

長期記録媒体としての光ディスクの 品質評価と寿命推定

井橋 孝夫 鈴木 敏夫

CD-R, DVD-R, BD-R などの光ディスクは、テキストなどの各種データ保存やデジタルカメラなどの静止画像保存、デジタルテレビの動画保存の手段であるため、その需要が拡大している。しかし、品質が規格を満たさない上に寿命の短いメディア等が市場に数多く参入していることや、寿命に関する具体的な基準や正しい情報が無かったことから、その信頼性については国内外でも懸念されていた。NPO 法人 ADTC では、光ディスクの寿命に関する世界的な推定試験法に基づいて 2009 年 4 月から実際に「光ディスクの寿命推定試験」を行っている。本稿では、光ディスクを巡る専門家の動向、加速試験による寿命推定法について解説し、安心して利用できる光ディスクの普及に向けた取り組みを紹介することとした。

キーワード：光ディスク、寿命推定、品質評価

1. まえがき

デジタル化の利点は作成、加工、複製、伝送、保存が容易で、アナログ方式に比べて非常に効率的に行える点にある。個人、企業、社会、文化にとって財産となる情報のデジタル化は、これら情報を科学、文化、社会及び企業の発展のために再利用していくためには当然の流れと言える。

デジタル機器の技術革新は目覚ましく、情報の処理量、処理スピード、転送量、転送スピード、データの蓄積量、蓄積スピード及びビット単位当たりのコストなどが、驚くべきスピードで現在のものを過去のものへと変えていく。デジタルデータの長期保存を考える場合、記録媒体の選択は重要である。ある媒体から他の媒体にデータを移し替えることによって、デジタルデータの保存は行われていくが、記録媒体を含む蓄積再生装置の技術革新によってもたらされる経済価値としての変化が、場合によっては再生装置の存在を危うくし、記録媒体の寿命に関わらずデータのマイグレーションが必要となったり、再生環境が破たんすることによってマイグレーションを困難にしたりすることが考えられる。

デジタルデータを長期間保存するデジタルアーカイブに向けた記録媒体は、長寿命、大容量、高データ転送速

度、低価格な媒体であり、磁気ディスク、磁気テープ、光ディスクが候補として挙げられる。現在よく使用されているのはデータ転送速度、記憶容量の点から磁気記録が主流であるが、光ディスクはマルチメディアに対応していて、大容量で安価であり、記録再生機器が世界中に広く普及している点から有望視されている。光ディスクを長期保存用記録媒体としていくには、光ディスクの品質評価方法を国際規格にし、国際規格に基づき評価された光ディスクに長期保存するのが有効である。本稿では光ディスクの寿命推定試験方法に関する国際標準規格の概要と、試験方法を活用した第三者機関 NPO 法人アーカイブディスクテストセンターにおける光ディスクの寿命推定に関する活動を紹介する。

2. 光ディスクの信頼性に関する取り組み

国内においては、1990 年代前半に通商産業省（現経済産業省）の働きかけにより、光ディスク媒体を測定するシステムの標準化に関する研究会が、浜松地域の企業を中心に発足し、地域外の有力企業も加わり標準化の研究が進められた。一方米国では、NIST (National Institute of Standards and Technology) を中心に、画像を電子的に保存する目的で光ディスクを使用した場合の研究が行われ、その成果は、ISO の Technical committee 42 により CD-R 等の温度相対湿度の影響による期待寿命値の推定に関する方法として準備され、2002 年に ISO 18927 として規格化された。

2002 年以降、光ディスク関係企業にて構成された任意団体である CDs21 Solutions (会長 中島平太郎) は、市

IHASHI Takao
特定非営利活動法人 アーカイブディスクテストセンター
(ADTC) 理事長
SUZUKI Toshio
特定非営利活動法人 アーカイブディスクテストセンター
(ADTC) 理事

