

システム開発
16-F-9

長期保存のための光ディスク媒体の開発に 関するフュージビリティスタディ

報 告 書

— 要 旨 —

平成17年3月

財団法人 機械システム振興協会
委託先 財団法人デジタルコンテンツ協会



この事業は、競輪の補助金を受けて実施したものです。

序

わが国経済の安定成長への推進にあたり、機械情報産業をめぐる経済的、社会的諸条件は急速な変化を見せており、社会生活における環境、都市、防災、住宅、福祉、教育等、直面する問題の解決を図るためには技術開発力の強化に加えて、多様化、高度化する社会的ニーズに適応する機械情報システムの研究開発が必要であります。

このような社会情勢の変化に対応するため、財団法人機械システム振興協会では、日本自転車振興会から機械工業振興資金の交付を受けて、経済産業省のご指導のもとにシステム技術開発調査研究事業、システム開発事業、新機械システム普及促進事業等を実施しております。

このうち、システム技術開発調査研究事業及びシステム開発事業については、当協会に総合システム調査開発委員会（委員長：放送大学副学長 中島 尚正氏）を設置し、同委員会のご指導のもとに推進しております。

本「長期保存のための光ディスク媒体の開発に関するフェージビリティスタディ」は、上記事業の一環として、当協会が財団法人デジタルコンテンツ協会に委託し、実施した成果をまとめたもので、関係諸分野の皆様方のお役に立てれば幸いです。

平成17年3月

財団法人 機械システム振興協会

はじめに

本報告書は、財団法人 デジタルコンテンツ協会が (DCAj) が、財団法人 機械システム振興協会から平成 16 年度事業として受託した「長期保存のための光ディスク媒体の開発に関するフィージビリティスタディ」の成果をまとめたものである。

近年、政府の取り組むe-Japan計画の推進に伴い、文化をはじめとした、行政、学術研究、医療、教育等の幅広い分野においてデジタルデータによるアーカイブが急速に増えつつあり、デジタルコンテンツ等のデジタルデータを長期保存することの必要性が従来に比して遥かに高まっている。

しかし、その一方で、デジタルデータの長期保存について技術的な根拠が明確にされておらず、将来が懸念されているのが実状である。

現在、デジタルコンテンツ等のデジタルデータの記録・保存には磁気テープ、磁気ハードディスク、光ディスクなどが用いられているが、前の2者は構造上、長期保存に適さない。一方、光ディスクは長期保存に適しているとされているが、それでも30年前後とも言われ、その実態は殆ど把握されていない。これは、公的に認められた保存寿命の推定方式が確立していないことも原因である。

デジタルデータの長期安定保存の実現は、e-Japan計画の描くデジタルコンテンツの充実と文化関連産業の育成、電子政府の実現、電子商取引の促進、人材育成等各種保存の円滑な運営のための重要な要素となる。

本フィージビリティスタディ (以下スタディという。) は、これらの問題を鑑み、現状において条件を満たす可能性の高い光ディスクである記録形DVDにつき、調査、研究及びそのための基礎実験を行い、光ディスク媒体によるデジタルデータの長期保存化の実現を目指すものである。

本スタディの実施にあたり、ご指導・ご支援をいただいた関係の官庁、関係機関の各位に感謝の意を表します。

平成17年3月

財団法人 デジタルコンテンツ協会

目 次

序

はじめに

1	スタディの目的	1
2	スタディの実施体制	2
3	スタディの内容	6
第1章 試験装置・ソフトウェアの改善		7
1.1	まえがき	7
1.2	寿命劣化要因と寿命予測	7
1.3	評価ツール	9
1.3.1	既存の評価ツール	9
1.3.2	新たな評価ツールの開発	10
1.3.2.1	DVD 誤り率測定装置	10
1.3.2.2	CLV 補正	11
1.3.2.3	バースト分布の測定	15
1.4	まとめ	16
第2章 現状の光ディスク媒体の保存寿命に関する調査		17
2.1	まえがき	17
2.2	評価条件の検討	17
2.3	評価対象ディスクの選択	19
2.4	測定装置と測定条件	19
2.5	初期品質の評価	21
2.5.1	評価結果	21
2.5.2	考察	26
2.6	加速劣化試験	28
2.6.1	加速劣化試験方法	28
2.6.2	加速劣化試験結果	28
2.6.3	考察	38
2.7	加速劣化試験結果のまとめと寿命推定	41
2.8	試験データから見た劣化要因の検討	49
第3章 寿命試験規格のまとめ		57
3.1	光ディスク取扱規格調査結果	57
3.2	光ディスク加速寿命評価試験の国際標準化の動向	57
3.3	アレニウス法を適用して寿命推定するに際しての留意事項	58

第4章 光ディスク寿命評価法の確立と長寿命光ディスクの開発	59
4.1 長期保存のための光ディスク媒体の検討	59
4.2 長寿命光ディスク開発の指針	62
4.3 光ディスクの寿命評価法	63
4.3.1 加速試験による寿命評価法	63
4.3.2 簡易寿命評価法	65
4.3.3 長期保存ディスクの管理法 (ドライブとの関係を考慮したエラーレート管理)	66
第5章 今後の課題及び展開	68
5.1 課題のまとめ	68
5.2 今後の展開	69

1 スタディの目的

デジタルコンテンツによる文化をはじめ、行政、学術研究、医療、教育等において幅広くデジタルデータによるアーカイブが急速に増えつつある。これらのデジタルデータ情報の記録及び長期保存において光ディスクが一番適しているとされているが、それでも寿命は30年前後とも言われ、その実態は殆ど把握されていない。これは、公的に認められた保存寿命の推定方式が確立していないことも原因である。

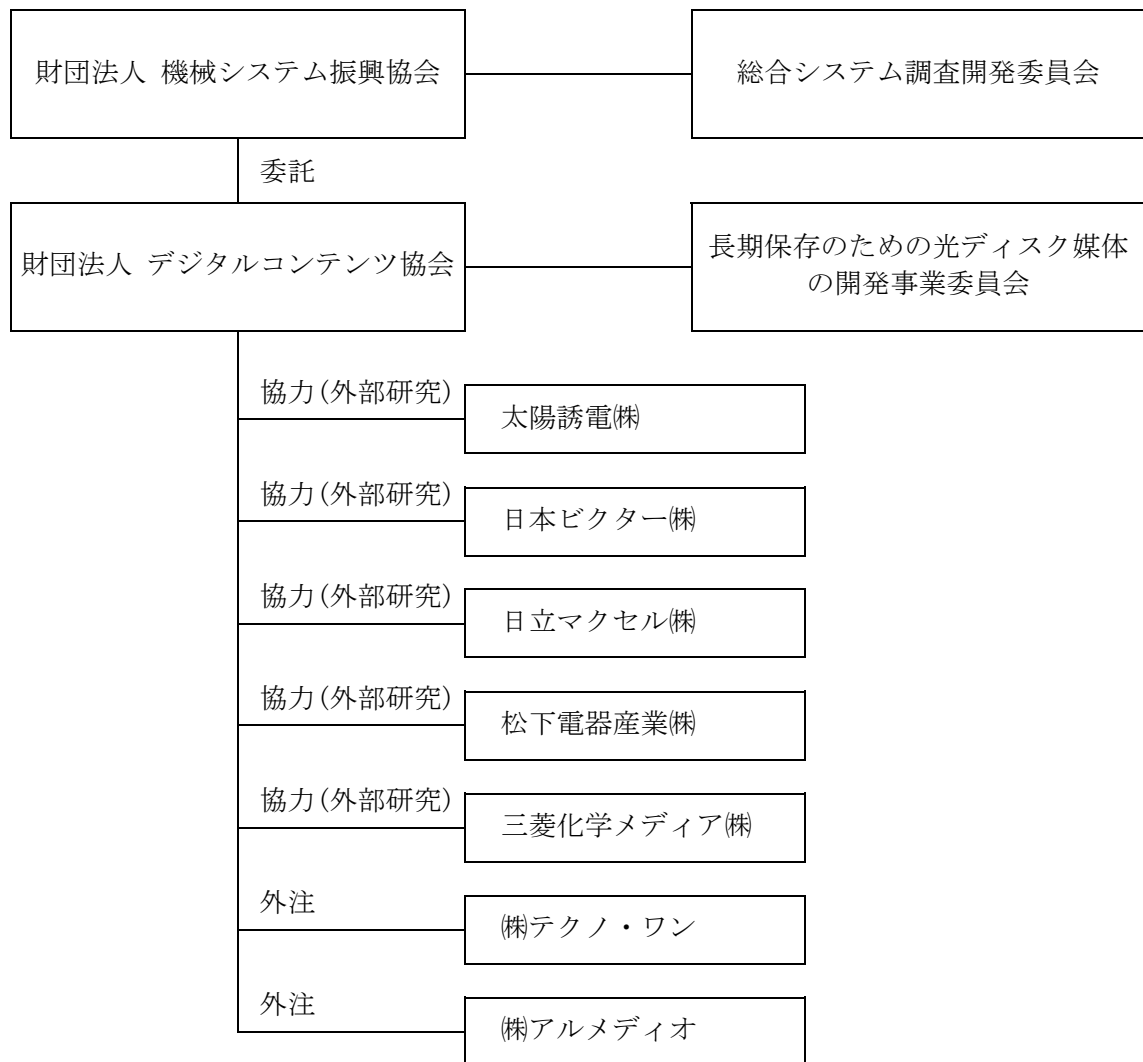
本スタディではこれらの問題を鑑み、現状で条件を満たす可能性の高い光ディスクである記録形DVDにつき、平成15年度の調査研究の成果を活かし、さらに評価データの拡充を実施して寿命推定法をより確実なものにする。そのための基礎実験を行い、その結果を標準試験規格として提案し、光ディスク媒体の長期保存化を目指すものである。

具体的には、昨年度の光ディスクの寿命加速試験方法と試験装置に関する調査研究での寿命推定結果ではDVD-R、DVD-RAMそれぞれに100年近いか、それ以上の寿命をもつと思われるものが存在することが明らかになった。この成果を踏まえ、光ディスクの寿命評価の各種試験や劣化したディスクの分析を通して得られた知見を基に光ディスクの劣化の要因を明確にし、長寿命光ディスク開発のための指針を明確にする。そして、長寿命光ディスクの試作を行い、新しい手法による寿命試験方法で試験を行う。

2 スタディの実施体制

財団法人機械システム振興協会内に「統合システム調査開発委員会」を、財団法人デジタルコンテンツ協会内に当協会会員会社と外部有識者等からなる「長期保存のための光ディスク媒体の開発事業委員会」を設置してフィージビリティスタディを実施した。

また、一部の業務は、財団法人デジタルコンテンツ協会より専門の業者に外部研究・外注を行った。



総合システム調査開発委員会委員名簿

(順不同・敬称略)

委員長	放送大学 副学長	中島 尚正
委員	政策研究大学院大学 政策研究科 教授	藤正 巖
委員	東京工業大学 大学院総合理工学研究科 知能システム科学専攻 教授	廣田 薫
委員	東京大学大学院 工学系研究科 助教授	藤岡 健彦
委員	独立行政法人産業技術総合研究所 産学官連携部門 コーディネータ	太田 公廣
委員	独立行政法人産業技術総合研究所 産学官連携部門 シニアリサーチャ	志村 洋文

長期保存のための光ディスク媒体に関する調査研究事業委員会名簿

(順不同・敬称略)

委員長	日立マクセル株式会社 技術顧問	渡部 篤美
委員	株式会社NHKテクニカルサービス 事業開発センター制作 デジタルコンテンツ テクニカルマネージャー	澁井 栄蔵
委員	太陽誘電株式会社 記録メディア事業部 技術部 課長	辛 有明
委員	太陽誘電株式会社 記録メディア事業部 技術部	興津 勲
委員	帝京平成大学 情報学部情報工学科 教授	田中 邦磨
委員	株式会社東芝 デジタルメディアネットワーク社 コアテクノロジーセンター 技術顧問	菅谷 寿鴻
委員	日本ビクター株式会社 メディアカンパニー 記録メディア事業センター 技術部 技術2グループ長	神原 理
委員	日本放送協会 放送技術研究所 記録・メカトロニクス 副部長	清水 直樹
委員	日立マクセル株式会社 開発本部 次世代ディスクセンター センター長	田村 礼仁

委員	松下電器産業株式会社 メディア制御システム開発センター 開発推進グループ グループマネージャー	赤平 信夫
委員	松下電器産業株式会社 パナソニックAVCネットワークス社 メディアビジネスユニット 技術グループ 主任技師	保田 昭
委員	三菱化学メディア株式会社 次世代商品戦略センター 2部長	竹島 秀治
委員	三菱化学メディア株式会社 セールスサポート本部 テクノロジーサービス部 マネージャー	佐藤 晋
オブザーバ	株式会社アルメディア 企画部 事業企画課 チーフ 企画部 事業企画課	沢井 健一 平川 進介
事務局	財団法人デジタルコンテンツ協会 常務理事 事業開発本部長 事業開発本部 先導的事業推進部長 事業開発本部 先導的事業推進部 研究主幹	工藤 浩輔 田中 誠一 増井 武夫 千葉 祐治

3. スタディの内容

(1) 試験装置・ソフトの改善

昨年度、新たに開発した試験装置・ソフトの改善を行い、評価試験ツールとして信頼性向上を図った。具体的にはディスク盤面のドーナツ状指定区間の平均誤り率を表示するものであり、メディアも DVD-R、DVD-RAM、DVD-RW の3種を対象とした。

(2) 低温長期間試験の実施

昨年度に実施した3点(75℃、80℃、85℃)において、評価期間の制約から評価を完了できなかったものについて継続した試験を実施する。それに加え、加速の程度が低い比較的低温(60～65℃)において長期間の加速試験を実施し寿命試験方法(アレニウス法)が正当であることを検証した。

また、DVD-RW についても同様に60℃～85℃に加速試験を実施し、寿命の評価を行った。

(3) 寿命試験規格と試験装置のまとめ

昨年度の調査研究成果に前記(1)(2)の成果を加え、寿命試験の規格化及び試験装置の仕様に関するまとめを行った。

(4) ディスクの評価法の確立と長寿命光ディスクの開発

昨年実施した寿命試験結果から寿命推定結果ではDVD-R、DVD-RAMそれぞれに100年近いか、それ以上の寿命をもつと思われるものが存在することが明らかになった。そこで、上記(1)～(3)の光ディスクの寿命評価のための各種試験や評価法を基にして、重要データの長期保存に適した光ディスクであるか否かを判断する方法について標準化案を一部検討した。また、各種試験や劣化したディスクの分析を通して得られた知見を基に光ディスクの劣化の要因を明確にし、長寿命光ディスク開発のための指針を明確にした。そして、長寿命光ディスクの試作を行い、昨年度及び前記(3)でまとめた試験法と試験装置により評価を行った。

第1章 試験装置・ソフトウェアの改善

1.1 まえがき

光ディスク媒体の寿命試験は、CD について、ISO/TC42 が国際規格として提案したものがある (ISO18921:2002)。

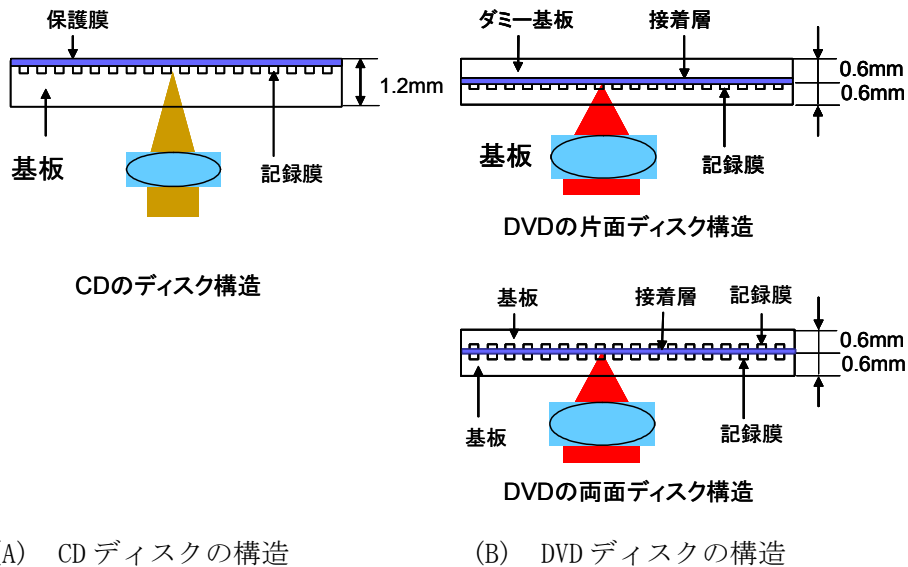


図 1-1-1 CD と DVD のディスク構造

これに対し、映像やデータの記録・保存用として、現在、記録形メディアの主流になりつつある記録形 DVD は、記録膜を内側にして、2 枚の 0.6mm 基板を貼り合わせた対称構造を有している (図 1-1-1 (B) 参照)。このため、記録形 DVD は、CD に比べ温・湿度の変化に強いことが予想され、高温で加速試験が可能となれば、寿命予測の試験期間を短縮できる。

1.2 寿命劣化要因と寿命予測

(1) DVD-R の劣化要因

図 1-2-1 に DVD-R の基本構造を示す。本来、寿命予測の観点として記録層に記録されたピットがどのように劣化していくかを見るべきものであるが、記録層以外の部分 (反射層や接着層) の劣化も加わるため寿命予測を難しくさせている。昨年度に引き続き、このような劣化現象の把握を行うため各環境下での加速劣化試験を実施し DVD-R メディアの寿命への影響を調査した。

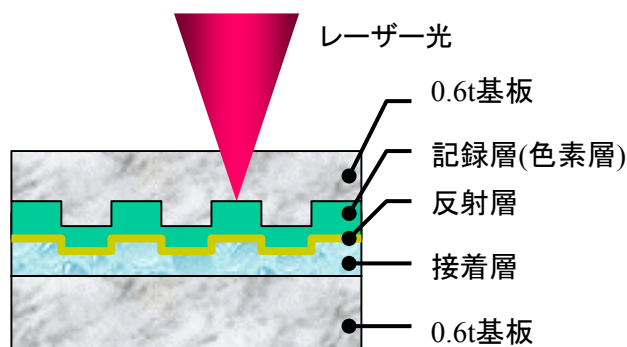


図 1-2-1 DVD-R 断面図

(2) DVD-RAM、DVD-RW の劣化要因

DVD-RAMに用いられている記録材料は、結晶相の状態と非晶質相の状態との間の変化を利用した相変化記録材料と呼ばれるものが用いられている。

相変化材料を用いている DVD-RAM、DVD-RW に記録されたデータの劣化の主な要因としては、非晶質記録マークが結晶状態に変化して記録マークが消えてしまいデータの再生ができなくなる場合、また、記録層が腐食して局所的または全体的に反射率変化が生じてデータの再生ができなくなる場合の2つが考えられる。

上記に加えて、相変化に限らず光ディスク全般の劣化要因として、基板材料自身や、基板表面にハードコート層を形成しているものについてはそのハードコート材料自身、あるいは貼り合わせに用いる接着剤材料の劣化も、要因としてあげることができる。

(3) 加速試験による寿命評価方法

DVD-R においては記録ピット内外での化学反応、また DVD-RAM、DVD-RW においては非晶質相の状態が結晶相の状態に変化する現象は反応速度論に従っていると考えられ、それらの変化に要する時間を t としたときに、 $1/t \propto \exp(-E_a/kT)$ なる関係式が成立する。ここで E_a は活性化エネルギーであり、記録材料に依存する定数、 k はボルツマン定数、 T は温度である。したがって実使用環境温度での記録ピット (DVD-R)、非晶質マーク (DVD-RAM) の安定性を議論するには、 E_a を求めることが重要である。さて、この式を変形すると $\ln(1/t) \propto -E_a/Kt$ となり、複数の温度での t を実験的に求めることによって E_a の値を求めることができる。

