

トピックス

高密度フロッピーディスクの現状と展望

Present State and Future Prospects of High-Density Floppy Disks

齊藤真二・安永 正・野口 仁・遠藤 靖・柏木 朗 富士写真フイルム(株)記録メディア事業部, 記録メディア研究開発センター

S. Saitoh, T. Yasunaga, H. Noguchi, Y. Endo, and A. Kashiwagi, Research and Development Center, Recording Media Products Division, Fuji Photo Film Co., Ltd.

The capacity of floppy disks has been rapidly increasing over the last few years. Zip disks realized a capacity of 100 MB, which is 70 times that of conventional 2HD floppy disks. HiFD increased this to 200 MB, while providing downward compatibility with 2 HD floppy disks. The development of thin-layer metal particulate media greatly contributed to the achievement of such high capacities. Head-media interface technology and servo tracking were also indispensable factors in the capacity increases. The recording density of floppy disks has increased by 10 times in 7 years, and future progress is expected. High-capacity floppy disks are now recognized as having promise comparable with that of hard disks and optical disks.

Key words: floppy disk, high capacity, ATOMM, HiFD, Zip

1. はじめに

フロッピーディスク (FD) は, 1972年に IBM 社が 8 インチタイプを発表して以来大きな進歩を遂げてきた。1976年に 5.25 インチ FD が市場導入されると, まず小型化の競争が進んだ。1980年に SONY 社より 3.5 インチの

FD が発表されると規格化が進み, 今日 3.5 インチ FD ドライブはパソコンに標準搭載され, 2HD (容量 2 MB) は FD の代名詞として世界的に普及した。一方, 3.5 インチ FD の高密度化も進み, FD 1 枚当たりの容量は 2 MB 以降, 4 MB, 10 MB, 21 MB と大容量化してきた。

しかし, マルチメディア時代の到来により, 扱うデータ容量が急激に増加しつつある今日, さらなる大容量ディスクが望まれていた。ハードディスク, 光ディスクはこれらの要求を満たすものであるが, FD においても 1995年に米国の IOMEGA 社より 3.7 インチ 100 MB 大容量 FD を用いる Zip が発売され市場に普及した。つづいて 1996年には松下寿電子工業社等が開発した 120 MB の LS120 が発売され, ミツミ電機社等による 130 MB の UHC も発表された。さらに 1997年になり, SONY 社と富士写真フイルム社から 200 MB の大容量と 2HD との下位互換性を併せもつ HiFD の発表がなされ, FD 大容量化が再び活発化してきた。これら主要な 3.5 インチ FD の仕様一覧を Table 1 に示した。

5.25 インチにおいては IOMEGA 社がベルヌーイ方式を用いた独自の β ドライブを開発し 230 MB の容量が達

Table 1 Specifications of 3.5-inch floppy disks

	Unit	MF2HD	MF2ED	MF2TD	MF2SD	Floptical	ZIP	LS120	UHC	HiFD
Main developers		Sony	Toshiba	NEC	NEC	Insite	Iomega	Matsushita Kotobuki	Mitsumi	Sony/Fuji Photo Film
Outer diameter	mm	85.8	85.8	85.8	85.8	85.8	93.5	85.8	85.8	85.8
Capacity (unformatted)	MB	2.0	4.0	13.3	28.0	25.7		152		240
Capacity (formatted)	MB	1.44	2.88	10.2	21	20.8	100	120	130	200
Media type	—	Co 変性 酸化鉄	Ba- ferrite	Metal	Metal	Ba- ferrite	Thin layer metal			Thin layer metal
Linear density	kbpi	17.4	35	36.6	52.5	24	45.2	44.8	60	72-91
Track density	tpi	135	135	432	542	1245	2118	2490	2700	2822
Track pitch	μ m	187.5	187.5	58.9	46.9	20.4	12.0	10.2		9
Areal density	Mbpi ²	2.3	4.7	15.8	28.5	29.9	96	112	162	Max. 257
Rotational speed	rpm	300	300	360	600	720	2945	720	3600	3600
Data transfer rate	MB/s	0.0625	0.125	0.16	0.56	0.2	1.4	0.4/0.66	2.7/3.8	Max. 3.6
Head type	—	Ferrite	Ferrite	MIG	MIG	Ferrite	MIG	MIG	MIG	MIG
Servo tracking	—	—	—	Sector	Sector	Optical	Sector	Optical	Sector	Sector
Data encode	—	MFM	MFM	MFM	2-7RLL	1-7RLL	1-8RLL	1-7RLL	1-7RLL	PRML (16-17 code)
ECC	—	—	—	○	○	○	○	○	○	○
Compatibility with 2HD	—	○	○	○	○	○	x	○	○	○

