

[第4章の参考文献]

- (1) 齊藤 実, “信号処理技術”, 精密工学会誌, 54, 12, 2233 (1988).
- (2) 尾崎 稔, 古川輝雄, 田中邦麿, 久保高啓, “光ディスクにおける再生データ処理方式”, 光メモリシンポジウム'85 論文集, 221 (1985).
- (3) T.Furukawa, K.Nakane, K.Tanaka and M.Nakada, “An evaluation of the reproducing methods on optical digital disk”, Proc. Int. Symp. on Optical Memory 199 (1987).
- (4) W.Spengler, N.Gottfried, M.Wingert, “Comparison of modulation codes for a magneto-optic disk drive”, Proc. SPIE, 889, 104 (1988).
- (5) 齊藤 実, 武田 立, “光磁気ディスク信号検出法の検討”, 信学技報, MR86-62, 25 (1986).
- (6) 光産業技術振興協会, “光ディスク技術動向調査”, 52 (1985).
- (7) O.Ito, K.Yoshimoto, I.Watanabe and T.Kubo, “Improvement of focusing and tracking servos in optical disk memory”, Proc. SPIE, 529, 145 (1985).
- (8) K.Katoh, A.Watabe, M.Yamamoto, H.Nakanishi and I.Yamada, “High-speed servo technology for optical disk drive”, Proc. SPIE, 889, 24 (1988).
- (9) 浮田宏生, 岩崎俊一, “磁気光学メモリの信号検出に及ぼす媒体雑音の影響”, 信学技報, MR72-17, 1 (1972).
- (10) D.Treves, “Magneto-optic detection of high density recording”, J.Appl.Phys., 38, 3, 1192 (1967).
- (11) R.P.Hunt, “Magneto-optics, lasers, and memory systems”, IEEE Trans. Magn., MAG-5, 4, 700 (1969).

第5章 光ディスク記憶の誤り特性

5.1 緒言

フォールトトレラント技術を議論する上で、まず第一に誤り特性の把握が基本となる。誤り特性には、誤り率、バースト誤り長分布、振幅マージン、位相マージン等がある。光ディスク媒体は記憶容量が膨大なので、これらの詳細な特性を知るためには、効率のよい測定技術を用いることが必須である。特に、媒体の長期的な信頼性を短時間で推定するために用いる加速劣化特性実験では、再現性の高い測定技術が要求される。

本章では、各種光ディスク媒体のうちから現在最も性能が高い光磁気ディスク媒体を代表として採り挙げ、誤り特性の初期及び加速劣化特性について測定方法及び測定結果を述べる。なお、再生専用型光ディスク媒体、追記型光ディスク媒体についても、同様の測定結果を得ている。したがって、次章以降のモデル化等の議論は各種光ディスク媒体にも適用可能である。

5.2 測定方法

光ディスクの誤り特性の測定には、ビット単位の分解能や高速性などを具備する必要がある⁽¹⁾⁻⁽²⁾。ここで用いた測定システムの基本構成は、第4章において示したものと同様である。

従来、誤り特性の測定において、信号再生系は実用装置と同様、PLL(Phase Locked Loop)回路から出力されるストロブ信号でデータを検出していた。しかし、長大欠陥に起因するPLLの誤動作により、ストロブ信号列でデータ信号列との同期ずれが発生し、これによる見掛け上の誤りが観測されるという欠点を有する。

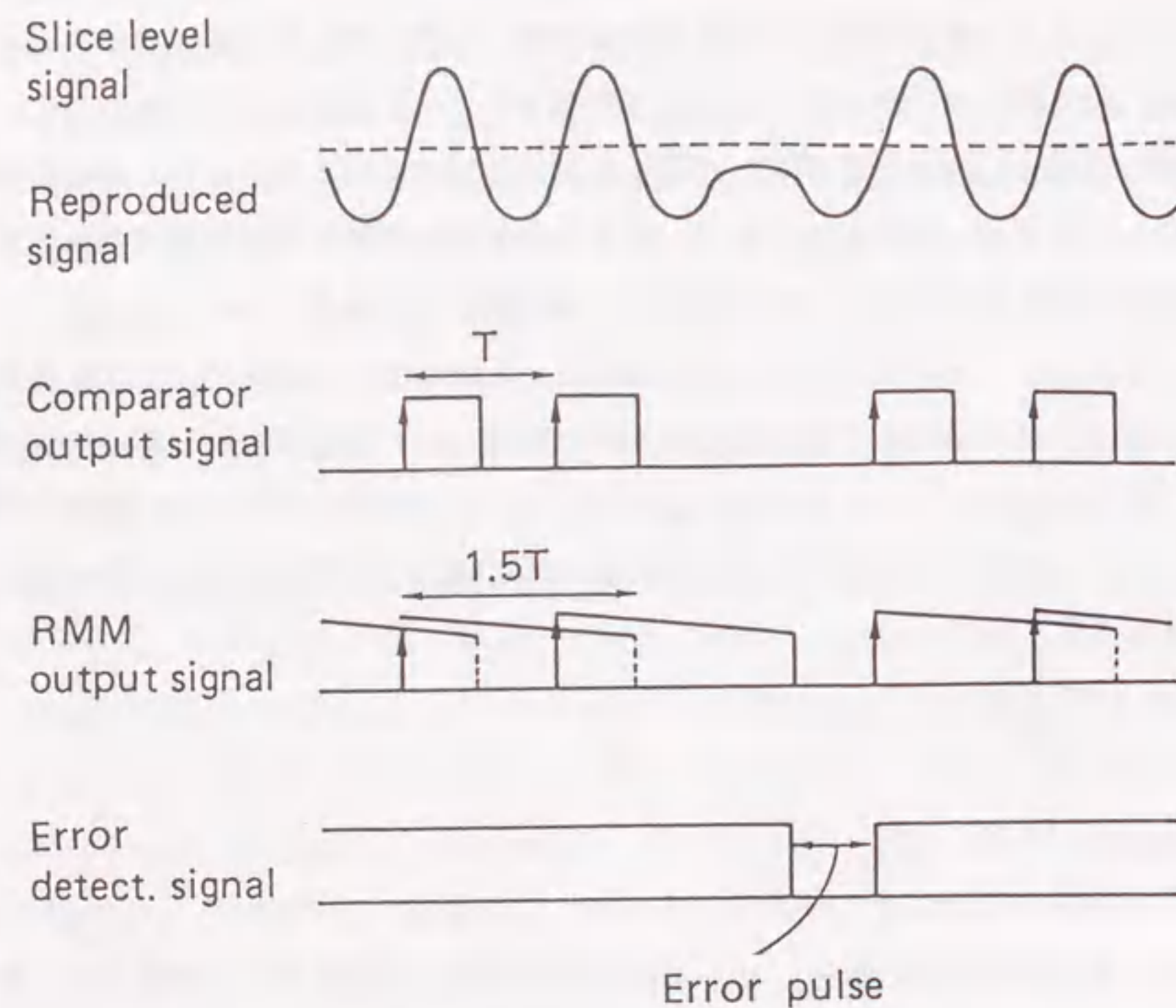


図5.1 誤りの測定原理

そこで、PLLを使用することなく誤りを検出する方法として、図5.1に示すような Retriggerable Monostable Multivibrator (RMM) を用いる簡便な測定方法を提案する。まず、記録信号として単一周期 (T) の信号を記録しておく。RMMの出力パルス幅 τ を、 $T < \tau < 2T$ の範囲内に設定しておく。通常は記録周期の1.5倍程度とする。2値化した再生信号をRMMに入力する結果、図5.1に示すように信号波形の異常に対応した誤り検出信号が出力される。この誤りパルスの個数、長さから、誤り率、バースト誤り長分布等が得られる。この方法を用いることにより、媒体劣化後も極めて安定に欠陥に起因する誤りの測定が可能になる。

また、従来は誤りの検出をソフト処理によるデータの比較検査によっていたため、誤り個数の増加に伴い多大な時間を要していた。これに比べて、上記方法によれば誤りが即時に検知できるので、短時間で効率よく測定できるという利点もある。

光ディスク装置の総合性能として重要な振幅マージン特性、位相マージン特性の測定は、以下のようにして行った。まず、振幅マージン特性については、ストロブタイミングを固定したのち、スライスレベルを上下させて誤り率を計測する。ここで注意すべき点は、スライスレベルの表現である。光記録の場合、磁気記録と異なり再生アナログ信号はユニポーラ信号であるので、交流結合後の再生信号の正側の波形と負側の波形は対称ではない。したがって、スライスレベルを百分率で表わす場合、交流中心を0%、上限値を+100%、下限値を-100%とすべきである。振幅マージン特性の測定フローチャートを図5.2に示す。

次に、位相マージン特性は、上記スライスレベルを固定して、時間軸上での2値化タイミングであるストロブ位置を変化させて誤り率を計測する。振幅マージン特性の測定フローチャートを図5.3に示す。

なお、正しいマージン測定のためには、再生アナログ回路系の周波数特性には十分留意することが重要である。すなわち、光検出器、プリアンプ、イコライザ等の回路の利得及び位相の周波数特性をネットワークアナライザ等で事前に測定しておくべきである。このとき必要帯域は、通常は記録信号の基本周波数の3倍程度とされる。

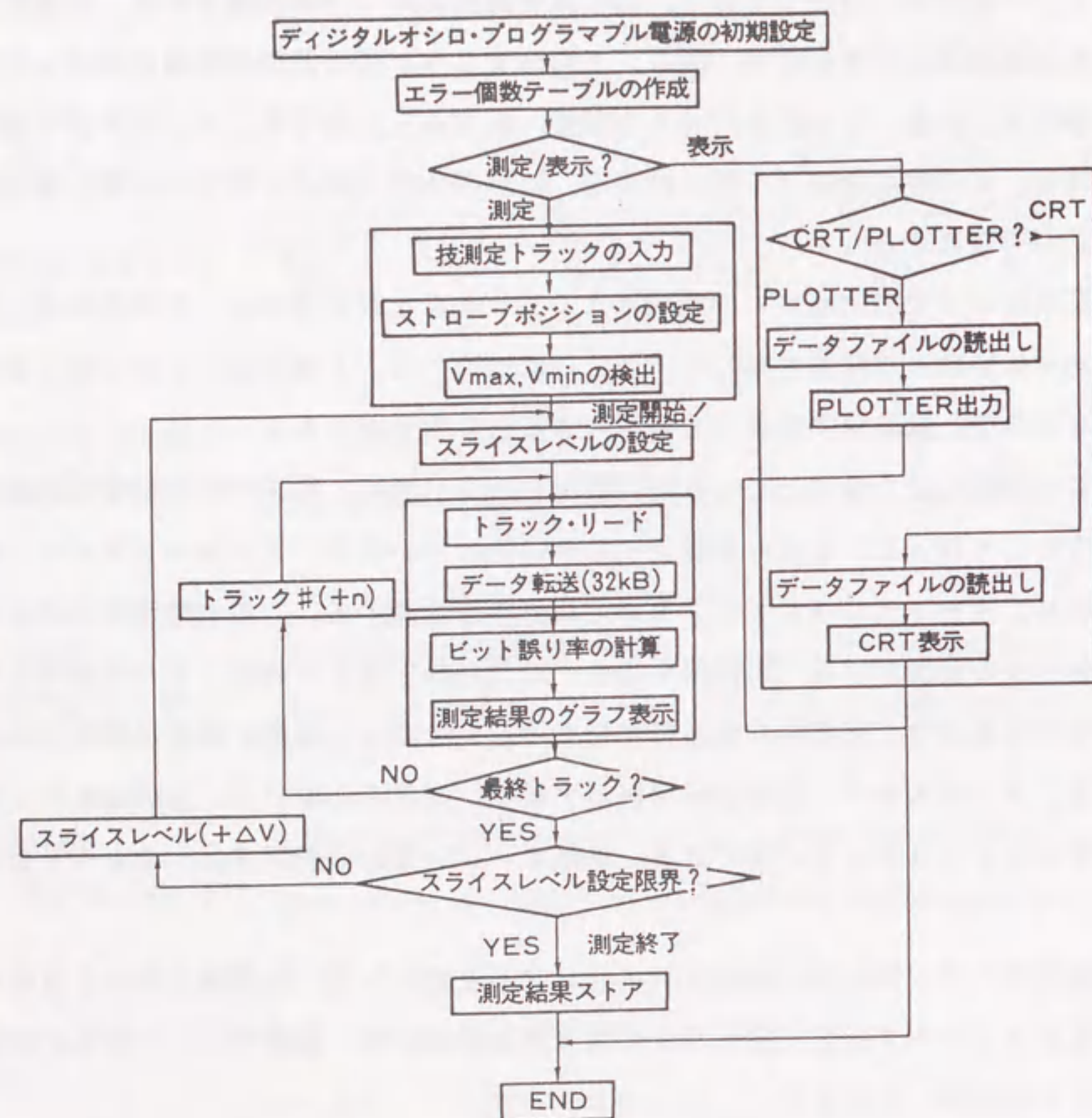


図 5. 2 振幅マージン特性の測定フローチャート

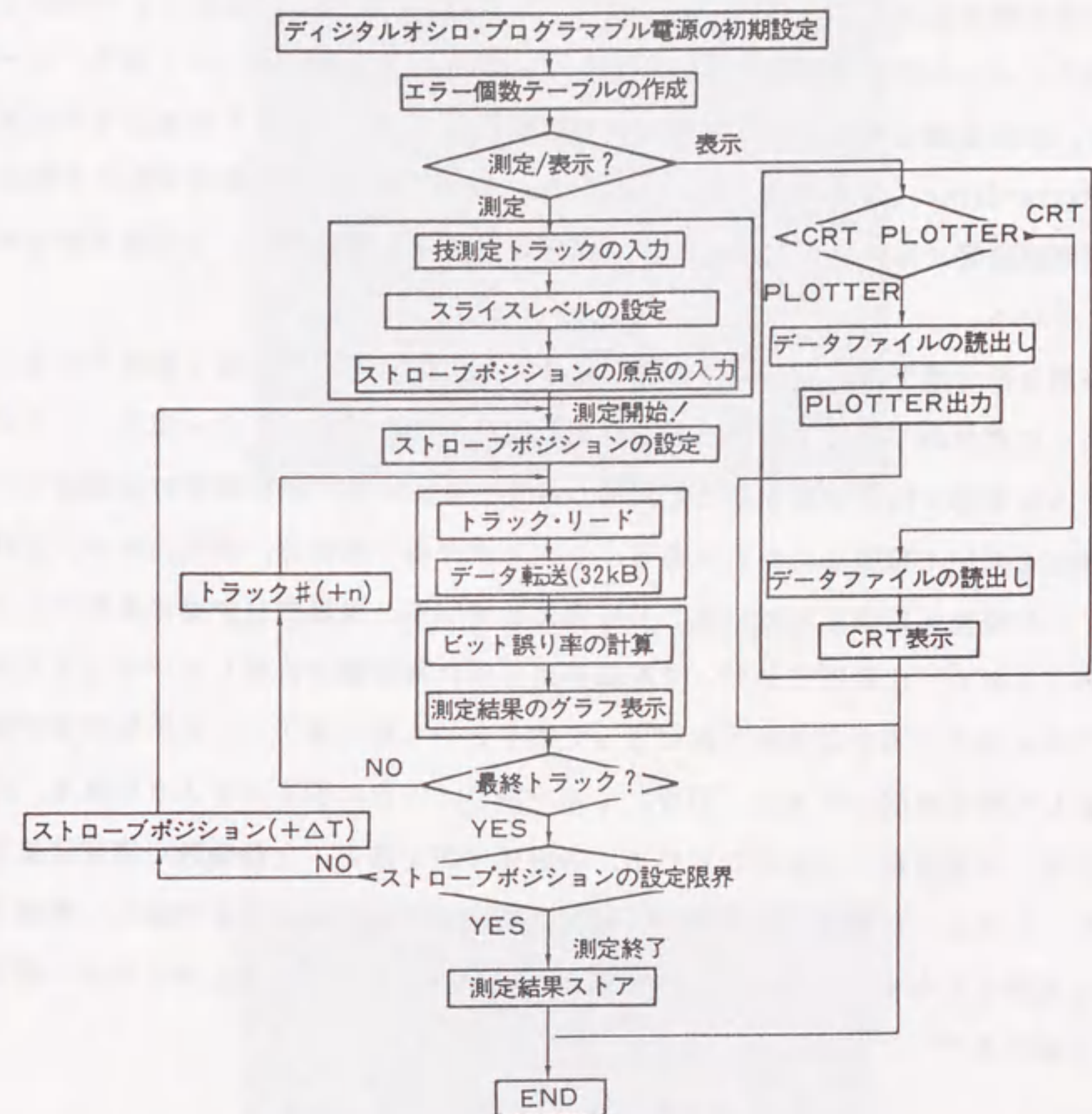


図 5. 3 位相マージン特性の測定フローチャート

5.3 初期特性の測定結果

ディジタル化オシロスコープの外部トリガとして、誤り検出信号を用いて観測した誤り信号波形の例を図5.4～図5.9に示す。誤りには、レーザー照射により形成したはずの記録ドメインが再生できないという誤り、いわゆる Missing-Error (図5.4～図5.7)と、未記録部分があたかもドメインが形成されているかのように検出される誤り、いわゆる Extra-Error (図5.8, 図5.9)とがある。誤り箇所の異常波形は非線形性が強く、磁気記録等で用いられているアナログ処理(波形等化技術等)で回復不能であることが良く分かる。

これらの誤り信号波形は、同一位置に同一波形として極めて再現性高く観測できる。また、このように電気的手段により検出された誤り箇所には、図5.10～図5.13に写真で示すような媒体欠陥が存在することが分かった。これらは、高解像度の走査型レーザー偏光顕微鏡を用いて観測したものである。トラックに沿う濃淡は、磁化方向が正反対の記録ドメインが交互に形成されていることを表わしている。大規模な欠陥は多数のトラックにまたがっており、広範囲にわたって記録再生品質に悪影響を及ぼしていると言える。

このような欠陥の分布を電気的手段によって誤りという形で測定し、その形状及び発生位置を表わした結果を図示すると、図5.14～図5.16に例を示すようになる。これらの図面では、欠陥は拡大表示されている。各媒体の誤り数と、欠陥個数の測定結果を示すと、表5.1のようになる。ここで、トラック方向または半径方向に連続して観測された誤り群を欠陥と見なすことにする。言い換えれば、媒体上2次元に広がりを持つ誤りの塊を欠陥と称する^{(3),(4)}。

表5.1 誤り数と欠陥個数の測定例

図番	図5.14	図5.15	図5.16
測定トラック数	4179	4131	4205
誤り数(bit)	1198	1200	1192
欠陥個数	318	444	391

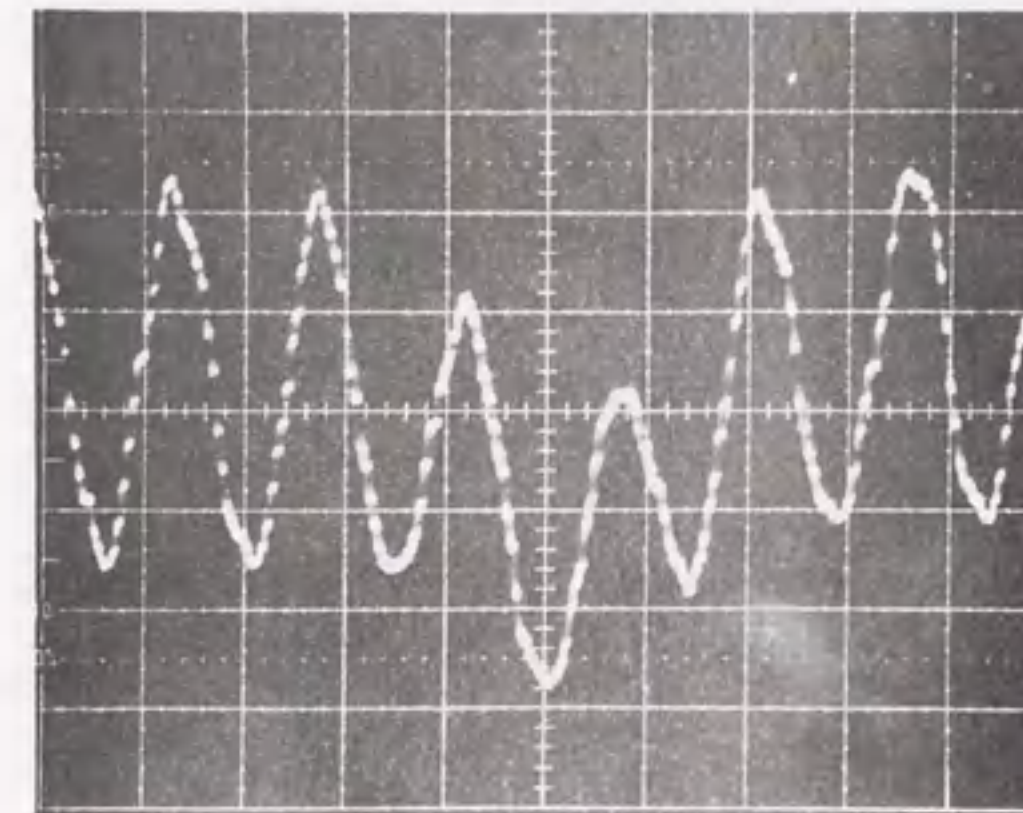


図5.4 誤り信号波形 (Missing-error)

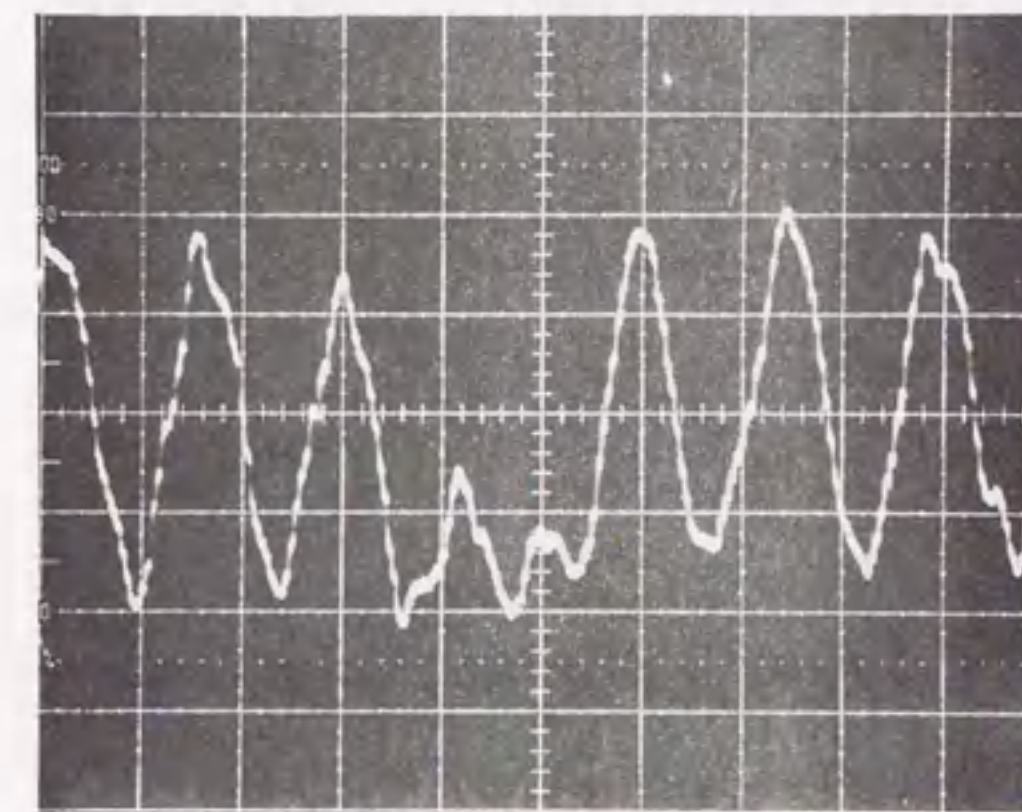


図5.5 誤り信号波形 (Missing-error)

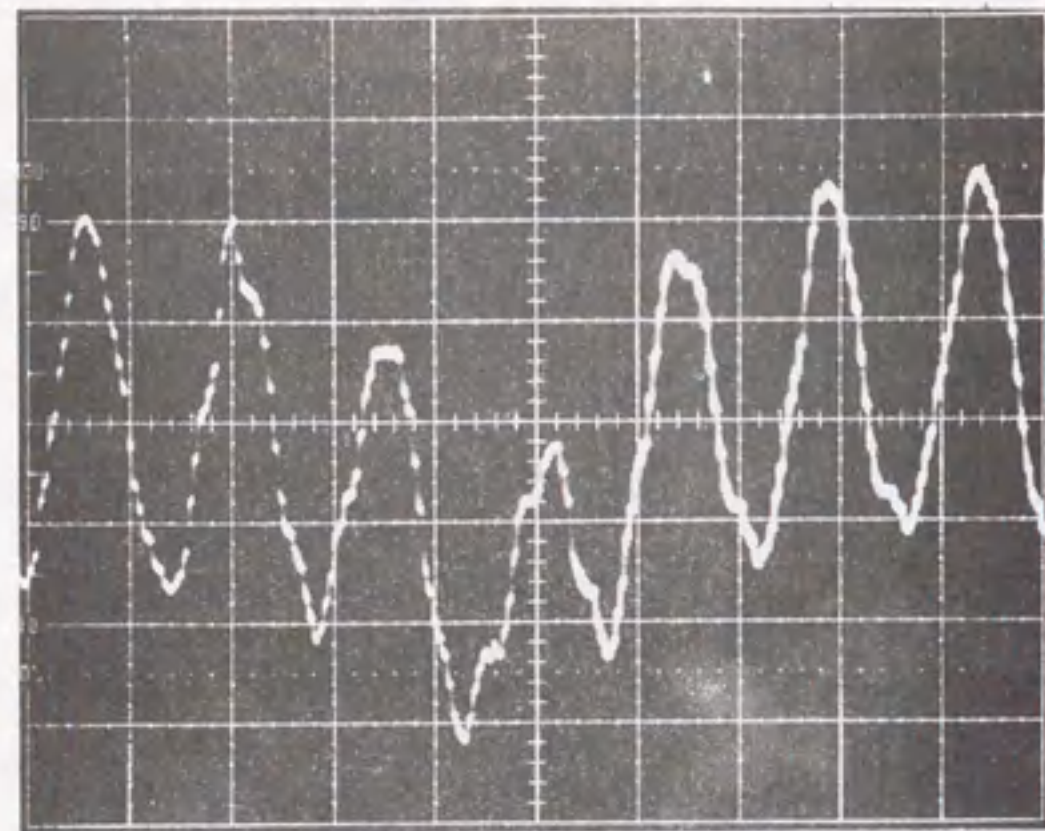


図 5. 6 誤り信号波形 (Missing-error)

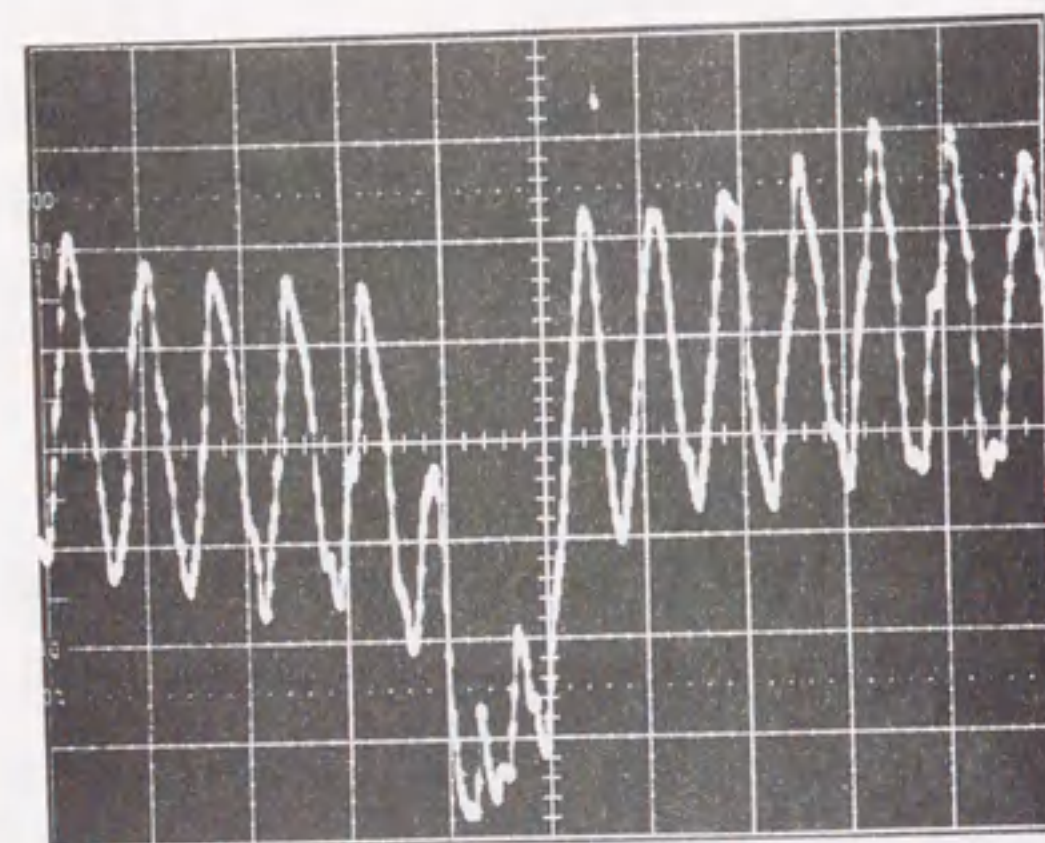


図 5. 7 誤り信号波形 (Missing-error)

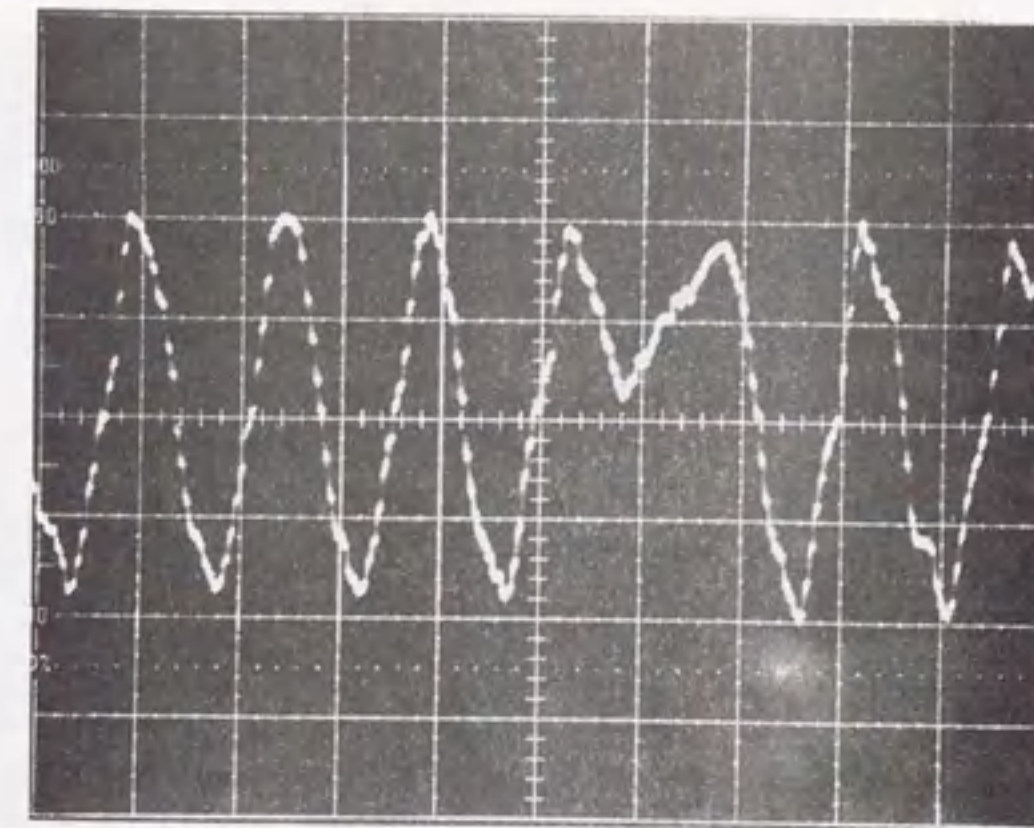


図 5. 8 誤り信号波形 (Extra-error)

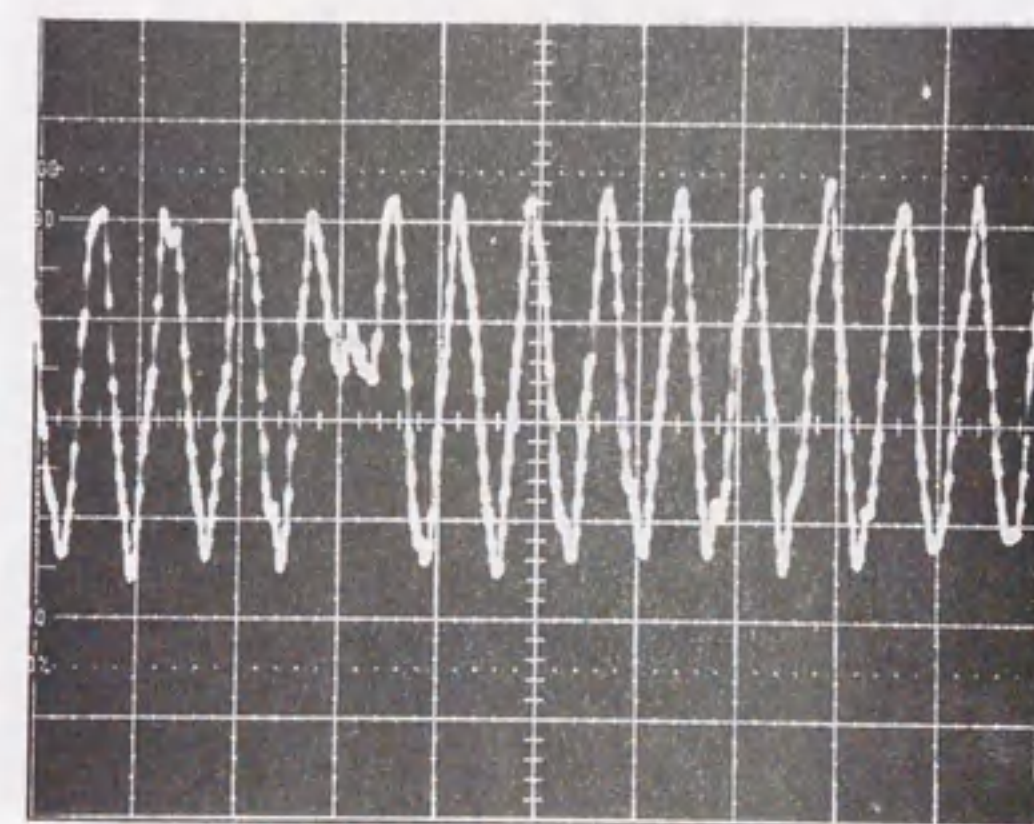


図 5. 9 誤り信号波形 (Extra-error)

