

デジタル情報の恒久的保存のための アーカイブ光ディスクの期待寿命評価方法

入江 満

Life Expectancy Evaluation Method of Optical Disk for Digital Data Archiving

IRIE Mitsuru

Abstract

In the era of digital big data, the users demand a stable preservation method of a huge digital information data. Today, we have three digital data storage media-type; Solid state (semiconductor, SRAM etc.), Magnetic (HDD, Tape) and Optical discs (CD, DVD, BD). Otherwise, in the today's carbon-conscious society, the optical disc technology be refocused on archiving solution for digital data information. Then, Recordable optical disc in professional use would be the most promising one in those digital storage media. This paper reports discussion of the life expectancy evaluation method of optical disk for data archiving based on the ISO/IEC standard.

Key words: digital data, Optical discs, Archive, life expectancy, ISO/IEC

キーワード：デジタルデータ，光ディスク，アーカイブ，期待寿命，ISO/IEC

1. はじめに

我々が生み出すデジタルデータ量は、2020年には40ZBという天文学的数値の予想も報告され、爆発的に増加するデジタル情報の保存・蓄積に対応する取り組みが急務の課題となっている。特に、脱炭素社会化に向けたデジタルデータ保存に対する省エネルギー化（グリーンIT）の重要性が指摘されている。10年以上の長期にわたって情報を保存する永続的保存を目的とし

たストレージメモリには、データの保存寿命が重要な指標となるが、光ディスクは20年を越えるストレージ特性を有することが市場で実証されており、さらに、保管時にエネルギーを必要としない。このように光ディスクは、脱炭素社会化に適したデジタル情報のアーカイバル保存媒体である^{1, 2)}。

光ディスクは、1982年にCD (Compact Disc) が登場後、30年以上に渡って開発が行われ、民生用音楽、ビデオのデジタル情報媒体として大容量化・高転送レート化を目指して仕様・用途は変遷し、今日では100GBの記録容量を有するBlu-ray Disc™ (BD) の導入に至っている。近年では、国内外にて光ディスクのアーカイバル用途及びその評価に関する重要性の認識が高まり、光ディスクを用いた電子化文書を長期保存するための媒体移行の手順を規定した標準規格^{3, 4)}も策定されている。

デジタル情報を永続的に保存するためには、記録されたデータの保存寿命を確保することが重要である。光ディスクの信頼性寿命の評価に関しては、筆者が国際エディタとしてアーカイブ特性評価を目的として2014年に、CD, DVD (Digital Versatile Disc) 及びBD光ディスク媒体に対応した光ディスク寿命推定試験法を国際標準規格⁵⁾として制定した。

ここでは、アーカイブ用途のための光ディスク期待寿命推定評価の概要及び新たに構築した評価システムを報告する。

2. アーカイブメモリとしての光ディスク

デジタル情報の記録デバイスには、HDD (Hard Disk Drive) の磁気メモリ、SSD (Solid State Drive) やUSB (Universal Serial Bus) メモリに代表される半導体メモリ、及び光メモリがあり、例えば、HDDはPCやクラウドストレージの1次大容量メモリとして、半導体メモリはPCのキャッシュメモリや携帯型メモリのUSBメモリとして、一方、光メモリは、オーディオ・ビデオ等のパッケージメモリやバックアップ保存用メモリとして普及している。図1にデジタル情報のストレージデバイスの種類とデータの保存方式の概要を示した。

特に、デジタル情報の永続的保存を目的としたストレージメモリには、データの保存寿命が重要な指標となる。この保存寿命に関しては、磁気メモリは磁気メディアや記録再生デバイス (磁気ヘッド) 等の耐久限界により5年 (保障期間)、半導体メモリは電子の移動による書き換えの限界により3年程度と言われている。光メモリは1990年当時に販売されたCD-Rディスクが問題なく再生されていることより、20年を越える長期間のストレージ特性を有することが市場で実証されている。

さらに、電子文書としての4つの保存義務要件①見読性、②安全性、③機密性、④検索性を検討した場合、安全性に関しては、情報の消失・書換えを回避するだけでなく、非改ざん性も重要な要件であり、光ディスクの一度の記録のみ (記録データの消去ができない) のライト