Table 2 Correlation between digital recording performance and media design

○, good effect; △, small or no effect; ×, bad effect.

	Low - frequency output	High - frequency output	PI50	Noise	Overwrite
Larger magnetization	○	○-△	×	×	△
Higher coercivity	△	○	○	△	×
Thinner magnetic layer	×	Optimum	○	○	○
Smoother surface	○-△	○	○	○	○-△
Smaller magnetic particles	△	△	△	○	△

成されている。また携帯機器用途の2インチクラスの小径FDとして、1996年に三菱電機社よりFLOPICO、1997年にはIOMEGA社よりClik!の発表が行われている。

このようなFDの大容量化を実現させた技術要素として、1)メディア性能の向上、2)ディスク回転の高速化、3)ヘッド性能の向上、4)ヘッド/ディスクインターフェース(HDI)の開発、5)サーボトラッキングの採用、6)高密度に適した変調方式の採用、7)新規カートリッジ設計、などがある。

本報告ではZip用ディスク、HiFD用ディスクとして開発され、FDの大容量化の実現に大きく寄与した塗布型の薄層メタルディスクの特徴を中心に、FDの大容量化の現状と展望について述べる¹⁾。

2. 大容量FDの技術要素

2.1 メディア性能の向上

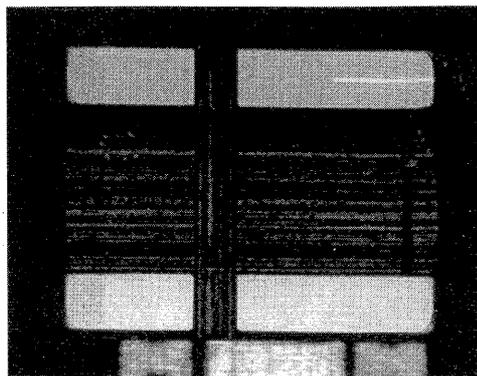
高密度のデジタル記録を行うためにメディアの求められる特性は、再生信号が十分なSN比(高出力、低ノイズ)をもつこと、磁化遷移領域が狭く再生波形の半値幅が小さいこと、オーバーライト消去が容易であることなどである。再生波形の特性については多くの理論式、近似式、実験式があるが、以下にその一例を示す²⁾。

$$E \propto I_r \cdot \ln\{(d+a+\delta)/(d+a)\}$$

$$W_{50} = 2\{(d+a+\delta)(d+a)\}^{1/2}$$

$$a \approx B_r \delta / 2H_c. \quad a = \delta I_r / 2\pi\mu_0 H_c$$

ここで、 E は出力、 W_{50} は半値幅、 a は磁化遷移パラメータ、 I_r は残留磁化、 H_c は抗磁力、 δ は磁性層厚、 d はスペース、 μ_0 は真空透磁率を示す。一方、低ノイズ化のためには粒子サイズを小さくする、表面を平滑にするなどの手法が有効である。磁気メディアの性能向上には、磁性粒子を小さくする、残留磁化と抗磁力を高くする、磁性層厚を薄くする、表面を平滑にするなどの方法がとられてきた。これらメディア設計とデジタル記録特性の関係の概略をTable

**Fig. 1** Typical air-bearing surface of a Zip drive.

2にまとめた。

このようなデジタル記録に適する塗布型メディアを目指して開発され、FDの記録密度を飛躍的に向上させたのが塗布型薄層メタル媒体であり、その特徴は、磁気特性に優れたメタル磁性体、高密度記録に適するサブミクロンの磁気記録層、そして各種の機能の有する下地層にある。詳細については3項で述べる。

