ってよい。そのため機械的な力で凝集を解砕させるだけでなく、バインダーや分散剤を磁性体表面に吸着させ物理化学的な方法で粒子を

個々に分散していく必要がある。このような分散の方法は多種多様であるが代表的なものとしてボールミルとビーズミル（サンドミル）がある。

ボールミルは古くから用いられ、円筒容器内に cm オーダの金属製のボールとともに磁性体、バインダ、溶剤を投入し、容器を回転させボールとの衝突による衝撃力で凝集を解砕させる方法である。この方法は強い衝撃力が得られるため大きな凝集の破壊には適するが、微粒子の磁性体を単粒子にまで分散するには適していない。また磁性体の粒子そのものを破壊する懸念がある。

ビーズミルは mm オーダ以下のガラスや金属、セラミックのビーズを原材料とともに攪拌することで剪断力により凝集を解砕する方法であり、より微粒子を単粒子にまで分散するのに適している。

これら分散の前処理としてより高粘度の状態が高い剪断力を与える混練を行う場合もありロールミル、ニーダーなどが用いられる。

図 3.35 は磁気テープ表面の SEM（走査型電子顕微鏡）像である。数十 nm の磁性体が単粒子に近いまでに分散されているのがわかる。

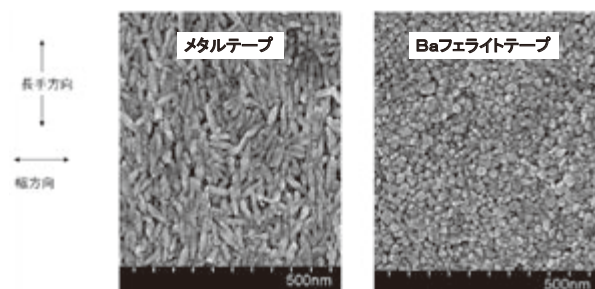


図3.35 磁性体の分散状態

3.8.2 磁性体を緻密に並べる塗布、配向

ベースフィルム上に緻密で均一な薄い磁性層を形成する塗布プロセスは、磁気テープのプロセス技術の中でもっとも重要と言っても過言ではない。磁性層が不均一であると出力が変動し SN 比が低下する。また生産性や歩留まりにも大きな影響を与える。均一に薄くかつ高速で塗布する生産技術はテープメーカーにとっての競争力の源でもある。

塗布方式は図 3.36 に示すようなドクター方式、リバースロール方式、グラビア方式、ダイ方式など一般的な塗料の塗布方式を基本に各社各様の方式が用いられ、その後独自に開発を進めるようになった。

図 3.37 は富士写真フィルムが 1960 年代の初期に用いた開発用の塗布ヘッドと塗布機の全体である。同社は写真フィルムの技術を転用できる部分もあった

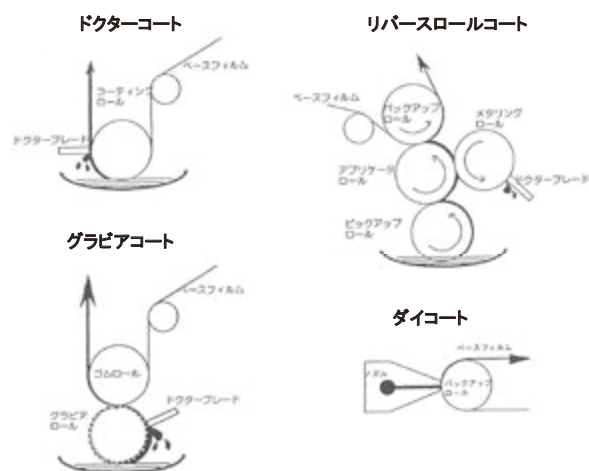
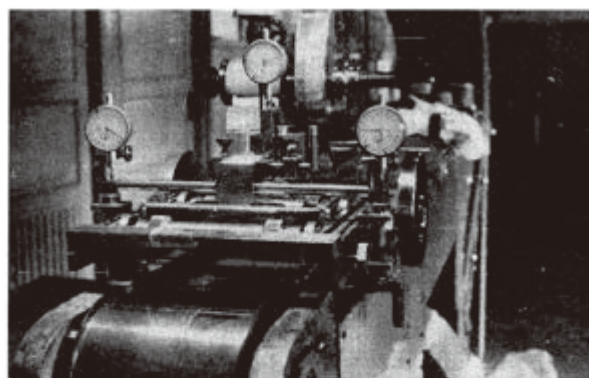
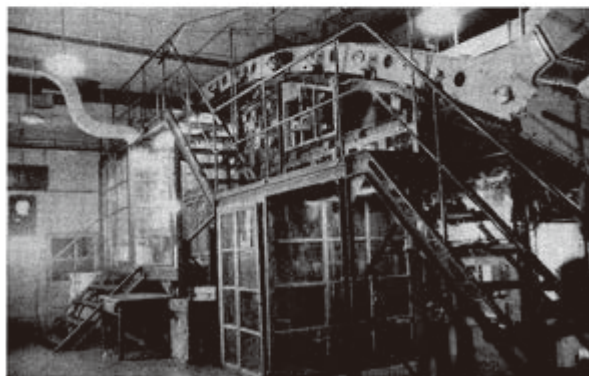


図3.36 代表的な塗布方式



研究用試験塗布機の塗布ヘッド



一号塗布機の外観

図3.37 富士フィルムの初期の塗布機(1960年代)

が、テープ全体の厚みも塗膜の厚みも写真フィルムの 1/10 以下と薄くかつ高速で成膜するため新たな技術開発が必要となっていた。

その後、高密度化が進むと磁性層の厚みが初期の 10 μm オーダから 100 nm オーダと 1/100 の薄さになり、より高度な塗布技術が必要になっていった。その内容は各社の生産ノウハウとして機密性が高く、技術の詳細を明らかにすることはできない。参考までに富士フィルムが技術発表などで公表している二層塗布の

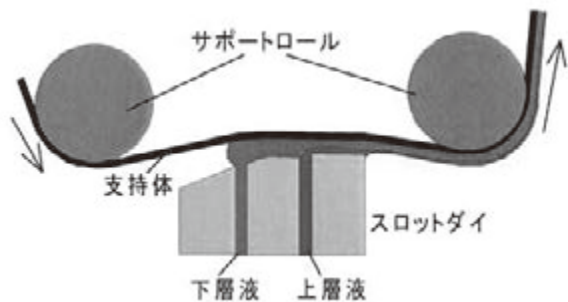


図3.38 ダイ塗布方式の概略図^[38]

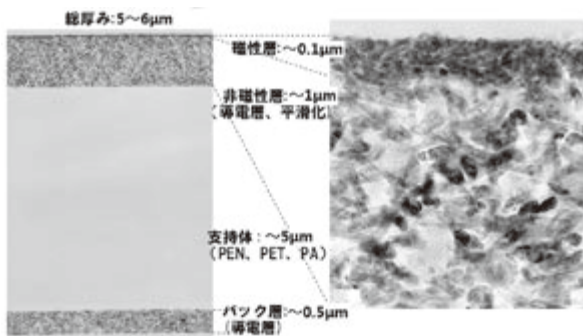


図3.39 最新の磁気テープの断面TEM像

ダイ塗布方式の概略を図 3.38 に示した。この方式により 100 nm オーダの極薄層を高速で塗布することが可能になった。

最新のコンピュータ用テープの磁性層厚みは 60 nm 程度である。図 3.39 に透過型電子顕微鏡 (TEM) によるテープの断面写真を示す。

この厚みは人間の毛髪の 1/1000 の薄さであり、ムラなく毎秒数 m の高速で均一で形成する技術は正に精密生産技術の先端と言ってもよいだろう。これを例えれば、コップ 1 杯 100 cc の塗布液をテニスコート一面に均一な厚みで 1 分以内に敷き詰めることに相当する。

塗布した直後に磁性体は塗布液中でランダムな方向を向いているが、これを記録する方向である長手方向に並べる必要があり、図 3.34 の中に示したように塗膜を乾燥させる前に磁界をかけて配向させる。配向には永久磁石やソレノイドが用いられ併用することもある。また図 3.34 の同極の対磁石を異極の対磁石とすると、Ba フェライトなどを垂直方向に配向させることができる。その他に補助配向として交流磁界やパルス磁界を印加する方法も提案された。配向性は磁界の強さ、磁性体の分散度、塗布液の粘度などにより変わるが、磁界をかけたあと未乾燥状態が長く続くと配向の戻りが生じてしまうため磁場中で塗膜を乾燥させることが理想である。

3.8.3 最終品質を決める仕上工程

塗布、配向し乾燥させたロール状の磁気テープの原反はその後カレンダー処理と呼ばれる圧延工程を通る。

カレンダーは図 3.40 のように金属ロールと弾性ロール間、または金属ロール同士の間で磁気テープ原反を通し温度と圧力をかけることで表面を平滑にする工程である。平滑化でスペース損失を少なくする効果があるだけでなく、磁性層の磁性体の充填率が上がり出力を高める効果がある。また磁性層の弾性率が高くなり耐久性に対しても有利であることが多い。

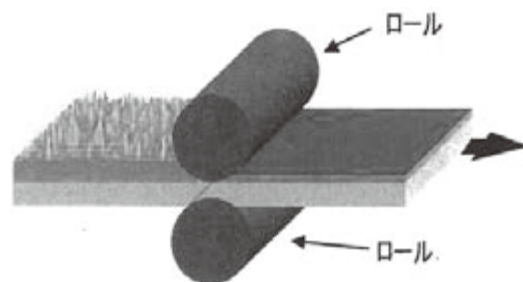


図3.40 カレンダー(圧延)処理工程

熱硬化樹脂を用いる場合はカレンダー処理のあと熱処理工程で塗膜の硬化を促進させる。原反はその後に図 3.41 のように所定の幅に裁断 (スリット) されるが、スリットはテープの形状制御の点で重要な役割をもつ。スリット品質で重要なのは、幅精度、直線性、エッジ品質である。テープは記録再生を正確に行うため走行位置を精度よく制御する必要がある。ドライブ内の規制ガイドなどがその役割を果たしているが、テープの幅精度や直線性が悪いと走行に変位や蛇行が生じ位置決めに狂いが生じ品質トラブルが発生する。特に高密度化でトラック密度が高くなるとその影響が大きいので、ミクロン単位の高精度のスリット技術が開発された。またテープ端部は裁断面が部材と接触するためダメージを受けてデブリが発生しやすくドロ

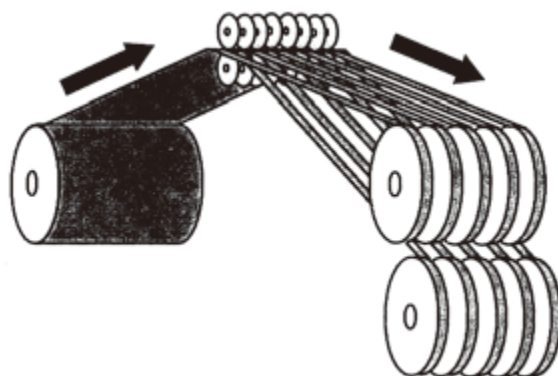


図3.41 スリット工程

エピソード5 同時重層塗布技術の誕生

富士写真フィルムの同時重層塗布技術は1980年代半ば、同社の生産技術部門の柴田徳夫、千野直義らが開発した技術であり、磁気テープの歴史における重要なプロセス技術である。同社は写真フィルムにおいて数層の感光層を同時に形成する技術を以前から有しておりその技術の応用という見方もされたが、磁気テープの塗膜の形成速度が写真フィルムより一桁以上速いこと、塗膜の厚みが一桁以上薄いこと、水系ではなく溶剤系であることなど異なる点が多く新たな技術開発が必要であった。この技術を既に重層テープが製品化されていたオーディオテープではなくビデオテープに適用する新たなプロジェクトが1986年にスタートした。ビデオテープで必要なサブミクロンの上層の薄層化が同技術によって初めて可能になった。

テープ開発は当時オーディオ開発部門であった筆者が担当、その後ビデオ開発部門の稲波博男が加わった。2つの層とすることで機能分離した設計ができるため技術者としての面白みはあったが、同時に塗布するため塗布液の相性が悪いと上手く塗れない、期待した性能が出ないという苦勞も多かった。また、VHSという当時の主力製品、量産品種に2年という短期間で新技術を適用するプロジェクトはタフな仕事であった。同技術を用いた最初のVHSテープは1989年に発売され、その後VHS-HG、S-VHS、さらには8mmビデオ、カセットテープと同社の民生用テープ全体に展開され、1990年代初頭に「ダブルコーティング」の製品ラインアップを完成させた。

しかし、当時は民生用テープの需要がピークに達し製品もコモディティ化しつつあった時期であり、事業へのインパクトは必ずしも大きいものではなかった。このプロセス技術の最も大きな貢献はその後のコンピュータ用テープのデファクト技術となる薄層メタルテープを誕生させたことにある。

プアウトやヘッド付着の原因となるため、裁断面の形状を制御する技術も重要である。

スリット後、必要に応じ表面をクリーニング処理、研磨処理する場合がある。これはテープ表面の突起や塵埃を取り除くだけでなく、表面の潤滑材を配向させ摩擦を下げる、表面の余剰な物質を取り除きヘッドへの汚れ付着を防止するなどの効果をもつ。その後、所定のカートリッジに組み込みを行う。カートリッジの部品の材質選択や成型精度、テープのリールへの巻取り方法も最終品質に影響を及ぼす。また近年の高密度のデータ用テープでは位置決めのためのサーボ信号をテープ上に予め記録している。これについては次節3.9で述べる。

3.9 テープの性能を高めたシステム技術

磁気テープの10倍/10年の記録密度の向上はテープ技術とシステム、ハード技術の進歩の融合によってなされたものである。その寄与を厳密に分離することは不可能だが、例えば1994年に発売されたコンピュータ用テープDLT4000に対し、2010年に発売さ

れたLTO-5の面記録密度は23倍になっている。一方、DLT4000とLTO-5のテープは同じ薄層メタル構成をとっているが、使用するメタル磁性体の体積は約1/10になっている。

記録密度を決める基本特性であるSN比は多くの要因によって決まり、様々な理論式、近似式、実験式が提示されている。SN比の近似式の一例として以下がある^[39]。

$$\text{SN比} \propto \text{粒子密度} \times \text{トラック幅} \times \text{最短記録波長}^2$$

1ビットを1/2波長と仮定し当てはめると、LTO-5の面記録密度でのSN比は、DLT4000と同じメディアでは1/23倍(-34dB)に低下することになる。磁性体の微粒子化でLTO-5の粒子密度も10倍になったと仮定するとSN比は10倍(20dB)改善できることになる。従って、残り14dBのSN比低下は何らかの技術でカバーしている計算になる。テープでは高Hc化や表面の平滑化などによる出力損失の改善などがあるがそれだけでは不十分である。以上は多少乱暴な計算ではあるが、ヘッドの記録性能の向上と再生ノイズの低減、新たな信号処理の導入などシステム技術の寄与も大きいと考えられる。

システム技術は、磁気テープが本来もつ性能を引き出す役割と、磁気テープがもつ弱点を補う役割をもっている。そのような観点で重要なシステム技術は以下の4つと考える。

テープの長所を引き出し

短所を補うシステム技術

- ・記録ヘッドと再生ヘッド
- ・記録方式と信号処理方式
- ・エラー訂正方式
- ・サーボトラッキング方式

これらシステム技術の詳細については各々に関する専門の文献を参照して頂きたいが、テープの特性との関係においてその意義を解説する。

3.9.1 テープの長所を引き出す磁気ヘッド

磁気テープで磁性体がもつ本来の記録能力を発揮させるには、磁気ヘッドで十分に記録できること、さらには記録減磁やギャップ損失など記録再生プロセスにおける磁化の損失を少なくする必要がある。またヘッドから発生するノイズがテープより高いとテープの性能を十分に発揮させることができない。

磁気記録の初期から使用されてきたリング状の磁気ヘッドは、インダクティブ（誘導型）ヘッドと呼ばれる磁束の時間変化に応答するものである。材質ではパーマロイ、センダスト、アモルファスの金属系、フェライトの酸化物系があり、製法からはバルク、薄膜などに分類される。記録再生の性能に関わるヘッドの重要な特性はBsが大きいこと、Hcが低いこと、広い周波数領域において μ （透磁率）が高いことである。表3.4にヘッド材質の比較を示した。

表3.4 磁気ヘッドの材質と特性^[40]

	パーマロイ	硬質パーマロイ	センダスト	アモルファス	フェライト
組成	Fe,Ni,(Mo)	Fe,Ni(Mo,Ti,Nb,V)	Fe,Si,Al	Fe,Co,Si,B	Mn,Zn,Fe ₂ O ₃
飽和磁束密度(G)	>7000	>6500	8600	9000	5500
実効透磁率 1kHz	9000	20000	15000	8000	5000
抗磁力(Oe)	<0.02	<0.025	0.03	0.015	0.05
ビッカース硬度	110	>140	500	900	700