このように各温度条件でそれぞれの寿命時間を求めることにより、ある温度での寿命 (例えば $30^\circ\text{C}80\%\text{RH}$) の推定が可能となる (アレニウス法)。

DVD-R については反射膜の腐食、DVD-RAM、DVD-RW については記録層が腐食することにより、それぞれのもつ光学定数が変化し、反射率や光の干渉状態が変わり、正常なデータ再生を阻害する要因となる。腐食の主なものとしては、酸化、硫化が考えられる。

このうちの酸化は反応速度論に従っておこるため、複数の温度での寿命を求めることにより、温度に対する酸化の活性化エネルギーを求めることができ、実使用環境での寿命を推定することが可能となる。また、酸化は湿度によっても変化するため、複数湿度環境での寿命測定から湿度に関する活性化エネルギーを求めることも重要である。また、劣化原因が複数ある場合にはより低温での試験を行うことによって、劣化要因を切り分けることが可能になる場合があり、より厳密な寿命推定を行うことができる。

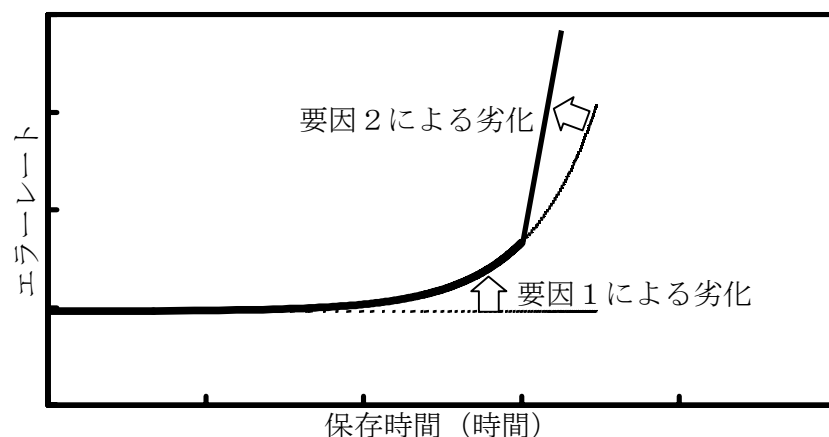


図 1-2-2 2つの要因がある場合のエラーレート変化模式図

今年度の試験で行ったように、 65°C などの低温域での試験が必要になる。また、要因1と要因2とを切り分けることができる場合、要因の切り分けを行った評価が、正確な寿命推定を行う上

で重要である。

また耐光性の評価試験は主に色素層をもつ DVD-R に対して有用であり記録層が相変化材料である DVD-RAM、DVD-RW の劣化要因になるとは考えにくい、これまで DVD-RAM、DVD-RW に光暴露試験を行った例がないことから今回実施した。

1.3 評価ツール

1.3.1 既存の評価ツール

光ディスクの特性を評価するための評価項目としては、光学的特性、電気的特性、寸法・機械的特性等があげられる。ドライブ装置では、集光された記録再生ビーム・スポットが記録面、記録トラックに忠実に追従してはじめて良好な記録・再生が可能である。従って、良好な電気的記録再生信号特性を得るためには、光ディスクの光学的特性と並んで、光ディスクの寸法・機械特性も非常に重要である。

特性区分	代表的特性例	測定装置例				
		汎用測定器 専用測定器（単項目）	ディスク専用総合特性測定器			
光学的特性	膜反射率 フォーカス	反射率測定器 光学特性測定器	*1	*2	*3	*4
電気的特性	ジッター 感度（出力） エラーレート 変調度 分解能	スペクトラムアナライザ オシロスコープ タイムインターバルアナライザ ジッターメーター	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓
寸法特性 機械的特性	外径・内径 厚み 重量 偏芯 チルト 面振れ	三次元測定器 膜厚測定器 段差測定器 チルト測定器				
その他	耐久特性 耐侯特性					

図 1-3-1-1 評価特性区分と測定装置例

電気的記録再生信号特性として、記録データの再生信号だけでなく、トラッキング・サーボ等に使用される溝からの再生信号が評価される。溝信号はデータを記録する前後で形成される記録マークにより変化するため、データ記録前の溝特性（未記録信号特性）とデータを記録後の溝信号（記録後信号特性）が評価される。記録再生信号特性の評価装置としては、ドライブをもとにした評価装置といわゆるスピンスタンドと言われる評価装置がある。機械特性の評価項目としては、ディスクの面振れ、反り、記録トラックの偏心量等がある。

それぞれの特性の代表的特性例と測定装置例を図 1-3-1-1 に示す。市販又は内製の装置では、一つの装置でいくつかの特性が測定できるようになっており、図 1-3-1-1 中の矢印で示される*1、*2、*3、*4 のような組み合わせの特性を測定できる総合特性測定装置が販売されている。主な総合特性測定装置を上記*1、*2、*3、*4 で分類すると図 1-3-1-2 のようになる。ドライブで記録したデータをこれらの評価装置で評価することも可能である。

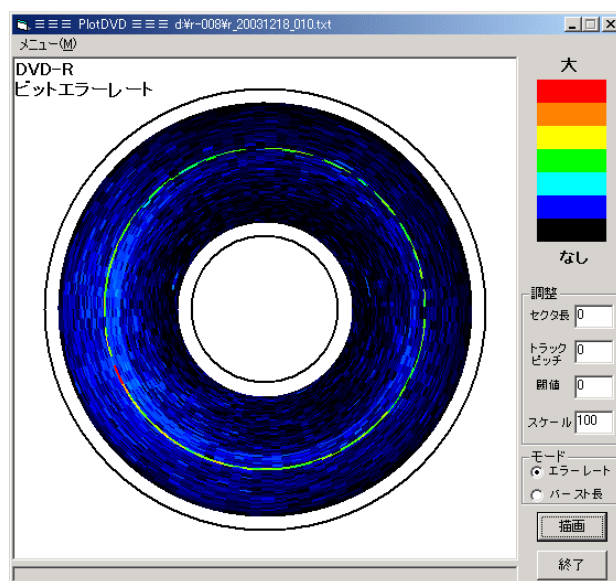
測定機分類	メーカー	測定器名称等	対応特性		方式	測定項目例
			光学	電気機械		
*1	Audio Development	DVD-CATS	○	○	光ビツクアツプ方式	
*1	エキスパートマグネティクス	DVDT-Rシリーズ	○	○	光ビツクアツプ方式	
*1	浜松メトリクス	Discpro	○	○	光ビツクアツプ方式	オブチカルチルト、反射率 ランドレベル電圧、グループレベル電圧、PP電圧(TES)、TES/1G、モジュレーション 面振れ量、面振れ加速度、偏芯量
*2	パルステック工業	RDC2000 DDU、ODUシリーズ	○	○	光ビツクアツプ方式	
*2	シバソク	LM108A	○	○	光ビツクアツプ方式	
*2	パナソニック モバイル・コミュニケーションズ	DVD-RAMディスク 評価システム	○	○	光ビツクアツプ方式	反射率、透過率、オブチカルチルト エラーレート、ジッター、サーボ信号特性、HF信号特性
*3	小野測器	LMシリーズ	△	△	光ビツクアツプ方式	オブション(オブチカルチルト、反射率) オブション(エラーレート、ジッター、サーボ信号特性、HF信号特性) 面振れ量、面振れ加速度、偏芯量、真円度、反り角
*4	BASLER	Basler REFERENCE	○	○	CCD 方式	反射率、透過率、オブチカルチルト 面振れ量、面振れ加速度、
*4	Dr.Schenk	MTシリーズ	○	○	CCD 方式	反射率、透過率、オブチカルチルト 面振れ量、面振れ加速度、
*4	Aeco	ARGUS	○	○	CCD 方式	反射率、透過率、オブチカルチルト 面振れ量、面振れ加速度、

図 1-3-1-2 主な総合特性測定装置の具体例

1.3.2 新たな評価ツールの開発

1.3.2.1 DVD誤り率測定装置

R-008 三菱 DVD-R 加速前



R-008 三菱 DVD-R 第2回加速後

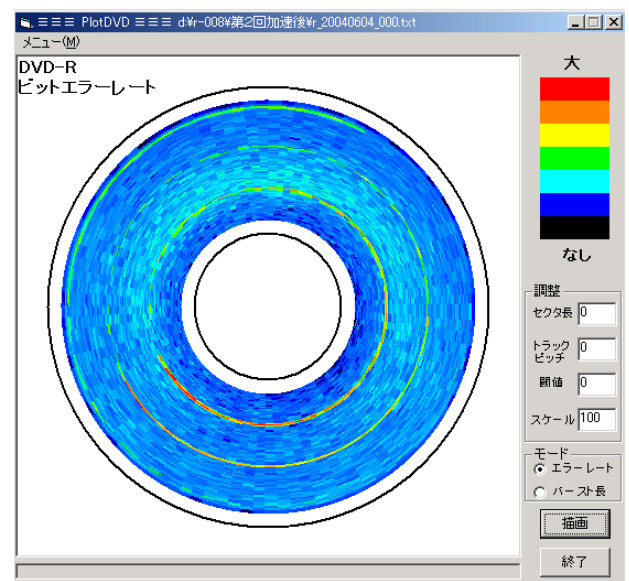
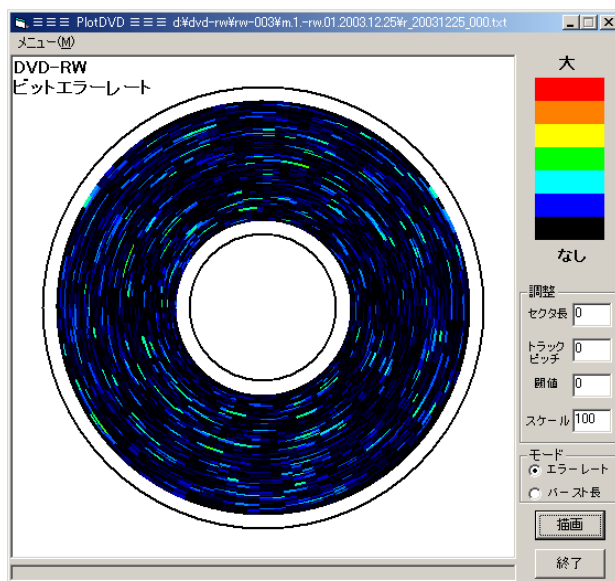


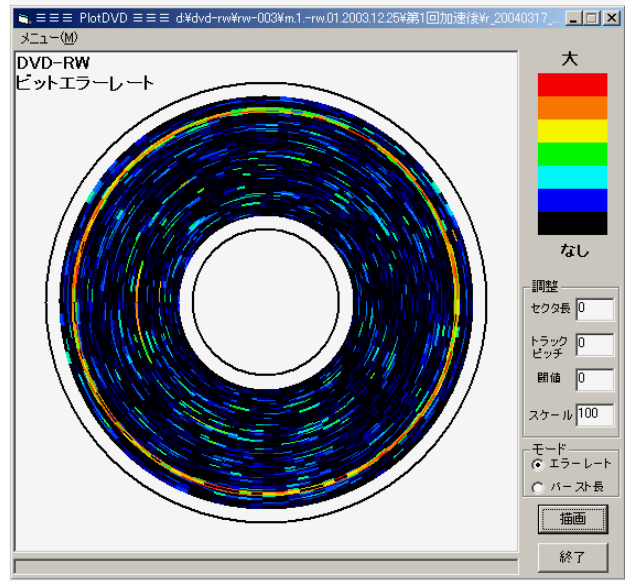
図 1-3-2-1 DVD-R 加速寿命試験結果による誤り分布状況

加速寿命試験を実施しディスクの盤面の誤り分布状況を測定し、DVD-R、DVD-RW の測定結果を図 1-3-2-1、図 1-3-2-2 に例示する。

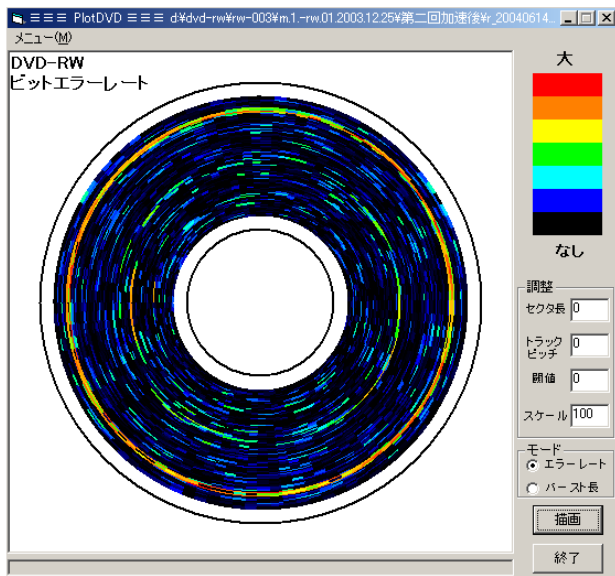
RW-003 三菱 DVD-RW 加速前



RW-003 三菱 DVD-RW 第1回加速後



RW-003 三菱 DVD-RW 第2回加速後



RW-003 三菱 DVD-RW 第3回加速後

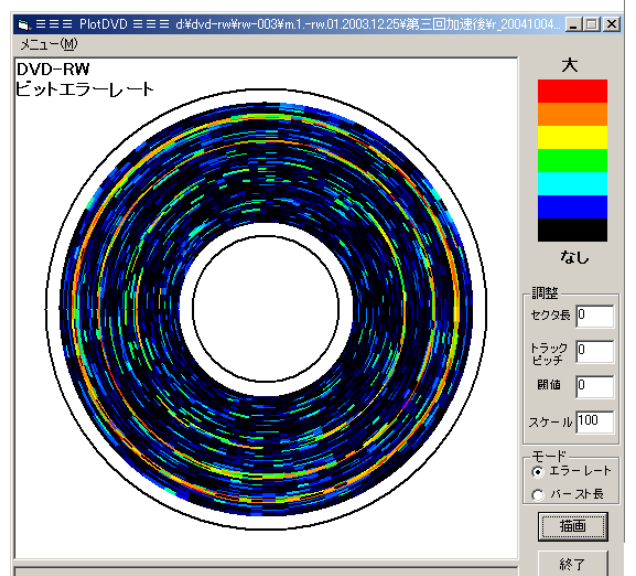


図 1-3-2-2 DVD-RW 加速寿命試験結果による誤り分布状況

結果からわかるように DVD-R はディスク中周部分から劣化している。しかも、ディスク半面の誤り率が多く、半面の誤り率が少ない。また、DVD-RW では本ディスクの場合は全面の劣化が見られるものの、局所的に劣化が発生し、それがディスク全面に分散している。

1.3.2.2 CLV補正

15 年度に開発した測定装置は USB 経由でドライブからデータを取り出している。従ってセクタ番地のディスク盤面上の物理的位置はコンピュータ側からは見えていない。DVD-RAM は Z

CAVフォーマットと称してディスクトラック一周の中に記録されているセクタ数は規格で決まった整数になっている。このトラック一周中のセクタ数はトラック番号により異なるのではあるが、セクタ番号から欠陥のディスク上の物理的位置関係が特定できる。しかし、DVD-R、DVD-RWのようなCLVフォーマットではロープに一定間隔で結び目を作り、それを螺旋状に列べたような構造化をしているので、結び目の間隔に誤差があるとディスク上の物理的位置は判らなくなってしまう。ISO/IEC規格によるとビット長の誤差は±1パーセントにも及ぶ。

以上の問題点を解決するためにCLV補正と称する技術を開発した。ディスクの誤り率を測定する前にディスクの誤差を見付けて、加速寿命試験を行った後に、そのビット長誤差を補正して、欠陥の正しい物理的位置を求めようというものである。ディスクの誤差を見付けるために、ディスク記の半径方向に一本の太い線を引き、それが直線に見えるようになるまで、誤差を逆方向に加算していく方法で解決した。ここで問題になるのは引いた線の処置で、完全に消去して後刻の誤り率測定に影響が出ないようにする必要がある。

そのために線はマジックインクでは引かず、製図用の黒テープを貼り付けた。テープは「I・C INC社のI・C TAPE」を使用した。このテープは、厚さ0.177mmのものである。

テープを貼り付けた状態を図1-3-2-4に示す。



図 1-3-2-3 CLV 補正用の黒テープ



図 1-3-2-4 黒テープを貼り付けた状態

次に問題になったのは黒テープの残渣糊である。糊を完全に除去するためにアルコールでふき取ることにした。試したアルコールは「エチルアルコール (エタノール)」「メチルアルコール (メタノール)」「2-プロパノール」「ブタノール」「アセトン」の5種類である。アルコールをふき取る機材としての綿棒は、ジョンソン・エンド・ジョンソン株式会社の「ジョンソン綿棒 200本入り」を、キムワイブは、株式会社クレシアの「ワイパ S-200」を使用した。

ふき取り方法は下記の2種類を試した。ふき取り方法としては方法2が良好で、アルコールとしては2-プロパノール以外が良好であった。

- ① 方法1：アルコールを染み込ませたキムワイブをディスク上に置き、5分間放置してから綿棒で拭き取る。
- ② 方法2：アルコールを染み込ませた綿棒で20回拭き取る。綿棒を回しながら拭き、各面5回ずつとする。

2-プロパノールの場合の残渣を図1-3-2-5に示す。



図1-3-2-5 2-プロパノールを使用した場合の残渣

CLV補正が正しく補正できるか否かを検照するために、コンピュータシミュレーションによる作図で線による誤りを示し、スタンパーによるビット長誤差の推定をできるようにした。

図1-3-2-6はビット長誤差による補正線の曲がりである。又図1-3-2-7はそれをコンピュータシミュレーションにより模擬した図である。

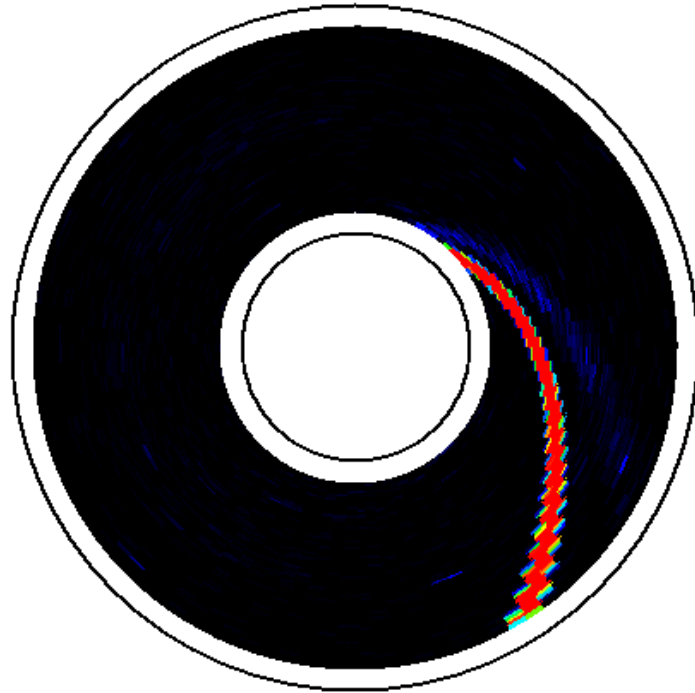


図 1-3-2-6 ビット長誤差による補正線の曲がり

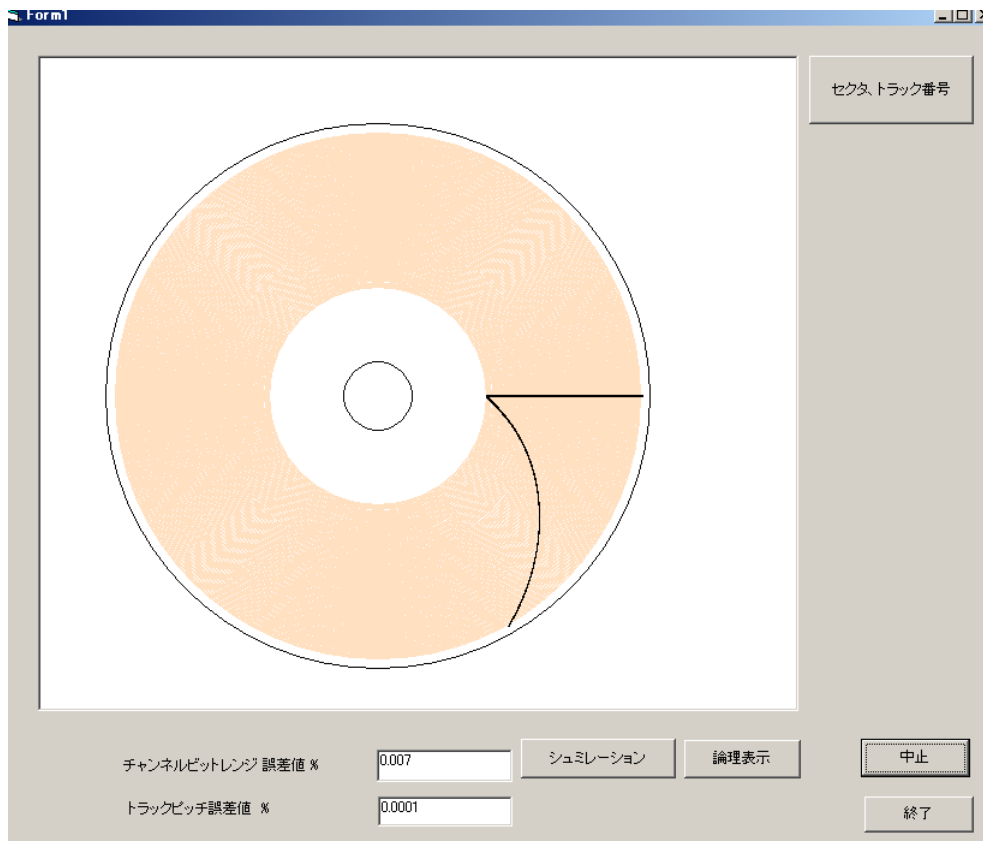


図 1-3-2-7 補正線の曲がり模擬したシミュレーション図

以上本方式の誤りデータ表示方法はCLV補正スタンパーの製造誤差に弱いという欠点を持っている。しかし、CLV補正を施すことにより、小さい誤差のスタンパーであれば、修正が可能であることがわかった。