2.2 ヘッドとHDI

抗磁力の低い酸化鉄系の磁性体を用いた従来のFDでは、積層型またはバルク型のフェライトヘッドが使用されてきたが、ZipやHiFDなどの大容量FDでは抗磁力の高いメタル磁性体に記録する必要があるため、飽和磁化の高いMIGヘッドが主に用いられている。

一方、高速回転するメディアに対し、ヘッドのフライングハイトを一定に保ち、追従性を向上させるためのHDIの設計、ドライブ側では、スライダ、ジンバル、サスペンションの構造が重要になってくる。HiFDやZipではHDD用に類似したスライダを用い、FD用に最適化したものを用いている。Fig.1に市販のZipのABS(air bearing surface)の一例を示した。

また、3000 rpm以上の高速でメディアを回転させることで非接触方式を実現しており³⁾、CSS方式ではなく、ディスクを回転させながらランディングさせるダイナミックローディング方式を採用していることと併せ、システムの信頼性を大きく向上させている。なお、LS120は回転速度は720 rpmと比較的低速で接触方式をとっている。

2.3 カートリッジ

カートリッジはメディアの保護、防塵の役割をもつが、高速でメディアが安定回転し良好なヘッド追従性を実現させる上でもその役割は重要で、空気力学を考慮した内部構造の設計が行われている。Zipのヘッドウィンドウはカートリッジ前面に設けられ、開口面積を小さくしているが、これは高速動作を可能にしかつ防塵性を高めているだけでなく、安定したヘッドの追従性を得ることに寄与している³⁾。

2.4 線記録密度と転送レート

メディア性能の向上、安定したヘッド追従性を実現する

HDIの開発により、Zipの線記録密度は45.2 kbp/で2HDの2.6倍、HiFDは91 kbp/で2HDの5.2倍の高密度を達成している。また、線速度が異なる半径方向に対しいくつかのゾーンに分割し、記録周波数を変えることで記録容量を大きくするゾーンビット記録が一般に行われている。

変調方式は2HDではMFM変調方式が用いられているが、Zipではより高密度化が可能となる1-8RLL符号方式、さらにHiFDでは16-17変換によるPRMLが用いられている。また、メディア上の欠陥に対しては、誤り訂正、欠陥セクターの代替セクター処理が行われている。

回転数はZipで約3000 rpm、HiFDで3600 rpmと2HDの約10倍以上に高速化されており、これによりZipで最大1.4 MB/s、HiFDで最大3.6 MB/sの高転送レートを実現している。

2.5 トラック密度とサーボ方式

トラック密度の向上にともないサーボ制御が不可欠になっている。サーボ方式の代表的なものとして、1) 各セクターにトラック情報を記録するセクターサーボ方式、2) 表面に溝を設け光学的に位置を検出する光サーボ方式、がある。

セクターサーボ方式は2TD (10 MB) から採用されており、複数のバースト信号の出力からオフトラック量を求めトラック位置の修正が行われる。Zipでは3度ごとの120本のサーボ信号が記録され、2HDの15.7倍の2118 tpi、またHiFDでは2822tpiの高トラック密度が達成されている。

光サーボ方式はディスク表面に溝を形成し、光の反射率の違いからトラック位置を制御する方式で、floptical (21 MB) から採用され、120 MBのLS120では同方式により2490 tpiの高トラック密度を達成している。

3. 塗布型薄層メタルディスク

3.1 メタル磁性体

塗布型磁気記録媒体の性能向上には磁性体の進歩が大きく貢献している。FDにおいても当初は γ 酸化鉄が用いられてきたが、Table 3に示すように2DD, 2HDでは抗磁力が高いCo γ 酸化鉄が、さらに高密度の2ED以降では、垂直異方性を有する微粒子バリウムフェライト磁性体や、残留磁化や抗磁力が従来の酸化鉄の2倍以上であるメタル磁性体を使用されるようになった。

大きな飽和磁化は高出力をもたらす、高い抗磁力は減磁界を低減させるため、特にメタル磁性体は磁気記録媒体の性能を大幅に向上させてきた。しかし、この高い磁気エネルギーをもつメタル媒体にも、記録密度を高める上でいくつかの課題があった。特に、塗布型媒体では磁性層を薄くすることがむずかしく、従来のFDの磁性層厚は1~3 μ m程度であった。これは、磁化量と抗磁力が高いメタル磁性体にとって、記録密度やオーバーライト特性などのデジタ