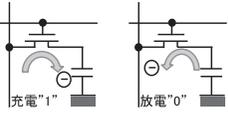
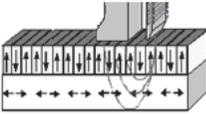
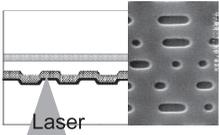
| | 半導体メモリ Solid State Drive (SSD) | 磁気メモリ Hard Disk Drive (HDD) | 光メモリ Optical Disk Drive (ODD) |
|------------|---|--|---|
| 外観 |  |  |  |
| 情報 記録方法 | 電荷の充放電  | 磁化の方向  | ビット形成  |
| 寿命 | ~10年 | ~7年 | 30年 < |

図1 デジタル情報のストレージデバイスの種類とデータの保存方式の概要

ワンス記録方式を用いれば、この要件をシステムとして満足することができる。さらに、光ディスクは、リムーバブルメディアとして保存時にエネルギーを必要とせずに保管が可能であり、省エネルギー・ストレージメモリとしての要件も満足している。

このように光ディスクは、デジタル情報のアーカイブ保存媒体として重要な要件を兼ね備えたメディアであることがわかる。

3. 統計解析を用いた光ディスクの期待寿命推定

光ディスクの信頼性寿命は、物理的要因によって生じる再生寿命であり、これは、オフィスや家庭の一般保存環境のもとで長期保存されている間に記録膜の特性が少しずつ劣化して生じる磨耗故障と考えられる。図2には、光ディスクの故障分布と期待寿命の概略を示した。光ディスク寿命の劣化要因は、主として記録層を構成する記録膜や反射膜などの機能性薄膜の特性が酸素や水分の拡散などの化学的反応によって生じるため、劣化原因が反応速度論に従う場合には、与えたストレスと反応速度の関係をアレニウスモデルやアイリングモデルとして取り扱い、温度や湿度ストレスの加速試験による評価が行なえることは広く知られている。図3にアレニウスモデルとアイリングモデルを用いた加速試験⁶⁾による寿命推定の概略図を示した。

また、この期待寿命の評価基準としては、「デジタル再生信号のエラー率が一定値に達した時点」として定義されている。この指標を用いる理由は、再生信号のエラーは、記録膜全体のマクロ要因（信号変調特性など）から局所部分に生じるピンホール等のマイクロ要因までを含んだ総合的な要因によって生じると考えられるためである。例えばDVD（では、エラー訂