1.3.2.3. バースト分布の測定

16年度には当該誤り測定装置で更に詳細な誤り特性を測定できるように改造した。誤り測定装置でディスク上の位置に対応した誤り率の数値を出力できるように改造した。出力した数値を更に演算して、バースト分布がどの割合で発生しているかを表示できるようなソフトを開発した。現在の出力した数値を利用して、図1-3-2-8のようにバースト長分布の図を作成できるようにした。目的はどのような種類の誤りが発生して誤り訂正能力を圧迫するかを明確化するためである。

測定したグラフを変型して、バースト誤り分布を求め、DVDの誤り訂正符号で訂正した結果を求めた。

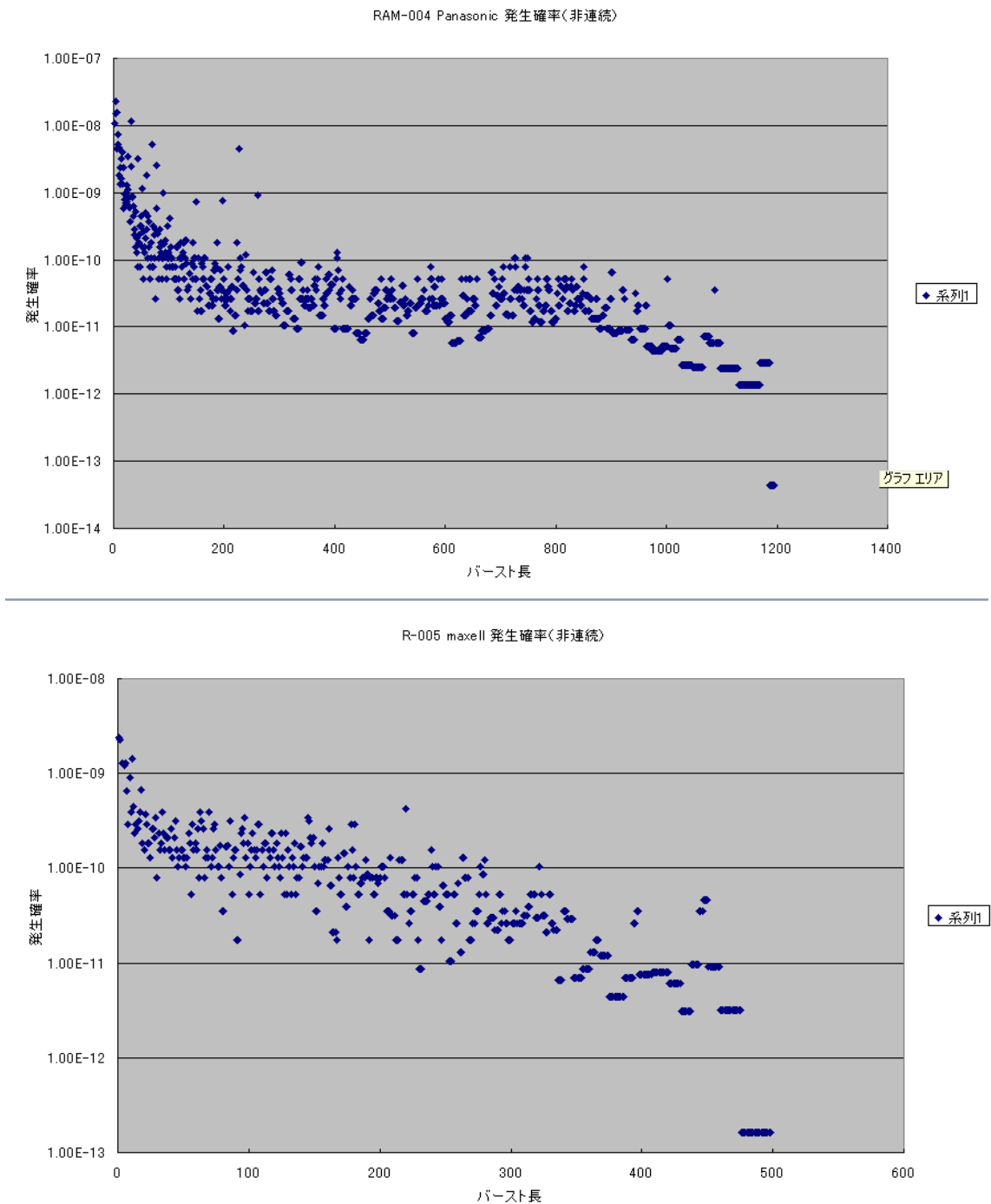


図1-3-2-8 バースト長分布図

横軸はバースト誤りの長さを縦軸は誤り発生確率を示している。図からわかるように、連続した長いバースト誤りの方が短いランダム誤りよりも発生確率が低い。本バースト長分布のグラフとDVDの記録符号とを組み合わせると誤訂正の発生する確率を計算することができる。

1.4 まとめ

DVD-R ディスク、DVD-RAM ディスク、及びDVD-RW ディスクの寿命劣化要因分析と寿命予測方法の検討を行った結果、メカニズムは異なっても、劣化を起こさせる環境要因としては、温度、湿度、光、大気中に含まれるガスなどであり、これらによる加速試験を行えば良いことが分かった。

一方、昨年度実施したDVD-R ディスクの加速試験で、高温で突然PIエラーが増加して寿命基準を大幅に上回るディスクが見られた。これらディスクでは、アレニウス法で寿命予測をしようとしている反応速度論に基づく劣化要因（第一の要因）以外に、高温で顕著となる第二の劣化要因が考えられる。本来、第一の劣化要因で寿命を予測しようとしていたので、第二の劣化要因が顕著に現れているディスクでは、正確な評価ができない可能性がある。第2の要因によるアレニウス図の傾きが第1の要因より大きければ、見かけ上長寿命となり、正確な寿命推定はできない。従って、2つの要因が考えられる場合は、より低温側での加速試験が欠かせない。

今年度追加した加速温度65°C80%RHが、これを実証する上で十分低温領域にあるかは、加速試験の結果を見ないと判別できない。ただ、低温側の加速試験では、寿命に達するまでの時間が急激に延びることから、結果を出すまでに1年、あるいは数年かかる場合もあり、現実的には実証が難しいこともある。このため、高温で劣化が急激に進む原因を特定し、それを改良したディスクで加速試験を行うなども有効な手段と考えられる。

今年、DVD-RW ディスクの加速試験を追加したが、寿命測定に必要なデータの収集は、昨年度リストアップした評価装置を用いることができる。これらの装置では、光学特性及び機械特性は、DVDディスク全体で共通して測定に使用できる。信号の品質の測定では、規定されるパラメータがディスクの種類によって若干異なることもあり、評価装置の機能が一部異なる場合もある。これら評価ツールについては、昨年度と同じリストを添付した。

昨年度は、既存の評価ツールに加え、市販ドライブを改良し、これに開発したエラー測定ソフトと表示ソフトを組み合わせることで、新たにディスクのエラー分布を表示できる装置の開発を行った。DVD-RAMの場合は、半径方向にアラインされたセクタ情報からエラー分布の目視化ができた。しかし、DVD-Rディスクの場合は、目印になる角度情報がないこともあり、正確にエラー分布を表示できない課題があった。また、バイトエラー長の分布が表示できない課題もあった。

今年度は、DVD-Rディスクの表面に設けた半径方向のマークを基準に、ディスクのエラーを目視化する新たな手法を開発した。これによって、加速試験前と加速試験後のエラー分布を目視化することができた。また、昨年度はエラーの大きさの分布表示ができなかったが、今年度はソフトの改良をすることで、バイトエラー長の分布が表示できるようになった。これらの開発で加速試験前後のエラー分布が表示できるようになったことから、来年度は、実際に寿命劣化の原因究明などに使用していきたい。

第2章 現状の光ディスク媒体の保存寿命に関する調査

2.1 まえがき

当協会は、コンテンツの流通・保護・保存の立場から、記録形媒体についても、CPRM (Content Protection for Recordable Media) などコピープロテクション技術が導入されている光ディスク媒体に関心を持っている。昨年度は、予算の都合からこの条件を満たし、かつ現在、DVD レコーダなどで多く使われている記録形 DVD ディスクとして、追記形の DVD-R ディスクと書換形の DVD-RAM を選び、保存寿命に関する評価実験を実施した。

2.2 評価条件の検討

(1) 初期品質の評価試験

寿命劣化と関連する測定項目として、DVD-R ディスク、DVD-RW ディスク、DVD-RAM ディスクでは、若干の違いがある。

DVD-R 及び DVD-RW は、初期特性の測定項目として、反射率、信号変調度、アシンメトリー、PI エラー、ジッター、ラジアルチルト、タンジェンシャルチルトを測定することにした。なお、PI エラーが連続する 8 ECC ブロックで、280 個を超えるディスクについては、加速試験は行うものの寿命予測は行わないことにした。

DVD-RAM ディスクの初期特性は、バイトエラーレート、ラジアルチルト、タンジェンシャルチルトを測定することにした。なお、バイトエラーレートが 9×10^{-4} を超える媒体については、加速試験は行うものの寿命予測は行わないことにした。

(2) 温度加速試験

加速試験においては、劣化量が $dx/dy=K$ (K は加速係数) を満たす場合、一般に加速試験が適用できる。

x が、温度、湿度、圧力、イオン拡散、電解など様々な因子による関数の場合は、より複雑なアイリングモデルを使うことになる。しかし、これが温度だけの関数の場合、アレニウス法を適用することができる。

1.2 の(3)項で、反応により変化が現れる時間を t とした時

$$1/t \propto \exp(-E_a/kT)$$

なる関係にあり、いろいろな加速温度で、 E_a を求めることで寿命推定ができることを述べた。

この場合、劣化量は温度の関数で、 $dx/dT=K$ (K :定数) を満たす場合、アレニウス法を適用できることを示している。つまり、加速温度付近での劣化の変化量が同じ程度であれば、アレニウス法による寿命推定が可能なことを示している。

一方、DVD ディスクの寿命を判定するためには、加速試験による劣化量について明確な定義が必要となる。DVD-R ディスクでは、DVD-ROM ディスクと同様、エラー訂正前、連続する 8 ECC ブック(図 2-2-1 参照)で、少なくとも 1 バイトのエラーを持つ PI 行の数は 280 個以下とすることが規格で定義されている。つまり、8ECC ブロック \times 37856B に対し、280 個の PI エラーなので、バイトエラーレートは、ほぼ 9×10^{-4} に相当する。なお、PI 行に 1 バイト以上のエラーが生じる場合もあるので、厳密なバイトエラーレートの測定ではないが、一つの PI 行は 182 バイトなので、大きな差異は生じないと考えられる。

そこで、DVD-R ディスク及び DVD-RW ディスクの評価実験では、PI エラーが 280 個に達したとき、寿命とし、それに達する時間を測定することにした。

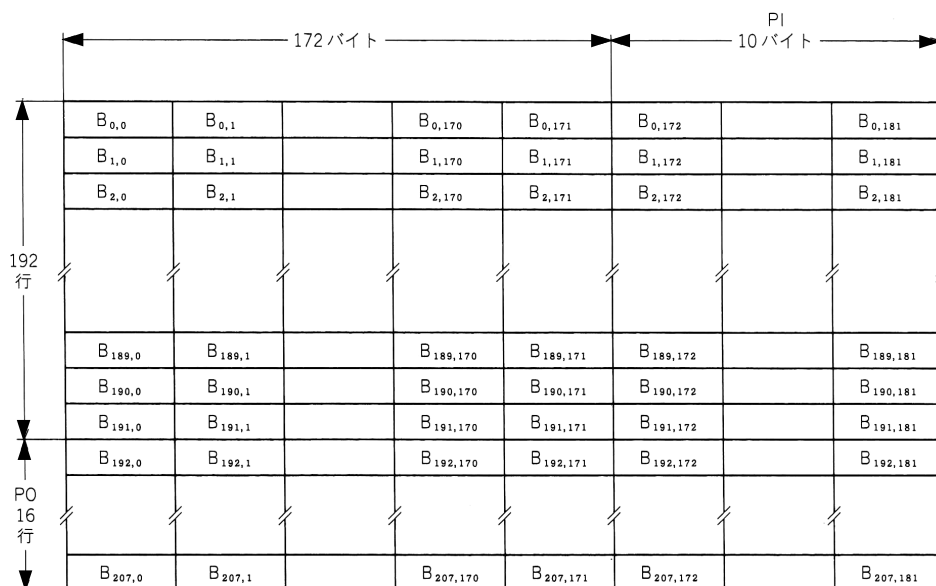


図 2-2-1 ECC ブロックの構成

一方、DVD-RAM ディスクの場合は、DVD-R ディスクや DVD-RW ディスクのように PI エラーの定義はないので、PI エラー 280 個に相当する劣化量として、バイトエラーレートが 9×10^{-4} に達した時、これを寿命とし、これに達する時間を測定することにした。

以上から、温度加速試験における評価基準については決まった。一方、加速条件について、ISO/FDIS18921 (CD-ROM の寿命試験) では、下記の、温度・湿度の 5 水準で試験が行われている。

80°C85%RH、70°C85%RH、60°C85%RH、80°C70%RH、80°C55%RH

- ① 湿度について大きな変更ができないこと、及び条件を一致させる必要がある。
- ② 加速温度が低いと結果が出てくるまでには時間がかかり、年度末迄結果がでない。
- ③ DVD ディスクは対称構造を持っていることから、CD ディスクに比べ温度加速に強いことが予想される。
- ④ 高温で予測したアレニウス法が低温領域で使えるかは、上記の温度より低い温度で寿命を測定することで、その検証が可能となる。温度範囲としては、60°C~65°C 程度が適切と見られるが、昨年度の加速試験で、75°C で 3000H 程度の寿命を持つメディアの存在が予測された。このため、できるだけ 1 年で試験結果が得られることを期待し、10°C のスパンを取って、加速試験を行うことにした。

高温での加速試験は、比較的短い時間で寿命測定ができるメリットがあり、これらの 4 点を考慮し、以下の 4 水準で試験を行うことにした。

85°C80%RH、80°C80%RH、75°C80%RH、65°C80%RH

(3) 耐光試験及び耐ガス試験

これらの試験は一般にはあまり行われませんが、有機色素材料を用いている DVD-R ディスクだけではなく、無機の相変化材料を用いている DVD-RW ディスクや DVD-RAM ディスクについても、耐光性試験及び耐ガス試験を行うことにした。

- ① 耐光性試験 … 陽光と類似の光暴露試験を行う。
- ② 耐ガス試験 … 温泉地同等以上のガス濃度の硫化水素ガスで暴露試験を行う。

2.3 評価対象ディスクの選択

DVD は一般に次のように分類される。

- (1) 再生（読み出し）専用のもので DVD-ROM
- (2) 記録（書き込み）可能なもの
 - (a) 追記型（1回だけ記録できるもの）で DVD-R
 - (b) 書換型（繰り返し消去・記録できるもの）で DVD-RAM、DVD-RW など

本スタディでは、ディスクへの記録（書き込み）をユーザ側で行うことを想定しているため、また個々の市販品を評価することが目的ではないため、一定の数量をまとめて購入可能な市販品という条件に合う下記（図 2-3-1）のものを選んだ。

なお、DVD-R の方がメーカ（またはブランド）の数が多いため、評価の対象も DVD-R を多くした。また、海外メーカ（またはブランド）のものをできるだけ多く含めるようにし、国内メーカ（またはブランド）のものとの比較が行えるようにした。

種類	メーカ (OR ブランド)	型番	仕様等
DVD-R	太陽誘電	DVDR-D47SPY10P	4.7GB 4倍速
	Maxell	DR47B.1P10S	4.7GB 4倍速
	三菱化学メディア	DHR47U5	4.7GB 4倍速
	TDK	DVD-R47X5G	4.7GB 4倍速
	Ritek (Spark) *	DVD-R4.7G 4X1P	4.7GB 4倍速
	CMC*	DVD-R4.7PW4XSLIM5P	4.7GB 4倍速
	Optodisc (Radius) *	RDR470-005-204	4.7GB 4倍速
DVD-RAM	Princo (SuperX) *	DVD-R4.7 4XPW10P	4.7GB 4倍速
	Panasonic	LM-HC47LS5	4.7GB 3倍速 カートリッジ無
	Maxell	DRMC94B.1P	9.4GB 3倍速 TYPE4
	Ritek (Ridata) *	DVDRAM-47P-5PK	4.7GB 2倍速 カートリッジ無
	Optodisc (Radius) *	RDM470-005-20	4.7GB 2倍速 カートリッジ無
DVD-RW	Prodisc (SmartBuy) *	SDVD-RAM94 (T4) PC	9.4GB 2倍速 TYPE4
	TDK	DVD-RW47X5G	4.7GB 2倍速
	三菱化学メディア	DHW47U5	4.7GB 2倍速
	Victor・JVC	5VD-RW47B	4.7GB 2倍速
	Radius*	RDW470-005-202	4.7GB 2倍速
	Sailor*	78-4781-000	4.7GB 2倍速

*印は台湾メーカ（またはブランド）

図 2-3-1 評価対象ディスク

2.4 測定装置と測定条件

(1) DVD-R

(a) 測定装置

1) データの記録

データを記録する際には、下記の 2 種類の市販ドライブを用いて 4 倍速記録した。

- ① ソニー製 DVD-R/RW ドライブ DRU-500
- ② パイオニア製 DVD-R/RW ドライブ DVR-105

2) 機械特性評価

機械特性の評価には、下記の 2 種類の評価機を用いた。

- ①アドモン製反り角測定機 S3DL-12N
- ②小野測器製機械特性評価装置
- (b) 測定条件
 - 1) 測定標準環境： 温度 $25 \pm 3^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $50 \pm 10\% \text{R. H.}$
 - 2) 測定条件
 - ① 測定項目：反射率 R_{top} 、信号変調度 I_{14} / I_{14h} 、Asymmetry、PI エラー、Jitter
 - ② 測定箇所：半径 24mm、40mm、50mm の 3 箇所各 4000 Physical Sector 分を測定
 - 3) チルト測定条件