パーマロイヘッドはFe-Ni合金で比較的大きな飽和磁束と透磁率をもち安価でもあることから、初期の酸化鉄を用いた磁気テープ用の標準的なヘッドであった。耐摩耗性が課題で特に摩耗性の高い二酸化クロムを用いたカセットテープで課題となった。

一方、フェライトヘッドは硬質で耐摩耗性に優れ1980年代の多くの磁気システムに用いられたが、Bsが低いことが短所であった。一般にヘッドのBsはテープのHcの5倍以上が必要と言われ、メタルなど1500 Oe以上の高いHcの磁性体を使用するシステムには不向きであった。これに対しセンダストやアモルファスヘッドはBsが高く高Hcの磁気テープの記録が可能であり、高密度記録のシステムで使用されるようになった。カセットテープでは日本ビクターがセンダストヘッドを搭載することで初めてHc 1100 Oeクラスのメタルテープの使用が可能になった。ソニーはセンダストをフェライトヘッドのギャップ部にスパッタしたMetal-In-Gap (MIG) ヘッドを開発し、Hc1500 Oeクラスのメタルテープを使用する8mmビデオに採用した。

製法面では、従来のバルクヘッドとフォトリソグラフィなど半導体の薄膜プロセス技術を応用した薄膜ヘッドがある。薄膜ヘッドは微細な構造を高い精度で形成できるため、ヘッド磁界分布をシャープにしたり高密度記録に必要な狭トラックのヘッドを作成することが可能になった。

一方、現在のシステムの多くで再生ヘッドとして用いられる磁気抵抗（MR：Magneto Resistive）ヘッドは、メディアの記録磁化から発生する磁界に対し電気抵抗値が変化するMR素子を用いたヘッドで磁束の大きさに直接応答するものである。インダクティブヘッドに対し高感度で低ノイズの特徴がある。1990年代末にはさらに高感度の巨大磁気抵抗（GMR：Giant Magneto Resistive）ヘッドが実用化されHDDの高密度化に大きく貢献した。磁気テープでは1984年にIBM3480がHDDに先駆けて再生ヘッドにMRヘッドを使用し、2000年代後半にはGMRヘッドもIBM3592、さらにはLTOでも使用されるようになった。直近ではGMRヘッドよりさらに高感度のトンネル磁気抵抗（TMR：Tunnel Magneto Resistive）ヘッドも磁気テープに用いられるようになった。特に低ノイズで高SN比のBaフェライトテープによる高密度化は、これら高感度かつ低ノイズの高性能のヘッ

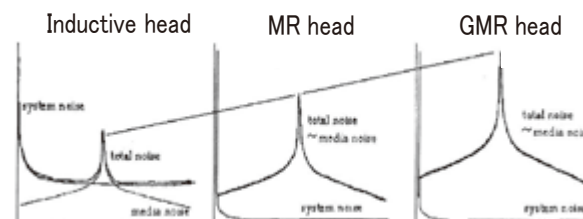


図3.42 再生ヘッドによる変調スペクトルの違い

ドの採用によって初めて実現できたものである。図3.42にヘッドによる再生信号の変調スペクトルを示したがGMRヘッドは高感度化と低ノイズ化で大きな効果があることが分かる。

MRヘッド、特にGMRヘッドの感度は温度変化に敏感であり、磁気テープのような接触記録では表面突起などとの衝突摩擦熱でスパイク状のノイズが発生する。また静電気の放電でMR素子が破壊するなど課題があった。これらを技術的に解決するで初めて実用化が可能になった。

このように優れた磁気特性のテープの開発とともに、そのポテンシャルを引き出すヘッド技術の開発があって初めて磁気テープシステムの高密度化が実現できたと言えることができる。

3.9.2 テープの弱点を補う記録方式と信号処理

磁気記録は、記録方式として短所とも言えるいくつかの原理的な性質をもっている。

第一に、入出力特性の履歴性と非線形性がある。図3.43のヒステリシス曲線の0→1→2→3が示す通り、磁化したあと磁界を取り去ってもゼロには戻らず磁化が残るといふ挙動を示す。これは記録を可能にする基本的性質である一方で、0→1→2の初期磁化において磁界の強さに対し磁化の大きさが比例関係にない、すなわち非線形であることは応答性の点では弱点となる。

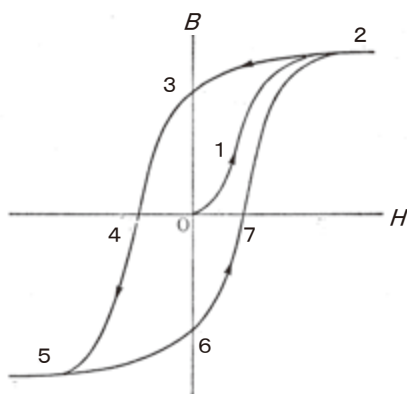


図3.43 磁気記録のヒステリシス曲線

第二に、先の図3.4で示したように記録する周波数に対し低周波領域と高周波領域で応答が低いことがある。低周波側は応答が磁束の時間変化に比例する磁気記録の原理からきており、高周波側はスペース損失、記録減磁損失、ギャップ損失など磁気記録特有の現象からくるものである。

第三に磁気記録は接触記録であるため、記録層の不均一性や表面の欠陥の影響が高密度化によって顕著に

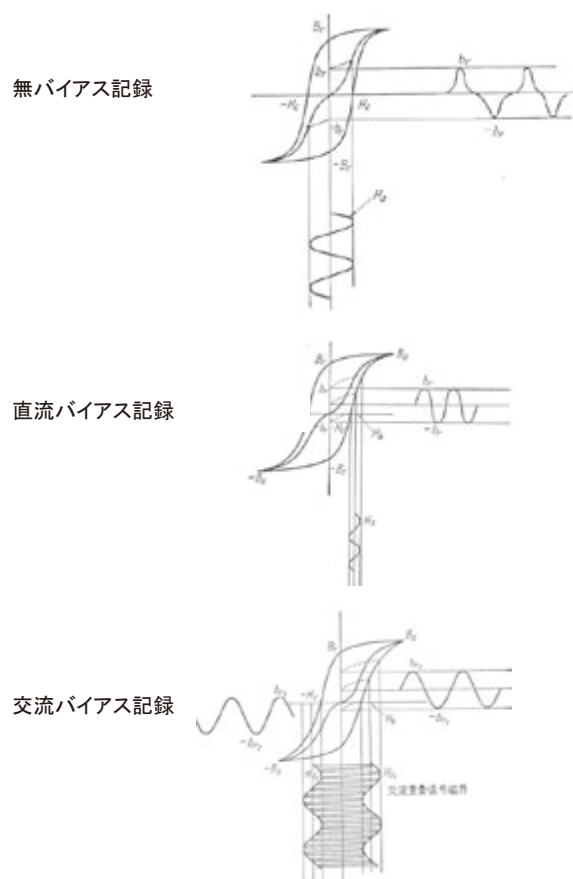


図3.44 各種バイアス記録^[41]

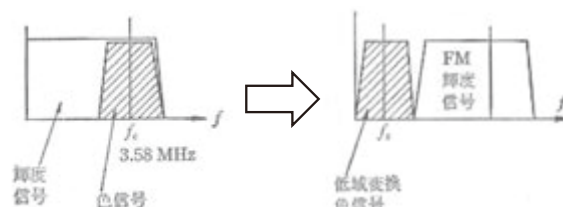


図3.45 FM変調と色信号低域変換^[42]

なってくることもある。

実用化のためには、これらの応答性の弱点を上手く処理するシステム側の技術が必要になってくる。図3.44に示すようにアナログ音声信号をそのまま（無バイアス）記録すると、ヒステリシス曲線の非線形性のため再生波形に歪が発生する。直流バイアス記録によりヒステリシス曲線の直線部分を使うことが可能になった。さらに音声信号を高周波信号に重畳する交流バイアス記録の発明により、線形性を有しかつ振幅の大きな信号を得ることができるようになり音声の磁気記録が実用的なものになった。なお、交流バイアス記録は実験中に発生した電流の発振によって偶然見つかった現象であることは有名である。

図3.45に示すアナログ映像記録の周波数変調（FM）記録は、広大な周波数帯域をもつ映像信号の

振幅変化を高周波の搬送波の周波数に変調することで使用する帯域を狭くしている。同時にメディアの不均一性に由来する振幅変動が直接映像に現われ難くなるようにしている。

バイアス記録とFM記録はともに磁気記録がもつ応答特性の弱点カバーし、実用的なアナログ記録を可能にした記録方式の基本的な発明とすることができる。

信号を1と0で記録するデジタル記録ではNRZ、NRZIなどいくつかの記録符号化の方式があるが、一般的に0や1が長く続く直流成分（低周波成分）を減らすRLL（Run Length Limited）符号化を行うため、記録データを並び替えるブロック符号化が行われる。直流成分があると微分形（磁束の変化量に比例する）の磁気記録では記録再生できない、クロック信号が再生されずジッタ（時間軸の揺らぎ）が発生しやすい、重ね書きを行うオーバーライト特性が悪化する、アジマス記録を利用しにくい、など弊害が多いためである。代表的なものとして8ビットの元信号データを低周波成分の少ない10ビットのデータに変換する8-10変換、14ビットに変換する8-14変換などがある。

図3.12に示したように1ビットのパルス信号を記録しても再生パルス波形が幅をもつため、高密度記録でビット間隔が狭くなると符号間干渉を起し、信号の振幅が低下したり信号のピーク位置がずれたりしエラーとなる確率が上昇する。周波数特性からビット間の干渉パターンを予め予測し、これに合うように信号の波形等化（イコライジング）を行い、ビタビ複合と呼ばれる方法で0,1を判別するPRML（Partial Response Maximum Likelihood）信号処理方式が1990年代に実用化された。これはまずHDDに採用されHDDの高密度化を加速させた。磁気テープでもコンピュータ用のDDS3より採用された。PRMLはその後EPRML（Extended PRML）などより高次に進化した。LTO-5ではノイズを事前予測することでデータ検出の信頼性を高めたNPML（Noise Predicted ML）方式が、IBMの最新の3592ではDD-NPML（Data Dependent NPML）が導入された。これらの信号処理技術は波形干渉やノイズというある意味でのメディアの不完全さを補うものであり、磁気テープシステムの高密度化にも大きく貢献した。

また、大きな記録容量が必要な映像のデジタル信号をそのまま記録しようとする、システムの録画時間または小型化の大きな制約となるため映像の圧縮技術が適用されるようになった。ソニーは1993年のデジタルβカムに高能率符号化方式による1/2圧縮を適用し、βカムの小型サイズで高画質デジタル記録を実現

した。1996年のβカムSXではDVDでも用いられるMPEG2圧縮方式を採用している。

磁気テープに限らずデジタル記録では、記録再生でエラーが発生しないようシステムで様々な工夫がなされている。LTOでは記録でのエラーを防ぐため図3.46に示すように書込みの直後に読取りヘッドで確認、エラーがあった場合は異なるヘッドで再書込みを行い、エラーが発生した特定の箇所を避けて記録するようにしている。

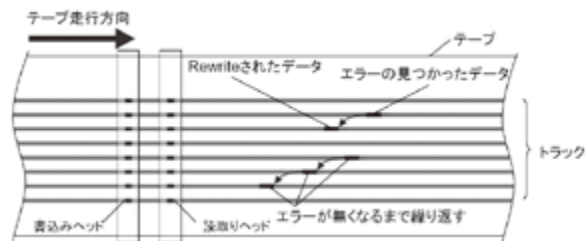


図3.46 LTOのリライトのしくみ^[43]

後発のエラーに対しては、他の記録システムと同様にエラー訂正機能（ECC: Error Correction Code）が搭載されている。LTOでは図3.47に示すようにデータ部にパリティ部を付加したサブデータセットを記録し、エラーの有無の判断とエラー部の特定を行っている。またサブデータセットは図3.48に示すように、大きなテープ傷などで訂正不能にならないように

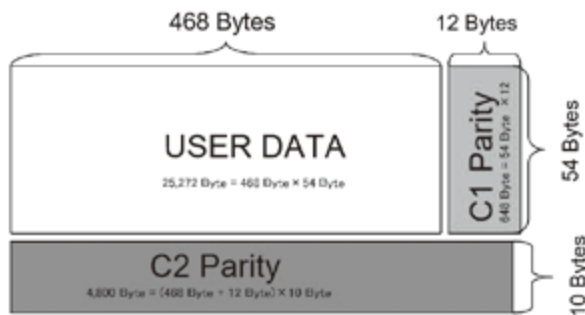


図3.47 LTOの誤り訂正用ECC^[44]



図3.48 LTOのインターリーブ方式^[45]

分割して記録するインターリーブ方式が採用されている。誤り訂正の理論などより詳細については専門書を参照願いたい。

エラーは様々な形態があり発生する原因も様々である。テープ要因ではSN不足で発生するランダムエラー、表面の欠陥や塵埃で発生するエラー、テープ上に発生した傷などに起因する大きなバーストエラーなどがある。エラー訂正はすべてのデジタル記録に適用されているが、エラーはメディアの不均一性、不完全性が主たる原因となるもので、それを補償し信頼性を高める仕組みとして大きな役割を果たしている。

3.9.3 高密度化のカギ トラッキング

磁気テープの高密度化には、①線記録密度を上げる、②トラック密度を上げるの二つの方向がある。線記録密度の向上には短波長、単ビット記録による各種の信号損失を小さくするとともに、時間軸の変動による信号劣化を抑えることが必要である。トラック密度の向上はテープ上の狭い記録トラック上を高精度でヘッドを走らせるトラッキングが重要になる。

テープに対するヘッドの位置を一定に保つため、テープ走行を規制するテープガイドの位置や傾きなどシステム側の機械精度を高めることが基本だが、それだけでは μm オーダーの精度で位置決めが必要な高密度記録では限界がある。またテープは温湿度で寸法が変化し湾曲や蛇行などで直線性も完全ではないため、これらによる位置ずれも補償する技術が必要になる。

記録と再生の場所を一致させる位置決め技術はサーボと呼ばれる。サーボは「機械的な運動動作に用いられる自動フィードバック制御システム」の意味をもつ。位置決めには走行方向の時間軸と幅方向のトラック軸がある。

ヘリカル方式の映像記録ではトラックが斜め方向のため時間軸のずれがトラッキングのずれもになり、発生するとアナログ映像記録では画面の乱れとなる。そのため再生時のヘッドの回転位置を記録トラックに合わせられるよう、テープ端部のコントロールトラックにヘッドの位置を示す同期信号を記録し再生時にヘッドの位置を調整できるようにしている。さらに映像信号を一旦メモリに取り込み同期信号に合わせて再生するTBC (Time Based Corrector) が導入されると、時間軸の変動は飛躍的に改善された。

一方、近年の高密度のコンピュータ用テープは固定ヘッドによるリニア記録で1/2インチ幅に数百本から数千本のトラックをもち、トラック方向の位置決めの方法がますます重要になっている。図3.49にコン

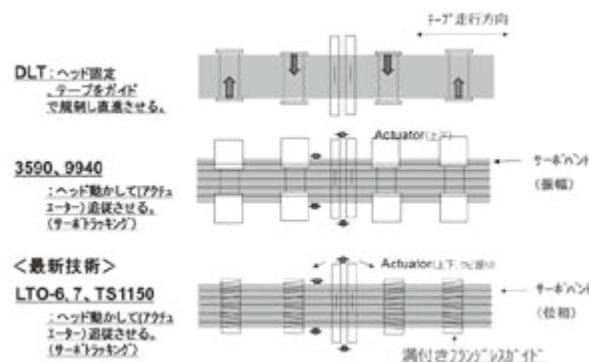


図3.49 トラッキング方式の進歩

ピュータ用テープのトラッキング方式の比較を示した。トラックピッチが $100\mu\text{m}$ のDLTではテープ位置をガイドで規制する方式であるが、トラックピッチ $79\mu\text{m}$ のIBM3590ではサーボ信号を予め記録しその振幅の変化で位置を割り出す振幅サーボ方式が取られている。

さらにトラックピッチ $5\mu\text{m}$ 以下となる最新のコンピュータテープでは、ハの字のサーボ信号を予めテープ上に記録し、その再生信号の時間間隔からヘッドのトラックに対する位置ずれ量を割り出し修正するタイミングバーストサーボ方式 (位相サーボ) が採用されている。

図3.50にLTOのサーボパターンを示した。LTOでは4つのデータバンドと5つのサーボバンドをもち、ハの字の信号パターンにあたるABの間隔はヘッドのトラック幅方向に位置により変化するため、これによりヘッドの位置を検出することができる。また平行な信号パターンにあたるACの間隔は、トラック幅方向のヘッド位置に依存せずテープ速度変動などによる時間軸のずれを検出する役割をもつ。ヘッドの位置検出はAB間隔/AC間隔から求めることができ、ヘッドを動かすアクチュエータにフィードバックしている。