場で販売されたCD-Rの寿命試験を行い、ここで得られた知識を活かして、2005年以降米国の光ディスク関係の任意団体であるOSTA(Optical Storage Technologies Association)やNISTと協力して光ディスク寿命推定試験方法を開発し、2007年6月ECMA(European Computer Manufacturer Association)においてECMA-379として規格制定され、その後ECMA-379はISO(the International Organization for Standardization)に規格提案され、国際的な試験方法ISO/IEC 10995として制定された。

3. 光ディスクの故障要因と寿命推定

光ディスクの故障は、「一般保存環境の下で長期保存されている間に、記録膜等の特性が経年劣化して生じる物理的要因により、再生信号よりデジタルデータが修復できない欠落が生じた時点」として規定されている。

一般的な製品寿命を表す平均故障時間(MTTF: Mean Time To Failure)は、JIS Z8115に「非修理アイテムの故障寿命の平均値」と定義してある。非修理アイテムとは「故障が起こっても修理しないか又は修理不可能なアイテム」をいう。光ディスクの故障時間は、記録保存されたデータの再生不能を回避するために、MTTFではなく故障率5%(生存確率95%)の動作時間として規定している。

経年劣化を起こす前の光ディスクの初期品質は、DVDを例にとると、ROMはディスク製造時、記録系ディスクは記録後のジッター値を規定することによって維持している。ジッター値と記録されたデータのエラーレートとは相関があり、8/16復調等の信号処理を行わなくても、ディスク上に記録されたデータ品質を知ることができる。DVDはエラー訂正用の符号が付加されており、初期エラー、劣化によるエラーやディスク表面の傷や汚れなどのディフェクトによるエラーに対応して、安定して記録されたデータが再生されるように規格化されている。これより、光ディスクにおける故障とは、エラー訂正が不能となった状態と考えられる。DVDでは、デジタルエラー訂正符号であるECC(Error Correction Code)において、エラー訂正前の連続する8ECCブロックのPIエラー(Parity of Inner-code)の数が280以下と規定されており、この数値でDVDの故障になったかどうかの判断を行う。他の光ディスクシステムも同様な規定があり、故障に関してはそれぞれの規格に従い判断を行う必要がある。

光ディスクの物理的要因による寿命劣化は、主に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、水分の拡散などの化学反応で変化することにより生じると考えられている。このように劣化原因が反応速度論に従う場合は、与えられ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扱い、温度湿

度ストレスによる加速試験で寿命推定試験を行うことができる。

4. アレニウスモデルとアイリングモデル

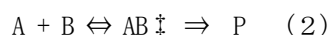
S.アレニウスは1859年スウェーデン生まれで、反応速度定数の温度依存性を、活性化エネルギーを使って表すアレニウスの式によって広く知られている。1903年には解離の電解質理論によって、ノーベル化学賞を受賞した。

$$t = Ae^{\frac{\Delta H}{kT}} \quad (1)$$

ここで、 t は速度定数、 A は前指数因子、 ΔH は活性化エネルギー、 k はボルツマン定数(8.617×10^{-5} eV/K)、 T は絶対温度(273.15+degree Celsius)である。

アレニウスのモデルは、多くの化学反応の速度定数の温度依存性が式(1)で表され、これに基づき反応がどのように進むのかについて一般的なモデルを構築した。

H.アイリングは1901年メキシコ生まれで、活性錯合体理論(遷移状態理論)を発展させたアメリカの化学者である。活性錯合体理論は、反応の活性化障壁の頂上付近における過渡的な化学種に注目したもので、この過渡的な化学種を活性錯合体または遷移状態という。活性錯合体理論では、反応物と活性錯合体は互いに平衡にあるとし、反応を2段階過程と考える。