ディスク半径 23~58mm (5mm 単位) で測定し、その最悪値を使用した。

(2) DVD-RAM

今回の各種試験では RAM の代表的特性として主に 2 つの特性（電気特性として BER：バイトエラーレート、機械的特性としてチルト）について評価を行った。

以下にその測定装置と測定条件の概要を示す。

(a) 測定装置（図 2-4-1）

- 1) BER（バイトエラーレート）

松下電器製ドライブ LF-D200 + 計測用 PC（測定用内製ソフト）

※ 記録／再生とも固定の 1 台のドライブを使用した。
- 2) チルト（Radial Tilt, Tangential Tilt）

Aeco 社製「ARGUS」



図 2-4-1 BER 測定装置（左）と ARGUS（右）

(b) 測定条件

- 1) 測定標準環境： 温度 $25 \pm 3^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $50 \pm 10\% \text{R. H.}$
- 2) BER 測定条件
 - ① BER 測定箇所：全ユーザゾーン（Zone 0-34）の中央付近連続 32 ECC ブロック
 - ② BER 測定信号：全メディアとも各 ECC ブロック毎にランダム信号を 2 倍速記録（1 回記録）し、再生／データコンペアを行い、エラーバイト数をカウント。
 - ③ 全ゾーン終了後に $\text{BER} = \text{エラーバイト総数} / \text{記録バイト総数}$ を算出。

※ 今回の評価対象サンプルについては 3 倍速メディア（国内 A, B ブランド）と 2 倍速メディア（台湾 C, D, E ブランド）の 2 種類があったが測定条件を統一するため、同一ドライブにてすべて 2 倍速記録を行った。

※ 今回の評価の主目的は信号の保存性能確認にあるため、初期記録箇所と同一箇所を再生する Archival 評価のみで行った。
- 3) チルト測定条件：チルト測定位置：ディスク半径 23~58mm (1mm 単位)

(3) DVD-RW

(a) 測定装置

1) データの記録

データの記録は下記の市販ドライブを用い、すべてのディスクを2倍速記録で行った。
パイオニア株式会社製 DVD R/RWドライブ DVR-107、Firm.Ver.1.13

2) 電気特性評価：エキスパートマグネティックス社製 DVDT±R/RW106 を用いた。

3) 機械特性：ドクターシェンク社製 Prometheus MT-136

(b) 測定条件

1) 測定標準環境： 温度 $25 \pm 3^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $50 \pm 10\% \text{R.H.}$

2) 測定条件

① 測定項目： 反射率 R14H、信号変調度 I14/I14H、アシンメトリ、PI エラー、ジッター

② 測定箇所： 半径 24mm、40mm、50mm の三箇所各 4000 Physical Sector 分を測定
※ 今回の評価の主目的は信号の保存性能確認にあるため、初期記録箇所と同一箇所を再生するアーカイバル評価のみで行った。

3) チルト測定条件：ディスク半径 25～57mm (8mm 単位) で Radial、Tangential を測定

2.5 初期品質の評価

2.5.1 初期品質評価結果

(1) DVD-R

市場で購入した国内メーカー A、B、C と台湾メーカー E、F、G、H の 7 種類の DVD-R ディスクについて、初期の記録再生特性を評価した。

(a) DVD-R 評価者 1 の評価結果

評価者 1、2 はそれぞれパイオニア社製 DVD-R/RW ドライブ DVR-105、ソニー社製 DVD-R/RW ドライブ DRU-500 を用いて 4 倍速記録し、エキスパートマグネティックス社製 DVDT-R2 評価機を用いて、反射率 R14H、信号振幅 I14/I14H、Asymmetry、PI エラー、Jitter の評価を行った。評価者 1 の結果を図 2-5-1-1、測定に用いたディスクのブランド毎のばらつきを図 2-5-1-2 に示す。

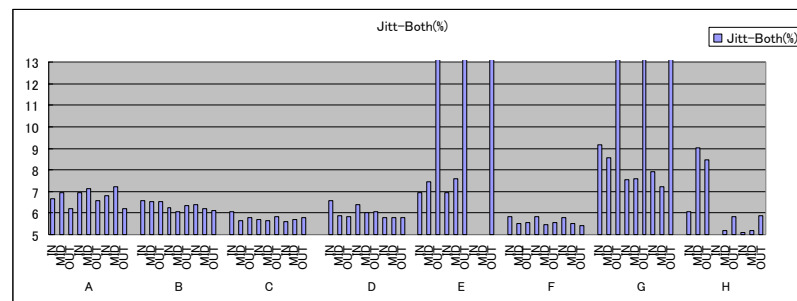
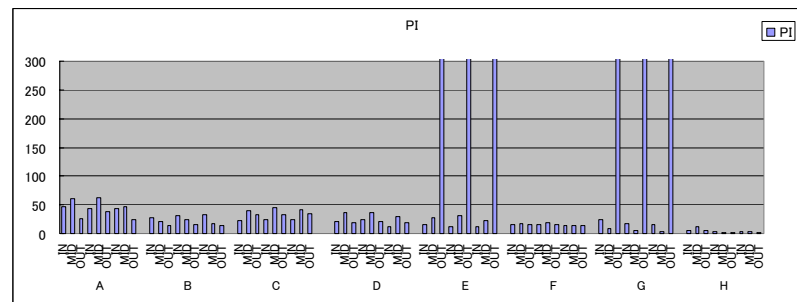
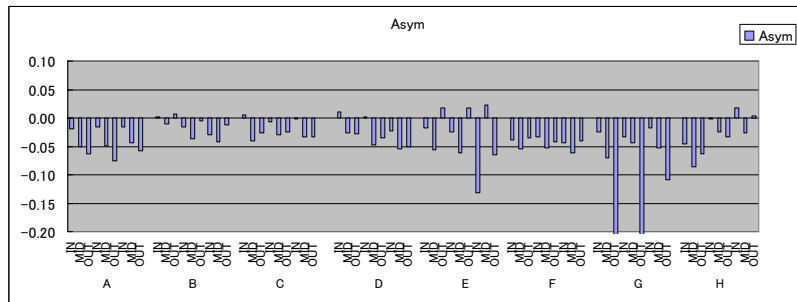
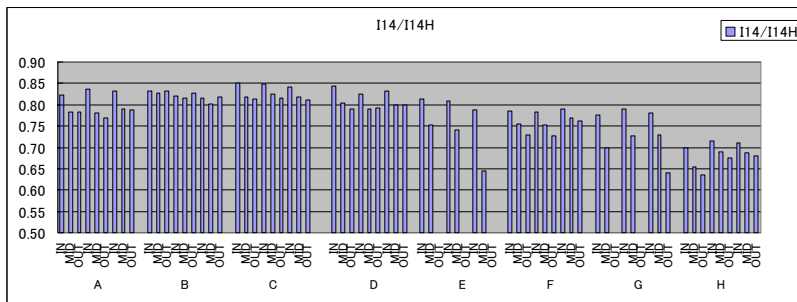
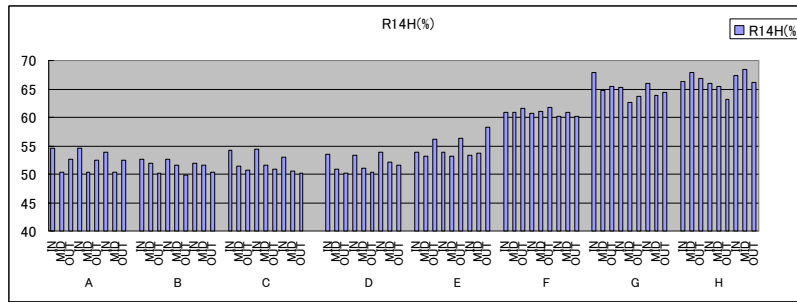
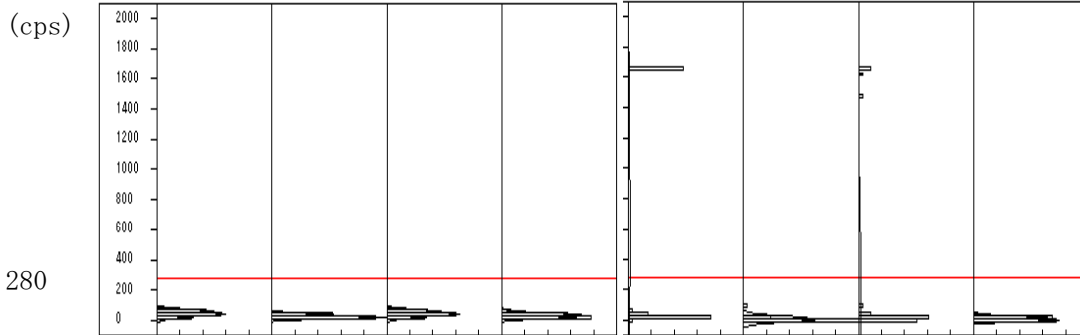


図 2-5-1-1 パイオニア DVR-105 で記録したディスクの初期特性 (評価者 1)

国内 A、 B、 C、 Dブランド

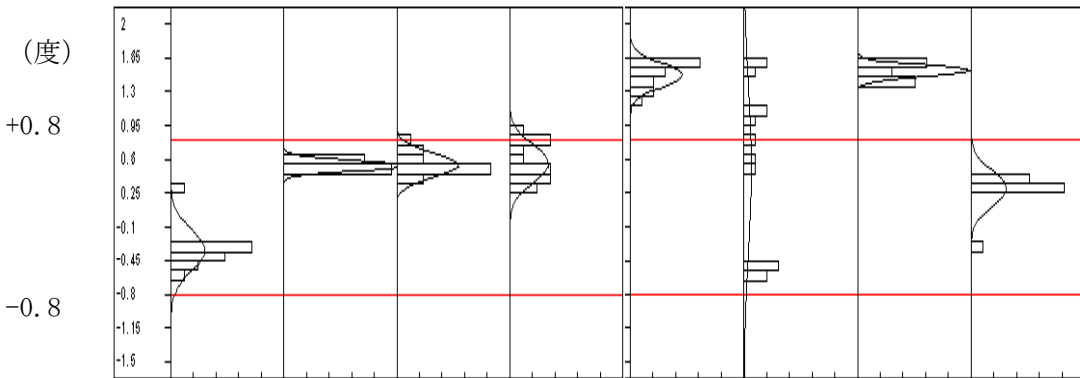
台湾 E、 F、 G、 Hブランド

<PI エラー>内周、中周、外周



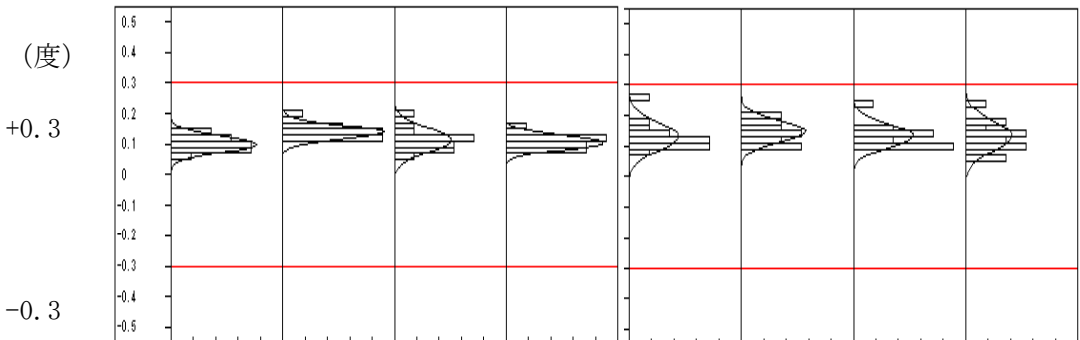
平均値	45.8	26.4	43.6	30.6	569.5	8.1	208.5	9.2
標準偏差	11.6	7.2	20.9	12.1	782.6	16.1	8.7	

<R-Tilt> r=58mm



平均値	-0.34	0.54	0.54	0.55	1.49	0.50	1.51	0.29
標準偏差	0.22	0.05	0.12	0.19	0.12	0.87	0.05	0.18

<T-Tilt> r=58mm



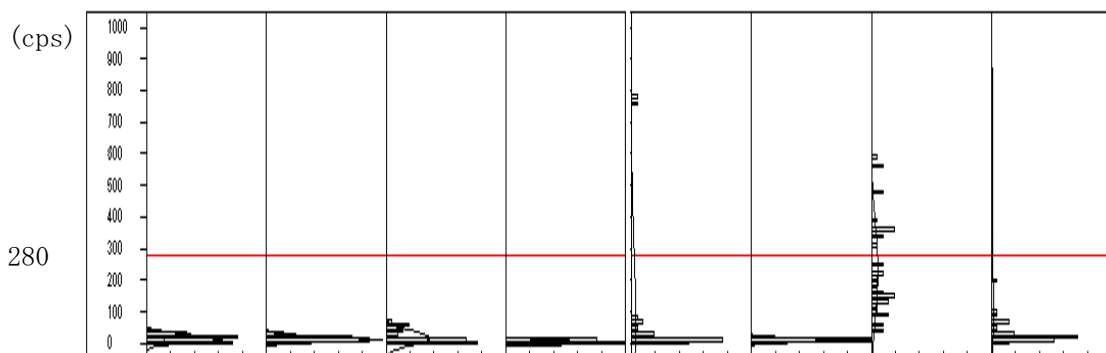
平均値	0.09	0.14	0.11	0.11	0.13	0.15	0.13	0.14
標準偏差	0.03	0.02	0.04	0.02	0.05	0.03	0.04	0.05

図 2-5-1-2 DVD-R 各ブランドの初期主要品質ばらつき (評価者 1)
記録ドライブ : パイオニア DVR-105

国内 A、B、C、Dブランド

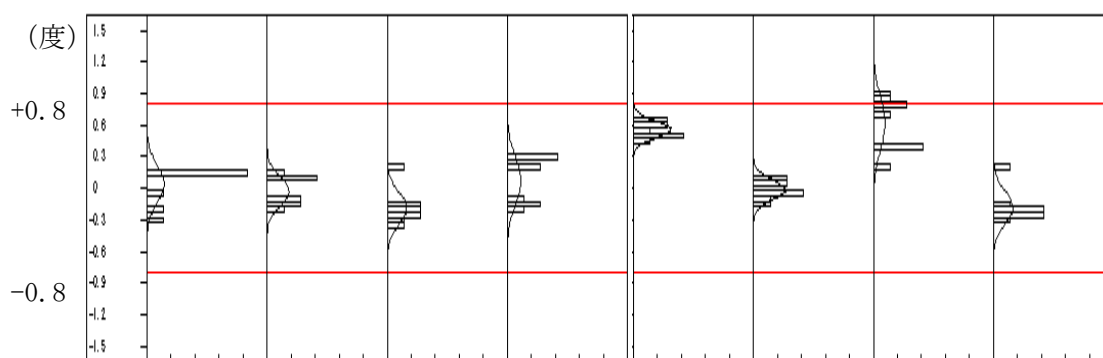
台湾 E、F、G、Hブランド

<PI エラー>内周、中周、外周



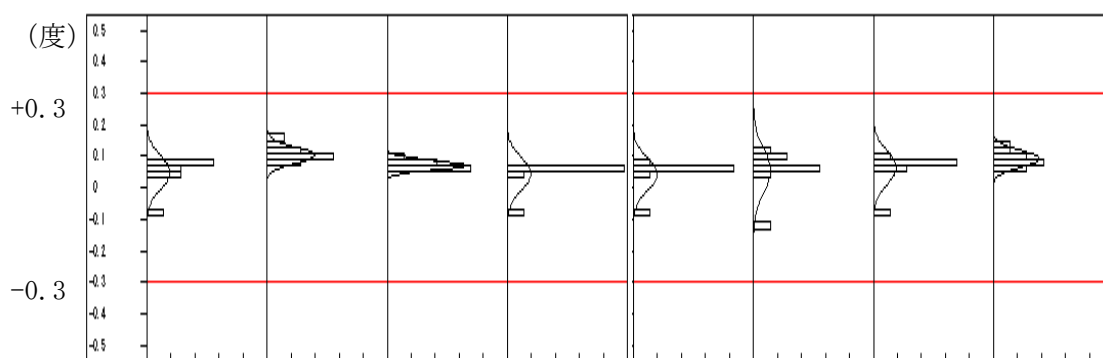
平均値	14.8	13.7	15.9	4.3	81.2	9.8	228.8	115.5
標準偏差	11.6	7.2	20.9	2.9	231.3	3.7	149.0	558.2

<R-Tilt> r=58mm



平均値	0.041	-0.030	-0.193	0.073	0.558	-0.016	0.615	-0.181
標準偏差	0.174	0.136	0.154	0.222	0.079	0.092	0.257	0.154

<T-Tilt> r=58mm



平均値	0.048	0.104	0.072	0.044	0.042	0.055	0.064	0.092
標準偏差	0.051	0.025	0.014	0.050	0.050	0.069	0.052	0.026

図 2-5-1-3 DVD-R 各ブランドの初期主要品質ばらつき (評価者 2)
記録ドライブ: ソニーDRU-500

(2) DVD-RAM

(a) 評価者 3 の評価結果

5 種類（国内 2 ブランド、台湾 3 ブランド）の各ディスク（サンプル数 n=1）について 2.4 項で述べた測定装置により初期品質評価として以下の特性測定を実施した。（下記数値は DVD フォーラム等の公式規格値）

- | | |
|-----------------------------------|----------|
| ① バイトエラーレート (BER) | — |
| ② Radial Tilt (以降 R-Tilt と呼ぶ) | ±0.7° 以内 |
| ③ Tangential Tilt (以降 T-Tilt と呼ぶ) | ±0.3° 以内 |

BER（バイトエラーレート）については C ブランドの内周部でやや高いものを除き、全ユーザ Zone (No.0~34) 平均値は国内 2 ブランド (A, B)、台湾 3 ブランド (C, D, E) とも 10^{-5} 台にあり、ゾーン間でのばらつきに多少のくせがあるものの全体的に比較的良好であった。

チルト値 (R-Tilt, T-Tilt) については台湾ブランド品でかなり大きな値を示すものがあった。

T-Tilt 値については国内、台湾ブランドともかなり良好で規格を十分満足するものの、台湾 D ブランド品等では R-Tilt の内周部～外周部での傾きが大きく、外周部で規格をオーバーする傾向が認められた。

(b) 評価者 4 の評価結果

各ブランド（国産 2 社、台湾産 3 社）のディスク（n=1）について初期品質の評価として、ドライブでのバイトエラーレート (BER) 測定と、ドライブで記録した箇所のジッターを、DVD-RAM テスターを用いて行った。また DVD-RAM テスターとしてはシバソク製 LM330A を使い、ランドトラック及びグルーブトラックの両方についてジッターを測定した。BER の測定結果を表 2-5-1-4 に、ジッターの測定結果を表 2-5-1-5 に示す。

表 2-5-1-4 初期 BER

ディスク	J R - 2 (HLDS)	L F - M 6 2 1 (Panasonic)
国内 A ブランド	1.76E-05	9.04E-05
国内 B ブランド	7.16E-05	9.04E-06
台湾 C ブランド	2.62E-05	1.24E-05
台湾 D ブランド	2.52E-04	6.33E-05
台湾 E ブランド	8.57E-05	1.47E-05

表 2-5-1-5 初期ジッター

ディスク	G/L	記録ドライブ		仕様
		J R - 2	L F - M 6 2 1	
国内 A ブランド	G	6.8	8.2	< 9.0
	L	6.6	8.3	< 9.0
国内 B ブランド	G	8.3	7.5	< 9.0
	L	8.5	7.5	< 9.0
台湾 C ブランド	G	8.6	9.1	< 9.0
	L	7.6	9.0	< 9.0
台湾 D ブランド	G	7.3	7.1	< 9.0
	L	7.9	7.0	< 9.0
台湾 E ブランド	G	9.6	8.9	< 9.0
	L	8.8	8.8	< 9.0

