

電子情報の恒久保存メディア及びそれを用いたシステムに関する  
調査報告書

平成 22 年 3 月 31 日

国立大学法人 京都大学

# 目次

1. はじめに（越智裕之）	1
1.1. 背景	1
1.2. 目的	1
1.3. 成果の概要	2
2. 大規模デジタルアーカイブシステムの要件調査（金子晋丈）	3
2.1. 要件調査の概要	3
2.2. 所蔵資料のデジタルデータサイズ	3
2.3. デジタルデータの保存スペース	5
2.3.1. 保存用デジタルデータの保存	5
2.3.2. 提供用デジタルデータの保存	6
2.4. ストレージメディアへの書き込み	7
2.4.1. 保存用デジタルデータのメディアへの書き込み	7
2.4.2. 提供用デジタルデータのメディアへの書き込み	8
2.5. デジタルデータの読み込み	8
2.5.1. 物理的な資料閲覧サービスの現状	9
2.5.2. 電子的な資料閲覧サービスの現状	11
2.5.3. アクセスの偏りに関する分析	13
2.6. デジタルデータのマイグレーション	15
2.6.1. 保存用デジタルデータの定期的確認	15
2.6.2. 保存用デジタルデータのマイグレーション	16
2.6.3. 提供用デジタルデータのマイグレーション	16
2.7. まとめ	16
3. デジタル記憶メディアの長期保存適性に関する比較調査（越智裕之）	18
3.1. デジタル記憶メディアの開発動向	19
3.2. 光学ディスク	20
3.2.1. 構造	20
3.2.2. 信頼性阻害要因	21
3.2.3. 寿命に関する調査結果	22
3.3. 磁気ディスク	24
3.3.1. 構造	24
3.3.2. 信頼性阻害要因	24
3.3.3. 寿命に関する調査結果	25
3.4. 磁気テープ	26
3.4.1. 構造	26

3.4.2.	信頼性阻害要因 .....	26
3.4.3.	寿命に関する調査結果 .....	27
3.5.	フラッシュメモリ .....	27
3.5.1.	構造 .....	27
3.5.2.	信頼性阻害要因 .....	27
3.5.3.	寿命に関する調査結果 .....	28
3.6.	マスク ROM .....	28
3.6.1.	構造 .....	28
3.6.2.	信頼性阻害要因 .....	28
3.6.3.	寿命に関する調査結果 .....	29
3.7.	密封型マスク ROM .....	29
3.8.	まとめ .....	32
4.	恒久保存メディアとしての密封型マスク ROM の要件に係る予備評価 (越智裕之) .....	34
4.1.	非接触通信技術 .....	34
4.1.1.	既存の非接触通信技術及びそれらの比較 .....	34
4.1.1.1.	電磁波によるもの .....	34
4.1.1.2.	後方散乱方式によるもの .....	34
4.1.1.3.	光によるもの .....	34
4.1.1.4.	容量結合によるもの .....	34
4.1.1.5.	電磁誘導結合によるもの .....	35
4.1.2.	電磁誘導方式の詳細設計 .....	35
4.1.3.	予備評価チップの実験結果 .....	35
4.2.	非接触電源供給技術 .....	37
4.2.1.	電磁誘導方式と太陽電池方式及びそれらの比較 .....	37
4.2.2.	電磁誘導方式の詳細設計 .....	37
4.2.3.	予備評価チップの実験結果 .....	39
5.	密封型マスク ROM を用いたプロトタイプシステムの試作 (越智裕之) .....	40
5.1.	メディアの構成 .....	40
5.1.1.	概要 .....	40
5.1.2.	各構成要素の詳細 .....	41
5.2.	読出しシステムの構成 .....	42
5.2.1.	概要 .....	42
5.2.2.	リーダ部 .....	45
5.2.3.	インターフェース部 .....	46
5.3.	プロトタイプシステムの性能 .....	46
6.	プロトタイプシステムの評価及び検討 (越智裕之) .....	49

6.1.	プロトタイプシステムの課題.....	49
6.2.	密封型マスク ROM の課題.....	49
6.3.	恒久保存メディア一般の課題.....	49
6.4.	大規模デジタルアーカイブシステムの構成例と性能見積もり.....	50
7.	おわりに (越智裕之) .....	52
7.1.	総括 .....	52
7.2.	今後の展望と課題.....	52
	参考文献 .....	53

## 1. はじめに

### 1.1. 背景

情報処理技術及び機器の進歩や通信インフラストラクチャーの普及に伴い、人々の様々な活動がこれらに深く依存するようになってきた。政治、経済、教育、文化、社会等、あらゆる領域で情報が電子的に生産・流通し、利用されており、デジタル情報が社会的基盤として重要となっている。

書籍やフィルム等で蓄積されるアナログ情報と比較し、デジタル情報には以下のような利点がある。

- ネットワークを介して遠隔地へも瞬時に送り届けることができる。
- データ検索との親和性が高い。
- デジタルデータはノイズに強く、通信や複製による劣化が生じない。
- 編集、複製が容易で製作コストが低減できる。

これらの利点から、様々な情報がデジタル製作されるように移行しており、既存のアナログ情報も順次デジタル化されようとしている。

このような中、デジタルコンテンツを継続的に収集し、これらをサービスするための大規模なデジタルアーカイブを構築することは重要であり、国立国会図書館でも「NDL デジタルアーカイブシステム」が構築されている。

しかしながら、大規模なデジタルアーカイブを実現することは有史以来の大きな挑戦であり、多くの問題を解決しながら進めていかなければならない。その問題の一つが、デジタル情報の保存方法である。

貴重なデジタル情報を利用に供しつつ長期的に保存する大規模なデジタルアーカイブを実現するためには、大容量かつ高信頼なデジタル記憶メディアが不可欠である。しかしながら、現在使用されている磁気テープ、磁気ディスク、光学ディスク、フラッシュメモリといったデジタル記憶メディアは耐久性に問題があり、空調コストをかけて温度や湿度などの環境を適切に保った場合でも、その寿命は数十年と言われている。これらのデジタル記憶メディアを用いて半永久的にデジタルコンテンツを保存し続けるためには、デジタル記憶メディアが寿命を迎える前に複製すればよいが、膨大な量の新規資料の受け入れと並行して膨大な量の既存資料の定期的複製を行うことは、運用方法的にも、コスト的にも非常に難しいと考えられる。デジタル記憶メディア自体が半永久的な寿命を持つことが強く望まれる。

### 1.2. 目的

本調査では、NDL デジタルアーカイブシステムを含む大規模デジタルアーカイブシステムに向けて、1,000年とも言われる和紙の寿命に匹敵する程度の寿命が期待できる新しいデジタル記憶メディア（以下「恒久保存メディア」と言う。）の実用化に向けたフェージビリティスタディ及びそれを用いたシステムの試作を実施した。具体的には以下のことを行った。

(1) 大規模デジタルアーカイブシステムの要件調査

大規模デジタルアーカイブシステムで想定される機能、収蔵データ量及び応答時間等を調査し、主に記憶メディアやその装置に求められる要件を整理した。また、これらの調査結果から、今後の実用システムに向けた課題についても検討した。

(2) デジタル記憶メディアの比較調査

磁気メディア、光学メディア及び半導体メモリ等の既存のデジタル記憶メディアについて、その特徴、大規模デジタルアーカイブシステムにおける利用可能性及び長期保存への適性等について、文献等の信頼できる情報源に基づいた比較調査を実施した。その上で、本件の目的に照らし、密封型マスク ROM の適性を明らかにした。

(3) 恒久保存メディアとしての密封型マスク ROM の要件に係る予備調査

上の比較調査の結果で選定した、密封型マスク ROM について、備えるべき通信や電源供給等の要素技術の機能・性能要件等を明らかにした。また、これらの要件について、実際に回路設計・チップ試作を行い、実現可能性を示すための予備評価を実施した。

(4) 密封型マスク ROM を用いたプロトタイプシステムの試作

上の予備調査の結果に基づき、密封型マスク ROM を利用してデジタル情報の長期的な保存及びアクセスを可能にすることを目的としたプロトタイプシステムを設計、開発した。

(5) プロトタイプシステムの評価及び検討

プロトタイプシステムについて、評価を行った。また、今後の実用化に向けた課題等を検討、整理した。

なお本調査においては、上記(1)を慶應義塾大学デジタルメディア・コンテンツ統合研究機構講師・金子晋丈が、(2)～(5)を京都大学大学院情報学研究科准教授・越智裕之が主に担当した。本報告書の執筆も、両名が行った。

### 1.3. 成果の概要

本調査で得られた成果は以下の通りである。

- 国立国会図書館の統計データに基づき、大規模デジタルアーカイブシステムの要件を明らかにした。
- 磁気ディスク、光学ディスク、フラッシュメモリといった既存のデジタル記憶メディアの限界を明らかにした。
- 恒久保存メディアの一つとして密封型マスク ROM に着目し、これを用いたプロトタイプシステムの試作を行い、デジタル情報の長期的な保存及びアクセスの実現可能性、及び実現に向けた有用な知見を得た。

## 2. 大規模デジタルアーカイブシステムの要件調査

### 2.1. 要件調査の概要

本調査では、国立国会図書館の所蔵資料のうち国内刊行の主な資料群が完全にデジタル化されており、かつ、新規に受け入れる資料も遅滞なくデジタル化する場合を想定して、大規模デジタルアーカイブシステムの要件を明らかにする<sup>1</sup>。

特に、国立国会図書館がこれまで継続して行ってきた所蔵資料のデジタル化が、所蔵する国内刊行のほぼ全資料に適用された際の、デジタル化された資料（以下「デジタルデータ」と言う。）の保管・運用の持続可能性を明らかにし、所蔵資料のデジタル化に関する各種要件を明らかにする。ここで、持続可能性とは、新たに発生するデジタルデータを遅滞なくデジタルストレージに保存し、また利用要求が発生した際に遅滞なくデジタルストレージから読み込めることを指す。

以下では、まず、2.2 で国立国会図書館の所蔵資料のうち国内刊行の主な資料群が完全にデジタル化された際のデジタルデータの総容量を推計する。次に、2.3 から 2.6 で、所蔵するデジタルデータを現在すでに行っている方式、もしくは類似する方式で保管、提供していくことを想定し、(1)デジタルデータを保存するストレージデバイスの物理的スペース、(2)デジタルデータのストレージデバイスへの書き込み、(3)ストレージデバイスからのデジタルデータの読み込み、及び(4)ストレージメディアのマイグレーション、の 4 つの観点から要件を明らかにする。最後に、2.7 で本節のまとめとして本調査の考察を述べる。なお、本調査では、『国立国会図書館年報 平成 20 年度版』に記載されているデータ、及び国立国会図書館へのヒアリング調査によって開示された情報を元に、定量的考察を行っている。

### 2.2. 所蔵資料のデジタルデータサイズ

本章では、デジタル化の対象となる可能性のある資料群として、和漢書<sup>2</sup>、国内刊行雑誌、国内刊行新聞、地図<sup>3</sup>、博士論文を想定し、そのデジタルデータの基本サイズを仮定した後、これらの資料群をデジタル化した際の想定されるデジタルデータの総容量を推計した。

デジタルデータの基本サイズの仮定にあたっては、先行する国立国会図書館でのデジタル化プロジェクトの数値を参考にした。国立国会図書館が平成 20 年度まで実施してきた明治期・大正期刊行図書のデジタル化事業では、①A4 サイズ、解像度 400dpi、階調 2bit の白黒 2 値のデジタルデータと、②A4 サイズ、解像度 350dpi、階調 8bit のグレースケールのデジタルデータが作成されていた。一方、平成 21 年度からの大規模デジタル化事業では、③A3 サイズ、解像度 400dpi、階調 8bit のグレースケールデータ及び、④A3 サイズ、解像度 400dpi、階調 24bit のフルカラーのデジタルデータが作成されている。

---

<sup>1</sup> ただしデジタル化の実績に乏しくデータ容量の計算が困難であることから、録音・映像資料、電子資料等については対象外としている。また現在の NDL デジタルアーカイブシステムには、インターネットから収集したウェブサイト、著作のデータも格納されているが、これも対象外とした。

<sup>2</sup> 本来であれば「国内刊行図書」とすべきところであるが、便宜上、『国立国会図書館年報 平成 20 年度版』の図書館資料受入・所蔵統計から容易に入手できる和漢書の冊数で代用した。

<sup>3</sup> 便宜上、1 枚ものの地図のみとし、海外刊行のものも含む枚数で代用した。

以上の4種類のデジタルデータについて、そのデータサイズを表2.1にまとめる。

表 2.1. 国立国会図書館のデジタルデータの種類

種類	想定 サイズ	解像度	階調	1 コマあたりのデータサイズ	
				保存用	提供用
①白黒2値	A4	400dpi	2bit	3.7MB	0.4MB
②グレースケール	A4	350dpi	8bit	11.3MB	0.2MB
③グレースケール	A3	400dpi	8bit	29.5MB	0.3MB
④フルカラー	A3	400dpi	24bit	88.5MB	0.8MB

(出典：国立国会図書館へのヒアリング調査（平成21年9月30日）より。  
各データサイズは、①、②は実績値、③は試算、④はサンプル調査に基づく。)

次に、デジタル化の対象となる可能性のある資料群として想定した和漢書、国内刊行雑誌、国内刊行新聞、地図、博士論文の5種類の資料群について、表2.1を参考に、資料1点あたりのデジタルデータのサイズを表2.2のとおり仮定した。なお表2.2では便宜上、デジタル化に用いるデジタルデータの種類を一律、表2.1の4種類のデータのうちサイズが大きい方の③グレースケールと④フルカラーに統一した。

表 2.2. デジタル化の対象となる資料群の1点あたりのデジタルデータサイズ

資料種別	データ種別	1点あたりの 想定コマ数	1点あたりのデータサイズ	
			保存用	提供用
和漢書	フルカラー	100	8,850.0MB	80.0MB
国内刊行雑誌	フルカラー	100	8,850.0MB	80.0MB
国内刊行新聞	グレースケール	A3換算で45 <sup>4</sup>	1327.5MB	13.5MB
地図	フルカラー	A3換算で3 <sup>5</sup>	265MB	2.4MB
博士論文	フルカラー	100	8,850.0MB	80.0MB

『国立国会図書館年報 平成20年度版』に記載された各資料群の所蔵資料点数<sup>6</sup>を元に、

<sup>4</sup> 資料1点あたり25ページと仮定し、ブランケット判(546mm × 406mm)がA3判(420mm × 297mm)の約1.8倍となることから、 $25 \times 1.8 = 45$ コマ相当と想定した。

<sup>5</sup> 国土地理院刊行の10,000分の1地形図のサイズ(520mm × 738mm)がA3判(420mm × 297mm)の約3.1倍となることから、 $1 \times 3.1 = 3$ コマ相当と想定した。

<sup>6</sup> 所蔵統計中の冊数・点数を用いていることから、同一内容の資料を複数所蔵している場合(複本がある場合)、その冊数もカウントされている。国立国会図書館は複本のデジタル化は行わないが、調査の便宜上、その比率は考慮していない。特に和漢書の場合、複本の冊数は少なくない点に留意する必要がある。仮に、

これらがすべてデジタル化された際のデジタルデータの想定サイズを表 2.3 にまとめる。

表 2.3. デジタル化の対象となる資料群のデジタル化完了時点のデータサイズ  
(平成 20 年度末の所蔵資料数による)

資料種別	資料点数	資料種別ごとのデータサイズ	
		保存用	提供用
和漢書	6,756,004	55.7PB	515.4TB
国内刊行雑誌	5,749,831	47.4PB	438.7TB
国内刊行新聞	2,840,356	3.5PB	36.5TB
地図	474,127	0.1PB	1.1TB
博士論文	506,817	4.2PB	38.7TB
総計	16,378,920	110.9PB	1.0PB

次章以降では、上述のデジタルデータを保存するための物理的保管スペース、デジタルデータのストレージメディアへの取り込み、ストレージメディアからの読み込み、及び、ストレージメディアのマイグレーションの 4 つの観点から、運用の持続可能性について述べる。なお保存用デジタルデータと提供用デジタルデータでは、目的、サイズが大きく異なるため、必要に応じてそれぞれの観点において別々に議論する。

### 2.3. デジタルデータの保存スペース

本節では、表 2.3 を元にデジタルデータを保存するのに必要となる物理的なスペースについて概算を行う。

#### 2.3.1. 保存用デジタルデータの保存

現在、国立国会図書館では、保存用デジタルデータの保存に DVD とブルーレイディスク (BD) を用いている。本調査では便宜上、より大容量のデータの保存が可能な BD を試算に用いる。平成 21 年度末時点で一般に市販されている BD の 1 枚あたりの保存容量は、2 層式 12cm のディスクで 50GB である。前節で算出した保存用デジタルデータの総容量が 110.9PB であることから、データを保存するのに必要な BD の保存枚数は約 233 万枚となる (算出式 1)。

$$110.9PB \div 50GB = 2,325,742 \quad (1)$$

これは単純に BD の保存容量 50GB を常に使い切ることを前提としており、所蔵資料と保存ディスクの関連性を無視している。そこで、所蔵資料と保存ディスクに関連性を持た

---

本件の対象資料群全体の 30%が複本であるとする、表 2.3 の保存用データの総計は 77.6PB、提供用データの総計は 0.7PB となる。

せ、ひとつの資料が複数の BD にまたがらないように保存することとする。このとき、複数の資料を 1 枚の BD に保存することを可とすると、数量の多い図書、雑誌の 1 点あたりのデータサイズが表 2.2 より約 9GB であることから、平均すると BD1 枚あたり資料 5 点を保存できる一方で、平均 5GB の空きスペースが発生すると見込まれる。ここから、BD の平均利用率を約 90%と仮定すると、保存枚数は約 258 万枚となる（算出式 2）。

$$110.9\text{PB} \div (50\text{GB} \times 0.9) = 2,584,157 \text{ (2)}$$

ここでは、BD を書庫に保管することを考える。BD1 枚あたりの容積は、12cm × 12cm × 1.2mm であるが、一般的にはディスクをケースに入れて保存する。このケースの厚さを 5mm 程度とすると、ケースに入れて BD を並べた場合、保存には約 186 立方メートルの容積が必要となる（算出式 3）。

$$12\text{cm} \times 12\text{cm} \times 5\text{mm} \times 2,584,157 \text{枚} \div 1000 = 186.1\text{m}^3 \quad (3)$$

仮に、国立国会図書館東京本館で電子資料を排架している集密書架（幅 1,200mm、9 段設置可能）に BD を隙間なく並べた場合には、1 連の書架に 2,160 枚の BD が保存可能である（算出式 4）。

$$1,200\text{mm} \times 9 \text{段} \div 5\text{mm} = 2,160 \quad (4)$$

したがって、約 258 万枚の BD を保存するには、約 1,197 連（＝約 1.4km 相当）の書架が必要となる（算出式 5）。

$$2,584,157 \text{枚} \div 2,160 \text{枚} = 1,196.3 \quad (5)$$

なお、この想定の場合、BD からデジタルデータを読み込む際には、書架からディスクを探し出して、BD に装填する作業が必要となる。仮にこれらの BD すべてを、1 台あたり 1,058 枚収容できるオートチェンジャー<sup>7</sup>に格納して自動で提供できるようにすると、合計 2,443 台となる。これを隙間なく一列に並べると約 3.0km 分となる（算出式 6、7）。

$$(2,584,157 \text{枚} \div 1,058 \text{枚}) = 2,442.5 \quad (6)$$

$$2,443 \text{台} \times 1,210\text{mm} = 2,956.0 \text{ (7)}$$

### 2.3.2. 提供用デジタルデータの保存

国立国会図書館では平成 14 年度から、近代デジタルライブラリーとしてデジタル化した所蔵資料のオンライン提供を行っている。このシステムでは、提供用資料をハードディスクドライブで保存している。

提供用デジタルデータのサイズは 1.0PB であり、平成 21 年度末の最新のハードディスクドライブ、ストレージサーバを利用すると、汎用的な 19 インチラック 1 本につき約 1.0PB の保存容量を持つ。したがって、1 本の 19 インチラックにすべての提供用データを保存することが可能である。RAID 等の冗長構成を取った場合でも、2 本のラックで十分収納できる容量である。なお、この試算は保存すべき容量のみを考慮しており、データへのアクセス量及びそれに最適化したデータの分散等は一切考慮していない。

<sup>7</sup> 仮にクボタコンプス社製 SG-R50 D4（幅 1,210mm）を想定した。  
(<http://www.kubotacomps.co.jp/pages/storage/SG-R50.html>)

## 2.4. ストレージメディアへの書き込み

本節では、毎年新規に受け入れる資料を遅滞なくデジタル化する際に必要となる、ストレージメディアへの書き込みについて述べる。

平成 20 年度の 1 年間に増加した資料の点数及び、その資料がデジタル化された際のデータサイズを表 2.4 にまとめる。資料ごとのデジタルデータのサイズには、表 2.2 の数値を用いている。

表 2.4. デジタルデータの年間増加量（平成 20 年度の受入資料数による）

資料種別	年次増加 資料点数	資料種別ごとのデータサイズ	
		保存用	提供用
和漢書	202,592	1.7PB	15.5TB
国内刊行雑誌	297,937	2.5PB	22.7TB
国内刊行新聞	140,582	0.2PB	1.2TB
地図	14,978	0.0PB <sup>8</sup>	0.0TB <sup>9</sup>
博士論文	17,380	0.1PB	1.3TB
総計	673,469	4.5PB	40.7TB

以下では、この平成 20 年度分の年間増加量と同量が毎年増加するものとして、この年間増加量を当該年間に保存用、提供用各メディアに書き込むために必要となる時間等の試算を行う。なお、4.5PB のデータをブルーレイディスクに書き込むと、2.3.1 の算出式 2、5 と同様の計算により、年間 10.5 万枚のディスクが新たに発生し、端数切り上げで書架約 49 連が必要となる。