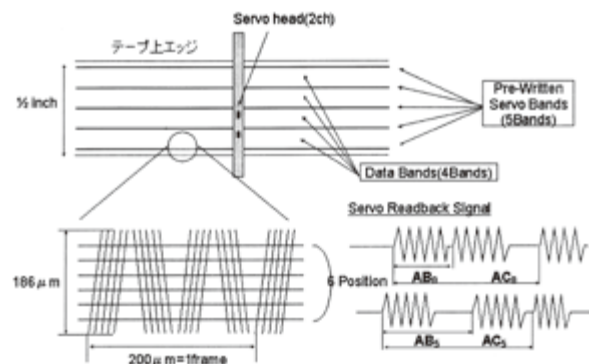


図3.50 LTOのサーボパターン

LTO の最新の G8 の仕様では、1/2 インチ幅の中に 6656 本のトラックがありトラック幅は $1.56 \mu\text{m}$ に過ぎない。サーボはこのトラック上をエラーが発生しないよう所定のずれの範囲でヘッドを走行させる働きをもつ。1 本のテープでこれを例えれば、図 3.51 に示すように鹿児島→札幌間 1600 km の道程を 1 mm 以内の蛇行で走行することに相当する。

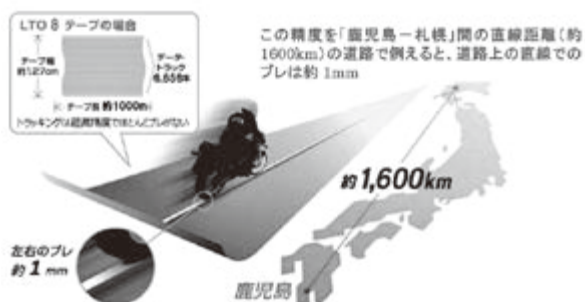


図3.51 高精度のトラッキング^[47]

なお、S-DLT ではテープ裏面に図 3.52 のようにピットを形成し、光ピックアップで読み取る光学サーボを採用している。これはサーボ信号を裏面に設けることで記録層をより有効に使える効果がある。

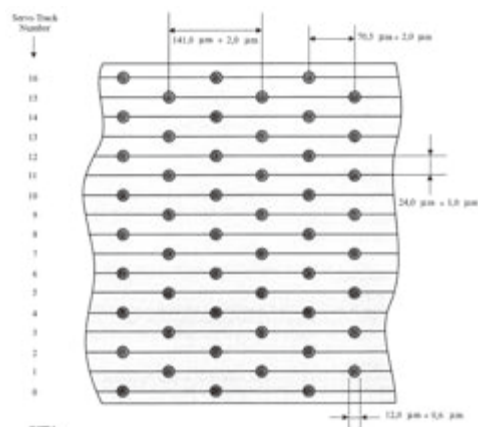


図3.52 S-DLTの光学サーボパターン^[48]

引用・参考文献

[1] 西川正明：磁気記録の理論、朝倉書店、1991
 [2] 日本放送協会編：「NHK ホームビデオ技術」、日本放送出版協会、1981
 [3] 日本放送協会編：「NHK ホームビデオ技術」、日本放送出版協会、1981
 [4] 西川正明：磁気記録の理論、朝倉書店、1991
 [5] 西川正明：磁気記録の理論、朝倉書店、1991
 [6] JEITA テープストレージ専門委員会資料をもとに作成

https://home.jeita.or.jp/upload_file/20181203094355_yxXw0r2czQ.pdf (閲覧 2019-10-01)

[7] JEITA テープストレージ専門委員会資料
<file:///cfs-05/HOME6/10003866S/My%20Documents/文献/JEITA保存性.pdf> (閲覧 2019-10-01)
 [8] 西川正明：磁気記録の理論、朝倉書店、1991
 [9] マリンソン：磁気記録の基礎、丸善、1994
 [10] K.Hanai et al : “The storage stability of metal particle media: Chemical analysis and kinetics of lubricant and binder hydrolysis”
<https://storageconference.us/2002/presentations/b14-hana.pdf> (閲覧 2019-10-01)
 [11] K.Katayama et al : “Long-Term Stability of Magnetic Tape for Data Storage Under an Accelerated Condition”. *IEEE Trans.Magn.*, VOL. 52, NO.7, 2016
 [12] K.Katayama et al : “Long term stabilities of magnetic tape for data storage in office environment”, *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS* 117, 17E305, 2015
 [13] 松本光功：磁気記録、共立出版、1977
 [14] A. Moser and D. Weller : “Thermal processes and stability of longitudinal magnetic recording media”, *IEEE Trans. Magn.*, VOL.35, NO.5, 1999
 [15] JEITA テープストレージ専門委員会
https://home.jeita.or.jp/upload_file/20190108152636_yKSGflVlix.pdf (閲覧 2019-10-01)
 [16] JEITA テープストレージ専門委員会資料
https://home.jeita.or.jp/upload_file/20130617102525_XwG0sm45iu.pdf (閲覧 2019-10-01)
 [17] O.Shimizu et al : “Long-Term Archival Stability of Barium Ferrite Magnetic Tape”, *J.Magn. Soc. Jpn.*, 36, 2012
 [18] Y.Kurihashi et al : “Effect of Thermal Conditions on Bit Error Rate for Barium-Ferrite Particulate Media”, *IEEE Trans. Magn.*, VOL 49, NO.7, 2013
 [19] 高尾正敏：ビデオレコーディングの話、裳華房、1989
 [20] 国立科学博物館 技術の系統化調査報告 VTR 技術開発資料集 3、2001
 [21] 久野誠一：「磁気記録用メタル粉の開発と事業化」、資源と素材 111, NO.12, 1995
 [22] 久野誠一：「磁気記録用メタル粉の開発と事業化」、

- 資源と素材、111, NO.12, 1995
- [23] 特公昭 60-050323、特公昭 61-018258
- [24] 松本光功：磁気記録媒体総合資料集、総合電子リサーチ、1985 の資料を元に作成
- [25] O.Kubo et al： “Properties of Ba ferrite particles for perpendicular magnetic recording media”, *IEEE Trans Magn.*, MAG-18, 1982
- [26] 小川悦治、久保修：日本応用磁気学会誌 .VOL.17 supplement NO.S2, 1993
- [27] D.Beraman et al： “6.7 Gb/in² Recording Areal Density on Barium Ferrite Tape”, *IEEE Trans. Magn.* VOL.43. NO.8, 2007
- [28] 篠原紘一：「蒸着テープ」、日本応用磁気学会誌 VOL.7、No.3、1982
- [29] 特公昭 60-031012、特公昭 57-003138
- [30] 高尾正敏：ビデオレコーディングの話、裳華房、1989
- [31] 高尾正敏：ビデオレコーディングの話 .裳華房、1989 の資料をもとに作成
- [32] Tadashi Ozue et. al： “11.5 Gb/in² recording using spin-valve heads in tape system”, *IEEE Trans. Magn.*,VOL.38, NO.1, 2002
- [33] K.Motohashi et al： “Investigation of Higher Recording Density Using an Improved Co-CoO Metal Evaporated Tape With a GMR Reproducing Head”, *IEEE Trans.Magn.*,VOL.43, NO.6, 2007
- [34] 「世界最高 面記録密度 45.0 Gb/in² の磁気テープ技術を開発」
https://www.maxell.co.jp/news/up_file/news/100514.pdf (閲覧 2019-10-01)
- [35] J.Tachibana et al： “Exploratory Experiments in Recording on Sputtered Magnetic Tape at an Areal Density of 148 Gb/in²”, *IEEE Trans. Magn.*,VOL.50, NO11, 2014
- [36] 特許 3506065
- [37] 山内恭久 他：「高性能重層ビデオテープの開発」、KONICA TECHNICA REPORT VOL.4 JAN., 1994
- [38] 柴田徳夫 他：「極薄層塗布型デジタル磁気記録メディアの生産技術」富士フィルム研究報告、NO.48, 2003
- [39] マリンソン：磁気記録の基礎、丸善、1994
- [40] 西川正明：磁気記録の理論、朝倉書店、1991 の資料を元に作成
- [41] 森園正彦：ハイファイテープレコーダ、ラジオ技術社、1969 の資料を元に作成
- [42] 西川正明：磁気記録の理論、朝倉書店、1991 の資料をもとに作成
- [43] JEITA テープストレージ専門委員会資料
https://home.jeita.or.jp/upload_file/20110908181308_34jzwpY2GE.pdf (閲覧 2019-10-01)
- [44] JEITA テープストレージ専門委員会資料
https://home.jeita.or.jp/upload_file/20110908181308_34jzwpY2GE.pdf (閲覧 2019-10-01)
- [45] JEITA テープストレージ専門委員会資料
https://home.jeita.or.jp/upload_file/20110908181308_34jzwpY2GE.pdf (閲覧 2019-10-01)
- [46] JEITA テープストレージ専門委員会資料
https://home.jeita.or.jp/upload_file/20110908181338_5aQZ9DXF3N.pdf (閲覧 2019-10-01)
- [47] Standard ECMA-320 S-DLT 規格より

4 | 磁気テープ技術における変革点

磁気テープシステムの記録密度は、テープの技術とハードの技術の融合により数十年間変わらずほぼ一定の速度で増加してきた。その継続的進歩のベースにはいくつかのブレイクスルー技術があった。筆者はメディア側から以下の4つをテープシステムの進歩に貢献した変革技術として取り上げた。

筆者が選んだ磁気テープの変革技術

- ・ Co 被着酸化鉄磁性体
- ・ メタル磁性体
- ・ 塗布型薄層構造
- ・ Ba フェライト磁性体

革新技術の選択の基準は、①性能の飛躍をもたらした技術、②市場価値の大きな製品を生み出した技術、③10年以上にわたりデファクトとなった技術である。3つが磁性体の技術、1つが層構成の技術であるが、記録素子である磁性体がかつても重要な技術であることには異論がないと思われる。なお、ここでは取り上げなかったが、①の観点では連続的に入射角を変化させる斜め蒸着法は革新的技術と言える。各技術の内容については第3章で述べたが、ここではテープの歴史全体の流れの中での意義をまとめてみた。

4.1 大型商品 VHS を生んだ Co 被着酸化鉄 (1975 年頃～)

磁気テープの磁性体は1950年代の実用化からその後20年間は酸化鉄が用いられた。映像記録では大きな容量を必要としたが、当時は放送局など業務用に限られていたため、オープンリールのテープを長くし消費量を多くすることで対応できる部分もあった。システム側での着実な進歩もあり、磁性体によるテープの革新的な進歩を必要とする状況になかったことも、長らく酸化鉄の中での改良に留まった理由であったと考える。

しかし、1960年代に入りDuPontにより開発されたAGFAによってテープ化された二酸化クロムは、酸化鉄の2倍の高いHcをもち磁気テープの性能を飛躍的に高める可能性をもった磁性体であった。

1970年代に入ると磁気テープの民生用への展開が本格化、同時に扱い難いオープンリールからカートリッジ（カセット）への移行が進んだ。カートリッジ

化によって記録面積の制約を受けるため、テープの記録密度の向上が結果的に加速するようになった。二酸化クロムは高Hcだけでなく磁化量や配向度も酸化鉄より高く、時代の要求に応える材料でポスト酸化鉄として注目された。実際にカセットテープの高音質のTYPE IIクロムポジションとしていち早く実用化され、民生用ビデオテープの開発でも先行していたソニーは二酸化クロムの使用を前提としていた。

そのような状況において、1970年代中頃に日本のメディアメーカ各社が開発を進め、磁性体メーカでは戸田工業が独自の技術をもってメディアメーカと共同で開発し実用化したのがCo被着酸化鉄である^[1]。その背景には二酸化クロムが欧米の発祥の技術であり、国内ではソニーのみが独占実施権をもち、使用するには高額なサブライセンス料が必要であったことがあった。

酸化鉄にCoを含有させることで高Hc化は可能だが、結晶構造中におけるCoイオンの不安定な挙動のため磁気特性が変化しやすく実用に至らなかったことは第3章で述べた。これに対し日本のメーカ各社はほぼ同じ時期に、図4.1に示すような異なるアプローチで改善を進め各々実用化するに至った。

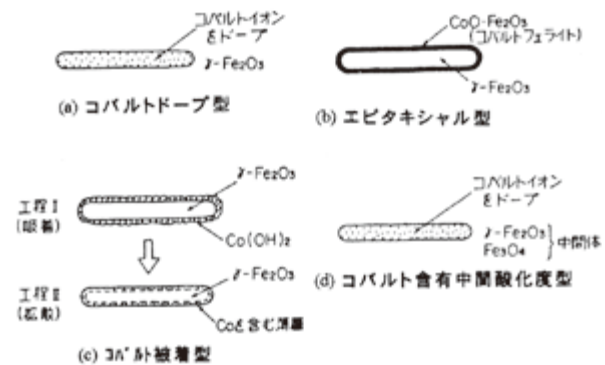


図4.1 各種Co変成酸化鉄の比較^[2]

TDKの今岡保郎、梅木信治らは戸田工業と共同で酸化鉄に水酸化コバルトを吸着して酸化鉄の表面をCo化合物で変成したCo被着酸化鉄「AVILYN磁性体」を開発し、表面のみにCoを析出させることでCo酸化鉄の安定化を実現した^{[3][4]}。

日立マクセルの岸本幹雄、雨宮政博らは酸化鉄表面にCoフェライトを結晶成長させた「EPITAXIAL磁性体」を開発し同様に安定性の課題を解決した^[5]。図4.2にその製法を示した。

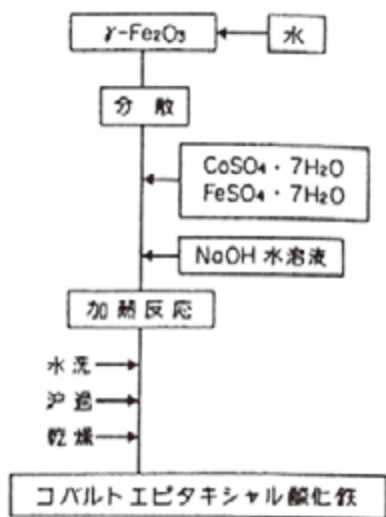


図4.2 日立マクセルのCo被着酸化鉄の製法^[6]

富士写真フィルムの明石五郎らはCo被着型とは異なる手法で課題を解決した。 γ 酸化鉄とマグネタイトの中間化合物（ベルトライド化合物）にCoを添加するとHcが高かつ加圧減磁の原因となる磁気歪みが相殺されることを見出し、高性能と安定性を両立させた「BERIDOX 磁性体」を開発した。

これら新たなCo変成酸化鉄の磁気特性は二酸化クロムに遜色なく、ヘッド摩耗がより少ないなどの長所もあり品質面でも二酸化クロムを凌駕するようになった。結果的に日本メーカーが開発したCo被着酸化鉄は二酸化クロムを駆逐することになり、その後10年以上に渡り新規磁気テープの磁性体のデファクトとなり、VHSなど磁気テープ繁栄の時代の大型商品を支える技術となった。

二酸化クロムでは特許権などで欧米企業に主導権があったが、Co被着酸化鉄は開発、生産とも日本企業を中心となった。また二酸化クロムは酸化鉄とは製法が大きく異なるが、Co被着酸化鉄の製法は酸化鉄の製法の延長にあった。次に続くメタル磁性体も含め製法に連続性と類似性がありそれまでのノウハウを活用できたことは、その後の磁性体の進歩を加速できた一因と考えられる。Co被着酸化鉄はVHSの台頭により需要が急速に伸び、石原産業、堺化学など新たなメーカーが参入してきた。ともにチタン工業と同じく酸化チタンの生産メーカーであり、副生成物として生じる硫酸鉄を酸化鉄の原料として利用できるメリットがあった。1980年代は日本発祥のCo被着酸化鉄テープの時代であった。

Co被着酸化鉄の革新性は、欧米で十数年にわたる研究開発でも実現できず実用化を断念していた酸化鉄へのCo添加を、各社独自の発想に基づく技術開発に

よりほぼ同時に実用化したことにある。そしてVHSという磁気テープの代名詞とも言える大型商品を誕生させたことにある。

もっとも1980年代に入っても1984年発売のコンピュータ用のIBM3480では二酸化クロムが採用され、1991年にPhilipsが発表したデジタルオーディオDCCのテープを開発したAGFAも二酸化クロムを用いた。欧米発祥の二酸化クロムに対する拘りはあったのではないかと推測する。もし二酸化クロムが酸化鉄の後継の磁性体となっていたら、その後の磁性体の進歩、日本企業を中心とした磁気テープ産業の急速な発展はもっと遅れていた、あるいは少し違った形になっていたかもしれない。

なお、TDKと日立マクセルのCo被着酸化鉄のより詳細な開発経緯については、2001年の国立科学博物館系統化調査報告のVTR技術開発資料集3に記載されているので参照されたい。

4.2 テープ繁栄の時代を築いたメタル磁性体 (1985年頃～)

1975～1985年がCo被着酸化鉄の時代とすれば、1985～2005年はメタル磁性体の時代である。この20年間はコンピュータ用テープの繁栄期であり、メタル磁性体はまさにそれを支えた材料技術であった。メタル磁性体は $B_m \times H_c$ で表される磁気エネルギー積がCo被着酸化鉄、二酸化クロムの約4倍であり1970年代末にはカセットテープで既実用化されていたが、より高密度で耐久性が要求される映像用として実用化が始まったのは1980年代後半の8mmビデオテープからである。そして、もっとも大きな役割を果たしたのがデジタル記録の放送用およびコンピュータ用テープであった。