G: グループトラック、L: ランドトラック

上記の結果より、ドライブで記録した場合、台湾 D ブランド品をドライブ JR-2 で記録した場合を除いて BER は 10⁻⁵ 台あるいはそれ以下の結果が得られた。また、ドライブで記録した箇所のジッターは国内 A ブランド、国内 B ブランド、台湾 D ブランドにおいては規格の 9.0% を下回る結果が得られた。その他のディスクにおいては規格値を大きく超えるものは見当たらなかった。

(3) DVD-RW

市場から購入した国内ブランドのディスク A(台湾製)、B(日本製)、C(シンガポール製)、E(台湾製)と、台湾ブランドのディスク D(台湾製)の 5 種類の DVD-RW について、初期の特性を評価した。

(a) 評価結果

2.4 項で述べた測定装置と測定方法によって、各ブランド(各社 30 枚、合計 150 枚)を評価した。

各ブランド別に初期主要特性の分布をヒストグラムで表した。R14H は測定半径位置による値の傾向があるため、50mm の値のみをプロットした。また、R-tilt は反り方向において絶対値の大きいほうの値の分布をプロットし、状態を見やすくした。そのほかの値はサンプル数 30、サンプルあたりの測定箇所 3 箇所、計 90 点の分布である。

初期記録時に、A 社(2 枚)、C 社(1 枚) D 社(4 枚)、E 社(1 枚)のディスクにおいて記録面表面傷によると推測できる書き込み停止が発生した。これらは不良ディスクであるが、この評価の主目的は保存特性であるため、これらのディスクは除外した。

2.5.2 考察

(1) DVD-R

全ての国内メーカー製ディスクでは、差はなく、良好な結果が得られたが、一部の台湾メーカー製ディスクについては、初期から問題があることが確認された。

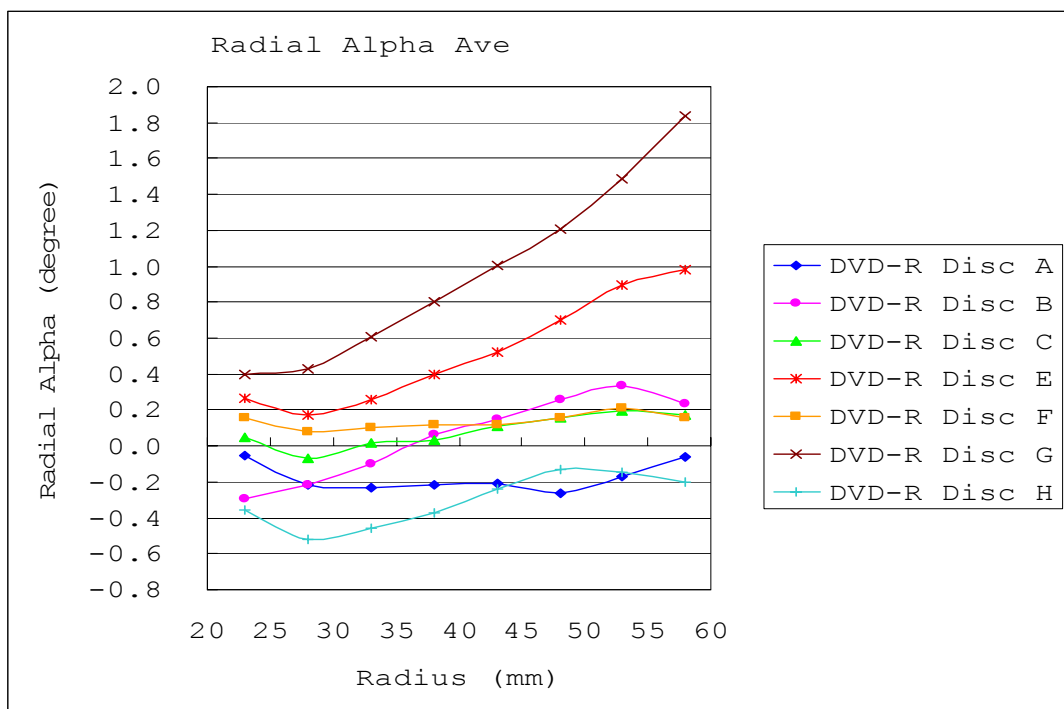


図 2-5-2-1 R-tilt の測定結果

パイオニア社製 DVD-R/RW ドライブ DVR-105 で記録した場合、台湾製ディスク G は、中周で記録中にエラーが発生し、記録が中断したものがあつた。

また、パイオニア社製 DVD-R/RW ドライブ DVR-105 で記録した場合のディスク E と G、及び、ソニー社製 DVD-R/RW ドライブ DRU-500 で記録した場合のディスク E、G と H で、初期から外周の PI エラーが規格値 280 を大幅に超えたディスクがあつた。ディスク E と G で PI エラーが悪い原因は、図 2-5-2-1 に示すように、外周で半径方向の Tilt (R-tilt) が規格値の 0.8° を超えているためと考えられる。

図 2-5-1-2 と図 2-5-1-3 の PI エラーの分布を見ると、ディスク E、G については評価者 1 と評価者 2 で異なる結果となっている。記録するドライブにより、反りに対する許容範囲が違うため、このような違いが起きていると推測される。

パイオニア社製 DVD-R/RW ドライブ DVR-105 で記録したディスクは、ソニー社製 DVD-R/RW ドライブ DRU-500 で記録したディスクに比べ、Asymmetry が低めに記録されていた。

(2) DVD-RAM

(a) 評価者 3 の場合

5 ブランドの DVD-RAM の初期品質確認について各サンプル $n=1$ ではばらつきを含めて判断がつかないため、次のステップ（加速劣化試験等）での初期値確認を兼ねて各ブランド $n=25$ の評価を行った。

チルト値については比較的 maximum となりやすい最外周付近 ($r=58\text{mm}$ 付近) にて正負記号に関係なく絶対値が大きい方を Max 値としてプロットしている。分布図上、正負両側に各々ピークが見られるのはそのためである。統計値として分布センターを表す算術平均値と標準偏差値、チルトの大きさを表す絶対値平均値を各図の下に示した。

BER 分布については国内 2 ブランドが比較的低いレベルでばらつきが小さい傾向にあるのに対して台湾 3 ブランドでは分布が広くばらつきが大きい傾向にある。

チルト値についても同様な傾向が認められ、R-Tilt 値の分布は台湾ブランドでばらつきが大きい傾向がみられる。

国内ブランド品に対して台湾ブランド品での品質ばらつきは大きい傾向にあるものの、基本的にはほとんどのブランド (D ブランドを除く) で BER、チルトに関する初期品質は確保されていると判断されるので次ステップの加速劣化試験を実施することとした。

(b) 評価者 4 の場合

5 ブランドの DVD-RAM 初期品質確認において、各サンプル $n=1$ ではばらつきを含めて判断がつかないため、次のステップでの初期値確認を兼ねて各ブランド $n=14$ の評価を行った。

BER については、国内 B ブランド、台湾 C ブランドがばらつきが小さく、台湾 D ブランド、台湾 E ブランドでは BER が悪い (5×10^{-5} 以上) ディスクが出現している。

これら結果から、各ブランドのディスクとも初期品質は確保されていると判断し、加速環境試験を実施することとした。

(3) DVD-RW

初期品質は、各特性において平均値、ばらつきにブランド間の差が大きいことが確認された。参考として DVD 規格を表示したが、市販ドライブでの書き込みであり、この値を超えていた場合直ちに規格からはずれているというわけではない。今回のサンプルは数量が各社 30 枚であり、製造番号から判断して同一ロットであると考えられ、特性の分布としては狭い範囲になると推測できる。しかし、分布が非常に広がったり、PI エラーや R-tilt 初期特性において大きく DVD 規格を超えているサンプルがあり、ディスクの設計品質、管理品質にメーカーの違いが現れている。また、ヒストグラムからでは読みにくいだが、測定半径位置により値の中心値が大きく異なるサンプルもある。これらの初期値から、特に、D 社、E 社のサンプルは初期の書き込み不良が発生す

ることは容易に推測できる。

2.6 加速劣化試験

2.6.1 加速劣化試験方法

昨年度から今年度にかけて実施した加速劣化試験は以下の3種類で、試験時間、評価項目等について若干の差はあるが基本的な試験条件はDVD-R, DVD-RAM, DVD-RWとも通とした。

(1) 温湿度試験

温度が劣化反応を加速する仮定にたつて寿命推定を行うアレニウス法を用いた。昨年度の3水準(85℃, 80℃, 75℃湿度80%R.H.とも通)の温湿度試験にて許容限界値に達しなかったディスクの継続評価と新たな温度水準(65℃80%R.H.)を追加してデータの信頼性向上を図った。なお、75~85℃の3環境については各評価者の所有する恒温槽を用いたが65℃環境では試験占有時間が長くなるため、評価者毎の恒温槽確保が困難であったため、外部(株式会社アルメディオ)の恒温槽を専用機として確保し、全種類のディスクを投入することとした。このため、65℃サンプルについては他の環境にはなかった「輸送条件」要因も考慮する必要が生じた。

(2) 耐光性試験

太陽光同等の光暴露状態で長時間ディスクを放置した時の影響を確認するための試験として実施した。

(3) 耐ガス試験

温泉地同等以上のガス濃度とされる硫化水素ガスを用い、長時間暴露状態とした時の影響等を確認するための試験として実施した。

2.6.2 加速劣化試験結果

(1) 温湿度試験結果

(a) DVD-R

今回は、昨年度から行っている75℃80%RH、80℃80%RH、85℃80%RHの試験に加え、寿命推定の精度を向上させるため65℃80%RHの条件を追加し試験を行った。しかしながら、65℃の試験において、75℃よりも激しい劣化が発生する等、予想よりも劣化が大きかったため詳細調査したところ、この試験で使用していた輸送容器に問題があることが判明した。使用した容器はディスクの外周部に圧力がかかる構造であったため、外周のPIエラーが大きくなってしまい劣化が加速した。圧力がかからない輸送容器でやり直しの試験を行った結果、外周部のPIエラー上昇もなくなった。これらの経緯から今回の寿命推定には65℃80%RHについては再試験での結果を使用する。65℃80%RH再試験については、寿命予測が可能とされるディスクA, B, C, Dについて行った。

1) 評価者1の試験結果

評価者1はパイオニア社製DVD-R/RWドライブDVR-105を用いて4倍速記録し、65℃80%RH、75℃80%RH、80℃80%RH、85℃80%RHで加速劣化試験を行った。この時の、PIエラーの変化の様子を図2-6-2-1(A), (B)に示す。ここでPIエラーは、同一条件で加速劣化試験を行った65℃は5枚、75℃、80℃、85℃は3枚のディスクの3測定位置(内・中・外)の平均値を用いた。

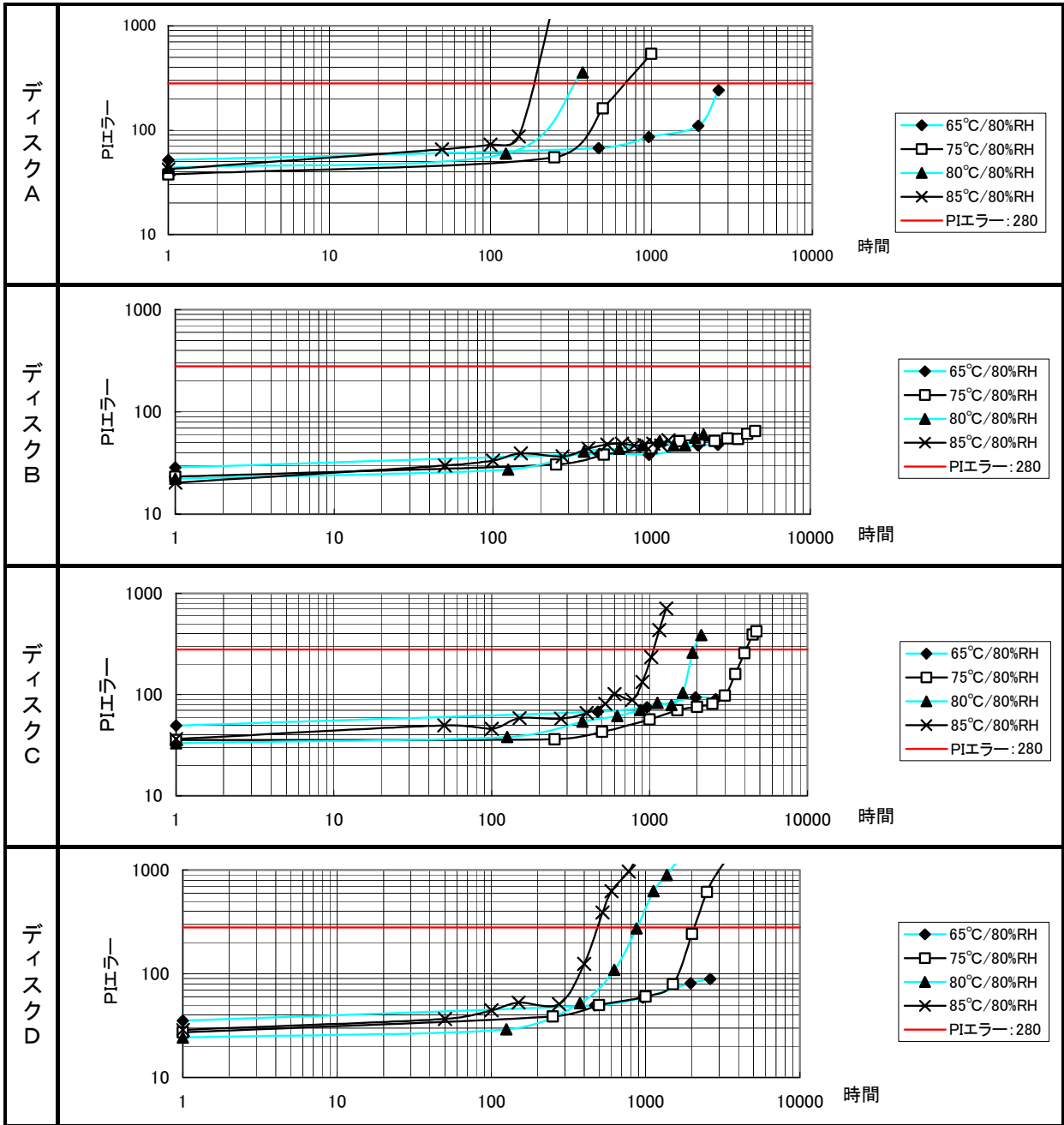


図 2-6-2-1 (A) パイオニア DVR-105 で記録したディスクの温湿度試験結果

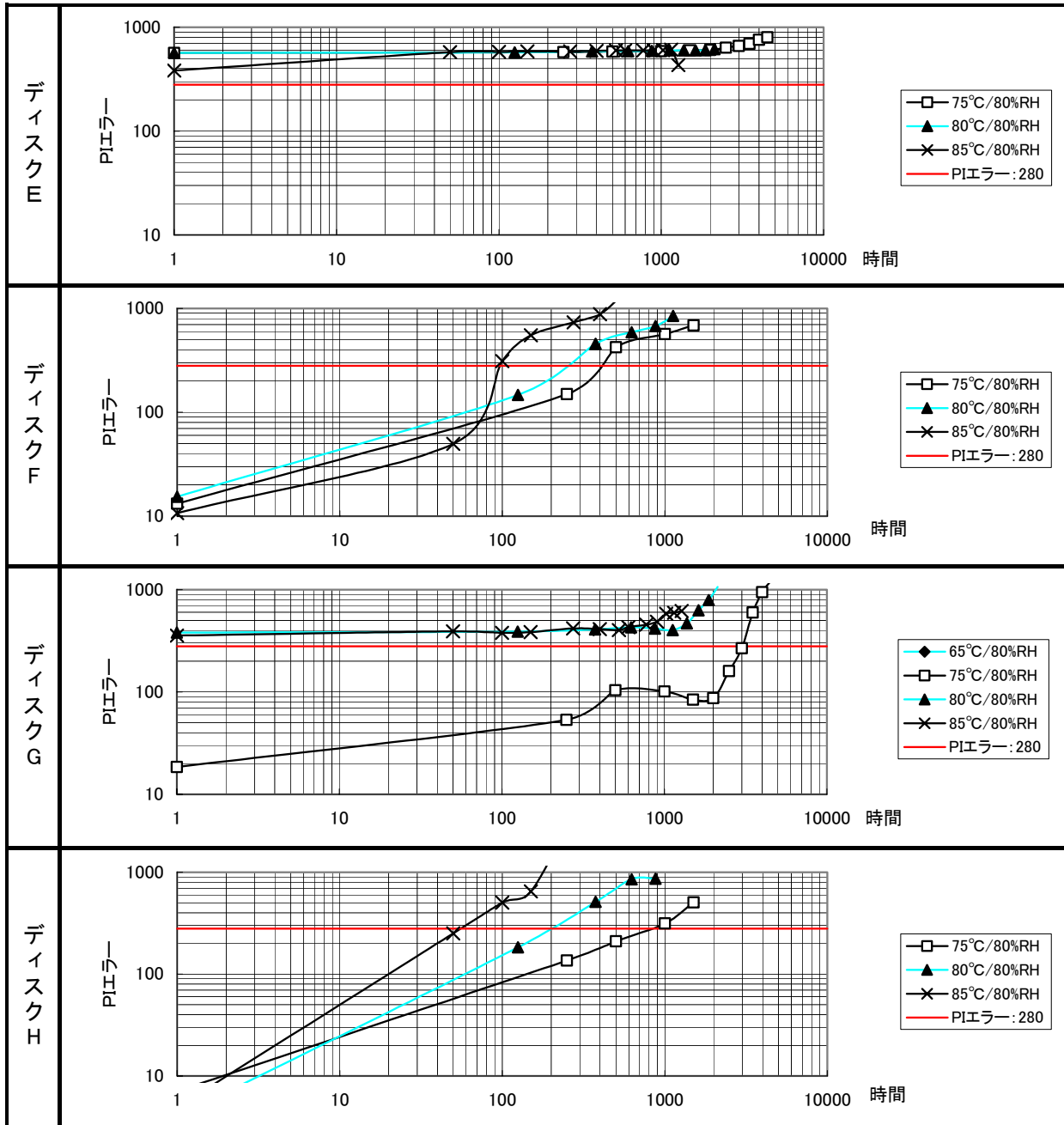


図 2-6-2-1 (B) パイオニア DVR-105 で記録したディスクの温湿度試験結果

2) 評価者 2 の試験結果

評価者 2 はソニー社製 DVD-R/RW ドライブ DRU-500 を用いて 4 倍速記録し、評価者 1 と同様の試験を行った。

(b) DVD-RAM

1) 評価者 3 の試験結果

国内 2 ブランド、台湾 3 ブランドの各ディスク（各サンプル数 $n=3\sim 5$ ）について 4 環境（ $65^{\circ}\text{C}80\%RH$, $80^{\circ}\text{C}80\%RH$, $80^{\circ}\text{C}80\%RH$, $85^{\circ}\text{C}80\%RH$ ）の加速試験を実施し、その中の 80°C , 85°C の結果を図 2-6-2-3 (A), (B) に示す。

- ① 図 2-6-2-3 (A) ~ (B) は各温度保存における BER 変化であるが各環境でも通して BER 値の増加が認められたのは台湾 D ブランド品であった。また国内 2 ブランド (A, B) に比較して台湾 3 ブランド (C, D, E) では初期品質評価結果で述べたような BER 初期値及び変化のばらつき ($n=3\sim 5$ 間) も大きい傾向がみられた。
- ② 昨年度の観察時間内では許容限界値に達しなかった 80°C 以下のディスクについて今年度も観察を継続した結果、新しい故障モードが顕在化してきた。国内 A ブランド品におけるディスク表面白濁（凝集物発生）である（図 2-6-2-2）。 $80^{\circ}\text{C}80\%RH$ (1700Hr 前後), $75^{\circ}\text{C}80\%RH$ (3300Hr 前後) 環境において観察されたこの現象により、ほぼ全数の同ブランド品ディスクはドライブ検知不能となった。他の 4 ブランド品では同一環境（同一保存時間）でも同様な現象は確認されていないため、同ブランド固有の故障モードと考えられる。そのため、同ブランド品の 2 環境（ 75°C , 80°C ）における加速試験寿命については白濁現象の発生する直前の実測値をもちいた関数近似による外挿を行い、推定値を求めることとした。