### 2.4.1. 保存用デジタルデータのメディアへの書き込み

表 2.4 より、2.3 で分析した 110.9PB 分のほかに、毎年、4.5PB の保存用デジタルデータを保存メディアに書き込み続けていく必要があることになる。

4.5PB のデータを 365 日休むことなくメディアに書き込む場合、平均約 153.2MB/s (1.2Gbps) の書き込み速度が必要となる（算出式 8）。

$$4.5\text{PB} \div (365\text{日/年} \times 24\text{時/日} \times 3600\text{秒/時}) = 153.2\text{MB/s} \approx 1.2\text{Gbps} \text{ (8)}$$

すなわち、153.2MB/s の書き込み速度を実現できない場合、保存できないデータが雪だるま式に増加していく。

なお、ここで求めた 153.2MB/s は、計算の便宜上、記録メディアの入れ替え時間を無視

<sup>8</sup> 約 3.8TB。

<sup>9</sup> 約 35.1GB。

した場合の書き込み速度であり、また書き込み装置が1台とした場合の値である。

ここで、BDへの書き込みを前提として、いくつかの試算を行う<sup>10</sup>。

BDへの書き込み速度は、8倍速書き込みで280Mbps（40MB/s）であるため、メディアの入れ替えがないとすると、4台の書き込み装置が必要となる（算出式9）。

$$153.2\text{MB/s} \div 40\text{MB/s} \approx 3.8 \quad (9)$$

これに、通常書き込み終了後に必要となる書き込みの検証の時間を考慮する必要がある。これは、実際に書き込みが行われる時間とほぼ同時間を追加で要する。したがって、2倍の8台が必要となる。

8倍速の書き込みの場合、平均利用率90%のBD（45GB）の場合は約20分で書き込みが終了し（算出式10）、検証にかかる20分とあわせて計40分を要する。

$$(50\text{GB} \times 0.9) \div 40\text{MB/s} = 19.2\text{分} \quad (10)$$

8台の書き込み装置を用いる場合、おおよそ5分に1回、いずれかの書き込み装置のメディアの入れ替えを行う必要がある<sup>11</sup>。1日あたりでは約283回である。

なお、書き込み専用のBDドライブの装置の核となる青色半導体レーザーの寿命は、10,000時間程度とされている。ここから、上述の仮定のもと8台を連続して運用する場合、平均して約1.5か月に1度、1台のBDドライブの半導体レーザーの寿命が尽き、交換が必要となる（算出式11）<sup>12</sup>。

$$10,000\text{時間} \div 8\text{台} = 1,250\text{時間/台} = 52\text{日/台} \quad (11)$$

#### 2.4.2. 提供用デジタルデータのメディアへの書き込み

表2.4より、2.3で分析した1.0PB分のほかに、毎年、40.7TBの提供用デジタルデータをメディアに書き込み続けていく必要があることになる。

40.7TBのデータを365日休むことなくメディアに書き込む場合、平均約1.4MB/s（11.2Mbps）の書き込み速度が必要となる（算出式12）。

$$40.7\text{TB} \div (365\text{日/年} \times 24\text{時/日} \times 3600\text{秒/時}) = 1.4\text{MB/s} = 11.2\text{Mbps} \quad (12)$$

この速度は、現在の標準的なハードディスクドライブで十分に実現しうる速度である。

#### 2.5. デジタルデータの読み込み

平成22年3月現在、国立国会図書館が提供している近代デジタルライブラリーでは、提供用デジタルデータ約6.4TBを対象としている。本調査の試算では、平成20年度末時点での提供用デジタルデータは約1.0PB（表2.3）であるので、単純計算で現在の近代デジタルライブラリーシステムの160倍のシステム資源が必要となる（算出式13）。そして平成20年度の新規受入れ資料の提供用デジタルデータ40.7TB（表2.4）が毎年増加すると仮定す

<sup>10</sup> この試算は、コピー元のストレージデバイスからの読み込み速度が、BDへの書き込み速度に比べて十分に早く、書き込みがボトルネックになることを前提としており、読み込み速度が十分でない場合は、さらに多くの台数が必要となる。

<sup>11</sup> この試算には、書き込みのエラーが発生した場合の対応は含まれていない。

<sup>12</sup> 実際には半導体レーザー以外にも故障要因は存在するため、さらに頻繁に修理・交換が必要となる。

ると、現行の約 6.4 倍のシステム資源が、毎年必要となることになる（算出式 14）。

$$1.0\text{PB} \div 6.4\text{TB} = 160 \quad (13)$$

$$40.7\text{TB} \div 6.4\text{TB} = 6.4 \quad (14)$$

ただし実際には、資料の参照を目的としたデジタルデータの読み込みの場合、利用者の嗜好や流行、資料の知名度、利便性（システムの参照のしやすさ）等によって、アクセスされるデータには偏りが発生しており、これを考慮したシステム設計を行えば、より効率的なシステム投資ができると考えられる。そこで本調査では、国立国会図書館が現在実施している所蔵資料の物理的な閲覧サービスと、デジタル化された所蔵資料のオンラインでの閲覧サービスについて、その偏りをそれぞれ分析する。これら 2 つの閲覧サービスは、閲覧の形態及び閲覧可能な資料の総数に違いがあり、これらの違いにより閲覧される資料への参照パターンに違いが見られる可能性もあるためである。これらを踏まえて、閲覧資料へのアクセス状況についての考察を行う。

### 2.5.1. 物理的な資料閲覧サービスの現状

所蔵資料の物理的な閲覧サービスは、利用者が国立国会図書館に赴き所蔵資料を閲覧するサービスである。国立国会図書館が平成 20 年度末時点で所蔵する資料（第一種資料及び第二種資料）の総数は、『国立国会図書館年報 平成 20 年度版』によれば約 3,988 万点であり、この多くが閲覧可能となっている。また、閲覧サービスで目標とするサービス基準も設定されており、平成 20 年度の場合、90%以上の利用者に対し書庫にある図書・雑誌を 25 分以内に提供することを目標にしている。この達成率実績は、96.5%であった。

この閲覧サービスにおける、特定の資料への申込みの集中度について考察する。図 2.1 に示すのは、国立国会図書館の業務システムを通じて平成 21 年 4 月 30 日から 10 月 30 日までの 6 か月間に申込まれた閲覧サービスにおいて、1 回以上利用された資料の点数とその利用回数をグラフに示したものである。

この 6 か月間の閲覧サービスの件数は 1,601,821 件で、実際に供された資料は 754,718 点であった。全 3,988 万点の、約 2%である。また、この 754,718 点のうち、100 回以上利用されたのは 26 点<sup>13</sup>、10 回以上 99 回以下は 11,441 点、3 回以上 9 回以下は 149,053 点、2 回以上は 190,795 点となっている。すなわち、閲覧に供される資料は全資料のうちのごく一部に集中していると言えよう。

同様に、特定の 1 日の閲覧サービスにおける、特定の資料への申込みの集中度について考察する。図 2.2 は、業務システムを通じて平成 21 年 4 月 30 日に申込まれ、かつ平成 21 年 4 月 30 日中に完了した閲覧サービスにおいて、1 回以上利用された資料の点数とその利用回数をグラフに示したものである。

<sup>13</sup> 最も多く閲覧された資料は 177 回閲覧された。

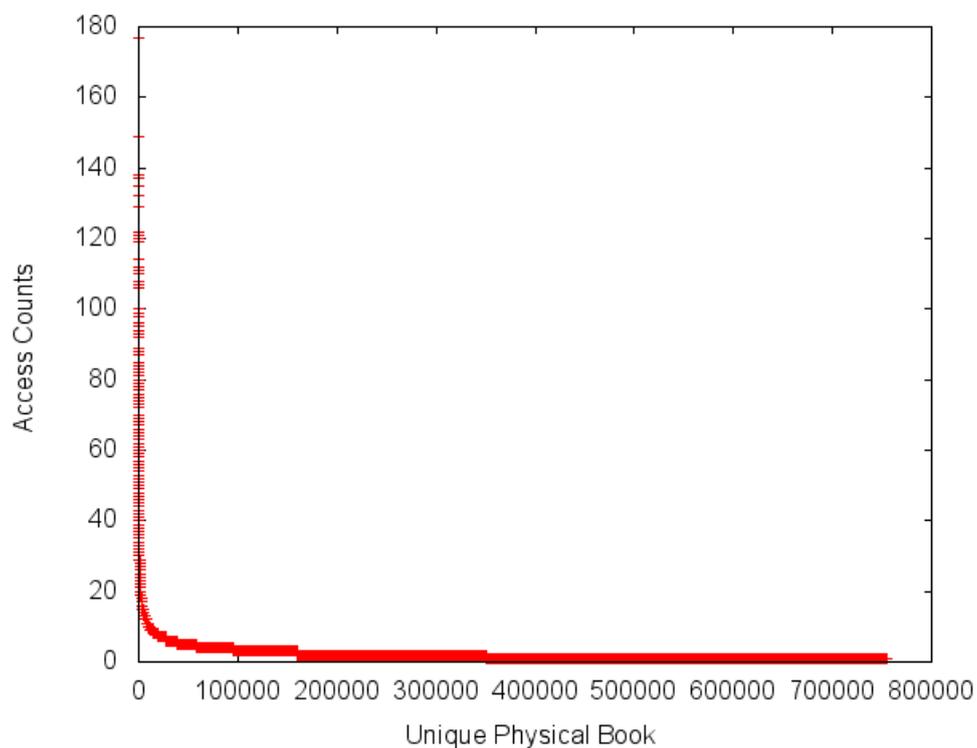


図 2.1. 6 か月間に閲覧された資料の点数と閲覧回数

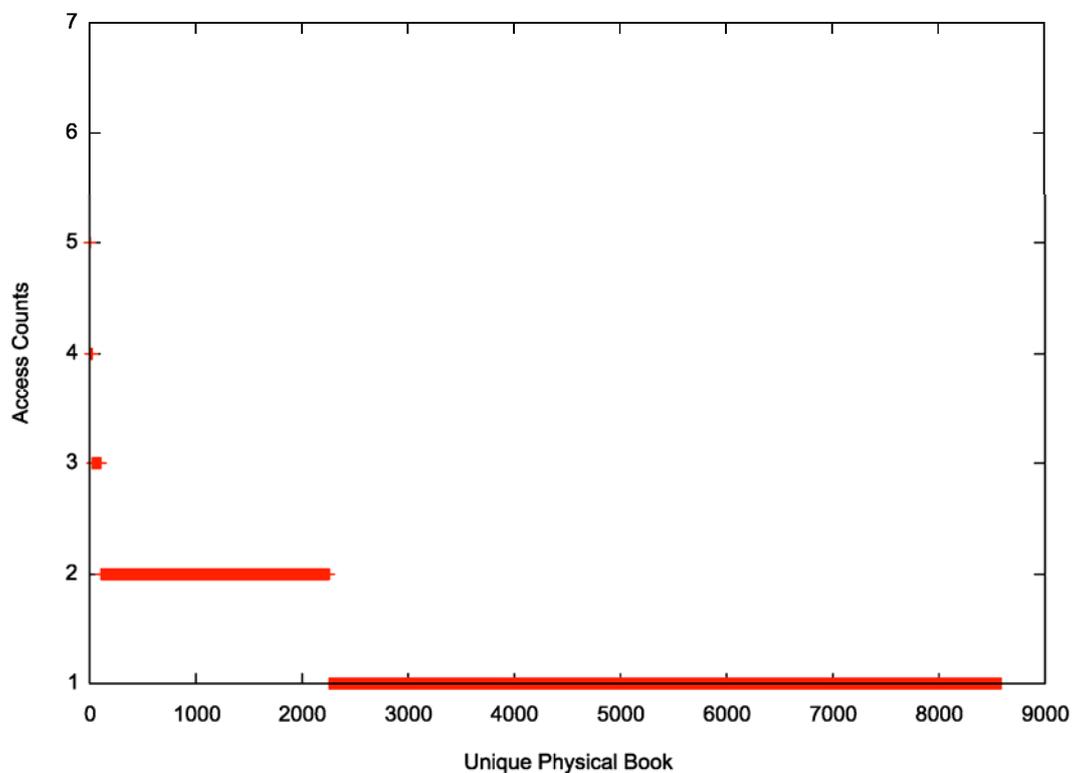


図 2.2. 1 日に閲覧された資料の点数と閲覧回数<sup>14</sup>

<sup>14</sup> 対象資料には、1日当たりの閲覧回数が1回に制限されているものも含まれる。

この4月30日の閲覧サービスの件数は12,829件で、実際に供された資料は8,587点であった。5回閲覧された資料が4点あったが、2回以上閲覧された資料が2,252点、1回だけ閲覧された資料が6,331点であった。図2.1と図2.2からは、全資料のうちのごく一部の資料に閲覧リクエストが発生していること、さらに、そのさらにごく一部の資料に複数回の参照が発生していることが共通して読み取れる。さらに、1日に閲覧された資料の点数が約8,500点であるのに対し、半年間（約180日間）に閲覧された資料の点数はその約89倍の約75万点であることから、毎日のように閲覧される資料が変化するというよりも、短期的には閲覧される資料はあまり変化せず、長期的には緩やかに変化しているものと推定される。これに関しては、複数回の閲覧が発生している物理的な書誌に対する閲覧回数の時間的な変化を別途検証する必要がある。

### 2.5.2. 電子的な資料閲覧サービスの現状

次に、デジタル化された資料の閲覧について、近代デジタルライブラリーのアクセスログを元に分析した。近代デジタルライブラリーは、平成21年8月25日の時点で、約15万6千冊の資料をインターネットを通じて閲覧に供している。資料を閲覧するまでにかかる時間は通信速度によるものの数秒程度であり、原則として24時間365日、サービスを提供している。すなわち、近代デジタルライブラリーは、物理的な閲覧サービスよりも閲覧可能な資料の点数は少ないものの、常にほぼ瞬時に閲覧できるサービスと言えよう。

この近代デジタルライブラリーにおける、特定の資料へのアクセスの集中度について考察する。調査したのは、平成21年8月31日午前4時から同年9月7日の午前4時までのアクセスログである。近代デジタルライブラリーのサービスは、2つのウェブサーバによって分散処理されており、1回以上参照されたコマ（資料の見開き1ページで1コマ）の点数とその参照回数をそれぞれ図2.3-a、図2.3-bに、その合計を図2.4に示す。また、2つのサーバを合計した、1回以上参照された資料<sup>15</sup>の点数とその参照回数を図2.5で示す。なお、閲覧に供されているコマの総点数は、平成21年8月25日時点で約1,695万点である。

図2.3-a、図2.3-bともに、ごく一部の資料にアクセスが集中している傾向が見られる。図2.4にこれら2つのサーバが提供した合計のアクセス傾向を示す。

図2.4から、アクセス数の多いコマに関しては、アクセスカウントが図2.3-a、図2.3-bのほぼ2倍になっていることがわかる。実際、アクセス数の多い資料のIDを確認すると、アクセス回数順の細かな違いはあるものの、2つのサーバでほぼ共通していた。2つのサーバの合計で100回以上アクセスのあったコマ数は687ある<sup>16</sup>。一方で、アクセスのあったコマ数の総数はほぼ2倍近くになっていた。これは、アクセス回数が数回以下の資料がアクセスされた資料の総数として大半を占めていることによる。2つのサーバの合計で10回以上99回以下のアクセスがあったのは6,860コマ、3回以上9回以下は34,468コマ、2回は94,546コマ、1回は27,390コマとなっている。なお、両者を合計すると、1か月間に開

<sup>15</sup> 資料の単位は分冊（巻号）単位である。

<sup>16</sup> 最も多く閲覧されたコマは7,441回閲覧された。

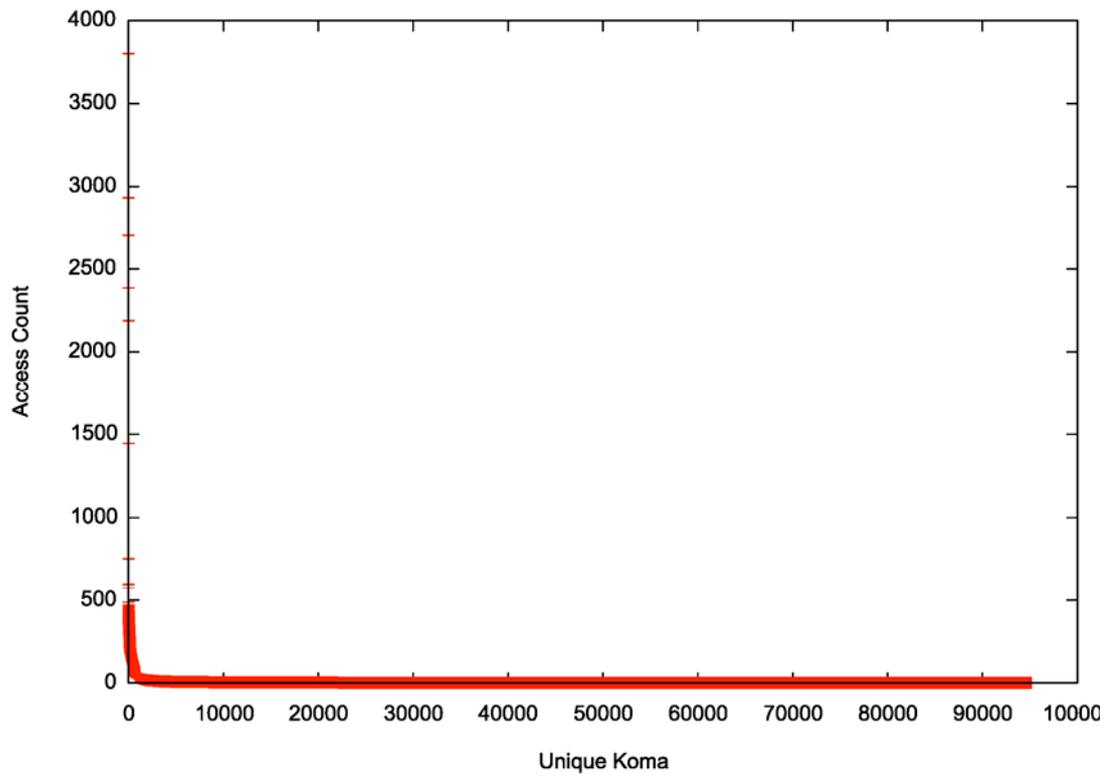


図 2.3-a. 1 か月間に関覧されたコマの点数と閲覧回数 (サーバ 1)

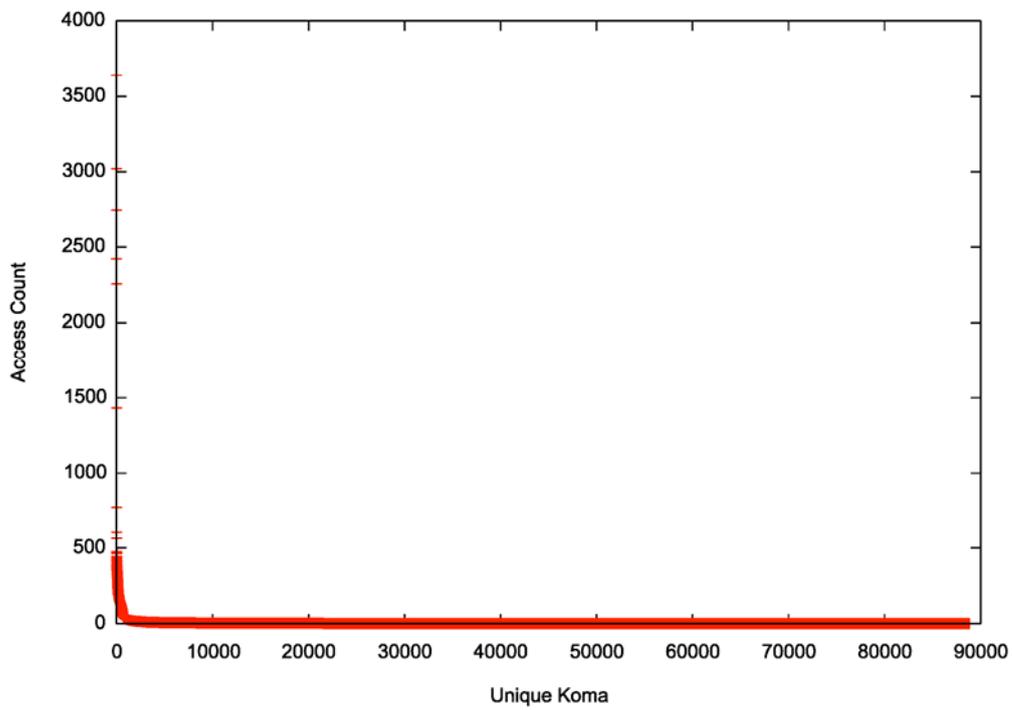


図 2.3-b. 1 か月間に関覧されたコマの点数と閲覧回数 (サーバ 2)

覧されたコマ数は延べ 163,591 コマであったことから、閲覧されているコマは、閲覧可能な総コマ 1,695 万の約 1%であると言える。1 回しか閲覧されていないコマが 2 回参照されるコマに比較して少ないが、これは、2 コマ程度パラパラと見て閲覧を終えるとされた利用によるものと考えられる。電子的な閲覧システムにおける特徴であろう。