ここで、 A 、 B は反応物、 AB^\ddagger は活性錯合体、 P は生成物である。図1に活性錯合体理論における反応断面図を示す。

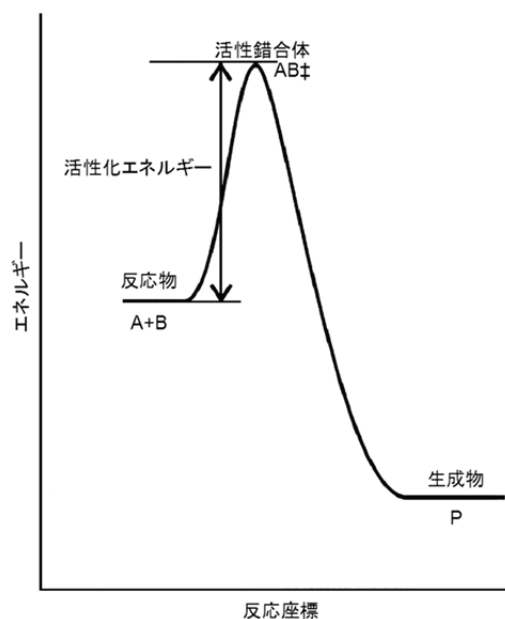


図1 反応断面図

アイリングの式は以下の通りである。

$$t = AT^a e^{\frac{\Delta H}{kT}} e^{(B+\frac{C}{T}) \times RH} \quad (3)$$

ここで、 t は速度定数、 A は前指数因子、 T^a は前指数温度因子、 ΔH 活性化エネルギー、 k はボルツマン定数、 T は絶対温度、 B, C は相対湿度の指数定数、 RH は相対湿度である。

後で述べる ISO/IEC 10995 では、簡易型のアイリング式を用いる。

$$t = Ae^{\frac{\Delta H}{kT}} e^{B \times RH} \quad (4)$$

一般にアイリング式は以下の様に拡張可能で、
 $t = AT^a \exp \left\{ \frac{\Delta H}{kT} + \left(B + \frac{C}{T} \right) \times S_1 + \left(D + \frac{E}{T} \right) \times S_2 + \dots \right\}$ (5)
 温度以外の関連するストレスを付け加えていくことが可能である。

5. ISO/IEC 10995

ISO/IEC 10995 (以下 10995 と略す) は、DVD-R/-RW/-RAM, +R/+RW を対象とした寿命推定の評価方法を規定している。ここで推定される寿命とは、周囲温度 25°C、相対湿度 50% の保管状態で、残存確率が 95% の時、95% 信頼区間の下限値で予想される寿命をいう。また、寿命とは DVD ±R/RW の場合だと、再生不能となる PI エラー数に達するまでの時間である。

簡易アイリング式を以下の様に自然対数をとってみる。

$$\ln(t) = \ln(A) + \frac{\Delta H}{kT} + B \times RH \quad (6)$$

これをさらに変形して、 $\ln(t)$ を y とおき、 $\ln(A)$ を a_0 、

$\frac{\Delta H}{k}$ を a_1 、 $\frac{1}{T}$ を x_1 、 B を a_2 、 RH を x_2 とおくと、

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 \quad (7)$$

のように表すことができる。これは説明変数 2 の重回帰式と考えることができる。

重回帰分析を行う際必要となる個体数は、説明変数が (7) 式より 2 であることから下記の式 (8) より、4 以上であることがわかる。

$$\text{個体数} - \text{説明変数} - 1 = \text{個体数} - 2 - 1 > 0 \quad (8)$$

これよりアイリングモデルにおける加速試験では、最低 4 つの温度湿度条件での結果が必要となる。10995 では、85°C/85%RH、85°C/70%RH、65°C/85%RH、70°C/75%RH の 4 条件で故障時間の対数平均値を求めている。

10995 では、寿命データ分布は対数正規分布に従うと仮定して、寿命推定値を求めるための解析手順を示している。上記 4 条件で光ディスクサンプルの加速試験を行い、回帰式より故障に到達した時間を求める。故障デー