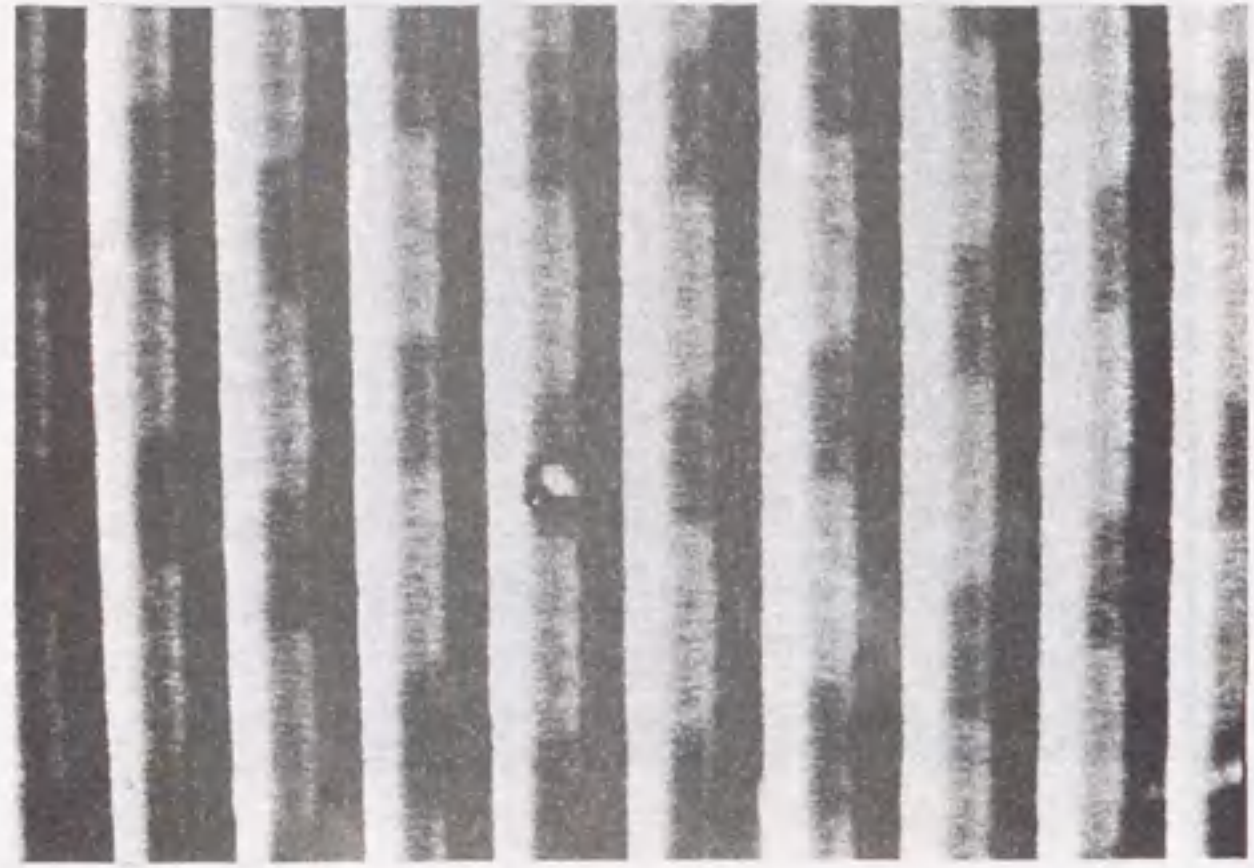


图 5. 1 0 媒体欠陷

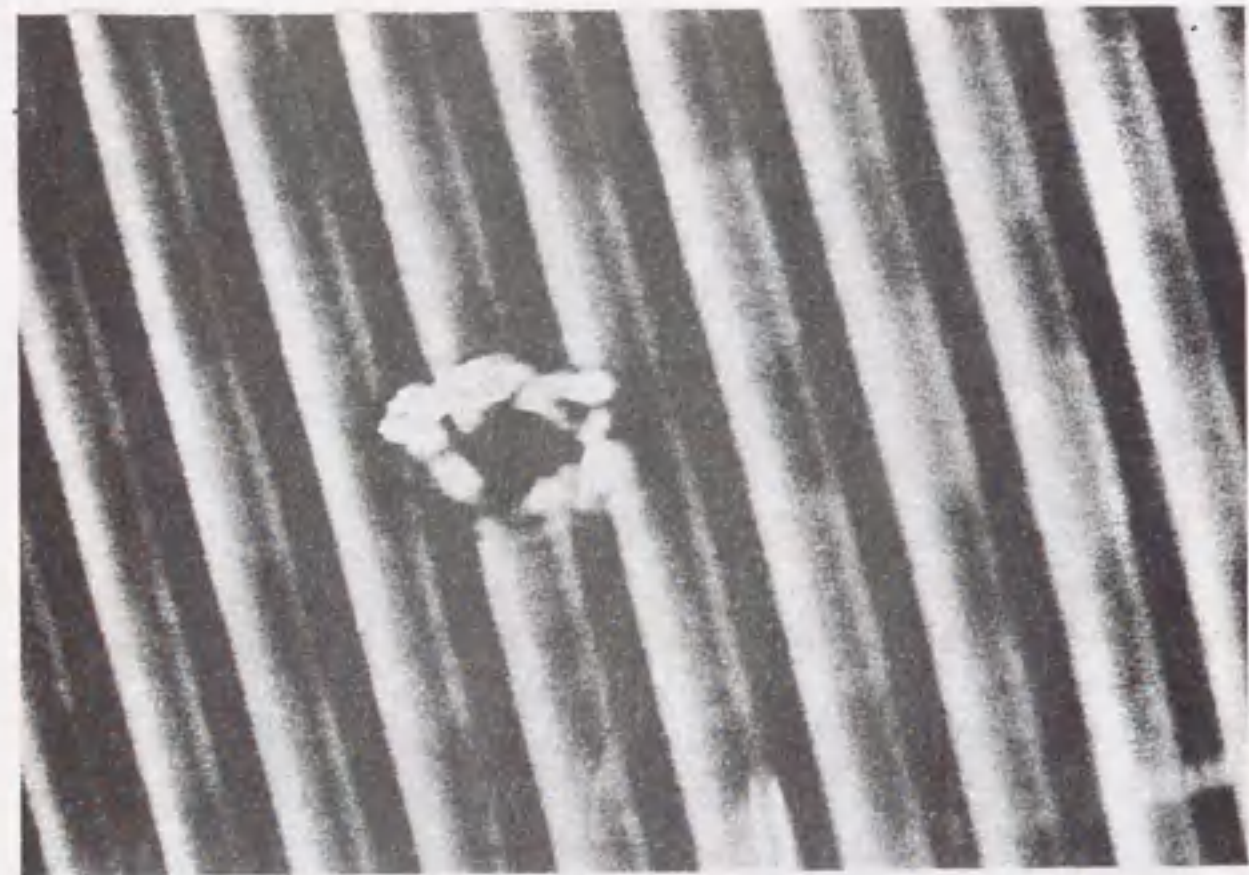


图 5. 1 1 媒体欠陷

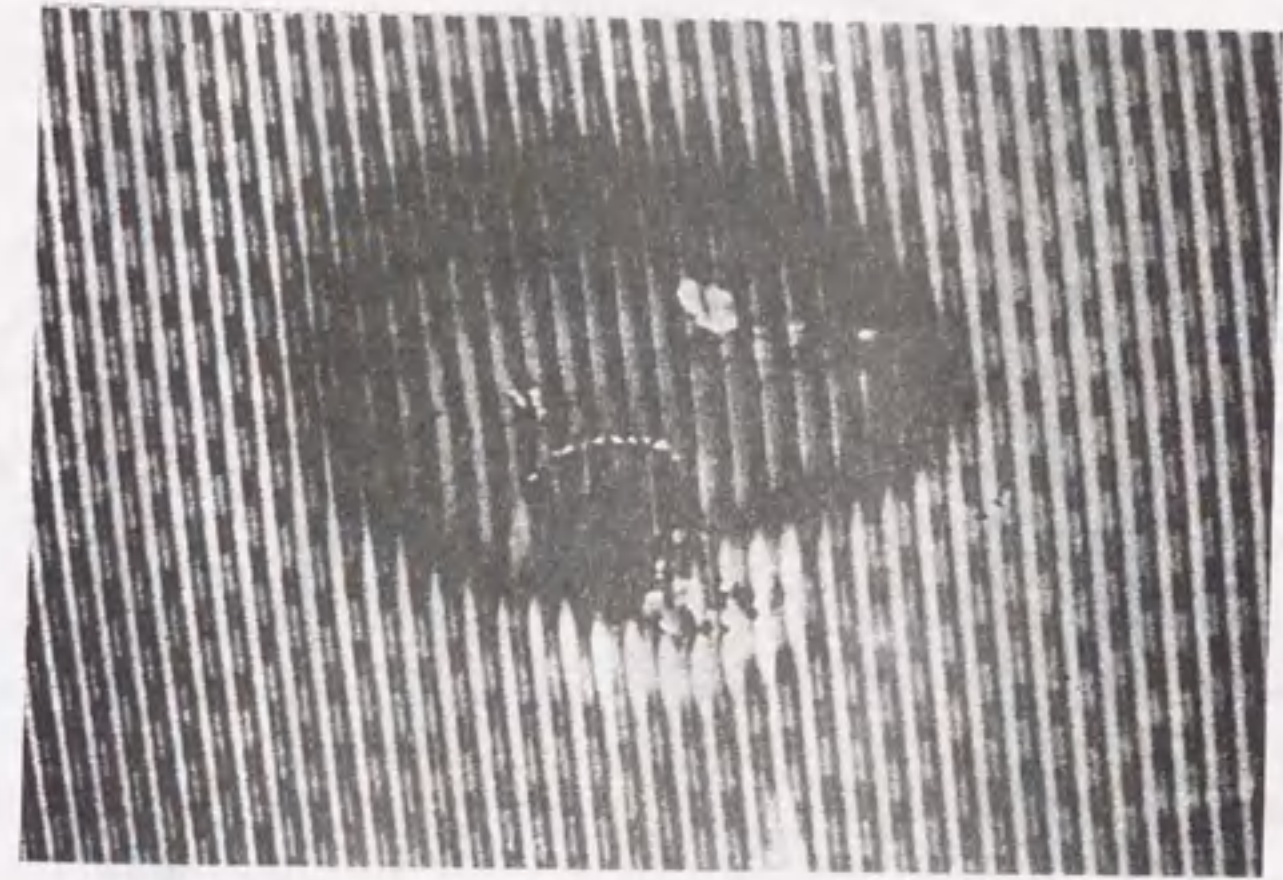


图 5. 1 2 媒体欠陷

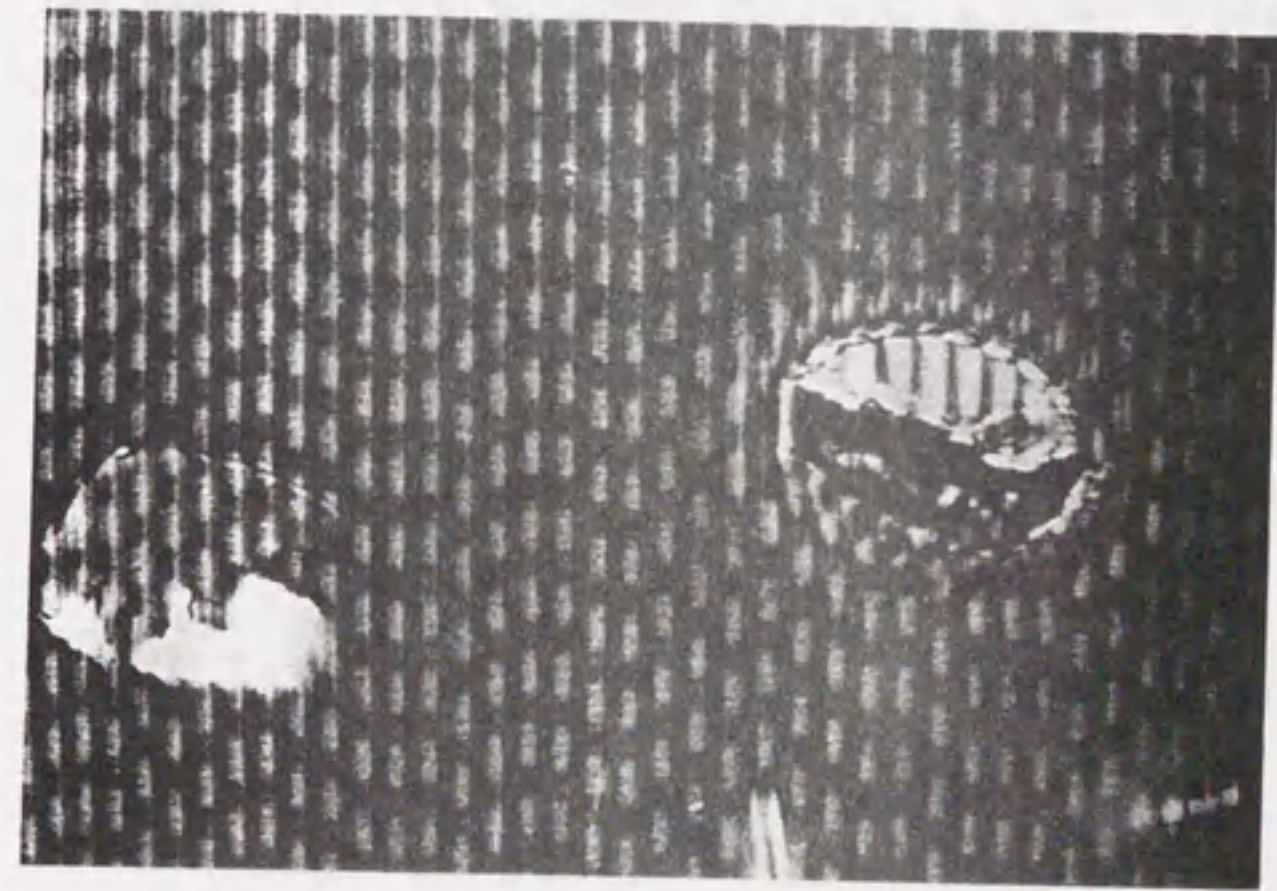


图 5. 1 3 媒体欠陷

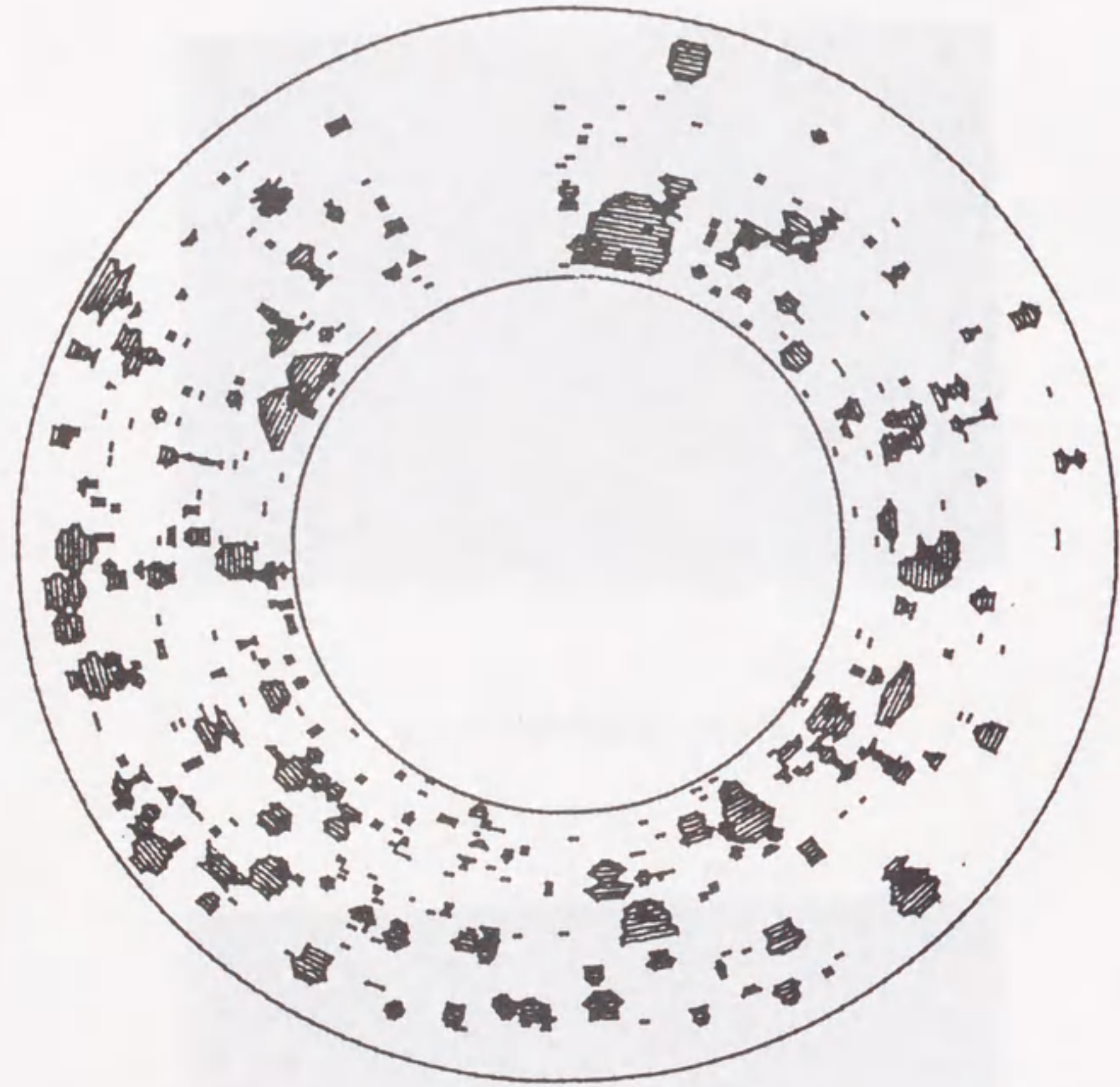


図5.14 欠陥マップ

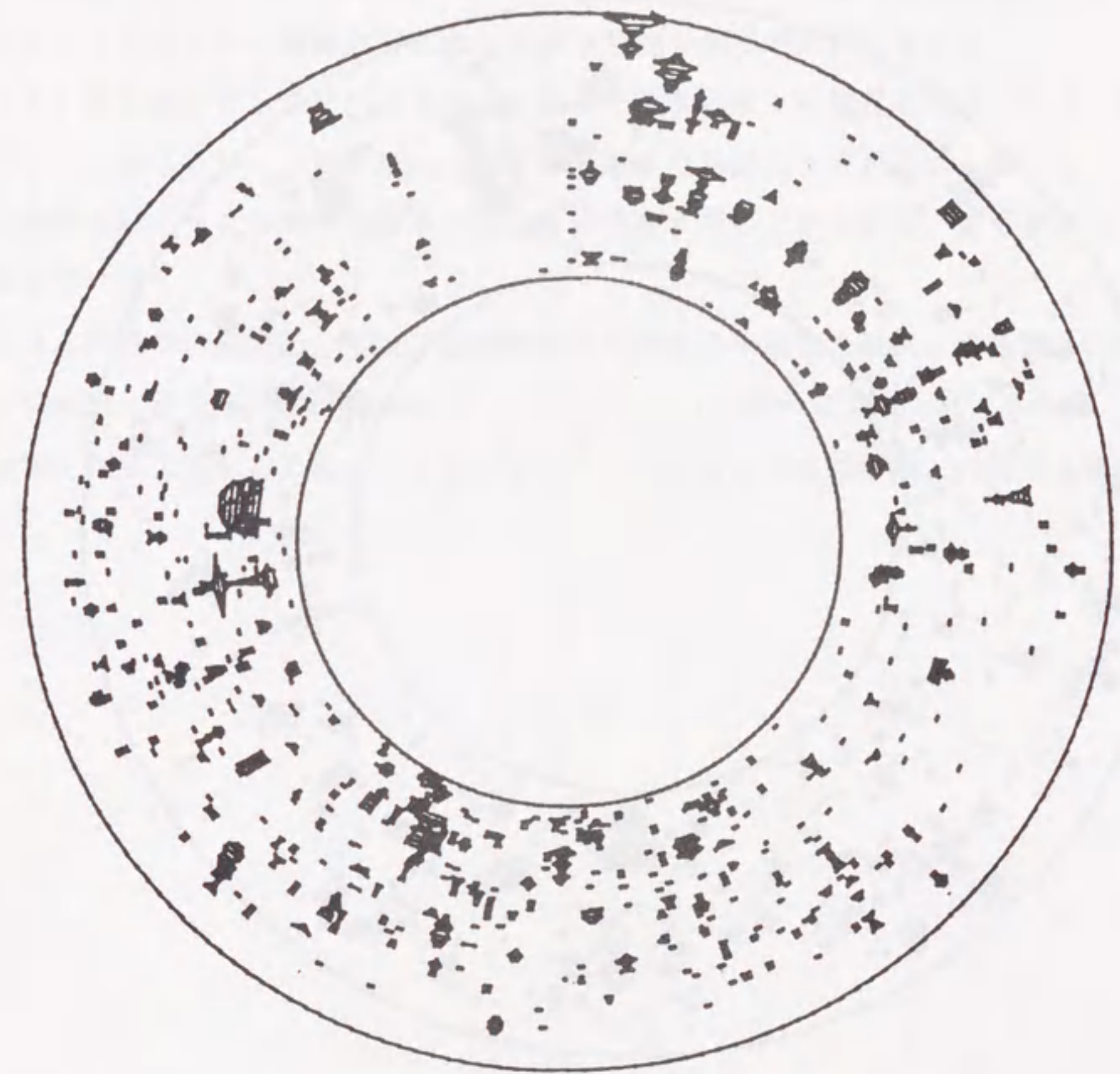


図5.15 欠陥マップ

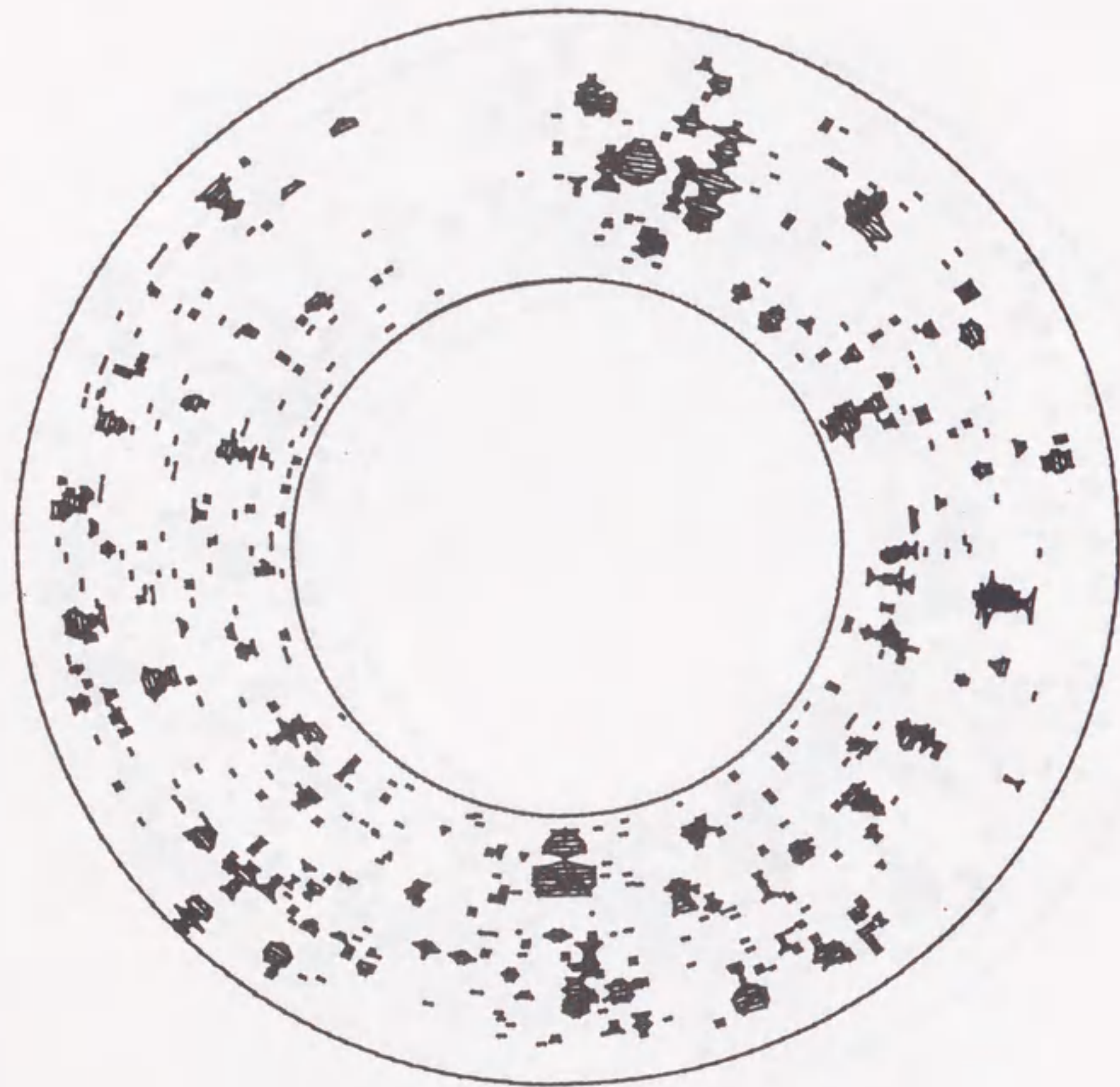


図5.16 欠陥マップ

次に、光磁気ディスク媒体全面における誤りの存在状態をトラック単位に測定した結果を示す。4枚の媒体について、全トラックを等分割して誤りが存在したトラックを各々集計した結果を図5.17～図5.20に示す。誤りの面内ばらつきが非常に大きいことが分かる。したがって、媒体全面にわたる誤り特性の測定が必要と言える。

また、実測結果としてバースト誤りの長さとその頻度との関係を図5.21～図5.24に示す。長さ5ビット以下のバースト誤りが90%以上を占めるが、数10ビット以上の比較的長いバースト誤りも僅かではあるが存在することが分かる。誤り率は $10^{-4} \sim 10^{-6}$ である⁽⁵⁾⁻⁽⁸⁾。

これらの誤りの原因としては、記録膜等の作製時の不純物の混入、記録膜・保護膜・エンハンス膜・基板等のピンホール⁽⁹⁾、プリグループの形状異常等が考えられる。このような製造工程に起因するもの以外にも、光ディスク媒体使用時の損傷、汚濁等もあり得る。

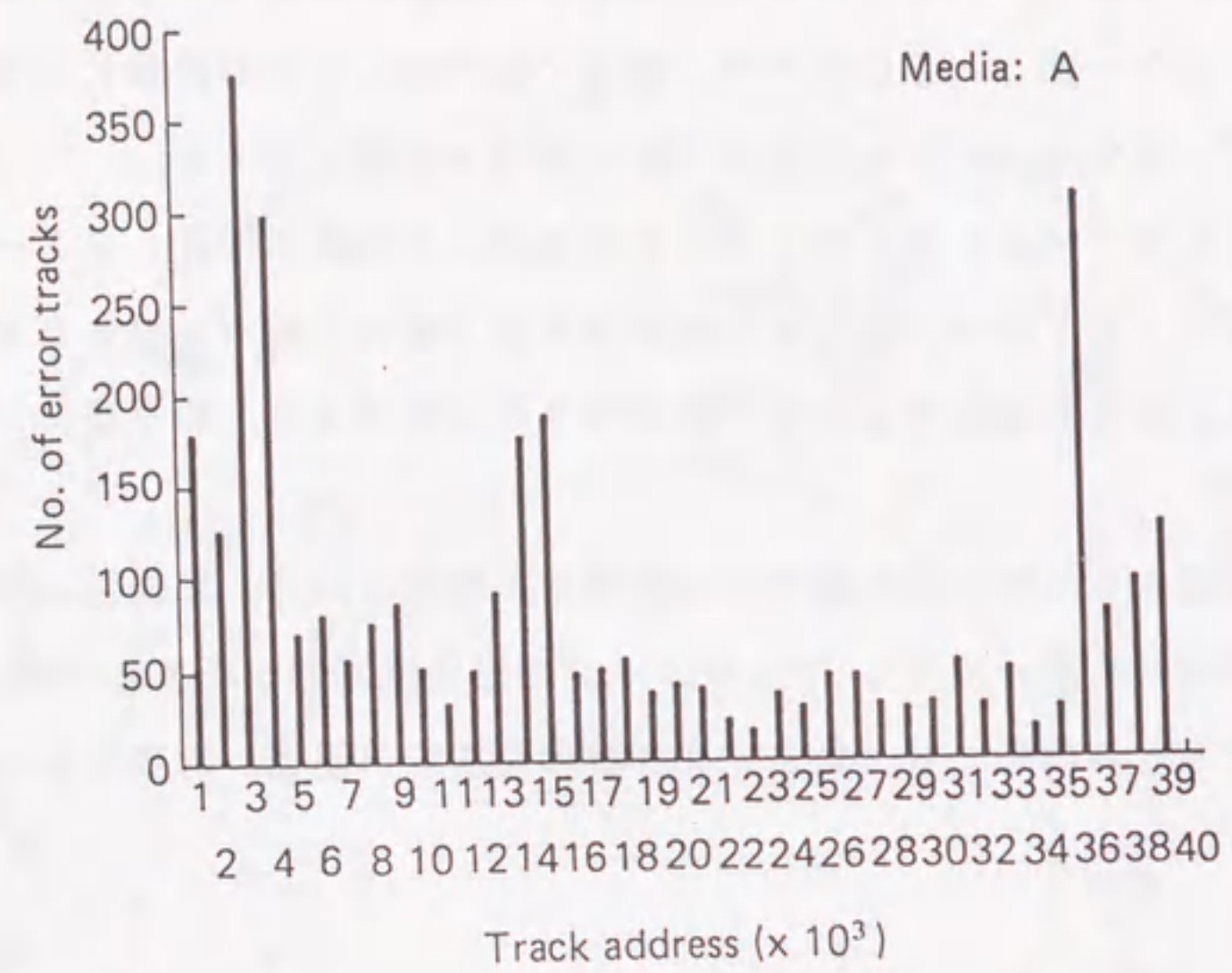


図 5. 17 誤りを有するトラックの分布

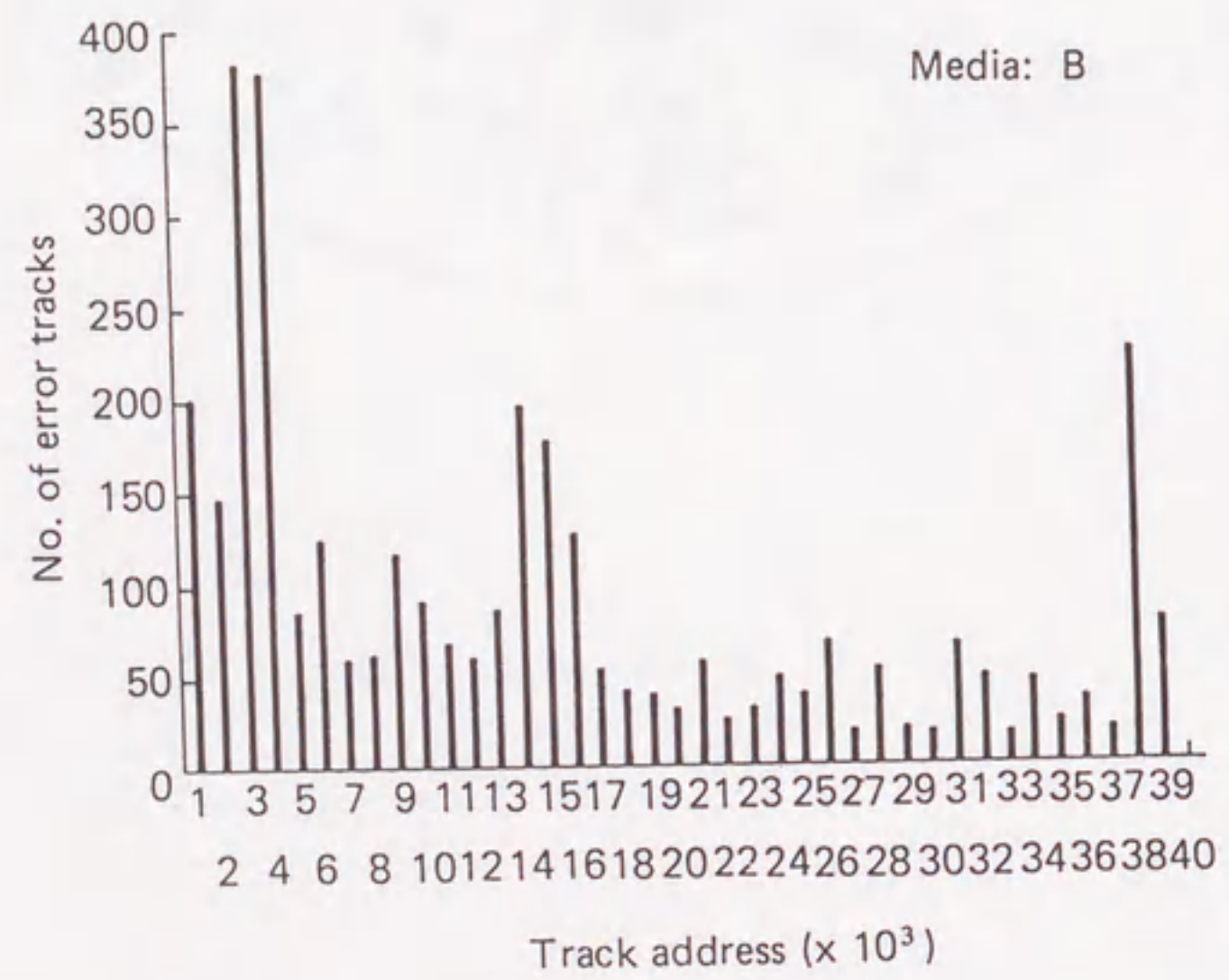


図 5. 18 誤りを有するトラックの分布

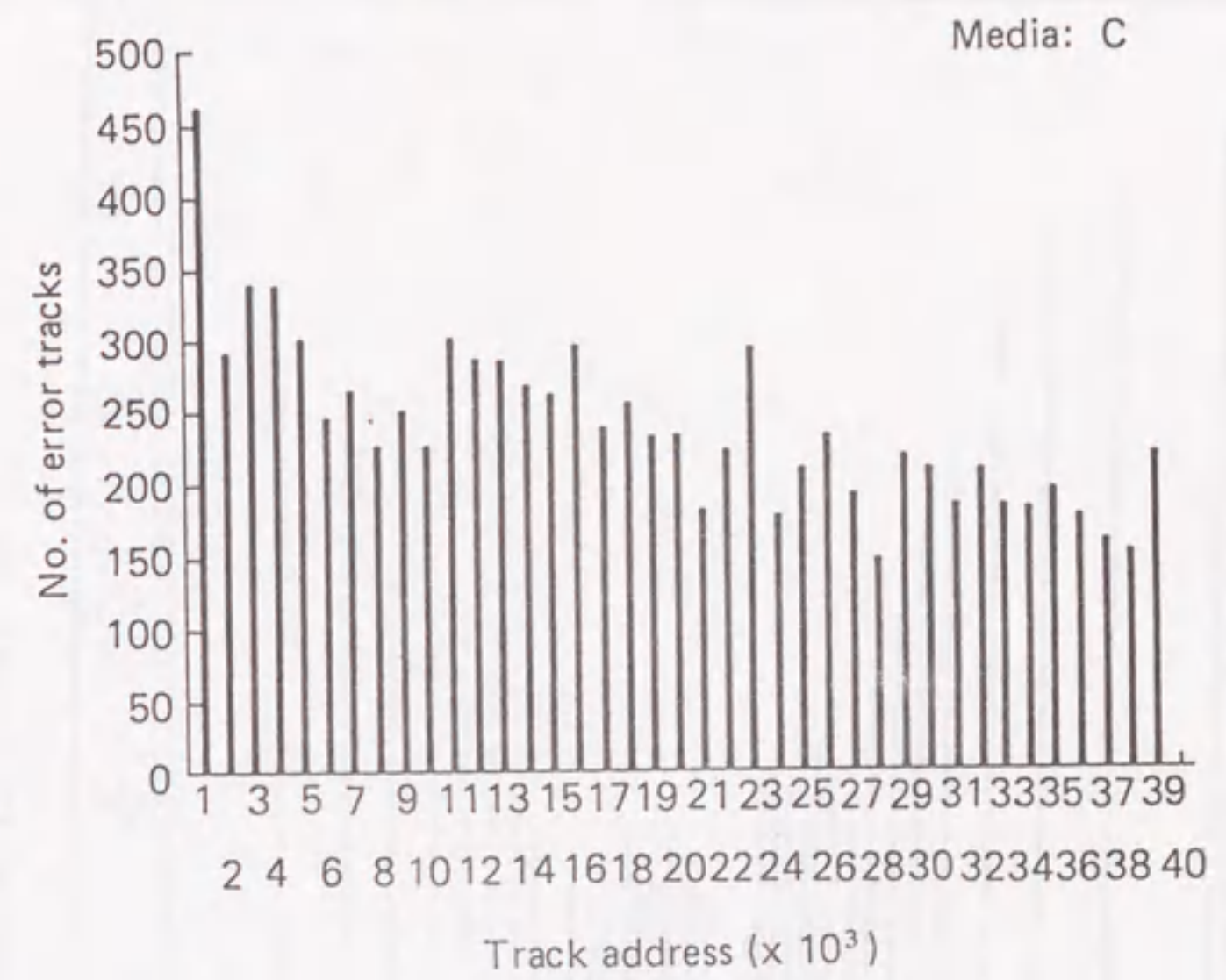


図 5. 19 誤りを有するトラックの分布

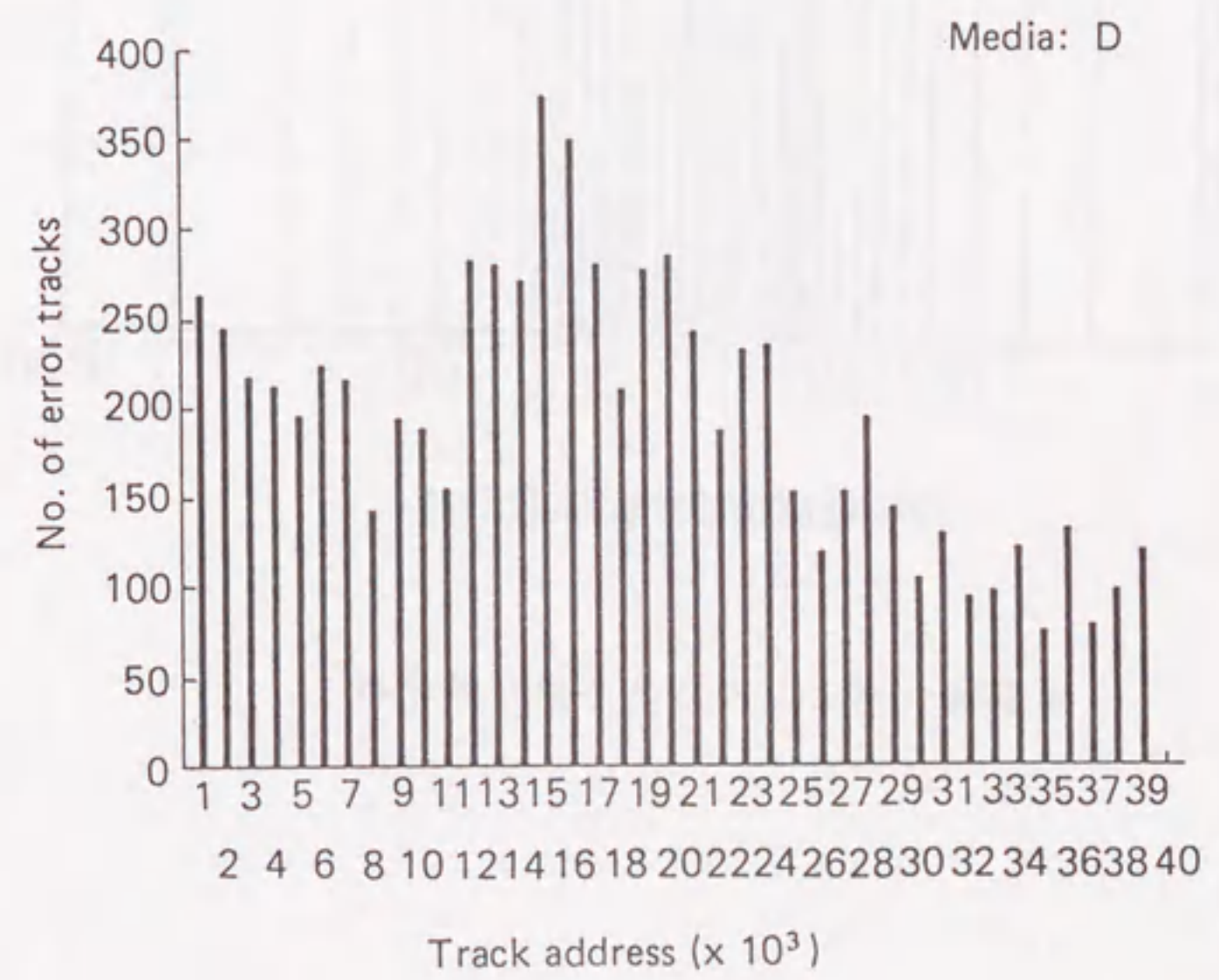


図 5. 20 誤りを有するトラックの分布

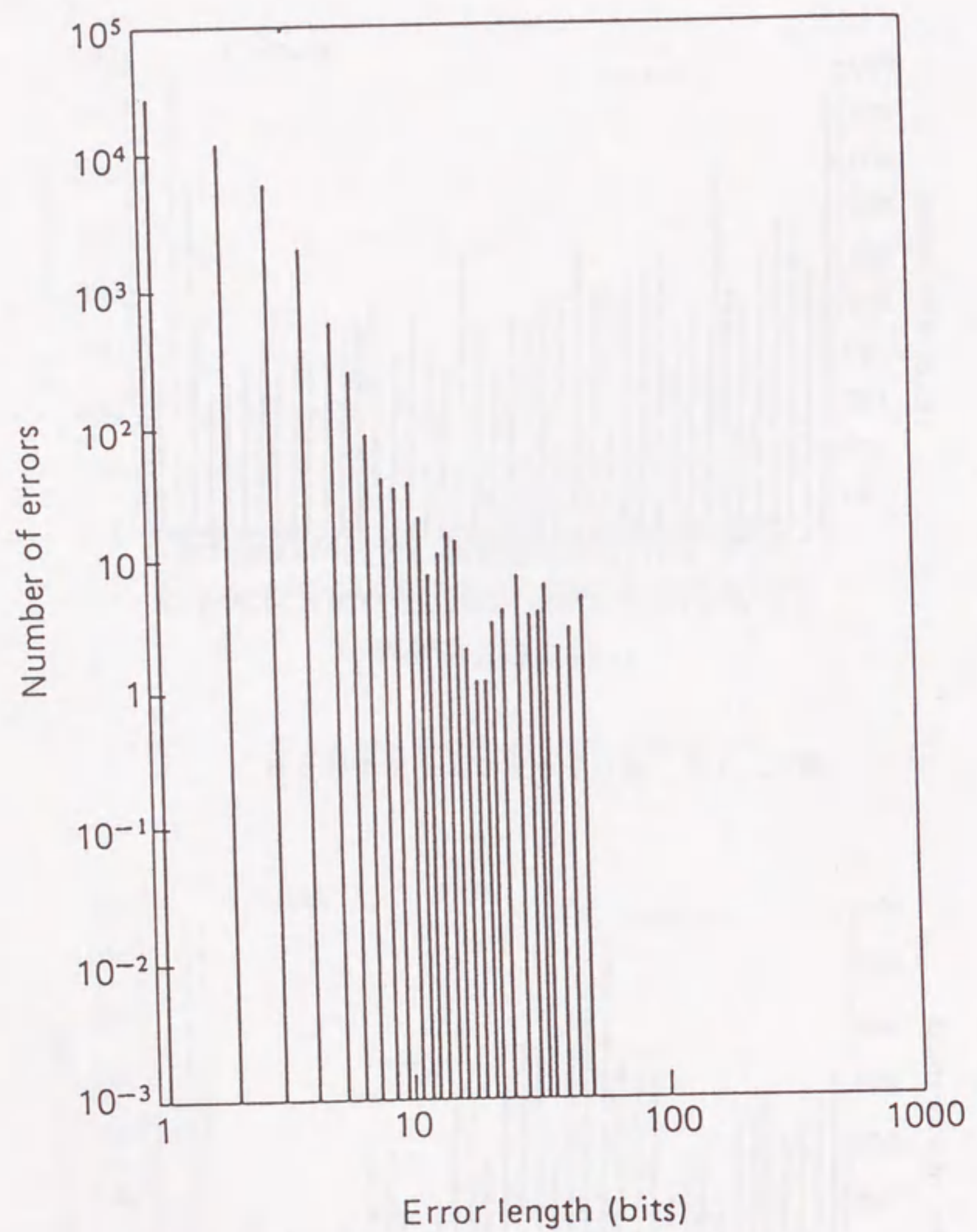


図 5. 2 1 バースト誤り長分布

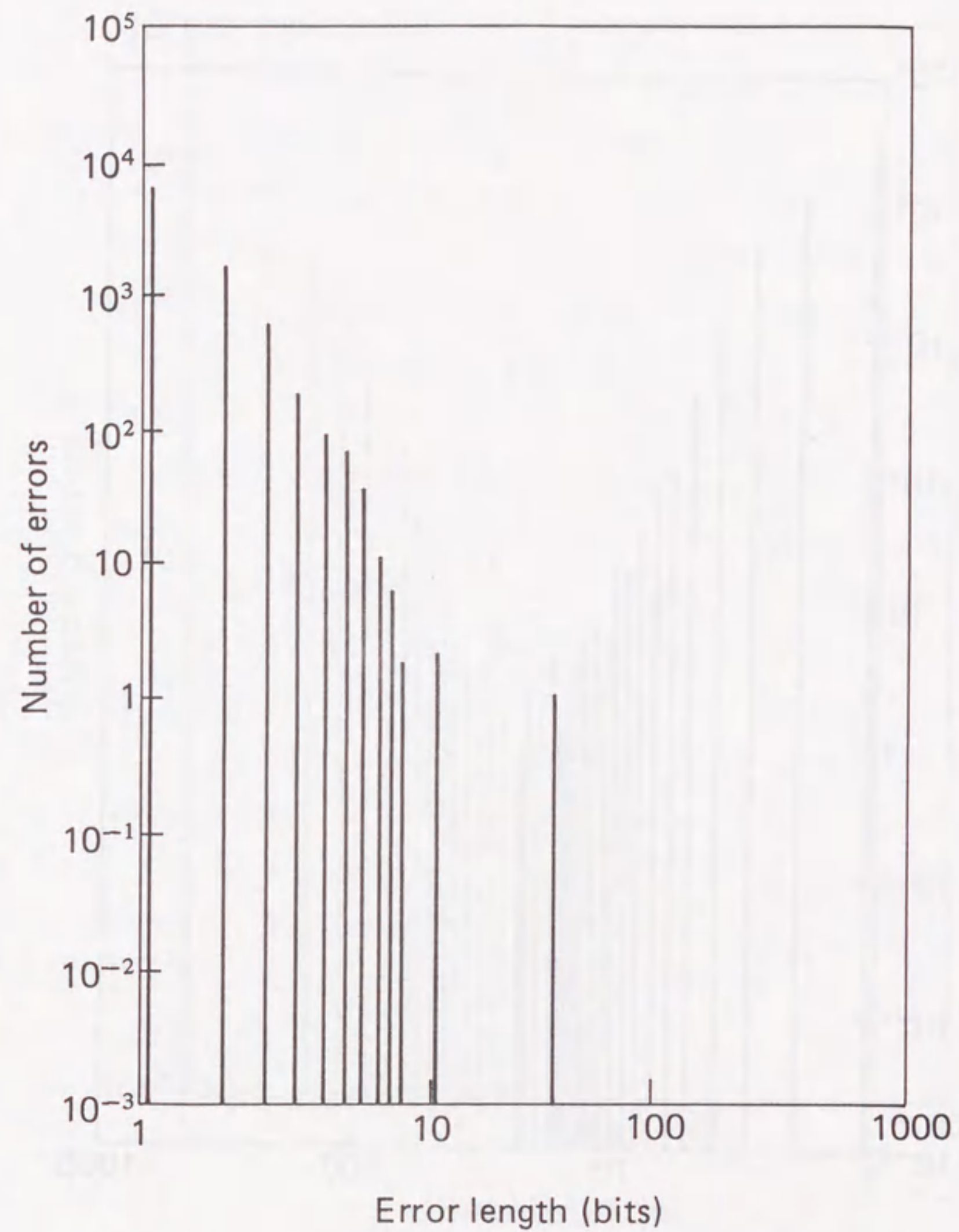


図 5. 2 2 バースト誤り長分布

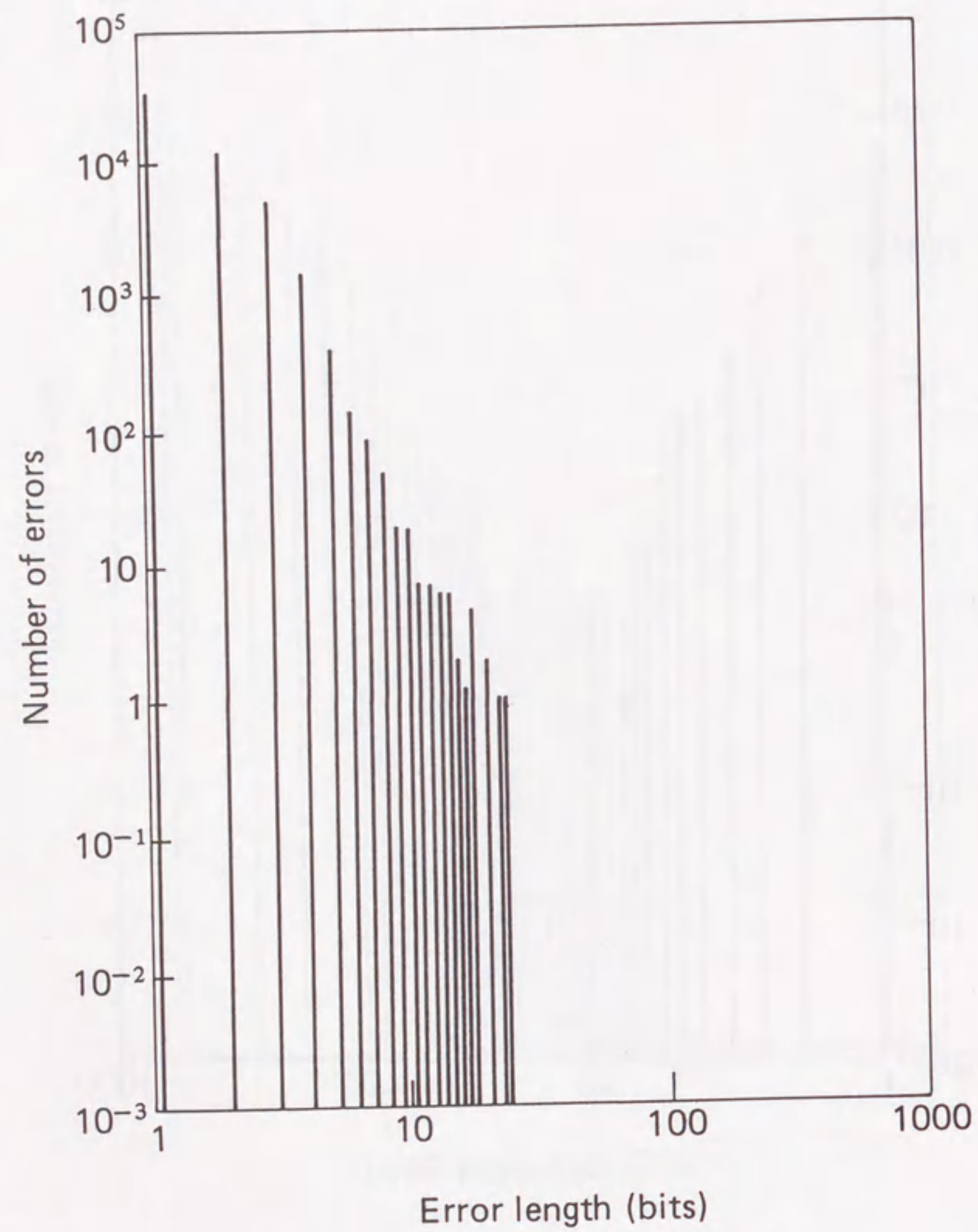


図 5. 23 バースト誤り長分布

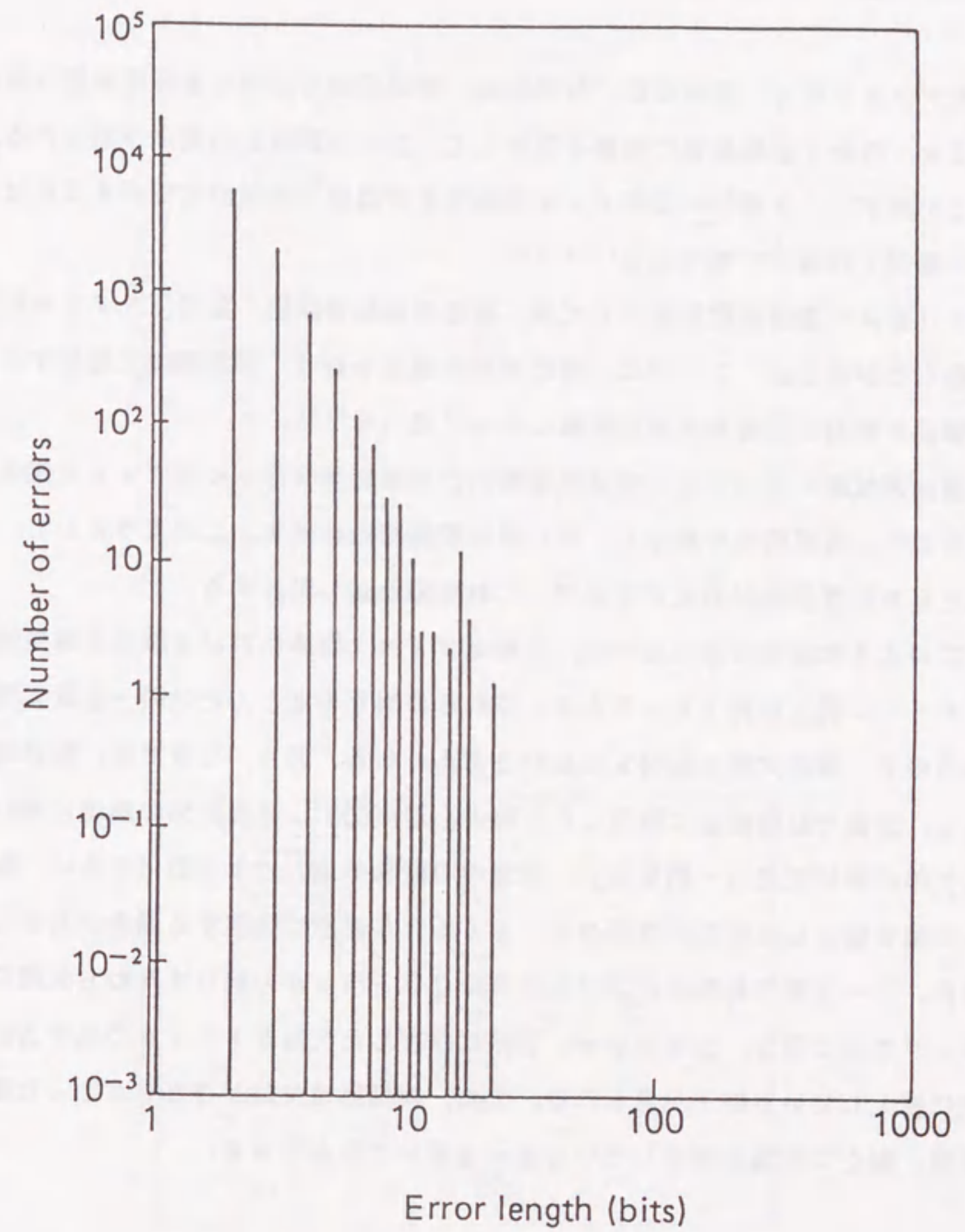


図 5. 24 バースト誤り長分布

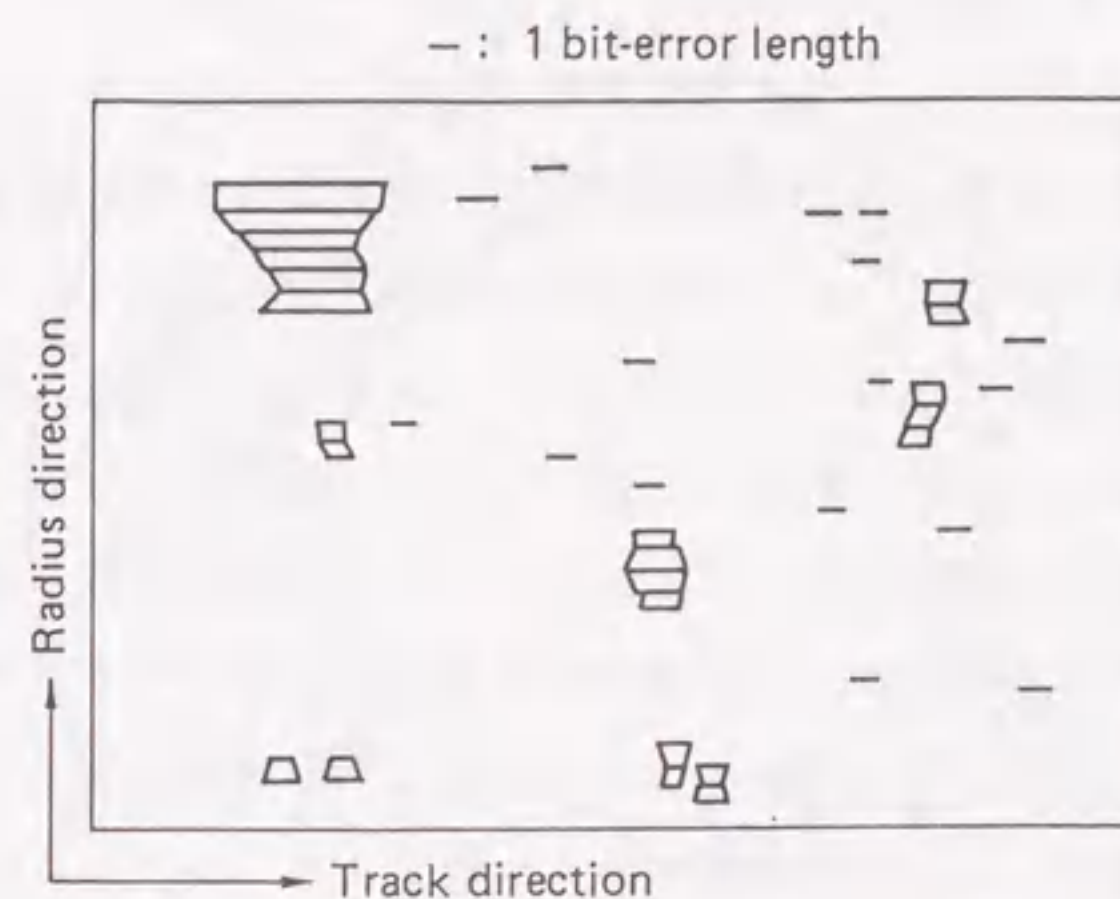
5. 4 加速劣化特性の測定結果

現在、光ディスクには、記録原理、材料組成、媒体構造等が異なる多種多様な媒体が存在する。また、今後も記録品質の改善を目指して、多くの媒体の出現が予想される。これら開発途上の光ディスク媒体の長期データ信頼性を短時間で定量的に把握するには、加速劣化特性の測定・評価が有効である⁽¹⁰⁾⁻⁽¹³⁾。