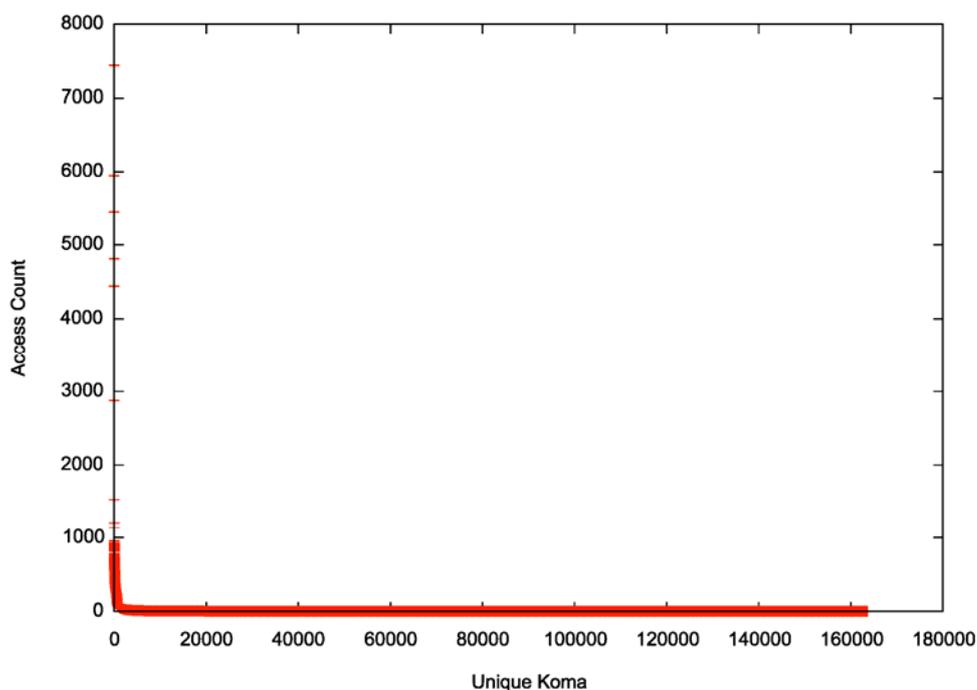


図 2.4. 1 か月間に閲覧されたコマの点数と閲覧回数（サーバ 1+2）

次に、資料へのアクセスを資料（分冊）単位で集計した図 2.5 であるが、アクセスのあった資料は合計で 16,542 点であり、1 万以上アクセスがあった資料が 2 点<sup>17</sup>、100 回以上 9,999 回以下が 1,383 点、10 回以上 99 回以下が 8,030 点、3 回以上 9 回以下が 4,145 点、2 回が 1,759 点、1 回が 1,223 点であった。コマへのアクセスと同様に、資料についても特定の資料にアクセスが偏っていることが分かる。資料単位の集計においてもコマへの閲覧と同様、1 回しか閲覧されていないコマが 2 回参照される資料に比較して少ない。

すなわち、近代デジタルライブラリーでは、特定の資料にアクセスが偏っており、さらにそのうちの特定のコマにアクセスが集中していることが分かる。実際に、総資料点数 15 万 6 千の約 11%の資料にアクセスが集中している。

### 2.5.3. アクセスの偏りに関する分析

所蔵資料の閲覧サービスと近代デジタルライブラリーの閲覧サービスには、提供している資料の総数、資料の種類、提供するサービス（サービス可能時間、閲覧までに要する時間）に違いがあるものの、閲覧・アクセスにおいては共通点が存在することが明らかにな

<sup>17</sup>最も多く閲覧された資料は 12,863 回閲覧された。

った。すなわち、閲覧可能な資料のうち、実際に閲覧される資料はそのごく一部であること、また閲覧される資料のすべてに遍く均等な閲覧が発生しているわけではなく、大きな偏りが見られることである。具体的には、物理的な閲覧サービスでは半年間で所蔵資料の約 2%に対する閲覧要求があり、近代デジタルライブラリーでは閲覧可能資料の約 11%に対しアクセスが発生している。また、アクセスの頻度に関しても、アクセスのもっとも多い資料で、物理的な閲覧サービスでは半年で 200 回、近代デジタルライブラリーでは 1 か月間で 13,000 回のアクセスがあり、ごく一部の資料にアクセスが集中している。表 2.3 より、提供用デジタルデータのサイズは 1.0PB であるが、このうち、約 890TB に関してはアクセスされないデータとなることが想定される。この分も含めてすべての資料の提供用デジタルデータをオンラインにしておくことは、結果的に 90%以上のシステム資源、電力を無駄に使うことになり、費用対効果の点で非効率である。

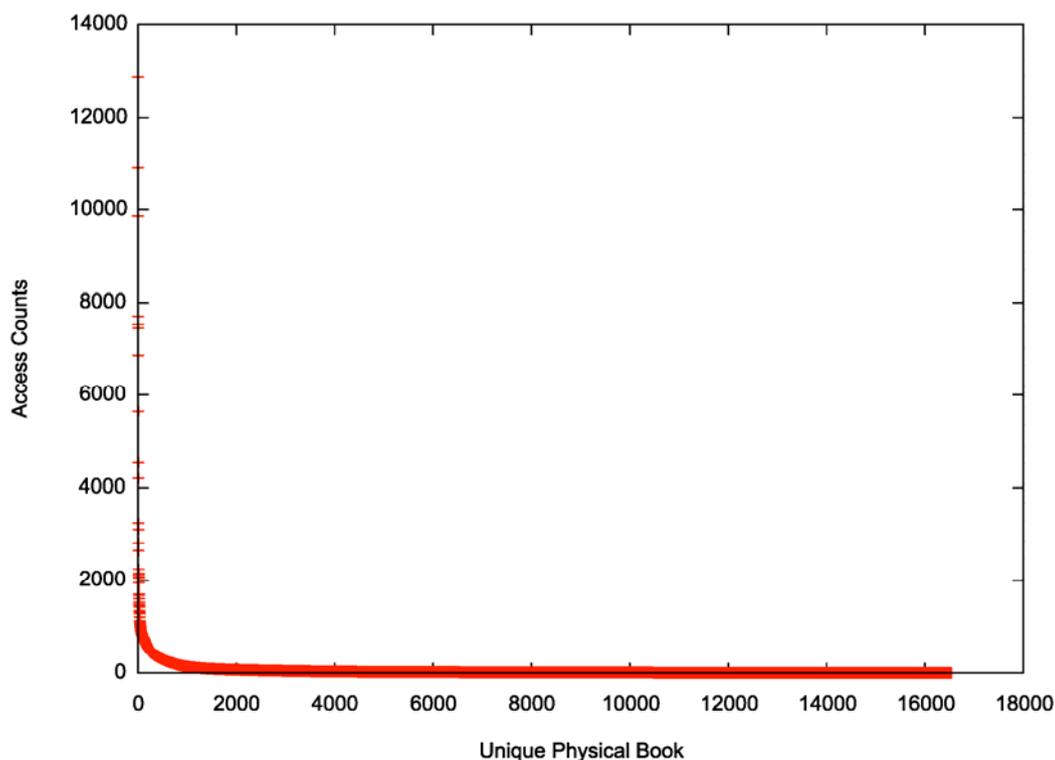


図 2.5. 1 か月間に閲覧された資料の点数と閲覧回数（サーバ 1+2）

一方で、上述の数値から明らかなように、デジタルデータによるオンライン閲覧サービスは物理的な閲覧サービスと比べて、より幅広い資料へのアクセス（約 5.5 倍）を生み、また、閲覧の集中（約 390 倍）も顕著であることが分かる。

ここで、デジタル化が完了したときのアクセス数を推定する。デジタル化された資料の点数が表 2.3 より 1,638 万点になった場合、1 か月間にアクセスされる資料点数は、その約 11%の約 180 万点と想定される。仮に、オンラインで閲覧できる資料の点数とアクセス数

が線形比例の関係にある、すなわち、閲覧可能点数が 100 倍になるとアクセス数も 100 倍になる、とすると、最も閲覧される資料の 1 か月間の閲覧回数は約 100 万回/月、もっとも閲覧されるコマは 75 万回/月となる。すなわち、1 日あたり 2、3 万回のアクセスが特定の資料に対して発生することが想定される。

## 2.6. デジタルデータのマイグレーション

本節では、保存しているデータのマイグレーションに関して試算を行う。

### 2.6.1. 保存用デジタルデータの定期的確認

表 2.3 より、国立国会図書館が保有するデジタルデータの総容量は 110.9PB となる。BD にすべてのデータを保存する場合、BD の枚数は約 258 万枚となる（算出式 2）。

「JIS Z 6017:2006 電子化文書の長期保存方法」に基づき、このディスクのデータ定期的に確認することを想定し、その実現可能性を試算する。光ディスクへの保存には、誤り訂正方式が採用されており、誤りの量が閾値以下の場合には、保存されているデータに誤りがあった場合でも、誤り訂正符号により読み込み時に正しいデータに訂正することが可能である。しかし、誤りの量が閾値を超えてしまうと、誤り訂正符号を用いても訂正できなくなってしまう。これを未然に防ぐため、JIS Z 6017 では、光ディスクを 3 年毎に定期検査して誤りの量を計測し、閾値以上になっている場合には新しいディスクにマイグレーションすることを推奨している。

現在、国立国会図書館には、DVD の誤り率を測定する機器が導入されている。この機器では、ディスク内の 3 点（内周・中周・外周）の誤り量を計測するのに、1 枚につき 3 分要する。この機械を 24 時間 365 日連続して用いることで、年間 175,200 枚の光ディスクの検証が可能である（算出式 15）<sup>18</sup>。

$$(365 \text{ 日/年} \times 24 \text{ 時/日} \times 60 \text{ 分/時}) \div 3 \text{ 分/枚} = 175,200 \text{ 枚} \quad (15)$$

ここで、1 年に 1 回すべてのディスクの誤り率を検証する場合、この計測装置を 15 台導入する必要がある（算出式 16）。

$$2,584,157 \text{ 枚} \div 175,200 \text{ 枚} = 14.7 \quad (16)$$

これより、JIS Z 6017 に準拠して 3 年に 1 回検証する場合には 5 台必要となる<sup>19</sup>。実際には、確認しなければいけないディスクの数が毎年 10.5 万枚増加していくこと、また故障が発生することから、より多くの設備を用意していかなければならないことになる。

なお、一般的なデジタルデータのアーカイブでは、メディアからの読み取りができなくなった場合や自然災害等に備えて、失うことが望ましくないデータに関しては、複数のコピーを作成することが多い。このように複数のコピーを作成する場合には、ディスクの検証の手間が線形比例するだけでなく、書き込み時の時間も線形に増加することになる。

<sup>18</sup> ここでの試算では、ディスクの入れ替えに要する時間については考慮していない。

<sup>19</sup> なお、光ディスクの誤り率を 3 点だけでなく全周に対して行う場合には、1 枚のブルーレイディスクの読み込みに約 1,000 秒（20 分）要し、必要な台数は 33 台となる。

## 2.6.2. 保存用デジタルデータのマイグレーション

JIS Z 6017 では、記録後 10～30 年程度を長期保存期間としており、さらなる保存期間の延長には、マイグレーションを行って対応することが想定されている。

仮に、平成 20 年度末時点の保存用デジタルデータの量を 10 年間ですべてマイグレーションするとなると、マイグレーションだけで、毎年 11.1PB をメディアに書き込むことになる。ここから、同じ性能の BD ドライブを用い同じ容量の BD にマイグレーションすることを仮定して算出式 8、9 と同様に計算すると、20 台の書き込み装置が必要となり、おおよそ 2 分に 1 回（1 日では 720 回）、ディスクの入れ替えが発生することになる。

なお、マイグレーションを行う 10 年間の間にもディスクの数が毎年 10.5 万枚ずつ増加していくこと、書き込み装置の故障を考えなければならないことから、実際にはさらに多くの設備が必要となる。

## 2.6.3. 提供用デジタルデータのマイグレーション

提供用デジタルデータはハードディスクに保存される。ハードディスクを含む IT 機器は通常、4～5 年程度で機器更新を迎える。機器更新時には、通常のサービスを出来る限り停止させないようにしながら、短時間でデータを新しい機器に移行（マイグレーション）する必要がある。

提供用デジタルデータ 1.0PB を 1 か月間でコピーする場合、必要とされるスループットは、414.3MB/s (3.2Gbps)となる（計算式 17）。

$$1.0PB \div (30 \text{ 日/月} \times 24 \text{ 時/日} \times 3600 \text{ 秒/時}) = 414.3MB/s = 3.2Gbps \text{ (17)}$$

利用しているハードディスクストレージが複数のユニットで構成されている場合は並列処理が可能となり、単にコピーを行うだけであれば、これは非現実的な容量ではない。しかし、常に利用者のアクセスを実現しながらコピーを行う場合は、スループットの低下が予想されるため、短期間でのコピーは困難を伴うことが予想される。また、異なるデータセンターへの移行など、移行元と移行先の機器が物理的に離れている場合にも、ネットワーク伝送を行わなければならないため、どのような転送手段を用いるにしろ困難が予想される。

## 2.7. まとめ

本章では、国立国会図書館の所蔵資料のうち国内刊行の主な資料群が完全にデジタル化され、かつ、新規に受け入れる資料も遅滞なくデジタル化される場合を想定し、所蔵資料がデジタル化された際の資料のデータサイズと毎年追加されるデジタル資料のデータサイズを明らかにし、これらのデジタルデータを安定的に運用していくために必要とされる要求要件をストレージの観点から整理した。具体的には、保存スペース、保存速度、読み込み速度、保存データのマイグレーションの観点から現在の運用状況に基づいた実現可能性の試算を行った。

試算によれば、特に書き込み速度、データのマイグレーションにおいて、今後デジタル

化が進んだ際に、実現が困難になってくることが想定される。これらの解決に当たっては、デジタルデータの総容量を減らす試み、長寿命、大容量のデジタルメディアの開発、高速、安価、低消費電力のデジタルアクセス方式の開発が必要である。また、読み込み速度に関して言えば、提供用デジタルデータへのアクセス数に著しい偏りがあることから、費用対効果を考慮した効率的な提供システム構築も必要となってくると考えられる。

### 3. デジタル記憶メディアの長期保存適性に関する比較調査

アーカイブ目的にデジタル記憶メディアを使用する際の問題点は、1980年代から議論されつつあった。1986年に書かれた[1][2]では、ポリエステルベースのマイクロフィルムや非酸性紙の書籍は適切な環境で保管すれば前者は500~1,000年、後者も100~500年の寿命がある一方、光学ディスクや磁気テープは5~20年毎にコピーする必要があると指摘し、マイクロフィルムの優位性を強調している。[3][4]では、デジタルデータの長期保存にあたり、記憶メディアの寿命（physical lifetime）のほか、記憶メディアにアクセスする機器の世代交代（obsolescence）や、記憶されたデジタルデータのフォーマットの世代交代によってデータを使用できなくなる危険性にも注意しなければならないことを一般向けにわかりやすく解説している。[5]でも、デジタルデータの保存のためには、長寿命な記憶メディア、古いメディアから新しいメディアへの移行（migration）の方法、様々なアナログメディアやデジタルメディア間での相互変換技術（conversion）、デジタルライブラリの管理手段（management tools）の研究が必要であると指摘している。[6]も動画像のデジタル保存に焦点を絞り、保存媒体（digital storage）、ファイル形式の変化、表示媒体の置き換え（translation）、保管（custodial）などの問題があることを指摘している。[7]も一般向けに警鐘を鳴らしている文献の一つであるが、この中で人類の言語を後世に末永く伝えることを目的としたRosetta Project[8]が紹介されている。これは円盤状の金属表面に凹凸を形成することで情報を記録するものであり、2,000年の寿命を持つとしている。また特別な読出し装置に依存せずに読出しが出来るよう、高倍率な顕微鏡での読み出しを想定している。これは長期保存性を最優先してアクセスの容易さを犠牲にしており、保存された情報の利用を前提とする（本件のような）アーカイブとは目的が異なる。

表 3.1 データ保存媒体の材質的寿命（[9], p.7 より執筆者訳）

記憶媒体	寿命
CD-ROM 及び DVD-ROM	5~200年
CD-R 及び DVD-R	70~100年
CD-RW 及び DVD-RW	35~70年
フロッピーディスク	5~10年
ビデオテープ	10~30年
デジタルテープ	10~30年
磁気テープ	10~30年
マイクロフィルム	10~500年
スライド	約100年
新聞紙	10~20年
非酸性紙	100~500年
エジプト時代の石碑	2,200年以上

どの記憶メディアがどの程度の寿命を持つのかに関しては様々な研究や報告があり、これらは次節以降で個別に議論するが、ここでは[9]に示された数値を表 3.1 に示す。この資料に限らず、記憶メディアの寿命が幅をもって提示されているのは、保存媒体の品質が製造メーカーによって異なることのほか、実測することのできない寿命を加速試験等によって推定することによる不確定性が加味されているからである[10]。

コストの観点も含めてデジタルアーカイブについて検討した報告として、スウェーデン国立公文書館によるもの[11]や、米国の映画芸術科学アカデミーによるもの[12]がある。後者では例として、ハードディスクでデジタルアーカイブをする場合、1 テラバイトあたりの年間費用は、メディア自体のコスト 535 ドルの他、メンテナンスのためのシステム管理者の人件費 340 ドルなどが上積みされ、合計で年間 1,500 ドルに及ぶとしている。

国内でもデジタルアーカイブの問題点について様々な報告が行われているが、この中には、デジタル保存についての課題を指摘するものもある。例えば日本画像情報マネジメント協会は、[1]～[7]で指摘されているようなデジタル記憶媒体の問題点を厳しく指摘し、アクセス頻度の低い長期保存用のデータを保持するためにはマイクロフィルムが最適であると強く主張している[13]。これに関連して、テキスト及びモノクロの二次元画像について、デジタル記憶媒体の光ディスクとともに、アナログの記録媒体であるマイクロフォームにも並行して記録することで、長期保存を実現する方式が ISO 11506:2009 “Document management applications -- Archiving of electronic data -- Computer output microform (COM) / Computer output laser disc (COLD)” として国際規格になっている[64]。

### 3.1. デジタル記憶メディアの開発動向

デジタルデータを記憶する素子や媒体には様々なものがあるが、以下のように分類することが可能である。

- 揮発性半導体メモリ
  - 複数の安定状態を持つ能動素子回路によるもの (スタティック RAM)
  - 容量に蓄積された電荷によるもの (ダイナミック RAM)
- ディスク媒体
  - 光学によるもの (CD、DVD、BD)
  - 磁気によるもの (ハードディスク)
- テープ媒体
  - 磁気によるもの (磁気テープ)
  - 物理形状によるもの (穿孔テープ、パンチカード)
- 不揮発性半導体メモリ
  - 容量に蓄積された電荷によるもの (フラッシュメモリ)
  - 回路構造によるもの (マスク ROM)

これらの中で、揮発性半導体メモリは回路の電源を遮断すると記憶内容が消失するため、デジタルアーカイブの目的には使えない。また、穿孔テープやパンチカードは他のメディ

アに比べ桁違いに大きな保管スペースを要するため調査対象外とした。

以下、光学ディスク、磁気ディスク、磁気テープ、フラッシュメモリ及びマスク ROM について、デジタルアーカイブ目的への適合性、特に寿命を調査した。

### 3.2. 光学ディスク

光学ディスクには、CD（Compact Disc）、DVD（Digital Versatile Disc）、BD（Blu-ray Disc）などがあり、それぞれ、書込み方法や構造の違いから表 3.2 のように分類される[14]。

表 3.2 光学メディアの概要（[14]より執筆者訳）

種別	書込み可否	規格名称	記録層数と容量（直径 12cm の場合）			
			片面 1 層	片面 2 層	両面各 1 層	両面各 2 層
CD	読出し専用	CD-ROM	650MB	-	-	-
	1 回だけ書込可	CD-R	650MB	-	-	-
	再書込可	CD-RW	650MB	-	-	-
DVD	読出し専用	DVD-ROM	4.7GB	8.5GB	9.4GB	17.1GB
	1 回だけ書込可	DVD-R/+R	4.7GB	-	9.4GB	-
	再書込可	DVD-RW/+RW/-RAM	4.7GB	-	9.4GB	-
BD	読出し専用	BD-ROM	25GB	50GB	-	-
	1 回だけ書込可	BD-R	25GB	50GB	-	-
	再書込可	BD-RE	25GB	50GB	-	-

#### 3.2.1. 構造

記録層は、光を反射する平面（ランド）中に光を反射しないピットと呼ばれる点状のものが同心円状のトラック上に形成されており、ピットの有無は所定の波長のレーザー（CD は 780nm、DVD は 650nm、BD は 405nm）を当てると判別できるようになっている。ピットの構造は、書込み方法によって大きく異なる。

製造時にデータを埋め込む読出し専用タイプ（例えば CD-ROM）の場合、ピットはポリカーボネートの表面にスタンプされた微小な凹凸形状によって実現される。この微小な凹凸のある面に金属（例えばアルミニウム）を蒸着することで記録層が完成する。蒸着する金属層を工夫することで半透明な反射層を形成することもでき、全反射する記録層の上に半透明な記録層を重ねると、レーザーの焦点距離を変えることでこれら 2 つの記録層を同じ面から選択的に読み出すことができるようになる。

利用者がデータを書き込むことができるもののうち、書込みが 1 回だけ可能なもの（一度書き込んだデータを上書きできないもの、例えば CD-R）の記録層は有機染料で出来ている（その背後に反射膜がある）。これに読出し時よりも強いレーザー光を照射することにより記録層である色素膜を熱し色素分子を分解することで記録ピットと呼ばれる記録痕を形成する。

書込みが複数回可能なもの（例えば CD-RW）の記録層は相変化合金でできており、結晶状態にあるランドと非晶質化した記録ピットの間の反射率の変化を利用して情報を記録する。書込み時は結晶状態のランドを選択的に非晶質のピットにすれば良く、これは焦点を絞った強いレーザーで融点以上まで加熱することで実現できる。一旦融点を越えたものが急激に冷却されることで非晶質の固体となるからである。消去時は非晶質のピットを結晶状態に戻せばよく、このためには、非晶質が結晶状態に遷移する温度（融点よりは低い）になるようにレーザーで加熱すれば良い。