メタル磁性体も技術発表はカセットテープで3Mが最初であったが量産技術が伴っていなかった。開発、量産は1990年頃までは関東電化工業が、その後は同和鉱業が中心となって大きな技術進歩を成し遂げた。

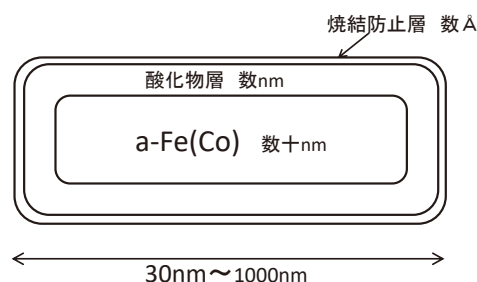


図4.3 メタル磁性体の構造略図^[7]

メタル磁性体は大きな磁気エネルギーをもち、他の酸化物磁性体より記録材料として有利であったが微粒子化には解決すべき課題も多かった。

図 4.3 はメタル磁性体の内部構造を単純化して示したものである。酸化膜が必要なため微粒子化で如何に均一に薄くしコアの磁性部分を確保するか、微粒子化で如何に形状磁気異方性を確保するかが大きな課題であった。同和鉱業の久野誠一らは、それまで焼結防止剤としてゲーサイトに Si を被着していたものをゲーサイトに Al を固溶させることで焼結防止効果と形状維持効果が高くなり、かつ酸素バリア性も高まることを見出した^[7]。これにより磁性体の Hc が高まり配向度も向上させることができた。また表面に酸化被膜を設ける方法は液中に酸素を送り込み乾燥させる液相反応であったが、酸素と不活性ガス中で行う気相反応とすることでより均一な酸化被膜が形成できた。もっとも、これら技術により磁性体の磁気特性は向上するも磁性体表面の性質もそれまでのものと変わったため、当初はテープメーカーでの処方との相性が悪い場合もあった。磁性体メーカーの表面改質とテープメーカーの処方技術の擦り合わせを重ねることで、メタル磁性体の性能を引き出すことができるようになった。

1980 年代のメタル磁性体は粒子長 200 nm、Hc 1500 Oe 程度であったが、デジタル記録の 1990 年代に入り高密度化が進み粒子長 100 nm 以下、Hc 2000 Oe 以上が要求されるようになった。この微粒子と高 Hc の両立を実現した技術が Fe, Ni から Fe, Co への組成変更と紡錘型の磁性体であった。紡錘型は針状比が小さくずんぐりした形状であり、針状比を高め形状異方性を確保することで Hc を高める従来設計とは異なる方向であった。しかし、結果的には紡錘型とすることで図 4.4 に示すように、2000 年代には粒子長は 35 nm まで

微粒子化し Hc も 3000 Oe 近くまで高めることができ、磁気テープ繁栄の時代を支える磁性体となった。

紡錘型で微粒子でも高 Hc が可能であった理由は以下のように考えられる。粒子が大きく細長いメタル磁性体では、内部は複数の磁区に分かれそれがつながった構造になっている。磁化反転させようとするすると各々の磁区が個別に反転するため、一斉に反転させるより弱い磁界で反転させることができる。一方、紡錘型で微粒子にすると内部の磁区がより一つ（単磁区）に近づく。磁化反転は一斉回転に近づくためより強い磁界が必要になり、微粒子にすると Hc がむしろ高くなる現象が起こったと推定している。さらに焼結防止剤として Al に加え希土類の Y を用いることでより高 Hc 化が可能になった。

メタル磁性体の革新性は、保護膜の必要性、形状異方性が、磁性体の微粒子化と高 Hc 化に対し本質的な弱点になると見られていたが、この壁を乗り越え十数年で粒子体積では 1/10 以下、Hc では 2 倍近くにしたことにある。また、これによって約 100 倍の大容量化が実現し、コンピュータ用、放送用として磁気テープを大きく発展させたことにある。

4.3 デジタル化に即応した薄層メタル技術 (1995 年頃～)

1970 年代の音声用カセットテープ、1980 年代の映像用 VHS テープ、そしてモバイル用途の 8 mm ビデオテープなど民生用テープは各社の磁気テープ事業を大いに活気づけたが、徐々にコモディティ化し事業としては魅力の無いものになっていった。個人向けのニーズへの対応も一段落し、1990 年代当初は磁気テープにとって次なる大型商品が明確ではなかった。一方で、1990 年代に入りコンピュータの普及が急速に進み、記録もアナログからデジタルへの移行が進みつつあった。

磁気テープのこのような状況において、富士写真フイルムの稲波博男、江尻清美らはメタル磁性体からなるサブミクロンの薄い磁性層を酸化チタンや α 酸化鉄の非磁性の塗布層の上の設けた全く新しい層構造を有する磁気テープの開発に成功した。この塗布型の薄層メタルテープを同社は ATOMM (A Thin layer high Output Metal Media) と命名し 1993 年に技術発表した^{[9][10]}。同テープの透過型電子顕微鏡 (TEM) による断面写真を図 4.5 に示した。

高密度のデジタル信号を記録するには磁性層の厚みを薄くしていく必要がある。これは磁性層が厚いと

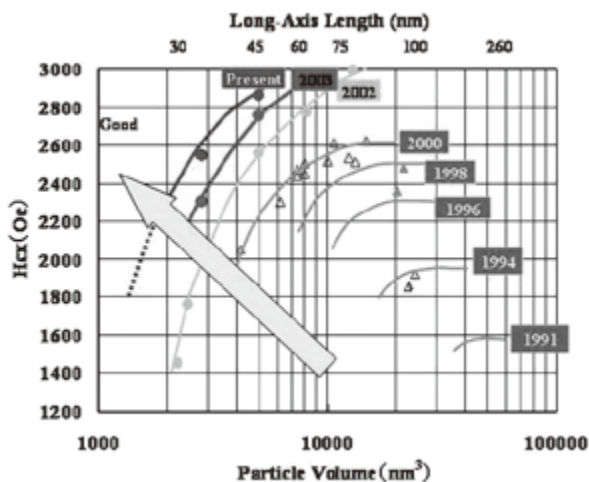


図 4.4 メタル磁性体の進歩^[8]

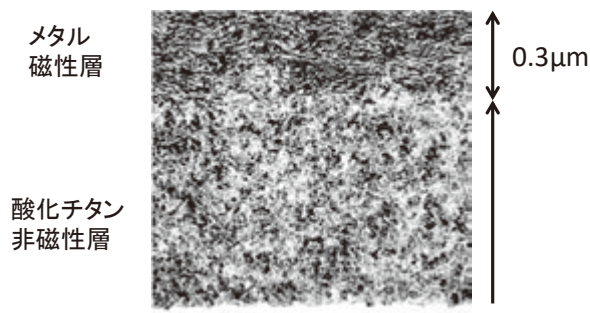


図4.5 薄層メタル(ATOMM)断面TEM像

ングヘッドでの磁気記録では深さ方向で磁化が広がり、かつ減磁界も大きい再生信号の PW_{50} が大きくなり高密度で記録が困難になるためである。また磁性層厚みが厚いと記録した磁化から発生する磁束が内部で安定な閉ループを形成し、磁界が外に出にくくなる現象も発生する。それまでの塗布型テープの磁性層の厚みは $3\sim 5\mu\text{m}$ 程度であり、高密度のデジタル記録に適するものではなかった。当時すでに実用化されていた薄膜型テープは蒸着法により $0.1\sim 0.5\mu\text{m}$ の薄くかつ均一な磁性膜を形成することができたため、デジタル時代の磁気テープは蒸着などの金属薄膜にシフトしていく可能性が大きかった。

$0.5\mu\text{m}$ 以下の薄い磁性層を直接ベースフィルム上に均一に塗布することは、当時の塗布技術では困難であった。また磁性層が薄いため潤滑剤など耐久性の確保に必要な材料を十分含有させることができない、支持体の突起がそのまま表面に現れるなどの問題もあり実用にはならないものであった。この問題を一気に解決したのが非磁性の層を磁性層の下に設ける新たな層構成と、それを塗布工程で一度に形成する同時重層塗布技術であった。同技術は1989年発売の世界初の重層ビデオテープ用の塗布技術として、同社の生産技術部の柴田徳夫らによって開発されたものであった。

薄層メタルはアナログ記録の Hi8 テープ、W-VHS テープですぐに実用化されたが、主たるターゲットは当時大きな市場の伸びが期待されたコンピュータ用テープの市場であった。1994年にはコンピュータ用テープで初めて DLT4000 に適用された。高密度での記録特性は蒸着テープに匹敵、高速塗布での大量生産が可能で生産コストは蒸着法より有利であった。また塗布型は放送用で信頼性の実績もあったため市場からすぐに受け入れられた。HDD の容量がまだ小さかった時代で、コンピュータ時代の始まりで増大する記録ニーズに対応できるメディアとして DLT4000 用のテープ DLT IV は生産が追いつかないほどの売れ行きを示した。テープメーカー各社も追随し、薄層メタルはその後の

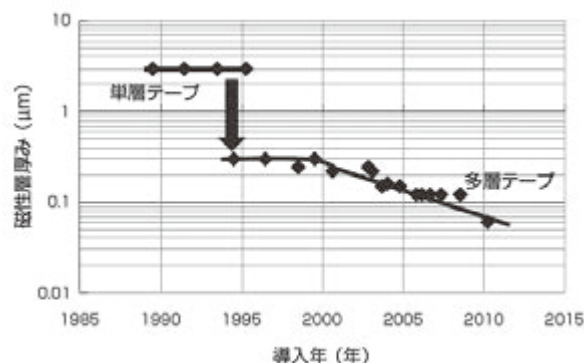


図4.6 磁性層厚みの推移^[11]

デジタル記録用テープのデファクト技術となった。後述の Ba フェライトテープもこの層構成を引き継いでいる。

図 4.6 にコンピュータ用テープの磁性層の厚みの推移を示した。1995年に1桁の不連続な薄層化が行われたことが分かる。これを実現したのが薄層メタルの技術であった。

一方で民生用デジタルビデオの DVC では、システムが蒸着テープに適合させた設計であったこともあり薄層メタルは使用されなかった。またソニー、松下電器がシステム開発する放送用デジタルビデオは従来の磁性層の厚いテープが中心であり、薄層メタルを用いたのは DVC-PRO のみであった。しかし、磁気テープの市場は既にコンピュータ用が中心の時代になっていた。

図 4.7 の左に示すように 1990 年当時の磁気テープのロードマップは酸化鉄に始まり Co 被着酸化鉄、メタルを経て最終的には金属薄膜になるというのが一般的な見方であった。これは 1980 年代初頭に富士写真フイルムの明石が提唱したロードマップにも沿っていた^[12]。HDD は 1980 年代にすでに薄膜型へと移行し、同社も将来を見据え薄膜型テープの開発も行っていた。しかし、薄層メタルの開発によりこのロードマップを図 4.7 の右のように変え、薄膜(蒸着)型の登場を限定的なものにすることになった。コンピュータ時代に入った 1990 年代以降に大容量化のニーズは急激に増加、競合メディアも台頭する中で安価な記録コストを塗布型テープで提供できるようになったことは、磁気テープの市場拡大に大きく貢献したと考える。

薄層メタル技術の革新性は、コンピュータ時代のデジタル記録への移行にいち早く対応したこと、それまでの厚みより 1 桁薄く塗布型では困難とされたサブミクロンの磁性層の薄層化を実現したこと、メタル磁性体の急速な進歩との相乗効果を生み出したことにある。そして 20 年近くにわたりデファクト技術として磁気テープの産業を支えたことにある。

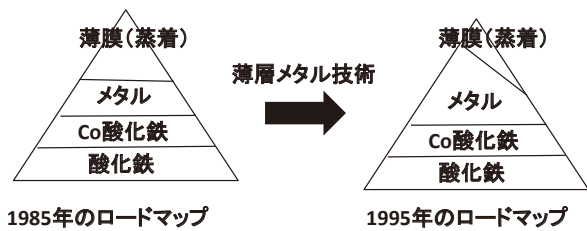


図4.7 磁気テープのロードマップ変革 その1

4.4 テープの危機を救った Ba フェライト (2005 年頃～)

2000 年代に入ると家庭用の磁気テープは光ディスクやフラッシュメモリに取って代われ、データのバックアップやアーカイブに使用されるコンピュータ用がテープの主な市場になっていた。一方、HDD は 1990 年代後半から技術革新が急速に進み、2000 年代に入るとデータ記録の主役の座に躍り出た。磁気テープはバイト単価で HDD に勝ち棲み分けが進むも市場は浸食される傾向になり、継続的なテープの大容量化が必須となっていた。

しかし、長らく磁気テープの進歩を支えてきたメタル磁性体も微粒子化による性能向上に陰りが見え始め、2000 年代に入り磁気テープメーカー各社はポストメタル磁性体の開発を本格化させ競っていた。ソニーはすでに実用化され市場で実績を積んだ蒸着テープによる高密度化^[13]、日立マクセルは微粒子で高 Hc の窒化鉄を独自に開発^[14]、富士フイルムは微粒子かつ高 Hc で垂直磁化が可能な Ba フェライトの開発を進めていた。

Ba フェライトは 1980 年代から次世代テープ材料の候補の一つと見られ各社検討を進めたことは第 3 章で述べたが、実際の特徴はメタル磁性体に遠く及ばず扱い難い性質ももっていた。そのため記録材料として「素性が悪い」とされ、その後のメタル磁性体の急速な進歩もあり、テープメーカー、システムメーカーにとって Ba フェライトは忘れ去られた存在になっていた。

筆者は野口仁と共に 1992 年に取ってこの Ba フェライトの検討を再開した。これは、Ba フェライトの扱い難い性質が先々高密度記録にとって長所になるとの考え、さらにはメタル磁性体では将来的に薄膜（蒸着）型に凌駕されるとの危機感からであった。図 4.8 に示すとおりメタル磁性体と Ba フェライトではその特徴は正反対であった。表 4.1 は着目した Ba フェライトの素性を記録材料として評価したものである。材料の素性とはその物がもつ本質な特徴であり、素性の良し悪しは時と場合で変わる場合がある。しかし、理

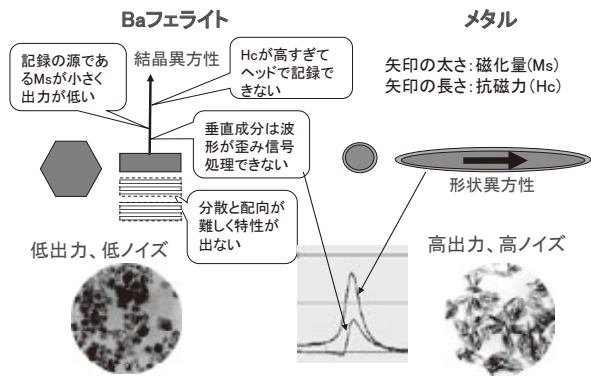


図4.8 Baフェライトとメタルの特徴比較

表 4.1 Ba フェライトの素性と記録メディアとしての評価

着目すべき素性	現実的短所 (否定論)	理論的長所 (肯定論)	実証の障壁
Msが小さい	出力が低い	ノイズが低い	ヘッドの高ノイズ
Hcが高い	ヘッドで記録できない	高密度でSN有利	ヘッド磁界の不足
微粒子化が可能	分散しにくい	ノイズが低い	ヘッドの高ノイズ分散の難しさ
垂直磁化が可能	信号波形が歪む SNIに反映しない	高密度でSN有利	周辺技術が未成熟 信号処理適性
化学的に安定	熱揺らぎに不利 メタルも実用上OK	酸化物で経時で安定	MP耐腐蝕限界？ 熱揺らぎ影響？

論的には長所となり得る素性も当時の記録密度やシステムでそれを事実として証明することは困難であった。

微粒子化による低ノイズもインダクティブヘッドの高いヘッドノイズでは SN 比に反映されず、また低ノイズの GMR ヘッドは当時まだ実用化されていなかった。高 Hc 化による高密度記録も当時のヘッドでは磁界が不足し十分記録することができなかった。Ba フェライトは平板状で磁化容易軸を垂直方向に向けることができるため、面内記録であっても磁化の垂直成分が多くなる高密度記録では有利と見られた。しかし分散や配向が難しくその効果を示すに至らなかった。波形歪の位相が周波数によって変わるので、信号処理が難しいと共同研究先から指摘を受けることもあった。

それに対しメタル磁性体は当時のシステム設計に適合する素性ももっていて順調に進歩した。筆者は当時メタルを「素直ですくすく育つ優等生」、Ba フェライトを「頑固で言うことを聞かない異端児」とやや自嘲気味に呼んでいた。

同時期に開発が進んだ薄層メタルの技術はいち早く実用化され、その後のメタルの急速な進歩もあり大きく事業展開される中で、Ba フェライトの研究は社内でも疑問視され始めた。そこで Ba フェライトの性能を実証する周辺技術の要件を揃えるため、高密度化の先端に行く HDD の技術、特に低ノイズの GMR ヘッド