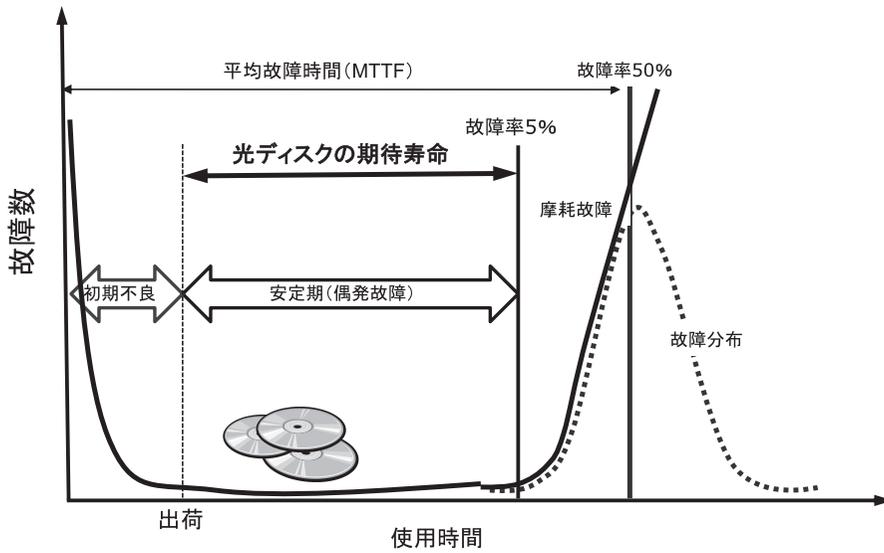


図2 光ディスクの故障分布と期待寿命の概略図

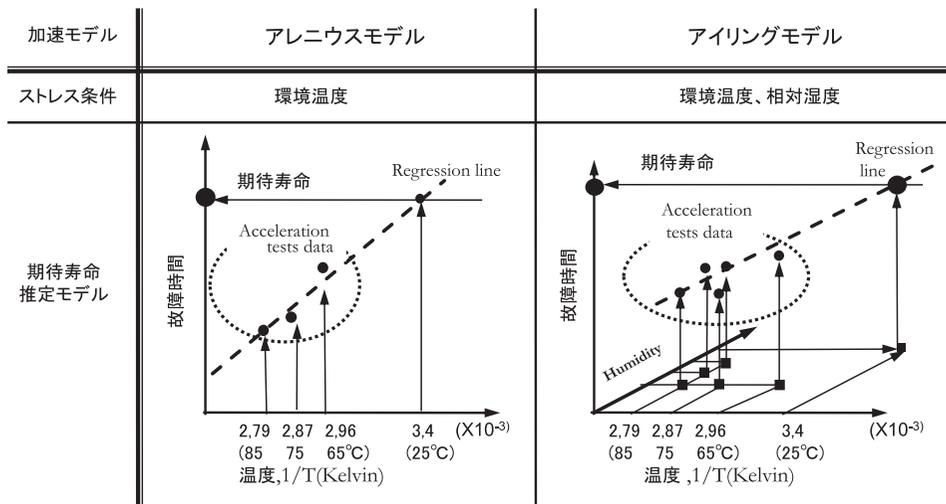


図3 アレニウスモデルとアイリングモデルを用いた加速試験による寿命推定の概略図

表1 CD, DVD及びBDの期待寿命の評価基準項目と基準値

| Media type \ Items | Error Correction Code | Evaluation Item | Requirements For Signal Quality |
|---------------------------|-----------------------|-----------------|------------------------------------|
| CD-R, CD-RW | CIRC | C1 | 220 times/s |
| DVD-R, +R, DVD-RW, +RW | ECC Block | PI-8 | 280 |
| DVD-RAM | | BER | 9.0E-4 |
| BD-R, RE (SL, DL, TL, QL) | LDC with BIS | R-SER | 1.0E-3 For drive with test disc |
| | | Burst Error | 600 bytes (7 ≥ defect numbers) |

正前において連続する8 ECC (Error Correction Code) ブロックで, PIエラー (Inner-code Rarity Error) の数を280個以下とすることが定義されている。表1には, CD, DVD及びBDの期待寿命の評価基準項目と基準値を示した。

光ディスクの標準期待寿命は, 国際標準規格では保管温度25℃, 相対湿度 (RH) 50%時において残存確率が95%の時, 95%の信頼水準 (下限) で予測される時間として定義され, 期待寿命推定は, アイリングモデル等を用いた加速試験とその加速試験データの統計解析により, 信頼性区間推定にもとづく期待寿命を評価する手法が国際標準規格として採用されている。

4. アーカイブ用光ディスクの評価方法

アーカイブ用光ディスクの評価は, データの保存寿命が重要な指標となる。光ディスクの期待寿命推定は, 国際標準規格によりアイリングモデル等を用いた加速試験とその加速試験データの統計解析によって行う試験方法が規定されている。ここでは, 国際標準規格にもとづいて構築した評価方法を述べる。

4.1 アイリングモデル等を用いた加速試験

光ディスクの期待寿命推定のために温度, 湿度を加速パラメータとした加速試験を実証できる評価システムを構築した。評価システムは, デジタル再生信号のエラー率を評価するための光ディスクの再生信号品質評価機 (パイオニア製BDR-PR 1 M, パルクテック製DDM-10) と種々の条件の加速試験を並行して実施するための大小7台のプログラム恒温恒湿度試験機 (エスベック製SH221 (小型4台), LHU-113 (大型3台)) 及び統計解析装置から構成されている。