記録層を挟む層の構造は次のようになっている。CD は、1.2mm 厚のポリカーボネート樹脂層が裏面（読出し面）にある。記録層を挟んで反対側はわずか 0.01mm 厚の保護層（ラッカー）の上にラベル情報が印刷される。DVD は記録層の両面にそれぞれ 0.6mm 厚のポリカーボネート樹脂層がある（この構造は片面読出しタイプも両面読出しタイプも同じである）。BD は、0.1mm 厚の保護層が裏面（読出し面）にあり、記録層を挟んで反対側には 1.1mm 厚の基盤層がある。

### 3.2.2. 信頼性阻害要因

光学ディスクが寿命を迎える要因として最も重要なのは、記録層の劣化である。

読出し専用ディスク（CD-ROM, DVD-ROM, BD-ROM）の場合、外界の湿気が保護層を通じて記録層に到達すると、アルミニウムが酸化してレーザーを反射できなくなり、読出し不能となる。書込み 1 回のみディスク（CD-R, DVD-R, BD-R 等）の場合、時間の経過とともに有機染料が変質する。この化学変化は高温と高湿度により加速される。また、有機染料は光によっても化学反応を起こし、直射日光などを照射すれば比較的短時間でも読出し不能になる。再書き込み可能なディスク（CD-RW, DVD-RW, BD-RE 等）に使われている相変化合金は有機染料よりも劣化速度が速く、アーカイブ向きではないと考えられている。この劣化は高温と紫外線、もしくは高温と高湿により加速される。また、消去と再書き込みのサイクル数も上限があり、DVD-RW で約 1,000 回、DVD-RAM で約 100,000 回とされている。消去と再書き込みのサイクルを繰り返したあとのものは更に寿命が短い。

保護層の厚さの違いにも注意が必要である。CD はラベル面側の保護層が 0.01mm と薄いため、記録層はこの面からの湿気の影響を受けやすい。また特に CD はラベル面に筆記具で力を加えたり、指定された以外のインクをラベル面に付着させたりすると使用不能になってしまう。BD は光学的な性能を重視し読出し面の保護層を薄くしてあるため、記録層はこの面からの湿気の影響を受けやすいと考えられる。DVD は両面に 0.6mm の層があり、CD や BD に比べると外界の影響が記録層に及びにくいと考えられる。

保護層のポリカーボネートは、記録層に比べると化学的に安定であると考えられるが、これもまた高温、高湿により白濁する可能性がある。保護層と記録層などを接着している接着剤も高温、高湿により劣化しやすく、端から剥がれてしまうこともある。また長期間、ディスクを水平にして放置するとディスクが湾曲して使用不能になるので、保存時は垂直に立てなければならない。

### 3.2.3. 寿命に関する調査結果

CD-ROM の寿命を調べた報告として[15][16][17][18][19][20][21][22]などが挙げられる。

[15]は光学ディスクの加速試験の報告としては草分け的であり、「3M 社の CD-ROM は 30℃、相対湿度 90%の環境で、99.5%が 100 年もつということが確信度 95%で言える」と結論している。

[16]では、米国議会図書館で所蔵している音楽 CD-ROM の 7 年間に渡る経年変化と、音楽 CD-ROM の高温・高湿加速試験の結果を報告している。前者は 1996 年当時の所蔵音楽 CD-ROM から 125 個を選び、その特性を 1996 年と 1999 年と 2003 年に調査したものである。この調査では、平均 BLER (Block Error Rate: ブロックエラーレート) が単調増加していることなどが示されている。後者は、ANSI NAPM IT9.21 規格 “Life Expectancy of Compact Discs (CD-ROM)-Method for Estimating, Based on Effects of Temperature and Relative Humidity” に基づき行われた。これは 60～80℃、湿度 55～85%、ストレス時間 500～1,000 時間といった 5 つの所定のテスト条件をそれぞれ 10～30 枚の CD-ROM に課し、特性の変化を測定したものである。このテストでは、500 時間経過時点で既にいくつかのディスクで目に見える不具合が発生していた。観察された不具合は、斑状の模様が発生、反射層の透明化、反射層の剥がれや碎片化であった。これらの変化が通常環境での長期保管でも同様に発生するかどうかは不明であるが、その可能性があることを示唆していることは確かである。

[17]では音楽 CD-ROM や CD-R 及び DVD-ROM の高温・高湿加速試験を行い、CD-ROM については反射層の碎片化や透明化が、CD-R についても反射層の碎片化や記録層の色素の退色などが、DVD-ROM では反射層のピンホール発生、反射層の半透明化や消失などがみられたと報告している。さらに BLER を調べた結果、CD-R ではシアニン (cyanine) やアゾ (azo) 色素を用いたものよりはフタロシアニン (phthalocyanine) 色素を用いたものの方が良好であったと報告している。

[18][19]では、CD-R と DVD-R に対し、高温・高湿加速試験と光照射実験を行っている。CD-R の実験では、フタロシアニン色素を用いたものが両テストを通じて比較的好成績であった。DVD-R についても製品間の性能差は大きかったが、採用されている色素は不明としている。

加速試験に基づいてより踏み込んで、推定寿命が何年であることを提示する動きが国内にみられる。光ディスクの寿命推定には、2008 年 1 月、光ディスクやドライブの製造メーカーを中心に構成する団体「CDs21 ソリューションズ」が提案した DVD の寿命検査法「光ディスク寿命推定試験法」が、「ISO/IEC 10995」として国際規格として承認されている[23][24]。これは、これまでに紹介した文献と同様、通常よりも高い温度と湿度の中で光ディスクを保存することで経年劣化をシミュレートする加速劣化試験を採用している。具体的には、適切にサンプリングした DVD ディスクを定められた温度・湿度中に置き、一定時間毎にエラーレートがフォーマットで定められた上限値を越えていないかを計測する。

その結果、エラーレートの上限值を越えたものが5%に達した時点を目安としてディスクの寿命とし、これから通常環境での寿命を算出している。試験方法にはアレニウス法<sup>20</sup>とアイリング法<sup>21</sup>の2つを採用している。DVD-Rにおいては記録ピット内外での化学変化、またDVD-RAMやDVD-RWにおいては非晶質相の状態が結晶相の状態に変化する現象は反応速度論に従っていると考えられ、それらの変化に要する時間を $t$ とする。実使用環境温度での記録ピット、非晶質マークの安定性を議論するには活性化エネルギー $E_a$ を求めることが重要であると考え、複数の温度で $t$ を実験的に求めることによって $E_a$ を求めることができ、これにより、より常温に近い環境での寿命を求めることができる。ただしこの方法は統計的に処理するため製品のばらつきが大きいと予測ができない。また化学反応以外の要因（重力によるたわみ、温度変化による膨張・収縮の繰り返しで生じる亀裂など）による寿命は別の方法で検討する必要がある。

以下、寿命推定結果を抜粋する[25]。DVD-Rについては、初期段階から十分な特性が得られなかったものや、加速劣化試験において著しい変化を示すものもあったので、それらの信頼性の低いブランドを除いた3ブランドについて結果を述べる。保存環境は実使用環境の上限と考えられる相対湿度80%RHを想定し25℃、30℃の場合について求めた。二つのブランドでは生存確率95%では10年程度～20年程度といった結果となった。残り一つのブランドでは生存確率95%では数10年～100年程度であるとの結果を得た。ここで生存確率95%の寿命とは、不具合の生じたサンプルを最大5%まで容認した残りのサンプルの寿命である。より信頼度の高い寿命予測をするには、比較的低温での環境を加えて試験を行う必要がある。DVD-RW 5ブランドを試験したところ、2ブランドは反射膜や記録層の変質により劣化が起こったと考えられ、推定に値しないと判断された。他の2ブランドは数10年程度との推定寿命となった。残り1ブランドの推定寿命は25℃85%RH、信頼水準95%、生存確率95%において12,400年と異常に大きな値となった。しかし、高温時の寿命が非常に短く、他の特性（反射率）が規格を大きく外れる変化をすることから、このブランドは温度による寿命への影響が大きいことが推定でき、このような長い推定寿命を持つと判断するにはデータ不足であると考えられる。DVD-RAM 5ブランドを25℃80%RH、30℃80%RHの環境下で推定寿命を求めている。25℃80%RH、信頼水準95%におけるディスクの生存確率95%の推定寿命はそれぞれ、307年、219年、139年、15年、10年となっている。30℃80%RHの場合、どのブランドでも上の半分程度の寿命が推定されている。この結果よりブランド間での推定寿命のばらつきが大きいことが分かる。

以上のようにアレニウス法やアイリング法を用いれば化学変化に伴う経年劣化に起因する寿命をある程度推定することができる。この際、以下の点に注意する必要がある。

- ブランド間のばらつきが大きい

<sup>20</sup> 寿命推定のための加速試験の一種。湿度は一定として温度を常温よりも高い何種類かの条件に設定して寿命を測定し、これに基づいて常温での寿命を推定する。

<sup>21</sup> 温度だけでなく湿度も変えた何種類かの条件で寿命を測定し、これに基づいて通常の温度、湿度環境での寿命を推定する。

- 統計的処理のため、十分な数のサンプルで試験を行う必要がある
- ここで試算されるのは例えば生存確率 95%での推定寿命であるので、この年数を経過した時点で 5%の不良品が発生するのを前提にシステム設計（バックアップディスクの枚数策定等）をする必要がある
- 化学変化以外の要因による劣化を考慮していないので、通常環境で保存されたディスクの経年変化も継続的に調査する必要がある

なお、ブランド間のばらつきが大きい要因として、反射層及び記録層の素材の違いが大きいと考えられる。反射層はアルミニウムが廉価であるが、銀や金を用いたものの方が長寿命であると言われている。CD-R や DVD-R の記録層の色素としては、アゾやシアニンよりもフタロシアニンが優れているという主張がみられる[26]。

BD の寿命については、まだ文献が少ない。BD-ROM の表面コーティングで不良がみられた事例の報告[27]があった一方、高温・高湿加速試験により 100 年以上の推定寿命が確認されたとするメーカーからの報告[28]もあった。

### 3.3. 磁気ディスク

#### 3.3.1. 構造 [29][30]

磁気ディスクは大きく分けて、ハードディスクとフロッピーディスクがある。ハードディスクは、アルミニウムあるいはガラス等でできたディスク表面に磁気記録層をコートした硬い媒体を用いた記録媒体である。これに対し、フロッピーディスク等はフレキシブルな媒体を用いている。また、フロッピーディスクでは媒体とヘッドが接しており、これにより高い記録密度を達成していたが、ハードディスクは数年以上に渡る使用にも耐えるよう、ヘッドを媒体から浮かすようにしている。ヘッドと媒体を離すことは高い記録密度を達成する上での障害と考えられていたが、近年の微細加工技術の進歩により、ハードディスクであるがゆえに超平滑な表面を実現できる利点が勝るようになってきた。他方、リムーバブルメディアの主力はフロッピーディスクから光学ディスクやフラッシュメモリに移行している。このため以下では、ハードディスクのみを扱うこととする。

ハードディスクでは高速データ転送を達成するため、ディスクの回転数は高速化の一途を辿っている。最先端の製品では、ヘッドとディスクの間の空隙は 10nm 程度であり、ディスクの回転速度は毎分 15,000 回転程度である。また、垂直磁気記録方式や GMR（Giant Magneto-Resistive）素子を用いた読出しヘッドの登場が、高い記録密度の達成に大きく寄与している。

#### 3.3.2. 信頼性阻害要因

ハードディスクは記録媒体と読出し機構が不可分となっており、記録媒体の劣化だけでなく読出し機構の故障等によっても使用不能となってしまう。故障する箇所としては、ヘッド、メディア、ヘッドとメディアのインターフェース、ファームウェア、パッケージングなどがあり、故障に影響するストレス要因としては、温度、湿度、高度（気圧）、振動、

コンタクトスタート・ストップの頻度、動作頻度などが挙げられる。ハードディスクの故障発生率は図 3.1 のようないわゆるバスタブ曲線となる[31]。つまり、最初の 1 年程度は初期不良が発生しやすく、その後安定した動作をする時期が続き、5~7 年経過すると故障が増加して寿命となる。

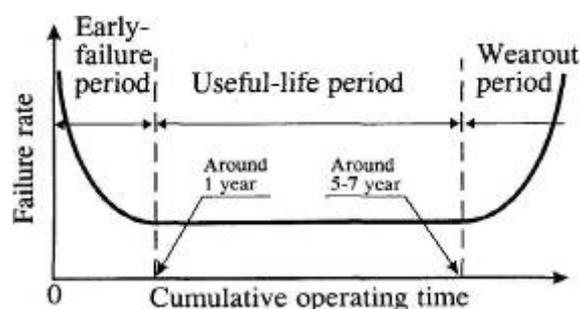


図 3.1 ハードディスクの故障率のパタン ([31])

信頼性を向上させるための技術は各メーカーで精力的に進められているが、ユーザのニーズは大容量、高性能、小型、低消費電力、低価格といった方向に向いており、これらとの兼ね合いで、市場に出回っている製品の場合、保証できるのは 5 年程度、と情報ストレージ研究推進機構が報告している[32]。

ヘッドやメディア以外での信頼性向上技術の研究としては、ハードディスクのヘッドと本体を電氣的に結線するためのフレキシブル基板 (FPC) の寿命を改善する技術[33]が提案されている。

### 3.3.3. 寿命に関する調査結果

[34]ではハードディスク製品のヘッド及びメディアの寿命の評価法を紹介している。ヘッドの寿命に関しては、まず、環境温度及びバイアス電流とヘッド温度の関係を明らかにし、次に環境温度 150°C で加速試験を繰り返し行い、この結果をグラフにプロットし、ヘッド出力が 10%低下する時間とヘッド温度の関係を導いている。実験に用いたヘッドの場合、5 年間 (43,800 時間) の寿命を保証するためにはヘッド温度を 101.5°C 以下にすれば良いとしている。メディアの寿命に関しては、まず、40~60°C で時間経過に対する出力信号の減衰率を実測し、これをグラフにプロットして温度と減衰率の関係を導いている。実験に使ったメディアの場合、5 年間で出力信号の減衰を 1dB 以内に抑えるためには、環境温度を 90°C 以下にすれば良いとしている。

このほか、ディスクの回転の停止中にディスクに直接接していたヘッドが回転再開直後や回転停止直前の摺動 (コンタクトスタート・ストップ) によって受けるダメージ[35]や、予備トラック数を増減させることによる信頼性と記録容量のトレードオフ[36]の評価が行われている。

上のように、個々の構成部品の寿命を評価する手法は概して慢性的に進行する経年変化を扱ったものであり、偶発的事象に起因する故障は考慮されていない。これを加味するも

のとして、実際に運用されているハードディスクシステムの信頼性に関する報告もある[37][38]。[37]では、MTTF (Mean Time To Failure: 平均故障寿命) が公称 100~150 万時間のハードディスク 10 万台について 5 年以上に渡って ARR (Annualized Failure Rate: 年間平均故障率) を調査したところ、約 3%であったと報告している。MTTF が 100 万時間ならば ARR は 0.88%の筈であり、実測値はそれより 3.4 倍大きかったことになるので、これだけから単純計算しても実際の MTTF は 29 万時間程度、つまり 33 年程度と推計される。なお、上で ARR から MTTF を推計した際は、ARR が一定の値をとることを仮定しているが、同報告では導入後 5 年以上経過したものは ARR が更に大きいことも示しており、実際の MTTF は更に短いと考えるべきであろう。つまり、(1)MTTF が 100 万時間 (=114 年) だからといって、平均的に 114 年間使用可能であることを意味しないこと、及び (2) あくまで統計的な期待値であり、個々の製品の寿命の最低値を保証するものではないことに注意が必要である。

### 3.4. 磁気テープ

#### 3.4.1. 構造[39]

磁気テープは薄くフレキシブルなポリマーでできた下地に磁性体粒子を塗布もしくは蒸着もしくは吹き付けて作られる。単位体積当たりの記憶容量を高めるため、テープの厚さは 10 $\mu$ m 以下のものが使われるようになってきた。単位面積当たりの記録密度を高めるため、媒体とヘッドを接触させる方式を採用している。さらに、テープ上の面積を最大限活用する工夫も行われている。即ち、黎明期のテープはヘッドを固定してテープの進行方向に 1 トラックだけデータを記録していたが、現在はヘッドを上下に移動させることで進行方向に平行に設けられた複数のトラックを走査するリニアサーペンタイン (linear serpentine: 線型蛇行) 方式あるいはドラム式のヘッドを回転させながらテープに斜めに当てることで螺旋状に走査するヘリカルスキャン (helical scan) 方式が用いられている。初期のテープはリールに巻き取るオープンリール式であったが、最近ではリールを内蔵した箱にテープが巻き取られるカートリッジ式が主流である。

#### 3.4.2. 信頼性阻害要因

[40]によれば、磁気テープの長期信頼性を阻害する要因として、磁性体粒子、結合剤、テープ下地のいずれもが考えられるとしている。磁性体に記録された磁気は、外界の磁界の影響で消失し得る。また、高温環境下では磁性体に記録された磁気の経年減少が加速される。結合剤は水分などにより変質する可能性がある。下地に含まれている潤滑剤は再生の度に消費され、長期間保存した場合も減少し、これによってテープの円滑な走行が阻害される。テープ下地は化学的に比較的安定なポリエステルが使われることが多いが、巻き取り方が不適切であるとストレスがかかって歪み、再生時のトラックずれの原因となり得る。これらの要因の中で、結合剤の化学変化が支配的であると[41]は結論付けている。また保管に当たっては、20 $^{\circ}$ C、湿度 40%程度の環境が望ましく、直射日光や埃を避け、立てて (巻

き取り軸が水平になるように) 保管することが望まれる。

なお、初期の磁気テープでは保管中に隣接するテープ間で磁界が干渉することで磁気転写が発生することが知られており、また保管中にときどきテープを巻きなおす必要があるとされていたが、[42]によれば、前者は記録密度の高い近年のテープの場合、磁界が隣のテープに干渉することはほとんどなくなったこと、後者については、巻き取り時のテンションを低めに抑える技術や、磁性層の化学的安定性の向上、走行安定性の向上等により、テープの巻きなおしは必要なくなったことが記されている。

### 3.4.3. 寿命に関する調査結果

磁気テープの寿命については、「適切な使用及び保存条件で 30 年以上の寿命が予測されているが、システムベンダーより、製品の変遷などを考えて 10 年程度ごとの移行が推奨されている」とされている[42]。

## 3.5. フラッシュメモリ

### 3.5.1. 構造

フラッシュメモリは、デジタルカメラ等で用いられる小型メモリーカードやパソコン等で用いられる USB メモリのような小容量製品から、ハードディスクに匹敵する総容量をもつ SSD (Solid-State Drive) まで、様々な形態で製品化されている。

フラッシュメモリは半導体集積回路メモリの一種であり、特別な構造をもった MOS (金属酸化膜半導体) トランジスタでデータを保持する。つまり、ゲート電極とチャネル領域の間にもう 1 つの絶縁されたゲート電極 (フローティングゲート) を構成し、このフローティングゲートに電荷が貯まっているかどうかで情報を記録する。フローティングゲートに溜める電荷量を「有る」「無い」の 2 段階にすると MOS トランジスタ 1 個当たり 1 ビットの情報しか保持できないが、4 段階に読み書きできるようにすることで MOS トランジスタ 1 個当たり 2 ビットの情報保持できるようにした製品も出回っている。前者を SLC (Single Level Cell)、後者を MLC (Multiple Level Cell) と呼ぶ。MOS トランジスタの基板電位を高くすると、同じ基板上に形成された全てのフローティングゲートの電荷がトンネル効果により取り除かれる (消去)。特定の MOS トランジスタのゲート電極の電位を高くすると、フローティングゲートに電荷を注入することができる (書込み)。フローティングゲートの電荷は電源を切っても保持されるので、不揮発性メモリに分類される。

### 3.5.2. 信頼性阻害要因

フラッシュメモリは絶縁されたフローティングゲートに電荷を蓄積することで情報を保持するが、この絶縁層は非常に薄いので、徐々に電荷がリークし、記憶内容が失われてしまう。このリークによるデータ保持可能期間は絶縁層の厚さで決まることが知られている [43][44][45]。例えば [45] では、寿命を 10 年以上にするためには、ゲート酸化膜の厚さを 4.3nm 以上にする必要があると試算している。しかし、ゲート酸化膜を厚くすることは集積回路の微細化と相反し、動作速度や動作可能電圧、最小チャネル長 (トランジスタの大

きさ)などの劣化を招く。

また、書込み及び消去の際にはゲート酸化膜に強い電界をかけることでトンネル効果により絶縁体であるゲート酸化膜の中を電子が通過するが、その一部がゲート酸化膜に取り込まれてしまう。電荷が取り込まれた部分は電気を通しやすくなるため、ここをリーク電流が流れるようになる。これを SILC (Stress Induced Leakage Current: ストレス誘起リーク電流)と呼ぶ。書込み及び消去の回数を重ねるほど、SILCは増加するので、データ保持可能期間は短くなる。更に書込み及び消去を繰り返すと、ついにはゲート酸化膜に取り込まれた多数の電子により電流の通り道ができてしまい、絶縁性が失われてしまう。これを Oxide Breakdown (酸化膜破壊)と呼ぶ。

### 3.5.3. 寿命に関する調査結果

上述の通り、フラッシュメモリの寿命は主としてデータ保持期間と書込み・消去反復回数で決まる。後者に関しては、周辺回路の技術として、(1)特定のブロックに書込み・消去が偏らないようにする、(2)不良ブロックが発生した時のために予備トラックをあらかじめ用意しておく、(3)誤り訂正符号を導入する、といった工夫により長寿命化が図られている。しかし前者は動作速度や集積度を犠牲にしてゲート酸化膜を厚くすることによらなければ本質的に改善の余地はない。業界ではフラッシュメモリのデータ保持期間は「10年」、書込み・消去サイクル数の上限は「10万回」を設計寿命としているようである[45][46]。