を活用できるディスクでBaフェライトの高密度特性を検証することを試みた。浮上型のHDDヘッドを表面も粗い塗布型のフレキシブルディスクで評価するには、衝撃や静電気によるヘッド破壊の懸念もあり多くの工夫が必要であった。また信号処理技術の大学との共同研究も開始した。一方でBaフェライトの特性向上と分散改良、Baフェライトの特性を引き出す塗布技術の開発を進めた。

これらの地道で継続的な努力が実を結び、研究開始10年後の2002年にメタルに対しSN比で数dBの優位性を実証することができた^[15]。これはテープのSN向上の技術進歩の数年分に相当するものであった。

2004年から筆者はIBMと次世代テープの共同研究を開始、Baフェライトによる高密度化をIBMに提案した。最初はBaフェライトに消極的であったIBMもGMRヘッドの採用やBaフェライトに適する信号処理方式DD-NPMLと新たなサーボ方式を開発、2006年に容量8TBの可能性を実証し共同発表を行った^[16]。

技術発表とは言えこの容量は当時の薄層メタル製品LTO-G3の20倍であり、新たな記録材料として4世代分の技術の発展性を要求していたシステムメーカーも満足させるものであった。

図4.9にメタルとBaフェライト磁性体の粒子体積とHcの関係を示した。Baフェライトで高密度化に必要な微粒子化と高Hc化の両立が可能になったことがわかる。

Co蒸着、窒化鉄などライバル技術がある中で、Baフェライトは研究開始から20年近くたった2011年にIBMとOracleのコンピュータ用ハイエンドテープで実用化された。LTOでもG6から採用されポストメタルを確実なものにした。2010年に29.5 Gbps (容量35 TB)^[17]、2014年に85.9 Gbps (容量154 TB)^{[18][19]}、2015年には123 Gbps (容量220 TB)^{[20][21]}の技術発表を行い、さらなる大容量化の可能性を示した。図4.10のようにBaフェライトを垂直方向に配向し高密度記録特性を向上させることも行われている^[22]。

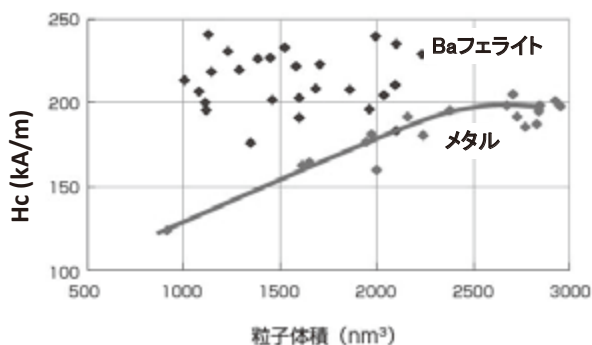


図4.9 磁性体の微粒子化と高Hc化の両立

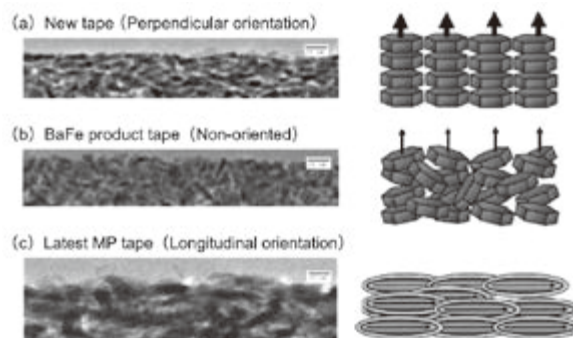


図4.10 Baフェライトの垂直配向

Baフェライト技術の革新性は図4.11に示すように、業界の最大公約数から生まれた既存のロードマップに従い激しい競争に巻き込まれるのではなく、新たなロードマップを創造し業界でのテープ開発のイニシアティブを取ったことにある。当時の面内記録のロードマップにはBaフェライトはなかった。そして、20年近くにわたり諦めずに研究を継続させたことで、メタル磁性体の技術限界とともに終焉の危機にあったテープの技術と産業をさらに先へと導いたことにある。

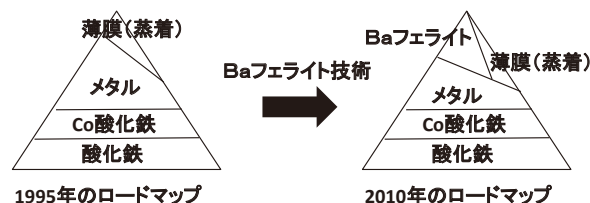


図4.11 磁気テープのロードマップ変革 その2

筆者はBaフェライトを研究開始後20年近く経って復活させることができた理由を尋ねられることがあるが、以下のような点を挙げている。

第一に、技術者が材料の素性を見極める感性とそれを活かす強い意思をもつこと、その価値を実証するために必要な要件を地道に準備したことにある。

第二に、ビジョンだけでなく説得力のある現物を示し上位者を動かしたこと、上位者がその価値を認め部下を信頼したことにある。それまでは研究のI/O比の議論を呼ばないよう極力少ないリソースで行ったことにある。

第三に、相互に利害関係もある中で、テープの将来という上位の目的を常に共有し、システムを主導するハードメーカーの技術にも一歩踏み込んで材料の特徴を引き出したことにある。

最後に、技術の意義を点のデータではなく競合との比較軸、将来性の時間軸の面のデータで示し、システムメーカーを納得させたことにある。

エピソード6 同時に研究をスタートした社内ライバル技術の危機を20年後に救ったBaフェライト

民生用テープのコモディティ化、記録のデジタル化やディスクメディアの台頭など、磁気テープを取り巻く環境が大きく変化していた1992年当時、富士写真フィルムの磁気材料開発部門の部長であった柏木朗は研究者の自己申告をもとに、次世代のテーマ探索として3名の技術者からなる2つの小グループを立ち上げた。稲波博男（リーダー）、江尻清美、鈴木雅樹のチームAから生まれたのがその後のテープ技術のデファクトとなった薄層メタル技術であり、筆者（リーダー）と野口仁、山崎信夫によるもうひとつのチームBから生まれたのがBaフェライト技術であった。

共に次世代技術を競ったライバルであったが、チームAの薄層メタル技術の実用化が急速に進み大きく事業展開されたこともあり、チームBのBaフェライト研究は社内外から否定的なストロークを受け研究継続を疑問視されるようになった。この状況を打開するため、筆者は1994年に敢えてAチームの成果である薄層メタル技術を用いたプロッピーディスク開発へのテーマ変更を願い入れた。その理由の一つはディスクで先端を行くHDDのヘッドを適用することで、テープでは実証が難しいBaフェライトの可能性を示すことができるのではないかという思いからであった。もっとも、これらは本来の開発テーマの中の数%を断続的に充てた所謂「やみ研」で進めたのが実態であった。2000年当時、研究所長であった杉崎力はこれに理解を示すも継続可否についての判断の時期が迫ってきた。杉崎は「技術の可能性と君たちの熱意は認めるが、業界全体としてメタルとBaフェライトでは開発にかかるリソースが違い過ぎる」という懸念をもっていた。確かに社内においてBaフェライト研究を行っていた技術者は数人に過ぎず、一方で薄層メタルの技術者はその10倍以上であった。協働すべきシステムメーカーや磁性体メーカーもメタルを前提とした開発を進め、Baフェライトにほとんど無関心か否定的であるのが実情であった。筆者は判断に2か月の猶予時間が欲しいと頼み杉崎はそれを承認した。その間に準備を進めていた施策をすべて織り込むべく、野口が中心となり最後のテストを計画した。生産技術部の萬代俊博とBaフェライトの特徴を活かす新たな精密プロセスを開発、Baフェライトの改良は山崎が、スキルが必要な測定は評価部門の遠藤靖が担当した。そして可否判断直前の試験サンプルでメタルの進歩数年分に相当する高いSN比を実現、2000年代に入って次世代テープの有力候補として開発を社内提案できるようになった。集大成として行ったテストがBaフェライト研究終結の締めめのテストになるか、新たな開発の始まりのテストになるかの大きな賭けに勝つことができた。

社内提案はできたものの、薄層メタルで業界をリードしメタル磁性体もまだまだ伸びると考えられた時期でもあり、事業部は依然として一度失格の烙印を押されたBaフェライトには消極的であった。しかし、杉崎の支援もあり2004年から筆者はIBMとメタルに替わる次世代テープの共同研究を開始、Baフェライトを疑問視するIBMに対し、テープの将来展開にはBaフェライトとそれに適したシステム開発が必要であることを訴求、GMRヘッド採用などハード技術に踏み込んだ議論を行いその性能を認知させることに成功した。IBMは磁気システム開発の先端を行く企業であるとともに、テープメーカーにとって重要顧客でもある。競合メーカーも独自のテープ技術を提案していた中で、技術交渉には細心の注意を払う必要があった。

磁気テープシステムのリーディングカンパニーであるIBMを引き込むことでBaフェライトがようやく業界で認知され、研究開始から20年近く経った2011年に実用化することができた。結果的には1992年に同時に研究をスタートしたチームAの成果がその後の磁気テープ事業を20年間支え、その技術が限界に達したとき、20年前に同時にスタートし社内でライバル技術として競い合ったチームBの成果が後継の技術となり、磁気テープをその先へと導くことになった。

参考・引用文献

- [1] 特公昭 52-24237、特公昭 52-24238
- [2] 川村俊明：国立科学博物館 技術の系統化調査報告第1集「VTR産業技術史の考察と現存資料の状況」第1集、2001
- [3] 梅木信治 他：IEEE Trans.Mag., VOL.10, 1974
- [4] 特公昭 52-36751、特公昭 52-36863
- [5] 岸本幹雄 他：粉体および粉末冶金, VOL.26, NO.4, 1979
- [6] 川村俊明：国立科学博物館 技術の系統化調査報告第1集「VTR産業技術史の考察と現存資料の状況、2001
- [7] 久野誠一：第2回ナノセラミックックス研究会講演資料、2005の資料を元に作成
- [8] 久野誠一：第2回ナノセラミックックス研究会講演資料、2005
- [9] H.Inaba et al：“The advantage of the thin film magnetic layer on a metal particle tape”, IEEE Trans. Magn., VOL.29, NO.6, 1993
- [10] H.Inaba et al：“Development of an advanced metal particulate tape”, IEEE Trans.Magn., VOL.34, NO.4, 1998
- [11] 原沢建、野口仁：「データストレージ用磁気テープの高密度化研究」, Synthesiology VOL.10 NO.1, 2017
- [12] 明石五郎：「磁気テープの進歩」日本応用磁気学会誌、VOL.7, NO.3, 1982
- [13] Tadashi Ozue et.al：“11.5 Gb/in² recording using spin-valve heads in tape system”, IEEE Trans.Magn., VOL.38, NO.1, 2002
- [14] Y.Sasaki et al：“Development of NanoCap technology for high-density recording”, IEEE Trans. Magn.,VOL.41, NO.10, 2005
- [15] 齊藤真二 他：「記録密度 Gb/in² クラスの塗布型磁気記録媒体」、富士フイルム研究報告、2003
- [16] D.Berman et al：“6.7 Gb/in² Recording Areal Density on Barium Ferrite Tape”, IEEE Trans. Magn. VOL.43. NO.8, 2007
- [17] G.Cherubini et al：“29.5 Gb/in² Recording Area Density on Barium Ferrite Tape”, IEEE Trans. Magn., VOL.47, NO.1, 2011
- [18] S.Furre et al：“85.9 Gb/in² Recording Area Density on Barium Ferrite Tape”, IEEE Trans. Magn.VOL.51, NO.4, 2015
- [19] 富士フイルム HP
従来比約62倍となる154TBの大容量データカートリッジの量産が可能に！
https://www.fujifilm.co.jp/corporate/news/articleffnr_0877.html (閲覧2020-02-06)
- [20] M.Lantz et al：“123 Gbit/in² Recording Areal Density on Barium Ferrite Tape”, IEEE Trans Magn. VOL.51, NO.1, 2015
- [21] 富士フイルム HP
世界最大容量1巻あたり220TB 磁気テープの高容量化技術を開発！
https://www.fujifilm.co.jp/corporate/news/articleffnr_0972.html (閲覧2020-02-06)
- [22] 小柳真仁 他：「バリウムフェライト磁性体による塗布型磁気テープの高密度化研究」, 富士フイルム研究報告、VOL.61、2016

5 | 磁気テープ産業の特徴と日本企業の貢献

5.1 インテグラル+モジュラー 複合型産業構造

数十年の磁気テープ産業の歴史において数多くの企業が参入したが、開発の歴史の長さ、商品展開の範囲の広さ、製品の市場シェアの大きさなどでみた代表的な日本のテープメーカーは、ソニー、TDK、マクセル、富士フイルムの4社、海外では3M（現Imation）であろう。一方、システム、ハードメーカーでは民生用、放送用のソニー、松下電器、コンピュータ用のIBMの3社が代表であろう。

磁気テープシステムの開発と実用化はドイツ、米国など欧米から始まり、第二次世界大戦後に日本企業もこれに注目し開発を開始したが、1950年代、1960年代はAMPEX、IBM、3M、BASF、AGFAなど欧米企業がその先頭を走っていた。

しかし、1970年代以降その技術進歩も産業発展も日本の企業が担うことになった。そのきっかけは既に述べたように、磁気テープの民生用への展開とカートリッジ化に伴う記録密度の向上の加速、および映像用は日本のハードメーカーが主導したヘリカル方式が主流になったことにあったと考える。

磁気テープの開発には磁性体を中心とした高性能の材料技術とともに、これらを組み合わせる処方技術、構造を制御するプロセス技術、さらにはシステム、ハード技術との融合、適合が不可欠である。磁気テープは複合材料でありインテグラル型、いわゆる摺り合わせ技術による商品の典型であると筆者は考えている。基本構造とそれを構成する材料はテープメーカー各社で大きくは変わらない。しかし、個々の素材の仕様、組み合わせ処方、生産のプロセスは、記録再生の基本特性はむろん、メディアとヘッドとの間（ヘッドメディアインターフェイス）で発生する様々な課題に対し相互に複雑に関連し合う。そのため解決方法は各テープメーカーのノウハウに依存しその内容はブラックボックス化している。その結果として、同じような材料を用いても各メーカーによるテープ性能や個性の違いが現われることになる。

筆者は本調査報告の冒頭で記録を「材料への物理的変化の固定」と定義したが、記録メディアの宿命からこの物理的変化はどんどん微細な領域へと進むことになりそれを制御する技術が必要になる。磁気テープは2000年頃には既に数十nmの所謂ナノテクノロジー

の領域に突入しており、材料そのものの特性だけでなく材料を緻密に配置させる技術が重要になってくる。磁気テープの生産プロセス設計はインテグラルな技術開発の中核部分であり、この点は光ディスクなどのターンキー方式と呼ばれるモジュール組み立て型の生産技術とは大きく異なり、一種の参入障壁にもなっていた。このような磁気テープのミクロでインテグラルな技術開発に対する感性を日本人が欧米人より持ち合わせていたと思われることも、日本メーカーが磁気テープ技術を主導した理由の一つと考える。

一方、磁気テープの基幹素材である磁性体とベースフィルムは専門メーカーが存在している。酸化鉄では戸田工業、石原産業、チタン工業、メタル磁性体では関東電化工業、同和鉱業（現DOWAエレクトロニクス）、ベースフィルムでは東レ、帝人（フィルム事業は現東洋紡フィルムソリューション）が代表的なメーカーである。磁性体の技術開発はテープメーカー自身が独自に進め、生産量が少なかった磁気テープの歴史の前半においては生産もテープメーカーが中心であったが、需要が拡大するに伴い特に量産品種生産については専門メーカーにシフトして行くようになった。独自にロードマップを描く専門メーカーからの技術提案、テープメーカーからの仕様提示や生産委託、共同開発など様々な関係が存在するが、主要材料の外部調達という点ではモジュラー型産業の側面ももっている。

1970年代から1990年代にかけ民生用、放送用の磁気テープシステムは日本のハードメーカーが主導したヘリカル方式が主流となり、材料、メディア、ハードメーカーのほとんどすべて日本企業であったことは、コミュニケーションの面で技術開発をより効率的なものにしたと考える。三位一体となった開発が日本国内メーカーで完結したことは、日本のテープメーカーの開発にとっては有利であった。

一方でリニア方式が中心のコンピュータ用のシステムはその黎明期からIBM、ヒューレットパッカード（HP）、STK（現Oracle）、DEC（現Quantum）など欧米企業が主導してきた。情報通信手段が発達した現代においてコミュニケーションの問題はないが、21世紀に入りLTOに代表されるように欧米メーカーが策定した事業モデルが日本のテープメーカーを悩ます状況を作り出した。テープメーカーはどこでも参画できるオープンシステムであるが、IBM、HP、QuantumのTPC 3社がフォーマットホルダーとなりロイヤリ