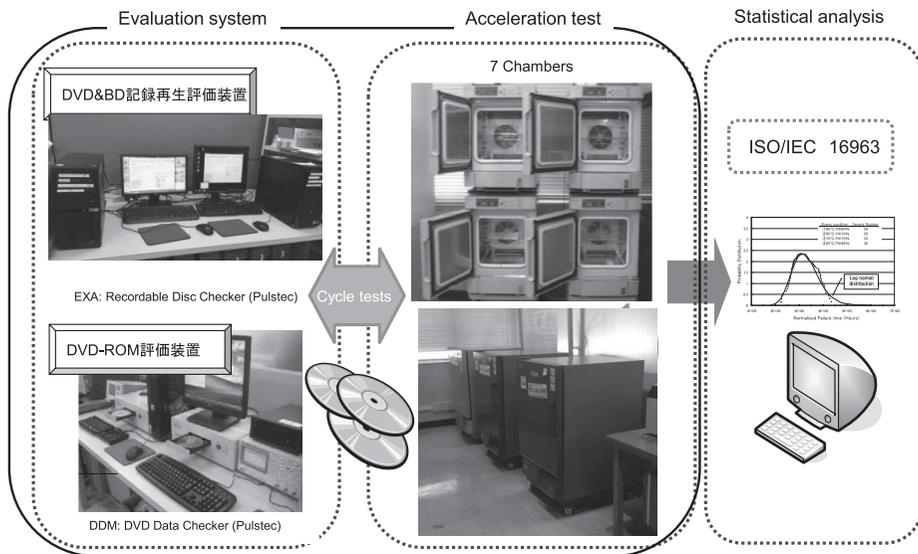


図4 光ディスク寿命評価システムの構成図

表2 アイリング法を用いた加速試験条件の例⁵⁾

| 標本群 | ストレス条件 | | 試験標本数 | 最大インキュベーション間隔 | 最小総インキュベーション時間 | 中間相対湿度 | 最小平衡保持時間 |
|-----|---------|-----|-------|---------------|----------------|--------|----------|
| | 温度 (°C) | %RH | | 時間 | 時間 | %RH | 時間 |
| A | 85 | 80 | 20 | 300 | 1 500 | 30 | 7 |
| B | 85 | 70 | 20 | 400 | 2 000 | 30 | 6 |
| C | 85 | 60 | 20 | 600 | 3 000 | 30 | 5 |
| D | 75 | 80 | 20 | 600 | 3 000 | 32 | 8 |
| E | 65 | 80 | 30 | 800 | 4 000 | 35 | 9 |

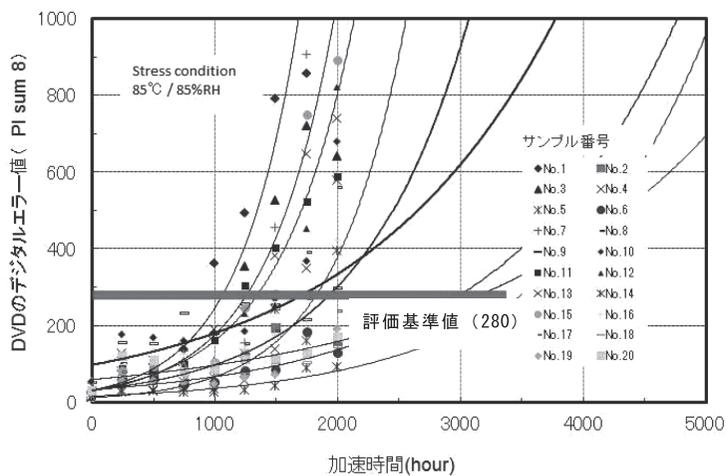


図5 加速試験の測定結果例 (DVD)

光ディスクの寿命推定評価システムの概略構成を図4に示した。加速試験条件は光ディスクのメディアや加速反応モデル毎に国際標準規格に規定されている。加速反応モデルとしてアイリングモデルを用いた場合の加速試験条件⁵⁾の一例を表2に示した。また、図5には加速試験の測定結果の一例としてDVDディスクの加速試験時間とデジタルエラーの変化の様子を示した。この図より光ディスクサンプルの故障時間は、加速試験のデジタルエラーデータをもとに図中に示した回帰曲線を算出し、評価基準値(280)に達した時間として推定することができる。

4.2 加速試験データを用いた統計解析^{5,7)}

光ディスクの標準期待寿命算出のための加速試験データを用いた統計解析の手順を次に示す。国際標準規格で採用されているアイリングモデルは温度以外に相対湿度のストレスを考慮した加速試験モデルである。アイリングモデルの一般式は、温度以外の複数のストレスを考慮して表されるが、光ディスクの加速試験では、温度と相対湿度のみを考慮した簡素化されたアイリング式が

$$\ln(t_{50\%}) = \ln(A) + \left(\frac{E_s}{k} \right) \times T^{-1} + B \times R \quad (1)$$