フラッシュメモリの製品の試験を行っている報告もみられる[47][48]。[48]では、MLC方式の8Gビットフラッシュメモリ4製品のビットエラー率を実測しており、書換え1万回でビットエラー率が $10^{-6}$ になった製品があったことや、1万回の書換え後のデータ保持特性では2,000時間後にビットエラー率が $10^{-5}$ 近くまで上昇した製品があったことなどを報告している。フラッシュメモリもまた、製品による品質差が大きいことがわかる。

## 3.6. マスク ROM

### 3.6.1. 構造

マスク ROMも半導体集積回路メモリの一種であり、製造時のフォトマスクによって所定のデータを出力する回路を作り込むことで得られる読出し専用メモリである。電源を切ってもデータの内容が消えない不揮発性メモリである。電子辞書、ゲーム機のカートリッジなど、同じ内容で量産される製品にしばしば使われる。

基本原理は、X軸方向に走るワード線とY軸方向に走るビット線の交点に選択的にトランジスタを配置し、選択されたワード線上にトランジスタが配置されているかどうかをビット線で判定するというものである。実際には、(a) NOR型拡散プログラム方式、(b) NOR型コンタクトプログラム方式、(c) NAND型メタルプログラム方式、(d) NAND型イオン注入プログラム方式などがある[49]。面積密度では(d)が優れる。

### 3.6.2. 信頼性阻害要因

シリコン半導体自体は物理的に非常に安定な物質(シリコン純結晶、多結晶シリコン、

二酸化シリコン)及びこれらに封止された金属(銅、タングステン、アルミニウム)からなる。このため、外界からの化学的影響は受けにくいと考えられる。ただし、入出力端子は露出しているため、ここが腐食することは考えられる。また、集積回路チップのパッド部分と外界を結線するためにワイヤボンディングを実施すると、パッド部分のアルミニウムとボンディングワイヤの金が化学変化を起こし、剥がれ落ちる可能性があることも知られている[50]。

使用に伴う劣化要因としては、集積回路一般に、エレクトロマイグレーション、NBTI (Negative Bias Temperature Instability: 負バイアス温度不安定性)、トータルドーズ効果などが知られている。エレクトロマイグレーションは、細いメタル配線に比較的大きな電流を流した場合に、徐々に配線が細くなってついには断線してしまう現象であり、電流容量に対してメタル配線を十分な太さとすることで防止が可能である。NBTIはPMOSトランジスタの閾値電圧が印加された電圧ストレスに伴って劣化する現象であるが、定期的に電圧ストレスを解除することにより回復させることが可能である。トータルドーズ効果は人工衛星など、極めて強い放射線環境においてのみ観測される。

### 3.6.3. 寿命に関する調査結果

[51][52]でマスク ROM の長期信頼性を試験した結果が報告されている。[51]ではプラスチックモールドパッケージに封止された4MビットマスクROM3品種を対象とし、高温保存試験(125°C、2,000時間)、高温動作試験(125°C、電源電圧5.5V、2,000時間)、不飽和プレッシャクッカ試験(125°C、相対湿度85%、電源電圧5.5V、200時間)を実施した結果、高温保存試験、高温動作試験では全ての資料で不良は見られず、不飽和プレッシャクッカ試験において、3品種中1品種において10個の資料中3個の故障がみられた。他のデータを援用して、30°C、相対湿度85%の環境に換算すると、推定寿命は41年以上となる。試験打ち切りまで故障しなかった残り2品種の寿命は146年以上と推定され、これだけ見ても他の媒体よりも明らかに長寿命であると期待できる。

ただし、通常の半導体集積回路では外界と電氣的に結線する部分で金属が露出することが不可避であり、100年以上の寿命を期待する場合はこの部分の劣化(腐食等)がアキレス腱になると考えられる。

### 3.7. 密封型マスクROM

恒久保存に適したデジタル記憶メディアとしてマスクROMが有望である一方、露出する金属端子を無くすことが必要であることを上に述べた。この条件を満たすデジタル記憶メディアはまだ製品化はされていないが、すでに実証試験を目指した研究開発はスタートしている。この概要は図3.2の通りである[53]。すなわち、1枚のシリコンウエハ上にマスクROMを敷き詰め、さらに、電源及びデータを非接触で取り込んだり送信したりするためのインターフェースも同じシリコンウエハ上に実装する。そしてこのウエハ全体を二酸化シ

リコン等の化学的に極めて安定な絶縁体で完全に封止するのである<sup>22</sup>。

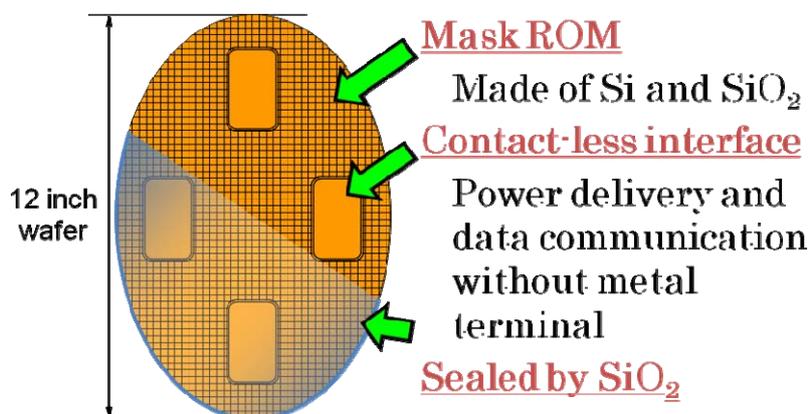


図 3.2 密封型マスク ROM[53]

非接触電源供給手段としては、電磁誘導によるものや、太陽電池の原理に基づくもの等が考えられ、非接触データ通信技術としては、電磁波による無線通信、IC タグで使われている後方散乱方式、より近距離で有効な電磁誘導結合による方式などが考えられる。

このメディアを用いたシステムの構成は例えば図 3.3 のようになる。この図の左端の円盤状のものが密封型マスク ROM である。この例では、非接触電源供給手段として太陽電池を採用している。円盤はシリコンウエハそのものであり、現在、直径 12 インチ (30cm) までのものが製造可能である。この上に太陽電池 (PN 接合ダイオード) もデータ通信のアンテナ (コイル) もマスク ROM やその他の電子回路も全て一連の製造プロセスで集積し、全体を保護層で封止する。

記憶メディアそのものを集積回路上に実現することで、従来の記憶メディアにはなかったような様々な付加機能を持たせることも可能になる。各記憶メディアに相互通信する機構を持たせることで拡張性を持った大規模アーカイブシステムが実現できるようになる。つまり、各メディアに自律的にアドホックネットワークを形成する機構を持たせることにより、メディアを順不同でメディアラックに挿入するだけで、サーバからアクセス可能な状態となる。図 3.3 中央は、密封型マスク ROM を一列に配列し、アドホックネットワークで相互通信させる場合を例示している。太陽電池を動作させるのに必要なエネルギーを光源から与えると、サーバのリーダからのアクセス要求が目的の密封型マスク ROM まで順次転送され、読み出されたコンテンツのデータが順次サーバのリーダまで送り返される。

<sup>22</sup> なお、本件の履行期間中に、石英ガラスを用いた新たな記憶媒体が日立製作所から提案された[65]。これはフェムト秒レーザーによって石英ガラス内に屈折率の異なる微小領域を刻印するものであり、可視光発光ダイオードを用いた光断層撮影法でデータを読み出すものである。推定寿命 10 万年以上とする加速試験結果も示されており、これも、恒久保存メディアとして有力だと考えられるが、16.6Mbyte/cm<sup>3</sup>

(=0.133Mbit/mm<sup>3</sup>) という記憶密度は後述するように市販のブルーレイディスク (23Mbit/mm<sup>3</sup>) やハードディスクドライブ (19Mbit/mm<sup>3</sup>) および現在の技術で製造可能な密封型半導体メモリ (24Mbit/mm<sup>3</sup>) に遠く及ばない。ちなみにここで用いられている石英は二酸化シリコンが原料であり、二酸化シリコン内にデジタルデータを封入するという点では、本件と発想を一にするものである。

長期的信頼性に関して従来の媒体よりも格段に優れると期待できることは上に述べたが、大規模アーカイブを実現する上で、記憶メディアの収納スペースも重要な問題である。そこで、現在の代表的なデジタル記憶メディアであるハードディスク装置及び光学ディスクと、提案する密封型マスク ROM を単位体積当たりの記憶密度で比較する。

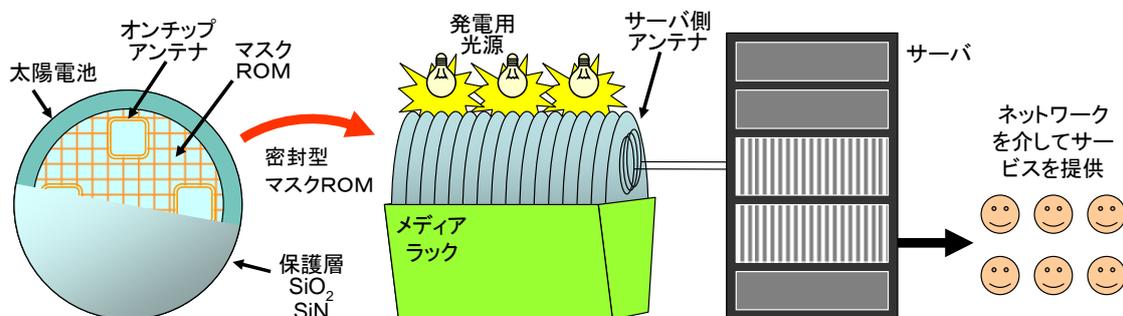


図 3.3 提案する恒久保存メディアシステムの実現例

- 片面 2 層 (50G バイト) のブルーレイディスク (占有体積 120mm×120mm×1.2mm) : 23Mbit/mm<sup>3</sup>
  - このように収納 (保存) した状態ではアクセスができない
- 市販の 500 G バイトのハードディスクドライブ (占有体積 78mm×132mm×20mm) : 19Mbit/mm<sup>3</sup>
  - 高温になると著しく信頼性が低下するため、空調等のスペースが別途必要
- 提案する密封型マスク ROM を現在実用化されている 45 nm プロセスの 12 インチウエハで実現し 700 G ビットの記憶容量を持たせた場合 (占有体積 30cm×30cm×320μm) : 24Mbit/mm<sup>3</sup>
  - 図 3.3 に示すように隙間を空けずメディアラックに収納した状態で読出しが可能

以上より、単位体積当たりの記憶密度の観点でも密封型マスク ROM は既存のデジタル記憶メディアと比較して遜色がないことがわかる。

この密封型マスク ROM の実装形態の一つとして、図 3.4 のような Digital Rosetta Stone[54] のプロトタイプが試作されている。試作されたのは 0.18μm CMOS プロセスを用いた 5mm 角の Stone チップ、及び同サイズの読出し用 Reader チップである。このチップは、1 枚のシリコンウエハからなる Digital Rosetta Stone に敷き詰められた回路の一部を切り出したものを模したものである。Digital Rosetta Stone では、非接触電源供給と非接触データ転送の両方に電磁誘導結合を採用している。電源供給は 2mm×2mm のコイルを 4 個使用し、0.2mm の距離で 56mW の伝送に成功している。データ転送は 0.4mm×0.4mm のコイル 2 個をペアにしてクロックとデータを伝送しており、1Gbit/sec のデータ転送性能を持つ。実際は電源供給中にデータ転送を行うことができないため、電源供給とデータ転送を交互に行う必要があるが、それでも平均データ転送速度は 150Mbit/sec を達成している。なお寿命に関しては、ウエハ全体を二酸化シリコン及び窒化シリコン膜で覆うことで

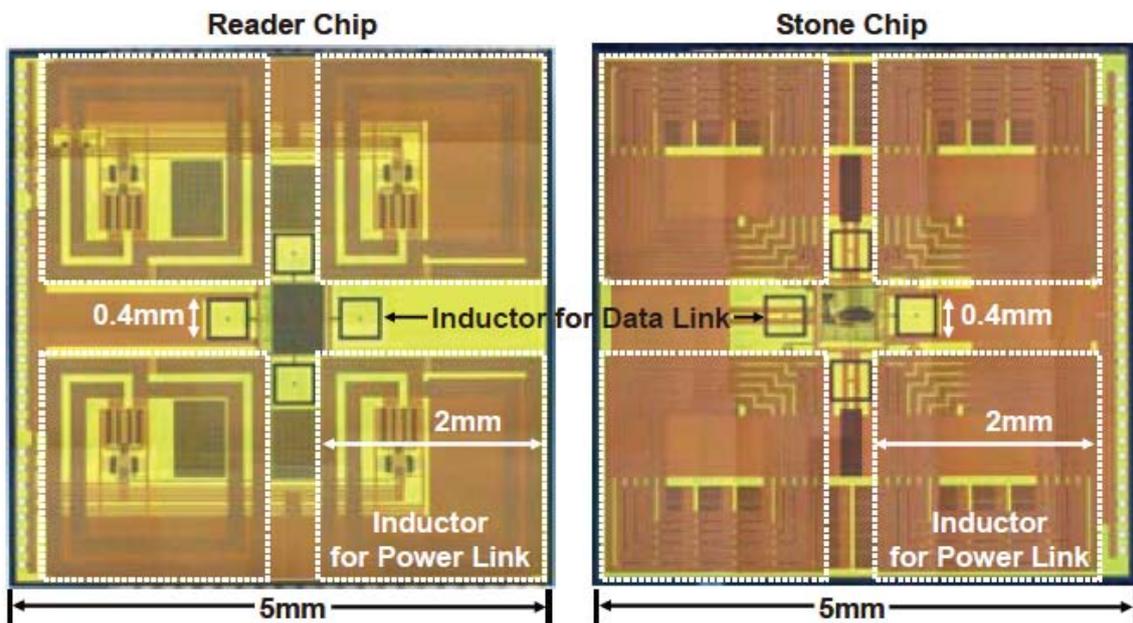


図 3.4 Reader チップと Stone チップ

膜内の相対湿度を 2%以下に保持できると仮定した場合、Peck のモデル[55]に基づき、100°C 以下の環境であれば 1,000 年以上の保存が可能であると見積もっている。

### 3.8. まとめ

以上より以下のことが明らかとなった。

- 光学ディスクは、加速試験の結果から見る限り、1 回だけ書込みが出来るもの (DVD-R など) の中でも特定の製品では 100 年程度の寿命を期待できるが、保管にあたって低温・低湿で暗い保管環境が不可欠である。
- ハードディスクは高速に読み書きできることが最大の特長であり、現在出回っている製品の寿命は 5 年程度と考えるべきである。
- 磁気テープは、現在出回っている製品の寿命は 30 年程度と考えるべきである。
- フラッシュメモリは、現在出回っている製品の設計上の寿命は 10 年程度のようなものである。
- マスク ROM は、加速試験の結果より 100 年以上の寿命があると推定される製品が存在し、これだけ見ても他の媒体よりも明らかに長寿命であると期待できるが、有線通信を前提とする限り、露出する金属端子の経年劣化の方が支配的になると考えられる。
- マスク ROM と非接触電源供給手段及び非接触通信手段を同一基板上に集積して絶縁層で密封した新しいデジタル記憶メディアが提案されている。これは 1,000 年以上の寿命をもつと期待でき、かつ収納状態でもアクセスできる特長をもつ。

2 章で述べたように、国立国会図書館等の所蔵資料がデジタル化された場合にデジタルデータを安定的に運用していくためには、長寿命、大容量、省スペースで、読み書きが速い

恒久保存メディアが不可欠である。上で得られた調査結果より、密封型マスク ROM は少なくとも長寿命、大容量、省スペース、高速読み出しといった要件を備えており、恒久保存メディアの候補として現時点で最も有望であると言える。この結果に基づき、次章以降では恒久保存メディアとして密封型マスク ROM を選定し、実現可能性調査を行うこととする。

## 4. 恒久保存メディアとしての密封型マスク ROM の要件に係る予備評価

先述の通り本件では、恒久保存メディアとして密封型マスク ROM を選定し、実現可能性調査を行うこととした。密封型マスク ROM はその特性上、非接触通信、非接触電源供給が必要となるが、それぞれ複数の方式が存在する。ここでは、本件には各々、何が適しているかを検討し、最適と考えられる技術を用いて回路設計・チップ製作を行い、実現可能性を予備的に評価した。

### 4.1. 非接触通信技術

#### 4.1.1. 既存の非接触通信技術及びそれらの比較

非接触通信技術には、(a)電磁波によるもの、(b)後方散乱方式によるもの、(c)光によるもの、(d)容量結合によるもの、(e)電磁誘導結合によるものなどがある。以下、これらを順に見ていくが、本件では特に、通常のシリコン半導体集積回路製造技術を用いてチップ内に通信系を全て実現して封止できるかどうか、消費電力が低く、十分な性能が得られるかどうかのポイントになる。

##### 4.1.1.1. 電磁波によるもの

電磁波は適切なアンテナを用いることにより相当遠距離まで信号を伝えることが可能であるため、放送や無線通信の分野で古くから一般的に使われてきた。これを比較的近距離の通信に利用した例として、無線 LAN やアクティブ無線タグ（最長通信距離 10～100m 程度）などが挙げられる。さらに近距離の通信に応用した例として、三次元積層された LSI チップ間の通信（通信距離 1mm 以内）に応用する提案もあり、例えば[56]ではアンテナのサイズを 4mm 程度としている。この程度の大きさのアンテナであれば LSI チップ内のメタル配線層を利用して実現することも可能であるが、後述の容量結合方式や電磁誘導方式と比べ消費電力が比較的大きくなってしまふ欠点がある。

##### 4.1.1.2. 後方散乱方式によるもの

後方散乱方式は読み出し装置から送られる電磁波の一部を反射することで情報を送り返すものであり、パッシブ無線タグ（IC カード）で広く使われている[57]。この方式は、データ送信側は低消費電力で実現できるが、データ受信側が十分な強度の搬送波を送ることが前提となる。また、通信速度をあまり高くできない。

##### 4.1.1.3. 光によるもの

光を用いた非接触通信も技術的には可能であり、例えば赤外線通信は広く利用されている。これを実現するためには発光素子と受光素子が必要であるが、通常のシリコン基板を用いた半導体製造技術では、発光素子を実現することは難しい。

##### 4.1.1.4. 容量結合によるもの

送信側と受信側にそれぞれ平板電極を設けてこれらを近接させると、これらの間に容量結合が生じる。これによる通信も可能であるが、ごく至近距離の通信にしか使えない。

#### 4.1.1.5. 電磁誘導結合によるもの

送信側と受信側にコイルを設けてこれらを近接させると、これらの間に電磁誘導結合が生じる。この原理はトランスと同じである。Digital Rosetta Stone[54]では、直径 0.4mm のコイルで 0.2mm の通信距離が確保でき、このコイル 1 個で瞬間的には毎秒 1G ビットの通信速度が得られたと報告されている。光学ディスクと読出しヘッドの間隔 (0.2mm) と同等以上の通信距離が確保できる非接触通信技術の中では、通信速度や消費電力の観点で最も優れている。

以上より、非接触通信方式としては電磁誘導結合を採用することとする。

#### 4.1.2. 電磁誘導方式の詳細設計

電磁誘導方式で通信を行うためには、送信側コイルとその駆動系、及び受信側コイルと波形整形回路が必要である。送信側コイルと受信側コイルの特性は磁界シミュレーションによって見積もる必要があり、駆動系及び波形整形回路の特性は、回路シミュレータで見積もる必要がある。このため、コイルの設計・改良及びその特性見積もりと回路の設計・改良及びその特性見積もりを何回か繰り返し、適した特性のものを得ることとした。

今回は、直径 1mm 程度の 8 角形コイルを採用することとした。直径を 1mm 程度にした理由は、実証試験を容易にするため、0.5mm 程度の距離まで通信可能としたかったこと、及び、直径 30cm のシリコンウエハ (線膨張率  $24.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ) の直径は  $10^{\circ}\text{C}$  の温度変化によって約 0.072mm 伸縮するので、コイルはこの程度の位置ずれ耐性をもつ大きさにするべきだと考えたことによる。

この前提でシミュレーションしながら見積もり等を繰り返し、予備評価チップのデータ送受信コイルの諸元を表 4.1 のように決定した。

表 4.1 予備評価チップのデータ送受信コイルの諸元

	送信コイル	受信コイル
メタル層	メタル 6 層 (Thick Metal)	メタル 6 層 (Thick Metal)
直径	0.9mm	1.0mm
巻数	2 回	4 回
太さ・間隔	10 $\mu\text{m}$ ・8 $\mu\text{m}$	3 $\mu\text{m}$ ・6 $\mu\text{m}$
インダクタンス	10.0nH	44.1nH
寄生容量・寄生抵抗	0.45pF・10 $\Omega$	0.61pF・77 $\Omega$

また、このコイルを用いた時のデータ受信波形のシミュレーション結果は図 4.1 のようになった。

#### 4.1.3. 予備評価チップの実験結果

予備評価チップは TSMC 社 0.18 $\mu\text{m}$  メタル 6 層プロセスで試作した。このチップ上には

データ送受信回路のほか、後述の電源送受信回路も搭載した。もう 1 個の同じチップを裏返して向かい合わせると、送信コイルと受信コイルが向かい合わせになるようにした。このチップの顕微鏡写真と、測定装置構成を図 4.2 に示す。