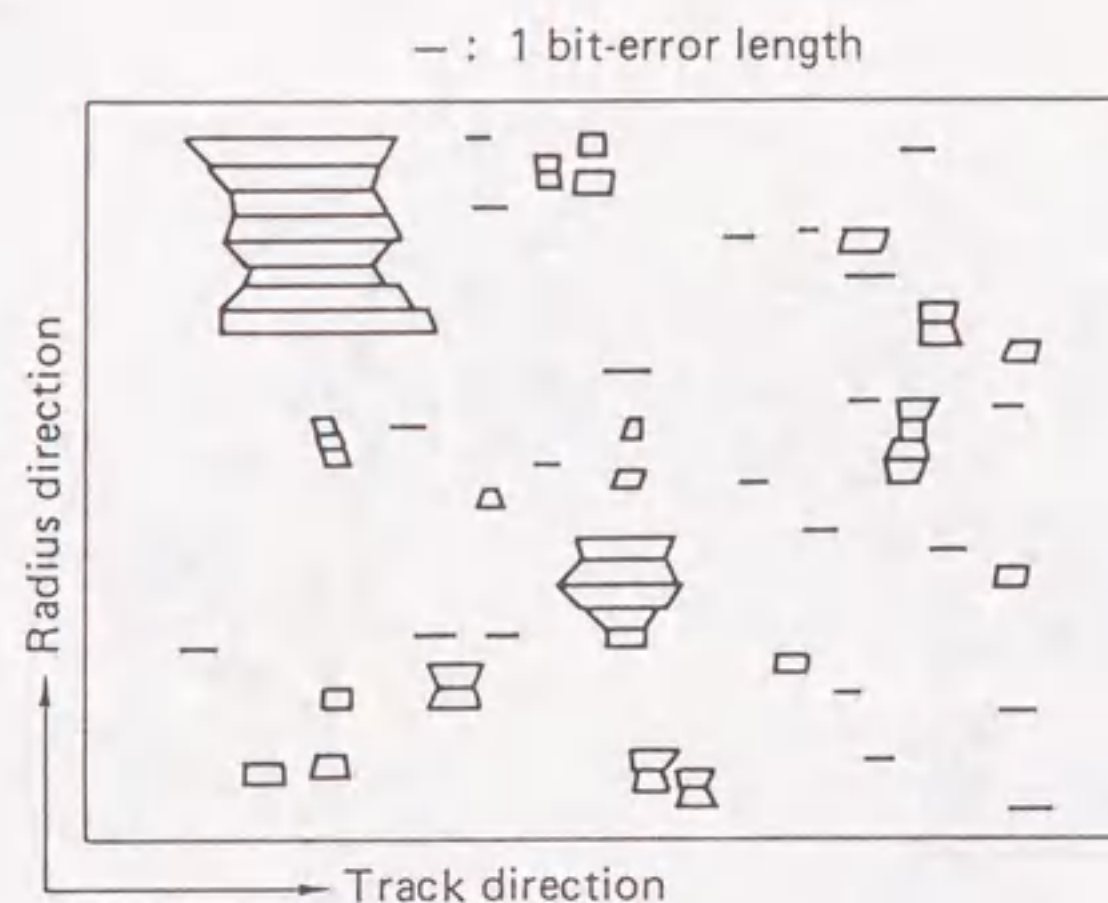
光ディスク媒体の加速劣化試験としては、高温高湿加速試験、温湿度サイクル試験、腐食ガス試験などがあるが、ここでは、特に劣悪な環境を避け、通常環境で使用する場合の媒体寿命推定に有効な高温高湿加速試験に絞って述べる⁽¹⁴⁾。

高温高湿加速試験においては、恒温恒湿槽内の劣悪環境条件下に光ディスク媒体を長時間放置したのち、各種特性を測定し、再び恒温恒湿槽内に戻す。このようにして、寿命推定が可能となる程度媒体が劣化するまで、これを繰り返し実行する。

さて、このような測定方法に基づき、光磁気ディスク媒体における誤りを電氣的に観測した。1ビットの長さは約1 μ mである。これらの誤りのほとんどは同一位置に固定的に検出されるので、媒体欠陥に起因するものと考えられる。図5. 25では、媒体のある部分に注目し、室温で記録直後に検出した欠陥と、温度60 $^{\circ}$ C、湿度85%の環境に約2700時間放置後の欠陥の形状変化の一例を示す。空气中の酸素の進入による酸化のため、初期から存在した欠陥を核として成長する場合や、全く新たな箇所に発生する場合があることが分かる。また、同一加速劣化条件における約3000トラックの誤りすなわち欠陥の増加の様子をマップの形で図5. 26に示す。初期に存在した欠陥がトラックの長手方向および半径方向に拡大している様子が見られる。また、初期には欠陥が存在しなかった箇所に、加速劣化後、新たに欠陥が発生している場合も多いことが分かる。



(a) Exposure time: 0 hr.



(b) Exposure time: 2700 hrs.

Exposure environment

Temperature : 60 $^{\circ}$ C

Relative humidity : 85%

図5. 25 加速劣化による媒体欠陥の変化

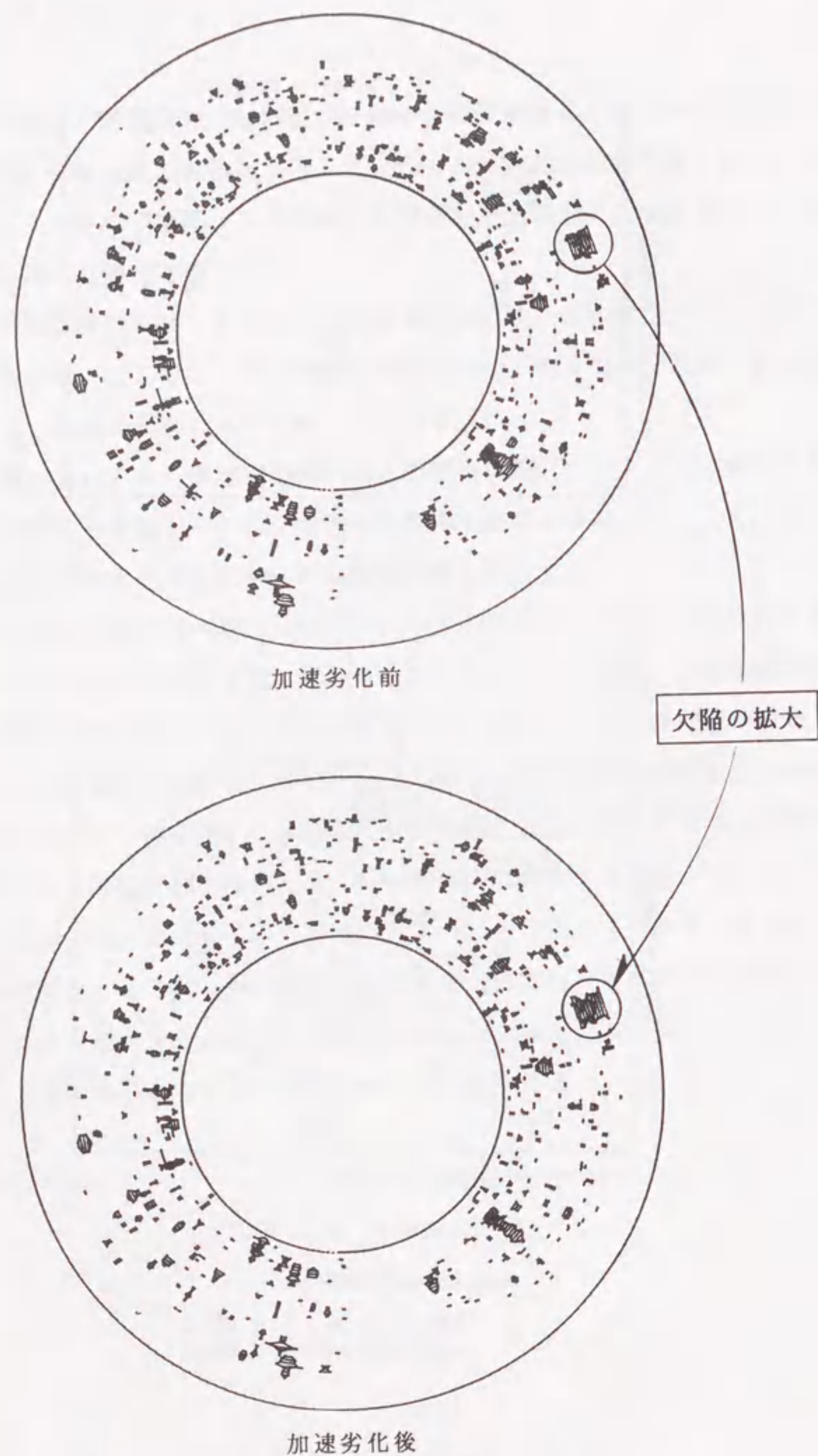


図5. 26 加速劣化による媒体欠陥の変化
(加速劣化条件は図5. 25と同じ)

次に、媒体を温度70℃、湿度85%の雰囲気中で加速劣化させた場合のバースト誤り長分布の変化を図5. 27、図5. 28に示す。放置時間の増加に伴い、バースト誤りが増加することが分かる。このバースト誤りの発生頻度とその長さは、後に述べるように誤り訂正処理技術による誤り率の改善効果に大きな影響を与える重要な測定パラメータである。

また、振幅マージンの加速劣化特性の実測例を図5. 29に示す。放置時間401時間においては、初期に比べてスライスレベル中心における誤り率は約1桁増加し、かつマージン幅も狭くなっていることが分かる。一般に、振幅マージンの底は媒体欠陥、その両壁は各種雑音によって各々支配される。したがって、固定的な誤り率の増加のみならず、マージンが減少しているため間欠的な誤りが多数発生しやすい状況と言える。

図5. 30は、加速劣化現象によるCNRと誤り数の変化をあわせて示した図である。これからも明らかなように、CNRはマクロな観測量なので、劣化状態をあまり敏感に表わさないが、誤り特性は欠陥の増加・拡大を如実に表現する観測量と言える。したがって、加速劣化実験の測定パラメータとしては、誤り特性が最適であり、CNR、反射率等のマクロ量は不十分であると考えられる。

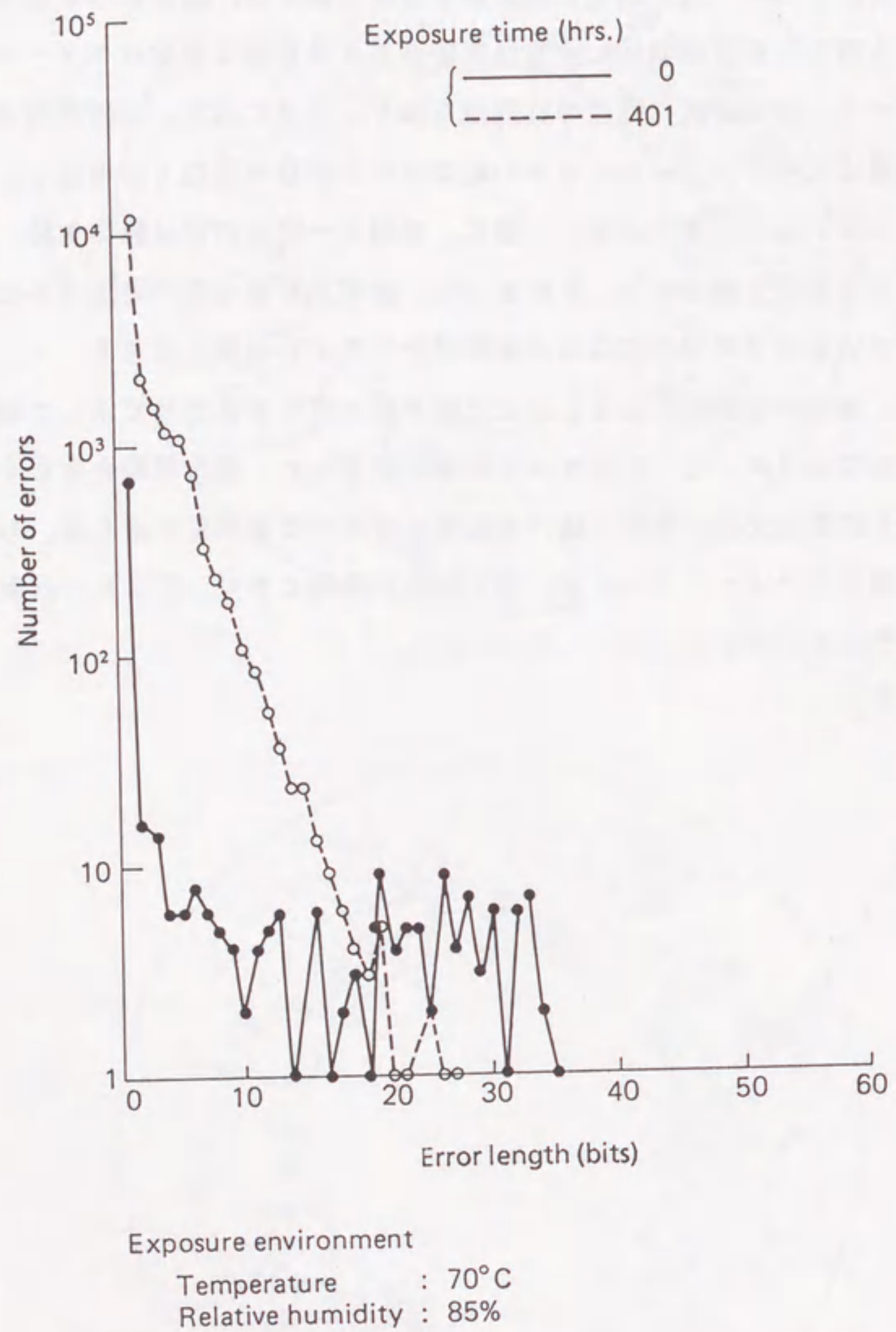


図5. 27 加速劣化によるバースト誤り長分布の変化

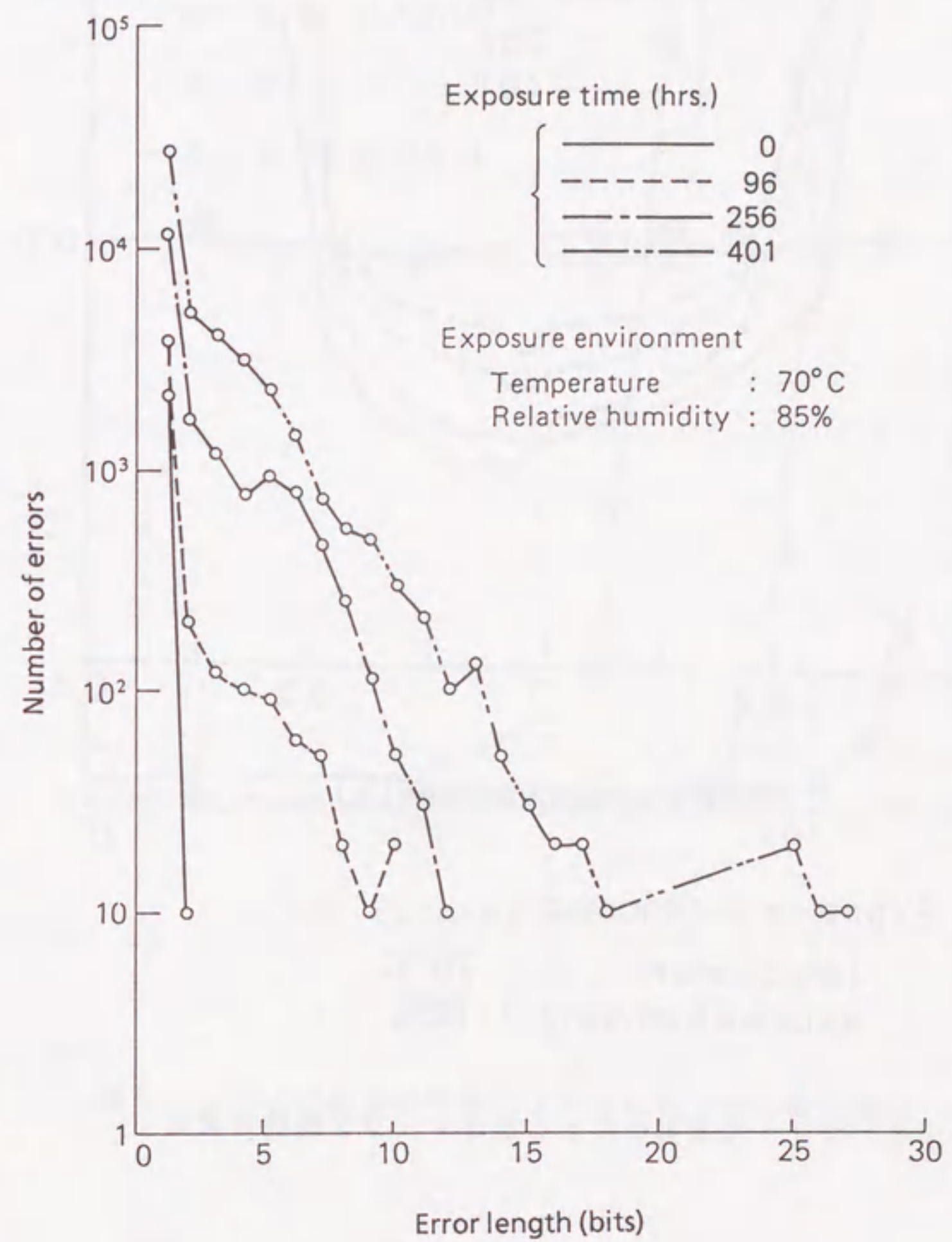
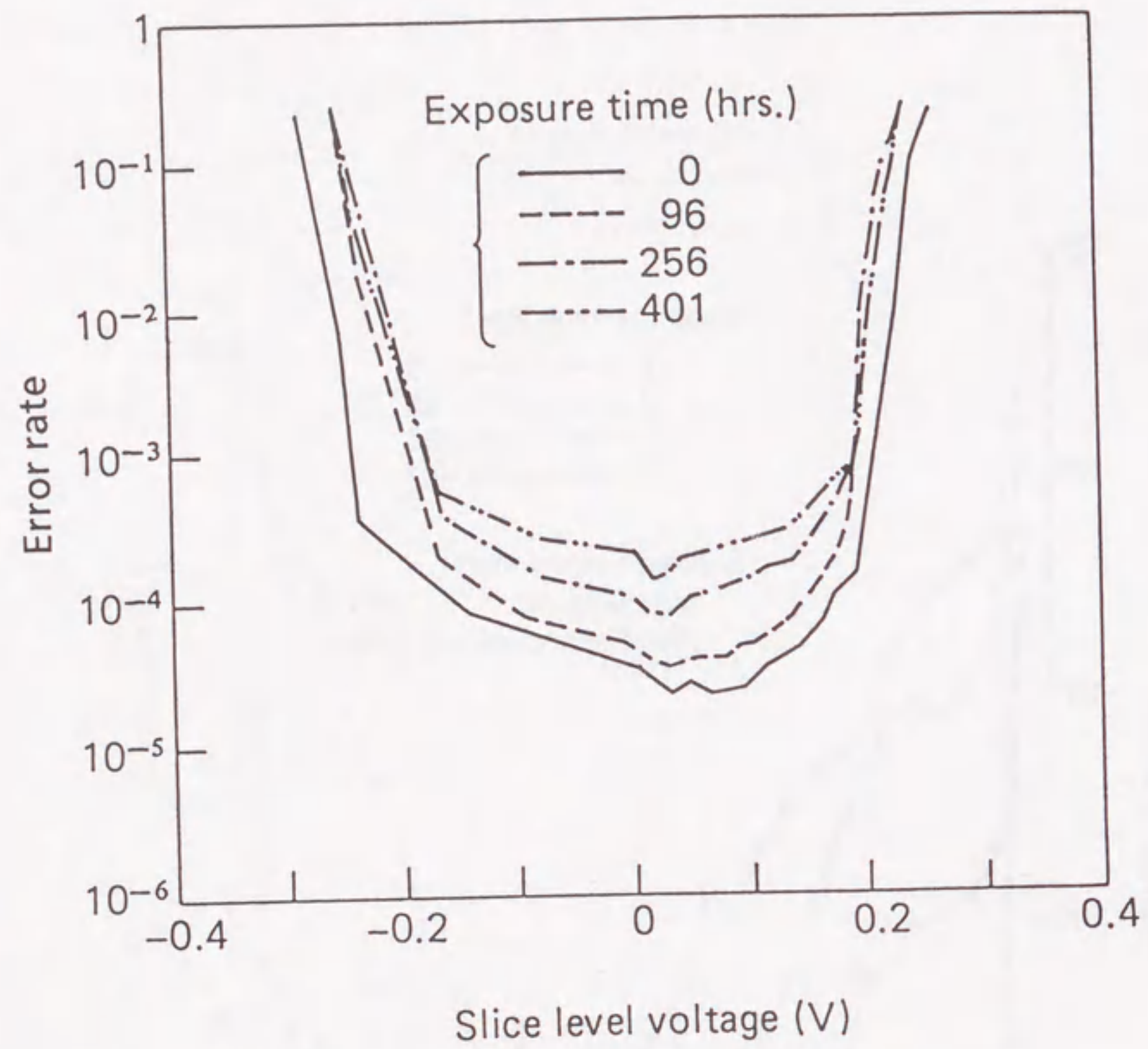


図5. 28 加速劣化によるバースト誤り長分布の変化



Exposure environment
 Temperature : 70°C
 Relative humidity : 85%

図5. 29 加速劣化による振幅マージン特性の変化

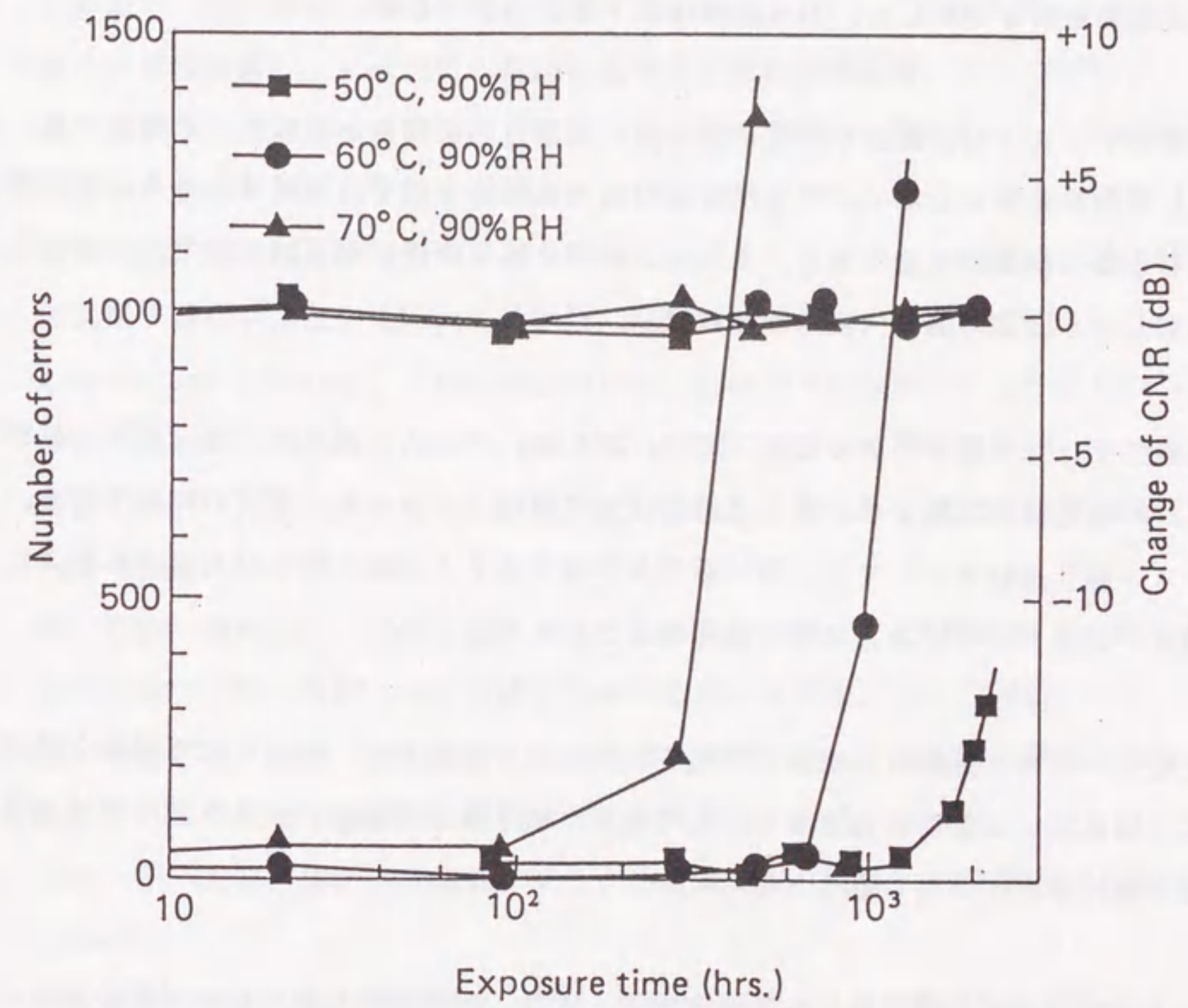


図5. 30 加速劣化現象によるCNRと誤り数の変化

5.5 結 言

本章においては、光磁気ディスク媒体の初期および加速劣化後における誤り特性の測定方法、測定結果を明らかにした。主な成果は以下のとおりである。

- (1) 光磁気ディスクの各種誤り特性の効率良い測定方法を明らかにした。本方法では、PLL回路を必要としないので見かけ上の誤りは検知されず、初期はもちろん媒体劣化後も正確な測定が可能である。さらに、即時に誤りの検出が可能なので、誤り個数が増加しても測定時間の大幅な増加はない。
- (2) 光磁気ディスク媒体の誤り特性として、誤り率、バースト誤り長分布、振幅・位相マージン特性等を実測した。誤りは媒体欠陥に起因し、ほとんど固定的に発生する。バースト誤り長分布としては、短い誤りが多発するとともに、数10ビットに及ぶ比較的長い誤りも存在するという特徴を明らかにした。
- (3) 光磁気ディスク媒体の加速劣化特性を実測により把握した。酸化により媒体欠陥が拡大成長或いは新たに発生する。この結果、誤り率の増加、バースト誤りの増加等の誤り特性の変化が生じることを示した。

以上のように得られた誤り特性の各種測定データは、次章以降のモデリング等の議論の基礎となるものである。

[第5章の参考文献]

- (1) 各務直行, 樋口和則, 熊沢正幸, 川又 晃, 内山 晋, “光磁気ディスクのビット誤り率測定装置”, 第8回日本応用磁気学会学術講演概要集, 238 (1984).
- (2) 島元昌美, 古川輝雄, 清瀬泰広, 尾崎 稔, 田中邦麿, “光ディスク媒体欠陥分布測定器の開発”, 昭62信学全大, 4-174 (1987).
- (3) 齊藤 実, 武田 立, “光ディスク記憶における2次元バイト構成の検討” 昭63年度電子通信学会総合全国大会予稿集, 2-14 (1988).
- (4) M.Saito and T.Takeda, “Two-dimensional byte-organization for digital recording on optical disks”, Trans. IEICE, E71, 4, 353 (1988).
- (5) 齊藤 実, “光ディスクの信号読取り誤り特性”, 昭59年度電子通信学会総合全国大会予稿集, 7-82 (1984).
- (6) 林 信裕, 矢島啓二, 熊沢正幸, 川又 晃, 内山 晋, “光磁気ディスクのビット誤り特性”, 第10回日本応用磁気学会学術講演概要集, 232 (1986).
- (7) 樋口和則, 林 信裕, 熊沢正幸, 内山 晋, 川又 晃, “光磁気記録読み出し方式”, 昭61年度電子通信学会総合全国大会予稿集, 1-154 (1986).
- (8) 山本 学, 山田一郎, “光磁気ディスクのビット誤り特性”, 信学技報, MR87-50 (1988).
- (9) 阪本貞夫, 武田安弘, 西村俊彦, 鷺見 聡, 虎沢研示, “樹脂基板光磁気ディスクのピンホール不良解析”, 光メモリシンポジウム'88論文集, 85 (1988).
- (10) 荒谷勝久, 各務直行, 樋口和則, 小林 正, 熊沢正幸, 網島 滋, 川又 晃, 内山 晋, “光磁気記録用Tb-FeCo-Al薄膜の耐食性とディスク記録特性の経時変化”, 信学技報, CPM84-133, 25 (1984).
- (11) 小林政信, 浅野睦巳, 前野仁典, 大石佳代子, 川村和民: “光磁気メモリ媒体における腐食の環境依存性”, 日本応用磁気学会誌, 8, 2, 209 (1987).
- (12) 桐野文良, 荻原典之, 太田憲雄, “TbFeCo-M光磁気膜の耐腐食性評価”, 光メモリシンポジウム'88 論文集, 23 (1988).
- (13) 小深田美恵子, 榎原俊昭, 谷井 清, 児島理恵, 坪井 騰, “φ3.5インチ光磁気ディスクの開発”, 光メモリシンポジウム'88 論文集, 19 (1988).

- (14) 齊藤 実, 武田 立, 原 臣司: “光ディスク媒体の加速劣化試験方法”, 昭59年度電子通信学会通信部門全国大会予稿集, シンポジウム 6-4 (1984).

第6章 光ディスク記憶の 誤り特性のモデル化

6.1 緒言

第5章において述べたように, 光ディスクは記録密度が約 $1 \text{ bit}/\mu\text{m}^2$ と極めて高いため, 微小欠陥の影響を受けやすく, 磁気ディスクに比べ多くの固定的誤りが発生する。このため, 誤り率は通常 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ に達する。また, 光ディスク媒体の特性劣化も, 磁気ディスク等に比べ速いことが明らかにされている。

デジタル情報記憶用光ディスク装置の開発にあたっては, 製造時の誤り及び経時劣化後の誤りに対処するフォールトトレラント技術の導入が必要である。この技術を光ディスク装置に効率良く適用するためには, 第5章で得た媒体の誤り特性を基本データとして, 具体的な方式・構成を決定するという手順を踏むことが重要である。

このための一手段として, 誤り特性を数学的に表現できるようなモデル化の試みがある。従来からも各種モデルが議論されてきたが, 厳密性, 発展性などの観点からは不十分なものであった⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾。

本章では, 各種フォールトトレラント技術の定量的な取り扱いを可能にすることをねらいに, 誤り特性のモデリングを2方向からアプローチする。すなわち, ギルバートモデルを基本とする解析と, 欠陥の形状等を仮定したモデルに基づく解析である。両者ともバースト誤り長分布の実測値を合理的に説明できることを明らかにする。

6.2 合成ギルバートモデル

通信路において発生する誤りの統計モデルとして、ギルバートモデル (Gilbert model)⁽⁶⁾ が良く知られている。これは、いわゆるマルコフ連鎖 (Markov chain) と同様に、誤りの発生過程を良状態 (G) および悪状態 (B) と称する 2 事象と、それらの連結を表現する 4 個の状態遷移確率 (P_{gg} , P_{gb} , P_{bg} , P_{bb}) からなる統計モデルである (図 6.1)。これがマルコフ連鎖と異なるのは、状態遷移と出力が直接対応せず、状態 B においてビットの正誤が各々 $1-h$, h ($0 \leq h \leq 1$) の確率で生起する点である。

このギルバートモデルにおいては、長さ i ビットのバースト誤り発生確率 $P(i)$ は、状態遷移確率を用いて次式で表される。

$$P(i) = \frac{h \cdot P_{bg}^2}{P_{gb} + P_{bg}} \cdot P_{gb} P_{bb}^{i-1} \quad (6-1)$$

上式から明らかなように、ギルバートモデルではバースト誤り長とその個数の対数値とは反比例の関係にあると考えるので、誤り長の増加に従い、その個数が急激に減少する事象の表現に適している。

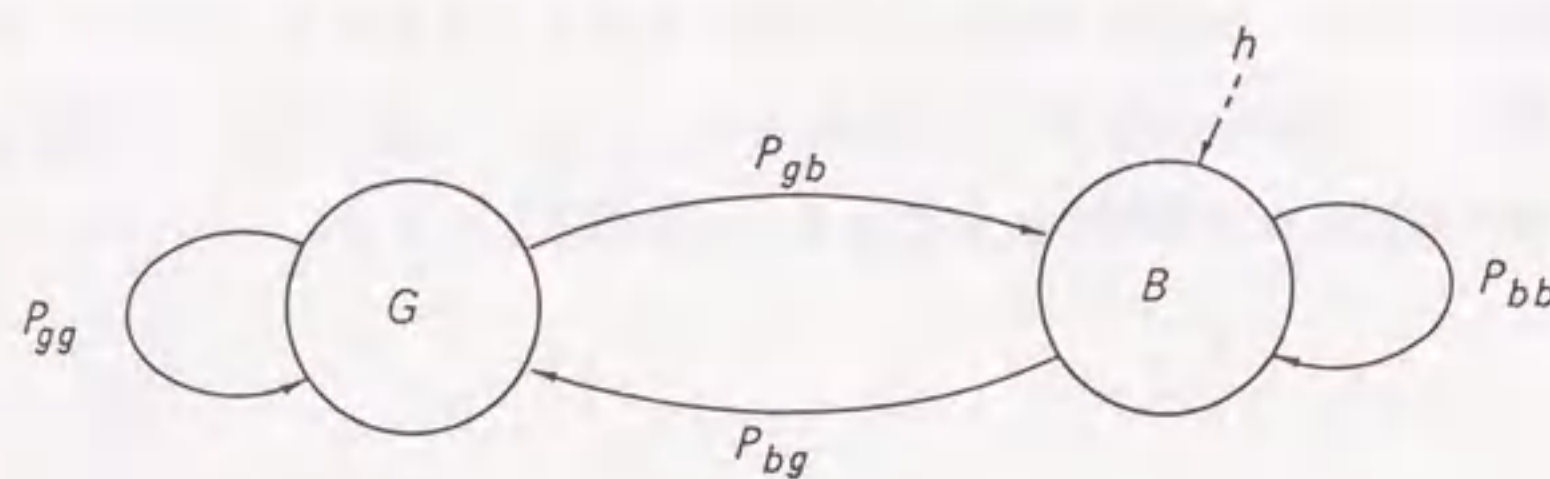


図 6.1 ギルバートモデルの状態遷移図

一般に、誤りの発生状況という観点から見ると、記憶装置における記録・再生は、通信路における情報の送信・受信と類似と考えられる。したがって、上記のギルバートモデルおよびその拡張モデル等⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾ は、通信路の誤りの発生過程のみならず、記憶装置の再生信号の誤りの発生過程への適用も可能と考えて良い^{(10), (11)}。

上記のギルバートモデルの変形の一つとして、図 6.2 に示すように状態 G を介して状態 B_s , B_l の両方に遷移し得るモデルを想定する。このモデルを合成ギルバートモデル (Modified Gilbert model) と称する⁽¹²⁾⁻⁽¹⁵⁾。

状態 G は媒体欠陥に起因する固定的な誤りが発生しない状態とする。ただし、状態 G においても s ($0 \leq s \leq 1$) の確率で間欠的な誤りが生ずるものとする。すなわち、この s は欠陥以外のすべての観測過程の要因により起こり得る誤りの発生確率の総和である。

また、状態 B_s は欠陥により固定的な短い誤りが発生し得る状態、状態 B_l は欠陥によって固定的な長い誤りが発生し得る状態とする。これら状態 B_s , B_l における誤り発生確率を h ($0 \leq h \leq 1$) とする。この h は、変調処理後媒体上に実際に記録されるデータのビット "0", "1" の発生比率によって決まる値である。

この合成ギルバートモデルで、長さ i ビットのバースト誤りが発生する確率 $P(i)$ は、図 6.2 に示した状態遷移確率 (p_{11} , p_{12} , p_{21} , p_{22} , p_{13} , p_{31} , p_{33}) を用いて、次式のように表わされる。

$$P(i) = (p_{12} p_{22}^{i-1} p_{21} + p_{13} p_{33}^{i-1} p_{31}) \cdot t_1 \cdot h^i + p_{11}^{i-1} \cdot t_1 \cdot s^i \quad (6-2)$$

$$\text{但し, } t_1 = p_{21} p_{31} / (p_{21} p_{31} + p_{12} p_{31} + p_{13} p_{21})$$

なお、状態遷移確率は、通常次式のようにマトリクス表示される。ここで、状態 J からの遷移確率は第 j 行、状態 K への遷移確率は第 k 列に配置される。

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & 0 \\ p_{31} & 0 & p_{33} \end{bmatrix} \quad (6-3)$$

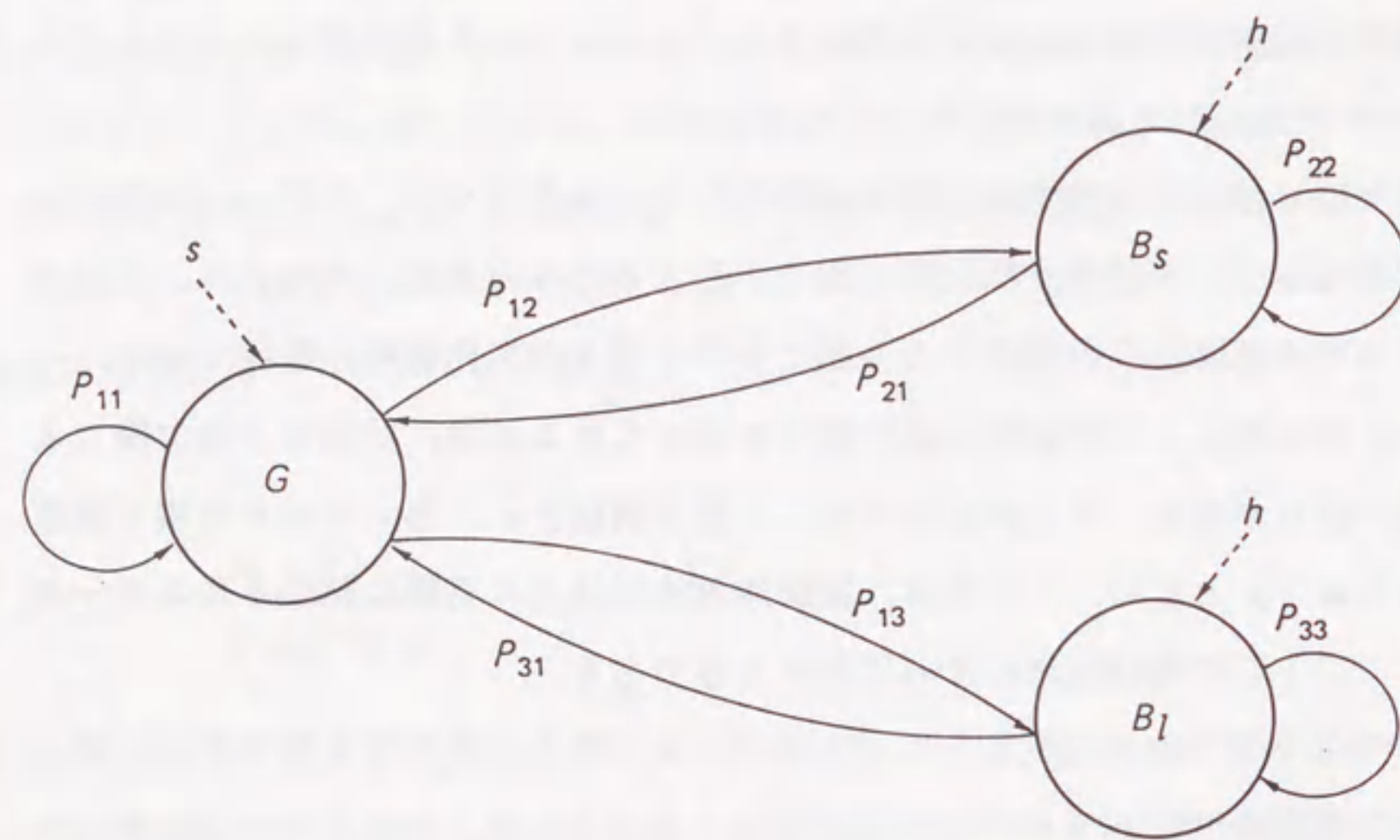


図 6. 2 合成ギルバートモデルの状態遷移図

例えば、図 6. 3 にヒストグラムとして示す光磁気ディスク媒体の誤り特性の実測例から、合成ギルバートモデルの状態遷移確率は次式で得られる。このとき、離散的な測定データについては、斜線で示すようにその近傍で正規化している。

$$P = \begin{bmatrix} 9.9999 \times 10^{-1} & 5.4491 \times 10^{-6} & 1.5570 \times 10^{-7} \\ 6.9072 \times 10^{-1} & 3.0928 \times 10^{-1} & 0 \\ 7.3684 \times 10^{-2} & 0 & 9.2632 \times 10^{-1} \end{bmatrix} \quad (6-4)$$

この結果をもとにした式(6-2)によるバースト誤り長分布を、図 6. 3 に実線で示す。これから分かるように、合成ギルバートモデルによって誤り特性が的確に記述できると言える。