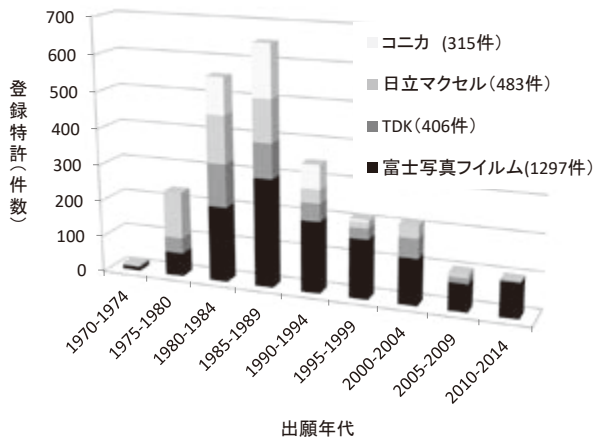


図5.1 テープ専門メーカーの登録特許の出願推移

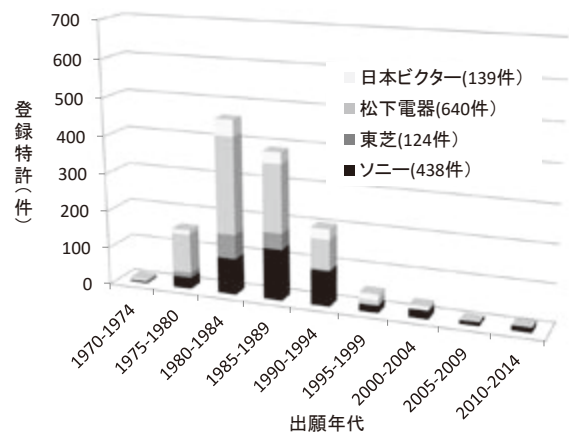


図5.2 テープシステムメーカーの登録特許の出願推移

データベース 日立Sharesearch
 検索条件: G11B5&23(ディスク分類のG11B5/82を除く)
 発明名称 磁気記録媒体 磁気テープ

ティ利益を生み出す構図となっている。コンピュータ用でも高度な摺り合わせ技術が必要なテープ技術は日本企業が主導してきたが、システム事業は欧米企業が主導する形になっていった。すなわち、テープメディアは現実的にシステム性能を左右する重要なものであるが、システム事業にとってはあくまで一つのモジュールとして扱われることになった。日本企業がシステム規格とテープ技術の両方を主導した20世紀後

半とは異なる事業モデルが21世紀に欧米企業によって形作られるようになった。

参考までに図5.1、図5.2に1970年以降に国内で成立した磁気テープに関する特許を100件以上保有した企業の出願年代の推移を示した。磁気テープの最盛期である1980年代に出願が集中している。テープ専門

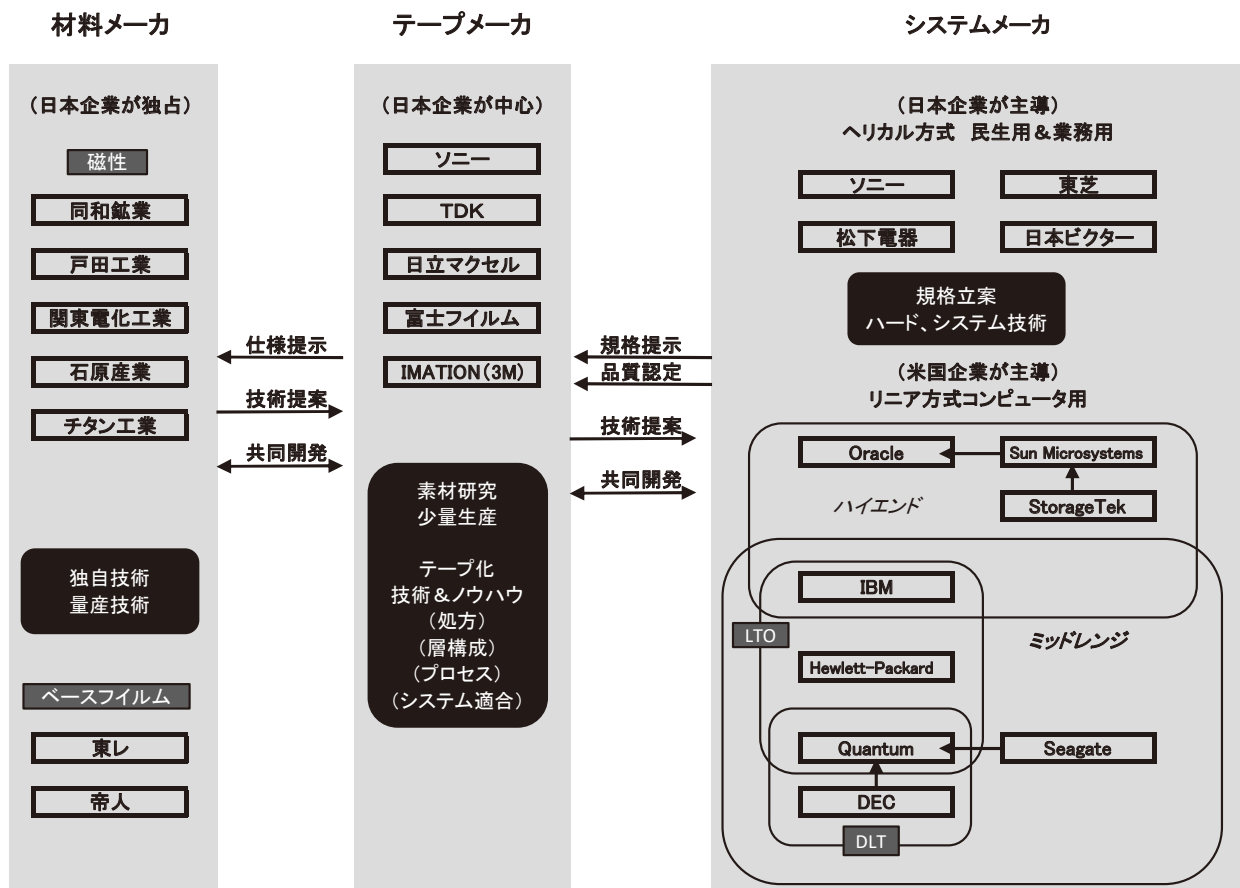


図5.3 磁気テープ産業の構図と主な企業

メーカーでは富士フイルムがもっとも多く2000年代に入っても出願が継続している。

システムメーカーではテープメーカーでもあるソニーの他、VHSテープ事業に参入した松下電器と日本ビクターの出願が1980年代に多くみられるが、松下電器は蒸着テープに関する特許を多く含んでいる。東芝はBaフェライトに特化した特許を集中的に出願している。図には示していないが、材料メーカーでは磁性体の戸田工業、同和鉱業、ベースフィルムでは東レ、帝人、バイングでは東洋紡の特許が多い。

図5.3に磁気テープ産業における代表的な企業と産業構造を示した。1980年代から今日に至るまで、技術開発力、市場シェアなどで重要な役割を担ったと筆者が考える企業であり、時制は一致していないことには留意願いたい。

5.2 原理発見は欧米、実用発明は日本

磁気テープ開発における日本企業の貢献を別の側面からみると、個々の技術において図5.4が示すように「原理は欧米、実用は日本」の例がいくつかみられる。

映像記録を現実なものにした AMPEX の回転ヘッド方式は基本発明であり、初期の放送用のデファクト技術となった。またヘリカル方式についても発案は米国の AMPEX や RCA が先と言われている。しかし、ヘリカル方式をより洗練させ実用レベルにしたのは東芝、日本ビクターなど日本企業であり、AMPEX 方式に取って代わり民生用、放送用の映像記録方式の主流となった。

高 Hc が可能な Co 変成酸化鉄は Co 固溶型が欧米中心で検討されるも磁気特性が不安定で断念されていたが、TDK、日立マクセル、富士フイルム、戸田工業らの技術開発で初めて実用化することができ VHS などの大型商品を生み出した。

Co 薄膜を斜めに蒸着することで磁気異方性が得られることは米国の研究者が偶然に発見し IBM もその研究を進めたが、入射角を連続的に変えることで実用に値する性能にまで高め、かつ量産性のある製膜法を開発したのは松下電器であった。メタルテープを最初に発表したのは 3M であったが、磁気テープ繁栄の時代を支えたメタル磁性体の開発力と量産技術をもったのは日本の企業だけであった。

1970 年から 1990 年の 20 年間は日本が著しい経

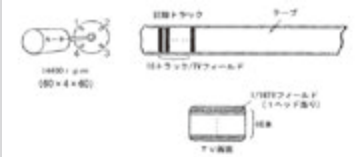
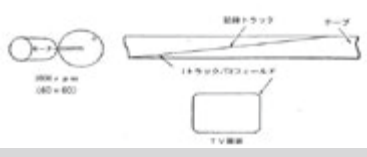
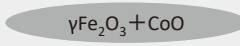

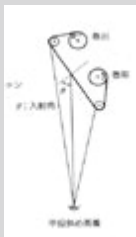

技術	欧米(原理)	日本(応用、進化)
回転ヘッド	<p>AMPEX</p> <p>4つのヘッドを高速回転させることで数十m/sのテープ相対速度を実現、固定ヘッドでは不可能な短波長の映像信号の記録を可能にした(16トラックで1フィールド画面を記録)</p> 	<p>東芝、JVC</p> <p>1つまたは2つのヘッドを斜め方向に高速回転させるヘリカル方式、1トラックに1フィールド画面の記録を可能にし、映像の繋ぎ目をなくした</p> 
Co添加酸化鉄	<p>AGFA 他</p> <p>酸化鉄にCoを固溶させ高Hc実現するも、磁気特性が不安定で実用に至らず</p> <p>$\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CoO}$</p> 	<p>TDK、日立マクセル</p> <p>Coを酸化鉄表面に被着することで高Hcと磁気特性の安定化を両立させた</p> <p>$\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3 \leftarrow \text{CoO}$</p> 
斜め蒸着	<p>IBM 他</p> <p>Coを斜めに蒸着することで磁気異方性が発現することを発見した</p> 	<p>松下電器</p> <p>回転冷却ドラム上の搬送ウェブに連続的に角度を変えながら蒸着することで、高い磁気異方性を実現した</p> 

図5.4 原理は欧米、実用は日本の例

済成長を遂げ、技術開発でも世界の先端を行く所謂「JAPAN AS NO.1」の時代であり、磁気テープの隆盛期もこの時期であった。一方で「欧米発祥の技術が応用では日本に先を越される」と揶揄されることもあった。

磁気テープの歴史を紐解いてみても同じことが言えるかもしれない。しかし、ここで挙げた例において欧米の発明がそのまま実用化されたのは AMPEX の回転ヘッド方式だけである。Co 酸化鉄、斜め蒸着の例

では欧米が行ったのは原理の発明というより原理の発見とみるべきである。存在するものを見出す「発見」と存在しないものを創り出す「発明」は本質的に違いがあり、産業技術では実用に適う「発明」にまで至ることが求められる。磁気テープに限らず、高度かつ緻密な摺り合わせ技術によって市場で今までにない新たな価値を生み出した製品は、仮に特許的には応用発明であっても産業的には重要発明と言うべきである。

6 | 磁気テープの社会貢献 過去と将来

情報の高速での記録、再生、消去が可能で広く普及したという点では、磁気テープは20世紀末までにおける唯一の記録メディアと言っても過言ではないだろう。実用化が始まった1950年代以降、放送用の音声記録、映像記録、さらには黎明期のコンピュータにおけるデータ記録など主に業務用として使われてきた。1970年代前半からはカセットテープ、後半からはビデオテープとして一般用への普及が始まり、音声、映像ソフトを記録し家庭、個人で楽しむようになった。1980年代、1990年代にはそのピークを迎え、生活における必須アイテムとなった。

カセットテープではソニーが1979年に発売したウォークマンが爆発的に売れたが、これはモバイルメディアの先駆けということができる。ビデオテープはテレビ番組の視聴をタイムシフトすることを可能にした。現代社会では当たり前のことだが、当時においてライフスタイルを変革する画期的な商品であったと言える。特にVHSはDVDに置き換えられるまで20年以上にわたり記録メディアを代表する商品であったと言ってよい。現在でも再生映像のことをVTR (Video Tape Recorder) と表現するのはその名残でもある。

1990年代の後半からHDDの高密度化が急速に進む一方で光ディスクやフラッシュメモリが普及し始め、長らく記録メディアに君臨してきた磁気テープもこれらの競合メディアに徐々にその座を譲ることになった。

表6.1に最新のデータストレージ用で各メディアの仕様を比較した。

表 6.1 記録メディアの仕様比較

	テープシステム		HDD	光ディスク
	LTO	インタープライズ	(near line用)	(ODA)
記録容量 [TB/unit]	6 (LTO7)	8.5 (T10KD)	6~8	0.3 3.3(11枚)
転送速度 [MBPS]	300 (LTO7)	252 (T10KD)	160-210	125(W) 250(R)
アクセス時間 [秒]	72 マウント時間 含む	56 マウント時間 含む	数ミリ秒	80 マウント時間 含む
媒体寿命 [年]	30		3-5	(50)
消費電力 (相対値)	~0.1		1	テープ同等
エラー率	1.0E-19	1.0E-20	1.0E-15	1.0E-15
即時Verify	可		不可	不可
媒体技術	BaFe	BaFe	SMR	多層化

言うまでもなく磁気テープの最大の弱点はアクセス性にある。その原因はテープ状のメディアであるためだが、これはフレキシブルな特徴を活かし記録面積を大きくすることで体積当たりの容量を最大化するとい

うテープの強みと裏腹な関係にある。従って、競合メディアの高密度化によって容量ニーズを満たすに従い、テープからアクセスが早く利便性の高い競合メディアへ移行することは必然であった。家庭用、個人用ではまず容量が小さい音楽用が1990年代光ディスク、さらには2000年代にフラッシュメモリへとシフトした。より大容量が必要な映像用も2000年代後半には光ディスクやHDD、さらにはフラッシュメモリにシフトしようとしている。

一方、同じ映像用でもより大きな容量を必要とする放送用は磁気テープの時代が続いたが、取材用は光ディスクやフラッシュメモリが使用されるようになり、磁気テープは主にアーカイブなど保存用に使用されるようになった。

現代社会において音声、映像というコンテンツの区別はもはや意味をもたず、すべてデジタルデータとして扱われる。大規模データを扱う場合、図6.1に示すように頻繁なアクセスが必要な on-line のホット領域はHDDやフラッシュメモリが使用され、磁気テープはバックアップ、さらにはアーカイブとアクセス頻度の少ないコールド領域に限定されるようになった。しかし、コールド領域の容量は全領域の総容量の約70%を占めると言われ記録メディアの必要性はむしろ大きいと言ってもよい。

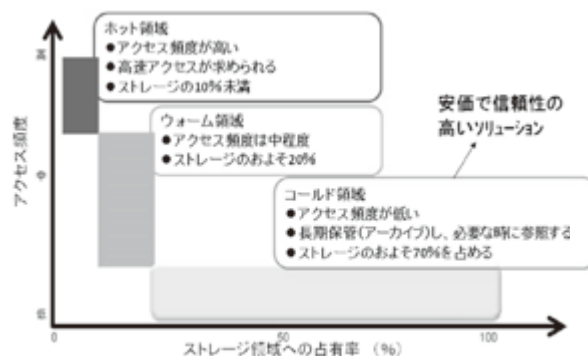


図6.1 ストレージの中のデータ領域

コールド領域で重要になるのは保管のコストと品質である。JEITAの試算によると空調費は発熱の大きいHDD装置に対しテープ装置は約10%と小さく、エネルギーコストで大きな差がある。図6.2はHDD装置とテープ装置のトータルコストを示した。容量規模が大きくなるほどその差が広がり1PB (1000 TB) 容量ではテープのコストはHDDの23%と1/4以下である。むろん、この試算にはテープが可換メディア

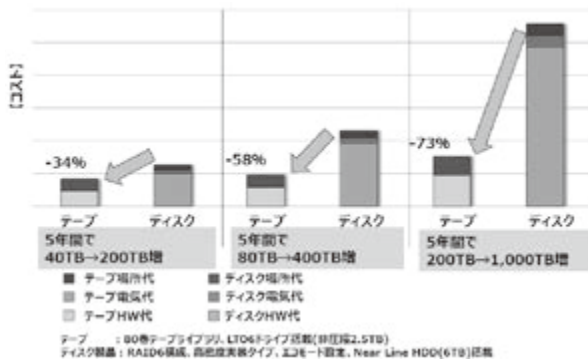


図6.2 テープとディスクの記録コスト比較^[1]

であることも寄与しているが、このことはセキュリティ対策や災害時の対応を含めたテープによるデータ保管の安全性を示している。テープは信頼性でもHDDに比べ実績があり、修復できないハードエラーの発生率も4桁以上低い。データセンター等におけるデータ損失のテープによるリカバリーの例も報告されている。Googleは2012年に発生したGmailの障害に対し、バックアップ用の磁気テープからデータをリストアしている^[2]。磁気テープはコールド領域において最適のメディアであると言える。

磁気テープに限らず記録メディアは記録密度（容量）＝顧客ニーズという単純な関係を数十年間保ってきた。このような技術指標がそのまま市場ニーズに繋がる関係を長年保っている分野は意外と少ない。例え