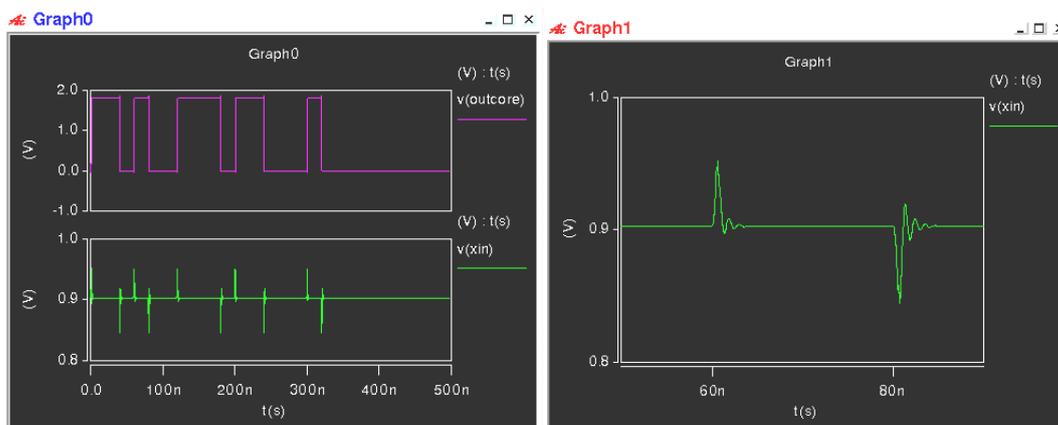


図 4.1 受信コイルのシミュレーション波形（左下：コイル出力、右：その拡大、左上：波形整形後）

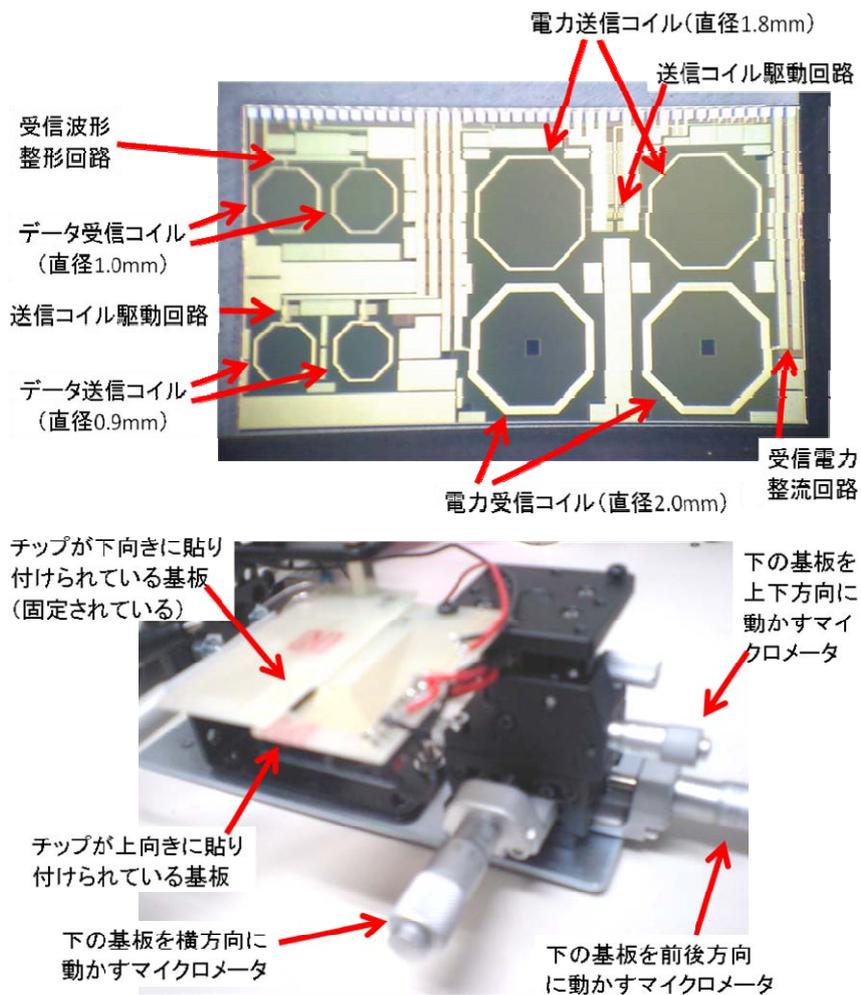


図 4.2 予備評価用チップの顕微鏡写真（上）と測定装置構成（下）

実験の結果、以下が確認された。

- 送受信コイル間の距離は 1mm 程度まで伝送可能であった
- 送受信コイル中心間の位置ずれは $\pm 0.5\text{mm}$  程度まで許容可能であった
- 通信エラーの原因となり得る波形の劣化が確認された（受信コイルの Q 値が高く、リンギングが発生と推定）

## 4.2. 非接触電源供給技術

### 4.2.1. 電磁誘導方式と太陽電池方式及びそれらの比較

非接触電源供給技術としては、(a)電磁誘導結合によるものと、(b)太陽電池によるものが候補として挙げられる。

(a)は例えば電動シェーバーや電動歯ブラシなど電源の電極が露出していると感電する恐れのある機器で実用化されているが、集積回路チップへの電源供給への試みもみられる。例えば、直径 0.6mm のコイル 4 個を実装した場合、12mW の電力を非接触で供給できたという報告がある[58]。ただし、供給側と受電側のコイルを相当接近させ精密に位置合わせをする必要がある上、通信にも電磁誘導結合を使用する場合は電源コイルの電磁波が通信を妨害する（通信用コイルと電源用コイルを十分離して配置するか、通信中は電源供給を停止する必要がある）といった欠点がある。

(b)については、通常バルク CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) プロセス上に形成された  $338\mu\text{m}^2$  のダイオードに 20kLUX の光を照射したところ 76nW の発電が確認できたという報告がある[59]。なお、通常バルク CMOS プロセスでは同一基板上に形成された複数のダイオード同士が基板を介して電氣的に短絡するため、複数のダイオードを直列接続して高電圧を得ることが難しい。これを可能にする方策として、通常バルク CMOS プロセスの代わりに SOI (Silicon On Insulator) プロセスを用いることが考えられる。SOI プロセス上で高効率な太陽電池を実装する技術の開発も試みられつつある[60]。

チップ面積当たりで単純計算すると、(a)の発電能力が  $12\text{mW}/1.44\text{mm}^2=8.3\text{mW}/\text{mm}^2$  であるのに対し、(b)は  $76\text{nW}/338\mu\text{m}^2=0.22\text{mW}/\text{mm}^2$  で約 1 桁劣るが、ノイズを出さず、安定した直流電源が確保できる点や、光が電磁誘導より遠くまで低損失でエネルギーを伝搬できる点などでは(b)が優位である。

これらの利害得失から、小面積に切り出されたシリコン基板を用いたメディアを実現する場合は面積効率に優れる(a)が、8 インチウエハ全体を使用する場合など比較的大きなシリコン基板を用いてメディアを実現する場合は(b)が本目的に最適である。

### 4.2.2. 電磁誘導方式の詳細設計

本件では、小面積に切り出されたシリコン基板を用いて、プロトタイプを実現することとした。このため、非接触電源供給に関しては電磁誘導方式を採用することとした。

電磁誘導方式で電源供給を行うためには、送信側コイルとその駆動系、及び受信側コイ

ルと整流回路が必要である。データ送受信系と同様に、送信側コイルと受信側コイルの特性は磁界シミュレーションによって見積もる必要があり、駆動系及び整流回路の特性は、回路シミュレータで見積もる必要がある。

電源送受信コイルはデータ送受信コイルよりも更に大きくしなければ、十分なエネルギーの伝送はできない。今回は試作ということで、直径 2mm 程度の 8 角形コイルを採用することとした。

この前提でシミュレーションしながら見積もり等を繰り返し、予備評価チップの送受信コイルの諸元を表 4.2 のように決定した。

表 4.2 予備評価チップの電源送受信コイルの諸元

	送信コイル	受信コイル
メタル層	メタル 6 層 (Thick Metal)	メタル 6 層 (Thick Metal)
直径	1.8mm	2.0mm
巻数	2 回	5 回
太さ・間隔	15 $\mu$ m・10 $\mu$ m	15 $\mu$ m・10 $\mu$ m
インダクタンス	21.4nH	112.6nH
寄生容量・寄生抵抗	1.1pF・14 $\Omega$	3.1pF・37 $\Omega$

また、このコイルを用いた時の電源受信波形のシミュレーション結果は図 4.3 のようになった。この時の条件は、駆動電圧 1.8V、駆動周波数 167MHz、コイル間距離 0.2mm、整流方式ダイオードブリッジ (3V 耐圧ダイオード使用)、負荷抵抗 100k $\Omega$ であり、約 1.22V の出力電圧を得ている。

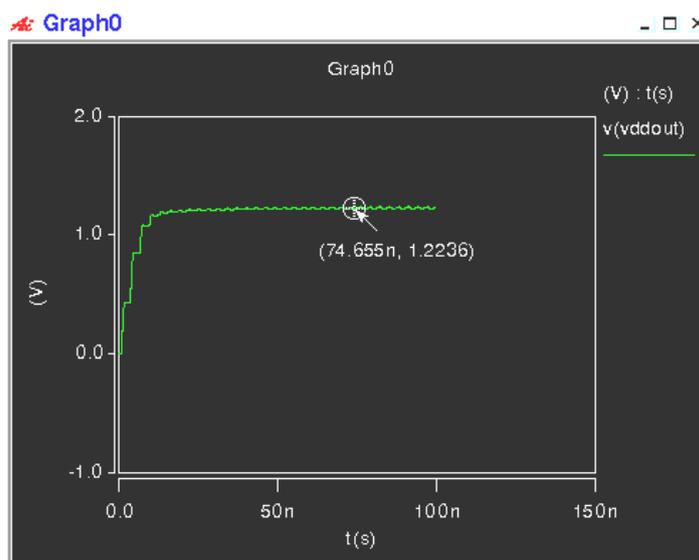


図 4.3 電源受信コイルのシミュレーション波形

#### 4.2.3. 予備評価チップの実験結果

予備評価チップは TSMC 社 0.18 $\mu\text{m}$  メタル 6 層プロセスでデータ系の送受信回路と共に試作した。実験の結果、以下が確認された。

- 送信側電源電圧が 1.8V、コイル間距離が 0.2mm のとき、受信側出力電圧は負荷抵抗 100k $\Omega$  のとき 1.39V など、おおむねシミュレーション通りの結果が得られた。
- 送信側電源電圧を 3.3V とし出力を高め、受信側整流ダイオードを 2.0V 耐圧のものにして損失を減らせば、十分な電力が伝送できると予想できる。

## 5. 密封型マスク ROM を用いたプロトタイプシステムの試作

先述の予備評価の結果、密封型マスク ROM を実現する上で必要となる非接触通信、非接触電源供給技術として電磁誘導方式の実現可能性が明らかとなった。より具体的には、通信、電源供給共に、コイル間の距離を 0.5mm 程度としても電磁誘導方式が利用可能である見通しが得られた一方、そのためにはデータ受信回路におけるリンギングの抑制や、電源送信側の電源電圧を 3.3V 程度にする必要があることなどが明らかになった。これらを踏まえて、実際にデータを記録したメディア及びこれを読み出すプロトタイプシステムを試作した。

### 5.1. メディアの構成

#### 5.1.1. 概要

本件で試作した密封型マスク ROM メディアのブロック図を図 5.1 に示す。赤で図示したのが電源系であり、青で図示したのがその他の回路及び信号である。

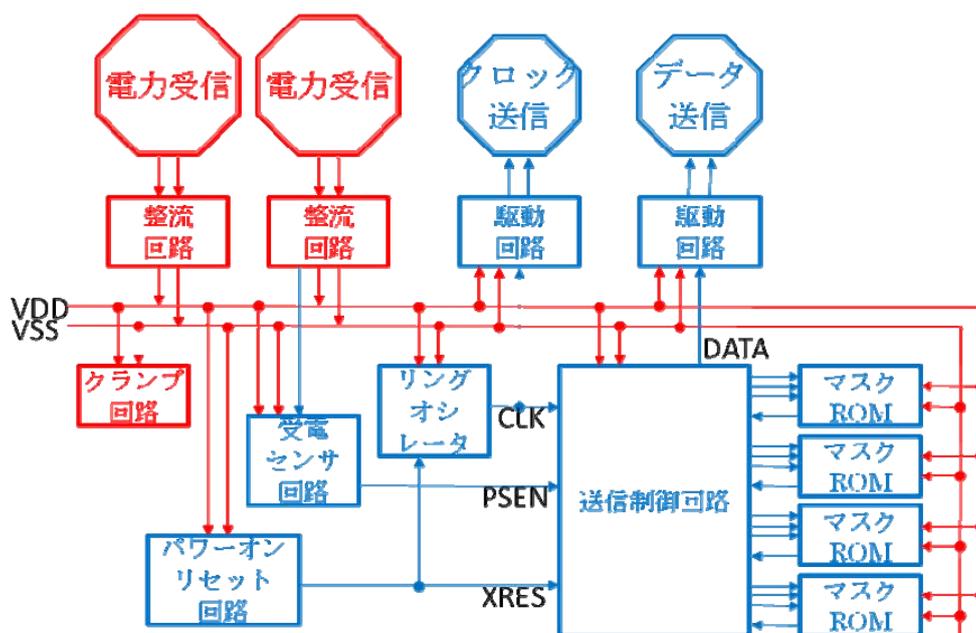


図 5.1 メディアチップのブロック図

電力受信コイルにエネルギーが供給されると、整流回路で直流電流に変換され、VDD-VSS 間のキャパシタを充電する。パワーオンリセット回路は電源電圧が 1.6V 以上になるとリセット (XRES) を解除する。クランプ回路は電源電圧が 2.0V 以上になると電流が流れるようになっており、チップ内の回路を過電圧から保護する。受信センサ回路は電力受信コイルを小さなダイオードで整流した信号を直接判定し、エネルギー供給の有無を素早く PSEN に出力する。送信制御回路は PSEN の状態に基づいてマスク ROM のデータを順次 DATA から出力する順序回路である。駆動回路はクロック送信コイル及びデータ送信コイルを駆動するための波形整形回路及びバッファからなる。

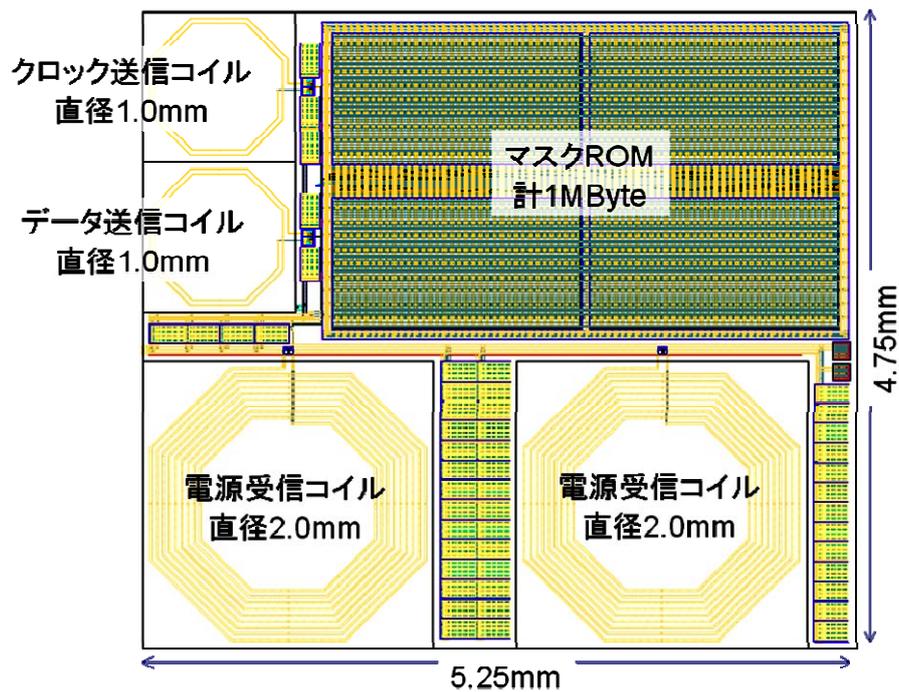


図 5.2 メディアチップのレイアウト



図 5.3 試作チップの顕微鏡写真（上右：メディアチップ、上左：リーダーチップ）

これらの回路が実装されたメディアチップのレイアウト設計図を図 5.2 に示す。図の電源受信コイルの左右等の隙間に配置された合計 50 個の小さな緑色の長方形は、電源エネルギーを蓄積するためのキャパシタであり、1 個あたり約 200pF である。

### 5.1.2. 各構成要素の詳細

電力送受信コイルについては、コイルの巻線間隔を広げた方が良い場合があることが判明し、改めて比較検討の上、表 5.1 のものを採用した（電力送信コイルは後述のリーダーチッ

プに実装されている)。

表 5.1 メディアチップの電源送受信コイルの諸元

	送信コイル	受信コイル
メタル層	メタル 6 層 (Thick Metal)	メタル 6 層 (Thick Metal)
直径	2.0mm	2.0mm
巻数	2 回	9 回
太さ・間隔	35 $\mu$ m・125 $\mu$ m	15 $\mu$ m・30 $\mu$ m
インダクタンス	16.7nH	149.0nH
寄生容量・寄生抵抗	2.2pF・6.3 $\Omega$	3.9pF・48 $\Omega$

整流回路は損失を減らすべく、ダイオードに代え、MOS トランジスタベースの疑似ダイオードでブリッジ整流器を組んだ[61]。

パワーオンリセット回路は、電源電圧が 1.6V に達するまでは負論理リセット信号を出力し、それ以降は少々ノイズが入ってもリセット解除状態を維持するヒステリシス特性を持たせる必要があると考え、[62]の図 3 を参考に設計した。

クランプ回路は[57]の図 3.17 を参考に、カレントミラー方式の回路を設計した。

受電センサ回路は、時定数の小さい積分回路をヒステリシスバッファで受けた回路として実現した。

リングオシレータは、電源電圧 1.8V で 100MHz 程度を発振するものとした。なお、パワーオンリセットがかかっている間は消費電力を抑えるため、リングオシレータを止めている。

送信制御回路は、エネルギー供給中 (PSEN=1) は停止し、エネルギーが止められると 16 ビット分のデータを含むパケットを 1 個出力して停止し、再度エネルギーを供給して停止すると、続きの 16 ビットを含むパケットを 1 個出力するように作られた順序回路である。

マスク ROM は、64 ビット×32K 語のものを 4 個実装した。この ROM マクロは Artisan 社の提供するものをそのまま使用している。

駆動回路は[63]の Fig.8 を参考にした。

データ送信コイルについては後述する。

## 5.2. 読出しシステムの構成

### 5.2.1. 概要

本件で試作したメディア用の読出しシステムの概要を図 5.4 に示す。また、その写真を図 5.5 に示す。

図 5.4 中、左上はメディアチップデータリードブロック (以下「リーダユニット」と言う。)、右上はデータ変換制御&PC インターフェースブロック (以下「FPGA ボードユニット」と言う。)、右下はサーバ PC、左下はクライアント PC である。FPGA ボードユニットはアル

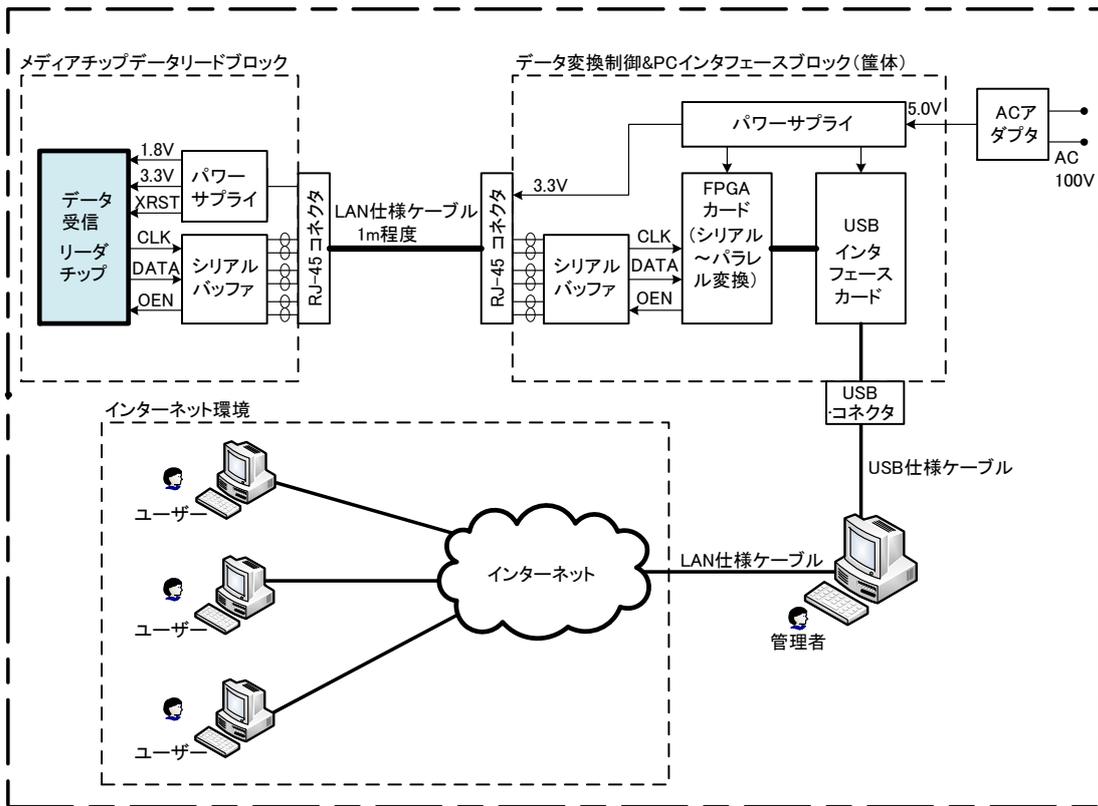


図 5.4 読出しシステムの概要

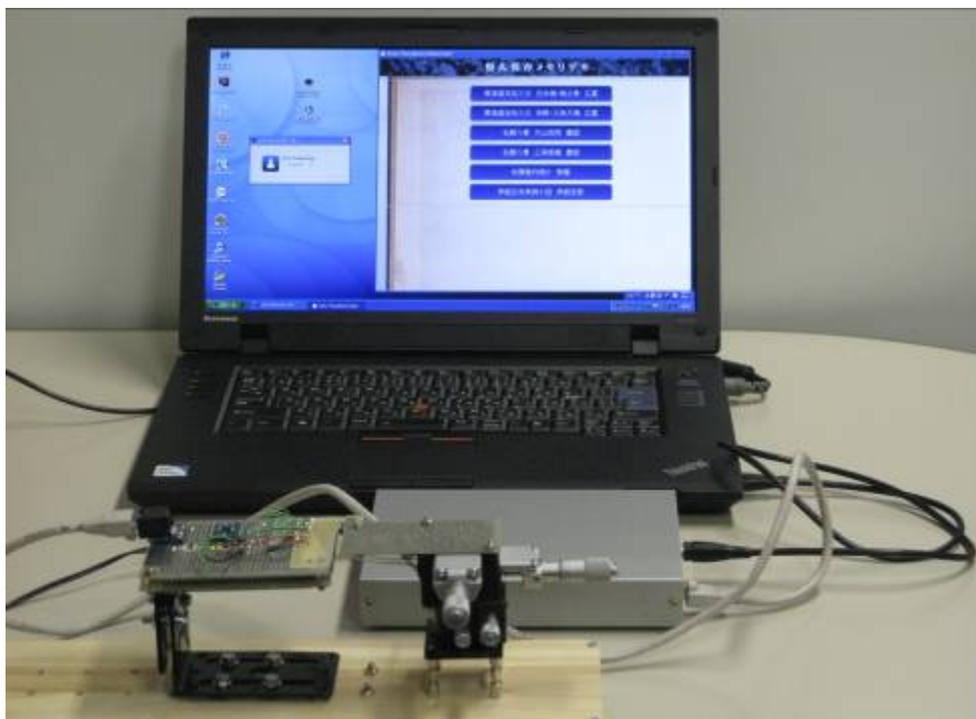


図 5.5 読出しシステムの写真

ミニ筐体に FPGA ボードや USB インターフェースカード等が入っており (図 5.6)、そこから 1m 程度のケーブルを介してリーダユニットが接続される。リーダユニットは、リーダチップと、これに 1.8V や 3.3V の電源を供給する回路、ならびにケーブル接続用のバッファからなる (図 5.7)。FPGA ボードユニットとサーバ PC は USB ケーブルで接続されている。サーバ PC には、FPGA ボードを制御するソフト、ならびに Web サービスを行うためのソフトがインストールされている。サーバ PC にクライアント PC を接続し、Web ページを開くと、ダウンロードしたいコンテンツのリストが表示され (図 5.8 (a))、どれかを選ん