Table 3 Properties of magnetic particles used for floppy disks

FD (capacity)	2HD (2 MB)	2ED (4 MB)	2SD (21 MB)	Floptical (21 MB)
Particle	Co-modified iron oxide	Ba-ferrite	Metal	Ba-ferrite
Hc (kA/m)	60	60	120	60
Ms (emu/g)	70-75	60	135	60
Size (μ m)	0.6	0.05	0.20	0.05
Layer thickness (μ m)	1.0	2.5	2.0	0.6

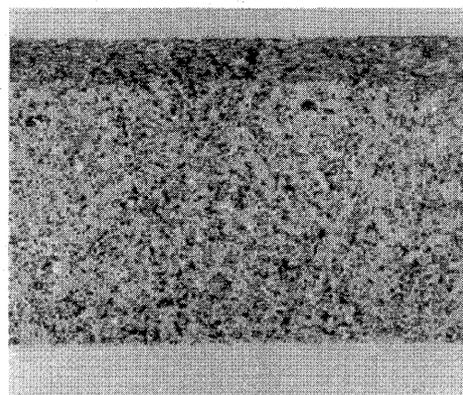


Fig. 2 Cross-sectional photograph of ATOMM-DISK.

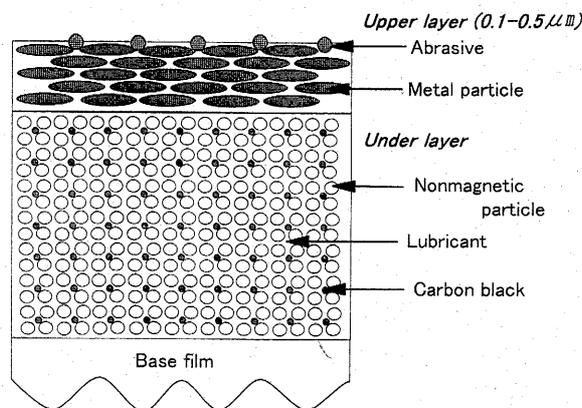


Fig. 3 Typical structure of ATOMM-DISK.

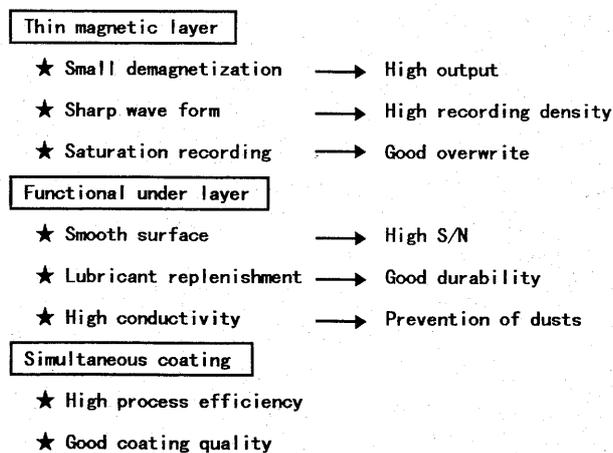


Fig. 4 Advantages of ATOMM-DISK.

Layer structure	Single and thick layer	Single and thin layer	Double and thin layers coated twice	Double and thin layers coated simultaneously
Surface smoothness	Rough	Rough	Smooth	Smooth
Packing density	Low	Low	High	High
Lubricant storage and replenishment	Average	Insufficient	Sufficient	Sufficient
Physical property control of coating layer	Difficult	Difficult	Easy	Easy
Thickness limit of magnetic layer	----	0.3-0.5 μm	0.2-0.5 μm	0.1 μm at present
Coating layer quality	Good	Poor	Poor	Good

Fig. 5 Comparison of typical layer structures of particulate media.