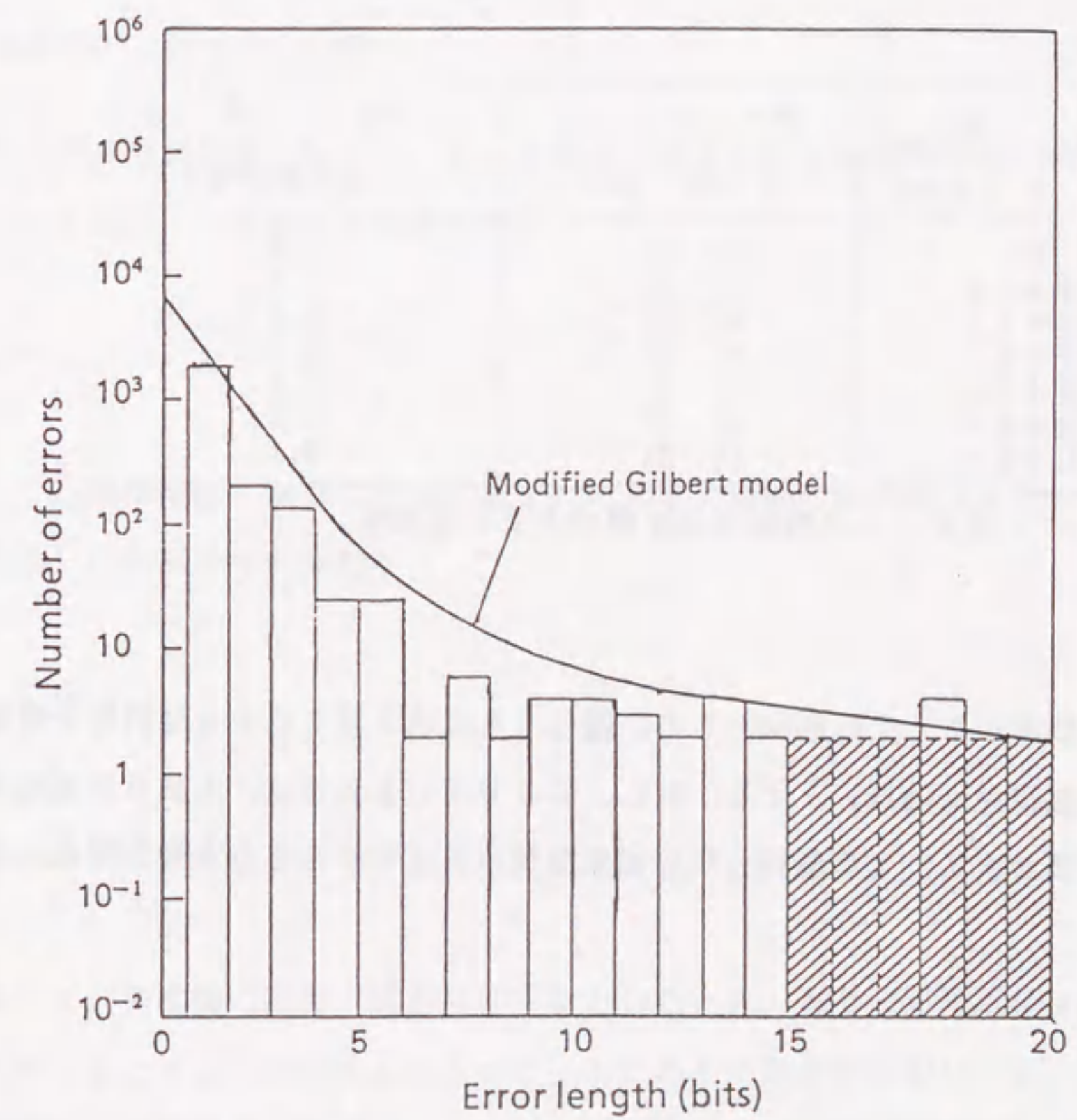


図 6. 3 バースト誤り長分布の実測値と理論値

6.3 欠陥形状に基づく統計モデル

一般に誤りは、ある広がりをもつ光ビームスポットが媒体上の欠陥部分を通過するとき、反射光量の過不足等により再生信号波形の異常を生じ、その結果として観測されるものと考えられる。

表6.1に誤りのトラック間相関に関する測定結果の一例を示す。この例では、隣接トラックの誤りの発生位置と長さから、この一群の誤りの原因は円形に近い1個の欠陥と推定できる。また、多数の媒体全面にわたる誤り位置及び長さの実測結果が同様の傾向を有するということから、このような円形に近い欠陥が多数存在していると言える。

表6.1 誤りのトラック間相関

位置+		長さ (bit換算値)
r (μm)	θ (度, 分)	
R	11° 22'	0.6
R+1.6	11° 22'	1.5
R+3.2	11° 22'	2.3
R+4.8	11° 21'	2.6
R+6.4	11° 21'	2.4
R+8.0	11° 21'	1.2
R+9.6	11° 21'	0.4

+ 光ディスク媒体中心を原点とする極座標

これらの実験事実から、欠陥形状として、図6.4に示す以下のような円形を仮定する。この円形欠陥の直径をx(bit)とする。但し、ここで用いる長さは、1誤りに相当する長さで正規化した値とする。その直径分布の密度関数は次式で与えられる指数関数とする。

$$\rho(x) = \frac{1}{x_0} \exp(-x/x_0) \quad (6-5)$$

但し、 x_0 : 平均直径

まず、図6.3のバースト誤り長分布の実測値から、平均直径 x_0 が異なる2種類の円形欠陥群が混在しているものとする。また、図6.4の円形欠陥において、トラックが欠陥部分をよぎる長さが $(n \pm 0.5)$ の範囲にあるとき長さnビットの誤りが生じると考える。このとき、直径xの円形欠陥によるnビット以上の誤りのトラック幅方向の発生範囲の長さ $L_n(x)$ は次式で与えられる。

$$L_n(x) = \{x^2 - (n-0.5)^2\}^{1/2} \quad (6-6)$$

次に、1個の円形欠陥において、長さnビット以上の誤りの個数と誤りの総個数との比を $R_n(x)$ とすると、これは次式で表される。

$$R_n(x) = L_n(x)/x \quad (6-7)$$

したがって、媒体全面における平均直径 x_0 の円形欠陥群による長さnビットの誤りの発生確率 $D(n)$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} D(n) &= \int_n^{\infty} \rho(x) \cdot \{R_n(x) - R_{n+1}(x)\} dx \\ &= \int_n^{\infty} \frac{1}{x_0} \exp(-x/x_0) \cdot \{L_n(x)/x - L_{n+1}(x)/x\} dx \quad (6-8) \end{aligned}$$

前記のように、2種類の円形欠陥が存在するとしたとき、各々の平均直径 x_1, x_2 を上式に代入することにより得られる長さnビットの誤りの発生確率を $D_1(n), D_2(n)$ とおくと、2種類の円形欠陥によるすべての長さnビットの誤りの発生確率 $D_{nd}(n)$ は次式で表される。

$$D_{nd}(n) = D_1(n) + D_2(n)$$

(6-9)

上式から図6. 5の破線で示される誤り長分布が得られる。ここで、2種類の円形欠陥の平均直径を各々1bit, 100bitとした。この曲線は、合成ギルバートモデルとは全く独立に求めたにもかかわらず、実測値に良く一致する。

このとき、各欠陥の大きさと個数の関係は図6. 6のようになる。本図から、平均直径1bitの円形欠陥の場合、微小直径のものが多数存在するが、直径が10bit相当以上の欠陥はほとんど無いことになる。また、平均直径100bit相当の円形欠陥の場合、その個数は少ないものの最長400bit相当の長さの欠陥が存在することになる。

以上の仮説は、SEMを用いた媒体の大面积検査等の物理的観測により実証されるべきものだが、現在のところ誤り長さ分布が良い一致を示すことから、前記仮説は概ね妥当と考えられる。欠陥の発生原因としては、平均直径1bitの円形欠陥の場合は記録層への不純物の混入、ピンホールの発生等、平均直径100bitの円形欠陥の場合は基板の形状異常等が推定される。

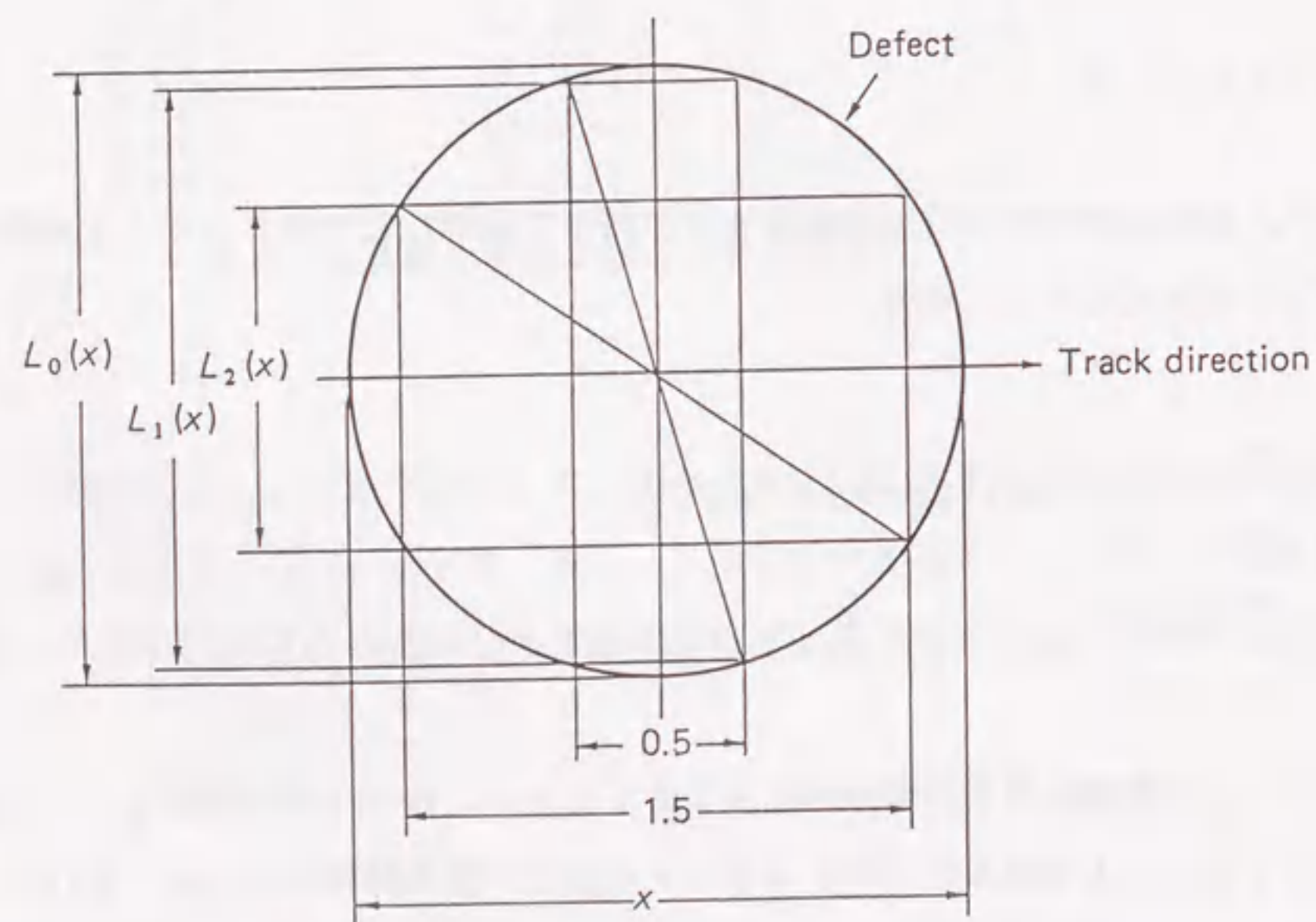


図6. 4 欠陥の形状

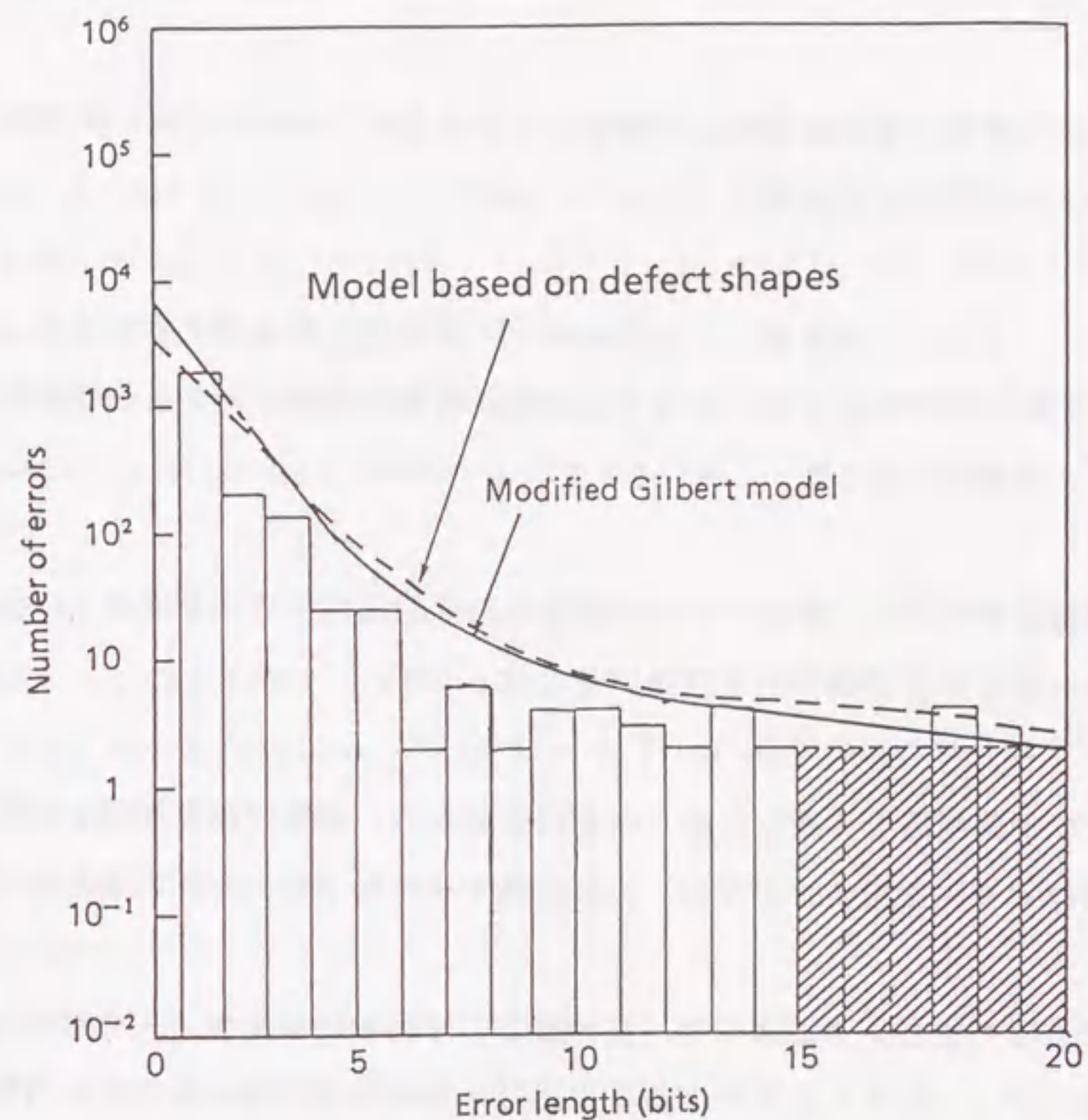


図6. 5 バースト誤り長分布の実測値と理論値

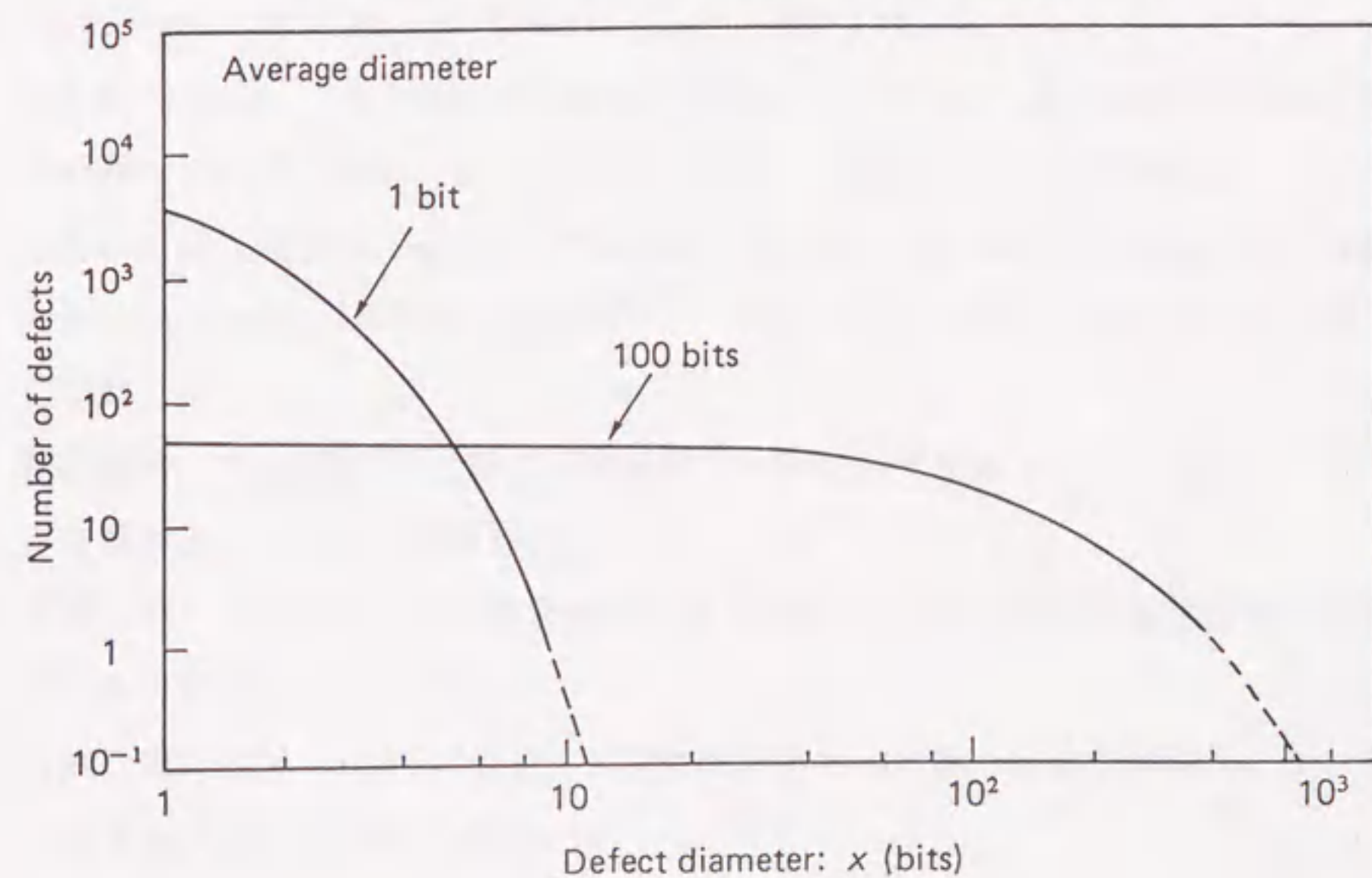


図6. 6 欠陥分布

6.4 結 言

本章においては、光ディスク媒体の誤り特性のモデル化を二つのアプローチで行った。得られた結果は以下のとおりである。

- (1) ギルバートモデルを変形した合成ギルバートモデルを適用することにより、誤り特性を統計モデル化した。本モデルが誤り特性の実測データを合理的に記述できることを明らかにした。
- (2) 上記統計モデルのパラメータ（状態遷移確率）を用いることにより、光ディスク媒体の誤り特性の数学的な取扱いを可能とした。
- (3) トラック間相関を考慮した誤りの測定結果から、媒体欠陥の形状を円形と仮定した統計モデルを示すとともに、上記合成ギルバートモデルとの照合を行った。

以上述べたようなモデリングによって、実測値として得られる光ディスク媒体の誤り特性を、次章以降のフォールトトレラント技術の設計・解析に結び付けることを可能としている。

[第6章の参考文献]

- (1) D.B.Kay, J.J.Wrobel and J.R.Horak, "Bit error measurements in solvent-coated optical disk media", Proc. of SPIE, 420, 130 (1983).
- (2) R.A.LaBudde and E.V. LaBudde, "Theoretical models for optical disk media error rates", *ibid.*, 420, 294 (1983).
- (3) J.H.Hoover and J.L.Waring, "A measured optical disk media error model and a compatible error management implementation", Tech. Digest of ODS, 67 (1984).
- (4) M.Moribe, Y.Hashimoto, M.Maeda, K.Itoh and S.Ogawa, "Bit-error reduction in magneto-optical disks", Proc. of SPIE, 899, 88 (1988).
- (5) W.E.Brown and A.M.Earman, "Determining error management strategies", *ibid.*, 899, 93 (1988).
- (6) E.N.Gilbert, "Capacity of a Burst Noise Channel", Bell Syst. Tech. J., 39, 1253 (1960).
- (7) S.Berkovits, E.L.Cohen and N.Zierler, "A model for digital error distributions", IEEE Annual Commun. Conv., 103 (1965).
- (8) J.J.Metzner, "An interesting property of some infinite-state channels", IEEE Trans. Information Theory, IT-11, 310 (1965).
- (9) B.D.Fritchman, "A binary channel characterization using partitioned Markov chains", IEEE Trans. Information Theory, IT-13, 221 (1967).
- (10) J.K.Alstad and M.K.Haynes, "Asperity heights on magnetic tape derived from measured signal dropout lengths", IEEE Trans. Magn., MAG-14, 5, 749 (1978).
- (11) 福田讓治, 土井利忠, "PCM磁気録音におけるドロップアウト統計モデル", 日本音響学会, 4-6-5 (1977).
- (12) 齊藤 実, "光ディスクの信号読取り誤り特性", 昭59年度電子通信学会総合全国大会予稿集, 7-82 (1984)
- (13) 齊藤 実, 武田 立, "光ディスクにおけるビット誤り特性の解析", テレビジョン学会誌, 40, 6, 528 (1986).

- (14) 松田文男, 尾崎 稔, 古川輝雄, 井上 徹, 田中邦鷹, “光ディスク用誤り訂正符号フォーマットの検討”, 光メモリシンポジウム'86, 139 (1986).
- (15) 村井克己, 臼井 誠, 沖野芳弘, 佐藤 勲, “光ディスク誤り訂正符号の高速復号のための一方式”, 信学技報, IT87-11, 9 (1987).

第7章 光ディスク記憶の交代処理方式

7.1 緒 言

光ディスク媒体は, 記録密度が非常に高い(約 $10^5 \sim 10^6$ bit/mm²)ことが特徴の一つであるが, 記憶の信頼性については問題点が残されている。これは, 媒体製造直後でも誤り率が $10^{-6} \sim 10^{-4}$ と高いことと, 媒体の経時劣化が比較的速いことである。これらの主な原因は, 1ビットの記録面積(約 $2.5 \mu\text{m}^2$)に比べて無視できない程度の大きさの欠陥が, 製造工程および経時劣化の間に発生することによっている。これらを解決する本質的手段は媒体材料・製造技術の改良であるが, 現在のところ飛躍的な改善は期待できない。

このような現状の媒体を用いて, 光ディスク装置を実現するためには, フォールトレラント技術の導入が有効であると考えられる⁽¹⁾。特に, 高い信頼性が要求されるコンピュータ用光ディスク装置の開発にあたっては, フォールトレラント技術を効率的に適用することが重要である。誤り制御の方策としては, 図7.1に示すような2段階構成が効果的と考えられている。第1段階では, 媒体製造時の欠陥に起因する誤りをデータ記録直後の再生による記録品質の検査に基づく交代処理技術により, 見掛け上零とする。第2段階では, 媒体の経時劣化に起因する誤りを, 誤り訂正符号の利用に代表される誤り訂正技術により実効上零にする⁽²⁾⁻⁽⁵⁾。

これらの冗長構成を具体的に設計するに当たっては, 装置性能とシステムコストが相反する関係にあるため, 最適な設計値を見出すことが必要である。このため, 媒体固有の各種物理特性(誤り特性, 劣化特性)を十分考慮した設計を行うことが重要である。特に, 交代処理方式の諸元は, 結果的に媒体の製造歩留り, すなわち媒体コストを左右することになる。現在のところ, これらに関する定量的な解析手法は確立されていない⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾。

本章では, これらの技術のうち, 交代処理技術に焦点を絞って, 光ディスク媒体の誤り特性を考慮した新たな交代処理設計手法について述べる。まず, 光ディスク記憶における交代処理技術の概要および各種方式について述べる。次に, 光ディスクのバースト誤り長分布の実測結果を状態遷移モデルで記述し, モデルパラメータ(状態遷移確率)からパー

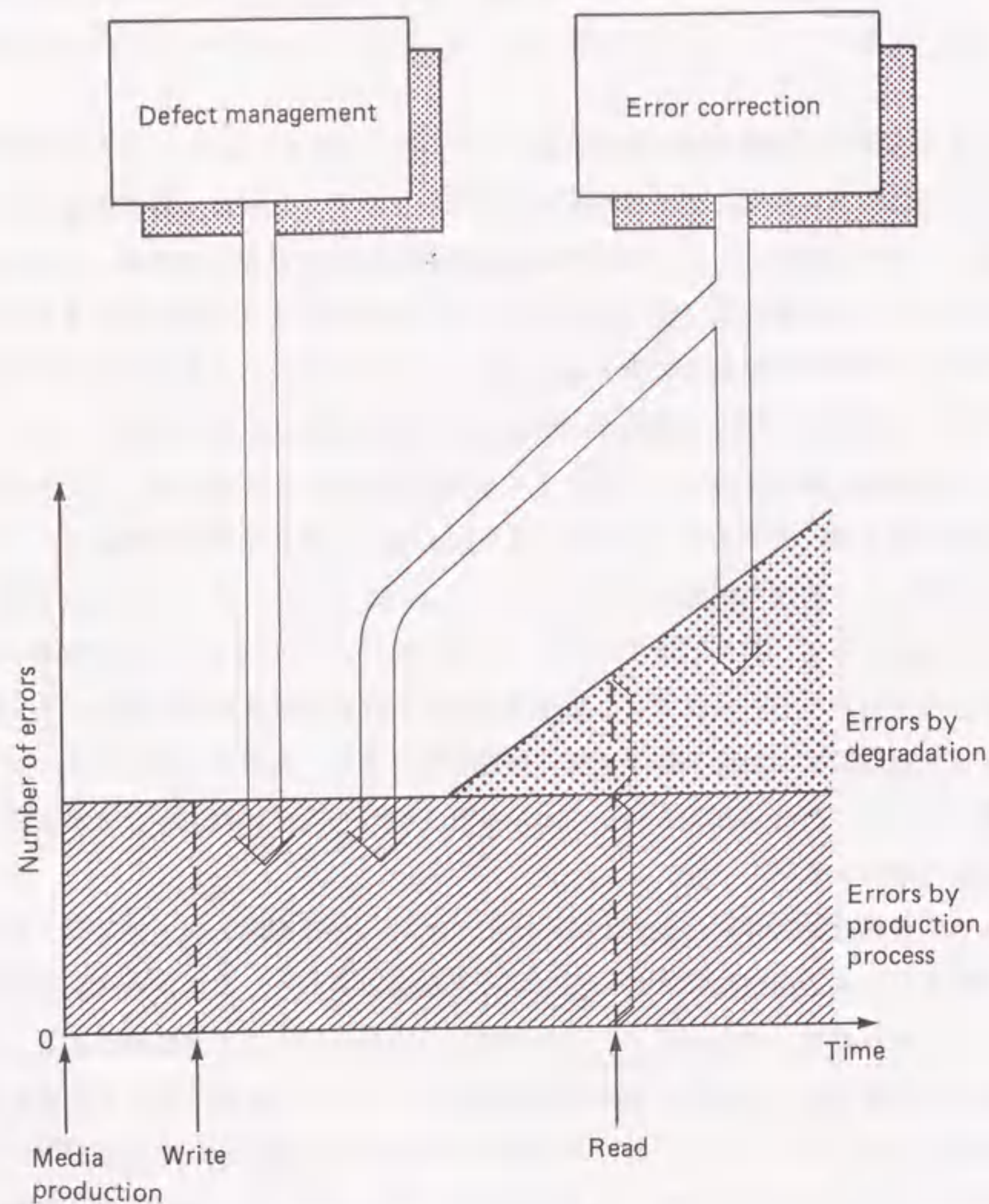


図 7. 1 光ディスク記憶における誤り制御ストラテジー

スト誤りの発生確率を導出する。この関数に基づき、交代セクタ・交代トラックの発生確率および媒体の欠陥救済確率を求め、交代処理方式の定量的な設計手法を明らかにする。最後に、交代処理方式と媒体製造歩留りとの関係にも言及する。

7. 2 交代処理方式の概要

情報格納単位であるセクタの中に散在する誤りの大部分は ECC で訂正可能なので、媒体上のすべての誤りを許容したまま誤り訂正処理方式のみで対処する方式が考えやすく、音声情報記憶用の CD (Compact Disk) 等で用いられている。しかし、光ディスク媒体の場合、媒体自体の物理・化学的な経時劣化に加えて、人為的な損傷・汚濁等による誤り率の増加も有り得るので、記録直後の誤りが ECC で救済できたからといってそのまま見過ごすのは信頼性確保上は危険と言える。したがって、記録直後には、必要ならば交代処理（以下、オンライン交代処理と呼ぶ）により記録時点での誤りが一定水準以下であることをまず保証し、再生時には、記録後経時劣化等により増加した誤りを ECC により救済するという、2 段階の対策を講じることによって、媒体の信頼性・寿命の改善を図ることが必要である⁽⁴⁾。

このようなオンライン交代処理を実現するため、記録直後の再生動作 (RAW: Read after Write) により検出されるセクタ当たりのバイト誤り数 N_{raw} すなわち記録品質に応じて、記録済みセクタを表 7. 1 のように分類する。ここで、 N_{std} はセクタ当たり許容されるバイト誤り数とする。まず、バイト誤りが 1 個以上検出されたセクタを不良セクタと称することにする。次に、不良セクタのうち、バイト誤り数が N_{std} 以下のセクタを使用許容セクタと定義し、交代処理は施さずに使用する。見逃されたバイト誤りは、付与される ECC を用いて訂正できるので、見掛け上は上位装置には通報されない。さらに、バイト誤り数が N_{std} 以上のセクタを使用不可セクタと定義し、このセクタをオンライン交代処理の対象とする。

一般に、光ディスクにおける交代処理とは、媒体上のデータ記録フォーマットに従い、セクタ・トラック等を単位として数段階のブロックに階層化し、各段階において判定される記録品質すなわち交代処理基準を満足できない使用不可ブロックを、予め用意してある交代ブロックに切り換えるものである。これは、記録直後のセクタのバイト誤りを零または所定の値以下に保証することと等価である。

表7. 1 記録品質によるセクタの分類

RAW時のバイト誤り数 N_{raw}	セクタ名称		交代セクタの使用
0	良セクタ		なし
$1 \leq N_{raw} \leq N_{std}$	不良セクタ	使用許容セクタ	なし
$N_{std} < N_{raw}$	セクタ	使用不可セクタ	あり

次に、光ディスク記憶における各種の交代処理方式を分類し、比較評価する^{(9),(10)}。表7. 2に示すように、交代処理方式は Linear-replacement方式(On-the-fly方式)と Mapping方式(Pre-scan方式)とに大きく二分される。前者は記録再生動作時のリアルタイム処理であり、従来の記憶装置には無かった光ディスク記憶固有の新しい交代処理方式である。記録直後に再生動作を行い、その記録品質を検査して交代処理基準を満足できない場合、即座に交代処理を行う。なお、交代先においても交代処理基準を満たせない場合は再度交代処理を繰り返す。

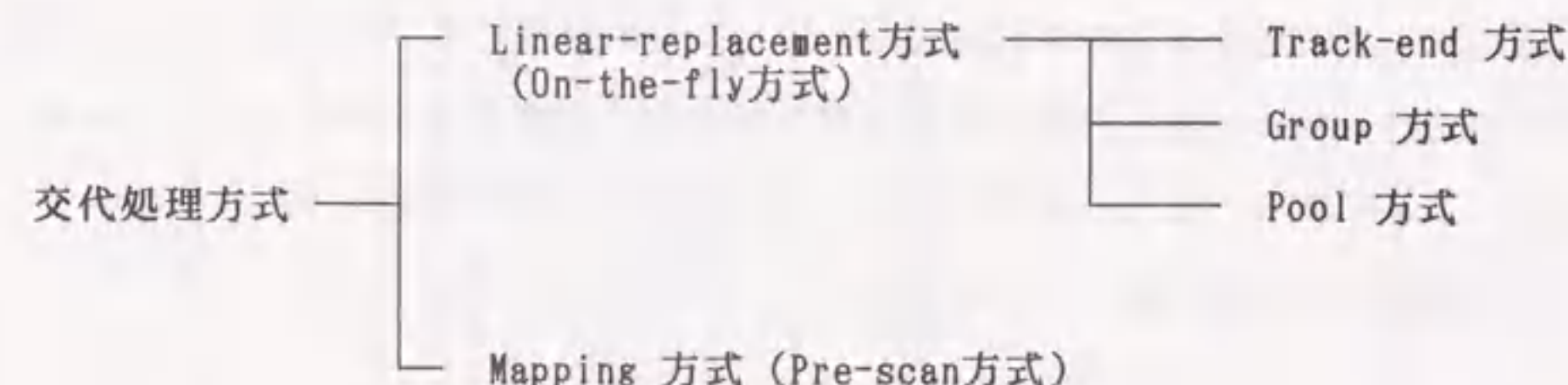
Linear-replacement方式は、媒体面上の交代領域の配置の仕方によって、さらに3方式に分類される。Track-end方式は、各トラックに交代セクタを用意するもので、シーク動作を伴わない高速処理が可能である。Group方式は、複数トラック毎に交代セクタを配置する交代処理方式である。媒体欠陥の大きさ等を考慮することにより冗長効率の良い構成が可能である。Pool方式では、最内周または最外周付近にまとめて交代セクタを設けるもので、交代アルゴリズムが最も簡素化できる。

一方、Mapping方式では、媒体の使用に先立って全面にわたって記録品質の検査を行い、欠陥セクタをすべて洗出し交代しておく。すなわち、初期状態では誤りが零であることを保証する。周知のとおり、光ディスク媒体は経時劣化を起こすので、初期保証の後に発生した欠陥セクタに対しては、上記Linear-replacement方式を用いることになる。Mapping方式では、検出された欠陥セクタはその直後のセクタに交代されるので、後続のセクタの論理アドレスが変わることになる。すなわち、物理アドレスと論理アドレスの変換が必要となるが、光ヘッドのアクセス動作を伴わない迅速な交代処理が可能である。

以上、説明したすべての交代処理方式において、交代先アドレス及び交代元アドレスを示す交代情報の管理が必要となる。交代情報の記録方法としては、①光ディスク媒体自体の特定領域に面内のすべての欠陥セクタに関する交代情報を集中記録する方法と、②欠陥セクタの中のユーザデータのあとに交代情報を個別に記録する方法がある。①の方法を用いる場合は、記録再生動作に先立って交代情報をホスト装置のRAMに読み込んでおき、欠陥セクタへの記録再生命令を即座に対応する交代セクタに切り替えることにより、交代セクタへの1回のシーク動作で処理する。

なお、通常130mm径光磁気ディスク装置においては、初期化時の欠陥セクタに対しては Mapping方式を用い、経時劣化による欠陥セクタについては、Linear-replacement方式のうちのPool方式を用いる。交代情報の記録については、上記2方法を併用している。

表7. 2 交代処理方式の分類



7. 3 交代発生確率の解析⁽¹¹⁾⁻⁽¹³⁾

7. 3. 1 バースト誤り発生確率

交代処理方式の設計手法を構築するには、まず、光ディスク媒体の誤り特性の実態を適切に表現できる数学モデルが必要である。この数学モデルとして、前章で明らかにした合成ギルバートモデル(MGM: Modified Gilbert Model)を用いる。

前記MGMにおいては、長さ*i*ビットのバースト誤りとなる確率*P*(*i*)は、状態遷移確率を用いて次式で与えられる。

$$P(i) = h \cdot t_1 \cdot (p_{12} \cdot p_{22}^{i-1} \cdot p_{21} + p_{13} \cdot p_{33}^{i-1} \cdot p_{31}) + s \cdot t_1 \cdot p_{11} \quad (7-1)$$

但し, $t_1 = p_{21} \cdot p_{31} / (p_{21} \cdot p_{31} + p_{12} \cdot p_{31} + p_{13} \cdot p_{21})$ (7-2)

次に, $D(x)$ を x ビット以上の長さのバースト誤りの発生確率と定義すると, $D(x)$ は上記 $P(i)$ を用いて次式で与えられる.

$$D(x) = \sum_{i=x}^{\infty} [P(i)] \quad (7-3)$$

一例として, ある光ディスクのバースト誤り長分布の実測結果を図7. 2にヒストグラムの形で示す. 誤りが長くなると発生頻度は減少するという一般的傾向に加え, 従来の磁気記録媒体では考えられないような相当長い誤りも僅かであるが存在するという特徴を有する. その誤り率は 1.36×10^{-6} である. これらの誤りのほとんどは媒体上の特定位置で固定的に発生している.

図7. 2のバースト誤り長分布の実測値からMGMの状態遷移確率を算出する. なお, 本実験においては, 媒体欠陥に起因する固定的な誤りのみが検出できたものとみなして, $s=0$ とおくことにする. また, 実効的にすべての固定的誤りを検出しているので $h=1$ とする. 以上の仮定のもとに表7. 3を得る.

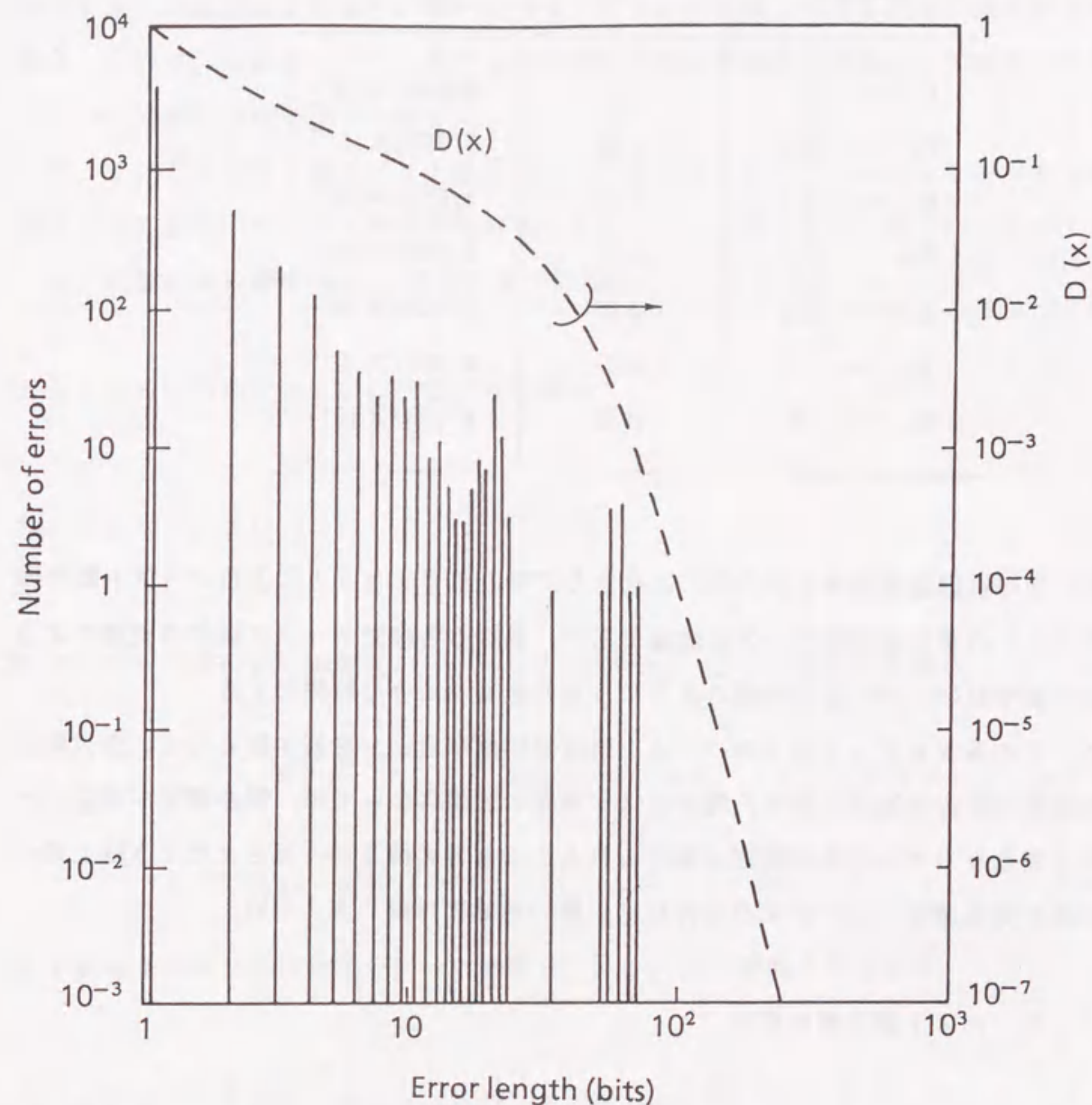


図7. 2 バースト誤り長分布の実測例

表7. 3 状態遷移確率の算出値

状態遷移	表記	数 値
G → G	p11	9.9999×10 ⁻¹
G → Bs	p12	5.7572×10 ⁻⁷
G → B _l	p13	1.6751×10 ⁻⁸
Bs → G	p21	5.2000×10 ⁻¹
Bs → Bs	p22	4.8000×10 ⁻¹
B _l → G	p31	6.6667×10 ⁻²
B _l → B _l	p33	9.3333×10 ⁻¹

表7. 3の状態遷移確率を式(7-3)に代入して得た長さxビット以上のバースト誤り発生確率D(x)の算出値を図7. 2に破線で示す。多数の各種光ディスク媒体の実測によると、この確率D(x)は一般に同図のようにうねりをもつことを特徴とする。

以下、この長さxビット以上のバースト誤り発生確率D(x)を基本量として、交代処理方式を定量的に取り扱う。なお、光ディスク媒体の種類によっては、誤り特性が図7. 2と大きく異なりモデルが多少変更を強いられることも考え得るが、長さxビット以上のバースト誤り発生確率D(x)が求められれば以降の議論には差し支えない。

7. 3. 2 バイト誤り率の導出

バイト誤り率は、直接測定することも可能ではあるが、媒体製造側にとって有益なビット単位の誤り情報が損なわれるので、実測はビット単位が便利である。この誤り特性の実測に基づく前記MGMのモデルパラメータ等からバイト誤り率が求められる。

今、バイト誤り率Ebをバイト内に1個以上のビット誤りが発生する確率とする。これは、次式で与えられる⁽¹¹⁾。

$$E_b = 1 - \sum_{j=1}^8 \left[\sum_{y=0}^8 \{ P_j(y) (1-s)^{8-y} (1-h)^y \} \right] \quad (7-4)$$

但し、P_j(y)は特定のバイト内にj個のビット誤りが存在する場合において、yビットが状態Bsまたは状態B_lにあり、残りの(8-y)ビットが状態Gにあるという条件付き確率である。これは、合成ギルバートモデルの7個の状態遷移確率の関数として表現できる。このP_j(y)の導出過程を以下に記す。

まず、シンボル内に1個のビット誤りが存在する場合において、bビットのうちyビットが本文中の合成ギルバートモデルにおいてBs、B_l状態にあり、残りの(b-y)ビットがG状態にある確率Ps1(y)を次のように場合分けして求める。

- (1) シンボル内の全ビットがG状態になる場合

$$P_{s1}(y) = t_1 p_{11}^{b-1} \quad (7-5)$$

- (2) シンボルの最初或いは最後のビットを含んでBs、B_l状態になる場合

$$P_{s1}(y) = t_1 p_{11}^{b-y-1} \cdot (p_{12} p_{22}^{y-1} + p_{13} p_{33}^{y-1}) + t_2 p_{11}^{b-y-1} \cdot p_{21} p_{22}^{y-1} + t_3 p_{11}^{b-y-1} \cdot p_{31} p_{33}^{y-1} \quad (7-6)$$

- (3) シンボルの最初及び最後のビットを除いてBs、B_l状態になる場合

$$P_{s1}(y) = t_1 p_{11}^{b-y-2} \cdot (p_{12} p_{22}^{y-1} p_{21} + p_{13} p_{33}^{y-1} p_{31}) \quad (7-7)$$

- (4) シンボル内全ビットがBs、B_l状態になる場合

$$P_{s1}(y) = t_2 p_{22}^{b-1} + t_3 p_{33}^{b-1} \quad (7-8)$$

上記(1), (2), (4) の場合は各々一通りであるが, (3) の場合は $(b-y-1)$ 通りがある。したがって, $Ps_1(y)$ は次式で与えられる。

$y=0$ のとき,

$$Ps_1(y) = t_1 p_{11}^{b-1} \quad (7-9)$$

$1 \leq y \leq b-2$ のとき,

$$Ps_1(y) = 2 t_1 p_{11}^{b-y-1} \cdot (p_{12}^{y-1} p_{22} + p_{13}^{y-1} p_{33}) + (b-y-1) \cdot t_1 \cdot p_{11}^{b-y-2} \cdot (p_{12} p_{22}^{y-1} p_{21} + p_{13} p_{33}^{y-1} p_{31}) \quad (7-10)$$

$y=b$ のとき,

$$Ps_1(y) = t_2 p_{22}^{b-1} + t_3 p_{33}^{b-1} \quad (7-11)$$

と各々表される。

具体的な算出に当たっては, 等比級数の和の公式等を用いることにより, 更に簡略化できる。また, シンボル内にビット誤りが j 個 ($2 \leq j \leq b$) 存在する確率 $Ps_j(y)$ についても, 上記同様, 合成ギルバートモデルの状態遷移確率から解析的に導出される。

なお, すべての誤りが1ビットずつ相異なるシンボルに分散して分布するという特殊な場合, シンボル誤り率は誤り率を単に b 倍した値に等しい。しかし, 実際の誤り長分布としては, 同一シンボル内に2ビット以上存在する可能性があるため, シンボル誤り率は誤り率の b 倍より小である。

今, シンボルを8ビットからなるバイトとすると, $b=8$ とおくことによりバイト誤り率が得られる。具体的な計算例として, 表7.3の状態遷移確率から上式を用いてバイト誤り率 E_b を求めると 5.51×10^{-6} となる。得られた厳密なバイト誤り率は, 誤り率の8倍 (1.09×10^{-5}) よりもかなり小さくなる。これは, すべての誤りが1個ずつ相異なるバイトに分散しているわけではないので当然の結果である。

7.3.3 1次交代セクタ発生確率の導出

交代処理方式として, ここでは図7.3に示すように交代処理を2段階の交代を行うこととする。第1段階では, 交代処理基準(セクタ当たりの許容バイト誤り数)を満足できない使用不可セクタを, 1次交代セクタに割り付ける。多くの場合, 1次交代セクタとしては, 同一ユーザトラック内の交代専用セクタを利用する。第2段階では, 第1段階の処理でユーザトラック内の1次交代セクタで納まらなかった使用不可セクタのデータを, 媒体上に予め用意された交代専用トラック内のセクタすなわち2次交代セクタに記録する。

記録済みセクタの良否の判定においては, ECCの訂正能力に見合う交代処理基準を設定する。具体的には, 記録直後の再生信号の品質検査に従い, 交代処理基準を満足できない危険なセクタは使用不可セクタとみなし, 用意してある1次交代セクタに2重書きする。このように記録時における誤りを許容するという概念は, 従来の磁気メモリには無かった考え方である。これが後述のように光ディスクでは媒体の製造歩留りの改善に大いに効果を発揮するので, 交代処理基準の正確な予測に基づく設定が重要である。