図 5.6. FPGA ボードユニットの外観 (左) と内部 (右)

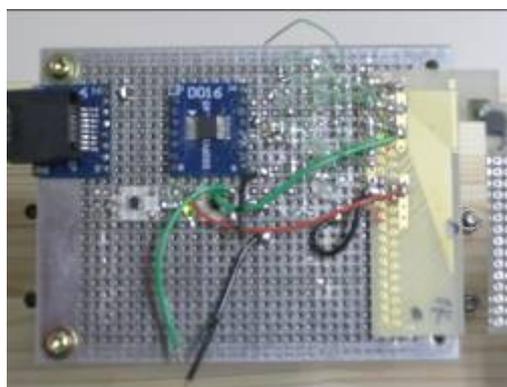


図 5.7. リーダユニット



(a) コンテンツのリスト

(b) 読出し中の画面

(c) 読出し結果の表示

図 5.8. Web の表示画面

でクリックすると、サーバ PC は FPGA ボードを介してリーダチップを制御し(図 5.8 (b))、  
 所望のコンテンツを読み出し、クライアント PC へ送る (図 5.8 (c))。

### 5.2.2. リーダ部

リーダ部のブロック図を図 5.9 に示す。赤で図示したものが電力送信系であり、青で図示したものがデータ受信系である。VDD と VSS はデジタル回路共通の電源であり 1.8V を印加する。VDDA と VSSA はデータ受信アンプにデジタル系のノイズが混入しないように設けられた電源であり、1.8V を印加する。VDDH と VSSH は電力送信アンプを駆動するために用いられる電源であり、最高 3.3V を印加することができる。

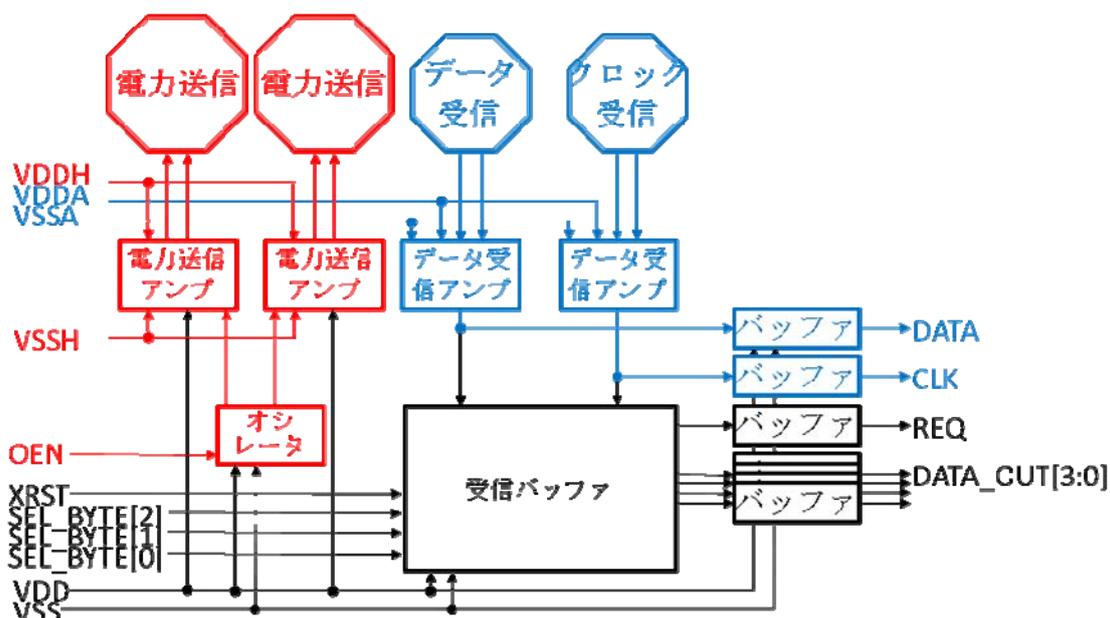


図 5.9 リーダ部のブロック図

オシレータは OEN 入力を 1.8V にすると位相が 90 度ずれた 2 相のクロック (約 200MHz) を発振する。電力送信アンプはオシレータのクロック (振幅 1.8V) から VDDH 電源のレベルの振幅をもつ正極性と負極性のクロックを生成し、電力送信コイルを駆動する。

データ受信アンプはヒステリシス特性をもつ差動アンプを前段に配し、振幅 1.8V のデジタル信号に変換する増幅用インバータを後段に配している。データ受信コイル及びクロック受信コイルで取り込まれた信号はそれぞれデータ受信アンプを経由して、I/O 用のバッファを介して DATA 及び CLK 出力から取り出される。

なお、黒で図示した受信バッファは 1 パケット分の受信データを取り込むためのデジタル回路であり、低速な周辺回路との接続を容易にするために実装されたが、今回のプロトタイプシステムでは使用しなかった。

メディアチップで使用したデータ送受信コイルの諸元を表 5.2 に示す。受信コイルをメタル 5 層にしたのは、意図的に寄生抵抗を大きくして Q 値を下げ、リングングを抑制する狙いからである。

表 5.2 メディアチップのデータ送受信コイルの諸元

	送信コイル	受信コイル
メタル層	メタル 6 層 (Thick Metal)	メタル 5 層 (Thin Metal)
直径	1.0mm	1.0mm
巻数	2 回	2 回
太さ・間隔	5 $\mu$ m・30 $\mu$ m	5 $\mu$ m・30 $\mu$ m
インダクタンス	11.2nH	44.1nH
寄生容量・寄生抵抗	0.354pF・23 $\Omega$	0.248pF・101 $\Omega$

これらの回路が実装されたリーダ部のチップのレイアウト設計図を図 5.10 に示す。図中の緑色の長方形は、電源ノイズを吸収するための容量であり、1 個あたり約 200pF である。

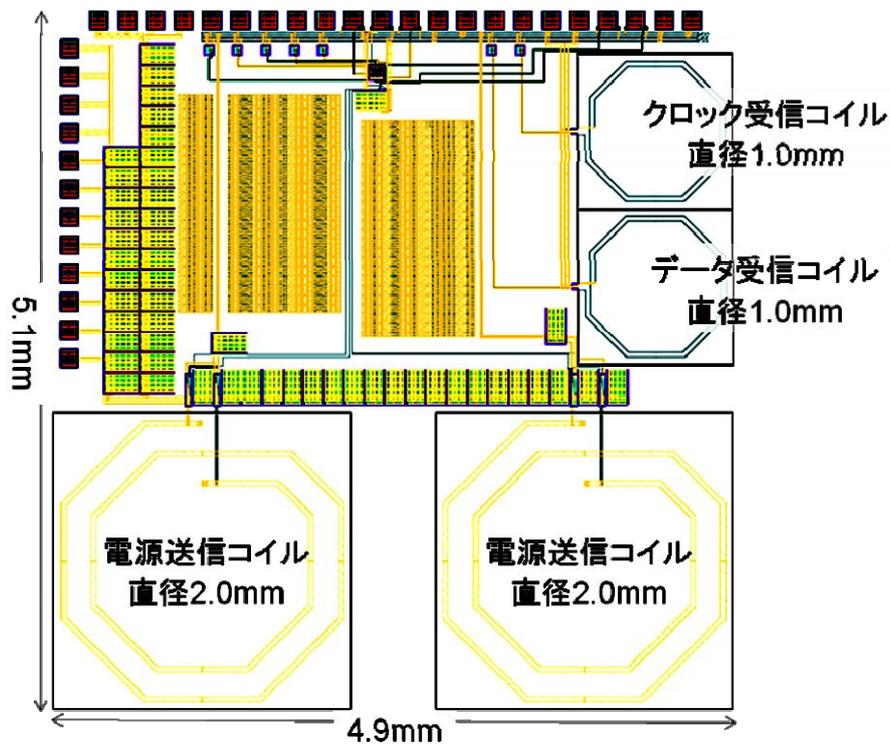


図 5.10. リーダ部のチップのレイアウト

特に大きな過渡電流が流れる VDDH には、3.3V 耐圧の容量を 49 個接続している。

### 5.2.3. インターフェース部

リーダユニット及びFPGAボードユニットのブロック図を図 5.11 および図 5.12 に示す。

### 5.3. プロトタイプシステムの性能

試作したリーダ部のチップに電源装置や測定機（オシロスコープ等）を接続し、メディアチップを接近させたところ、リーダチップから供給されたエネルギーを使用してメディアチップが動作し、1 パケットずつデータを送り返しているのを示唆する波形がオシロスコー

プで確認された (図 5.13)。ただし、その波形は図からも明らかなようにノイズが重畳し、タイミングも振幅も不安定であった。

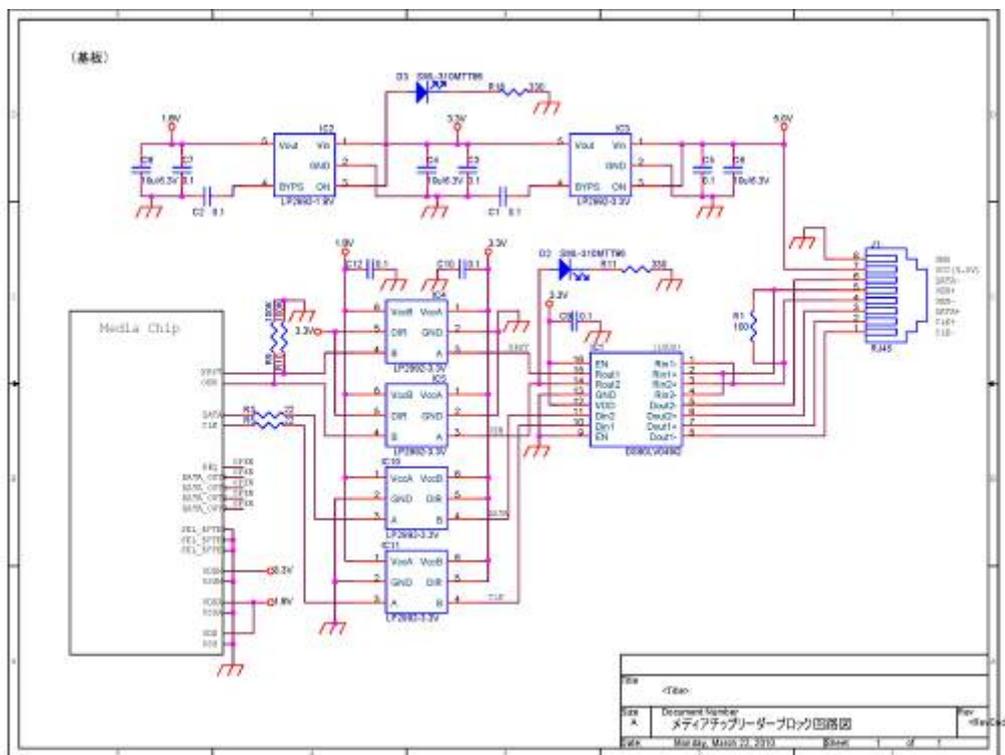


図 5.11 リードユニットのブロック図

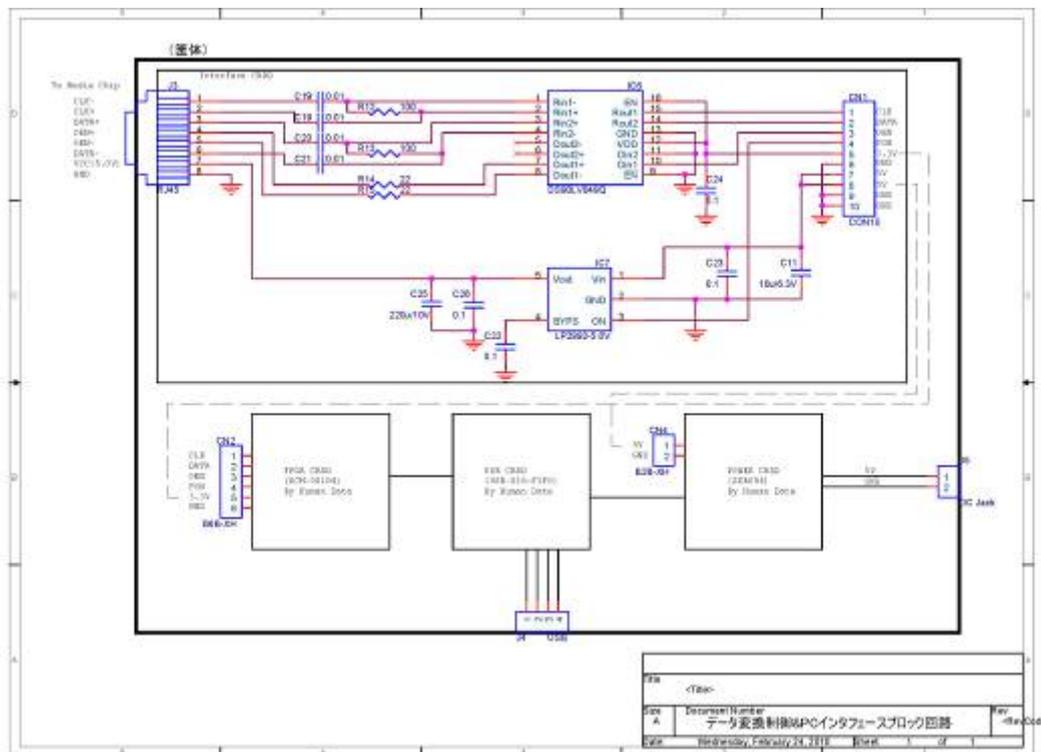


図 5.12 FPGA ボードユニットのブロック図

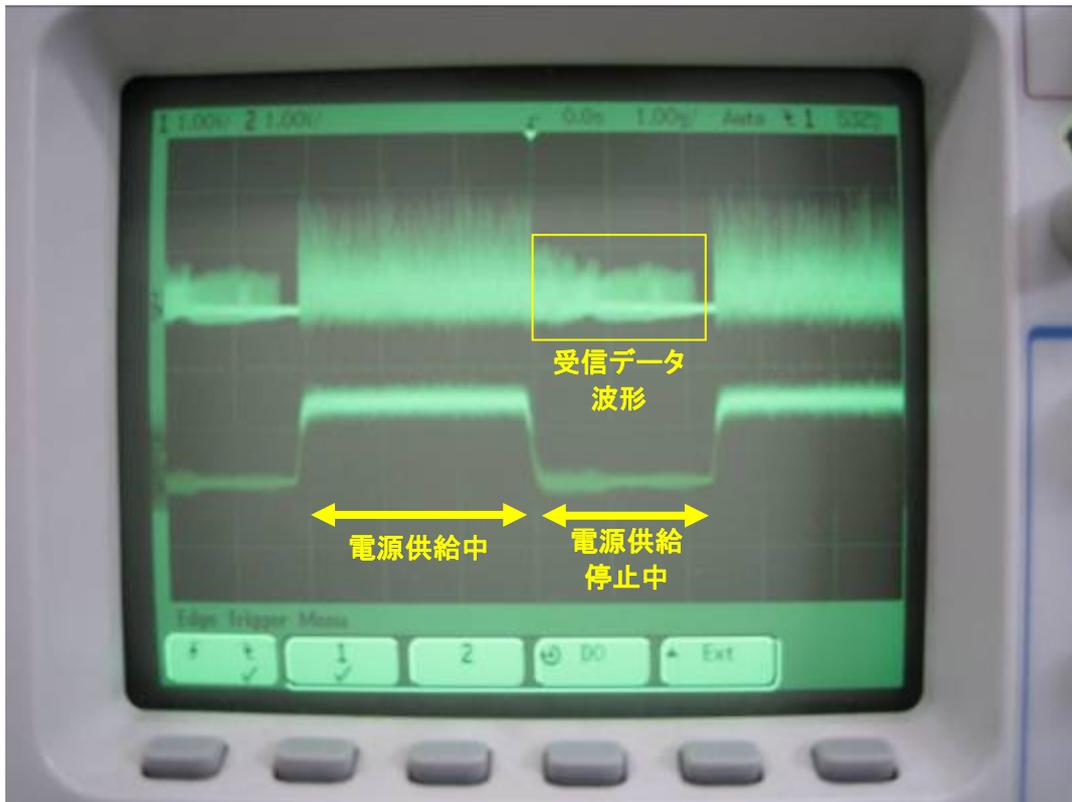


図 5.13. リーダチップの出力波形

リーダ部のチップを試作したシステムに接続した状態で、メディアチップを接近させたところ、動作が不安定でパケットを安定して受信できない（パケットヘッダを認識できない）状態であった。

## 6. プロトタイプシステムの評価及び検討

### 6.1. プロトタイプシステムの課題

今回試作したプロトタイプシステムは結果的に動作しなかったが、この原因は主としてリーダチップ上のデータ受信アンプ回路のノイズ耐性が低く、電源等を介してデジタル回路からのノイズの影響を受けたせいであると考えられる。これを回避するためには、トリプルウェル構造の採用やデカップリングキャパシタの追加等によりデジタル回路がアナログ回路に影響を及ぼすノイズを軽減したり、ボード上のデカップリングキャパシタとチップ上の電源ラインの間のインダクタンスを減らすようにボードやワイヤボンディングを最適化したりすることが考えられる。これらを改善すれば、非接触でのデータの読出しができるであろうことは実験結果が示唆している。

### 6.2. 密封型マスク ROM の課題

今回のプロトタイプシステムでは 0.18 $\mu\text{m}$  プロセスを用いて約 5mm 角のチップ上に 1M バイト分のマスク ROM を実装したが、目標は 65nm あるいは 45nm プロセスを用いて 8~12 インチのウエハのほぼ全体にマスク ROM を敷き詰め、1 枚で数 10G バイトの容量を持つメディアを実現することである。このようなメディアを実現するためには、(1)非接触電源供給方法の検討、(2)コスト削減の方策検討等が必要である。(1)は、4.2.1 節で議論した通り、電磁誘導方式と太陽電池方式の利害得失を再度検討することが必要である。(2)は、マスクコストの削減に向け、ROM のデータを与えるコンタクト層あるいはビア層以外のマスクを共通化することや、さらにその層を電子ビーム直描技術[67]を用いてマスクレスにすること等が考えられる。

十分な体制を組んで研究開発を進めれば、3 年程度で製品を開発することも可能と考えられる。その後運用ノウハウを蓄積しながら互換性を保ちつつ改良を重ね、数年かけてコストを低減するのが現実的なシナリオであろう。

### 6.3. 恒久保存メディア一般の課題

デジタルデータの恒久保存のためのメディアに関する課題は、3 章冒頭でも述べたように、メディア自体の寿命の他にも、互換性のある読み取り装置を将来に渡って維持・交換し続けなければならないことや、メディアに書かれたデータのフォーマットの陳腐化への対策などが考えられる。幸いにも今後暫くは半導体技術が持続的に成長すると期待されるので、読出し装置はむしろ高性能化や低コスト化が進むと考えられるが、千年後の技術や製品の動向までは予想できない。但し、光や電磁気は最も基本的な物理現象であり、これを用いた通信やエネルギー供給は、形を変えつつも遠い将来に渡って使われ続けると予想することもあながち不自然ではないであろう。

また、2 章で明らかにされた通り、膨大な量の新しいデータをメディアに記録し続けることが必要である。密封型マスク ROM でこれを可能にするためには、データが書かれたメディアを製造する装置や、製造されたメディアを移動して所定の保管場所に収納する装置な