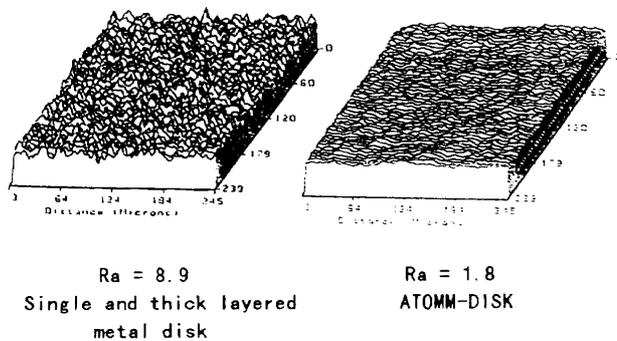


Fig. 6 Surface smoothness of ATOMM-DISK.

ル記録特性を向上させる上での大きな制約となっていた。

3.2 薄層メタルディスク (ATOMM-DISK)

富士写真フイルム社は1992年に、メタル磁性体からなる超薄層磁性層と、非磁性粉体からなる下地層で構成される塗布型薄層メタル媒体 (ATOMM: Advanced Super Thin Layer & High Output Metal Media) を開発した^{4,5)}。これをディスク媒体に適合させたのが薄層メタルディスク (ATOMM-DISK) である。Fig. 2 に ATOMM-DISK の TEM 断面写真を、Fig. 3 に ATOMM-DISK の層構成の概略を示した。ATOMM-DISK は薄層磁性層と、非磁性下地層からなるが、磁性層と下地層は同時に重層塗布され、これにより塗布型で0.1~0.5 μmの超薄層磁性層を形成することが可能になった。非磁性粉体としては酸化チタン、α酸化鉄などの微粒子の酸化物が用いられる。

Fig. 4 に ATOMM-DISK のもつ特徴を、Fig. 5 に一般的な塗布型FDの層構成との比較を示した。ATOMM-DISK では薄層磁性層で高密度記録を実現する一方、下地層は潤滑剤の貯蔵、補給など、トライボロジーの課題を解決し、信頼性を高めるための重要な役割を担っている。Fig. 6 は下地層の機能の具体例として媒体表面の平滑化の効果を示した。下地層のないメタル単層である2TDに対し、ATOMM-DISKの表面粗さが格段に平滑であることがわ

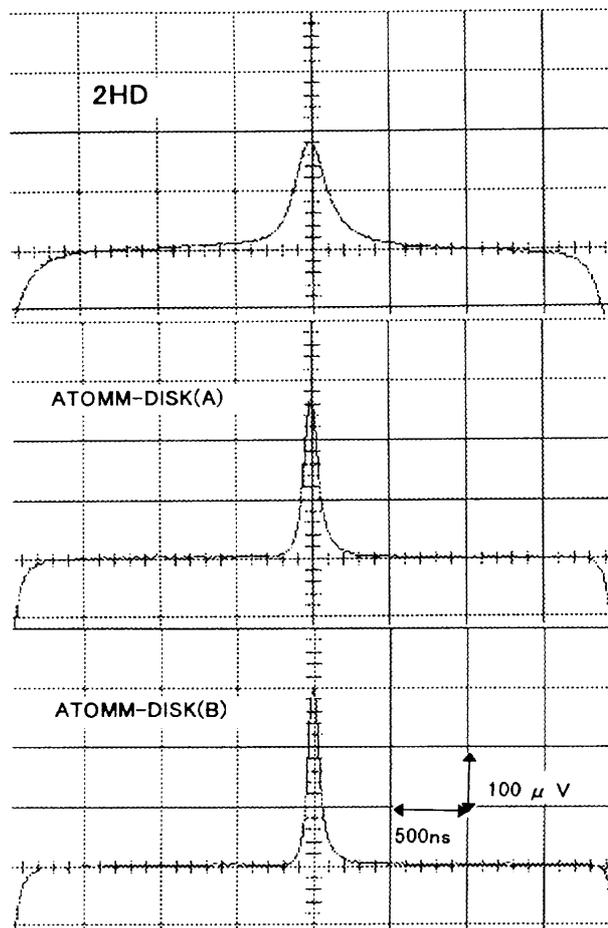


Fig. 7 Isolated pulse wave forms.

ATOMM-DISK (A): $H_c = 120 \text{ kA/m}$, $\delta = 0.32 \mu\text{m}$;
 ATOMM-DISK (B): $H_c = 159 \text{ kA/m}$, $\delta = 0.22 \mu\text{m}$.