今, セクタ当たり z 個以下のバイト誤りを許容したとき, 1次交代セクタ発生確率 $E_s(z)$ は次式で与えられる。

$$E_s(z) = 1 - N(z) \quad (7-12)$$

但し, $N(z)$ はセクタ内のバイト誤りが z 個以下である確率である。

これに必要な $N(z)$ は, 長さ x ビット以上のバースト誤り発生確率 $D(x)$ を用いて次式で与えられる。

$$N(z) = (1 - E_b)^s + s \cdot E_b \cdot (1 - E_b)^{s-1} \cdot \frac{1}{8} \sum_{i=8(z-1)+1}^{8z} [1 - D(i+1)] \quad (7-13)$$

但し, s はセクタ内全バイト数, E_b はMGMパラメータに基づいて得られたバイト誤り率である。上式は, セクタ当たり1箇所以上のバースト誤りのみによるものだが, 誤り率が高い場合にはセクタ当たり2箇所以上のバースト誤りの発生確率も十分考慮すべきである。これらを含めた厳密解の導出手順は以下のようなになる。

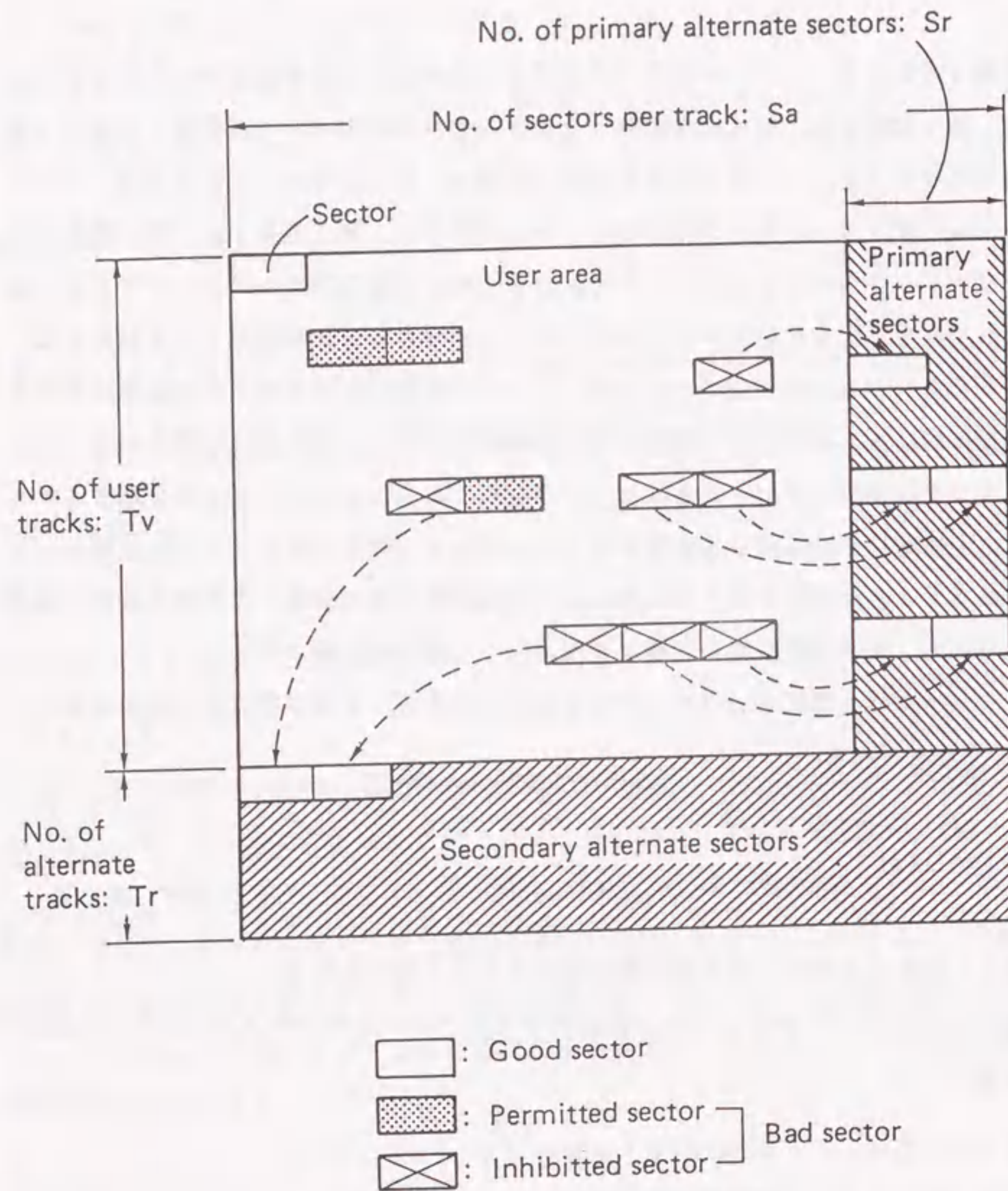


図 7. 3 交代処理方式の概念図

まず、セクタ内に m 回の誤りが発生する確率 $Q(m)$ は、MGMパラメータから導出されるバイト誤り率 E_b を用いて次式で表される。

$$Q(m) = s C_m E_b^m (1 - E_b)^{s-m} \quad (7-14)$$

但し、 s はセクタ内の全バイト数。

また、1回の誤りの長さが n バイト以内に納まる確率 $R(n)$ は、誤りがバイト間にまたがること等を考慮して、長さ x ビット以上のバースト誤り発生確率 $D(x)$ を用いて次式で与えられる。

$$R(n) = \frac{1}{8} \sum_{i=8(n-1)+1}^{8n} [1 - D(i+1)] \quad (7-15)$$

上記 $Q(m)$ 、 $R(n)$ を用いて、例えば $N(0)$ 、 $N(1)$ 、 $N(2)$ 、 $N(3)$ は以下のように表される。

$$N(0) = Q(0) \quad (7-16)$$

$$N(1) = Q(0) + Q(1) \cdot R(1) \quad (7-17)$$

$$N(2) = Q(0) + Q(1) \cdot R(2) + Q(2) \cdot R(1)^2 \quad (7-18)$$

$$N(3) = Q(0) + Q(1) \cdot R(3) + Q(2) \cdot R(1) \cdot R(2) + Q(3) \cdot R(1)^3 \quad (7-19)$$

$z \geq 4$ の場合も同様に解析的に得られる。このようにして求めた $N(z)$ を式(7-12)に代入することにより、セクタ当たり z 個以下のバイト誤りを許容したときの1次交代セクタ発生確率 $E_s(z)$ が得られる。

具体例として、図 7. 2 に示した長さ x ビット以上のバースト誤り発生確率 $D(x)$ を用いて、バイト誤り率と1次交代セクタ発生確率との関係を算出した結果を図 7. 4 に示す。このとき、セクタ当たりのデータバイト数を 1 k byte、セクタ当たりの許容バイト誤り数 z を 0 ~ 3 個と仮定した。現在の光ディスク媒体のバイト誤り率は $10^{-5} \sim 10^{-4}$ 程度である。したがって、1次交代セクタ発生確率は全く誤りを許容しない場合は相当高いが、誤りを1バイト許容するだけで1桁、3バイトまで許容すると2桁と急激に低下する。

このように記録直後の信号品質の検査に基づいて誤りがある程度許容するという方法は、1次交代セクタ発生確率を低減するうえで効果的であるが、次のような点に留意する必要がある。第1に、使用許容セクタは、経時劣化後の誤り数がECCの訂正能力以上になる確率が他のセクタよりも高くなることである。なぜならば、経時劣化に伴い誤りを引き起こす媒体上の欠陥部分は、それを核にして拡大するという物理的傾向があるので、記録時点では許容できた短い誤りが経時後長大な誤りに成長する可能性が高い。さらに、このような長大な誤りによるPLL(Phase-Locked Loop)回路の同期ずれ及び変調方式に依存する誤り伝播等によって、経時劣化に伴う媒体上の欠陥長の増加に比べ、再生信号から検出される誤り長の増加のほうが見かけ上は大きくなる可能性が十分あるからである。第2に、使用許容セクタは、実際の使用時においては必ず誤り訂正処理を施されることになるが、誤り数が多いほど訂正時間が長く、場合によっては装置スループットの低下を生じさせることもある。

したがって、上記の二つの留意点と適用するECCの訂正能力・訂正処理時間等とを勘案して余裕のある交代処理基準を設定すべきである。例えば、多くの光ディスク装置で使用されている数バイト誤り訂正用のガロアフィールドGF(2⁸)上で定義される短縮化Reed-Solomon符号の場合は、いかなる訂正アルゴリズム⁽¹⁴⁾⁻⁽¹⁶⁾を用いても4バイト誤り以上の訂正時間が急増するため、セクタ当たりの許容バイト誤り数は1~3 byte/セクタとすべきである。

7. 3. 4 2次交代セクタ発生確率の導出

上記使用不可セクタのうち、1次交代セクタすなわち同一ユーザトラック内の交代セクタに納まらないセクタいわゆるあふれセクタは、予め用意された交代専用トラック内の2次交代セクタに置き換える。この別トラックに確保されている2次交代セクタ領域の使用には、通常100gr前後の重量の光ヘッド全体が移動するシーク動作により数10msを要し、さらに数10msの回転待ちを伴うので、データ処理性能上その発生確率はなるべく小さくする必要があり、以下に、この2次交代セクタ発生確率を前節で求めた1次交代セクタ発生確率を用いて導出する。

前提として、図7. 3に示すようにユーザトラック当たりの全セクタ数をS_a、交代セクタ数をS_rとする。1トラック内に使用不可セクタが(S_r + 1)個以上発生した場合、

交代トラック内の2次交代セクタが使用されるので、その発生確率E_tは次式となる。

$$E_t = \sum_{i=S_r+1}^{S_a} \{ C \cdot E_s^i \cdot (1 - E_s)^{S_a-i} \} \quad (7-20)$$

例えば、図7. 4の1次交代セクタ発生確率E_sを用いて、2次交代セクタ発生確率E_tを算出した結果を図7. 5に示す。このとき、トラック当たりの全セクタ数S_aは32個、1次交代セクタS_rは0~4個と仮定した。同図からバイト誤り率10⁻⁴においては、1次交代セクタが1個増えると2次交代セクタ発生確率は約2桁ずつ低下することがわかる。

以上のようにして、2段階からなる交代処理の発生確率を導出したが、さらに、交代処理方式の階層がより多い場合においても、同様にして交代発生確率を逐次解析的に導出し得る。

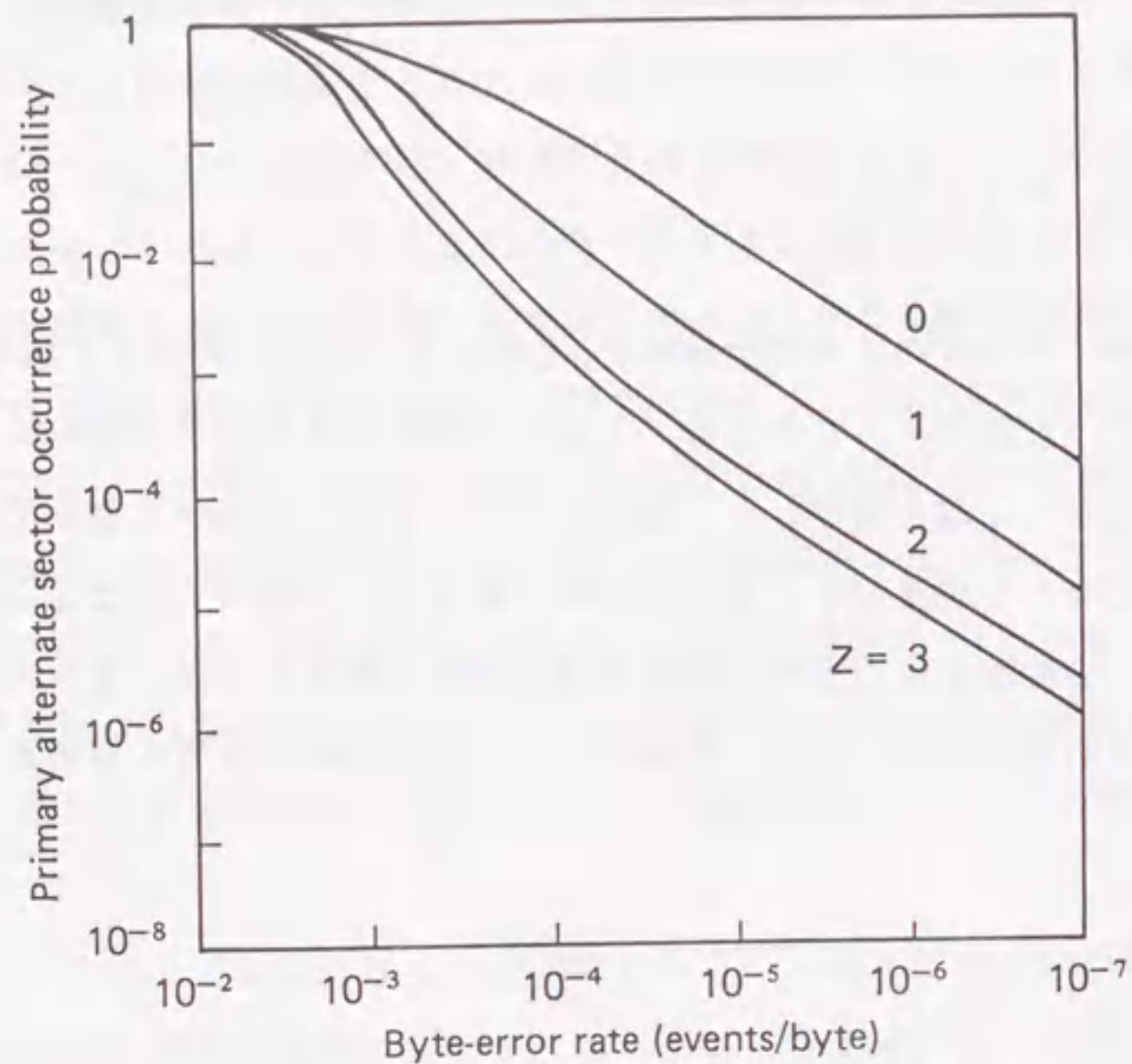


図 7. 4 1次交代セクタ発生確率

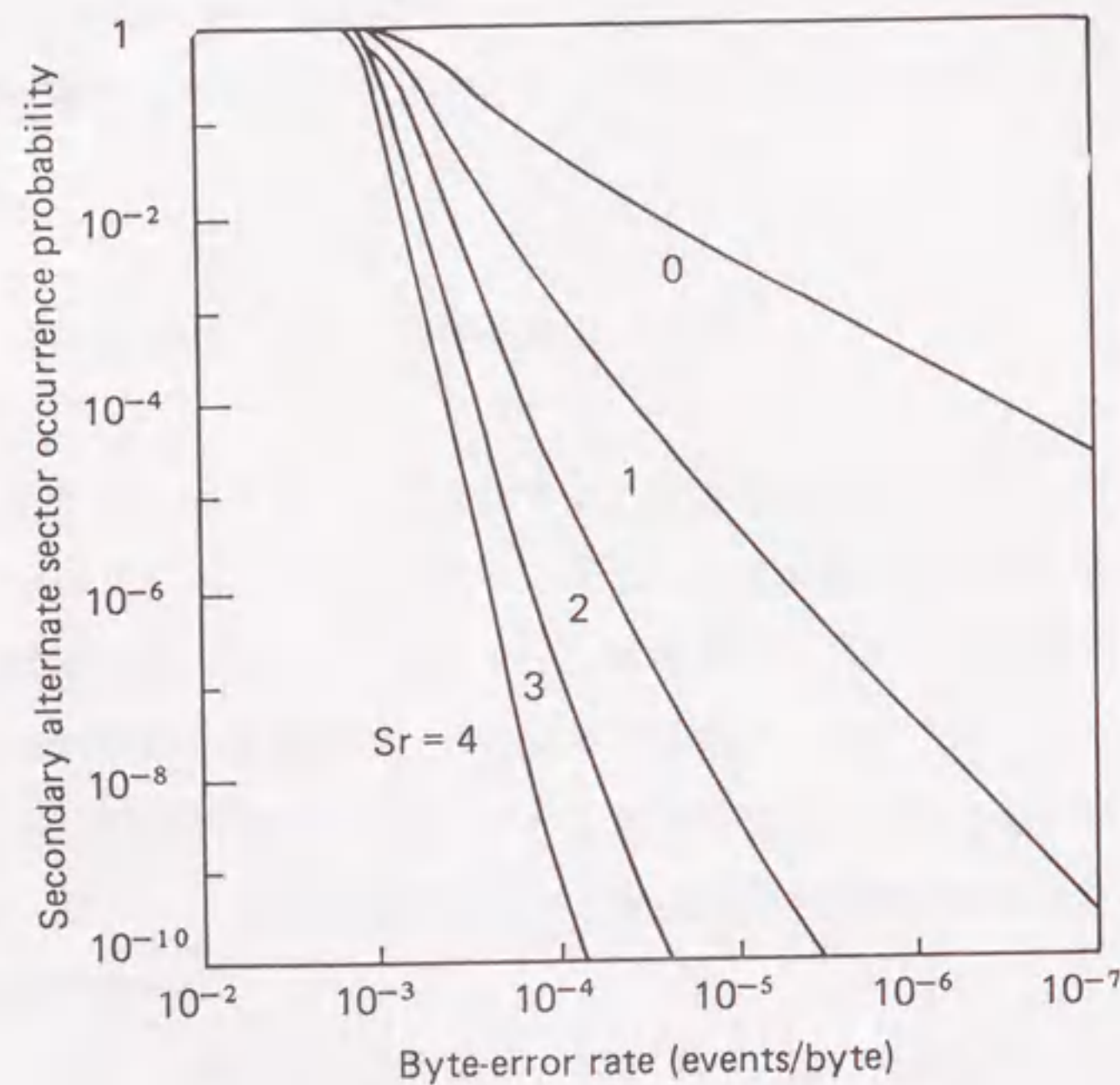


図 7. 5 2次交代セクタ発生確率

7. 4 欠陥救済確率の解析

量産時には数百万枚にも達するであろう光ディスク媒体の欠陥をすべて救済できるようにするには、設定した交代セクタ数及び交代トラック数で十分か否かを推定しておくことが、実用上の重要課題である。今、多数の媒体を用意したときに、ユーザトラック内の1次交代セクタをあふれる使用不可セクタ数が交代トラック内の2次交代セクタの総数以下である媒体の割合を欠陥救済確率と定義する。まず、1次交代セクタで納まらない使用不可セクタが存在するユーザトラックが q 本である媒体の発生確率 $P_m(q)$ は、Poisson分布により次式で与えられるものと仮定する。

$$P_m(q) = \frac{e^{-\lambda} \cdot \lambda^q}{q!} \quad (7-21)$$

但し、 λ は1次交代セクタで納まらない使用不可セクタが存在するユーザトラック数の期待値であり、これは次式で表される。

$$\lambda = \frac{T_v}{S_a - S_r} \cdot \sum_{i=S_r+1}^{S_a} \{ (i - S_r) \cdot \frac{C \cdot E_s^i \cdot (1 - E_s)^{S_a - i}}{S_a^i} \} \quad (7-22)$$

但し、 T_v は媒体片面当たりのユーザトラック数である。上式から欠陥救済確率 η は、2次交代セクタ用として用意された交代トラック数を T_r とすると次式で与えられる。

$$\eta = \sum_{q=0}^{T_r} P_m(q) \quad (7-23)$$

具体例として、図7.5の2次交代セクタ発生確率の算出結果に基づき、上式から求めた欠陥救済確率 η の算出例を図7.6、図7.7に示す。

図7.6は、交代トラック数の増加による欠陥救済確率の改善効果を示している。仮定として、セクタ当たり3個のバイト誤りを許容し、1トラック32セクタ当たり4セクタを交代セクタとし、トラック総数は20000本としている。図7.6から、交代トラックの増加に伴い欠陥救済確率は改善されるが、その効果は徐々に頭打ちになることがわかる。こ

の算出例では改善効果からみて、交代トラック数は 100トラック程度が適当と考えられる。これは、全トラック数の約 5%に当たるが、トラック内交代セクタで処理しきれない欠陥の多いトラックを有効利用するための補償と見なすことができる。

図 7. 7 は、欠陥救済確率に及ぼすバイト誤りの許容効果を表している。セクタ当たり 1 バイト誤りを許容することによりバイト誤りを全く認めない場合に比べ、バイト誤り率が約 1桁悪い媒体も使用可能となることがわかる。この結果から、従来の記憶装置の誤り制御には無かった、記録直後の再生における固定的な誤りがある程度許容するという考え方が、現状の光ディスクの媒体製造レベルにおいては極めて有効であると言える。このような考え方は、Reed-Solomon符号等の強力な訂正能力を有する ECC 専用 L S I が着々と開発されつつあることを背景に実用上有効になったものである。

次に、図 7. 7 を用いて欠陥救済確率と媒体製造歩留りとの関係を考察する。図 7. 7 に示すような 2×10^{-4} 付近にバイト誤り率のピークをもつ分布を有する媒体ロットを想定し、ECC は 3 バイト以上の誤りを訂正できるものと仮定する。この場合、欠陥救済確率曲線とバイト誤り率の分布曲線とが重なった部分に対応する媒体が全面にわたって使用可能な媒体と言える。例えば、セクタ当たりの許容バイト誤り数を 1 バイトとすると、上記 2 曲線の重なり部分（斜線部）からして歩留りは約 50%であるが、許容バイト誤り数を 3 バイトに増加することにより歩留りはほとんど 100%とみなせる。このように、一定数のセクタ内バイト誤りを許容することにより、光ディスクの媒体製造歩留りを飛躍的に改善できるといえる。

さらに、図 7. 7 からわかるように欠陥救済確率はあるバイト誤り率以上になると急激に減少する特性を有するので、現実の媒体バイト誤り率の分布曲線のピークがバイト誤り率の高い方にシフトしているような場合は、交代処理方式の設計値が媒体歩留りに大きく影響する可能性があることがわかる。

したがって、実際のバイト誤り率の媒体間ばらつきを十分把握したうえで、ここで述べた交代処理方式の設計法を用いることが重要である。この結果として、バイト誤り率分布曲線が欠陥救済確率曲線で完全に包含され、媒体製造歩留りが 100%に十分近くなるような交代処理方式・構成を明らかにできる。

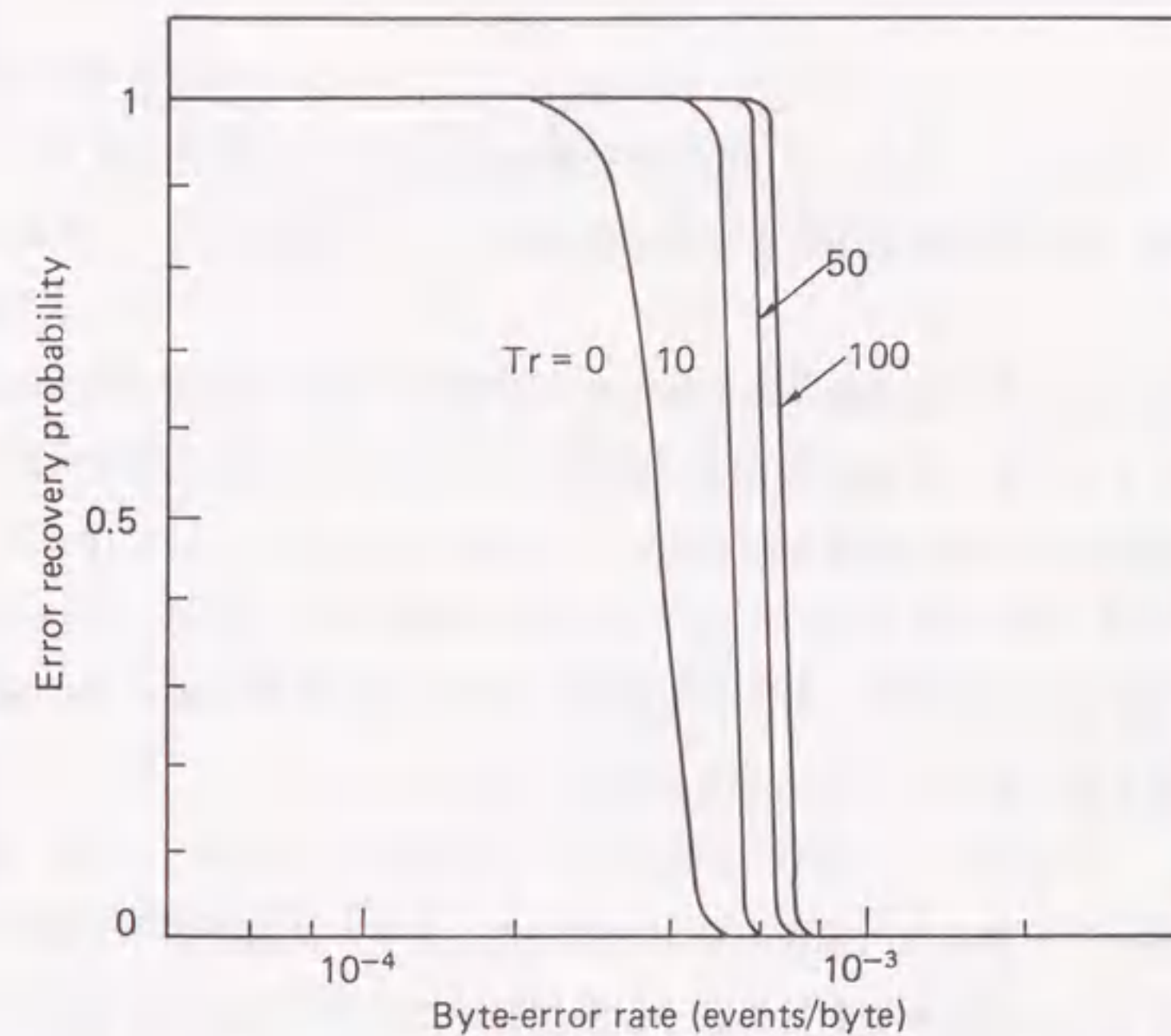


図 7. 6 欠陥救済確率とバイト誤り率との関係

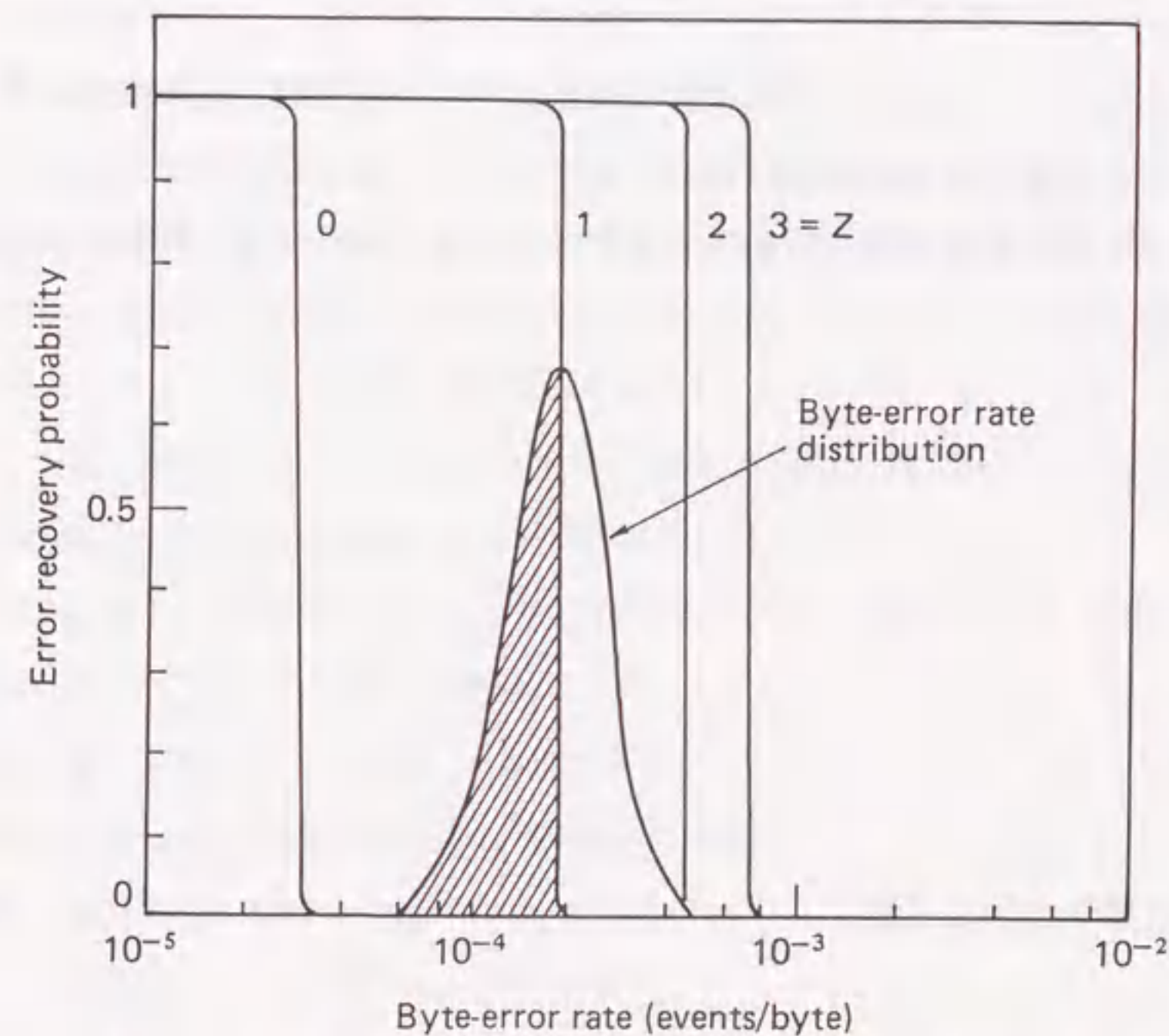


図 7. 7 欠陥救済確率に及ぼすバイト誤りの許容効果

7.5 結 言

本章においては、光ディスク媒体の誤り特性の実測結果に基づく、交代処理方式の設計法を新たに提案した。その内容は以下のとおりである。

- (1) バースト誤り長分布の測定結果を前章で述べた統計モデルで記述することにより、そのモデルパラメータ（状態遷移確率）を用いて長さ x ビット以上のバースト誤り発生確率およびバイト誤り率を導出した。
- (2) 長さ x ビット以上のバースト誤り発生確率、バイト誤り率等を用いることにより、解析的に1次及び2次交代セクタ発生確率等を導出した。
- (3) 交代発生確率から媒体の欠陥救済確率を導いた。この欠陥救済確率とバイト誤り率のばらつきを十分考慮することにより、媒体製造歩留りを推定する手法を明らかにした。

ここで得られた光ディスク媒体の誤り特性に最適化した交代処理方式の新設計手法は、媒体フォーマットの決定及び各種装置性能の算定にも有効である。さらに、本設計手法は、光ディスクのみならず高記録密度化の進む磁気ディスク等においても、将来は同様に適用する必要が生じよう。

[第7章の参考文献]

- (1) 当麻喜弘, “フォールトトレラントとその関連技術”, 信学論, 59, 4, 359 (1976).
- (2) K.Bulthuis, M.G.Carasso, J.P.Heemskerk, P.J.Kivits, W.J.Kleuters and P.Zalm “Ten billion bits on a disk”, IEEE Spectrum, 26 (1979).
- (3) R.F.Kenville, “Hardware issues for optical mass storage systems”, Digest of Papers, Fifth IEEE Symposium on Mass Storage Systems, 52 (1982).
- (4) 齊藤 実, “光ディスクにおける記憶制御技術”, 電気学会第9回光磁気記録技術専門委員会資料, 1988.
- (5) 齊藤 実, “光ディスクにおける誤り特性を考慮した欠陥救済法”, 第6回光ディスク懇談会資料, 1988.
- (6) S.L.Corsover and C.H.Thomas, “Error management techniques for optical disc systems”, Proc. of SPIE, 299, 33 (1981).
- (7) S.R.Perera and M.O'Keefe, “Storage Technology Corporation optical storage error control”, Tech. Digest of ODS, 56 (1984).
- (8) M.Miyazaki and K.Nishi, “Hitachi optical disk subsystems”, Digest of Papers, 7th IEEE Symposium on Mass Storage Systems, 62 (1985).
- (9) T.Takeda and M.Saito, “Evaluation of sector alternation methods for optical disks”, Trans.IEICE, 71, 4, 355 (1988).
- (10) 武田 立, 齊藤 実, “光ディスク交代処理方式の比較評価”, 昭63年度電子通信学会総合全国大会予稿集, 2-15 (1988).
- (11) M.Saito and T.Takeda: “Study on defect-relief system for optical disks”, Trans.IEICE, 69, 4, 452 (1986).
- (12) 齊藤 実, 武田 立, “光ディスク欠陥救済方式の考察”, 昭61年度電子通信学会総合全国大会予稿集信学全大, 1739, (1986).
- (13) 齊藤 実, 武田 立, “光ディスクにおけるビット誤り特性を考慮した交代処理方式”, 信学論(C), J71-C, 2, 287 (1988).
- (14) W.W.Peterson, “Encoding and error-correction procedures for the Bose-

Chaudhuri codes", IEEE Trans. Inf. Theory, IT-6, 459 (1960).

(15) J.L.Massey, "Shift-register synthesis and BCH decoding", IEEE Trans. Inf. Theory, IT-15, 122 (1975).

(16) Y.Sugiyama, M.Kasahara, S.Hirasawa and T.Namekawa, "A method for solving key equation for decoding Goppa Codes", Inf. & Control, 27, 87 (1975).

第8章 光ディスク記憶の誤り訂正方式

8.1 緒言

デジタル記憶用光ディスク装置の重要な開発課題の一つは、高い信頼度の確保である。前章で明らかにしたように、光ディスク媒体は誤り率が $10^{-6} \sim 10^{-4}$ と高いため、データ部に関しては誤り訂正符号(ECC:Error Correcting Codes)⁽¹⁾の積極的な導入が必要とされている。主な半導体記憶装置及び磁気記憶装置におけるECCの適用例を表8.1に示す⁽²⁾⁻⁽⁵⁾。従来の記憶装置においてもECCは適用されていたが、いずれも誤りの発生を例外的事象として捉えた処理に過ぎなかった。これらに対して、光ディスク記憶においては、誤り訂正能力が極めて高いECCを装置設計に取り込んでいる⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾。なお、ECCの符号化・復号化回路の実現には、最近の優れたLSI製造技術に依るところが大きい^{(9),(10)}。また、アドレス部に関しても、多重記録等の冗長構成を採ることにより信頼度の向上を図っている。

そこで、本章では、まず光ディスク記憶における誤り訂正方式を比較したうえで、誤り特性を考慮した信頼度の解析手法を提案する。誤り特性データを数学的に取り扱うため、第6章で明らかにした統計モデル(合成ギルバートモデル)を導入し、このモデルパラメータ等に基づきECCによるデータ誤り率の改善効果を定量的に明らかにする。また、同じく誤り特性に基づき、アドレス多重記録によるアドレス誤り率の改善度を導き出す。最後に、データの同期ずれ防止のための再同期パターンのビットパターン構成などについても触れる。

表8.1 各種記憶装置へのECCの適用例

装置	RAM	磁気ディスク	磁気テープ	光ディスク
記憶容量	256kbits/chip	3.2GB/unit	180MB/vol	322MB/surface
ECC種類	SEC-DED符号	ファイア符号	Reed-Solomon符号	Reed-Solomon符号
符号構成 (Data, Check)	(32bits, 8bits)	(25519bits, 56bits)	(7Bytes, 1Byte)	(104Bytes, 16Bytes)
訂正能力	1bit	11bits(burst)	1Byte	8Bytes
検出能力	2bits	22bits(burst)	2Bytes	16Bytes
インタリーブ	なし	なし	なし	10-way
ポインタ	未使用	未使用	振幅異常, 位相誤差等の検出.	未使用

8.2 データ誤り率の解析

通常, デジタルデータ蓄積用の光ディスク媒体は, 容量1kB または512Bのセクタを基本単位として記録再生される. 一般的なセクタの記録フォーマットは図8.1に示すとおりである. すなわち, セクタはプリフォーマットされたアドレス部とユーザ記録可能なデータ部から構成される. この両者に対して, 確実に記録再生が実行されなければならない. まず, データ部についてはECCの付与により高信頼度化を図る⁽¹¹⁾⁻⁽¹³⁾. 強力な訂正能

力を有し, かつ冗長効率が比較的良い2種類の代表的なECCの構成・特徴等を表8.2にまとめて示す. この2種類のECCによるデータ信頼度改善効果を統計モデル(合成ギルバートモデル)のパラメータに基づき定量的に解析する^{(14), (15)}.

表8.2 光ディスク記憶向けECCの比較

種類	8n' 1t 訂正RS符号* (LDC: Long Distance Code)	1n' 1t 訂正RS符号(C1)・2n' 1t 訂正RS符号(C2)の積符号
符号構成(n, m) n: 符号語長(Bytes) m: 情報語長(Bytes)	(120, 16)	C1: (14, 12) C2: (48, 44)
原始多項式	$P(x) = x^8 + x^5 + x^3 + x^2 + 1$	$P(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$
生成多項式	$G(x) = \prod_{i=120}^{135} (x + \alpha^i)$	$C1: G(x) = \prod_{i=0}^1 (x + \alpha^i)$ $C2: G(x) = \prod_{i=0}^3 (x + \alpha^i)$

* : GF(2⁸)上で定義される短縮化Reed-Solomon符号⁽¹⁶⁾⁻⁽¹⁹⁾

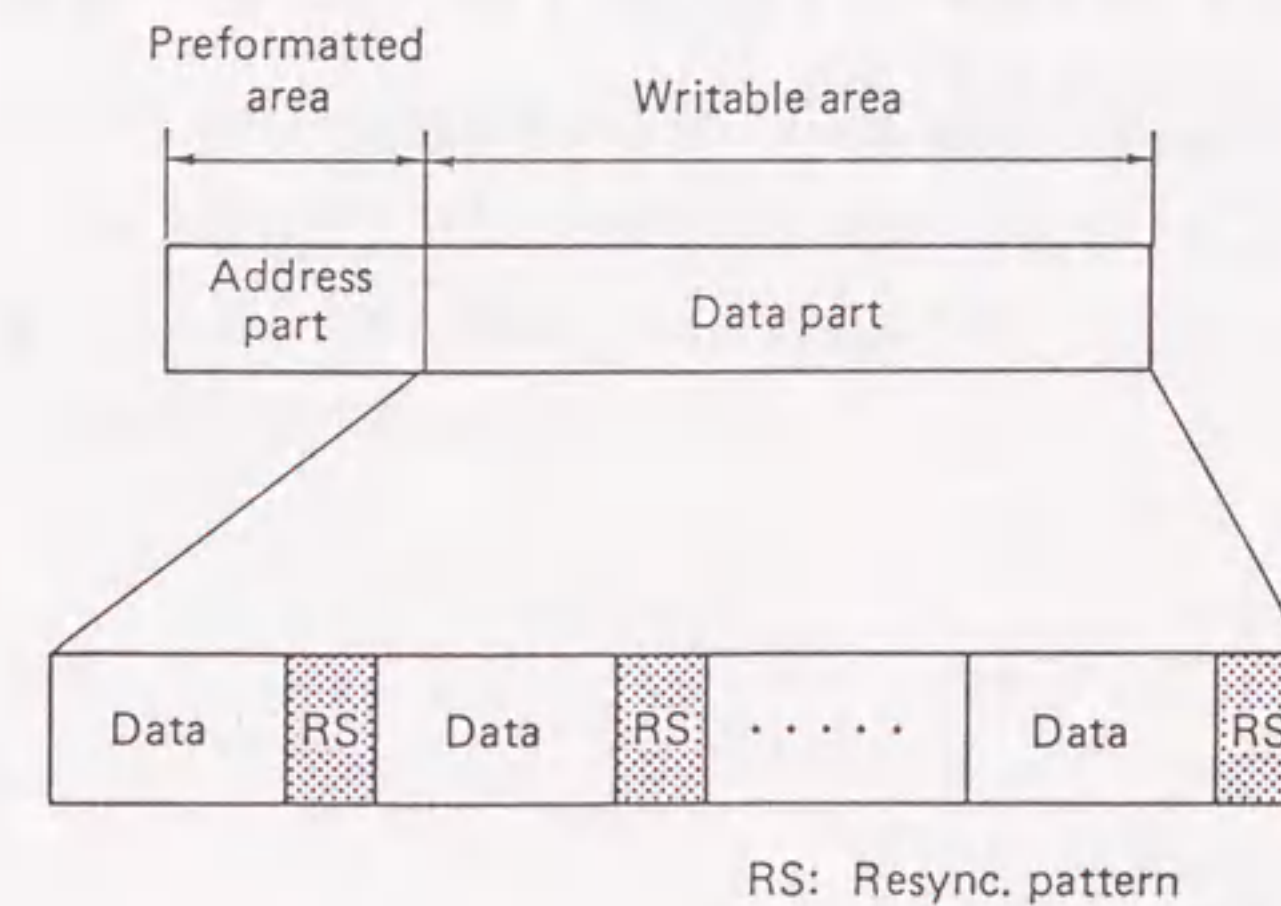


図8.1 セクタフォーマット

8. 2. 1 準備

まず、前提として以下の諸量を定義する。第6章で述べた合成ギルバートモデルにおいて、長さ*i*ビットのバースト誤りが発生する確率*P*(*i*)は、その状態遷移確率等を用いて次式で与えられる。

$$P(i) = h^i \cdot \tau \cdot (p_{12} \cdot p_{22}^{i-1} \cdot p_{21} + p_{13} \cdot p_{33}^{i-1} \cdot p_{31}) + s^i \cdot \tau \cdot p_{11}^{i-1} \quad (8-1)$$

但し、 $\tau = p_{21} \cdot p_{31} / (p_{21} \cdot p_{31} + p_{12} \cdot p_{31} + p_{13} \cdot p_{21})$

ここで、*h*は状態*B*、*s*は状態*G*において間欠的な誤りが検出される確率、*s*は状態*G*において間欠的な誤りが検出される確率である。上式を用いて、長さ*x*ビット以上のバースト誤りが発生する確率*D*(*x*)を次のように定義する。

$$D(x) = 1 - \sum_{i=1}^{x-1} [P(i)] \quad (8-2)$$

連続*z*バイト以上が誤りとなる確率*R*(*z*)は、長さ*x*ビット以上のバースト誤り発生確率*D*(*x*)に基づき、次のように与えられる。

z = 1 のとき、

$$R(z) = 1 \quad (8-3)$$

z ≥ 2 のとき、

$$R(z) = \sum_{x=8(z-2)+2}^{8(z-1)+1} [D(x)] \quad (8-4)$$

したがって、連続*z*バイト誤りとなる確率*r*(*z*)は次式となる。

$$r(z) = R(z) - R(z+1) \quad (8-5)$$

符号語長*N_c*の符号語*C*において、特定の連続*k*バイト以上が誤りとなる確率*E*(*k*)は次式で与えられる。

$$E(k) = E_b \cdot \sum_{j=k}^{N_c} [R(j)] \quad (8-6)$$

ここで、*E_b*はバイト誤り率であり、上記の統計モデルの状態遷移確率などから導出できる。

上記の準備に基づき、各種誤り訂正方式の能力を定量的に解析する。まず、所定の誤り訂正方式に関して、誤り訂正不能なデータパターンをすべて列挙し、場合分けする。各場合の誤り訂正不能確率を上記*D*(*x*)、*R*(*z*)、*r*(*z*)、*E*(*k*)などの関数として導出する。これらの総和として、誤り訂正処理後の誤り率すなわち誤り訂正能力を算出するという手法を用いる。

8. 2. 2 ロングディスタンス符号の誤り訂正能力

表8. 2で示したGF(2⁸)上で定義される8バイト訂正短縮化Reed-Solomon符号、いわゆるロングディスタンス符号(LDC)の誤り訂正能力の導出を行う。評価対象とするLDCの符号語長を*n*バイトとする。図8. 2に表わすように、インタリーブは符号語に直交する方向で、その長さは*L*バイトとする。