どからなる統合的かつ自動化されたシステムを構築する必要がある。

#### 6.4. 大規模デジタルアーカイブシステムの構成例と性能見積もり

本件で試作したプロトタイプシステムでは、0.18 $\mu$ m プロセスを用いたこともあり、約 25mm<sup>2</sup> のチップ上に 1M バイトのマスク ROM を搭載するにとどまった。また、実験の容易性を重視してデータ通信用コイルを大きめにし、通信速度も約 100Mbps に抑えていた。

3.7 節で試算したように、現在実用化されている最先端の 45nm プロセスを利用して 12 インチウエハに密封型マスク ROM を実現すれば、1 枚当たりの容量は約 90G バイトとなる。通信速度もウエハ上に 1,000 個の通信コイルを搭載することは容易であり、その場合、100Gbps を達成できることになる。

90G バイトの密封型マスク ROM の容量の 20%が誤り訂正符号に使用され、更に 2.3.1 項の議論と同様に、平均 10%の空きが発生すると想定すると、密封型マスク ROM 1 枚につき  $90\text{G バイト} \div 1.2 \times 0.9 = 67.5\text{G バイト}$  のコンテンツが収録されることになる。国立国会図書館でデジタル化の対象となる資料のデータサイズは表 2.3 より 119P バイトであるから、 $119\text{P バイト} \div 67.5\text{G バイト} = \text{約 } 185 \text{ 万枚}$  の密封型マスク ROM で収録できる。1 枚あたりの占有体積が 30cm $\times$ 30cm $\times$  320 $\mu$ m であり、図 3.3 に示したように隙間を空けずに収納してもアクセスが可能であることを踏まえると、総体積は 53 立方メートルになる。仮に幅 913mm の書架一連に 8 段の棚を作り、密封型マスク ROM を並べた場合には、一連の書架に  $913\text{mm} \times 8 \text{ 段} \div 0.32\text{mm} = 22,825 \text{ 枚}$  を保存可能である。従って、185 万枚の密封型マスク ROM を収蔵するためには、81 連の書架があればよい。

また 2.5.3 項の議論より、一ヶ月にアクセスされる資料点数は約 200 万点である。実際はアクセスの集中する資料があるため、延べアクセス点数はこれより高くなるが、これは、最近一度アクセスされた資料をハードディスクや SSD にコピーして提供するシステム構成をとることで回避できるため、以下では密封型半導体メモリへの一カ月あたりのアクセスを 200 万点とする。表 2.3 より、資料 1 点当たりの平均データサイズは  $119\text{P バイト} \div 16,378,920 \text{ 点} = 7.6\text{G バイト}$  であるから、アクセスに伴って必要なスループットは  $200 \text{ 万点} \times 7.6\text{G バイト} \div 30 \text{ 日} \div 24 \text{ 時間} \div 60 \text{ 分} \div 60 \text{ 秒} = 5.9\text{Gbps}$  となり、これは 100Mbps のコイルが 59 個並列に動作すれば達成可能なスループットである。

新規データの書込み速度に関しては、表 2.4 より 1 年間に 4.9P バイトのデジタルデータを扱う必要がある。1 日当たりでは、約 14,000G バイトとなり、これを容量 90G バイトの密封型マスク ROM メディアに保存すると 1 日当たり 156 枚の書込みが必要である。電子ビーム (EB) 直描装置 1 台あたり 1 日に 2 枚のマスク ROM をプログラムできると仮定して製造ラインを組むと、EB 直描装置は 78 台あれば需要を満たすことができる。マスク ROM のプログラムに特化すれば、EB 直描装置の効率を改善することも可能であろう。

コストに関しては、容量 25G バイトの片面 1 層の BD メディアの実勢価格が 500 円程度であるから、1G バイト当たりの費用は 20 円となる。一方、通常のパルク CMOS プロセスを用いた場合、12 インチウエハの製造コストは 2006 年時点で \$5,500 程度とされており [66]、

\$1=100円で概算すると1枚550,000円となる。これに90Gバイトのコンテンツを記録すると、1Gバイトあたりのコストは約6千円となる。ここでバルクCMOSプロセスに代えて、液晶ディスプレイ等で実績のあるガラス基板を用いたプロセス[68]を採用すると、液晶ディスプレイの市場価格から考えて、12インチウエハ1枚、90GB相当の製造コストを5千円程度、1Gバイトあたりでは55.6円程度まで圧縮できると予想される。ガラス基板上に45nm級の微細加工を行う技術を確立するには時間が必要であるが、JIS Z 6017が推奨する光ディスクの書き換えタイミングが10～30年ごとであるのに対し、密封型マスクROMは100年以上の寿命が期待できることから、BDメディアのコストを凌駕することは原理的には可能である。

## 7. おわりに

### 7.1. 総括

本調査で得られた成果は以下の通りである。

- 国立国会図書館の統計データに基づき、大規模デジタルアーカイブシステムの要件を明らかにした。
- 磁気ディスク、光学ディスク、フラッシュメモリといった既存のデジタル記憶メディアの限界を明らかにした。
- マスク ROM を密封した新しい恒久保存メディアについて、プロトタイプを試作を通じて実現に必要な要素技術を明らかにし、また、実現に向けた有用な知見を得た。

### 7.2. 今後の展望と課題

今後の展望と課題は以下のとおりである。

- 既存のデジタル記憶メディアでは国立国会図書館を含む大規模デジタルアーカイブシステムの持続的発展を支えることは困難であり、寿命、体積密度、アクセス速度、コスト等の面で飛躍的に優れたデジタル記憶媒体が不可欠である。
- 今回の調査で用いた密封型マスク ROM は、上記の問題の中で、少なくとも寿命と体積密度を改善できると考えられる。コストも、改善の余地はある。アクセス速度、特に書込み速度に関しても、並列化により理論上は必要な性能を確保できると考えられる。
- 試作したプロトタイプシステムは、安定的には動作しなかったが、これはノイズの影響によるものである。ノイズの影響を排除するよう、メディアチップ、リーダ部のチップ、並びにリーダ部のチップを実装する基板を改良することでこの問題は解決できると考えられる。
- 通常のマスク ROM で寿命 146 年以上とする報告[51]もあり、密封型マスク ROM の寿命はこれを十分上回ると期待されるが、今後の課題として、密封型マスク ROM の寿命を加速試験等で実際に評価することは必要である。

## 参考文献

- [1] Alan Calmes: "Relative longevity of archival information on paper, film, magnetic and optical recording media," Proceedings of the International Symposium: The Stability and Conservation of Photographic Images: Chemical, Electronic and Mechanical, pp.50-65, (1986.)
- [2] Alan Calmes: "New confidence in microfilm," Library Journal, Vol.11, No.15, pp.38-42, (1986.)
- [3] Jeff Rothenberg: "Ensuring the longevity of digital documents," Scientific American, Vol. 272, Number 1, pp. 42-47 (1995)
- [4] Jeff Rothenberg: "Ensuring the longevity of digital information," Council on Library and Information Resources, <http://www.clir.org/pubs/archives/ensuring.pdf>, (1999.) (参照 2010-3-13)
- [5] Margaret Hedstrom: "Digital preservation: A time bomb for digital libraries," Computers and the Humanities, vol.31, pp.189-202 (1998)
- [6] H Besser: "Digital preservation of moving image material," <http://www.sims.berkeley.edu/~howard/Papers/amia-longevity.doc> (2001)
- [7] Kurt D. Bollacker: "Avoiding a Digital Dark Age —Data longevity depends on both the storage medium and the ability to decipher the information," American Scientist, vol.98, no.2, pp.106-110 (Feb. 2010).
- [8] The Rosetta Project, <http://rosettaproject.org/>, (参照 2010-03-18) .
- [9] Siegfried Weinmann: "Digital Documents —Does our saved knowledge have a safe future?" [http://www.londonmet.ac.uk/library/f43475\\_3.pdf](http://www.londonmet.ac.uk/library/f43475_3.pdf) (2006)
- [10] John Van Bogart: "Storage Media Life Expectancies," Digital Archive Directions Workshop, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nost/isoas/dads/presentations/VanBogart/>, (1998) (参照 2010-03-18)
- [11] Jonas Palm: "The Digital Black Hole," Riksarkivet/National Archives, Sweden, [http://www.tape-online.net/docs/Palm\\_Black\\_Hole.pdf](http://www.tape-online.net/docs/Palm_Black_Hole.pdf), (参照 2010-03-18) .
- [12] The Science and Technology Council of the Academy of Motion Picture Arts and Sciences, "Digital Storage Technology," The Digital Dilemma, Section 5.1, [http://www.oscars.org/council/digital\\_dilemma/](http://www.oscars.org/council/digital_dilemma/), (2007)
- [13] 植林幸一: "デジタル文書の保存戦略 —電子文書保存のベストプラクティスは何かを考える," JIIMA2008 文書情報マネジメントセミナー 文書情報マネジメントの最新ナレッジ, [http://www.jiima.or.jp/micro/pdf/Best\\_practice.pdf](http://www.jiima.or.jp/micro/pdf/Best_practice.pdf) (2008) (参照 2010-3-18) .
- [14] Fred R. Byers: "Care and handling of CDs and DVDs: A guide for librarians and archivists," Council on Library and Information Resources and National Institute of Standards and Technology,

- <http://www.clir.org/pubs/reports/pub121/contents.html>, (2003) (参照 2010-3-19) .
- [15] William P. Murray: “Accelerated service life predictions of compact disks,” Accelerated and outdoor durability testing of organic materials, ASTM STP 1202, pp.263-271, American Society for Testing and Materials (1994)
- [16] Chandru J. Shahani, Basil Manns, and Michele Youket: “Longevity of CD Media: Research at the Library of Congress,” <http://www.loc.gov/preserv/studyofCDlongevity.pdf>, (参照 2010-3-10) .
- [17] Joe IRACI: “The Relative Stabilities of Optical Disc Formats,” Restaurator, vol.26, no.2, pp.134-150 (2005)
- [18] Oliver Slattery, Richang Lu, Jian Zheng, Fred Byers, and Xiao Tang: “Stability Comparison of Recordable Optical Discs—A Study of Error Rates in Harsh Conditions,” J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol., vol. 109, pp. 517-524 (2004)
- [19] Jian Zheng, Oliver Slattery, Fred Byers, Arthur Klepchukov, Anna Nhan, Chandru Shahani, Michele Youket, Elmer Eusman: “NIST/Library of Congress (LoC) Optical Media Longevity Study”, National Institute of Standards and Technology, <http://www.itl.nist.gov/iad/894.05/loc/Public%20SP%20500-263%20November%20005.pdf>, (2005), (参照 2010-3-18)
- [20] S. A. Dobrusina, S. I. Ganicheva, I. G. Tikhonova, T. D. Velikova, and P. E. Zavalishin: “Influence of External Factors on the Longevity of Information Recorded on DVD±R Discs,” Scientific and Technical Information Processing, vol. 34, no. 5, pp.258-263, 2007 年.
- [21] M. Irie and Y. Okino: “Standardized Life Expectancy of High-Speed Recordable Optical Discs,” IEEE Trans. Magnetics, vol. 43, no.2, pp.864-866 (2007)
- [22] Daniel P. Wells: “Predicting the Longevity of DVD-R Media, by Periodic Analysis of Parity, Jitter, and ECC Performance Parameters,” Master Thesis, Brigham Young University (2008)
- [23] “光ディスクは長寿命メディアたりうるか!?DVD 寿命試験法が ISO を取得”, オプトロニクス, vol.28, No.334, pp.69-71, 2009 年 10 月.
- [24] 渡部 篤美: “長期保存用 DVD ディスクの寿命評価法”, 日本信頼性学会誌, vol.27, no.6, pp.400-410, 2005 年 9 月.
- [25] 機械システム振興協会 “平成 18 年度システム開発: 高信頼 (長寿命・高セキュリティ) 光ディスク媒体の活用システムの開発に関するフェージビリティスタディ 第 4 章 光ディスク媒体の保存寿命の評価”, デジタルコンテンツ協会, 2007 年 3 月. <http://www.dcaj.org/h18opt/choki.html>, (参照 2009-12-20) .
- [26] Arthur G. Blanck: “Archival media for the masses,” White Paper, Delkin Devices, [http://www.delkin.com/pdf/user\\_guides/archivalgold\\_whitepaper.pdf](http://www.delkin.com/pdf/user_guides/archivalgold_whitepaper.pdf), (2005,) (参照

2010-3-18)

- [27] Conrad Quilty-Harper: “Blu-ray disc coating starting to rot?”  
<http://www.engadget.com/2007/06/16/blu-ray-disc-coatings-starting-to-rot/>, (2007)  
(参照 2010-3-18)
- [28] 古宮成, 土生田晴比古, 北浦英樹, 土居由佳子, 高橋克幸, 中村敦史, 宮川直康, 西内健一, 山田昇: “Te-O-Pd 記録材料を用いた高速・多層・高信頼性の BD-R メディア,” 信学技報, vol.106, no.466, pp.11-16, (2008.)
- [29] 三浦義正: “大容量ストレージを支える HDD 技術,” 電子情報通信学会誌, vol.83, no.3, pp.204-212. 2000 年 3 月
- [30] 高野公史: “進化するハードディスク,” 電子情報通信学会誌, vol.89, no.11, pp.988-993. 2006 年 11 月
- [31] Jimmy Yang, Feng-Bin Sun: “A comprehensive review of hard-disk drive reliability,” Annual Reliability and Maintainability Symposium, (1999.)
- [32] 押木満雅: “磁気ディスク装置による情報ストレージ,” 国際シンポジウム「デジタル知の恒久的な保存と活用に向けてーデジタルジレンマへの挑戦」,  
<http://note.dmc.keio.ac.jp/topics/files/2008/10/oshiki-20081024.pdf>, (2008) (参照 2010-3-18)
- [33] 多川他: “披露寿命を考慮した磁気ディスク装置の FPC フォーミング設計法,” 1994 年電子情報通信学会秋季大会, C-374, p.52, 1994
- [34] 青野暁史, 中野太郎, 溝尾嘉章: “HDD 用ヘッド/メディアの熱安定性,” 信学技報, MR2004-51, (2005)
- [35] 川久保他: “塗布型磁気ディスクのコンタクト・スタート/ストップ寿命の一加速評価法,” 精密工学会誌, vo.54, no.9, pp.154-159, 1988
- [36] 平越裕之, 三道弘明: “ハードディスクにおける予備セクタ数の設計に関する一考察,” 電子情報通信学会論文誌, vol.J79-A, no.6, pp.1204-1211, (1996)
- [37] Bianca Schroeder, Garth A. Gibson: “Disk failures in the real world: What does an MTTF of 1,000,000 hours mean to you?” 5th USENIX Conference on File and Storage Technologies (FAST 2007), pp.1-16,  
<http://www.usenix.org/event/fast07/tech/schroeder/schroeder.pdf>, (2007) (参照 2010-3-18) .
- [38] E Pinheiro, WD Weber, LA Barroso: “Failure trends in a large disk drive population,” 5th USENIX Conference on File and Storage Technologies (FAST 2007), pp.17-28,  
[https://www.usenix.org/events/fast07/tech/full\\_papers/pinheiro/pinheiro\\_old.pdf](https://www.usenix.org/events/fast07/tech/full_papers/pinheiro/pinheiro_old.pdf), (2007) (参照 2010-3-18) .
- [39] Richard H. Dee: “Magnetic Tape for Data Storage: An Enduring Technology,”

- Proceedings of the IEEE, Vol. 96, No. 11, (November 2008)
- [40] JWC Van Bogart: “Magnetic Tape Storage and Handling —A Guide for Libraries and Archives,”  
<http://www.imaginar.org/dppd/DPPD/126%20pp%20Magnetic%20Tape%20Storage.pdf>
- [41] Kevin Morse: “DDS specs drive DAT reliability,” Computer Technology Review, vol.13, iss. 5, p.30, (1993)
- [42] 磁気記録媒体標準化専門委員会: “テープストレージの製品動向—2008年版—,” (社)電子情報技術産業協会,  
[http://home.jeita.or.jp/is/committee/tech-std/std/tapestorage\\_200807.pdf](http://home.jeita.or.jp/is/committee/tech-std/std/tapestorage_200807.pdf), (2008) (参照 2010-3-18) .
- [43] S. Aritome, R. Shirota, G. Hemink, T. Endoh, and F. Masuoka: “Reliability issues of flash memory cells,” Proceedings of the IEEE, vol. 81, no. 5, (1993)
- [44] 有留誠一 , 白田理一郎 , 遠藤哲郎 , 舛岡富士雄: “フラッシュメモリの信頼性,” 信学技報, SDM93-77, (1993)
- [45] D. Ielmini, A.S. Spinelli and A.L. Lacaita: “Recent developments on Flash memory reliability,” Microelectronic Engineering, Vol. 80, pp. 321-328, (June 2005)
- [46] Alan R. Olson, Denis J. Langlois: “Solid State Drives (SSD) Data Reliability and Lifetime,” The National Media Laboratory,  
[http://www.imation.com/PageFiles/1189/SSD\\_Gov\\_DataReliability\\_WP.pdf](http://www.imation.com/PageFiles/1189/SSD_Gov_DataReliability_WP.pdf), (2008) (参照 2010-3-18)
- [47] 日本電子部品信頼性センター: “平成 6 年度 VLSI 1M ビットフラッシュメモリの信頼性試験に関する調査研究成果報告書(II),” 日本電子部品信頼性センター (平成 7 年)
- [48] N. Mielke, T. Marquart, N. Wu, J. Kessenich, H. Belgal, E. Schares, F. Trivedi, E. Goodness, and L.R. Nevill: “Bit Error Rate in NAND Flash Memories,” 2008 IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS), pp.9-19, 2008 年 4 月.
- [49] Jan M. Rabaey, Anantha Chandrakasan, Borivoje Nikolic: “Digital Integrated Circuits — A Design Perspective, second edition,” Prentice Hall, (2003)
- [50] 一山靖友, “ワイヤボンディングの微細化における信頼性,” 溶接学会誌, vol.63, no.3, pp.202-206, (1994)
- [51] 日本電子部品信頼性センター: “平成 3 年度 VLSI 4M ビットマスク ROM の信頼性試験に関する調査研究成果報告書,” 日本電子部品信頼性センター (平成 4 年)
- [52] 日本電子部品信頼性センター: “平成 4 年度 VLSI 4M ビットマスク ROM の信頼性試験に関する調査研究成果報告書 (その 2) ,” 日本電子部品信頼性センター (平成 5 年)
- [53] 越智裕之: “密封半導体メモリの可能性,” デジタル知の恒久的な保存と活用に向けて: デジタルジレンマへの挑戦, 慶應義塾大学デジタルメディア・コンテンツ研究機構,

- (2008) <http://note.dmc.keio.ac.jp/topics/files/2008/10/ochi-20081024.pdf>, (参照 2009-02-20)
- [54] Yuan Yuxiang, Noriyuki Miura, Shigeki Imai, Hiroyuki Ochi, and Tadahiro Kuroda: "Digital Rosetta Stone: a Sealed Permanent Memory with Inductive-Coupling Power and Data Link," Proc. Symposium on VLSI Circuits, pp.26-27, (2009.)
- [55] D. S. Peck: "Comprehensive Model for Humidity Testing Correlation," International Reliability Physics Symposium, pp.44-49 (1986.)
- [56] A. Iwata, et al.: "A 3D integration scheme utilizing wireless interconnections for implementing hyper brains," ISSCC 2005, pp.262-263, Feb. 2005.
- [57] 宇佐美光雄, 山田純編: "ユビキタス技術 IC タグ," オーム社, 2005年3月.
- [58] Y. Yuxiang, Y. Yoshida, N. Yamagishi, and T. Kuroda: "Chip-to-Chip Power Delivery by Inductive Coupling with Ripple Canceling Scheme," SSDM 2007, pp.502-503, Sept. 2007.
- [59] N. Guilar, A. Chen, T. Kleeburg, and R. Amirtharajah: "Integrated Solar Energy Harvesting and Storage," ISLPED 2006, pp.20-24, Oct. 2006.
- [60] 新山太郎, 朴哲, 高宮真, 桜井貴康: "オンチップ太陽電池駆動 287mV, 13.3MHz リングオシレータ," 2007年電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会講演論文集 2, p.91, 2007年9月.
- [61] Maysam Ghovanloo, Khalil Najafi: "Fully Integrated Wideband High-Current Rectifiers for Inductively Powered Devices," IEEE J. Solid-State Circuits, vol.39, no.11, pp.1976-1984, (2004)
- [62] 植田昇広, 内田英明: "半導体集積回路装置のリセット回路," 特開 2006-74210, (2004)
- [63] Noriyuki Miura, Daisuke Mizoguchi, Yusmeeraz Binti Yusof, Takayasu Sakurai, and Tadahiro Kuroda: "Analysis and Design of Transceiver Circuit and Inductor Layout for Inductive Inter-chip Wireless Superconnect," IEEE 2004 Symposium on VLSI Circuits Digest of Technical Papers, pp.246-249, (2004)
- [64] ISO 11506:2009: "Document management applications -- Archiving of electronic data -- Computer output microform (COM) / Computer output laser disc (COLD)," [http://www.iso.org/iso/catalogue\\_detail.htm?csnumber=50565#](http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=50565#) (参照 2010-3-18) .
- [65] Takao Watanabe, Toshimichi Shintani, Kazuo Ono and Toshiyuki Mine, "A digital-data-preservation system featuring LED-light computer tomography", IEICE Electron. Express, Vol. 6, No. 22, pp.1569-1575, (2009)
- [66] John L. Hennessy and David A. Patterson: "Computer Architecture A Quantitative Approach, Fourth Ed.," Morgan Kaufmann Pub., (2007)
- [67] 早田康成, 小島義克, "電子ビーム直接描画技術の現状と課題," 信学論, vol.J84-C, no.12, pp.1192-1199, 2001年12月.

[68] B. Lee, et al., "A CPU on a glass substrate using CG-silicon TFTs," ISSCC 2003 Dig. Tech. Papers, pp.164-165, Feb. 2003.