用いられる。

ここで、 E_s は活性化エネルギー、 k はボルツマン定数、 T は環境温度 (Kelvin)、 R は相対湿度、 A 、 B は定数、 $t_{50\%}$ は残存確率50%時の寿命データである。温度と相対湿度のストレス条件の異なる加速試験を実施し、それぞれの条件下での寿命データが得られれば、重回帰分析により(1)式の定数 A 、 B 及び E_s を算出することができ、寿命推定のためのアイリング式を決定できる。このアイリング式により、実使用時(例えば保管温度25℃、相対湿度50%時)の期待寿命の平均値が算出できる。

光ディスクの標準期待寿命は、国際標準規格では保管温度25℃、相対湿度(RH)50%時において残存確率が95%の時、95%の信頼水準(下限)で予測される時間として定義されているため、この全体対数正規分布の対数平均と標準偏差により残存確率の信頼性区間を計算し、信頼性95%での信頼度関数を決定すれば、残存確率95%(生存確率5%)での期待寿命を求めることができる。図6には、加速試験によって得られた故障時間分布において統計解析によって推定される光ディスクの期待寿命の概要⁷⁾を示した。図6において、生存確率5%の点推定値($\ln \hat{B}_5$)の分散が算出できれば光ディスクの標準期待寿命($B_5 \text{ Life}$)_Lは、 $\ln \hat{B}_5$ の95%信頼性下限値として得ることができ、この分散は無作為抽出のデータのもとでは次の統計解析によって与えられる。

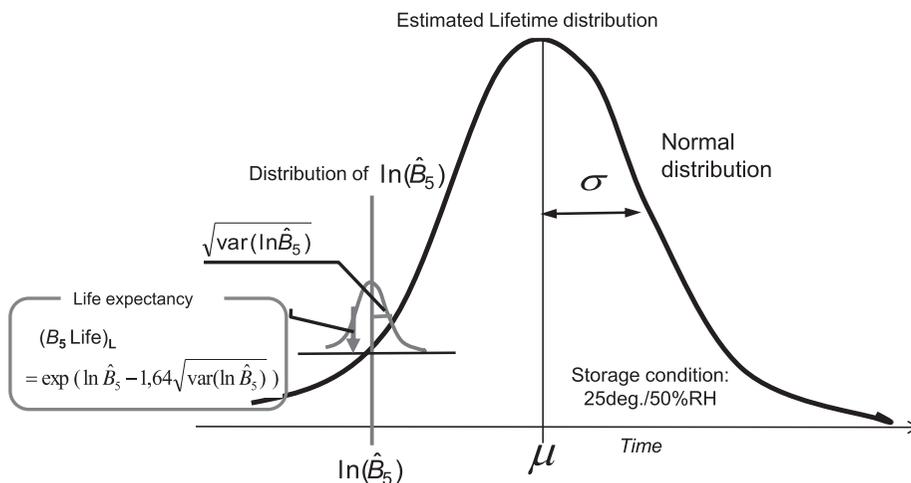


図6 統計解析による光ディスクの期待寿命推定の概要

生存確率5%の期待寿命 (\hat{B}_5) は,

$$\hat{B}_5 = \exp(\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_{10} + \hat{\beta}_2 x_{20} - 1.64\hat{\sigma}) \quad (2)$$

ここで, $\hat{\beta}_0 = \ln A$, $\hat{\beta}_1 = E_s/k$, $\hat{\beta}_2 = B$, $\hat{\sigma}$ は標準偏差, x_{10} , x_{20} は保存条件 (25℃, 50% RH) を示している。ここで光ディスクの故障分布は対数正規分布を仮定しており, 以後は対数値を用いて解析する。

$\ln \hat{B}_5$ (生存確率5%の点推定値) の分散を $\text{var}(\ln \hat{B}_5)$ とすると, $\ln \hat{B}_5$ の95%信頼性下限値は,

$$(\ln \hat{B}_5)_L = \ln \hat{B}_5 - 1.64\sqrt{\text{var}(\ln \hat{B}_5)} \quad (3)$$