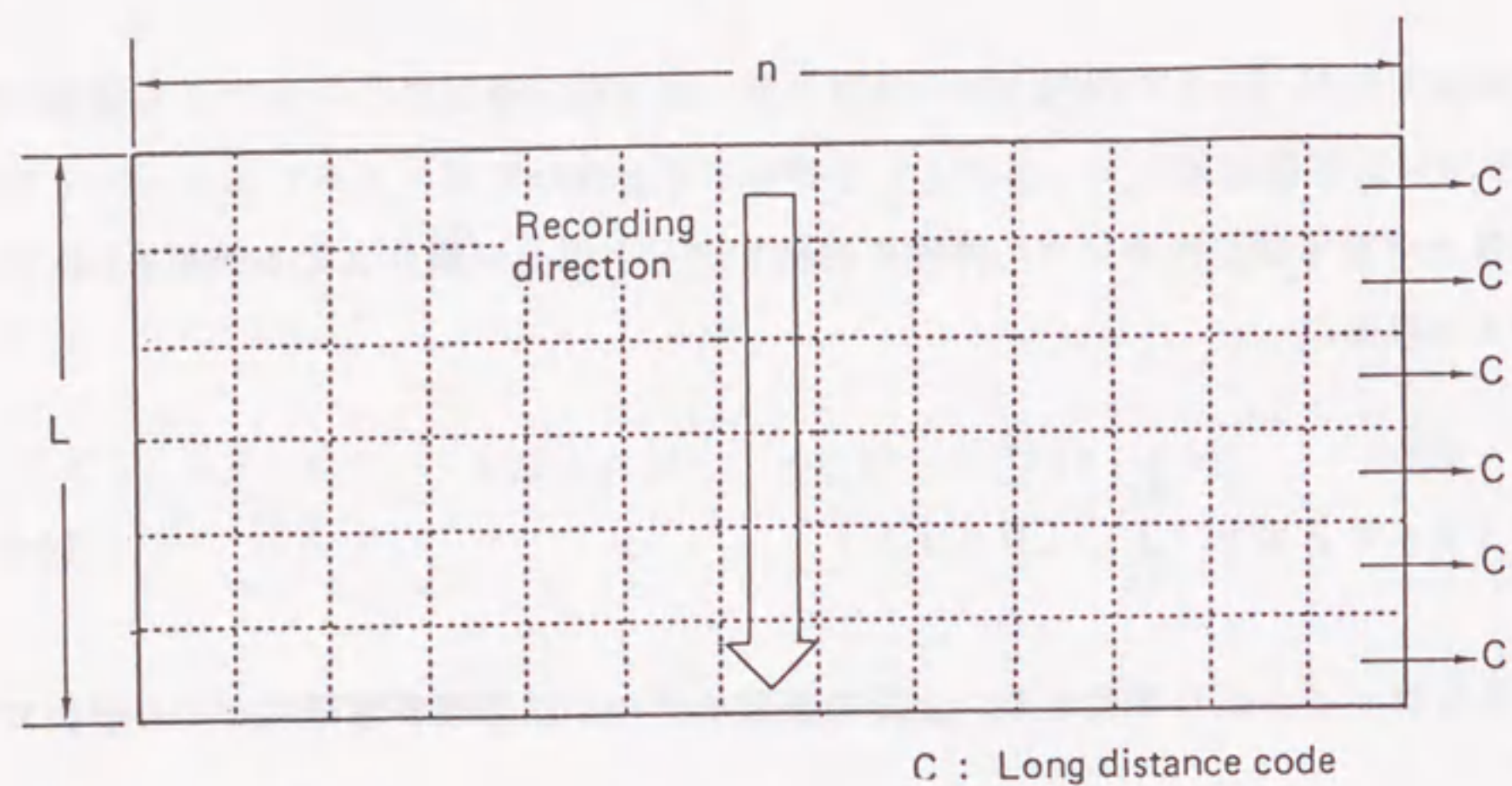


図8.2 ロングディスタンス符号(LDC)のインタリーブ構成

このとき、インタリーブ長Lを基準にして、バースト誤りの長さxにより図8.3に示すように誤り訂正不能パターンを場合分けできる。各場合の訂正処理後の誤り率Pd_j (j=0~8)は次のように表わされる。

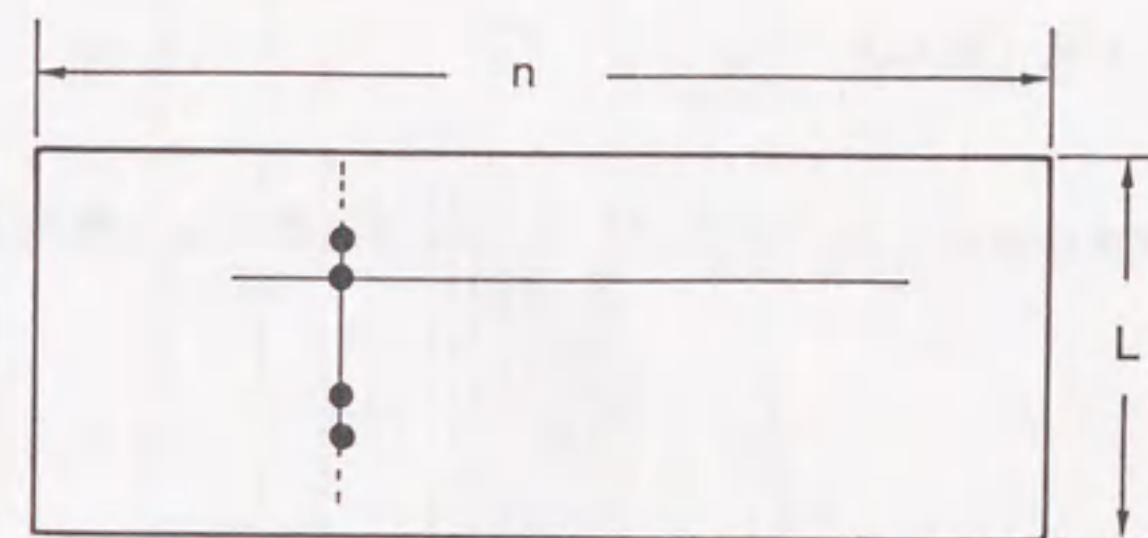
(1) $1 \leq x \leq L$ (j=0) の場合

$$Pd_0 = \sum_{i=0}^n C_n^i E(1)^i \cdot \{1 - E(1)\}^{n-i} \quad (8-7)$$

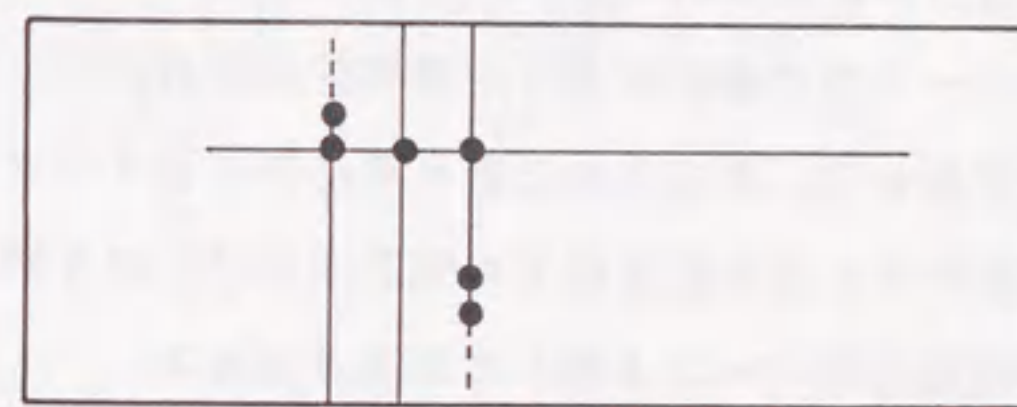
(2) $L+1 \leq x \leq 8L$ (j=1, 2, ..., 7) の場合

$$Pd_j = E_b \cdot \sum_{i=1}^L r(jL+i) \cdot \sum_{i=8-j}^v C_v^i E(1)^i \cdot \{1 - E(1)\}^{v-i} \quad (8-8)$$

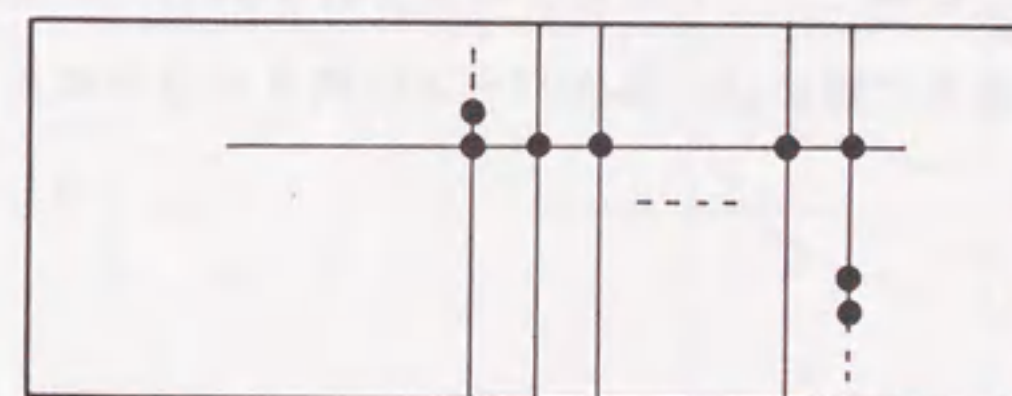
但し、 $v = n - 1 - j$



Case-1: $1 \leq x \leq L$



Case-2: $L+1 \leq x \leq 8L$
(j=1, 2, ..., 7)



Case-3: $8L+1 \leq x$
(j=8)

• Error-byte

図8.3 誤り訂正不能パターン

(3) $8L+1 \leq x$ ($j=8$) の場合

$$P_{d8} = E_b \cdot L \cdot n \cdot R(8L+1) \quad (8-9)$$

以上から、訂正処理後の誤り率 P_b は、式(8-7) ~ 式(8-9) の右辺の総和として次式で与えられる。

$$P_b = \sum_{j=0}^8 P_{dj} / 8nL \quad (8-10)$$

上記の解析に基づく算出例を以下に示す。まず、インタリーブの効果を定量化するため、図8.4に示すバースト誤り長分布の実測例に従い、訂正処理後の誤り率を算出した結果を図8.5に表わす。インタリーブ長の増加により、誤り訂正能力が向上することが分かる。したがって、このような解析から、要求される誤り率に対するインタリーブ構成が決定できる。また、この算出過程から、誤り訂正能力の制限要因は、誤り率が高い領域ではランダム誤り、誤り率が低い領域ではバースト誤りであると言える。

次に、誤り訂正能力のバースト誤り長分布への依存性を評価する。上記導出においても明らかのように、媒体の誤り特性と誤り訂正能力とを結び付ける重要な量は、長さ x ビット以上のバースト誤り発生確率 $D(x)$ である。図8.6に示す4種類(a)~(d)の長さ x ビット以上のバースト誤り発生確率 $D(x)$ に対する誤り訂正能力の算出結果を図8.7に示す。これから、誤り訂正能力の限界は、長大バースト誤りの存在に大きく依存することがわかる。

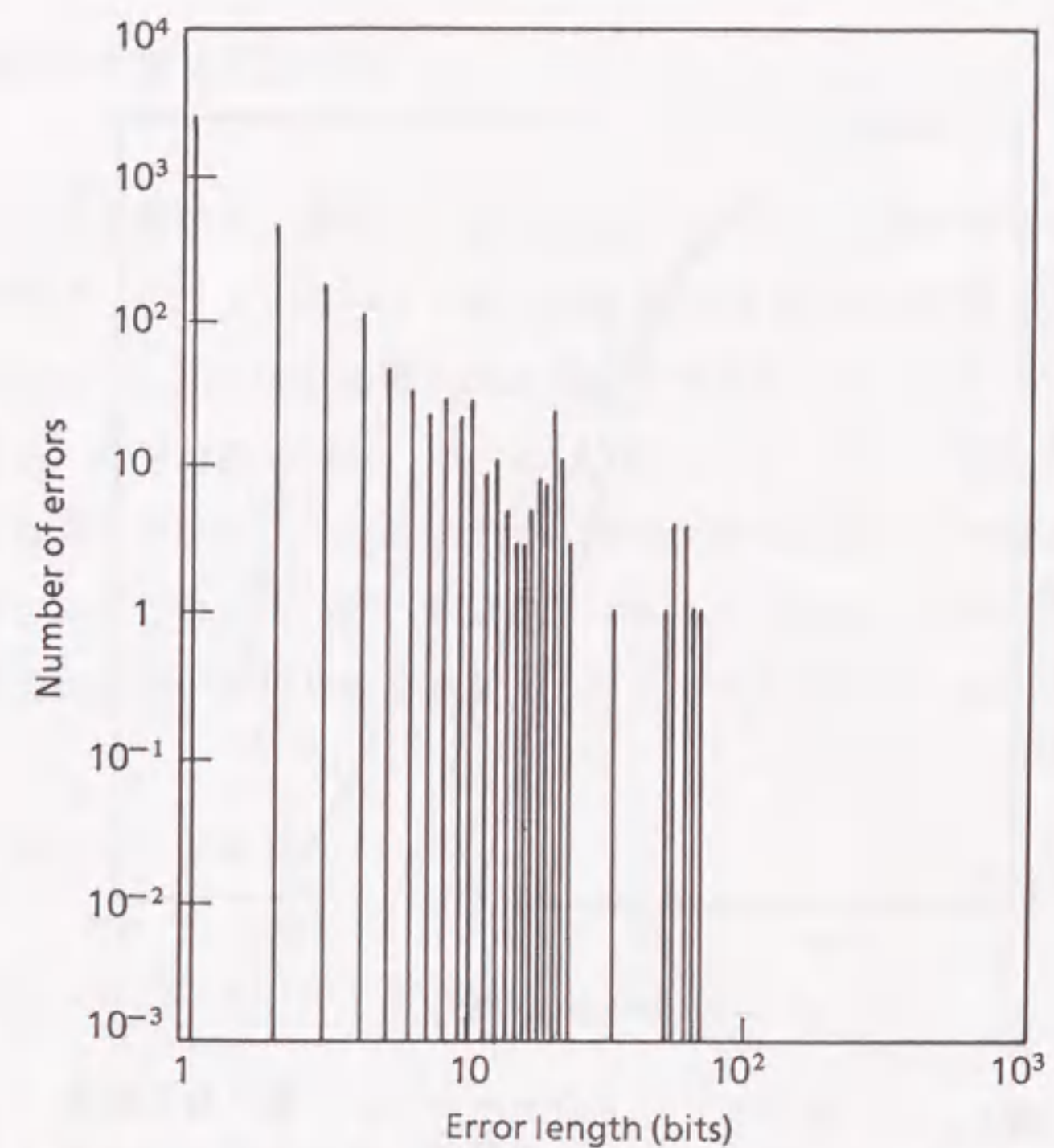


図8.4 バースト誤り長分布の実測例

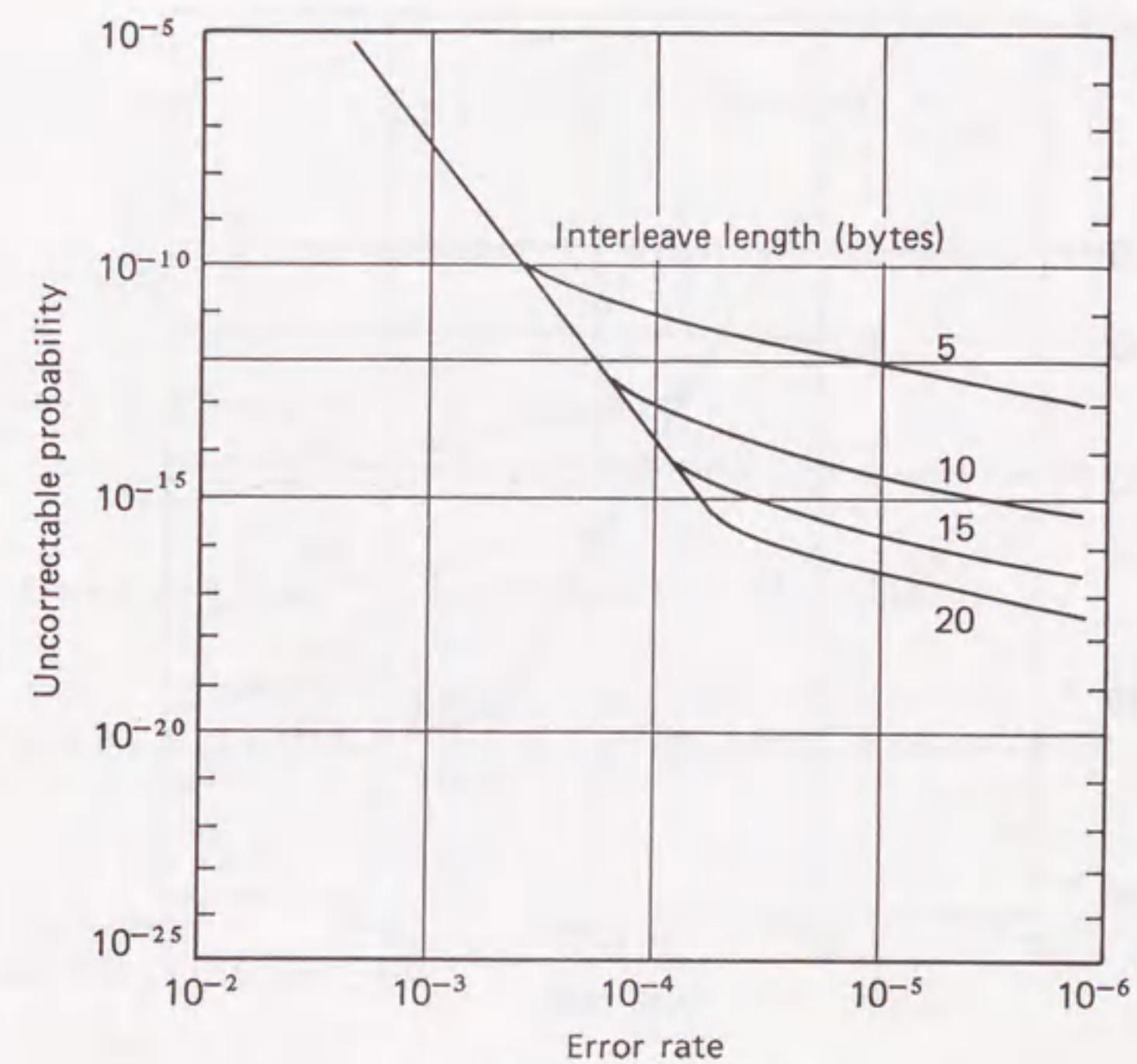


図8.5 誤り訂正能力

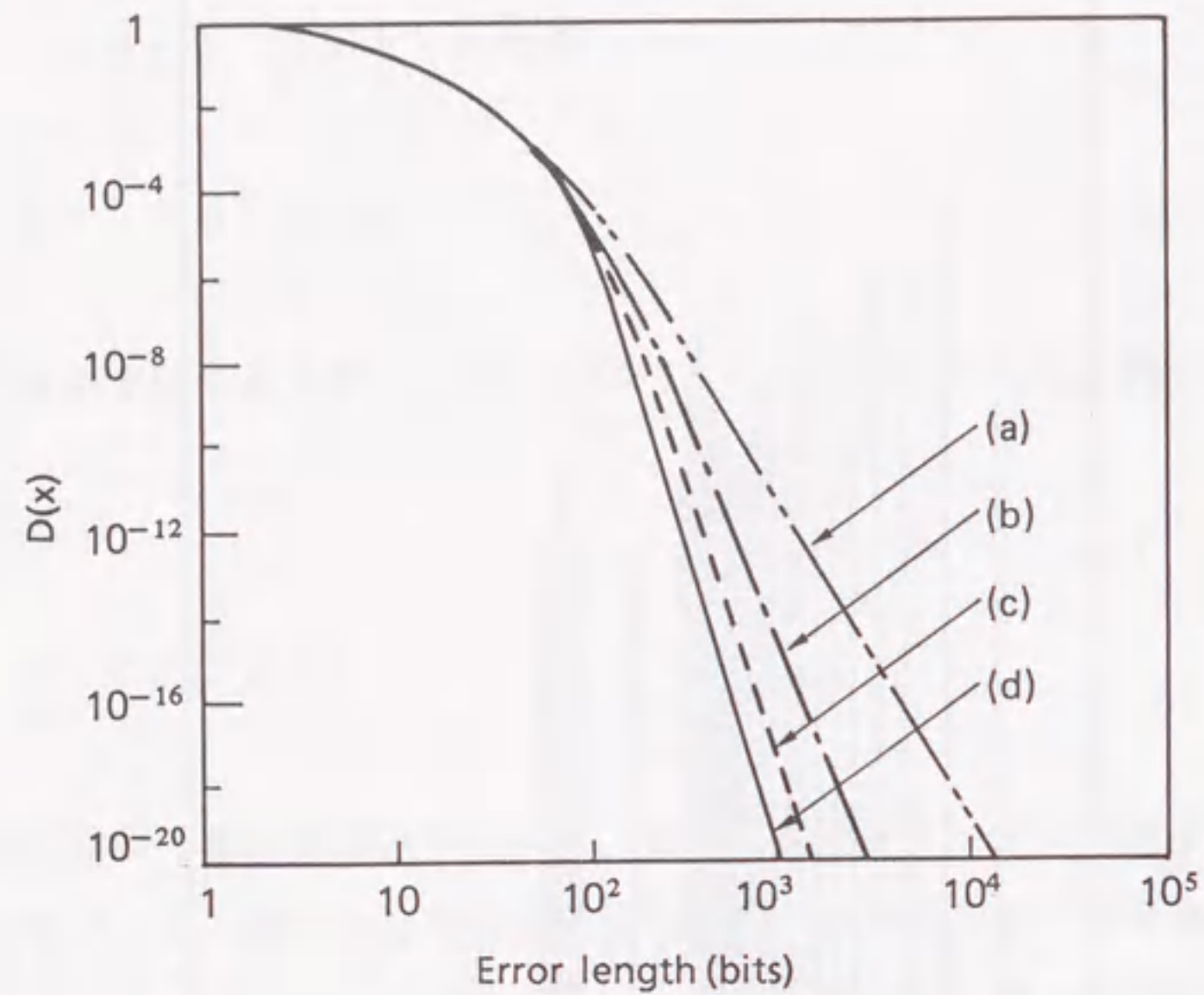


図 8. 6 長さ x ビット以上のバースト誤り発生確率

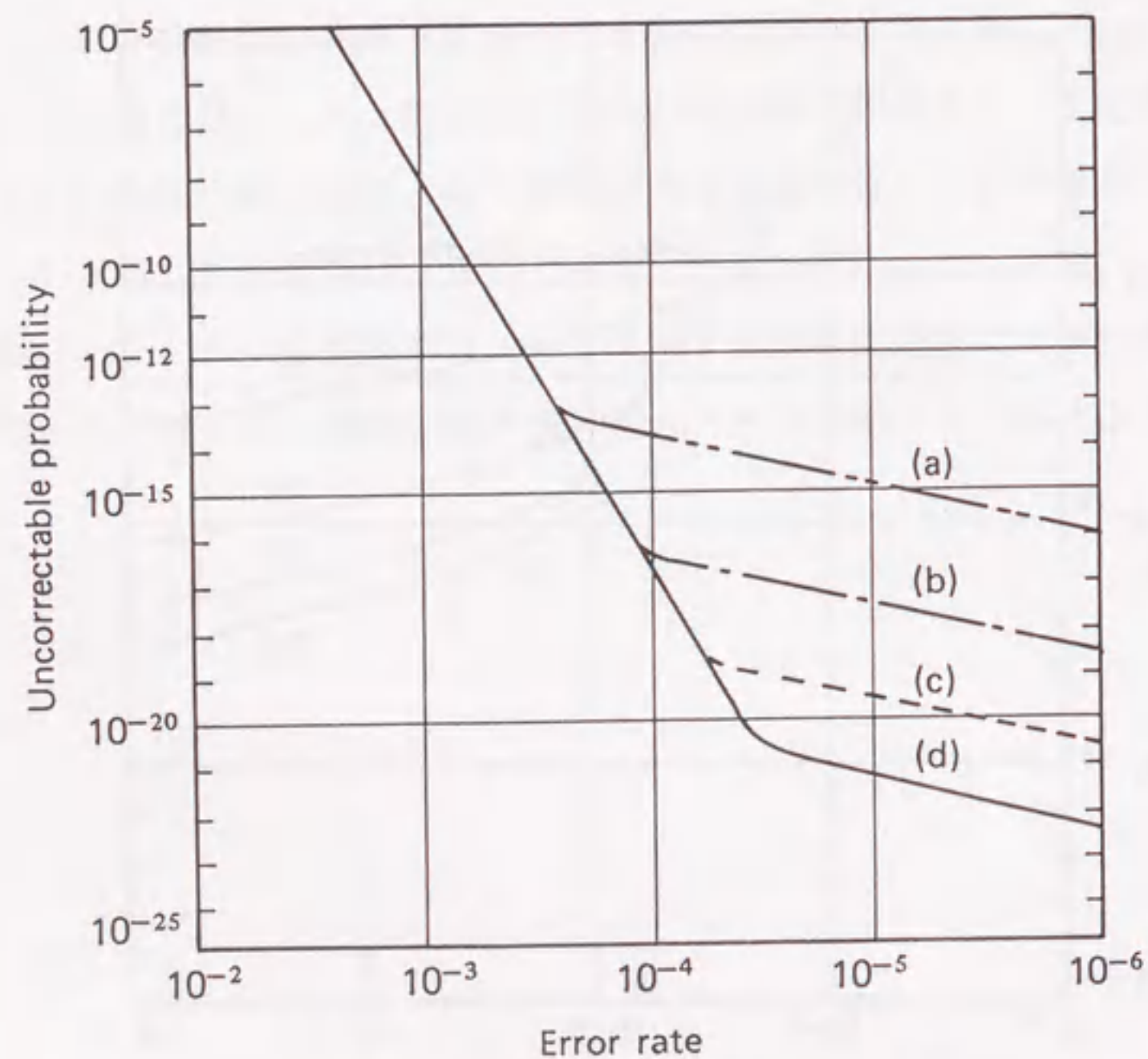


図 8. 7 誤り訂正能力

8. 2. 3 積符号の誤り訂正能力

前項と同様の手法を用いて、表 8. 2 に示した $GF(2^8)$ 上で定義される 1 バイト訂正短縮化 Reed-Solomon 符号 (C 1) と 2 バイト訂正短縮化 Reed-Solomon 符号 (C 2) とから構成される積符号 (PC: Product Code) の誤り訂正能力の算定を行う^{(14), (15)}。

符号 C 1, C 2 の符号語長を $Nc1$, $Nc2$ とし、図 8. 8 に示すように両符号語系列に対して斜め方向となるインターリーブを形成する。また、消失訂正および繰り返し逐次復号を実行するものとする。このとき、訂正不能誤りパターンは図 8. 9 のように 4 種類に分けられる。各場合のデータ誤り率を Pdj ($j = 1 \sim 4$) は以下のように求められる。

(1) $1 \leq x \leq Nc1$ の場合

$$Pd1 = Nc1 \cdot Nc2 \cdot E(1)^2 \cdot E(2)^4 \quad (8-11)$$

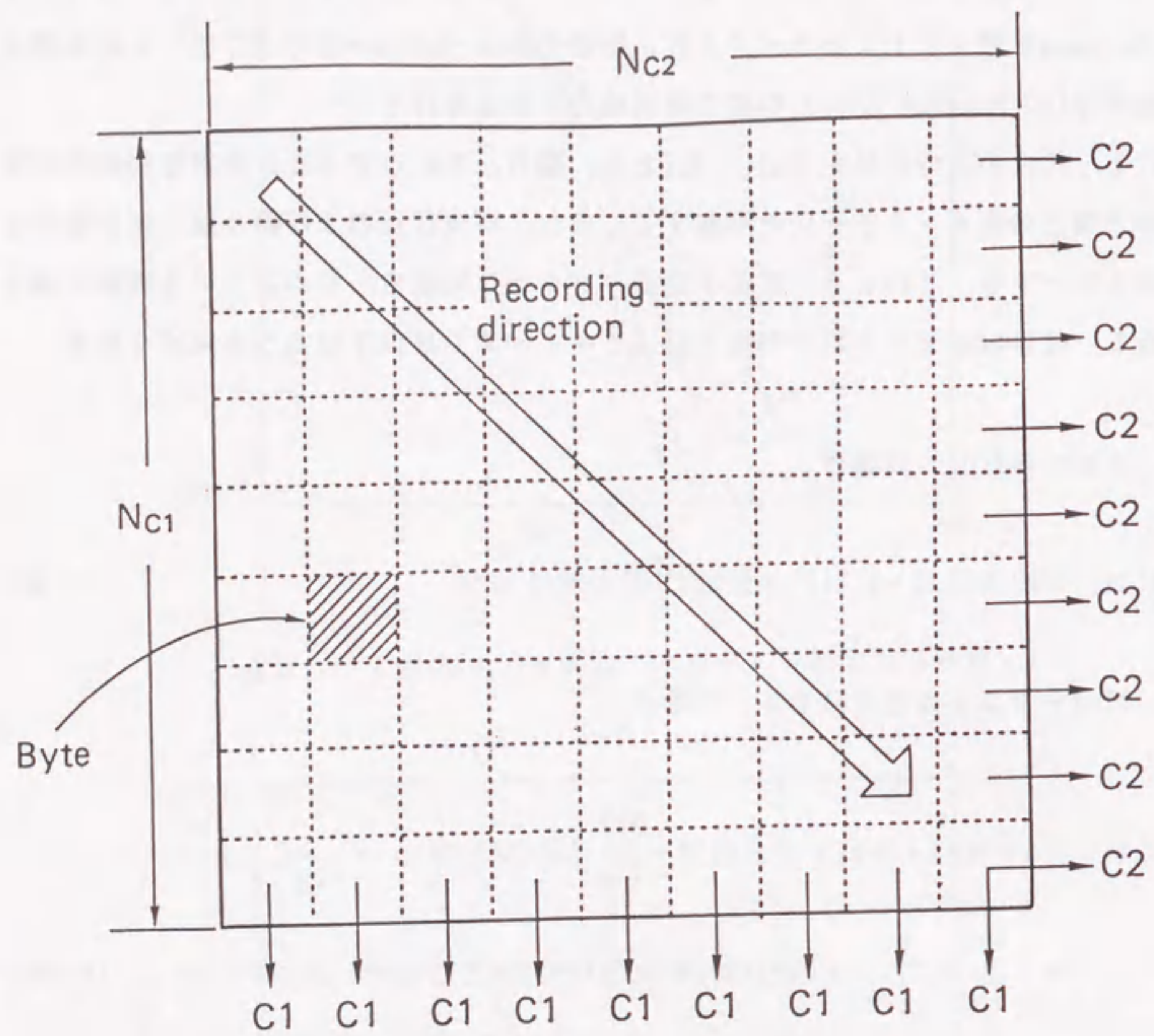
(2) $Nc1 + 1 \leq x \leq 2Nc1 + 3$ の場合

$$Pd2 = Eb \cdot Nc1 \cdot Nc2 \cdot [E(1)^4 \cdot \sum_{i=0}^{Nc1} \{ r(Nci+3+i) \cdot \binom{C}{i+2} \cdot 2 \} + \sum_{i=0}^{Nc1} \{ \sum_{j=0}^i r(Nci+3+i) \cdot (i+1-j) \cdot E(j+2)^2 \}] \quad (8-12)$$

(3) $2Nc1 + 4 \leq x \leq 3Nc1 + 1$ の場合

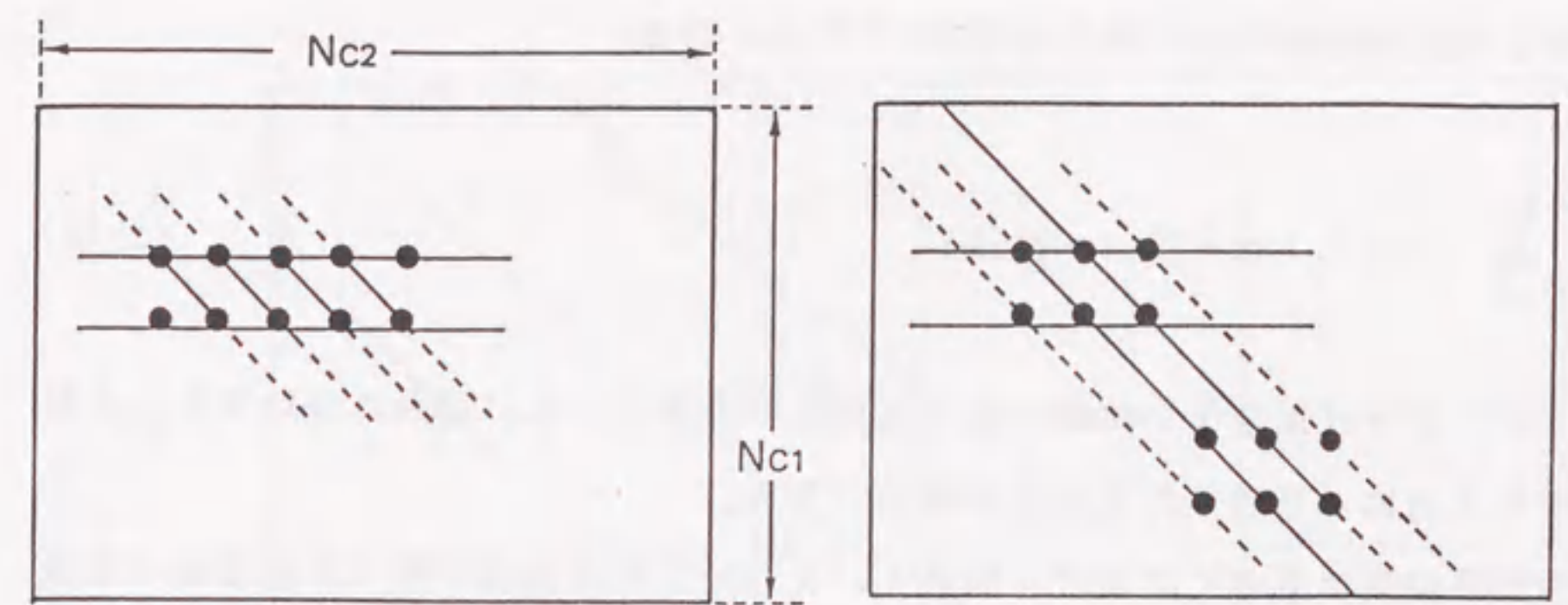
$$Pd3 = Eb \cdot Nc1 \cdot Nc2 \cdot \sum_{i=0}^3 \{ r(2Nci+4+i) \cdot 2Es \cdot (i+1) \} + Eb \cdot Nc1 \cdot Nc2 \cdot \sum_{i=4}^{Nc1-2} [\{ r(2Nci+4+i) \cdot 2Es \cdot (i+1) + (i-3) \cdot (i-2) \cdot E(1) \}] \quad (8-13)$$

但し、 $Es = E(1) + E(2) + E(3)$



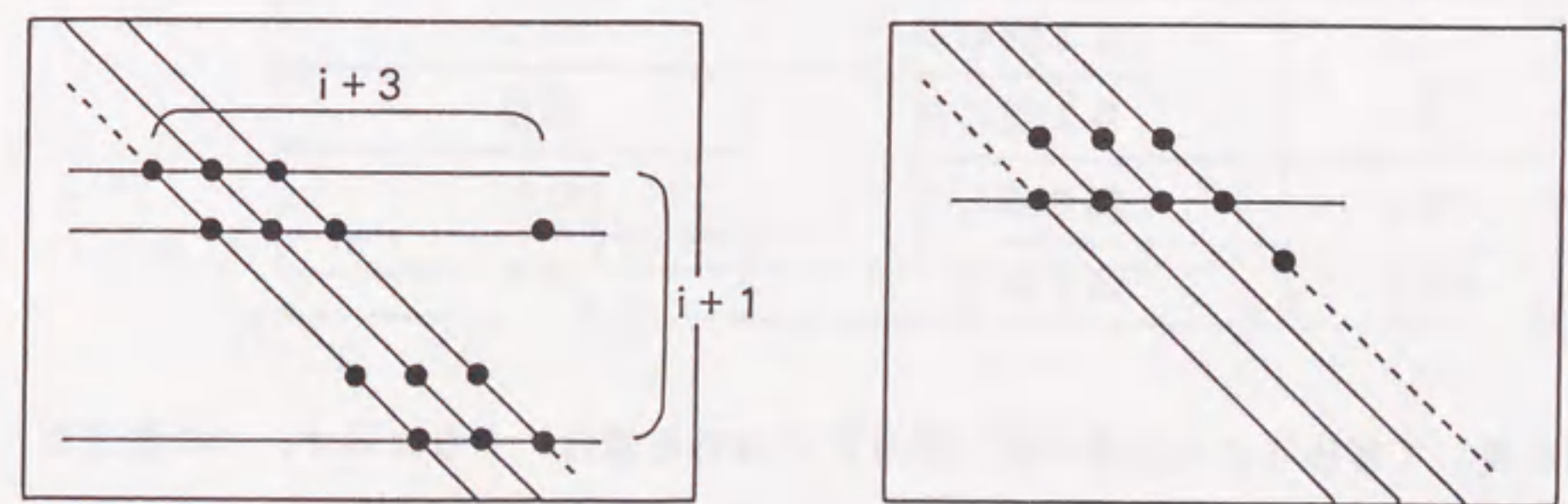
{ C1: Single error correcting RS-code
 { C2: Double error correcting RS-code

図 8. 8 積符号のインタリーブ構成



CASE-1: $1 \leq x \leq Nc1$

CASE-2: $Nc1 + 1 \leq x \leq 2Nc1 + 3$



CASE-3: $2Nc1 + 4 \leq x \leq 3Nc1 + 1$

CASE-4: $3Nc1 + 2 \leq x$

● Error-byte

図 8. 9 誤り訂正不能パターン

(4) $3Nc1 + 2 \leq x$ の場合

$$Pd4 = Eb \cdot Nc1 \cdot Nc2 \cdot R(3Nci+2) \quad (8-14)$$

以上から、誤り訂正処理後の誤り率 Pb は次式で与えられる。

$$Pb = \sum_{j=1}^4 Pd_j / (b \cdot Nc1 \cdot Nc2) \quad (8-15)$$

さらに、イレージャ訂正あるいは繰り返し逐次復号を実行しない場合についても、上記と全く同様の考え方により誤り訂正能力が導出できる。

このような解析結果に基づく積符号・斜めインタリーブ併用方式の誤り訂正効果の定量化を行う。今、符号語長は $Nc1=30\text{byte}$, $Nc2=41\text{byte}$ とする。また、復号法は繰り返し復号、イレージャ訂正の有無により区別した表 8. 3 に示す 4 種類を仮定する。

表 8. 3 積符号の復号法

復号法	C1, C2 復号回数	イレージャ訂正
(I)	各1回のみ	なし
(II)	各1回のみ	あり
(III)	繰り返し	なし
(IV)	繰り返し	あり

上記仮定に従って算出された各復号法の誤り訂正能力を図 8. 10 に示す。この結果から、繰り返し復号およびイレージャ訂正の効果が大きいことがわかる。ただし、繰り返し復号は誤り訂正能力の拡大に大きく影響するが、復号時間との兼ね合いに留意する必要がある。また、前項の LDC と同様に、長大バースト誤りによって誤り訂正能力は制限される。

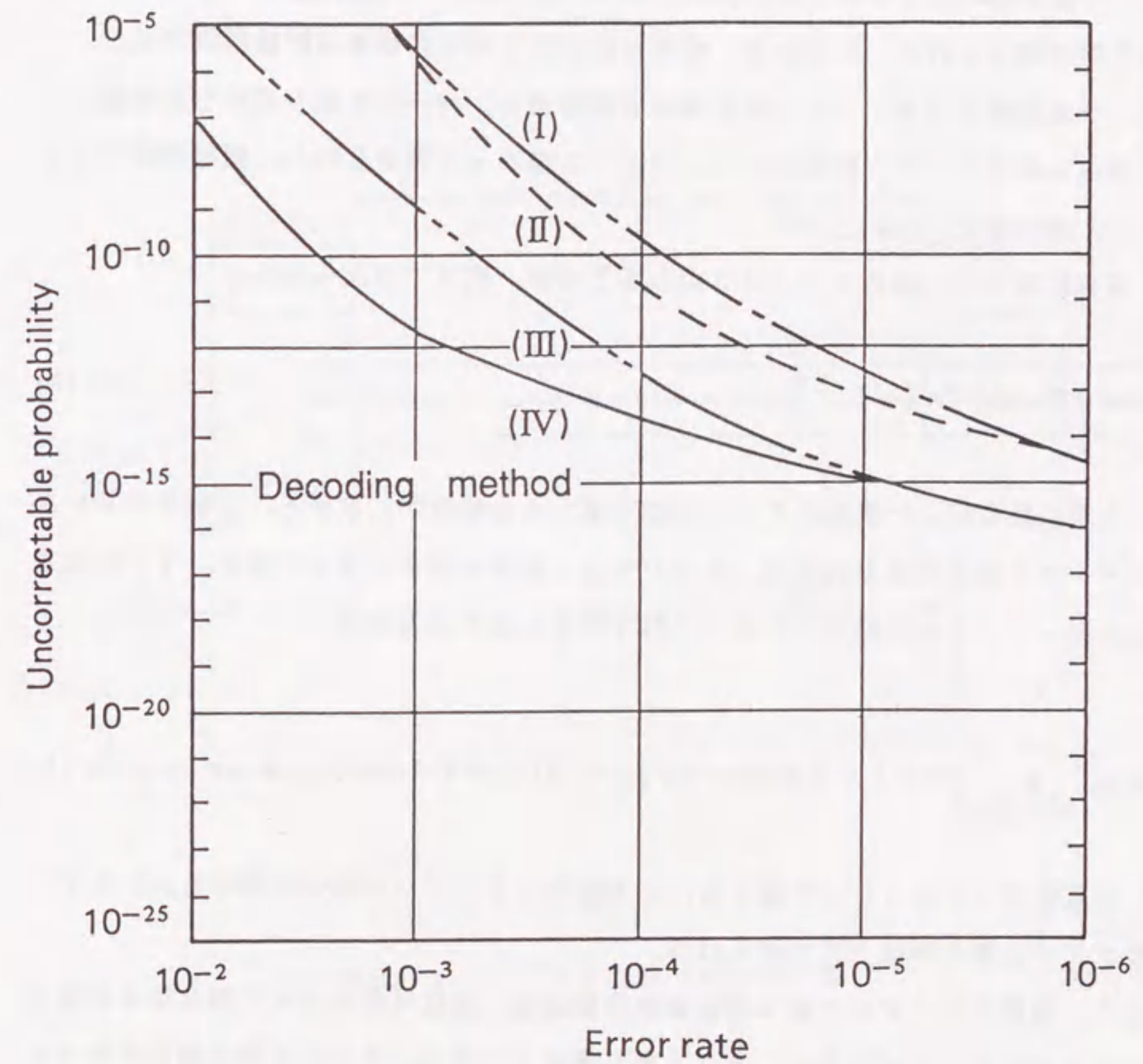


図 8. 10 誤り訂正能力

8.3 アドレス誤り率の解析

アドレス部は、通常光ディスク媒体製造時にプリフォーマットされる。初期および経時劣化後の媒体欠陥によるアドレス部の信頼度低下を防ぐため、アドレス情報のある間隔において多重記録する⁽²⁰⁾。たとえバースト誤りが発生しても、少なくとも1個のアドレス情報が正しく読み取れることができれば良いので、このように分散記録することによりアドレス誤り率を抑えられる。このとき、重要な設計値となるのは多重記録間隔である。

そこで、多重記録によるアドレス誤り率の改善効果を、バースト誤り長分布を考慮して解析的に明らかにする⁽¹⁴⁾。前提として、アドレス部バイト数を B_{add} 、記録間隔バイト数を B_{int} 、誤り率を E_{raw} とする。

まず、多重記録しない場合のアドレス誤り率 E_s は、次式で与えられる。

$$E_s = 8 B_{add} \cdot D(1) \quad (8-16)$$

次に、2重記録を行った場合のアドレス誤り率 E_m を解析的に求める。2個のアドレスに1個のバースト誤りが及ぶ状態は、そのバースト誤りの長さによって図8.11に示される。したがって、2重記録時のアドレス誤り率 E_m は次式となる。

$$E_m = \sum_{i=8B_{int}+2}^{\infty} [(i - 8B_{int} - 1) \cdot \{D(i) - D(i+1)\}] \cdot E_{raw} \quad (8-17)$$

さらに、 N 重記録($N \geq 3$)した場合も、最も離れた2アドレス部の間隔を B_{int} とすれば、そのアドレス誤り率は上式で得られる。

このとき、実用的なアドレス誤り率の設計目標値は、達成可能なデータ誤り率を考慮して定めるべきである。なぜならば、セクタ誤り率はデータ部とアドレス部の誤り率のうち高いもので支配されるので、どちらかに偏った冗長構成は不要だからである。したがって、上記のデータ誤り率およびアドレス誤り率の解析手法を用いて両者を定量的に比較したうえで、バランスのとれた冗長化を図ることが重要である。

上式に基づくアドレス誤り率の算出例を示す。アドレス部バイト数 B_{add} を10バイトとする。また、バースト誤り長分布は図8.4で与えられるものとする。アドレス誤り率の

記録間隔バイト数 B_{int} への依存性を算出した結果を図8.12に示す。今、データ誤り率の目標値を 10^{-12} 、セクタ容量を 10^4 ビットとおくと、アドレス誤り率は 10^{-8} 以下を満足すべきである。したがって、図8.12から誤り率が 10^{-5} のとき、アドレス間隔は8バイト以上に設定すべきであると言える。