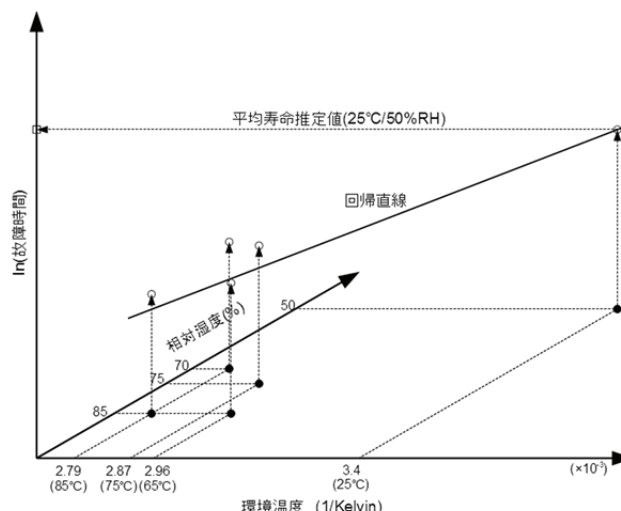


図2 アイリングモデルにおける寿命推定概要

タの累積分布には順序統計量の median rank 法を用いて、各条件での故障データの累積分布として対数正規グラフを用いて、仮定内であるかどうかの確認を行う。もう少し具体的に言うと、各条件での寿命データは対数正規グラフ上で直線となり、その傾きで表される対数標準偏差は、同じ母集団からとってきたサンプルとの仮定より等しくなる。これを確認することによって、各条件での故障が 10995 のモデル内であることが検証できる。図3に累積故障分布を示す。

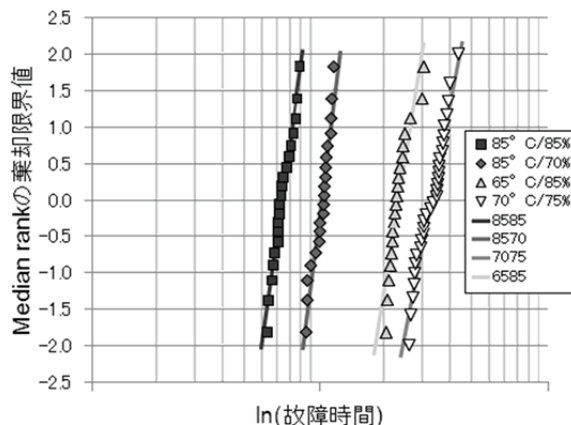


図3 累積故障分布

対数正規グラフから各条件での故障データの対数平均値を求め、重回帰分析により定数項及び偏回帰係数、すなわち簡易アイリング式の $\ln(A)$ 、 $\frac{\Delta H}{k}$ 、 B を求める。求められた定数項及び係数を簡易アイリング式に用いて、絶対温度 298.15K (25°C)、50%RH の値を代入することで、保管条件での寿命推定平均値が求められる。