かる。

ATOMM-DISKの磁性層厚や抗磁力は、記録密度やヘッド特性から要求される性能に適合するように選択される。またモジュレーションを最小限に抑えるため、面内ランダム配向処理を施している。メディアの寸法特性を支配する支持体の温湿度膨張と熱収縮はサーボ制御と密接な関

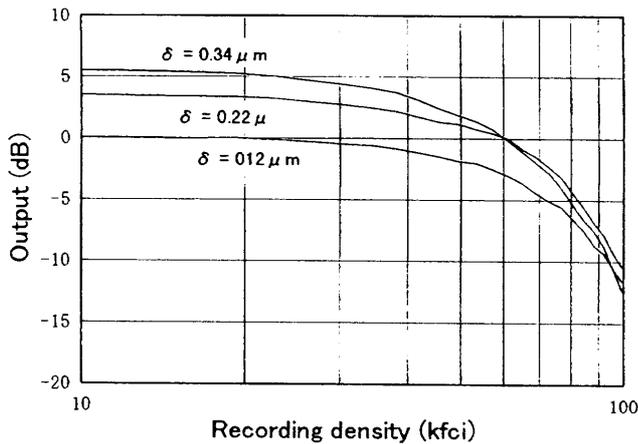


Fig. 8 Recording density of ATOMM-DISK.

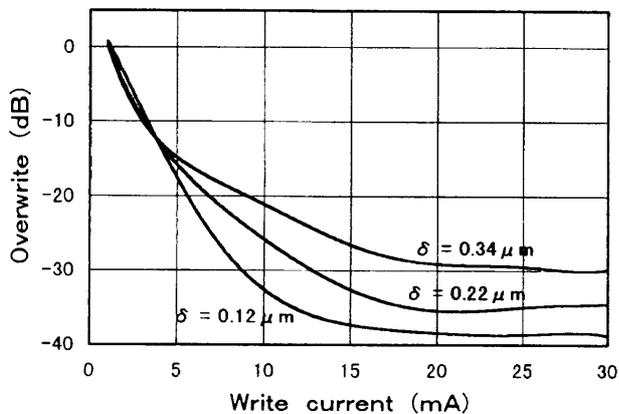


Fig. 9 Overwrite characteristics of ATOMM-DISK. High frequency, 6 MHz; low frequency, 1.5 MHz.

係があり、十分な等方性を確保する必要がある。また、ヘッドの追従性を高めるため、メディア剛性の最適化、メディア平坦性の向上が重要である。可撓性を有するメディアが中心部のハブにより固定されるFDでは、内外周での曲げ剛性が変化するので、全領域でヘッドの追従性を確保できるよう、支持体の厚みなどによって剛性は最適に調整される。また、メディアの平坦度が不十分であると、高速回転時のディスクの面ぶれが大きくなり、ヘッド追従性が不安定になる。

3.3 電磁変換特性

Fig. 7 に、磁性層厚 $0.32 \mu\text{m}$ 、 H_c 120 kA/m の ATOMM-DISK と、磁性層厚 $0.22 \mu\text{m}$ 、 H_c 159 kA/m の ATOMM-DISK の孤立反転波形を示した。ヘッドはギャップ長 $0.40 \mu\text{m}$ の MIG ヘッドを用いた。ATOMM-DISK は従来の 2HD に比べピーク半値幅が狭くかつ出力も高いことがわかる。Fig. 8 には ATOMM-DISK の磁性層厚を変えたときの記録密度特性を示した。 D_{50} は磁性層厚 $0.34 \mu\text{m}$ で 63 kfc i、 $0.22 \mu\text{m}$ で 74 kfc i、 $0.12 \mu\text{m}$ で 78 kfc i であり、薄層化により記録密度が向上することがわかる。Fig. 9 に ATOMM-DISK のオーバーライト特性を示したが、磁性