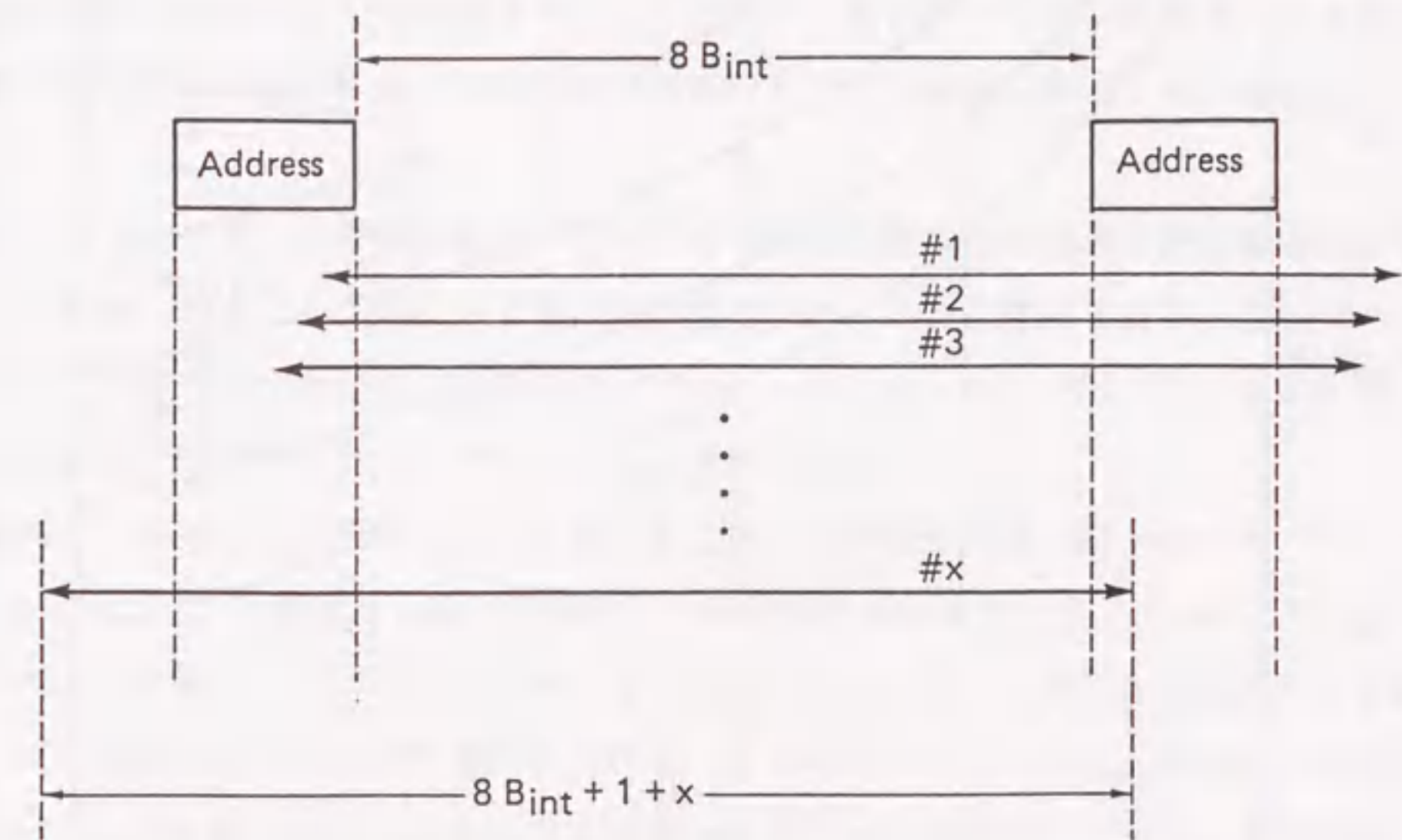


図8.11 アドレス誤りの発生状態

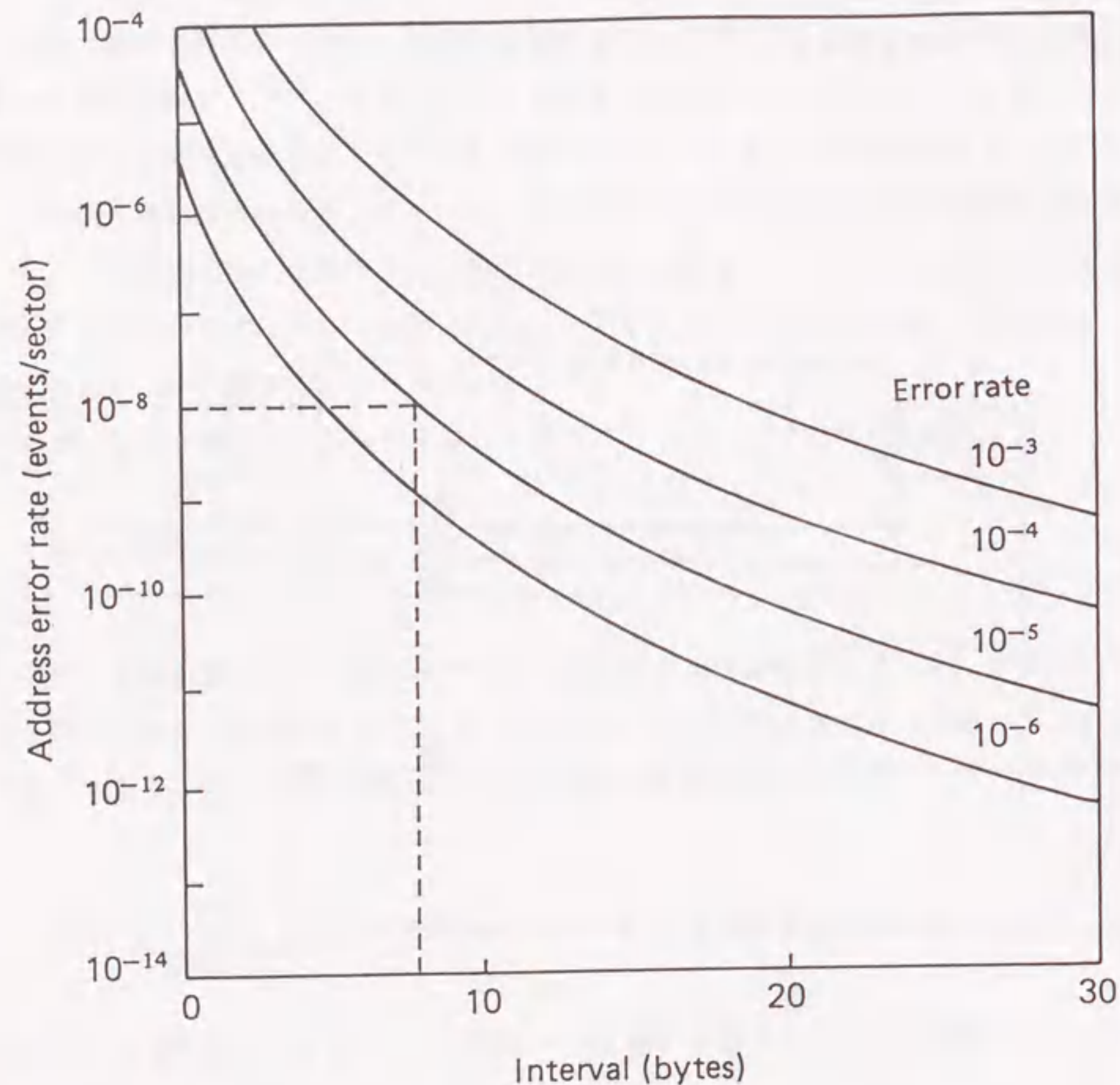


図 8. 1 2 アドレス記録間隔によるアドレス誤り率の改善効果

8. 4 再同期パターンの構成法

可変長符号変換を伴う2/7変調方式においては、同期ずれなどの原因により誤りの伝搬が生じる。この伝搬を防止するため、復調回路をリセットする必要があるが、この契機として用いられる光ディスク媒体固有の付加ビットパターンが再同期パターンである。これはデータ部に等間隔に配置される。再同期パターンの設計においては、①配置間隔と②ビットパターン内容とが重要である。

まず、再同期パターンの配置間隔については、前節のアドレス多重記録構成において述べた設計手法と同様にして解析できる⁽¹⁴⁾。ただし、再同期パターンの場合、その読取り誤り数の許容値は同時に採用されるECCの誤り訂正能力に依存することに留意すべきである。

次に、ビットパターンの選択においては、その検出難易度を定量的に評価する必要がある。このため、図8. 13に示すように再同期パターンの自己相関を取る。検出マージンとしては、許容される不一致ビット数を示すパターンドロップマージンと、検出可能な時間軸上の余裕を示すウィンドウマージンとが考えられる。

評価例として、2/7変調方式で変調されたデータの剰余に常に同一のデータビット“011”（記録ビットに変換すると“001000”）を付加することにより、いかなるデータパターンに対しても剰余なく再同期パターンとの整合がとれるという優れた特徴を有する特殊パターン“0010000000100100”を取り上げる。この特殊パターンの自己相関結果を図8. 14に示す。例えばパターンドロップマージンを1ビットとすると、ウィンドウマージンは-13ビット、+7ビット存在することが分かる。

このような評価により、再同期パターンの見逃しや正規の位置以外での検出を極力抑え得る広い検出マージンをもつビットパターンを、適用する変調方式に応じて選択することが重要である。また、パターンドロップマージンとウィンドウマージンの配分に関しては、検出回路の動作安定性・精度、及び媒体記録品質等の要因を考慮して総合的に決定すべきである。

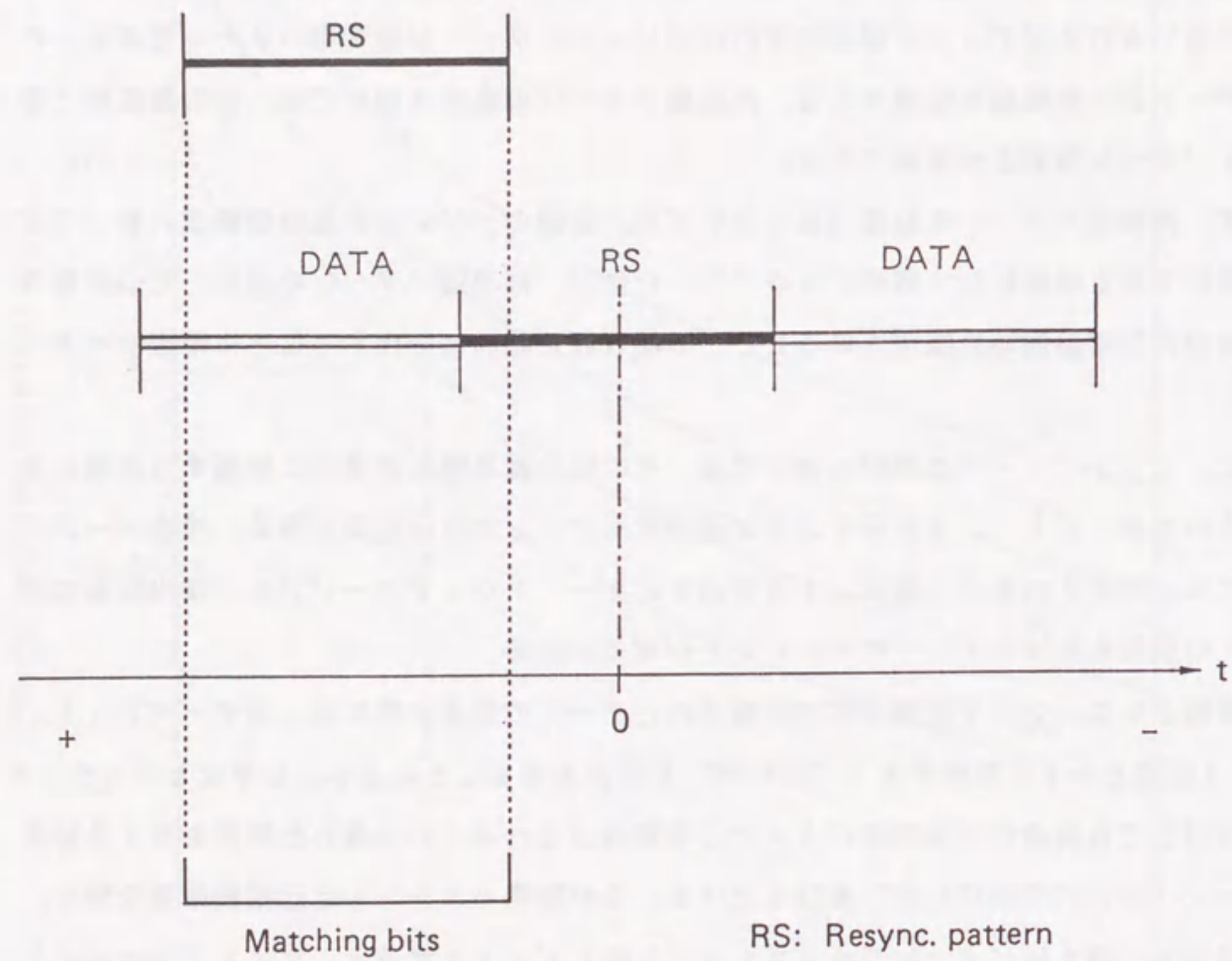


図 8. 1 3 再同期パターンの自己相関関係

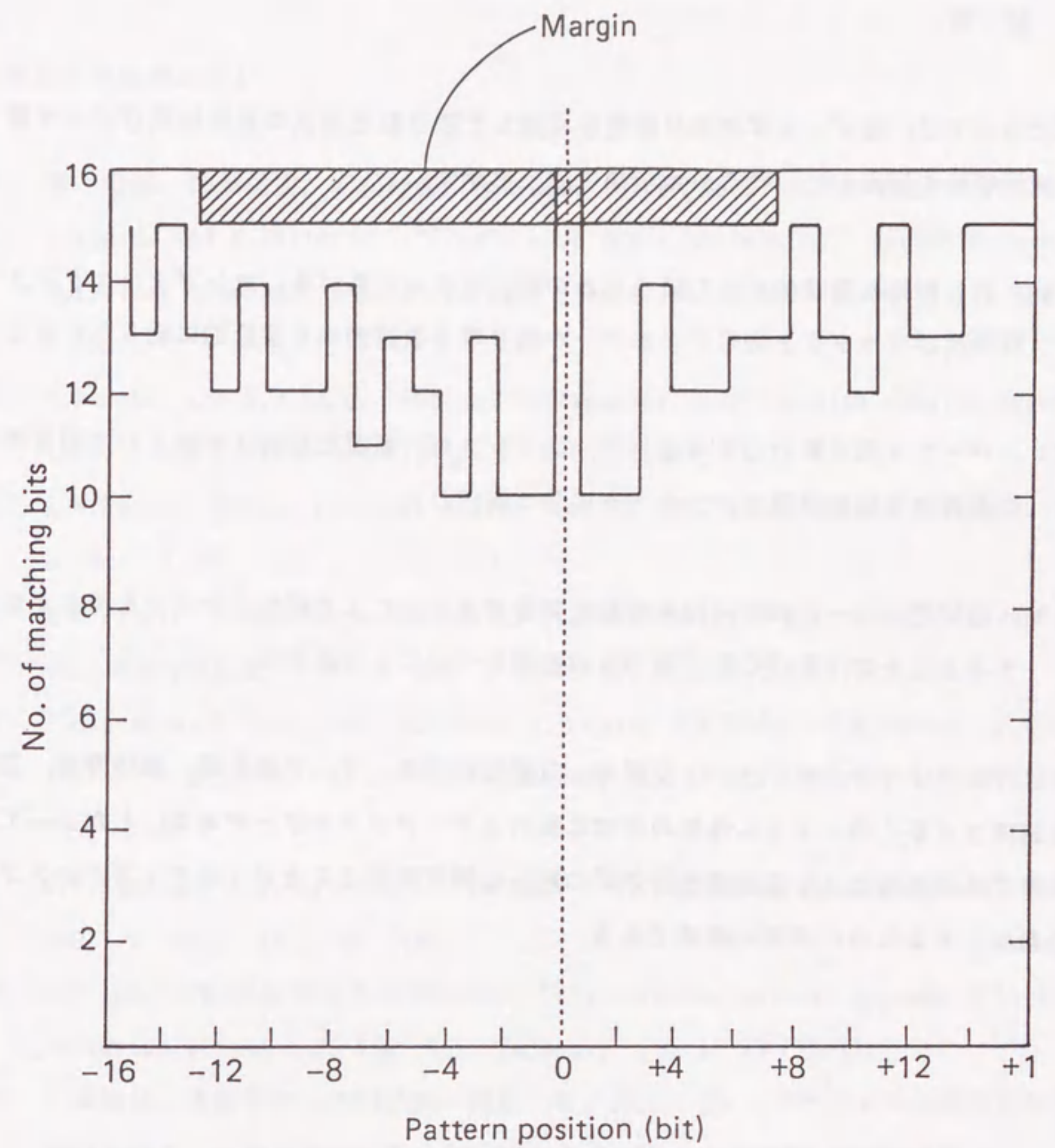


図 8. 1 4 再同期パターンの自己相関結果

8.5 結 言

本章においては、光ディスクの誤り特性を考慮した誤り訂正方式の設計法及びデータ信頼度の解析手法を提案した。得られた結果を以下に示す。

- (1) 誤り特性を数学的に取り扱うための統計モデルに基づき、ロングディスタンス符号及びプロダクト符号によるデータ誤り率の改善効果を定量的に明らかにした。
- (2) パースト誤り長分布を考慮して、アドレス部の多重記録によるアドレス誤り率の改善度を記録間隔をパラメータにして導出した。
- (3) 再同期パターンの自己相関関数を算出することにより検出マージンを明らかにするとともに、ECC訂正能力との関係についても考察した。

このようなフォールトトレラント技術は、有効記憶容量、データ誤り率、媒体寿命、実効転送速度など多くのシステム性能の決定に係わるキーテクノロジーである。したがって、上記手順で各種技術による信頼度改善効果の解析を綿密に行うことが、光ディスクシステムを最適設計するために非常に重要である。

[第8章の参考文献]

- (1) 嵩 忠雄, 都倉信樹, 岩垂好裕, 稲垣康善, “符号理論”, コロナ社 (1975).
- (2) S.Kaneda and E.Fujiwara, “Single byte error correcting - double byte error detecting codes for memory systems”, IEEE Trans. Comput., C-31, 7, 596 (1982).
- (3) A.M.Patel and S.J.Hong, “Optimal rectangular code for high density magnetic tape”, IBM J. Res. & Dev., 18, 6, 579 (1974).
- (4) A.M.Patel, “Error recovery scheme for IBM 3850 mass storage system”, IBM J. Res. & Dev., 24, 1, 32 (1980).
- (5) A.M.Patel, “Adaptive cross-parity (AXP) code for a high-density magnetic tape subsystems”, IBM J. Res. & Dev., 29, 6, 546 (1985).
- (6) G.C.Kenney, D.Y.Lou, R.McFarlane, A.Y.Chan, J.S.Nadan, T.R.Kohler, J.G.Wagner and F.Zernike, “An optical disk replaces 25 mag tapes”, IEEE Spectrum, 33 (1979).
- (7) C.W.Reno and R.J.Tarzaiski, “Optical disc recording at 50 megabits/second” Proc. of SPIE, 177, 135 (1979).
- (8) D.Y.Lou, G.M.Blom and G.C.Kenney, “Bit oriented optical storage with thin tellurium films”, J. Vac. Sci. Technol., 18, 1, 78 (1981).
- (9) 山岸篤弘, 吉田英夫, 小田好明, 尾崎 稔, 井上 徹, “光ディスク用誤り訂正・検出LSI”, 昭62年度電子通信学会総合全国大会予稿集, 6-81 (1987).
- (10) 村井克己, 一之瀬 亮, 黒木 譲, 白井 誠, 高木裕司, 福島能久, 佐藤 勲, “光ディスク用高能力誤り訂正LSI”, 信学春季全大, 5-269 (1989).
- (11) 高杉和夫, 林 晋一, 岡 隆史, “光ディスク装置における誤り制御方式方式”, 昭59年度電子通信学会総合全国大会予稿集, 7-78 (1984).
- (12) 松田文男, 尾崎 稔, 古川輝雄, 井上 徹, 田中邦麿, “光ディスク用誤り訂正符号フォーマットの検討”, 光メモリシンポジウム'86論文集, 139 (1986).
- (13) 村井克己, 白井 誠, 沖野芳弘, 佐藤 勲, “光ディスク誤り訂正符号の高速復号のための一方式”, 信学技報, IT87-11, 9 (1987).

- (14) 齊藤 実, 武田 立, “デジタル記録用光磁気ディスク装置のデータ信頼度の解析”, 信学論 (C-II), J73-C-II, 6 (1990).
- (15) 齊藤 実, 武田 立, 布谷正勝, “光ディスクにおけるECCの誤り訂正能力評価法”, 信学技報, IT86-48 (1986).
- (16) I.S.Reed and G.Solomon, “Polynomial codes over certain finite field”, J. Soc. Indust. Appl. Math., 8, 300 (1960).
- (17) W.W.Peterson and E.J.Weldon Jr., “Error-correcting codes”, 2nd. Ed., MIT Press (1972).
- (18) R.T.Chen, “Cyclic decoding procedure for Bose-Chaudhuri-Hocquenghem code” IEEE Trans. Inform. Theory, IT-10, 357 (1964).
- (19) Y.Sugiyama, M.Kasahara, S.Hirasawa and T.Namekawa, “A method for solving key equation for decoding Goppa codes”, Inform. Control, 27, 87 (1975).
- (20) 高杉和夫, 林 晋一, 溝口康充, 角瀬勝治, “光ディスク装置における特殊記号(セクタマーク)の記録・検出方式”, 昭59電子通信学会総合全国大会予稿集, 7-79 (1984).

第9章 光ディスク記憶の長期信頼度推定法

9.1 緒言

光ディスク媒体は, 高記録密度, 非接触等の他の記録媒体にはない特長から, 大容量・高信頼のアーカイバル媒体としても大いに期待されている。また, 光ディスク装置の開発も活発であり, 媒体の長期保管を想定した媒体自動交換機構を組み込んだ大容量のライブラリ装置も登場している⁽¹⁾⁻⁽³⁾。このような状況の中で, 研究開発上のひとつの重要な課題は, 媒体の長期信頼性の確保である。

前章までに述べてきたように, 光ディスクは生の誤り率が現状では高いので, 磁気ディスク装置と同等の 10^{-12} 以下の誤り率をユーザに保証するために, 交代処理・誤り訂正処理等の冗長構成技術を必要としている。ここで, 交代処理は主に媒体製造工程で生じる初期欠陥, 誤り訂正処理は主に媒体経時劣化による欠陥に対して極めて有効に機能する。したがって, 媒体の長期信頼性に関しては, 上記のフォールトトレラント技術を考慮することが重要である。

これまで光ディスク媒体の長期信頼性の評価には, 加速劣化特性の測定結果より推定する手法が用いられている⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾。しかし, 現在のところ, フォールトトレラント技術を十分踏まえた定量的根拠に基づく信頼度予測手法は明確にされていない。

本章では, 光ディスクに適用されるフォールトトレラント技術を考慮した光ディスク媒体の実用的な長期信頼性の予測手法を提案する。まず, 光ディスク媒体の高温高湿下での加速劣化特性の正確な測定方法について述べる。次に, 誤り訂正符号による誤り率改善度の定量化手法とアレニウスプロット法との組合せにより, 媒体寿命の規定値を合理的に決定したうえで, 実効的な媒体寿命を推定する手法について述べる。

9. 2 加速劣化特性の測定方法

開発研究途上の光ディスク媒体の長期信頼性を短時間で定量的に把握するには、加速劣化特性の測定・評価が有効と考えられる。光ディスク媒体の加速劣化試験としては、高温高湿加速試験、温湿度サイクル試験、腐食ガス試験などが考えられるが、媒体寿命を正確に推定するという目的には高温高湿加速試験が最適である⁽⁷⁾⁻⁽¹²⁾。これは、恒温恒湿槽内の劣悪環境条件下に光ディスク媒体を放置し、一旦取り出して各種特性の測定ののち再び恒温恒湿槽内に戻すという処理を繰り返すものである。このとき留意すべき点は、高温下に放置された媒体には多量の水分が含まれているということである。余分な水分を自然放出するまで室温で放置したのち、所定の測定を始めるべきである。通常は媒体重量の測定から48時間以上経過するとほとんど元の重量に戻ることが分かるのでそののち特性測定を行うこととした。

また、恒温恒湿槽の設定温湿度は、媒体材料の物理化学的特性を考慮して決定すべきである⁽¹³⁾。特に、PMMA、PC等のプラスチック基板の場合は、そのガラス転移温度より十分低い温度にすべきである(表9. 1)。温湿度の設定数としては、後述の媒体寿命推定のためのアレニウス・プロット法においては、同一湿度で少なくとも3水準の温度設定が必要である。

さらに、恒温恒湿槽内での媒体の放置状態については、基板、記録膜等の熱膨張率の違いおよび重力による物理的変形等があるので、適切な治具等を用意する必要がある。治具材料としては、寸法安定性や耐食性に優れたアルミニウム合金が好ましい。

測定項目としては、光学的、電気的、機械的特性など多種に及ぶ。このうち、誤り特性はあらゆる特性の総合的寄与によって、ユーザの使用状態に直接影響を及ぼす量となるため、媒体寿命推定上最も好ましいものと考えられる。

従来、誤り特性の測定は、信号再生系は実用装置と同様にPLL(Phase Locked Loop)を用いていた。しかし、この方法では、長大欠陥によるPLL回路の誤動作のため、データを正確に検出する契機を失い、結果として見掛け上のビット誤りが観測されるという欠点を有する。さらに重大な問題は、媒体劣化によってPLLの同期が全く取れず、結局測定不能となる場合が生じることである。このことは、劣化特性から媒体寿命を推定しようとするとき大きな支障となる。そこで、第4章で述べたようなRetriggerable Monostable Multivibrator(RMM)による検出方法を用いた。この方法により、媒体劣化後も極めて

安定して欠陥に起因する誤りの測定が可能になった⁽¹⁴⁾。

上述したPLLを用いることなく誤り特性を測定する方法は、光ディスク媒体の劣化特性を綿密に観測するために優れている。一方、PLLを用いてデータを再生し正解データとの比較検査を行う方法は実用状態での媒体性能を表わすことになる。したがって、目的に応じた測定方法の選択が重要であると言える。

表9. 1 基板材料の特性値

特 性	PMMA ^{#1}	PC ^{#2}
透過率 (%)	93	85~90
屈折率 (%)	1.49	1.60
熱伝導率 (cal/s・cm ² ・°C)	5×10 ⁻⁴	4.6×10 ⁻⁴
線膨張係数 (°C ⁻¹)	6×10 ⁻⁵	7×10 ⁻⁵
ガラス転移温度 (°C)	105	150
比重	1.18	1.20
吸水率 [24hrs.] (%)	0.3~0.4	0.1~0.2

#1 PMMA : Polymethylmethacrylate.

#2 PC : Polycarbonate.

9. 3 媒体寿命予測手法

9. 3. 1 誤り制御ストラテジーの考慮

誤り率 10^{-6} ~ 10^{-4} という現状の光ディスク媒体を用いて、磁気ディスクと同等の誤り率をホスト装置に対して保証するには、各種冗長構成技術を駆使する必要がある。実用的な光ディスク装置においては、図9. 1に示すように交代処理技術と誤り訂正技術とをコントローラに組み込むことにより、外部インタフェースで実効上 10^{-12} 以下の誤り率を実現している。

交代処理は、第7章で述べたように、データ記録直後の再生により記録品質を検査し、所定の基準（交代基準）を満足しない場合、予め用意された記録領域に書き換えるという処理である。主に、製造工程による媒体欠陥を救済する。交代基準の設定によって、有効記憶容量等が決まるとともに、ECCによる誤り訂正能力にも影響する。

誤り訂正は、第8章で述べたように、再生時に発生する誤りをECCにより訂正し、見掛け上の誤りを皆無とする。主に、ECCは媒体経時劣化に起因して生じる欠陥の救済に使用される。

したがって、光ディスク媒体の長期信頼度に関しては、交代処理技術と誤り訂正技術が大きな役割を果たすので、これらによる信頼度の改善効果を十分考慮した信頼度予測が重要である^{(15), (16)}。

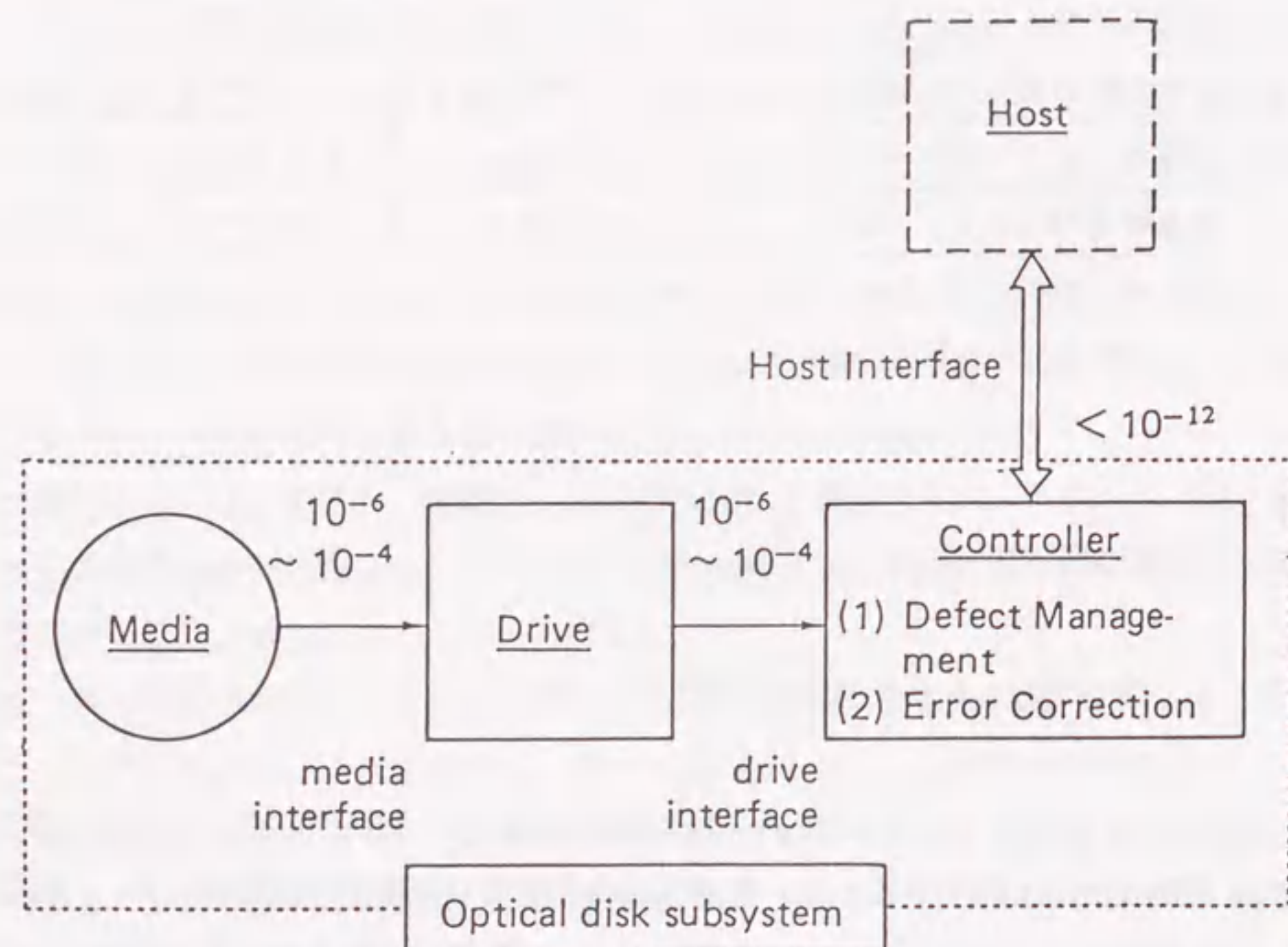


図9.1 光ディスク装置における誤り制御

9.3.2 予測手法と結果

一般に、部品・材料の特性の劣化は、それを構成する物質の拡散・酸化・再結晶などの物理・化学反応の進行によるものである。通常は複数の劣化反応が同時に進行するが、その中で最も劣化現象に影響の大きい反応を律速過程という。

ある部品または材料を代表する特性値を ϕ として、これがその熱平衡状態 ϕ_{∞} にないときには、 ϕ は ϕ_{∞} に向かって時間とともに変化する。上で述べた律速過程が単純な一次反応による場合には、この変化は、

$$d\phi/dt = (\phi_{\infty} - \phi) / \tau \quad (9-1)$$

と書くことができる。ここに、 τ は緩和時間と呼ばれる定数で、温度が高くなると次式に従って短くなる。

$$\tau = \tau_0 \cdot \exp(\Delta E / kT) \quad (9-2)$$

ここで、 τ_0 は定数、 k はボルツマン定数($= 8.616 \times 10^{-5}$ eV/deg)、 T は絶対温度、そして ΔE は活性化エネルギーと呼ばれて、反応の活性度を特徴付ける量である。ところで、 ϕ が ϕ_{∞} に比べて十分に小さい場合を考えると、(9-1)式の右辺の ϕ は無視され、

$$d\phi/dt = \phi_{\infty} / \tau = V \quad (9-3)$$

となり、この律速過程の反応速度 V は定数になり、

$$\phi = V t \quad (9-4)$$

となる。ここで、 ϕ がある値 ϕ_0 に達したときを寿命 L とすると、

$$L = \phi_0 / V \quad (9-5)$$

と与えられる。

実用的な部品・材料では、寿命 L は十分に長いものでなければならないから、実用条件で寿命を知るためには極めて長期にわたる試験が必要になる。そこで、比較的短時間で寿命を予測する方法として、しばしば加速劣化試験が用いられる。すなわち、反応速度 V は(9-2)、(9-3)式から分かるように温度の上昇とともに大きくなるので、高温で寿命測定を行う。この寿命と温度の関係は、(9-2)、(9-3)、(9-5)の各式より、

$$\ln L = A + \Delta E / k T \quad (9-6)$$

の関係のあることが分かる。ここに、 A は定数である。そこで、種々の温度で L を実測すれば、 $\ln L$ と $1/T$ のプロット、すなわちアレニウスプロットより A と ΔE が求められるし、この(9-6)式で与えられる直線を使用温度にまで外挿して、実用条件における寿命 L を推定することもできる。以下、ここで問題としている光ディスクについて、この手法による寿命の予測結果を示す。

デジタル情報の記憶装置として光ディスクを使用するとき、利用者が求める特性は誤り率が十分に低いことである。それも、個々のディスクについての話ではなく、記憶装置全体の特性がある基準を保証するものであれば十分である。コンピュータへの応用では、この誤り率は 10^{-12} 以下であることが求められている。ここから、光磁気ディスクの寿命として、「ECCによる訂正処理後の誤り率が 10^{-12} 以上となる時点」と定義するのが妥当なことを示している。

図9.2は、前の第8章で詳しく述べた誤り訂正符号を用いた場合の、訂正処理前後の誤り率の関係を求めた図である。インタリーブ長を10バイトとすれば、 10^{-12} 以下の誤り率を保証するためには、光ディスクの生の誤り率は 2×10^{-4} 以下であれば良いことが分かる。

図9.3は、前節9.2で示した方法により測定されたビット誤り率が、 2×10^{-4} 、 1×10^{-4} および 1×10^{-5} に達するまでの時間(寿命)と試験温度についてのアレニウスプロットの例を示している。ここに示した光ディスクの例では、上に述べた誤り率が 2×10^{-4} に達する時間、つまり寿命は、使用温度が 32°C として、約15年となることが示されている。

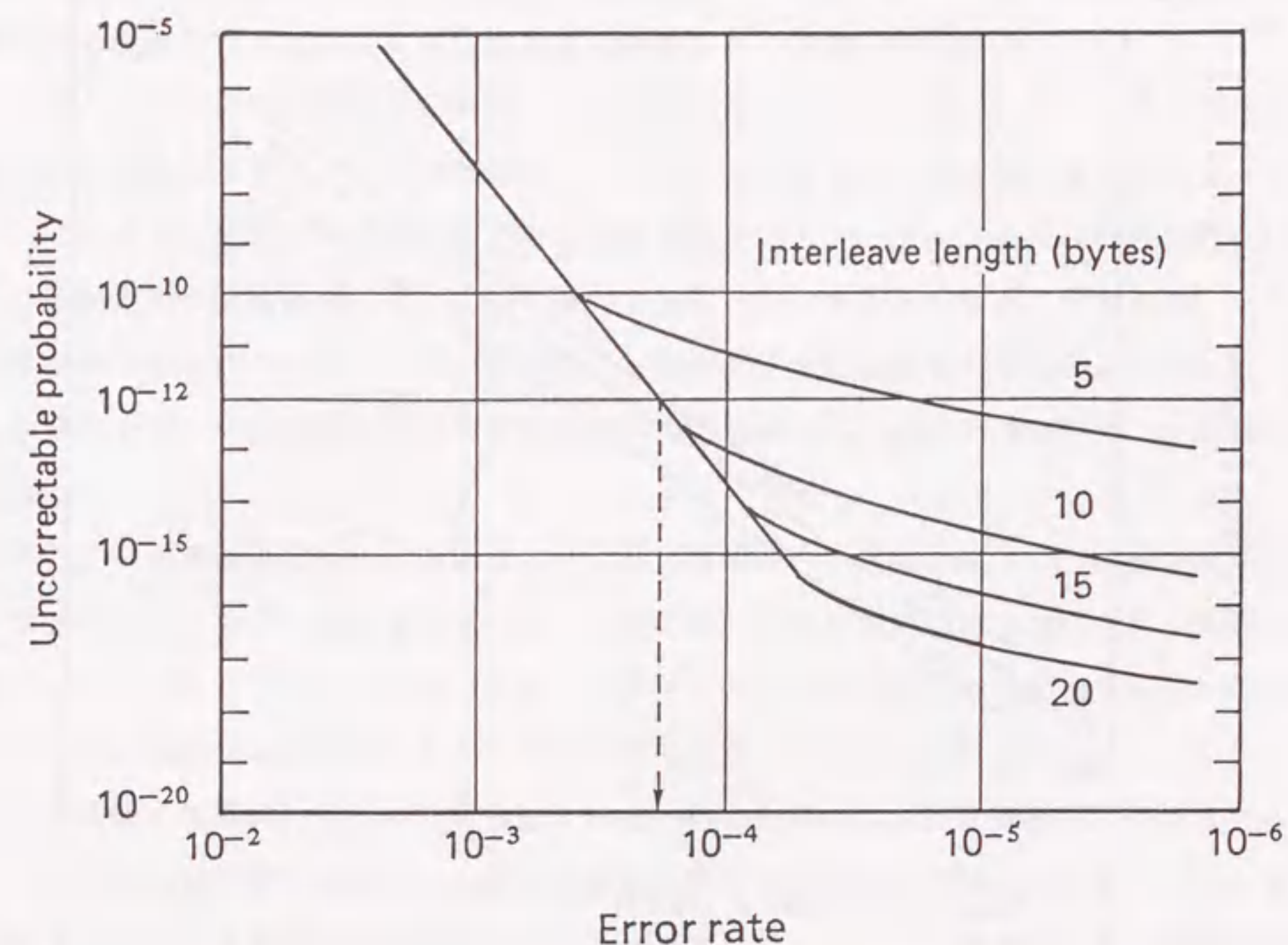


図9.2 誤り訂正能力の算出例

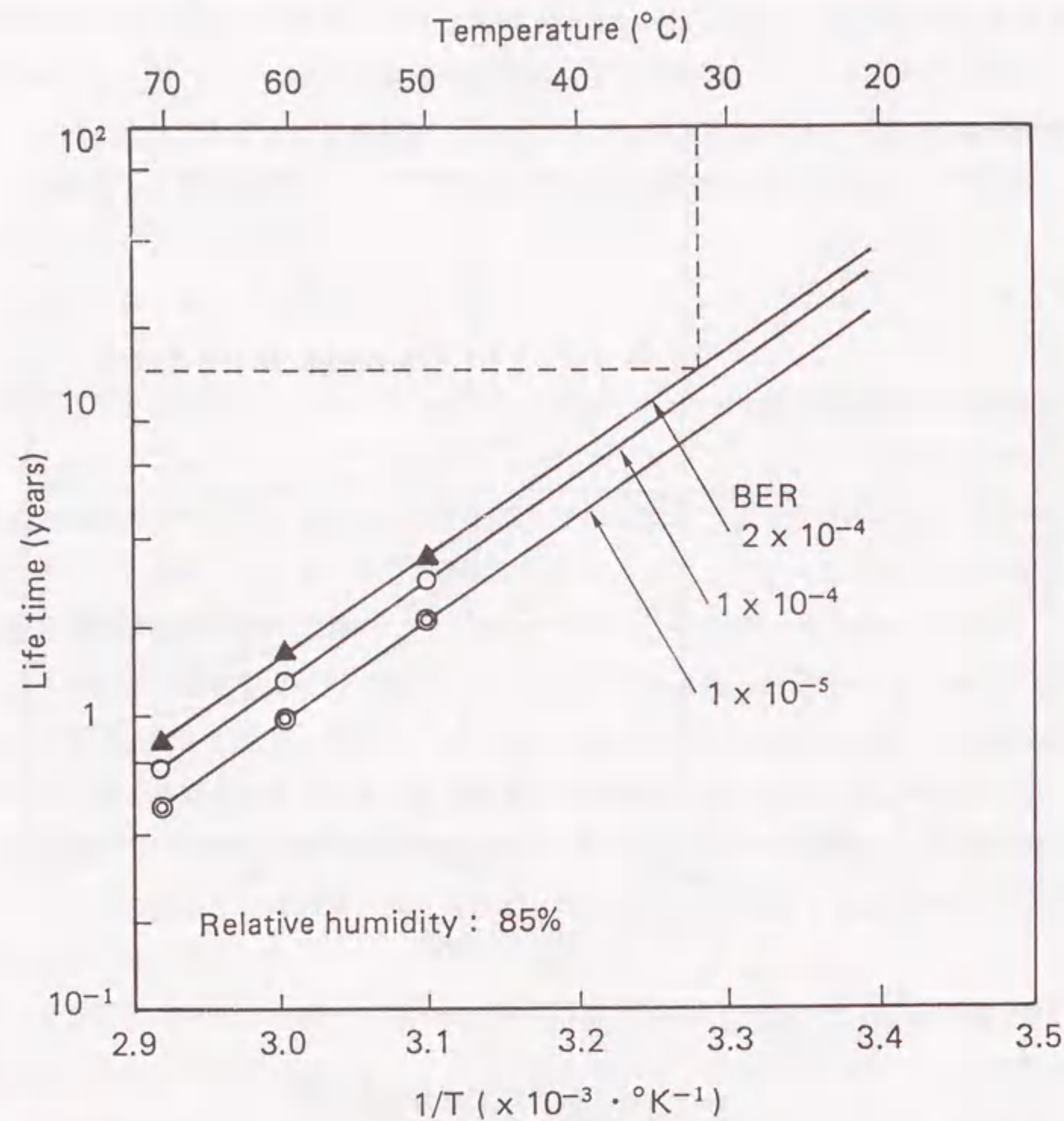


図9.3 アレニウスプロット

9.3.3 考察

前節で明らかにした光ディスク媒体の長期信頼度の予測手法は、光ディスク装置のフォールトトレラント技術を十分に考慮しているため、ユーザの使用状態に直結した非常に実用的な手法と言える。しかも、一貫して定量的な根拠に基づいているので、媒体の誤り特性や誤り制御方式の相違にも対応できる汎用性の高い予測手法である。

逆に、このような信頼度予測手法による解析結果を定量的な根拠として、光ディスク装置の誤り制御ストラテジーの設計にフィードバックさせることも重要と考えられる。つまり、光ディスク装置への各種性能要求と媒体性能とのトレードオフを交代処理技術及び誤り訂正技術等の記憶制御技術によって達成することができるといえる。すなわち、ある媒体性能が与えられたとき、所望の記憶容量・転送速度・信頼度等の装置性能を引き出すために必要十分な交代処理及び誤り訂正処理の具体的な方式・構成を導き出すことが可能である。

一方、高温高湿加速試験においては、恒温恒湿槽の出し入れによって、一種の温湿度サイクル試験を兼ねていると考えられる。このため、通常の使用状態での緩やかな温湿度変化においては起こり得ない剝離、そり、クラックなどの物理的変形が生じる可能性がある。これらの人為的な変形を核にして、欠陥が発生・拡大することが考えられる。つまり、加速劣化試験では媒体に通常の使用状態にはない何らかのストレスを強制的に与えているので、厳密にはいわゆる経時劣化の自然状態とは異なる劣化現象が発生し得る。したがって、印加ストレスによる固有の劣化モードを予め把握しておくことが重要である。理想的には、このような劣化が生じる以前に、律速過程に基づく劣化現象が十分進行していることが望ましい。

さらに、ECCによる誤り訂正能力の評価から、バースト誤りの影響が大きいことが明らかにされているので、最大バースト誤り長も加速劣化試験の注目すべき測定項目と考えられる。しかし、通常これ自体は信頼度予測パラメータにはなり得ないので、誤り率などの劣化による僅かな変化を忠実かつ敏感に反映させ得る測定項目と組み合わせる必要がある。

9.4 結 言

本章においては、交代処理技術および誤り訂正技術などの光ディスクのフォールトトレラント技術を考慮した媒体の実用的な長期信頼度の予測方法を提案した。主な結論を以下に述べる。

- (1) 光ディスク媒体の高温高湿下での加速劣化特性の測定のうち、特に重要である誤り率、バースト誤り長分布などの劣化特性の測定において、PLLを使用せず、簡便かつ効率的に誤りを検出できる方法について詳しく述べた。
- (2) 媒体劣化後の誤り特性の統計モデル化を基本とした誤り率の改善度解析手法とアレニウス・プロット法との組合せから寿命の規定値を決定することにより、実効的な媒体寿命を推定する手法を明らかにした。本予測手法の具体例として、8バイト誤り訂正可能なReed-Solomon符号の10段インタリーブを採用した場合、媒体寿命は10年以上と推定できることを示した。

以上の方法により、定量的根拠に基づき実用状況での光ディスク媒体の長期信頼度を推定可能であることを明らかにした。なお、上記(1)の誤り特性測定方法、及び(2)の媒体寿命推定方法は、再生専用型及び追記型光ディスク媒体においても同様に適用可能である。

[第9章の参考文献]

- (1) G.J.Ammon, J.A.Calabria, D.T.Thomas, "A high-speed, large-capacity, "juke-box" optical disk storage", Digest of Papers, 7th. IEEE Symposium on Mass Storage Systems, 43 (1985).
- (2) O.A.Reichardt, "OSAR (Optical Storage and Retrieval); A mass produced automated mass storage system", *ibid.*, 69 (1985).
- (3) 原 臣司, 中西 浩, 吉沢高志, 山田一郎, "130mm径光ディスク装置のハードウェア構成", 通研実報, 36, 10, 1397 (1987).
- (4) 太田賢司, "光磁気ディスクの信頼性", 日本応用磁気学会誌, 8, 361 (1984).
- (5) 小林政信, 浅野睦巳, 前野仁典, 大石佳代子, 川村和民: "光磁気メモリ媒体における腐食の環境依存性", 日本応用磁気学会誌, 8, 2, 209 (1987).
- (6) 桐野文良, 荻原典之, 太田憲雄, "TbFeCo-M光磁気膜の耐腐食性評価", 光メモリシンポジウム'88 論文集, 23 (1988).
- (7) 齊藤 実, 武田 立, 原 臣司, "光ディスク媒体の加速劣化試験方法", 昭59 信学電波全大, シンポジウム 6-4 (1984).
- (8) Y.Okino, "Reliability test of write-once optical disk", Proc. Int. Symp. on Optical Memory, 43 (1987).
- (9) 岡田満哉, 羽原 隆, 筑後宏基, 岡田昭彦, 土岐 薫, 岡田 修, 稲田博司, 後閑博史, "BERで評価した光磁気ディスクの経時変化", 光メモリシンポジウム'88, 87 (1988).
- (10) A.Gotoh and S.Nakamichi, "Long life 12" W-0 type optical disks", Proc. SPIE, 1078, 36 (1989).
- (11) H.Okazaki, T.Sasaoka, Y.Makane, T.Kiyomiya, H.Makino and T.Aoki, "A theoretical analysis for media life estimation using error rate", Proc. SPIE, 1078, 51 (1989).
- (12) H.Makino, "Reliability test of magneto-optical disks", Tech. Digest Int. Symp. on Optical Memory, 37 (1989).
- (13) 竹島幹夫, 岡田武司, "光ビーム記憶用プラスチック基板", 通研実報, 32, 2,

547 (1988).