条件毎に故障データの加速係数 (加速試験での平均寿命推定値と保管条件での平均寿命推定値の比) を算出して、保管条件での寿命データの正規化を行う。

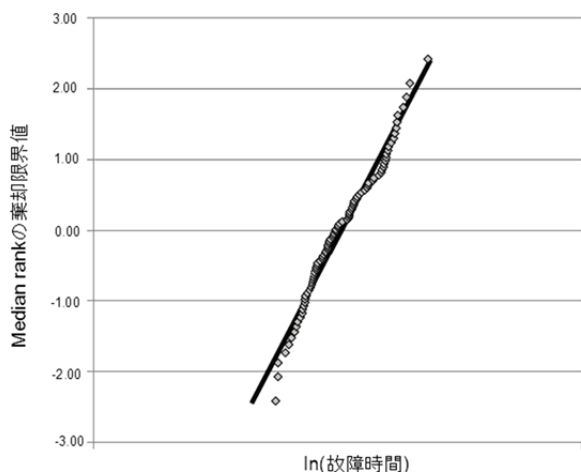


図4 加速係数を用いて正規化された推定寿命

信頼区間 90%とした場合の 25°C/50%RH において、残存確率を 95%として、95%の信頼水準で予想される寿命が推定される。

6. デジタルデータのマイグレーション

デジタルデータが記録された記録媒体には寿命があり、デジタルデータを長期保存するためには記録媒体の状態を数年ごとに確認して、劣化状態によって次の新しい媒体に記録保存することが必要である。光ディスクに関するマイグレーション（媒体移行）に関しては、ISO/IEC 29121 や JIS Z6017 などの規格があり、見続性の維持から光ディスクに記録したディスクの劣化程度を確認し、必要に応じてデータの移し替えを行う手法が規定されている。

Initial performance test

新規にデジタルデータを光ディスクに記録する際に、良好な特性で記録されているかどうかを確認する試験が、初回記録検査である。試験方法としてはエラー数やエラーレートを検出し、試験結果より光ディスクの良否判定を行う。検査された光ディスクが保存用として使用する場合の判断基準がそれぞれの規格に規定されており、使用可能とされるレベルは、今後光ディスクの劣化が進行したとしても、ドライブで再生可能なエラー数、エラーレートを十分に下回るように設定されている。

Periodical performance test

それぞれの規格は定期的に光ディスクの状態を検査することを求めている。検査する周期としては3年または3年以下を推奨しているが、光ディスクの保管環境、使用頻度、推定される寿命を考慮して適宜行われることが望ましい。定期検査方法は初期検査と同様に、エラー数

やエラーレートを測定し、判断基準に照らし合わせてマイグレーションが必要と判断された場合は、適切な方法でデータのコピーを行わなければならない。

7. Archive Disc Test Center – NPO Entity

資料、写真や動画などを光ディスクに記録保存しようとする利用者に対して、長期保存に適しているディスクであるかどうかの判断を手助けするために、光ディスクの寿命推定を行い、長期保存が可能なディスクであるかの判定を行うため、非営利活動法人アーカイヴディスクテストセンター(Archive Disc Test Center: 以降 ADTC と略す <http://n-ADTC.org>)が2008年8月に設立された。

2009年3月からはADTCセンターラボで寿命推定試験が開始された。ADTCセンターラボで行う寿命推定はISO/IEC 10995に準拠して試験を行い、DVD±Rを試験対象ディスクとしている。試験対象ディスクに関しては、試験体制が整い次第対象ディスクを増やしていく予定である。

図5にADTCセンターラボの外観を示す。加速試験を行うために恒温槽やDVD±RのPIエラー測定器などを装備している。図6は25°C、50%RHで保管した時に、アーカイバルグレード(寿命が30年以上)と推定されたディスクに対して与えられる認定マークである。



図5 ADTC センターラボ外観



図6 ADTCが発行する認定マーク

ADTC センターラボは 2011 年 4 月より東京都市大学総合研究所に場所を移し、環境情報学部情報メディア学科の横井利彰教授と連携して、これからの光ディスクの長期保存に関する共同研究を進めていく予定である。

8. むすび

本稿では、デジタルアーカイブの記録媒体として光ディスクを取り上げ、光ディスクの寿命、寿命推定試験法などの解説を行った。

CDやDVDの記録系ディスクの寿命に関する研究が進められ、寿命推定に関する国内外の規格が制定された。これらの規格に基づき寿命推定試験を行う ADTC のような団体が活動を開始し、長期保存用記録媒体として品質の安定した光ディスクが広く普及していくと考えられる。

光ディスクは民生用として発展し広く世界に普及したが価格競争の結果、特性が安定しないディスクが流通したという事実もある。一方膨大なデータを長期に保存していくには、コストを下げ保管することが重要であり、経済的な側面も重視していかなければならない。長期保存用記録媒体を産学が連携して研究していくことは、記録媒体の特性とコストのバランスを取り、安価で安定した記録媒体を普及させる役割を担っており重要であると考える。