ば、銀塩写真における感度、デジタルカメラにおける解像度は一般用としてはある程度進歩すると顧客ニーズは飽和し過剰品質となり、技術指標＝顧客ニーズの関係は崩れてくる。

記録メディアはアナログ時代に記録密度の向上により高品位なシステムを常に誕生させてきた。デジタル時代、さらにはIoT、AIの時代になり創出されるデータは図6.3に示すように指数関数的に増加すると予測されている。あらゆる産業、学術分野、特に医療、創薬、宇宙、気象、軍事、監視、資源といった領域で新たに膨大なデータが創出され、記録のニーズも高まると予想され、記録密度＝顧客ニーズとの関係は今後も保たれると思われる。

しかし、情報がすべて記録されるわけではなく、また記録ニーズに対し記録メディアの需要が今後もそれに比例するとは限らない。以下の要因がある。

情報量増加>記録メディア需要の要因

- ・データ保存の集約、クラウド化
- ・通信によるデータ配布
- ・データの消去、書換えによる再利用

20世紀は一つの音楽アルバムを一つのテープに、一つの番組や映画を一つのテープに、などコンテンツとメディアを対応させる傾向があった。しかし、各メディアの大容量化でその考え方は非効率になり、一つの記録メディアに複数のコンテンツを一括保管するようになった。家庭用途ではデジタルオーディオプレイヤーに数百曲の音楽コンテンツを、Blu-rayレコーダに内蔵されたHDDに数十の映像コンテンツを写真や音楽とともに記録できるようになっている。放送局では1メディアに1コンテンツの考え方が残っていたが、最近はLTOなどの大容量テープに映像コンテンツをまとめてアーカイブ保存するようになり、業務用ではデータセンターであらゆるデータが集中保管されるようになっている。

インターネットなど通信の進歩は、家庭での記録メディアの需要に大きな影響を与えた。20世紀は音楽、映像コンテンツは各家庭で個々に記録メディアとして保有する、すなわち莫大な量の複製（コピー）が必要な時代であり磁気テープも大量に消費された。しかし、21世紀になりコピーも大容量メディアに集約されるようになり、さらにはクラウド化では手元に記録メディアをもつ必要すらなくなっている。音楽配信、映像配信など通信が情報の配布の役割を担うようにな

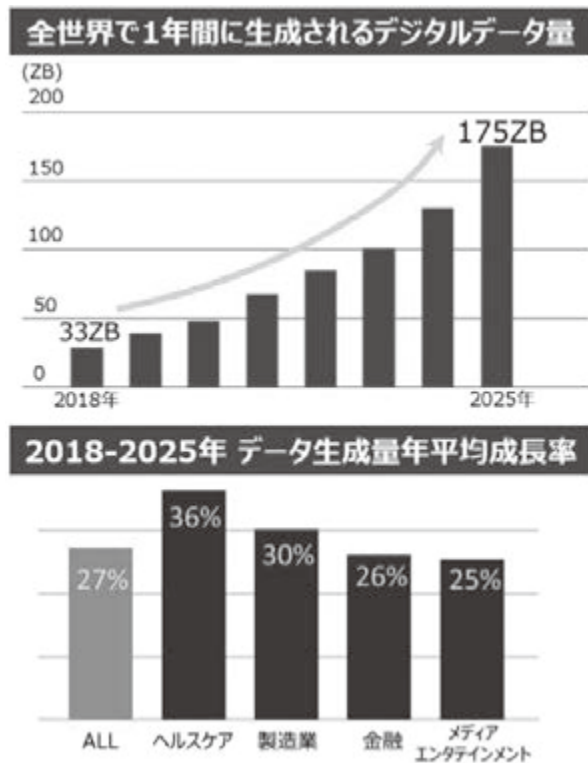


図6.3 世界で創出されるデータ量(IDCデータ)^[3]

ると、所有、保管のためのメディアのニーズは激減することになる。これはCDなどパッケージメディアの不振の原因にもなっている。

情報には記録として残すべき期間もある。映像遺産、公文書など半永久的に残すべきものもあるが、大半の情報は一時的なものである。不要となったデータは消去すればよく、記録メディアの需要は情報の寿命も考慮し予測する必要がある。

1984年のフラッシュメモリの誕生以降、30年以上メジャーな新規の記録メディアは誕生しておらず、磁気テープ、光ディスク、HDD、フラッシュメモリは各々の特徴を活かした形で当面は市場で棲み分けることになるであろう。その中でもフラッシュメモリがより重要な役割を果たしていくことは想像に難くないが、直接影響を受けるのはHDDである。光ディスクは三次元記録（ホログラフィックメモリ、二光子吸収）、近接場記録などが研究されるも実用には至っていない。光の波長限界の技術障壁を乗り越えることができず、数層のBlu-rayディスクで行き止まった状況にあり、記録メディア全体から見ればニッチ市場で生き延びていくことになる。磁気テープは当面フラッシュメモリと直接競合することはない、記録メディアの元来の役割である情報の長期保存の手段として、増大する情報の記録の最後の受け皿としての役割を担っていくと思われる。

その場合に重要なことは記録のマイグレーションである。紙や写真のような直接記録ではなく、変換記録である磁気テープには再生するレコーダやドライブが必要である。しかし、それらは装置個体としても製品仕様としても寿命がある。従って、適切なタイミングでデータを移し替えることが必要であり、例えばNHKの放送用の映像資産は1吋テープからD3テープへ、さらにはLTOテープなどのコンピュータ

用テープへとコンテンツの保存メディアの移し替えを行っている。これらは負荷のかかる作業ではあるが、より高性能で高機能な最新のシステムに移行することは品質、活用、保管といった面での利点も多いと考えられる。

図6.4に磁気テープの主力製品であるLTOの出荷容量の推移を示した。少なくとも容量で見ると出荷量は着実に増えており、記録ニーズの増加に対し磁気テープは今もそれに応え続けていることを示すものである。

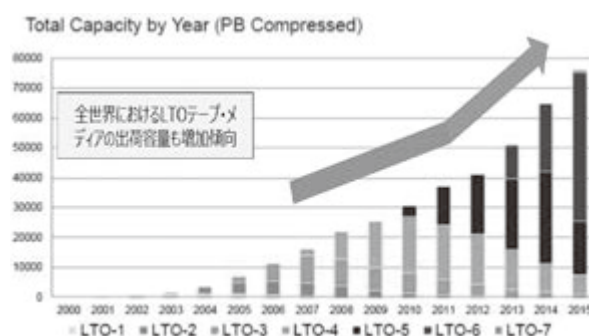


図6.4 LTOの出荷容量推移^[4]

参照・引用文献

- [1] JEITA テープストレージ専門委員会資料をもとに作成
- [2] 日経コンピュータ 2013年7月25日号
- [3] JEITA テープストレージ専門委員会資料
https://home.jeita.or.jp/upload_file/20191003093802_uSWUfqoj1n.pdf (閲覧2019-10-01)
- [4] JEITA テープストレージ専門委員会資料
file:///cfs-05/HOME6/10003866S/My%20Documents/文献/LTO出荷統計20180725112701_jYahZ5OUKL.pdf (閲覧2020-01-17)

7 | おわりに

磁気テープの数十年に渡る歴史の全体像を「磁気テープ 製品と技術の系統図」として巻末に示した。

磁気テープの技術史を纏める機会を得て改めて気が付いたことが幾つかある。

最初に、20世紀後半において磁気テープが果たした社会的貢献である。今でこそHDD、フラッシュメモリなどが記録メディアの主役となっているが、それまでの半世紀近くは音声や映像を手軽に記録し保存する手段は磁気テープしかなかったと言っても過言ではない。個人の生活向上、産業社会の発展に果たした役割は大きい。

次に、磁気テープの面記録密度が10倍/10年、体積記録密度では12倍/10年で進歩し、今も継続していることである。記録密度の向上が市場ニーズに直接応えると言う明確な目標があり、それに向かって邁進した技術者たちの努力の賜物である。この間に誕生したシステム規格は数十種類に及び、その時々のも多様なユーザーニーズに応えてきた。

さらに、技術や製品の第一歩は欧米が踏み出すが、その後の進歩の歩みは日本が先導する構図である。磁気記録そのものがそうであり、放送用、コンピュータ用の最初のシステムは欧米が発祥である。しかし、その後の日本企業の貢献がなければここまでの発展は無

かったと思われる。コンパクトカセット、VHSビデオを一流の産業に育て上げたのは日本の企業である。

磁気テープはマイクロな領域での高度なすり合わせ技術によって完成するインテグラルな製品であり、日本人、日本メーカーが得意な領域であったことが日本主導の産業となった理由と思われる。

しかし、21世紀になると欧米企業は事業の枠組みの中で、自らが主導できる展開シナリオを予め作り上げるようになった。モジュラー型、水平統合型の生産モデル、巨大IT企業の事業モデルも然りである。日本メーカーが作り出す高度なインテグラル型製品の磁気テープも、今日の主流システムであるLTOの事業モデルの中では一つのモジュールと見なされていると言われてもやむを得ない。

図7.1は1982年に富士写真フイルムの明石五郎が提唱した磁気テープのロードマップである（原図に一部説明を付記）。その後の磁気テープの40年近い歴史がこの通り進んだわけではないが含蓄のある図である。筆者は第4章でBaフェライトにより新たなロードマップを創造したと書いた。確かに2000年当時の業界ロードマップにはBaフェライトは無かったが、明石のロードマップには垂直磁化メディアの中で描かれている。創造ではなく復活させたという表現が正し

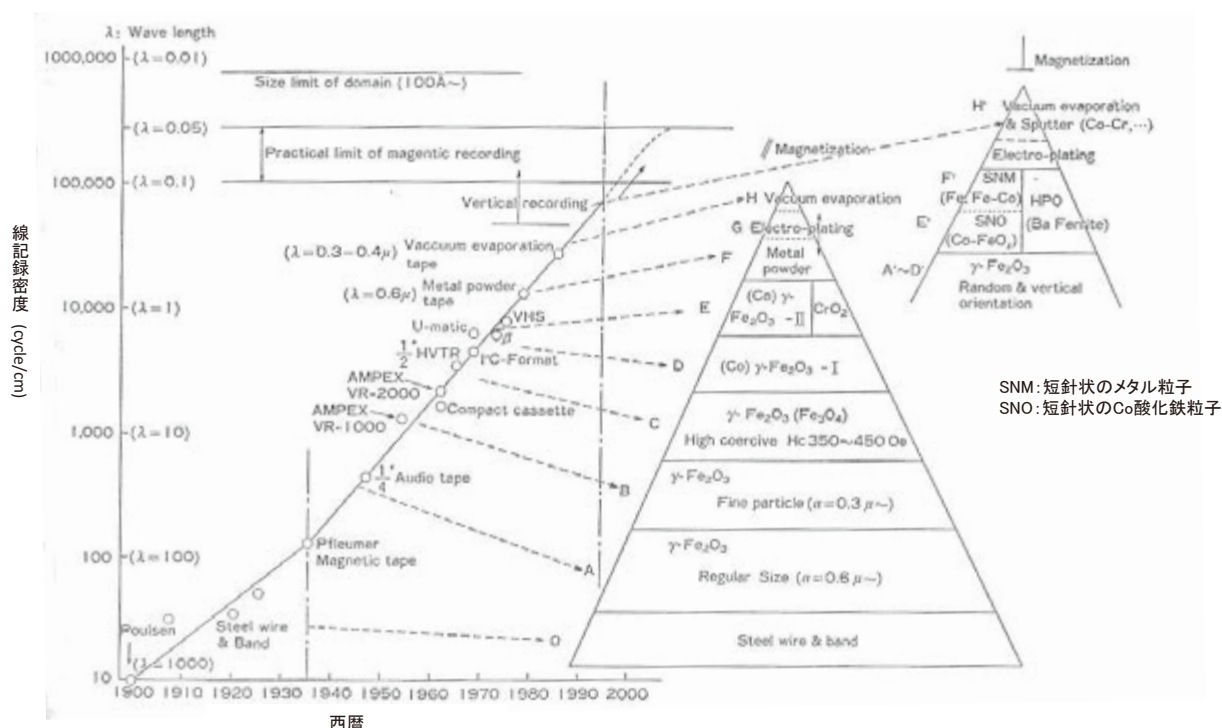


図7.1 記録密度と磁性体の進歩(明石のピラミッド)^[1]

いかかもしれない。頂点に立つスパッタテープも研究レベルでは実現できている。

富士フィルムのBaフェライト技術につき「磁気テープ、まさかの復権」という記事がある^[1]。磁気テープはもはや時代遅れの商品であるというのが一般的なイメージであった。確かに2000年代以降、一般家庭から磁気テープは徐々に姿を消しておりこれは正直な印象であろう。しかし、磁気テープの技術はその後も進歩し続け、一般の人は直接見ることが少ないコンピュータ用を中心に現役であり続けている。

磁気テープは長い歴史の中で何度か好機と危機の節目を迎えている。最初は1970年代のコンパクトカセット、VHSなど民生用への展開である。これにより磁気テープの高密度化の技術が加速し産業として大きな発展を遂げるようになった。二度目は1980年代に入りアクセスの速いHDDの進歩が始まり、コンピュータ用メモリとしての磁気テープの存在意義が問われ始めた時である。このときはカートリッジ化とオートメーション化で利便性を高め、テープの大容量の有用性を認識させることができた。三度目は1990年代に入り民生用のアナログ記録テープが成熟期を迎えるとともにデジタル記録へ転換期が始まった時期である。メタル磁性体の進歩で放送用テープのデジタル化が進むとともに、コンピュータ時代の始まりによりデータ用テープが大きな活路となり、薄層メタル技術がここで大きな役割を果たした。四度目は2000年代に入りHDDの大容量化と低価格化が急速に進み、バックアップ用途でも市場が奪われテープの需要が伸び悩んだ時期である。テープの継続的な大容量化が急務であり、今に続くLTOテープが新システムとして誕生、ハイエンドも大容量化が加速した。そして最後は2000年代後半、テープの発展を支えたメタル磁性体の進歩が鈍り始め、テープ技術、市場そのものが終焉を迎えるのではないかと思われた時期である。この危機はBaフェライトテープでとりあえず乗り切ることができた。

磁気テープでもっとも重要な技術である磁性体は酸化鉄（1950年～）、Co被着型酸化鉄（1975年～）、メタル&蒸着（1990年～）、Baフェライト（2010年～）の4世代に区分できる。これは約15～20年/世代でありこの間に記録密度は2桁近く向上している。磁性体の切り替えが技術レベル段階のステップアップを示すと考えると、磁気テープは15～20年で大きな進歩があったことになる。

筆者は磁気テープを中心に記録メディアの開発に30余年携わってきたが2012年に職務を離れ、この報

告書を作成している時点で7年が経過している。その後も磁気テープへの関心は大きく、その状況もある程度に把握しているが、それは2012年の時点で予測できた範囲を超えたものではない。Baフェライトテープを実用化したのは2011年であり、経験則からすれば15年後すなわち2020年代半ばには次なる技術によるステップアップが成されるはずであり、そうでなければ磁気テープの進歩は止まることになる。

Baフェライトをテープ用磁性体として復活させた2000年代初め、できることをすべて織り込んで達した記録密度は3 Gbps程度であった。これは当時としては画期的な値であったが、一方で持てる技術を使い果たしこれ以上何ができるのか、これが限界かもしれないとその先に不安をもったことも事実である。しかし、様々な施策をもって2011年には約29.5 Gbpsの可能性を実証、2015年には123 Gbpsの記録密度が実証されている。

筆者は研究所員に言ったことがある。「人間は技術の限界を見極められるほど賢くはない。しかし、人間は技術の限界を超える知恵をもっている」。一見、矛盾した言葉かもしれないが、長年磁気テープの開発に携わったものとしての実感である。記録密度の向上は立ち止まることが許されない記録メディアの宿命であり、フラッシュメモリ、HDD、光ディスクの技術者も同様の苦悩をもっているはずである。

磁気テープは成熟期から衰退期に向かうとする見方が多い。しかし、図6.4に示したとおり出荷容量で見ると年10%以上増加しており、これは社会のニーズに今も応え続けていることを示している。記録メディアは社会の必需品であり記録すべき情報量が今後も増える以上、記録メディアの需要が減ることはなく、仮に技術進歩が止まり大容量化が鈍ってきても、紙のように大量消費されれば事業や商売としては十分に成り立つかもしれない。

一方で、商品にも必ず寿命があり磁気テープもいずれ市場から姿を消すだろうがその時期は分からない。磁気テープの実用化が始まった1950年代半ばは筆者が丁度生まれた頃、つまり実用品としての磁気テープの年齢は筆者とほぼ同じである。お互いより長生きしたいものであるが市場に出て60年という年齢は少なくとも長寿な商品と言ってよいだろう。