で与えられる。

ただし, $\text{var}(\ln \hat{B}_5)$ は $\text{var}(\ln \hat{B}_5) = x'_5 \times \text{var}(\hat{\theta}) \times x_5$ で算出され, $\text{var}(\hat{\theta})$ は, フィッシャー情報行列の逆行列として次の式で与えられる。

$$\text{var}(\hat{\theta}) = \begin{bmatrix} \text{var}(\hat{\beta}_0) & \text{cov}(\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1) & \text{cov}(\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_2) & \text{cov}(\hat{\beta}_0, \hat{\sigma}) \\ & \text{var}(\hat{\beta}_1) & \text{cov}(\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2) & \text{cov}(\hat{\beta}_1, \hat{\sigma}) \\ & & \text{var}(\hat{\beta}_2) & \text{cov}(\hat{\beta}_2, \hat{\sigma}) \\ & & & \text{var}(\hat{\sigma}) \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここで, $\text{cov}(\hat{\beta}_a, \hat{\beta}_b)$ は $\hat{\beta}_a$ と $\hat{\beta}_b$ との間の共分散を表わし, $x'_5 \equiv [1, x_{10}, x_{20}, -1.64]$ である。すなわち, $\text{var}(\ln \hat{B}_5)$ は,

$$\text{var}(\ln \hat{B}_5) = [1 \quad x_{10} \quad x_{20} \quad -1.64] \begin{bmatrix} \text{var}[\hat{\beta}_0] & \text{cov}[\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1] & \text{cov}[\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_2] & \text{cov}[\hat{\beta}_0, \hat{\sigma}] \\ & \text{var}[\hat{\beta}_1] & \text{cov}[\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2] & \text{cov}[\hat{\beta}_1, \hat{\sigma}] \\ & & \text{var}[\hat{\beta}_2] & \text{cov}[\hat{\beta}_2, \hat{\sigma}] \\ & & & \text{var}[\hat{\sigma}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ x_{10} \\ x_{20} \\ -1.64 \end{bmatrix} \quad (5)$$

となる。

ここで、光ディスクの故障分布は対数正規分布を仮定しており、フィッシャー情報行列 I は、下記で与えられる。

$$I = \begin{bmatrix} \frac{n}{\sigma^2} & \frac{1}{\sigma^2} \sum_{j=1}^J n_j x_{1j} & \frac{1}{\sigma^2} \sum_{j=1}^J n_j x_{2j} & 0 \\ \frac{1}{\sigma^2} \sum_{j=1}^J n_j x_{1j} & \frac{1}{\sigma^2} \sum_{j=1}^J n_j x_{1j}^2 & \frac{1}{\sigma^2} \sum_{j=1}^J n_j x_{1j} x_{2j} & 0 \\ \frac{1}{\sigma^2} \sum_{j=1}^J n_j x_{2j} & \frac{1}{\sigma^2} \sum_{j=1}^J n_j x_{1j} x_{2j} & \frac{1}{\sigma^2} \sum_{j=1}^J n_j x_{2j}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2n}{\sigma^2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

最終的に、 $\text{var}(\ln \hat{B}_5)$ は、

$$\text{var}(\ln \hat{B}_5) = [1 \quad x_{10} \quad x_{20} \quad -1.64] \begin{bmatrix} \frac{n}{\sigma^2} & \frac{1}{\sigma^2} \sum_{j=1}^J n_j x_{1j} & \frac{1}{\sigma^2} \sum_{j=1}^J n_j x_{2j} & 0 \\ & \frac{1}{\sigma^2} \sum_{j=1}^J n_j x_{1j}^2 & \frac{1}{\sigma^2} \sum_{j=1}^J n_j x_{1j} x_{2j} & 0 \\ & & \frac{1}{\sigma^2} \sum_{j=1}^J n_j x_{2j}^2 & 0 \\ & & & \frac{2n}{\sigma^2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ x_{10} \\ x_{20} \\ -1.64 \end{bmatrix} \quad (7)$$

で得ることができる。ここで、 $x_{1j} = 1/(273, 15 + T_j)$ 、 $x_{2j} = RH_j$ 、 n_j は加速試験のサンプル数、 J はサンプルの総数である。