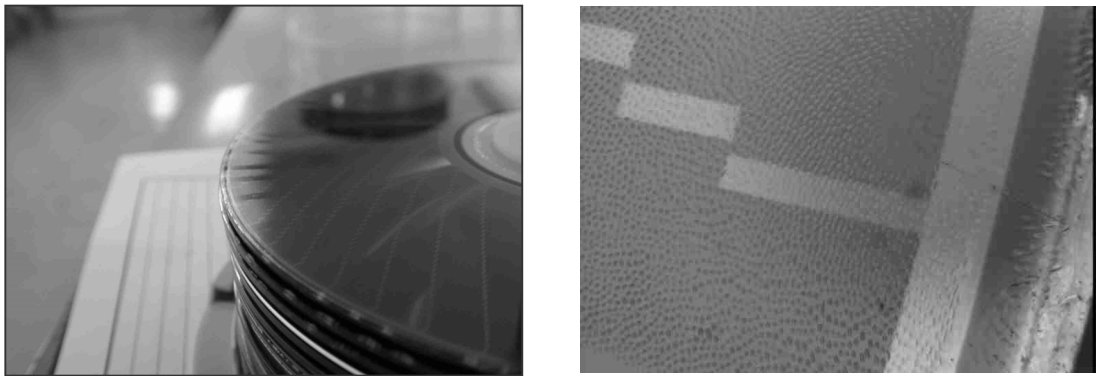


図 2-6-2-2 国内 A ブランドディスク表面白濁

図 2-6-2-3 (D) は今回の 4 環境の内最高温度条件である $85^{\circ}\text{C}80\%RH$ における BER 及びチルト変化をプロットしたものである。次項で述べる耐光性試験、耐ガス試験と同一保存時間である初期、96Hr, 192Hr の比較をしている。

各ブランド $n=3$ 平均値プロットであるが温湿度環境保存の影響が顕著なのは、BER 値では台湾 D ブランド、E ブランド、R-Tilt 値については台湾 C, D ブランドであった。T-Tilt 値については全ブランドにおいて同条件範囲内では顕著な変化はない。

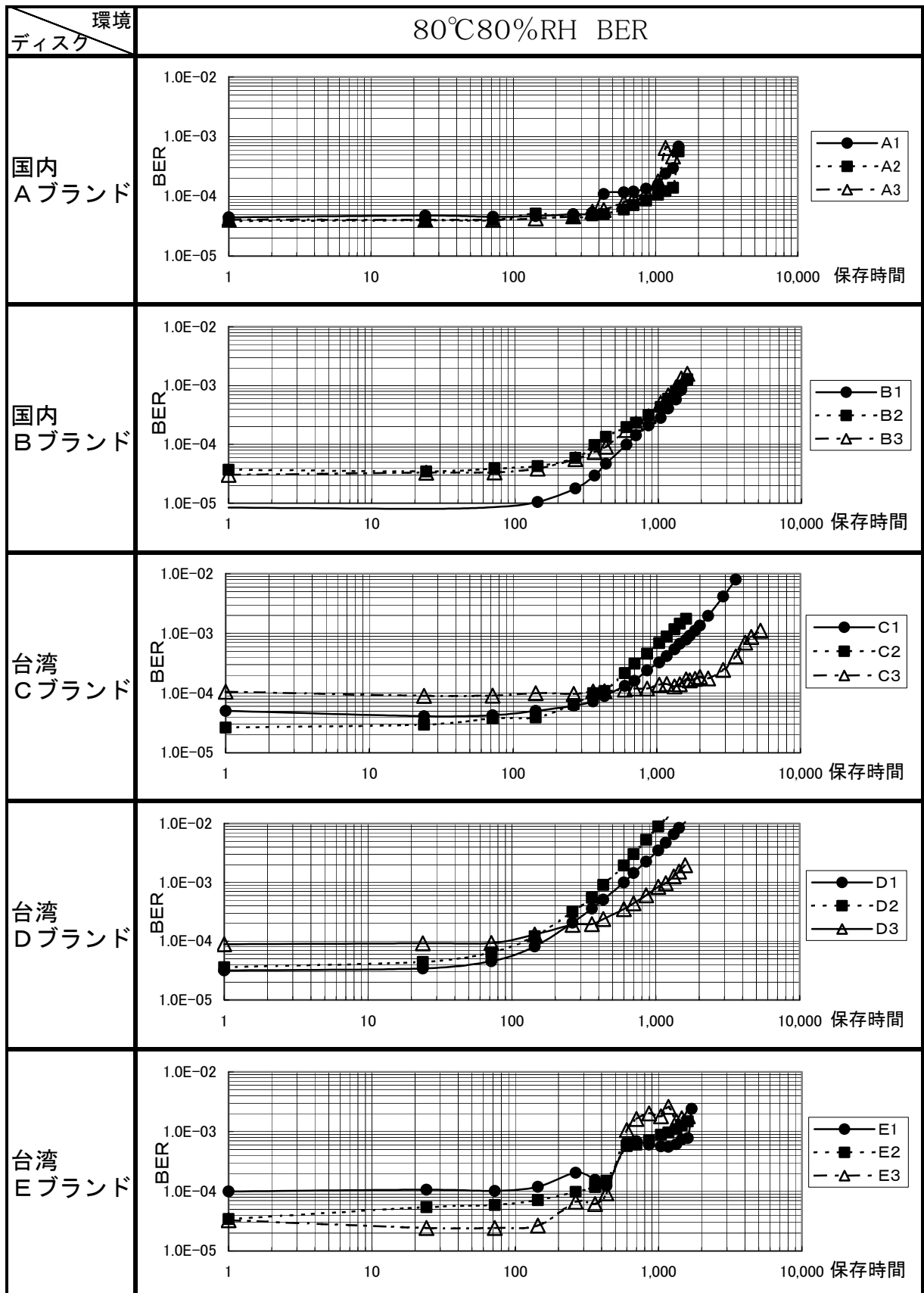


図 2-6-2-3(A) 80°C80%RH における BER 変化

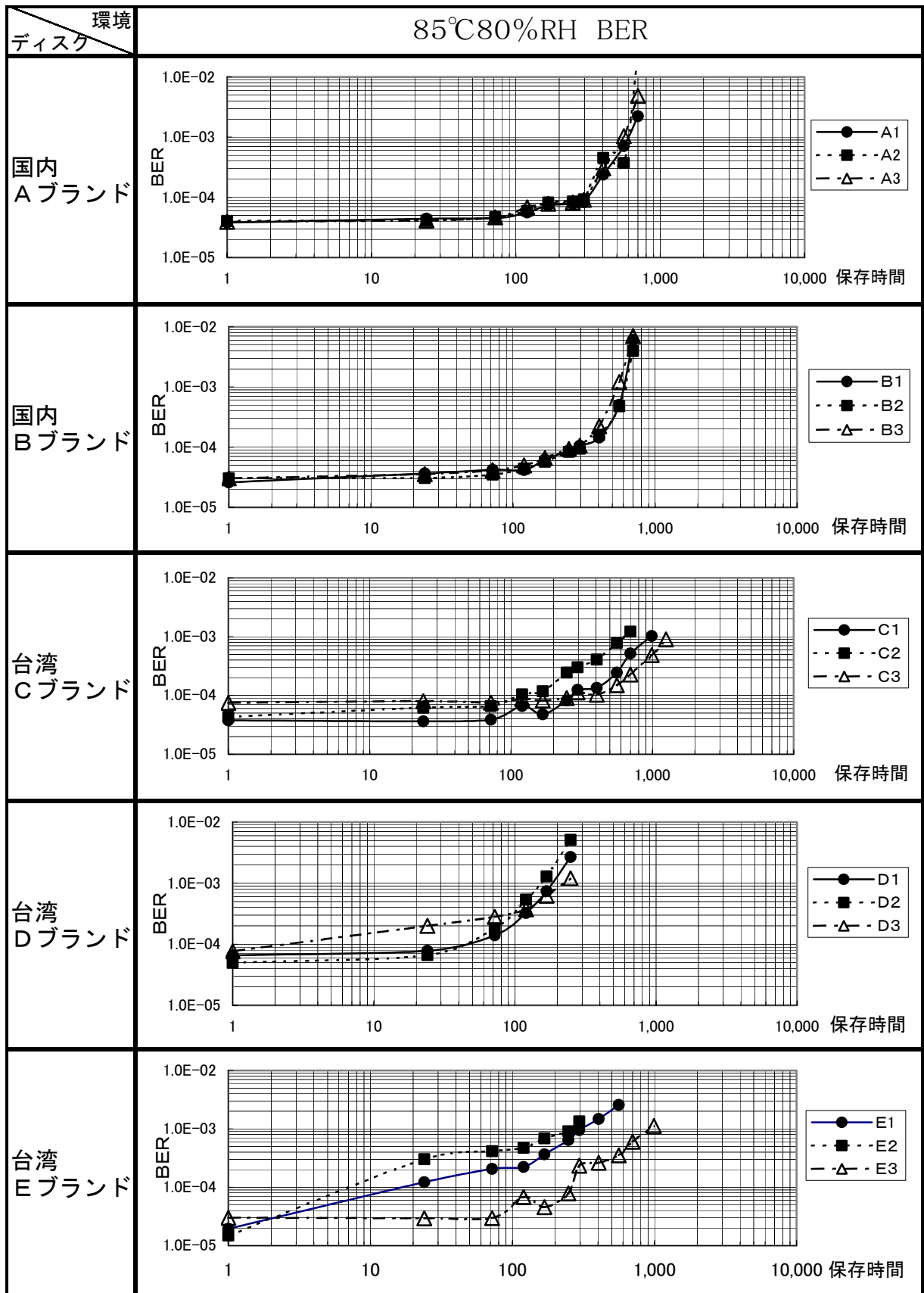


図 2-6-2-3 (B) 85°C80%RH における BER 変化

2) 評価者 4 の試験結果

評価者 3 と同様、5 ブランドのディスクについて、65°C80%RH、75°C80%RH、80°C80%RH、85°C80%RH の 4 つの環境でのバイトエラーレート (BER) の時間変化を測定した。その結果を図 2-6-2-5(A), (B) に示す。BER は 1 枚のディスクの全領域における平均値である。

75°C、80°C、85°C の環境においては、ほぼすべてのディスクの BER が許容限界値である $9E-4$ を超え、各環境での加速劣化寿命を求めることができた。65°C の環境においては、国内 B ブランド、台湾 D ブランド、台湾 E ブランドでは一部のディスクの BER が $9E-4$ を超えたが、国内 A ブランド、台湾 C ブランドにおいてはどのディスクも BER が $9E-4$ 以下であり、今回は、個々のディスクの BER データを外挿して 65°C での加速劣化寿命を推定した。65°C での加速劣化寿命をより正確に求めるには、さらに試験時間をのばして測定を継続する必要がある。

昨年度の試験では、BER が許容限界値に達しなかったディスクのうち、国内 A ブランドのディスクにおいて新しい劣化モードが明らかになった。ディスク表面の白濁である。国内 A ブランドディスクにおいては、75°C 環境に 1736 時間、80°C 環境に 1736 時間投入したディスクの表面に白濁が生じた。図 2-6-2-4 に 80°C 環境に 1736 時間投入した後のディスクの表面状態の顕微鏡写真を示す。白濁の生じたディスクは BER 測定用ドライブで検知不能となって、寿命試験の継続ができなくなった。他のブランドのディスクにおいてはこの現象は生じておらず、ディスク表面の白濁は A ブランド固有の劣化モードであると考えられる。

したがって、A ブランドディスクにおいては、ディスク表面の白濁が生じる直前までの BER 実測値から関数近似によって外挿を行い、加速劣化寿命を推定した。

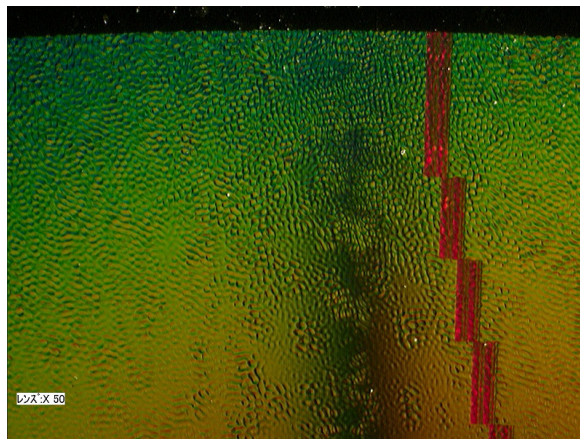


図 2-6-2-4 国内 A ブランドディスクの表面白濁

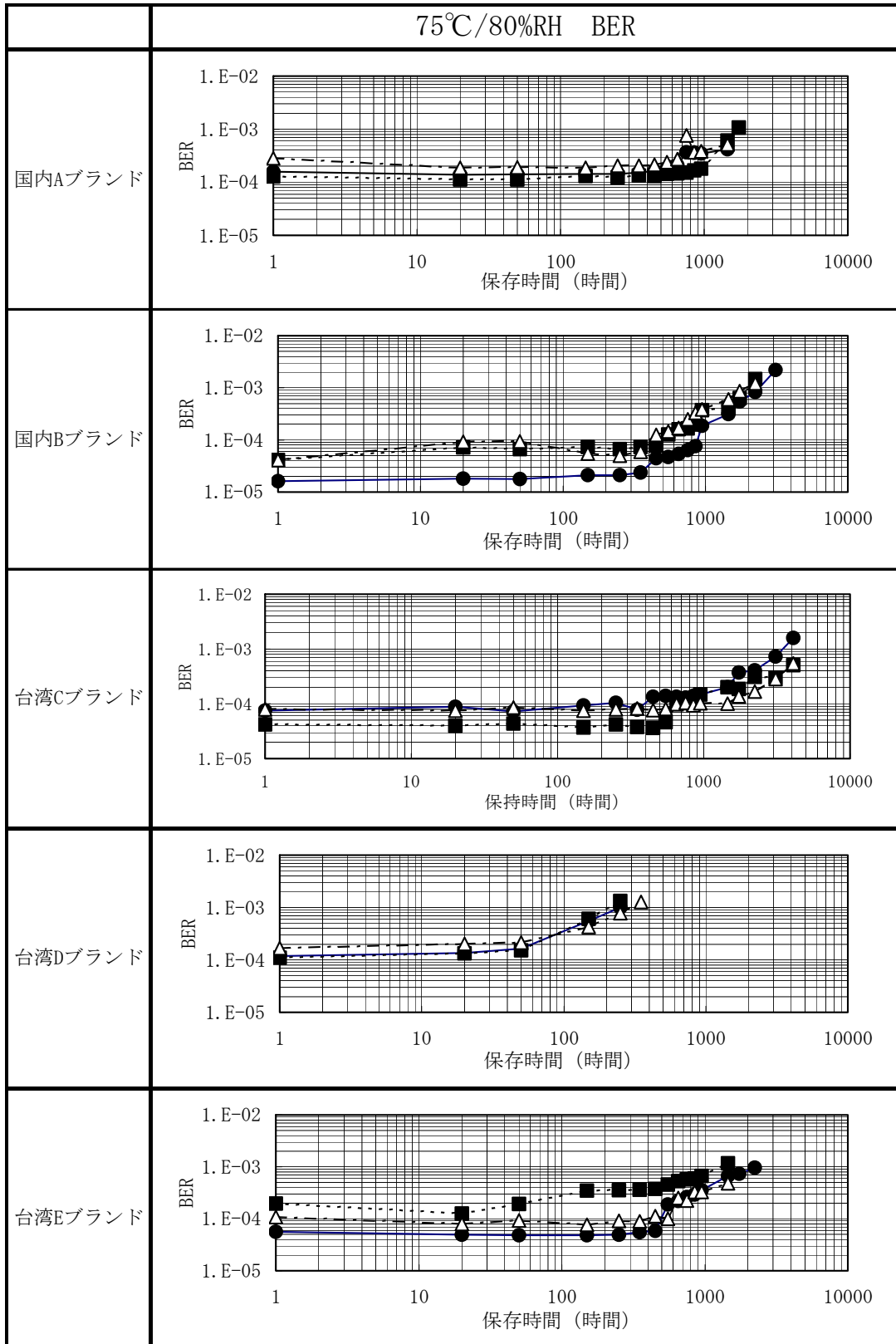


図 2-6-2-5 (A) 75°C/80%RH における BER 変化

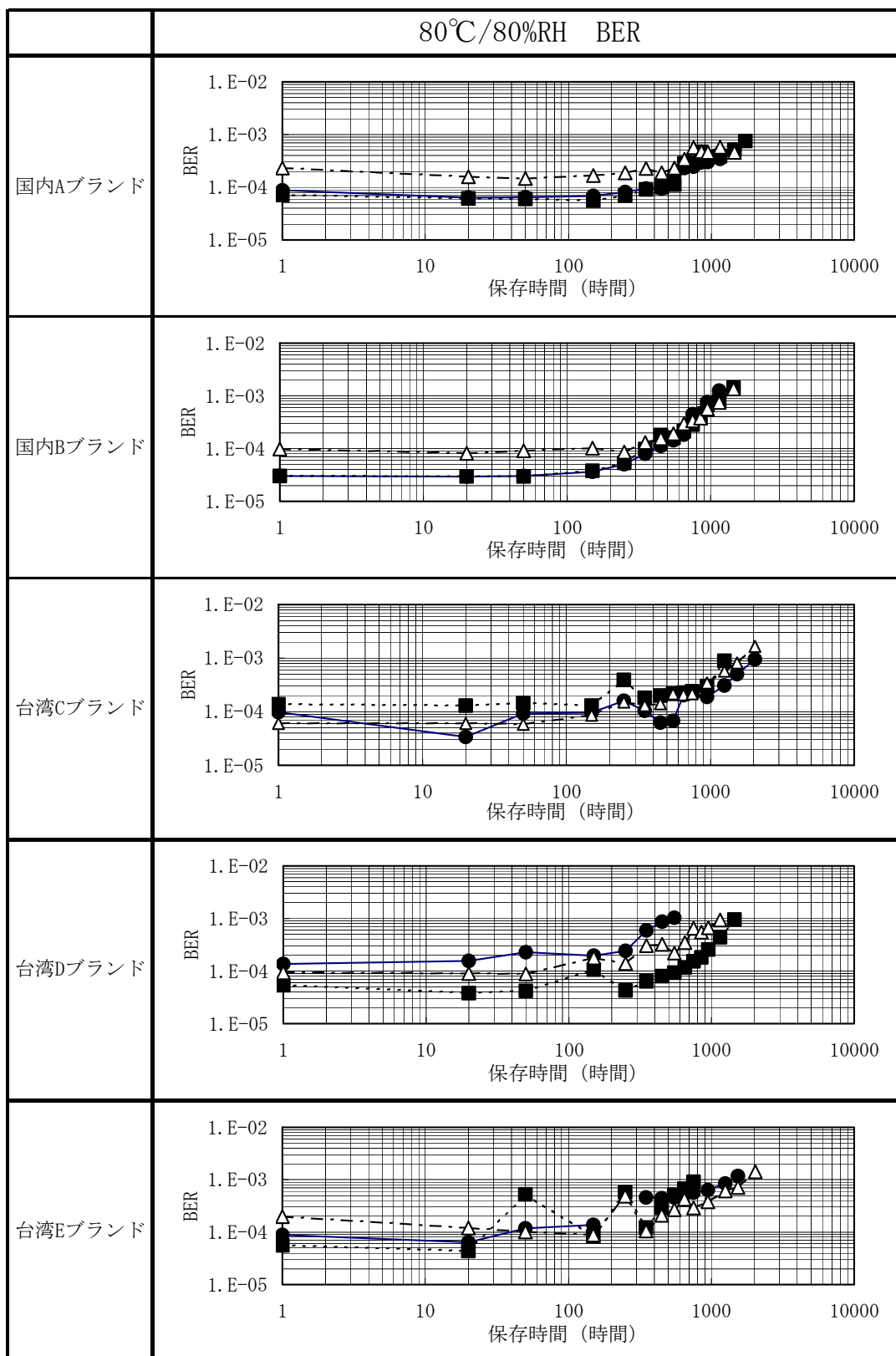


図 2-6-2-5(B) 80°C/80%RH における BER 変化

(c) DVD-RW

評価者 5 は、5 ブランドの各ディスク (各サンプル数 n=5) について 4 環境 (65°C80%Rh、75°C80%Rh、80°C80%Rh、85°C80%Rh) の加速試験を実施した結果を図 2-6-2-6 に示す。