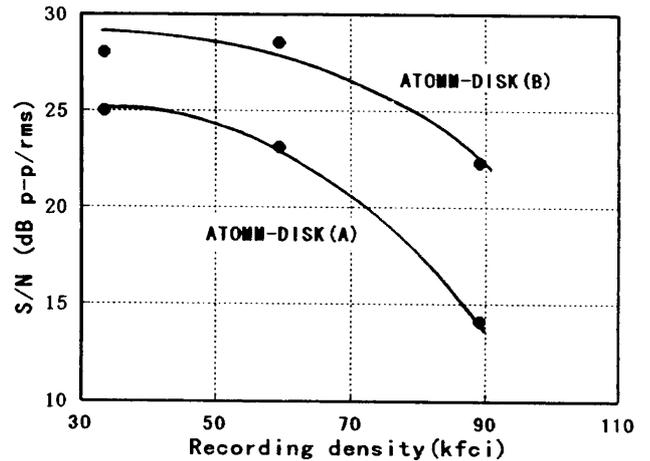


Fig. 10 Signal-to-noise ratio of ATOMM-DISK. ATOMM-DISK (A): $H_c = 120 \text{ kA/m}$, 粒子長 $0.2 \mu\text{m}$; ATOMM-DISK (B): $H_c = 159 \text{ kA/m}$, 粒子長 $0.1 \mu\text{m}$.

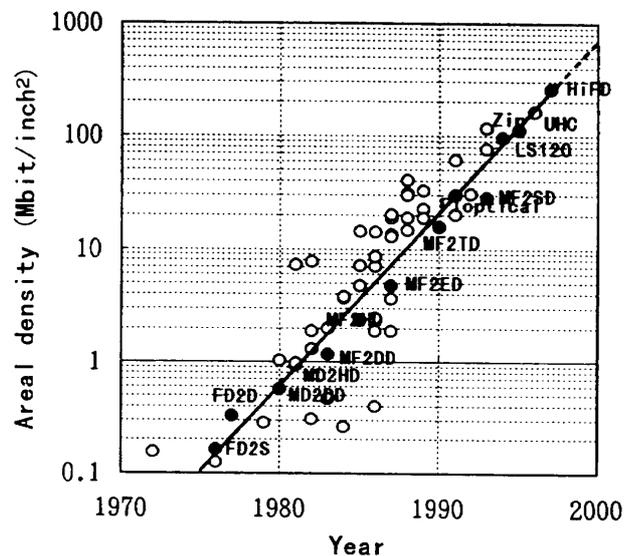


Fig. 11 Progress in the recording density of floppy disks.

層厚の薄層化によりオーバーライト特性も大幅に改善されていることがわかる。Fig. 10 には H_c 159 kA/m で粒子長 $0.1 \mu\text{m}$ の磁性体と、 H_c 120 kA/m で粒子長 $0.2 \mu\text{m}$ の磁性体を用いた ATOMM-DISK の S/N を比較した。磁性体の高抗磁力化と微粒子化により S/N が大幅に向上することがわかる。このような優れたデジタル記録特性により、ATOMM-DISK では高密度記録においても十分なエラーマージンを確保している。

4. FD 大容量化の展望

これまでに発表、発売された主な FD の記録密度の推移を Fig. 11 に示した。面記録密度は 7 年で約 10 倍の割合で進歩していることがわかる。200 MB の HiFD では、初期の 8 インチの FD と比較すると、線記録密度で約 30 倍、トラック密度で約 60 倍の高密度化を達成している。FD の線記録密度の向上にはメディアの高性能化が寄与してい

るが、トラック密度の飛躍的な向上にはサーボ方式の採用が不可欠であったことは言うまでもない。

しかし、面記録密度でみると Zip で 0.1 Gbit/inch², HiFD でようやく 0.25 Gbit/inch² に到達したのが現状である。特にトラック密度はハードディスクや光ディスクと比較するとまだ低く、トラックピッチを数 μm 以下にするサーボ方式と、メディアの寸法安定性向上が高密度化の鍵を握っている。

メディア性能の向上はメタル磁性体の改良、特に高抗磁力化と微粒子化が有効であると考えられる。メタル磁性体の他に、低ノイズで垂直異方性の特徴をもつバリウムフェライト磁性体を用いた塗布型 FD, スパッタ膜を用いた薄膜型 FD も大容量 FD の候補になると考えられる^{6)~8)}。また、記録波長が短くなるに従い、半値幅、ピークシフト、オーバーライトなどのデジタル記録特性を向上させる上で、ますます薄層化を進める必要がある。ATOMM-DISK は磁性層厚 0.1 μm 程度の極薄層が可能であり、今後の FD の大容量化に重要な役割を果たすと考えられる。