光ディスクの標準期待寿命 $(B_5 \text{ Life})_L$ は、最終的に $\ln \hat{B}_5$ の95%信頼性下限値として下記の式で与えられる。

$$(B_5 \text{ Life})_L = \exp((\ln \hat{B}_5)_L) = \exp(\ln \hat{B}_5 - 1.64 \sqrt{\text{var}(\ln \hat{B}_5)}) \quad (8)$$

4.3 光ディスクの期待寿命評価と今後の課題

現在、前記の光ディスク寿命推定評価システムを用い、国際標準規格に従い、加速試験モデ

ルにアイリングモデルを適用してBDメディアにおける期待寿命推定を行っている。図5に示したように加速試験による故障時間が測定できることを確認し、統計解析用のデータが得られている。一方、統計評価を実施する上で、試験に投入する光ディスクのサンプルの入手が新たな課題となることが分かった。これは、期待寿命推定を統計解析で行うため評価に用いる100枚程度のサンプルディスクを無作為抽出で集める必要があるためである。一般市場から製造日時や工場等に関して無作為抽出で光ディスクのサンプルを集めるのは困難と考えられるため、今後は、国内外の光ディスクメーカの支援を受けながらこの問題の解決を図り、評価の実績とデータの蓄積を図っていく予定である。

さらに、光ディスクをデジタル・アーカイブ媒体として広く活用していくためには、使用者に対して正しい理解にもとづく光ディスクの管理・運用を周知することも不可欠である。

5. おわりに

アーカイブ用途のための光ディスク期待寿命評価は、アイリングモデル等を用いた加速試験とその加速試験データの統計解析によって行う算出方法が国際標準規格に規定されている。本報告では、国際標準規格にもとづいて構築した加速試験システムとその実験結果より、加速試験の有効性を確認し、さらに、統計解析の手順を確認した上で、その適応に対しての今後の課題も明らかにした。

今日、爆発的に増加、氾濫するデジタル情報の長期保存の需要は増加し、デジタル情報の保存は危機的な状況を迎えている。特に、これまで長期保存を必要としていた公文書、医療等の分野に加え、ビッグデータを活用する新たな産業分野やSNSの進展に伴う個人所蔵のパーソナル分野でのデジタルデータの保存・蓄積も新たに必要となると考えられる。

光ディスクは、デジタル情報のアーカイバル保存媒体として期待されているが光ディスクを始めとしたデジタル記録媒体のいずれの記録媒体にも必ず保存寿命がある。このため、蓄積されたデジタル情報の保存寿命を明確にして保持するとともに、情報の表示・検索方法を確保して、情報を永続的に維持するために種々の記録媒体をハイブリッドに融合したアーカイブシステムの構築も必要であると考えられる。

今後、光ディスク期待寿命が明確になり、それにもとづいた電子情報の永続的保管を実現するためのシステム構築に関する規定などが早期に策定されることが期待される。

本研究は、大阪産業大学産業研究所の平成25年度分野別研究組織で実施した成果の一部をまとめたものである。関係各位に対し深く感謝する。

参考文献

1) 入江 満, 田中邦麿, 「光ディスクによるデジタル情報の永続的保存を目指して」, 情報処理学会

デジタルプラクティクス, Vol. 1, No. 2, April 2010, pp. 71-76.

- 2) 入江 満, 「[招待講演] クラウド時代における光ディスクのデータ・アーカイブ用途の標準化動向」, 信学技報, vol. 114, no. 413, MR2014-40, pp. 1-4 (2015).
- 3) JIS Z 6017: 2006, 電子化文書の長期保存方法.
- 4) ISO/IEC 29121: 2009, Information technology — Digitally recorded media for information interchange and storage — Data migration method for DVD-R, DVD-RW, DVD-RAM, +R, and +RW disks.
- 5) ISO/IEC 16963:2015, Information technology-Digitally recorded media for information interchange and storage-Test method for the estimation of optical media for long-term data storage.
- 6) P. A. Tobias and D. C. Trindade: Applied Reliability (Van Nostrand Reinhold, New York, 1995) 2nd ed., Chap. 7.
- 7) M. Irie, T. Suzuki, T. Ihashi and Y. Mitsuhashi : 「Study of Statistical Analysis using Fisher Information for Life Expectancy」, Technical digest of International symposium on optical memory, 92-93 (2015).