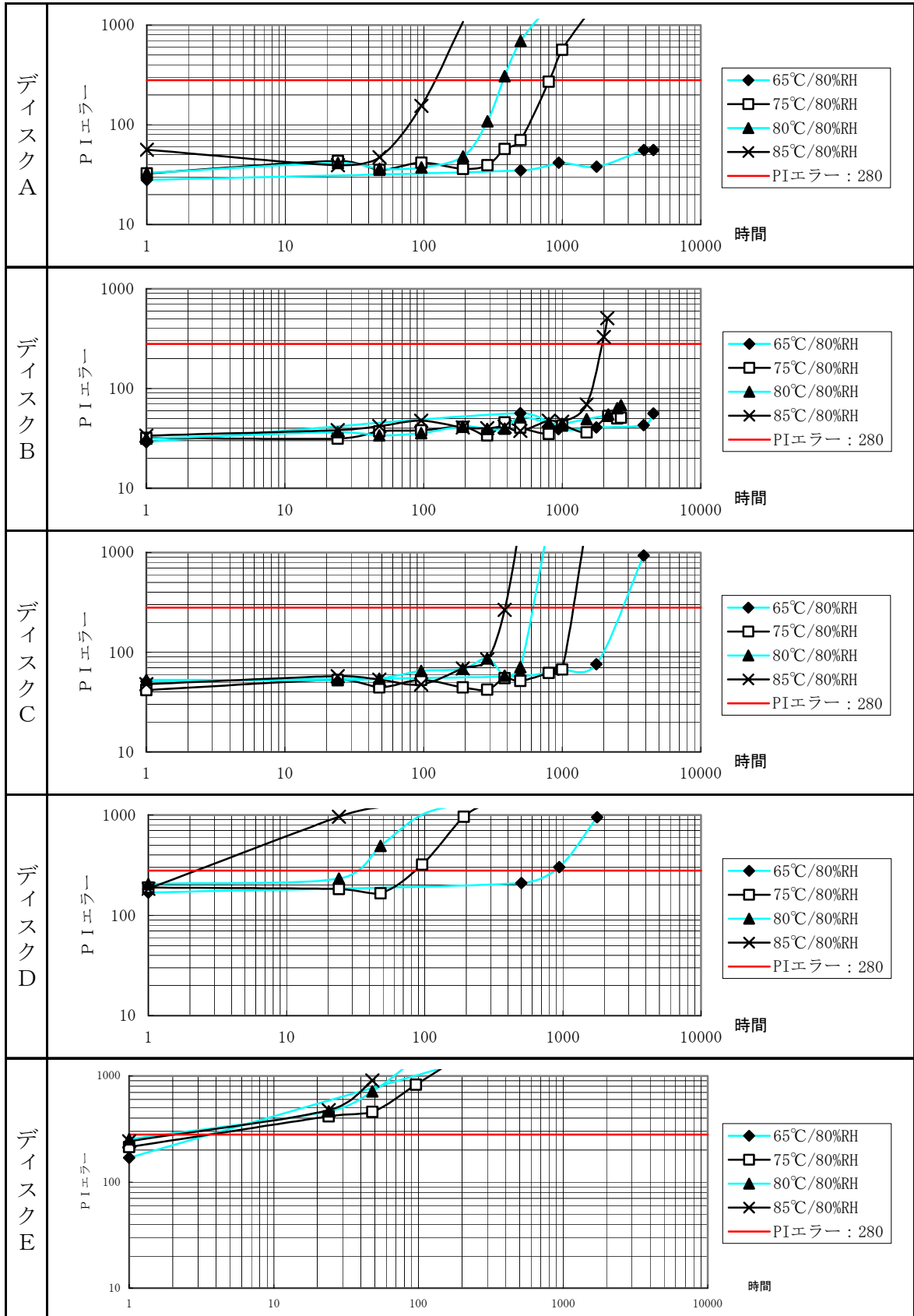


図 2-6-2-6 温湿度試験における PI エラーの変化

2.6.3 考察

(1) DVD-R

(a) 温湿度試験

評価者1が試験した結果では、同じ試験条件でも、ディスクBのように85°C/80%RHでも1000時間以上もほとんどPIエラーの増加が見られないディスクもあれば、ディスクF、Hのように100時間以下で許容限界値（PIエラー：280）を上回ってしまうディスクもあり、かなりブランドにより劣化の様子が異なった。

ディスクBについては劣化がほとんど進んでおらず許容限界値にはまだ達していない。ディスクE、Gについては、初期からPIエラーが許容限界値を超えており、アレニウス法で寿命を推定することはできなかった。

PIエラーと加速時間との関係を見ると、ディスクF、HではPIエラーは加速時間のLog関数的に増加したのに対し、ディスクA、C、Dでは指数関数的に増加した。この違いは、PIエラーの増加要因が違うことに由来するものと考えられる。

評価者2が試験した結果ではディスクA、B、C、Dは初期のPIエラーは低く、ディスクA、Dについては比較的明瞭な温度依存性が確認できた。ディスクCについては75°C80%RHと80°C80%RHで同程度の結果となっているが、温度条件が5°C間隔だったため、試験槽の環境条件のばらつき等でこのような状態になったと考えられる。ディスクBについては85°C80%RHでのみ2020Hr経過後わずかにPIエラーが上がりはじめたが、寿命である許容限界値にはまだ達していない。ディスクE、G、Hについては初期からPIエラー値が高く、E、F、G、Hについてはアレニウス法で寿命を推定するための加速試験寿命値を得ることができなかった。

また、2.6.2(1)(a)で述べたように、ディスクの外周部に圧力がかかる構造の容器を輸送や保管に使用すると、外周のPIエラーの劣化を加速することが判明した。このことから信頼性試験を行う際は輸送形態や保管する際に用いるケースについても十分に留意する必要がある。

(b) 耐光性試験

ディスクHは48時間後以降は測定できない程、激しく劣化した。ディスクH以外のディスクでも、PIエラーの増加が観察されたが、72時間までは規格上限値280を上回っておらず、72時間以上の寿命が確認されている。

48時間後以降は測定できなかったディスクHは、耐光性試験後、記録層が褪色していることから、記録層が激しく劣化しているものと推測される。

今回、試験に用いた耐光試験機は26600lxであり、これに投入時間を掛けると積算照度が算出される。72時間での積算照度は

$$26600lx \times 72 \text{ 時間} = 1915200lx \cdot \text{時間}$$

となる。これは照度500lxの蛍光灯の下に置いた場合は

$$1915200lx \cdot \text{時間} / 500lx / 24 \text{ 時間} \approx 160 \text{ 日}$$

程度に対応することとなる。

耐光性の指標としてはEuropean Wool Reference #5 (ISO-105-B02 参照)があり、これ以上の耐光性があれば通常の衣類並みの耐光性があり実用上、問題ないとされている。今回、試験に用いた耐光性試験機の場合、European Wool Reference #5が変色する時間は44時間程度であり、ディスクH以外のディスクでは72時間以上の耐光性が確認されており、実用上、問題ないと言える。

(c) 耐ガス試験

暴露48時間までは、どのディスクもPIエラーの増加は観察されなかった。ディスクHのみ、72時間でPIエラーの上昇が見られた。

今回、試験した硫化水素濃度は200ppmであり、温泉地(<1ppm)の数百倍に相当する。一水

準の試験であったため明確な加速係数を求めるに至っていないが、50°C90%RH の環境とあわせて、暴露 48 時間の耐久性は、想定される通常的环境下で問題ないことを示した結果と思われる。

(2) DVD-RAM

(a) 温湿度試験

一般的な傾向として、国内ブランド品に比べて台湾ブランド品の試験結果はばらつきが大きい傾向が見られた。例えば、評価者 3 が行った試験において、80°C80%RH での台湾 C ブランド品、D ブランド品や、85°C80%RH での台湾 E ブランド品においては、測定を行った 3 枚のディスクの BER 変化の仕方にばらつきが観察される (図 2-6-2-3(A), (B))。また、評価者 4 が行った試験において、台湾 D ブランド品では 75°C80%RH での加速劣化寿命よりも 80°C80%RH での加速劣化寿命のほうが長い、すなわちより高い温度での加速劣化寿命が長いという、反応速度論に従わない現象が見られている (図 2-6-2-5(A), (B))。これは、75°C80%RH の試験に用いたディスクと 80°C80%RH の試験に用いたディスクとの品質ばらつきによる可能性がある。したがって、品質ばらつきが大きい製品の真の実力把握を行うためには、そのばらつきを考慮した試験方法が必要となる。

2.6.2(1)(b)で述べたように、昨年度の試験では現れなかった新たな劣化モードが、国内 A ブランドディスクにおいて観察された。ディスク表面の白濁である (図 2-6-2-4)。この現象は他の 4 ブランドのディスクでは観察されなかったことから、A ブランドディスクに固有の劣化モードであると考えられる。この白濁を評価者 4 が調べたところ、ディスク表面に形成されたハードコート層材料が凝集したものであることがわかった。この凝集による白濁によってディスクがドライブで検知不能となったと思われる。ドライブが検知不能になる直前の BER 実測値を見ると (図 2-6-2-5(A), (B))、BER が上昇している傾向が見られるが、この BER 劣化は、記録膜の劣化 (非晶質マークの結晶化など) と、ハードコート凝集による白濁との複合要因によって生じている可能性がある。正確な寿命予測を行うためには、これらの複合要因を切り分けることが重要である。また、複合要因のうちの一つと考えられるハードコートの凝集を取り除くことによって、より長寿命の媒体を開発できる可能性がある。長寿命ディスクの開発については第 4 章で詳細に述べる。

(b) 耐光性試験

耐光性試験においては、一部のディスクで BER の増大が見られたほかはほとんどのディスクで顕著な BER の増大は見られなかった。BER 増大がみられた一部のディスクにおいては R-Tilt 変化が見られており、これが原因である可能性があるが確認が必要であるが、今回試験を行ったディスクは、長時間の光暴露に対して実用的に十分な品質を持っていると考えられる。

(c) 耐ガス性試験

耐ガス性試験においては、どのディスクも顕著な BER の増大は見られなかった。今回試験を行ったディスクは、硫化水素ガス暴露に対して実用的に十分な品質を持っていると考えられる。

(3) DVD-RW

(a) 温湿度試験

各環境における特性の変化は、基本的に温度との関連がある結果となった。ただし、各ブランドの耐環境時間には大きな差があり、後で述べる予測される寿命も差のあるものになった。結果の中で、PI エラーや反りに注目すると、短い時間で許容限界値を超える D、E ブランドは、初期特性の値も規格から外れていたり、ばらつきも大きい傾向があるといえる。

結果のグラフは各測定条件の平均でプロットを行ったが、短い時間で寿命を迎えた D、E ブランドは n=5 の中でばらつきも大きく、平均値がその測定条件の傾向をすべて示すことはでき

ない。

温湿度加速試験での劣化の状況はブランドにより異なることが判った。

Aブランドは特性劣化後の外観にてほとんど変化が見られず、また変化も比較的穏やかなことから、PI エラーの増加に関しては記録膜のマーク、特に3Tマークが変質により劣化した(図2-6-3-1 参照)と推測する。R14Hの低下が大きく反射膜の変質もあるが、I14/I14Hの上昇が見られ、記録膜も何らかの変質があるようである。

Bブランドは劣化したサンプルが少ないが特性劣化が急激であることから反射膜の腐食であると考える。

CブランドはSEM-EDS 観察の結果、反射膜の銀イオンの変移、変形が見られ、劣化時には肉眼でしみ(図2-6-3-2 参照)のようにはっきり見える変化が現れる。反射膜の材質的傾向であると推測する。

Dブランドも反射膜の劣化が確認されたが、SEM-EDS 観察で反射膜内の銀の硫化が発生していると考える。

Eブランドは反射膜の銀が酸化している。(図2-6-3-3 参照) これは水分の遮蔽効果が不足していることによって発生していると推測できる。

相変化記録を利用したDVD-RWは、記録後の放置時間による反射率の低下や、マークの変化のほかに記録膜、反射膜の腐食などがあり、これらがブランド毎の劣化時間の差を作っていると推測できる。

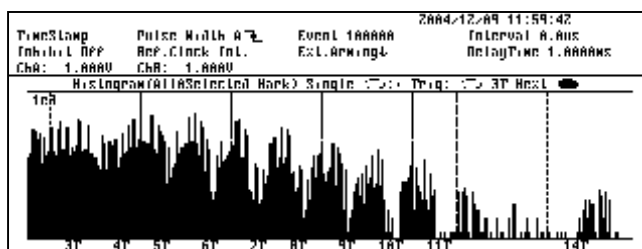


図 2-6-3-1 Aブランドの試験後のマーク長分布

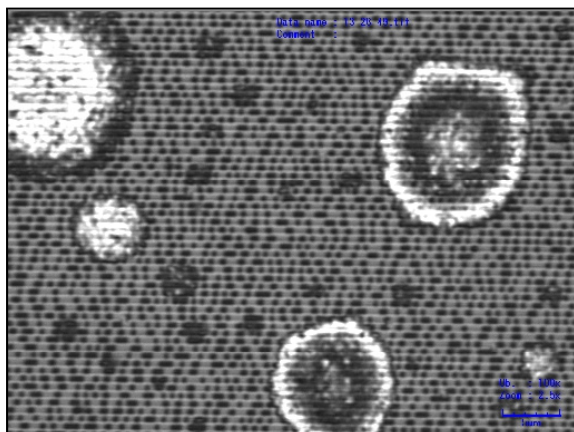


図 2-6-3-2 Cブランドの試験後のしみ

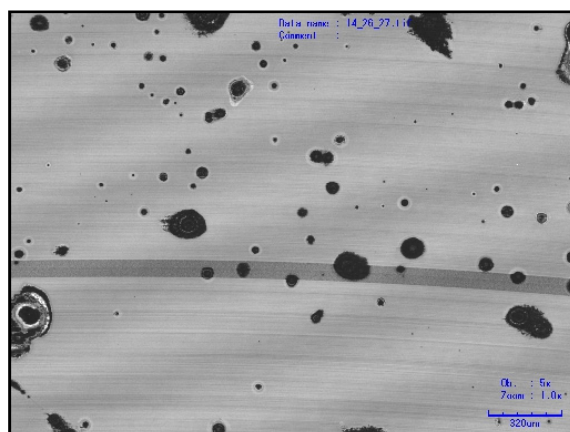


図 2-6-3-3 Eブランドの試験後の腐食

(b) 耐光性試験

キセノンランプによる耐光性試験はEブランドのみPIエラーの上昇が見られたが、他のブランドにおいてPIエラーはほとんど変化がなかった。ただし、R14H、I14/I14Hに対しては、温湿度試験以上に、光によるエネルギーが記録されたマークに影響を与えたようで、変化が見られた。また、ランプの紫外線がディスクに塗布されている接着剤、ハードコート剤、印刷インクなどのUV硬化樹脂に作用し、反りの変化も見られた。ただ、長期保存においてディスクを日光が当たるようなところに置くわけではないので、暗所あるいはケースなどに入れて保存すればPIエラーにまで影響を与えることはないであろう。

(c) 耐ガス試験

硫化水素ガスによる試験においても E ブランドのみ PI エラーの上昇が見られたが、他のブランドではすべての特性でほとんど変化を起こさなかった。E ブランドにおいては、硫化水素ガスがポリカーボネート性のディスクを透過したとは考えにくく、耐ガス試験の試験環境が 50°C90%Rh であるため、温湿度試験から推測しても硫化水素ガスではなく、温度湿度が影響を与えたと考察する。よって、耐ガスは今回の試験範囲においては、寿命推定に大きな影響を与えないと判断する。

2.7 加速劣化試験結果のまとめと寿命推定

(1) DVD-R

(a) 評価者1の場合

2.6.2 で得られた各加速劣化試験寿命を図 2-7-1 に示す。この結果をもとにアレニウス法により寿命推定を行った。この際、PI エラーが許容限界値の 280 を超えた時点加速劣化試験寿命とした。

ディスク B は 65°C80%RH : 2616 時間、75°C80%RH : 1500 時間、80°C80%RH : 2125 時間、85°C80%RH : 1275 時間までの温湿度試験では PI エラーが 70 以下で PI エラーの許容限界値よりもかなり小さく、寿命推定できる程には劣化が進んでいない。このため現時点では寿命推定はできないと判断した。

：外挿値

DISC	DISC A				DISC B				DISC C				DISC D			
	65°C	75°C	80°C	85°C	65°C	75°C	80°C	85°C	65°C	75°C	80°C	85°C	65°C	75°C	80°C	85°C
1	3353	659	321	183	4500 時間まで劣化が進んでおらず寿命推定不可能	4500 時間が十分進んでおらず寿命推定不可能	4500 時間が十分進んでおらず寿命推定不可能	4500 時間が十分進んでおらず寿命推定不可能	7153	4273	3995	1195	4940	1958	906	474
2	3124	724	321	227	4500 時間が十分進んでおらず寿命推定不可能	4500 時間が十分進んでおらず寿命推定不可能	4500 時間が十分進んでおらず寿命推定不可能	4500 時間が十分進んでおらず寿命推定不可能	7496	6093	1719	1176	6549	1977	879	463
3	3061	674	327	241	4500 時間が十分進んでおらず寿命推定不可能	4500 時間が十分進んでおらず寿命推定不可能	4500 時間が十分進んでおらず寿命推定不可能	4500 時間が十分進んでおらず寿命推定不可能	6649	3625	3719	940	5864	2322	858	549
4	3017	—	—	—	4500 時間が十分進んでおらず寿命推定不可能	—	—	—	7860	—	—	—	5691	—	—	—
5	3117	—	—	—	4500 時間が十分進んでおらず寿命推定不可能	—	—	—	7382	—	—	—	5470	—	—	—
平均	3134	686	323	217	—	—	—	—	7348	4664	3144	1104	5703	2085	881	495

DISC	DISC E				DISC F				DISC G				DISC H			
	65°C	75°C	80°C	85°C	65°C	75°C	80°C	85°C	65°C	75°C	80°C	85°C	65°C	75°C	80°C	85°C
1		ディスク枚数不足のため試験できず	ディスク枚数不足のため試験できず	ディスク枚数不足のため試験できず		258	246	103		3087	初期特性不良で寿命推定不可能	899		453	71	37
2	ディスク枚数不足のため試験できず				ディスク枚数不足のため試験できず	435	215	96	ディスク枚数不足のため試験できず	3013	初期特性不良で寿命推定不可能		ディスク枚数不足のため試験できず	943	450	111
3	ディスク枚数不足のため試験できず				ディスク枚数不足のため試験できず	471	243	94	ディスク枚数不足のため試験できず	2896	初期特性不良で寿命推定不可能		ディスク枚数不足のため試験できず	1394	258	48
4		—	—	—	ディスク枚数不足のため試験できず	—	—	—	ディスク枚数不足のため試験できず	—	—	—	ディスク枚数不足のため試験できず	—	—	—
5		—	—	—	ディスク枚数不足のため試験できず	—	—	—	ディスク枚数不足のため試験できず	—	—	—	ディスク枚数不足のため試験できず	—	—	—
平均	—	—	—	—	—	388	235	98	—	2999	—	—	—	930	260	66