また、ハードディスクの高密度化に大きく寄与した MR ヘッドなどの採用、超高密度記録が可能な垂直記録方式などが実現できれば、FD においても記録密度の飛躍的な進歩が期待できる。

5. あとがき

ATOMM-DISK により 3.5 インチで 100~200 MB クラスの FD を実現することができた。これにより FD の大容量化が再び活発化してくると考えられる。大容量の記録ニーズに応えるディスクとして、HDD, 光ディスクと並び大容量 FD もその有力な候補になってくると考えられる。特に手軽なリムバブルディスクとして、その地位を確保することが期待される。

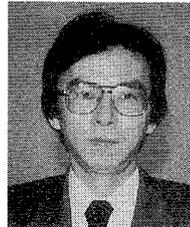
FD は磁性体の特性の向上と磁性層の薄層化、ヘッド性能の向上、サーボ技術の進歩などにより今後も大容量化が進み、近い将来 1 GB クラスの容量の実現も十分可能と思われる。

参考文献

- 1) 大石健吾, 遠藤 靖, 齊藤真二, 柏木 朗: *ITE Technical Report*, **19**(41), 25 (1995).
- 2) 松本光功, 著: “磁気記録” (共立出版, 1977).
- 3) J. C. Briggs: *SPIE*, **2604**, 220 (1995).
- 4) 柏木 朗, 稲波博男, 江尻清美: *ITE Technical Report*, **18**(25), 1 (1994).

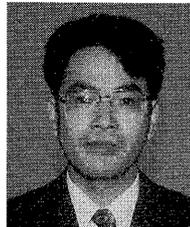
- 5) H. Inaba: *IEEE Trans. Magn.*, **29**, 3609 (1993).
- 6) S. Saitoh: *IEEE Trans. Magn.*, **31**, 2859 (1995).
- 7) 本田直樹, 駒木根隆志, 大内一弘: 日本応用磁気学会誌, **21** (Suppl. No. S1), 159 (1997).
- 8) 臼杵一幸, 西川正一, 長尾 信, 柏木 朗: トライポロジ会議予稿集, p. 535 (1997).

(1998年5月1日受理)



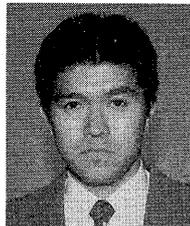
齊藤真二 さいとう しんじ

昭 56 東京大学大学院工学系研究科修士課程修了, 同年 富士写真フイルム(株)入社, 磁気テープ開発, 高密度フロッピーディスク開発に従事。記録メディア研究開発センター主任研究員, 現在に至る。
専門 工業化学



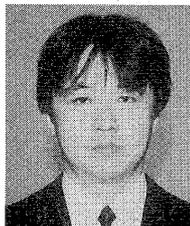
安永 正 やすなが ただし

昭 58 東京大学大学院理学系研究科修士課程修了, 同年 富士写真フイルム(株)入社, 磁気記録メディア研究開発に従事。記録メディア研究開発センター所属, 現在に至る。
専門 磁気記録



野口 仁 のぐち ひとし

昭 62 京都大学大学院工学研究科修士課程修了, 同年 富士写真フイルム(株)入社, 磁気テープ開発, 高密度フロッピーディスク開発に従事。記録メディア研究開発センター所属, 現在に至る。
専門 高分子化学



遠藤 靖 えんどう やすし

昭 61 武蔵工業大学工学部電子通信工学科卒業, 同年 富士写真フイルム(株)入社, 磁気記録メディアの商品開発に従事。記録メディア研究開発センター所属, 現在に至る。
専門 電気工学



柏木 朗 かしわぎ あきら

昭 43 京都大学工学部工業化学科卒業, 同年 富士写真フイルム(株)入社, カラー写真感材の研究に従事。昭 55 より磁気記録メディアの開発に従事。記録メディア研究開発センター所長, 現在に至る。
専門 物理化学