参考・引用文献

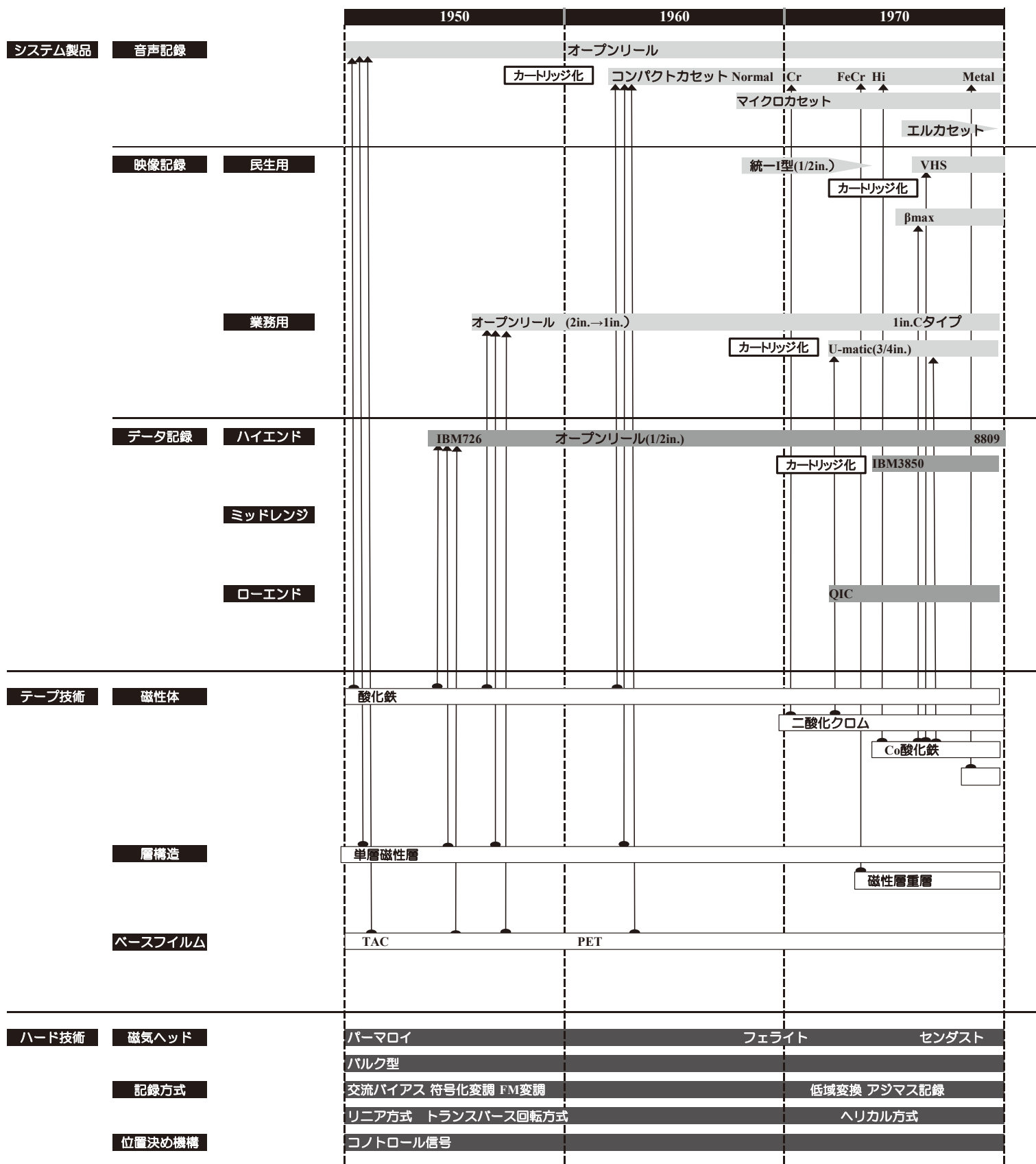
- [1] 明石五郎：「磁気テープの進歩」日本応用磁気学会誌、VOL.7 NO.3, 1982
- [2] 日経コンピュータ 2013年7月25日号

8 | 謝辞

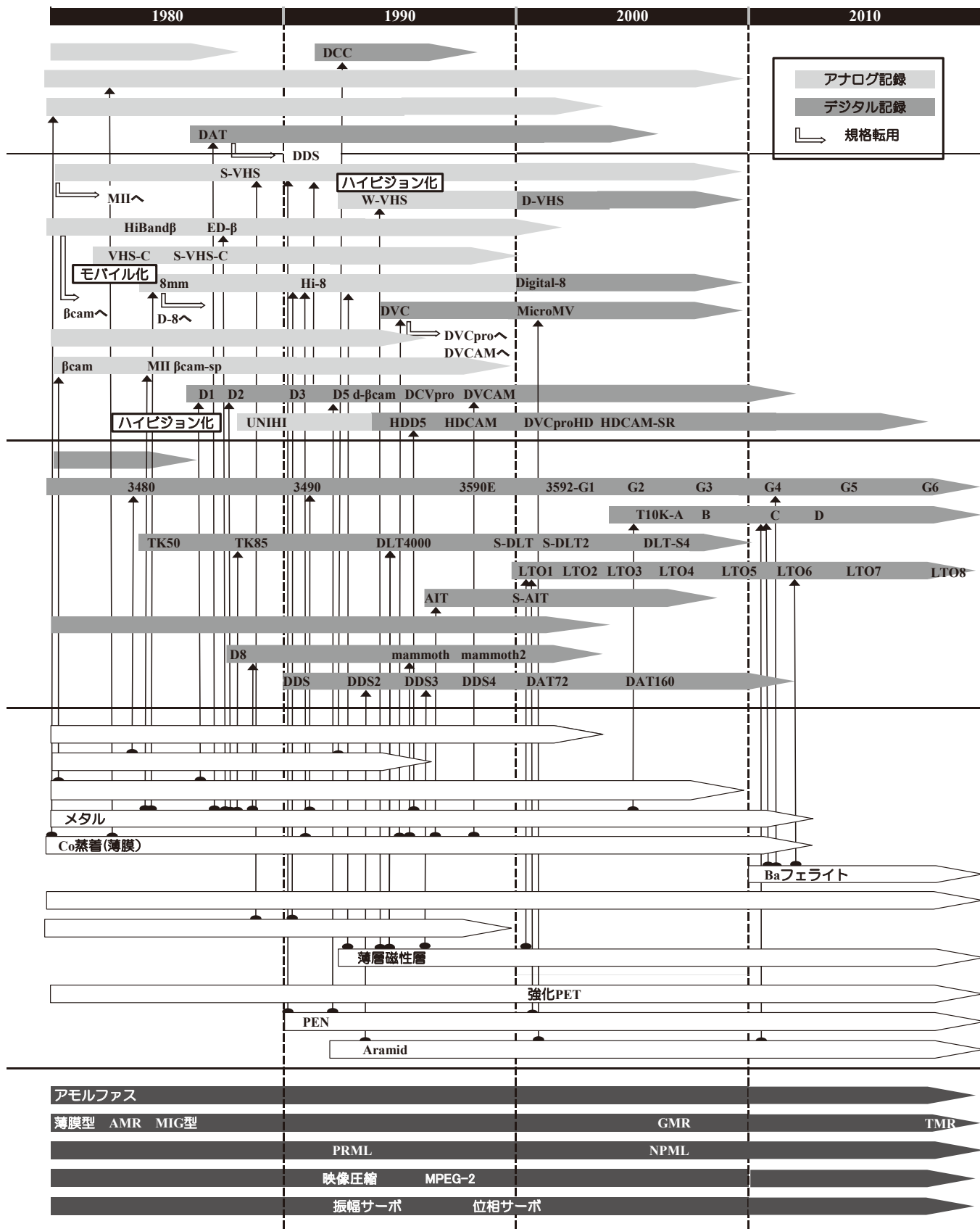
本調査報告書を作成するにあたり、多くの方々のご協力を頂きました。DOWA エレクトロニクスの松本和幸氏、吉田貴行氏には直接インタビューに応じて頂き、メタル磁性体について多くの有用な情報、資料を提供して頂きました。元戸田工業の三島啓男氏とは十数回に及ぶメールのやり取りで、酸化鉄磁性体の技術に関し詳細に解説して頂くだけでなく、当時の磁気

テープ業界についての興味深いお話を伺うことができました。ここに深く感謝申し上げます。また筆者が在籍した富士フイルムの記録メディア事業部、研究所、生産部、および知的財産本部の方々には、報告書作成に当たり様々な形でご協力を頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。

磁気テープ 製品と技術の系統図



製品ライフの開始時期は市場導入年度、終了時期はドライブまたはメディアの生産終了または販売終了などが考えられるが、不明な点も多く明確な基準に基づくものではない
 1950~1970年代のシステム製品でテープ技術との対応関係の矢印(→)がないものは酸化鉄磁性体、単層磁性層、PETベースフィルム
 1980年代以降のテープ技術とシステム製品の対応関係は、そのシステム分類においてはじめて採用された品種にのみ矢印(→)を記載
 ハード技術は磁気テープの性能を引き出す上で重要と思われるもの、システム製品との対応関係については本文を参照



磁気テープ 産業技術史資料 所在確認

名称	製作年	製造社	所在地	選定理由
Soni-Tape 「KAシリーズ」	1950	ソニー	ソニー	国産初の磁気録音テープである。
1 富士ファイルメモリーテープ	1965	富士ファイルム	神奈川県小田原市	国産初のコンピュータ用テープである。
2 カセットテープ C-60	1967	マクセル	京都府乙訓郡	国産初のコンパクトカセットテープである。
3 アピリン磁性粉サンプル Co被着磁性体	1973	TDK	秋田県にかほ市	酸化鉄の表面にCo化合物を変成被着させることで抗磁力を高め、磁気テープの性能を飛躍させた磁性体である。カセットテープ、VHSテープ等に採用され、マクセルのエピタキシャル磁性体とともに磁気テープ産業の繁栄に大きく貢献した。
4 コンパクトカセットテープ TYPE III Duad	1973	ソニー	東京都港区港南	上層に二酸化クロム、下層の酸化鉄を用いた初の重層テープで広い周波数特性を実現した。1970年代を代表する高音質のコンパクトカセットテープである。
5 Co・エピタキシャル磁性体	1975	マクセル	京都府乙訓郡	酸化鉄の表面にCo化合物を結晶成長させることで抗磁力を高め、磁気テープの性能を飛躍させた磁性体である。カセットテープ、VHSテープ等に採用され、TDKのアピリン磁性体とともに磁気テープ産業の繁栄に大きく貢献した。
6 コンパクトカセットテープ TYPE II SA	1975	TDK	秋田県にかほ市	高い抗磁力のCo被着酸化鉄を初めて用いた磁気テープである。先行して実用化されていた二酸化クロムに取って代りTYPE IIを代表的とするテープとなり、音楽用カセットテープの発展に貢献した。
7 1/2インチビデオカセットテープ ベータマックス K-30、K-60	1975	ソニー	宮城県多賀城市	VHSとともに家庭用ビデオの発展に貢献したβマックスの初代テープである。同フォーマットは放送用としてもっとも普及したβカムシリーズのベースにもなった。
8 VHS標準テープ タイプ75X	1975	富士ファイルム	神奈川県小田原市	家庭用ビデオでもっとも普及したVHSシステムの設計、開発に使用され、初代のVHSリアレンスになったテープである。
9 マイクロカセットテープ オングローム	1978	パナソニック	パナソニック	連続入射角変化法でCoを蒸着させる技術を磁気テープに応用した最初の製品である。このCo蒸着の技術はその後H18、DVCなど高品位のビデオテープにも適用された。
10 コンパクトカセットテープ TYPE IV MA-R	1979	TDK	秋田県にかほ市	メタルカセットテープ初期の代表的な製品である。テープの磁気特性が優れるだけでなくカセットに重鉛ダイキャストフレームを用い走行を安定化し高音質を実現した。
11 ベータカムシステム 1/2インチビデオカセットテープ 「HGシリーズ」	1982	ソニー	宮城県多賀城市	20年以上にわたり放送用ビデオでもっとも普及したシステムであるβカムシリーズの最初の放送用アナログビデオテープである。
12 8ミリビデオシステム用 メタルビデオカセットテープ P6-30、P6-60、P6-90	1985	ソニー	宮城県多賀城市	メタル磁性体の採用により、ビデオの小型化を実現し、モバイル録画を可能にした初代8mmビデオテープである。

	名称	製作年	製造社	所在地	選定理由
13	世界初の放送用メタルビデオカセット M II	1985	富士フイルム	記録メディア研究所 神奈川県小田原市	松下電器とNHKが開発したM II システム用で、品質基準の厳しい放送用ビデオテープでメタル磁性体を初めて実用化したテープである。「メタルテープ技術の開発による放送業界への貢献」で1990年にエミー賞の技術賞を受賞している。
14	ベータカムSPシステム用 メタルビデオテープ「BCT-Mシリーズ」	1987	ソニー	仙台テクノロジーセンター 宮城県多賀城市	メタル磁性体を用いた同テープによりβカムシリーズの放送用としての地位が確立した。「メタルテープ技術の開発による放送業界への貢献」で1990年にエミー賞の技術賞を受賞している。
15	デジタルオーディオテープ (DAT) DT-46, DT-60, DT-90, DT-120	1987	ソニー	ソニー本社 東京都港区	初のデジタルオーディオテープである。同テープの技術はコンピュータ用として普及したDDSテープにも展開された。
16	VHSテープ AXIA DC	1989	富士フイルム	記録メディア研究所 神奈川県小田原市	初の重層ビデオテープである。同時重層塗布技術により映像記録で重層化の効果を引き出すに必要な上層0.5 μmの薄層化を実現した。同技術はS-VHS、8mmビデオにも適用された。
17	メタル蒸着8ミリビデオカセットテープ 「Hi8ME」E6-60HIME、E6-120HIME	1989	ソニー	仙台テクノロジーセンター 宮城県多賀城市	蒸着技術をビデオ用に初めて採用し8mmビデオの高画質化を実現したHi8ビデオテープである。
18	デジタルマイクロカセット NT-1(スクープマン)	1992	ソニー	ソニー本社 東京都港区	ノントラックング(NT)方式を採用した切手サイズの世界最小のテープである。
19	デジタルベータカムVTR用 1/2インチビデオカセット 「BCT-Dシリーズ」	1993	ソニー	仙台テクノロジーセンター 宮城県多賀城市	高効率符号化方式を用い、高画質、長時間の録画を可能にしたβカムシリーズ最初の放送用デジタルビデオテープである。
20	コンピュータ用テープ DLTIV	1994	富士フイルム	記録メディア研究所 神奈川県小田原市	塗布型の磁気テープの磁性層厚みを従来の1/10以下の0.3 μmにまで薄層化し非磁性層上に設けることで、高密度のデジタル記録を可能にした最初のコンピュータ用テープである。
21	MEテープを用いたDVテープ AY-DVM60E	1994	パナソニック	ブランドコミュニケーション 本館、歴史文化コミュニケーション室 大阪府門真市	世界初の革新的工法(CVD)と金属薄膜とで小型/軽量/高性能を実現、8mmビデオより小型で映像のデジタル記録を可能にしたDVシステムのビデオテープである。
22	HDCAMフォーマットカムコーダー用 1/2インチデジタルビデオカセット 「BCT-HDシリーズ」	1997	ソニー	仙台テクノロジーセンター 宮城県多賀城市	ハイビジョンデジタル放送用のβカムシリーズの最初ビデオテープで放送局のデファクト標準システムとなった。
23	データテープ T10000C	2011	富士フイルム	神奈川工場 神奈川県小田原市	Baフェライト磁性体を用いた最初のコンピュータ用データテープで5TBの大容量を達成した(富士フイルムが生産し発売元のOracleに供給)。

「磁気テープ技術の系統化調査」 正誤表

ページ	段落	行	技術の系統化調査報告 第29集 2020年3月 (誤)	全文PDF版 2020年7月 (正)
122	右	図2.17	AMPEX方式とヘリカル方式	AMPEX方式(上図)とヘリカル方式(下図)
123	左	2	E.Msterson	E.Masterson
125	右	1、4	標準化	デファクト化
133	右	5	((Digital Equipment Corporation)	(Digital Equipment Corporation)
134	左	7	ヒューレッドカッパード	ヒューレットパッカード
141	左	下から3	チャンネル数	ヘッド数
146	左	図3.16 (上段)	180 240 μm $R_a=2.0 \mu\text{m}$ $R_a=2.0$ $R_a=0.8$	180 μm 240 μm $R_a=2.0\text{nm}$ $R_a=2.0\text{nm}$ $R_a=0.8\text{nm}$
146	左	図3.16 (中段)	$R_a=2.4$ $R_a=2.2$ $R_a=2.1\text{n}$	$R_a=2.4\text{nm}$ $R_a=2.2\text{nm}$ $R_a=2.1\text{nm}$
149	右	16	生成される、	生成され、
155	右	下から18	28~35nm。	28~35nm、
159	左	下から17	アルクリ樹脂	アクリル樹脂
170	左	下から13	in tyape system	in tape system
171	右	14	使用するの	使用するには
178	左	下から2	in tyape system	in tape system
178	右	6	D.Beraman	D.Berman
179	右	下から9	ヒューレッドパッカード	ヒューレットパッカード
181	右	10	不安定で	不安定で
186	右	6	なったと理由	なった理由