- (14) 齊藤 実, “光ディスクの信頼性評価基準としてのBERの測定について”, 光ディスク標準化委員会(WG3)信頼性に関する研究会講演資料 (1988).
- (15) 齊藤 実, “欠陥救済効果を考慮した光ディスク媒体の長期データ信頼度推定手法”, 電子情報通信学会春季全国大会予稿集, 1-299 (1990).
- (16) 齊藤 実, “光ディスク媒体における誤り制御を考慮した長期データ信頼度予測”, 信学論 (C-II), J73-C-II, 2, 122 (1990).

第10章 光ディスク記憶装置へのフォールトトレラント技術の適用成果

10.1 緒言

本章では, 第4章から第9章までのフォールトトレラント技術に関する研究成果を, 130mm径光磁気ディスク装置および90mm径光磁気ディスク装置の開発に適用した結果について述べる. すなわち, 試作機における誤り特性の統計モデルに基づく交代処理技術および誤り訂正技術の方式設計の結果を示す. また, これらによって定まった130mm径光磁気ディスク媒体および90mm径光磁気ディスク媒体の記録フォーマットについて述べる.

10.2 130mm径光磁気ディスク装置

光ディスクが本来有する高記録密度性を十分生かすとともに, アクセス速度およびデータ転送速度の向上を達成した130mm径光磁気ディスク装置が, 1987年NTTで開発された^{(1),(2)}. この装置及び媒体は, 追記型光ディスクとの互換性をも目指すとともに, 媒体の国際標準規格にも準拠しているものである. 開発装置の主な仕様は表10.1, 媒体仕様は表10.2に示される如くである.

表10.1 130mm径光磁気ディスク装置の主な仕様

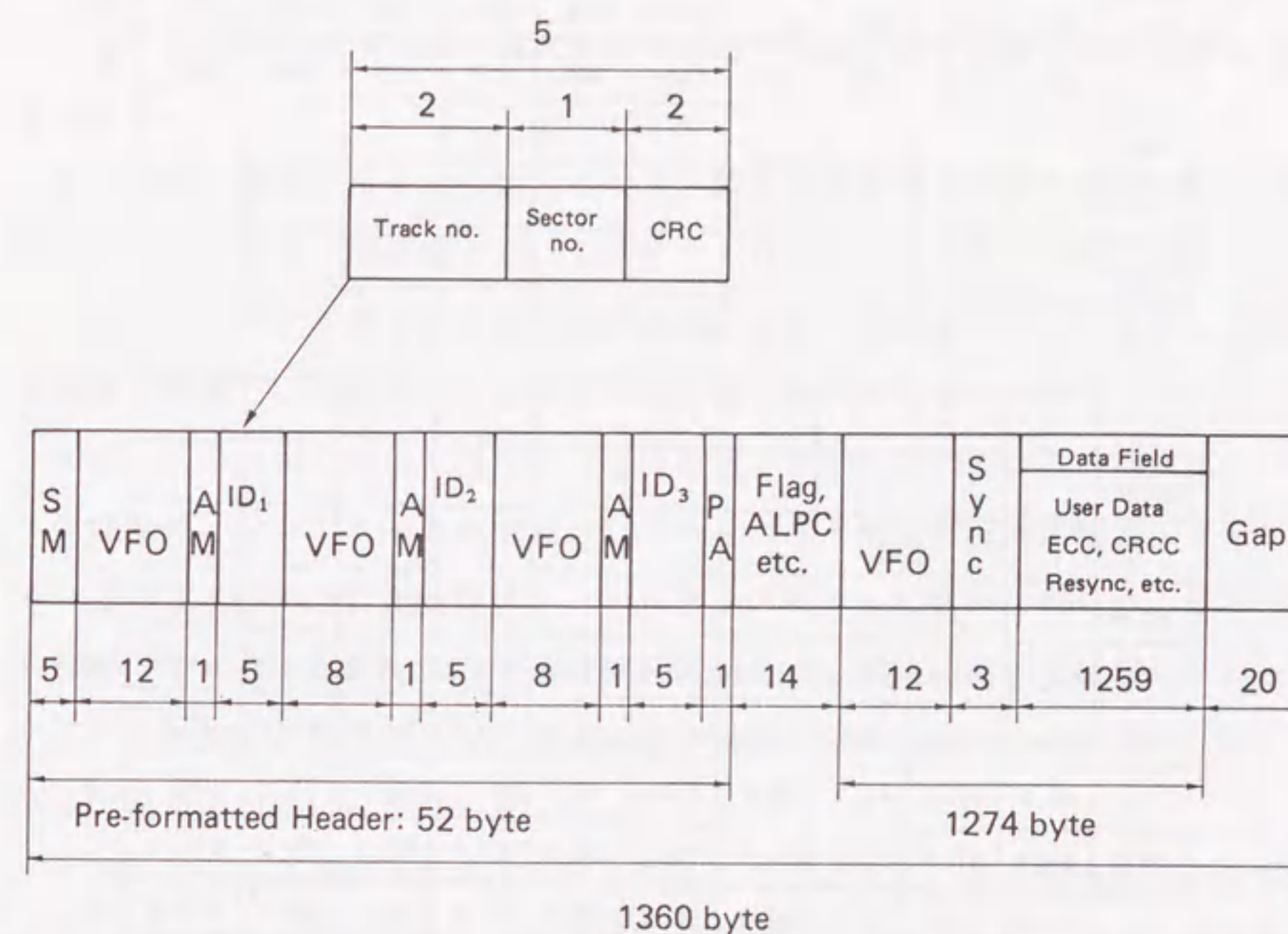
項 目	数 値 等
記憶容量	644 MB/両面
実効転送速度	0.68 MB/sec
平均アクセス時間	65 msec
ディスク回転数	2400 rpm
誤り率	10 ⁻¹² 以下
媒体寿命	10年以上
ホストインタフェース	SCSI*
寸法 (W×H×D)	146×82×209 mm

* SCSI: Small Computer System Interface.

表10.2 130mm径光磁気ディスク媒体の主な仕様

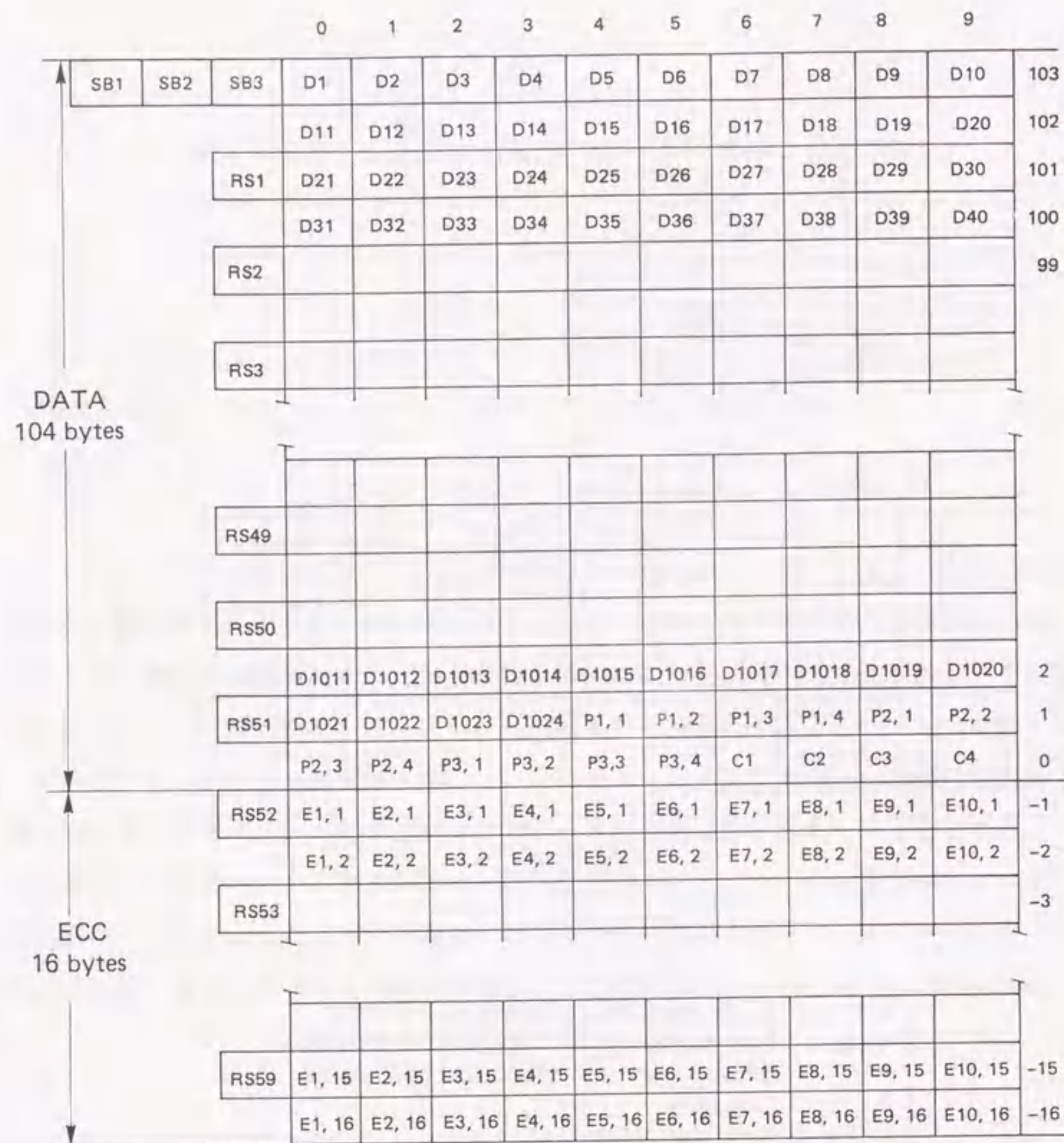
項目	数値等
記録方式	光磁気方式
直径	130 mm
記憶容量	644 MB/両面
トラック数	18750 トラック/面
セクタ数	17 セクタ/トラック
セクタ容量	1024 B/セクタ
トラックピッチ	1.6 μm
記録膜	TbFeCo
基板	ポリカーボネイト (PC)

本装置の高信頼化を表10.3に示したフォールトトレラント技術により図った。これは、第7章、第8章において述べた誤り特性を基本とした交代処理方式及び誤り訂正方式に基づいて設計されたものである。また、この結果得られたセクタフォーマットを図10.1、データブロックフォーマットを図10.2に示す。セクタ当りのユーザ記憶容量は1024バイトであるが、セクタアドレス、ECC等のため総計1360バイトとなる。アドレス部は、セクタマーク、アドレスマーク、同期パターン、アドレス及びレーザパワーの調整領域から成る。また、データ部は、同期引き込み用のパターン、データバイト、再同期パターン、ポインタバイト(交代情報)、CRCC(Cyclic Redundancy Check Code)バイト、ECCバイトから構成されるものである。



- SM : Sector mark (Pit-pattern 5 3 3 7 3 3 5)
- VFO : Synchronous pattern (Ex. 100100100
- AM : Address mark (Ex. 0100 1000 0000 0100)
- PA : Postamble
- ALPC : Auto laser power control area

図10.1 セクタフォーマット



SB : Sync. byte
 RS : Resync. byte
 D : Data byte
 P : Pointer byte (for defect information)
 C : CRC byte
 E : ECC byte

図10.2 データブロックフォーマット

交代処理方式については、まずユーザ使用に先立つイニシャライズ時は Mapping方式を用いる。すなわち、全セクタの消去・記録・再生を行い、交代基準に基づき欠陥セクタを判別する。欠陥セクタはそれに続く直後のセクタに交代される。この交代情報は媒体上のマッピング領域に記録される。次に、経時劣化などによりユーザ使用中に発生した欠陥セクタは、Linear-replacement方式により所定の領域に集中配置された交代セクタに切り換えられる。

データ部に適用するECCは、8バイト誤り訂正可能な短縮化Reed-Solomon符号とした。インタリーブは10段構成とし、1セクタ1024バイト当りで総計80バイトものパースト誤り・ランダム誤りが訂正可能である。また、再同期パターンをデータ中に20バイト間隔で配置し、同期ずれによる誤りの伝搬を防いでいる。

また、ECCの符号化・復号化回路は専用LSI化されている。当初は、チェックバイト生成回路、シンドローム生成回路、1~3バイト誤り訂正回路等はLSIで実現され、4~8バイトの誤り訂正処理はファームウェアによって行われていた。その後、すべての処理部分のLSI化が図られ、装置の高信頼性・小型化に大きく寄与している。なお、1~3バイト誤りの復号アルゴリズムはビーターソンの方法、4~8バイト誤りにはユークリッド復号法が用いられている。

アドレス部は3重にプリフォーマットすることにより、長大欠陥に起因する再生ミスを大きく低減させている。また、アドレス読取り誤りを防ぐため、その検出契機を与えるセクタマークやアドレスマークを冗長化して高信頼度化を図っている。

なお、本装置は書換型であるので、従来の磁気記憶装置と同様の適用領域が考えられており、次々に導入されていくものと予想される。さらに、光ディスク媒体の大容量性を活かしてイメージ情報の効率よい蓄積が期待できる。この一例として、本装置を多数の媒体を自動管理する機能を有するライブラリ装置に組み込んで、使い勝手の良い文書ファイル装置として活用するという試みもなされている。また、汎用パソコンをファイルマネージャとして、音声情報や画像情報をも積極的に取り込んだマルチメディアファイルとしても応用されている⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。今後、オフィス等のペーパーレス化の有力な武器として普及が期待されている。

表10.3 130mm径光磁気ディスクにおける誤り制御方式

項 目	数 値 等
交代処理方式	インテイク時：スリッピング方式 インテイク後：リニアリネズメント方式
交代セクタ数	2048 セクタ/面
誤り訂正符号	Reed-Solomon 符号 (Long Distance Code)
• 種類	$G(x) = x^8 + x^6 + x^3 + x^2 + 1$
• 原始多項式	$P(x) = \prod_{i=1}^{135} (x + \alpha^i)$
• 生成多項式	
誤り検査符号	Cyclic Redundancy Check 符号
• 種類	$G(x) = x^8 + x^6 + x^3 + x^2 + 1$
• 原始多項式	$P(x) = \prod_{i=1}^{136} (x + \alpha^i)$
• 生成多項式	
インタリーブ	10-way interleave
リシンク	20-Byte 単位 0010 0000 0010 0100
アドレス記録方式	3重記録
アドレス誤り検査符号	Cyclic Redundancy Check 符号
• 種類	$P(x) = x^{16} + x^{12} + x^6 + 1$
• 生成多項式	2/7変調方式
変調方式	ビットポジション記録方式
記録方式	

10.3 90mm径光磁気ディスク装置

世界に先駆けて、1989年に90mmクラスの小型光磁気ディスク装置が開発された⁽⁶⁾⁻⁽⁹⁾。本装置は、上記の130mm径光磁気ディスク装置の技術を継承しつつ、小型化技術を追求した結果実現されたものである。このため、媒体は単板であり、装置はハーフハイト（高さ41mm）である。本装置は、パーソナル・ユースに的を絞って開発された。

以下に、本装置の主な仕様を表10.4、媒体仕様を表10.5に示す。また、試作装置およびカートリッジの概観を図10.3に示す。

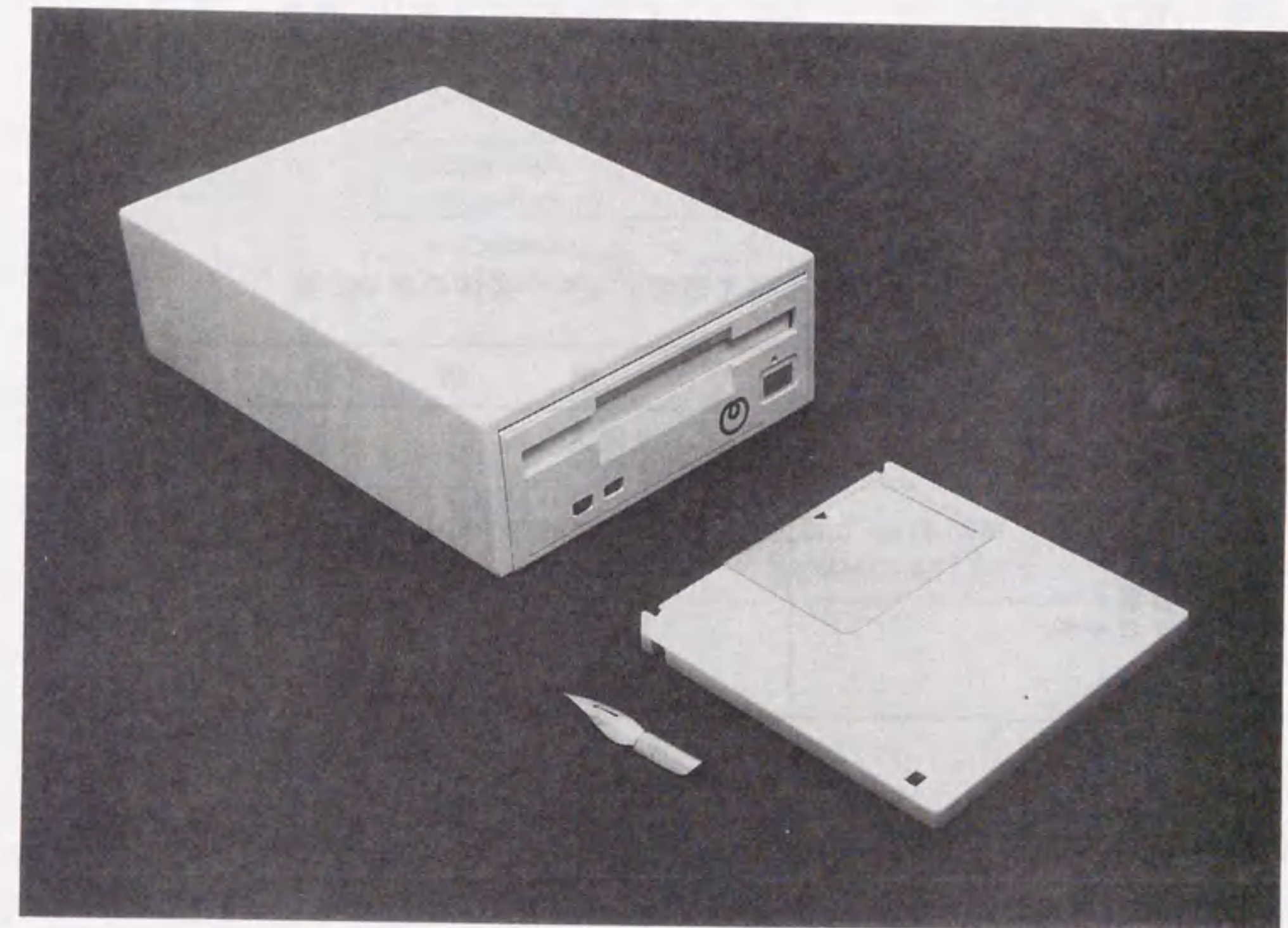


図10.3 90mm径光磁気ディスク装置の概観

表10.4 90mm径光磁気ディスク装置の主な仕様

項目	数値等
記憶容量	100 MB/片面 以上
実効転送速度	330 kB/sec
平均アクセス時間	100 msec 以下
ディスク回転数	1800 rpm
誤り率	10^{-12} 回/bit以下
媒体寿命	10 年以上
ホストインタフェース	SCSI*
寸法 (W×H×D)	102×41×150 mm

* SCSI: Small Computer System Interface.

表10.5 90mm径光磁気ディスク媒体の主な仕様

項目	数値等
記録方式	光磁気方式
直径	86 mm
記憶容量	100 MB/片面
トラック数	10667 トラック/面
セクタ数	22 セクタ/トラック
セクタ容量	512 B/セクタ
トラックピッチ	1.5 μm
記録膜	TbFeCo
基板	ポリカーボネイト(PC)

本装置の高信頼度を表10.6に示した誤り制御方式により図った。これらは、130mm径光磁気ディスク装置と同様に第7章、第8章において述べた交代処理方式及び誤り訂正方式に基づいて設計されたものである。また、この結果得られたセクタフォーマットを図10.4、データブロックフォーマットを図10.5に示す。

媒体記録フォーマットは、装置の小型化、媒体および装置の幅広い互換、ROMディスク(スタンプ型再生専用ディスク)媒体との互換性確保などの要件を満足するよう新たに考案された。

まず、データ部のECCには130mm径光磁気ディスク装置において用いられた8バイト誤り訂正可能な短縮化Reed-Solomon符号を採用した。ECC専用LSIの資源共有の観点から、その原始多項式、生成多項式は130mmと同様とした。

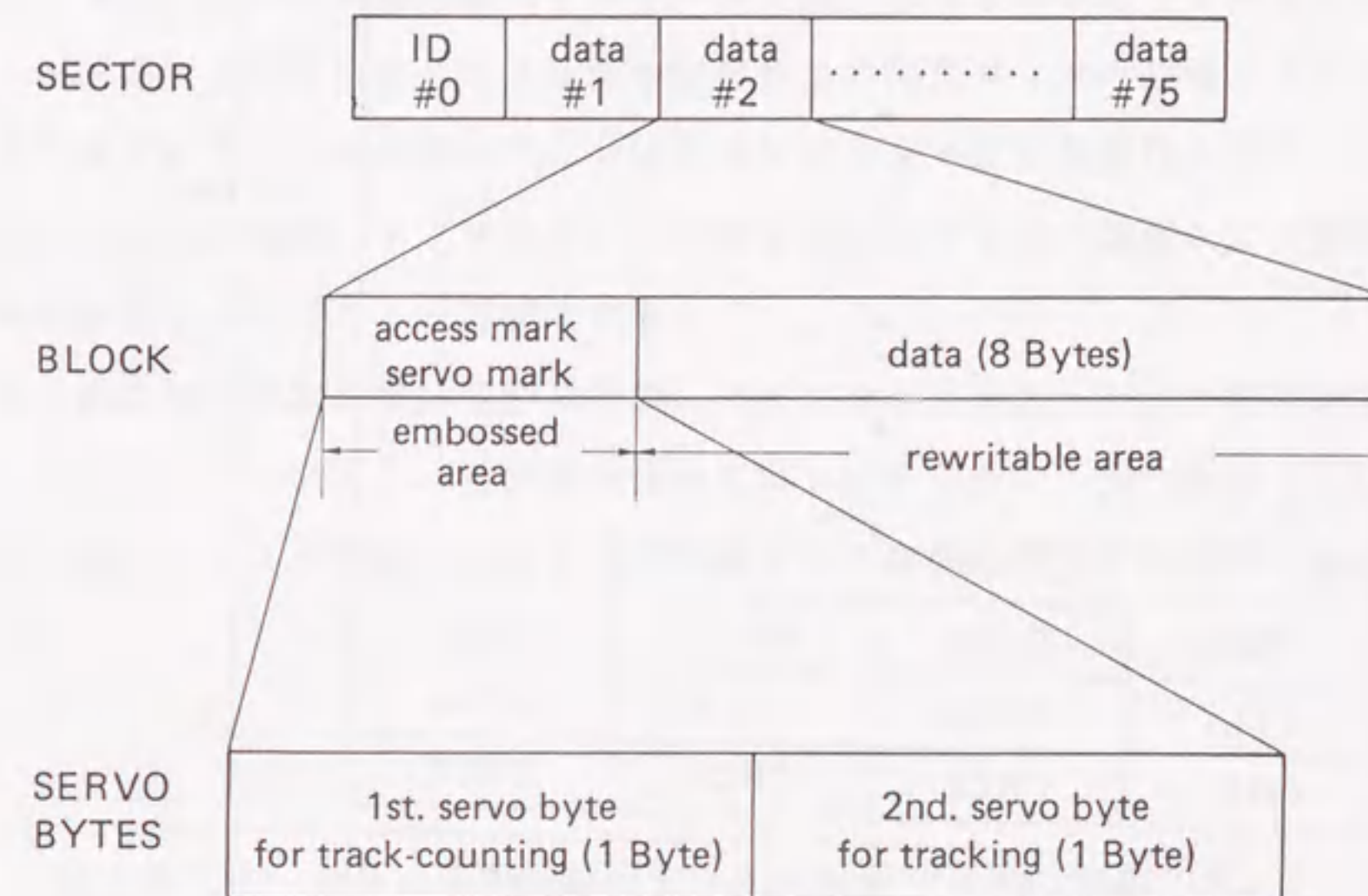
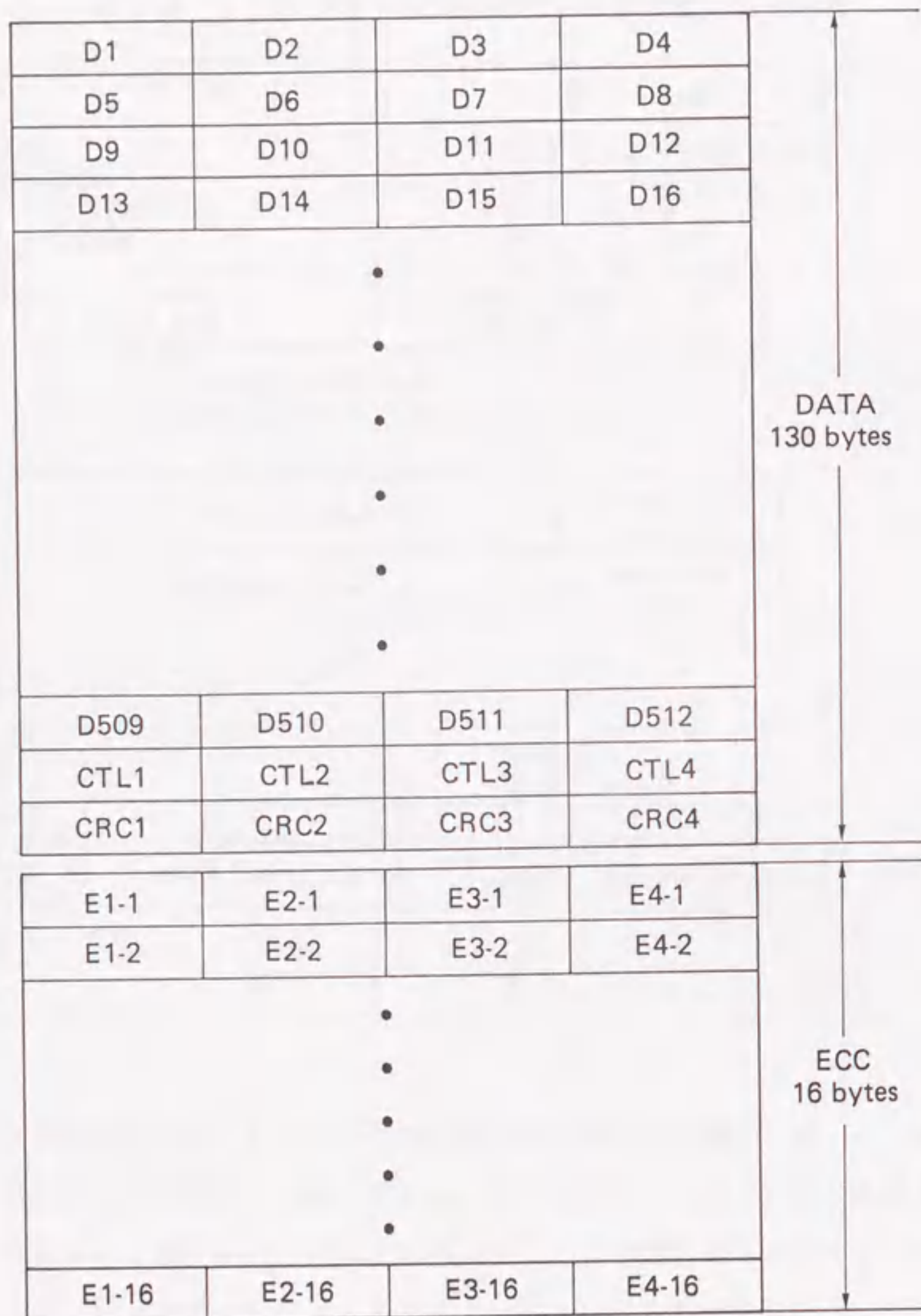


図10.4 セクタフォーマット



D : Data byte
 E : ECC byte
 CTL : Control byte
 CRC : CRC byte

図10.5 データブロックフォーマット

インタリーブは4段構成とし、1セクタ512バイト当りで総計32バイトのバースト誤り・ランダム誤りが訂正可能である。この誤り訂正方式による信頼度改善効果を第8章において明らかにした解析手法を用いて算出した結果を図10.6に示す。訂正前の誤り率が 10^{-4} でも訂正処理により 10^{-12} が十分確保できることが分かる⁽⁹⁾。

次に、アドレス部では多重記録によりバースト誤りによる読み取りミスを低減させるとともに、一部書換え可能なアドレス領域を設けたので磁気ディスク同様セクタインタリーブ動作が可能である。これを用いて、ソフトインタフェースを最適化することにより高速処理も可能である。また、セクタアドレスの付与の仕方により、論理セクタ容量を512バイト単位に増加させることが容易にできる。

さらに、溝のない媒体を用いているので、データをエンボス・ビットで記録するROMディスクと光磁気ディスクとの互換性が極めて良い。すなわち、同一装置でROM領域が混在する光磁気ディスク媒体や全面ROM領域である媒体の再生が即座にできるという利点がある。

表10.6 90mm径光磁気ディスクにおける誤り制御方式

項 目	数 値 等
交代処理方式	インテライズ時：スワッピング方式 インテライズ後：リアライズメント方式
交代セクタ数	1024 セクタ/面
誤り訂正符号	Reed-Solomon 符号 (Long Distance Code)
• 種類	$G(x) = x^8 + x^5 + x^3 + x^2 + 1$
• 原始多項式	$P(x) = \prod_{i=120}^{135} (x + \alpha^i)$
• 生成多項式	
誤り検査符号	Cyclic Redundancy Check 符号
• 種類	$G(x) = x^8 + x^6 + x^3 + x^2 + 1$
• 原始多項式	$P(x) = \prod_{i=136}^{139} (x + \alpha^i)$
• 生成多項式	
インタリーブ	4-way interleave
アドレス記録方式	3重記録
アドレス誤り検査符号	Cyclic Redundancy Check 符号
• 種類	$P(x) = x^{16} + x^{12} + x^6 + 1$
• 生成多項式	
変調方式	4/11変調方式
記録方式	ビットポジション記録方式

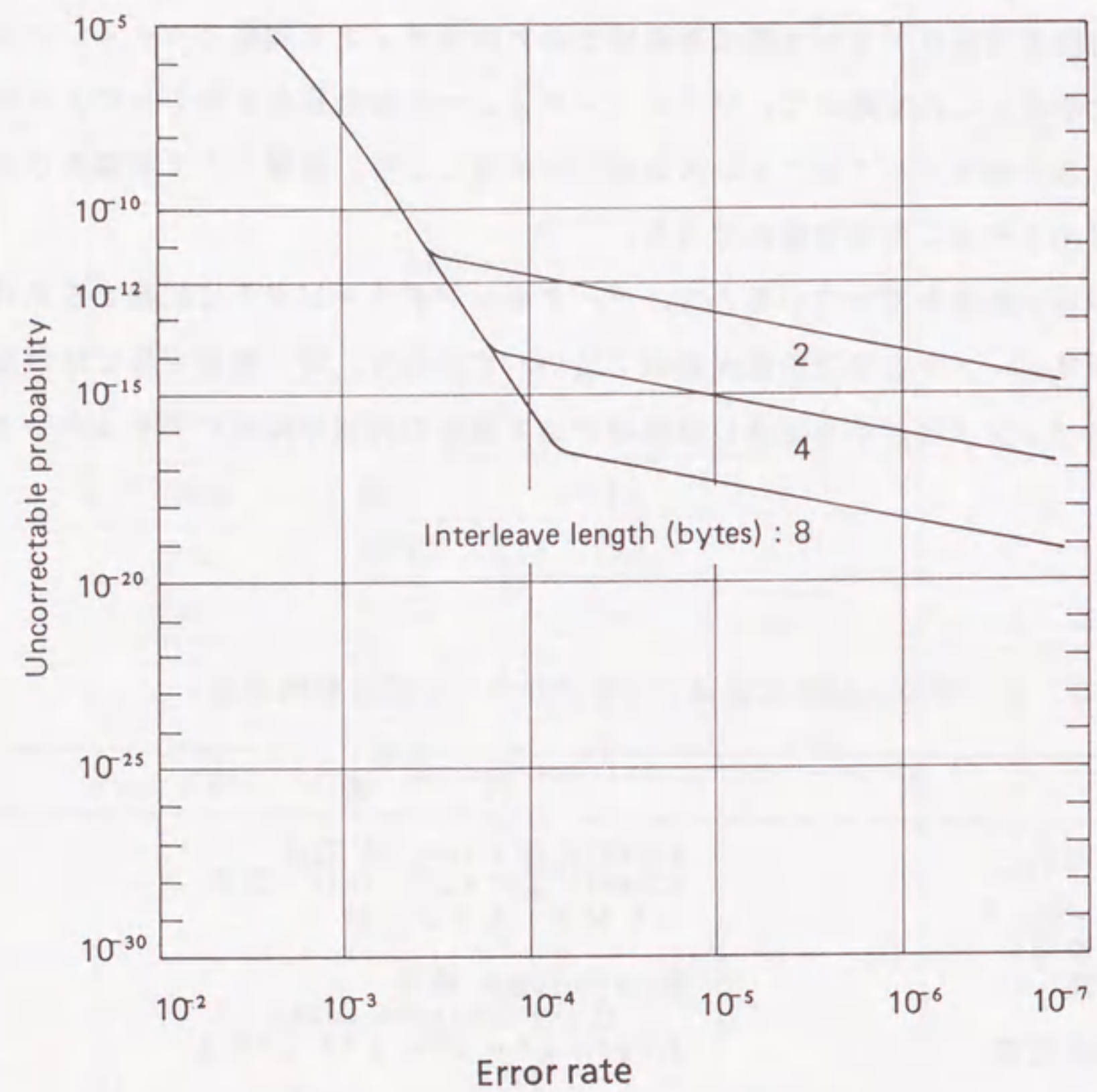


図 10.6 誤り訂正能力

10.4 結 言

光ディスク記憶の高信頼化に関する研究成果を、日本電信電話株式会社電子応用研究所において研究開発された130mm径光磁気ディスク装置および90mm径光磁気ディスク装置に反映させることができた。

すなわち、光ディスク媒体の誤り特性に基づく交代処理技術および誤り訂正技術の方式設計を行い、具体的な構成を決定した。これらによって、光ディスク記憶制御系を構築するとともに、媒体の記録フォーマットの最適化を図った。

なお、本開発を通じて、130mm径光磁気ディスク媒体および90mm径光磁気ディスク媒体の国際標準化においても技術的資料を提供することもできた。

[第10章の参考文献]

- (1) 板生 清, 山路昭彦, 原 臣司, 井沢伸芳, “高速追記・書換形光ディスク記憶システム”, 通研実報, 36, 10, 1389 (1986).
- (2) 中西 浩, 渡部昭憲, 山本 学, 山崎裕基, “追記・書換互換性をめざした高速光ディスク装置”, 信学技報, MR86-34, 17 (1986).
- (3) 武田 立, 齊藤 実, “書換形光ディスクを用いたパーソナル文書ファイルの検討”, 画像電子学会研究会, 87-02-03 (1987).
- (4) 武田 立, 井沢伸芳, 齊藤 実, 板生 清, “仮想ドライブ型オートチェンジャを用いた書換形光ディスク用文書ファイルの検討”, 信学技報, OS87-16(IE87-59), 13 (1987).
- (5) 石井克典, “書換形大容量光ディスクを用いたマルチメディアファイリングシステム”, NTT技術ジャーナル, 1, 6, 67 (1989).
- (6) T.Takeda, M.Saito and K.Itao, “System design of optical micro-disk subsystem”, Proc. SPIE, 899, 16 (1988).
- (7) M.Saito, T.Takeda and K.Itao, “90-mm optical disk subsystem using high-speed digital control techniques”, Optical Data Storage, 129 (1989).
- (8) 武田 立, 齊藤 実, 板生 清, “マイクロ光ディスク・サブシステム”, NTT R & D, 38, 6, 649 (1989).
- (9) M.Saito, T.Takeda and K.Itao, “Optimum error control strategy for optical micro-disk subsystem”, Trans. IEICE, E73, 5, 712 (1990).

第 1 1 章 ま と め

本論文は、電子計算機用ファイル記憶装置の高信頼化に関し、磁気バブル記憶装置及び光ディスク記憶装置のフォールトトレラント技術に関する研究成果を述べたものである。

本章では、本論文のまとめとして、研究の背景・目的の概要を述べた後、各章の研究成果を要約する。

本研究の対象とした磁気バブル記憶装置と光ディスク記憶装置は、情報通信システムの一翼を担う情報記憶を実現する新たな高性能、高機能ファイル記憶装置として登場して来たものである。磁気バブル記憶装置は、半導体メモリに優るチップ記憶容量を有するとともに耐環境性に優れた固体ファイル装置である。また、光ディスク記憶装置は、既存の磁気記憶装置を約1桁上回る高記録密度性を達成している。

これらの装置では、その高い記録密度を実現するため、高度な技術を駆使して記録媒体を製造しているが、現状では微少な媒体欠陥を完全に無くすることは不可能である。従来の磁気ディスク装置、磁気テープ装置等においては、媒体欠陥がデータ誤りに至る確率は極めて低かったため、例外的な事象としてオフラインで処理されていた。しかし、磁気バブル記憶装置・光ディスク記憶装置においては、媒体欠陥の存在が避けられないものとして容認した上で、各種のフォールトトレラント（欠陥救済）技術を適用する必要がある。

本研究は、磁気バブル記憶装置と光ディスク記憶装置の高信頼化を効率良く実現するために、それぞれの記憶媒体の特性に基づいて最適のフォールトトレラント技術を確立することを目的としている。

第2章においては、磁気バブル記憶の誤り特性を正確に把握するための測定方法について述べるとともに、初期特性および劣化特性について代表的な実測例を示し、誤り特性を解析した。測定例として、旧日本電信電話公社電気通信研究所において、電子交換システム用ファイル記憶装置として研究開発され、実用に供された磁気バブル記憶装置の信頼性の評価実験について述べた。この結果、メジャマイナループ構成を有する磁気バブル記憶

素子を用いた装置においては、装置外部にはマイナーループ単位の欠陥と見なされることから、チップ上に存在する微小欠陥の性質を詳細に捉える必要はなく、マイナーループ単位の欠陥状態の把握が重要であることを確認した。また、記憶容量64kbit及び256kbit チップにおける欠陥ループの存在分布の実測値が、ポアソン分布により近似できることを明らかにした。さらに、長期データ信頼性の調査として、磁気バブル記憶ユニット（容量4Mbit）20台の信頼性マージンを長期間実測した結果、22年以上にわたり十分なマージンが確保できることも明らかにした。

第3章においては、磁気バブル記憶チップの歩留りを向上させるためには、マイナーループ群の冗長化が有効であるという観点から、各種予備構成の設計・評価手法について述べた。すなわち、チップの欠陥密度を基本量として欠陥救済効果を定量化した。また、チップ欠陥密度と方式要求とを満足したうえで、最小ハードウェアで実現可能な最適予備構成が存在することを明らかにした。さらに、最適予備構成の適用を前提として、効果的な誤り訂正符号の新規の導入方法を示すとともに、これによるデータ信頼度の改善効果を定量化した。

第4章においては、光磁気ディスク媒体の基本記録再生特性の実測結果について述べた。すなわち、光磁気ディスクのSNRは30dB程度あり、デジタル情報の記憶媒体として十分高い品質を有していることを明らかにした。また、SNRの検光子角度依存性の実測値は理論値と良く一致し、SNRが最大となる検光子角度が存在することを示した。

第5章においては、まず、正確かつ効率良い誤り特性の測定方法について述べた。誤りは媒体欠陥に起因して固定個所に発生し、誤り率は通常 10^{-4} ~ 10^{-6} に達することと、バースト誤り長分布として短い誤りが多発するとともに、数10ビットに及ぶ比較的長い誤りも存在するという特徴を把握した。さらに、光磁気ディスク媒体の加速劣化特性から、酸化により媒体欠陥が拡大成長或いは新たに発生し、これによって誤り率の増加、バースト誤りの増加等が生じることを明らかにした。

第6章においては、初期および経時劣化後の誤り特性に基づく各種フォールトトレラント技術の定量的な取り扱いを可能にすることをねらいに、誤り特性を2方向のアプローチから解析した。すなわち、バースト誤り長分布の測定結果から導かれるギルバートモデルを基本とした統計モデルによる解析と、欠陥の形状等を円形と仮定した統計モデルに基づく解析である。両者ともバースト誤り長分布の実測値を合理的に説明できることを明らかにした。

第7章においては、まず、高い信頼性の光ディスク装置を実現するための冗長化ストラテジーについて述べている。その第1段階では、媒体製造時の欠陥に起因する誤りをデータ記録直後の再生による記録品質の検査に基づく交代処理で見掛け上皆無とし、第2段階では、媒体の経時劣化に起因する誤りを、誤り訂正符号に代表される誤り訂正処理により実効上零にする。これらの冗長構成の具体的な設計においては、装置性能とシステムコストが相反する関係にあるため、最適な設計値を見出すことが必要である。ここでは、上記2段階のフォールトトレラント技術のうち、交代処理方式に焦点を絞って、光ディスク媒体の誤り特性を考慮した新たな交代処理設計手法を提案した。まず、光ディスク記憶における交代処理技術の概要および各種方式について述べ、次に、光ディスクのバースト誤り長分布の実測結果を状態遷移モデルで記述し、モデルパラメータ（状態遷移確率）から所定の長さ以上のバースト誤りの発生確率を導出した。この確率に基づき、交代セクタ・交代トラックの発生確率および媒体の欠陥救済確率を求め、交代処理方式の定量的な設計手法を明らかにした。最後に、交代処理方式と媒体製造歩留りとの関係にも言及した。

第8章においては、光ディスクの誤り特性を考慮した信頼度の解析手法を提案した。誤り特性を数学的に取り扱うための統計モデルに基づき、誤り訂正符号によるデータ誤り率の改善効果を定量的に明らかにした。同様に、バースト誤り長分布を考慮して、アドレス多重記録によるアドレス誤り率の改善度を導出した。さらに、再同期パターンビットパターン構成についても考察した。

第9章においては、光ディスク記憶のフォールトトレラント技術を考慮した媒体の実用的な長期信頼度の予測手法を提案した。まず、媒体の高温高湿下での加速劣化特性の測定方法のうち、特に、誤り特性の変化を正確かつ効率的に測定可能な方法について述べた。

次に、媒体劣化後の誤り特性の統計モデル化を基本とした誤り率の改善度解析手法とアレニウス・プロット法との組合せから寿命の規定値を決定することにより、実効的な媒体寿命を推定する手法について述べた。本予測手法の具体例として、8バイト誤り訂正可能なReed-Solomon符号の10段インタリーブを採用した場合、誤り率 10^{-12} 以下を確保できる媒体寿命は10年以上と推定できることを示した。

第10章においては、光ディスク記憶のフォールトレラント技術に関する研究成果を、130mm径光磁気ディスク装置および90mm径光磁気ディスク装置に適用した。すなわち、光ディスク媒体の誤り特性に基づく交代処理技術および誤り訂正技術の方式設計を行い、具体的な構成を決定した。これらによって、光ディスク装置の誤り制御系を構築するとともに、媒体の記録フォーマットを定めた。

謝 辞

本論文を結ぶにあたり、終始御懇切なる御指導、御鞭撻を賜りました名古屋大学工学部電子工学科 内山 晋教授に謹んで深い感謝の意を表します。

また、本論文をまとめるに際し、有益な御教示、御助言を賜りました名古屋大学工学部情報工学科 稲垣康善教授、ならびに電子機械工学科 三矢保永教授に対し、深い感謝の意を表します。

本研究をまとめる機会を与えて頂き、適切な御指導、御援助を頂戴した、山梨大学工学部電子情報工学科 春日正伸教授ならびに清水 東教授に深く感謝致します。

本研究の遂行にあたり、日頃から御指導、御援助を頂いた、日本電信電話株式会社 電子応用研究所 稲垣伸夫所長、板生 清研究企画部長、平松琢弥オプトメカトロニクス部長、山田一郎主幹研究員、佐藤勇武主幹研究員の方々に深く感謝致します。また、本研究の機会を与えて頂くとともに、適切な御指導を賜った、茨城電気通信研究所 川又 晃元所長（現 ミナトエレクトロニクス㈱）、武蔵野電気通信研究所 電子装置研究部 寺島 諒 元部長（現 横河北辰電気㈱）、山田正計 元部長（現 ㈱グラフィカ）、深津良治 前部長（現 三菱レーヨン㈱）、電子機構研究所 機構技術研究部 徳吉睦生 前部長（現 東北金属工業㈱）、記憶装置研究室 飯田麒一郎 元室長（現 松下通信工業㈱）、ファイル記憶研究室 伊藤陽之助 元室長（現 ㈱東芝）、小野京介 元室長（現 東京工業大学）の方々に深謝致します。

本研究の実施にあたり、磁気バブル記憶の研究に関しては、布谷正勝主幹技師、古川純男主任研究員の方々に御指導、御助言を頂きました。光ディスク記憶の研究に関しては、理論解析から各種実験までの研究全般にわたり武田 立主幹研究員に適切な御指導と御協力を頂きました。また、原 臣司主幹研究員、細川茂文主幹研究員、渡部昭憲主幹研究員、山本 学主幹研究員、高柳 慎主任研究員の方々には、有益な御示唆、御助言を頂戴致しました。ここに改めて感謝の意を表します。

本研究は、以上のように多くの方々の御指導と御援助によって、はじめて完遂されたものであり、ここに深甚なる謝意を表します。