図 2-7-1 各ディスクの加速劣化試験寿命 (PI エラー基準値 280 に達するのに要した時間)

図 2-7-2 で求めた推定寿命は、一部、PI エラーが基準値に達していない場合に外挿値を用いており、今後も試験を継続し実測値を基に寿命を推定していく必要がある。

評価者 1 による試験において、パイオニア製 DVD-R/RW ドライブ DVR-105 で記録した場合、ディスク A、F は、初期から低 Asymmetry で記録されていた。今回試験した全てのディスクで、温湿度試験において Asymmetry が一旦低下して、その後はあまり変化しなかった。ディスク A、F

は、初期から低Asymmetryで記録されていたため、温湿度試験によるAsymmetry低下により、正常に再生可能と考えられるAsymmetryの規格値-5%~15%を大幅に下回った。

Asymmetry が規格値-5%~15%から外れた場合に正常に再生できるかどうかは、再生装置の性能にも左右されるため、加速試験後も規格値の範囲に入るように初期の記録を行うことが重要である。なお、Asymmetry が寿命に及ぼす影響については実験した結果を、4.1に記載している。

Disc	75、80、85°Cのデータを用いて求めた推定寿命		65、75、80、85°Cのデータを用いて求めた推定寿命		備考
	25°C80%RH	30°C80%RH	25°C80%RH	30°C80%RH	
A	76年	34年	246年	98年	65°C外挿
B	-	-	-	-	劣化が進んでおらず 継続評価必要
C	-	-	-	-	65°C外挿、75、80°C一部外挿 この影響のためメーカばらつき大
D	1289年	478年	270年	118年	65°C外挿
E	-	-	-	-	初期特性不良
F	-	-	-	-	ディスクばらつき大
G	-	-	-	-	初期特性不良 ディスクばらつき大
H	-	-	-	-	ディスクばらつき大

図 2-7-2 寿命推定結果

(b) 評価者2の場合

2.6.2(1)で温湿度試験を行ったディスクについて、65°C80%RH、75°C80%RH、80°C80%RH、85°C80%RHにおける加速劣化試験寿命を求めた(図 2-7-3)。PI エラー値は、同一条件で加速劣化試験を行った3枚のディスクの3測定位置(内・中・外)の平均値を用いた。

Disc	Disc A				Disc B				Disc C				Disc D								
	65°C	75°C	80°C	85°C	65°C	75°C	80°C	85°C	65°C	75°C	80°C	85°C	65°C	75°C	80°C	85°C					
1	—	1197	324	213	劣化が進んでおらず2408Hrで寿命推定不可能	劣化が進んでおらず2050Hrで寿命推定不可能	—	—	—	—	2320	1812	920	—	1840	1210	630				
2	—	627	327	211					—	—	1745	1680	930	—	1740	1085	650				
3	—	657	345	221					—	—	1820	1805	950	—	1670	1020	650				
4	—	—	—	—					—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	—	—	—	—					—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
平均値	—	827	332	215	—	—	—	—	—	1962	1766	933	—	1750	1105	643					
予測値	3050	—	—	—	—	—	—	3200	6740	—	—	—	3490	—	—	—					

予測値：関数近似による外挿で求めた、加速劣化試験寿命の推定値

Disc	Disc E				Disc F				Disc G				Disc H						
	65°C	75°C	80°C	85°C	65°C	75°C	80°C	85°C	65°C	75°C	80°C	85°C	65°C	75°C	80°C	85°C			
1	ディスク枚数不足のため試験できず	1685	1135	840	ディスク枚数不足のため試験できず	55	80	55	ディスク枚数不足のため試験できず	10	初期特性不良で寿命推定不可能	8	ディスク枚数不足のため試験できず	71	96	初期不良			
2		15	初期不良	500		60	66	48		10	3	118		54	17				
3		455	1250	780		7	52	13		7	8	88		38	13				
4		—	—	—		—	—	—		—	—	—		—	—	—	—	—	—
5		—	—	—		—	—	—		—	—	—		—	—	—	—	—	—
平均値	—	718	1193	707	—	41	66	39	—	9	—	6	—	92	63	15			
予測値	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			

図 2-7-3 各ディスクの各加速条件でPI エラー許容限界値 280 に達するのに要した時間

評価社 1 と同様に、65°C80%RH の条件の有効性を検証するため、75°C80%RH、80°C80%RH、85°C

80%RH の 3 加速条件からと、65°C80%RH、75°C80%RH、80°C80%RH、85°C80%RH の 4 加速条件からの加速試験寿命を基に、2 種類のアレニウス・プロットを作成した。

これらから求めた保存環境 25°C80%RH と 30°C80%RH での推定寿命は図 2-7-4 のようになった。ここで、ディスク A、C、D の 3 加速条件からの推定寿命と、4 加速条件からの推定寿命を比較すると、評価社 1 と同様に推定値に大きな差がある。今回得られたアレニウス・プロットの勾配は、メーカー毎に大きく異なっており、その結果、得られた加速試験寿命と実環境での推定寿命が必ずしも比例関係にないことは注目すべきである。勾配が急峻なディスクは、劣化メカニズムに複数要因を含んでいる可能性が考えられ、精度高い寿命推定を行うためには、長期間を要するが 65°C よりもさらに低温側での加速試験寿命を加える必要があり、一考を要する。加えて、高温での加速試験寿命が短い場合の試験誤差、低温での加速試験寿命の推定精度、ディスクの個体差などを排除することが今後の課題である。

ディスク	75, 80, 85°C のデータを用いて求めた推定寿命		65, 75, 80, 85°C のデータを用いて求めた推定寿命		備 考
	25°C80%RH	30°C80%RH	25°C80%RH	30°C80%RH	
A	2 9 0	1 1 4	2 4 0	1 0 0	65°C外挿
B	—	—	—	—	劣化が進んでおらず継続評価必要
C	2 1	1 3	7 0	3 6	65°C外挿
D	8 6	4 2	2 3	1 3	65°C外挿
E	—	—	—	—	アレニウス法適用不可
F	—	—	—	—	アレニウス法適用不可
G	—	—	—	—	初期特性不良
H	—	—	—	—	初期特性不良

図 2-7-4 寿命推定結果

(c) まとめ

今回の試験結果から台湾ブランド 4 社は、初期段階から十分な特性が得られないものや、加速劣化試験において著しい変化を示すものであった。各水準での寿命を求めるにあたり、初期より基準値を超えているものは除外せざるをえず、基準値を超えていなくても初期値が基準値近傍のものは、固体差など変動要因を多く含むことになり、寿命推定に値する品質水準ではないと考えられる。一方国内ブランド 4 社は、ブランド間で若干の差があるものの、総じて基準内品質からの緩やかな変化を示した。

これら変化を活性化エネルギーで説明できると考えて、アレニウス法による常温での寿命推定を行った。昨年度は試験水準が 5°C 間隔であったため、試験誤差の影響を大きく受けてしまったと考えられ、今年度は精度を上げるために昨年度の試験条件よりも低い 65°C のプロットを加えた。なおディスク B と、65°C 試験における国内ブランド品については、試験条件において加速劣化寿命に達していないため、PI エラーの変化を関数近似して外挿により寿命を推定した。

これら試験結果からアレニウス法による常温での寿命を推定したところ、国内ブランド品については、数十年～100 年程度の寿命であるとの結果を得た。信頼度高い寿命予測には、今回の 65°C のような比較的低温での環境を加えて試験を行うことが有効であるが、劣化メカニズムが解明されているディスクであれば、簡易的な合否判定として高温環境試験のみでも可能と思われる。

(2) DVD-RAM

(a) 評価者 3 の場合

本年度は以下の 2 点を実施することにより、寿命推定の精度向上を図った。

- ① 昨年度内の評価期間内において BER 値が許容限界値(9E-04)に達しなかったディスクの

追跡評価を実施し、各環境でのディスク実測値を把握する。

② 昨年度試験環境より低温域にあたる 65°C80%RH での保存試験を追加する。

その結果、追加した 65°C80%RH 以外のほとんどの試験において各ブランド、各ディスクの許容限界値到達時間を把握することができた。

この許容限界値到達時間の一覧表を図 2-7-5 に示す。

65°C80%RH については台湾 D ブランド品以外は許容限界値に到達していないため、保存・評価を継続中であり、報告書作成時点での実測データから到達時間を関数近似による外挿で求めた。

同じく国内 A ブランド 80°C80%RH, 75°C80%RH の一部ディスクについても保存・評価途中時点にてディスク表面の白濁発生により、ドライブ認識不能となったため、やむなくそれまでの実測データから到達時間を関数近似による外挿にて推定した。

上記実測・推定時間を使用してアレニウス・プロットした結果一覧表を図 2-7-6 に示す。

*但し網掛け数値は近似式推定値

		BER=9E-04 到達時間実測値 (Hr)				
		国内 A	国内 B	台湾 C	台湾 D	台湾 E
85°C	ディスク 1	596	576	971	188	336
	ディスク 2	507	604	564	150	221
	ディスク 3	515	521	1354	224	850
	平均値	539	567	963	187	469
80°C	ディスク 1	1946	1395	1806	732	1569
	ディスク 2	2616	1353	1259	543	1128
	ディスク 3	1700	1308	4840	1098	1063
	平均値	2087	1352	2635	791	1253
75°C	ディスク 1	4859	3892	3212	300	4859
	ディスク 2	4252	3212	2890	543	3779
	ディスク 3	3460	3613	3760	732	5015
	平均値	4190	3572	3287	525	4551
65°C	ディスク 1	10380	5438	8068	2890	5190
	ディスク 2	13543	6345	7613	1354	7613
	ディスク 3	10380	5668	7225	737	8067
	ディスク 4	31140	5668	7225	3009	6228
	ディスク 5	8502	5904	7783	3892	14450
	平均値	14789	5805	7583	2376	8310

図 2-7-5 許容限界値 (BER=9E-04) 到達時間実測値

	30°C80%RH 保存での寿命推定時間		備 考
	H16 年度推定	H15 年度報告書	
国内 A ブランド	1367 年程度	245 年程度	
国内 B ブランド	95 年程度	129 年程度	
台湾 C ブランド	49 年程度	96 年程度	
台湾 D ブランド	27 年程度	20 年程度	
台湾 E ブランド	464 年程度	54 年程度	

図 2-7-6 DVD-RAM 各ブランド品アレニウス・プロット寿命推定結果

上記結果のように国内ブランド品で保存条件を 30°C80%RH と仮定した時、約 95~1367 年、台湾ブランド品にて約 27~464 年という推定結果が得られた。

但し、この推定結果に関しては昨年度(H15)報告内容とやや異なった傾向になっている。
国内B,台湾C,Dではほぼ類似の結果が得られたものの、ディスク表面に白濁が発生した
国内Aブランド品、亀裂が発生した台湾Eブランド品等は寿命データ分布、推定結果の差が比較的大きい。

また評価者3,4間での差異も昨年度同様みられた。但し、全体的傾向としては国内A,Bブランド品に対する評価は比較的安定して類似傾向の結果になっている。

この差異については原因の一つとして国内ブランド品の初期品質、加速試験品質に比べて台湾ブランド品の品質のばらつきが大きいことの影響が考えられる。

より精度の高い寿命推定を行う上ではその品質ばらつきに見合ったサンプリング試験法、及びサンプル数量が必要と思われる

(b) 評価者4の場合

2.6.2の温湿度試験結果からアレニウス法による寿命推定を行った。

本年度の試験においては、65°C80%RH以外のほとんどの試験において各ブランド、各ディスクのBERが9E-4を超え、許容限界値到達時間を測定することができた。65°C80%RH環境においては、一部ディスクでBERが許容限界値に達していないものがあつたので、それぞれのディスクの実測値から近似式曲線を求め、この曲線から各温度条件での加速劣化寿命を推定した。また、国内Aブランドの80°C80%RH、75°C80%RHの一部ディスクにおいては、前述したようにディスク表面の白濁によってドライブ検知不能となつたため、それまでの実測データから到達時間を関数近似によって推定した。

実測値、推定値を含めて、許容限界値到達時間の一覧表を図2-7-7に示す。

		BER=9E-4 到達時間実績 (Hr)				
		国内 A	国内 B	台湾 C	台湾 D	台湾 E
85°C	ディスク 1	952	389	563	124	876
	ディスク 2	864	532	525	104	1036
	ディスク 3	425	505	625	121	959
	平均値	747	475	571	116	957
80°C	ディスク 1	1705	1015	2006	467	1301
	ディスク 2	1643	1203	1238	1424	746
	ディスク 3	1744	1239	1611	1127	2209
	平均値	1697	1152	1618	1006	1419
75°C	ディスク 1	2126	2307	3369	231	2120
	ディスク 2	1649	1942	5130	199	1216
	ディスク 3	2019	1799	4860	280	1808
	平均値	1931	2016	4453	237	1715
65°C	ディスク 1	10302	5375	13299	5241	3156
	ディスク 2	18428	6579	5626	2946	3225
	ディスク 3	21732	6441	13689	8655	2293
	ディスク 4	10653	4088	13920	662	3936
	ディスク 5	推定不可	5299	7633	7282	3593
	平均値	15279	5556	10833	4957	3241

網掛けの数値は近似式による推定値

図 2-7-7 許容限界値到達時間

図2-7-7の結果を用いて各メーカーのディスクについてアレニウス・プロットを行った。外挿は平均値を用いて行った。

上記アレニウス・プロットより 30℃での保存寿命を推定した。その結果を図 2-7-8 に示す。台湾 D ブランドについては、80℃の加速劣化寿命より 75℃の加速劣化寿命が長くなるという逆転現象が生じたため、外挿が困難であり、30℃で寿命推定を行っていない。

	推定寿命 今年度結果	備考	推定寿命 昨年度報告
国内 A ブランド	(556 年程度)	参考値 (ハードコート白濁有り)	154 年程度
国内 B ブランド	96 年程度		95 年程度
台湾 C ブランド	664 年程度		—
台湾 D ブランド	—	アレニウスによる推定不可	—
台湾 E ブランド	4 年程度		2 年程度

図 2-7-8 アレニウス法により求めた 30℃での推定寿命

国内 A ブランドにおいては、30℃で 556 年程度という、非常に長い推定寿命が得られた。ただし A ブランドにおいては、前述のように 75℃及び 80℃環境でハードコート層の凝集による白濁という別の要因によって BER が劣化しており、特に 75℃のアレニウス・プロットが近似直線から外れている傾向にある。白濁による劣化を切り分けた試験から 75℃及び 80℃の加速劣化寿命を求めることによって、劣化要因を切り分けた寿命推定を行うことができる。また、65℃においては BER がまだそれほど上昇していないことから推定値によってアレニウス・プロットを行ったが、その推定値にばらつきがみられる。より正確な寿命推定を行うためには、65℃における試験を継続し、65℃における加速劣化寿命を実測する必要がある。

国内 B ブランドにおいては、各温度における実測値のばらつきが小さく、また昨年度報告した推定寿命 (95 年) と、65℃の結果を加えた今年度の結果 (96 年) とがきわめて良く一致している。このブランドのディスクは品質ばらつきが小さく信頼性の高い結果が得られたと考えられる。

台湾 C ブランドにおいては、昨年度から試験を継続して 75℃と 80℃の加速劣化寿命を実測し、かつ 65℃の結果を加えることによって、30℃での寿命を 664 年程度と推定することができた。ただし、高温側 (75℃、80℃、85℃) の 3 点を外挿した直線よりも、65℃での加速劣化寿命が短くなっている。このことは、高温側と低温側で劣化のメカニズムが異なっている可能性もあるため検討が必要である。

台湾 D ブランドにおいては、80℃の加速劣化寿命より 75℃の加速劣化寿命が長くなるという逆転現象が生じたため、外挿が困難であり、30℃で寿命推定を行っていない。このようにばらつきの大きいブランドのディスクについては寿命推定を行うことができない。

台湾 E ブランドにおいては、約 4 年の推定寿命となった。ただし、実測値のばらつきが大きいためアレニウス・プロットの信頼性については検討が必要である。これについては評価者 3 の結果と合わせ、以下の (c) で考察する。なお、実測値のばらつきはディスク品質のばらつきに起因するものと推定される。

(c) まとめ

評価者 3 と評価者 4 の、許容限界値到達時間実測値をデータをすべてまとめ、アレニウス・プロットを行った。その結果を図 2-7-9 (A), (B) に示す。図中、△は評価者 3 の加速劣化寿命実測値 (あるいは推定値)、◆は評価者 4 の加速劣化寿命実測値 (あるいは推定値) である。また*はすべての測定値の平均値であり、この平均値を用いて行った外挿を実線で、評価者 3 及び 4 がそれぞれで行った外挿を点線 (評価者 3)、一点鎖線 (評価者 4) で示した。

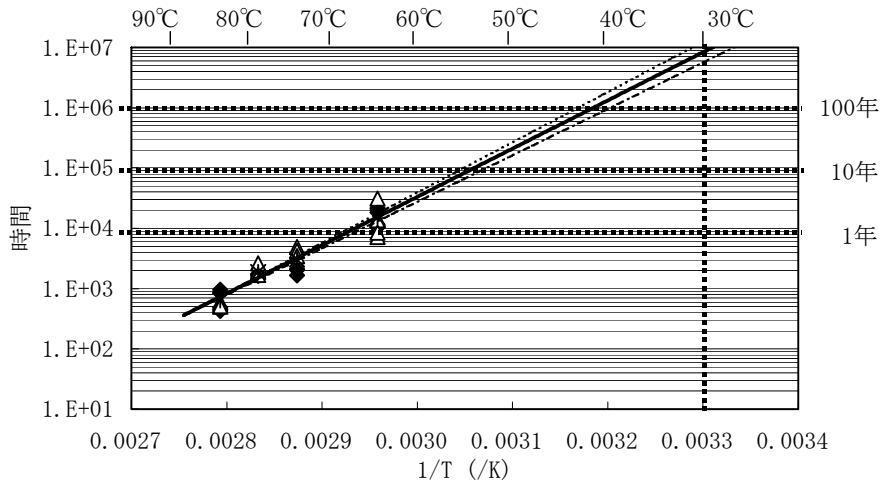


図 2-7-9(A) 国産 A ブランド品のアレニウス・プロット (評価者 3 及び 4 の実測値使用)

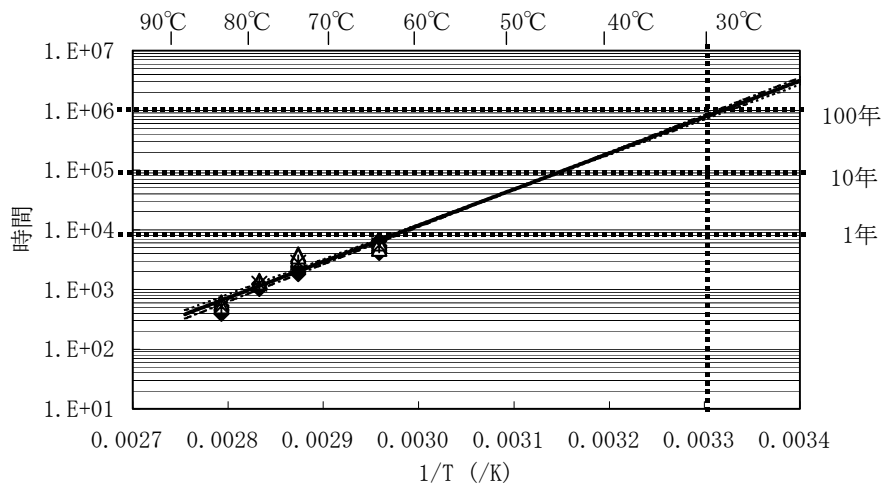


図 2-7-9(B) 国産 B ブランド品のアレニウス・プロット (評価者 3 及び 4 の実測値使用)

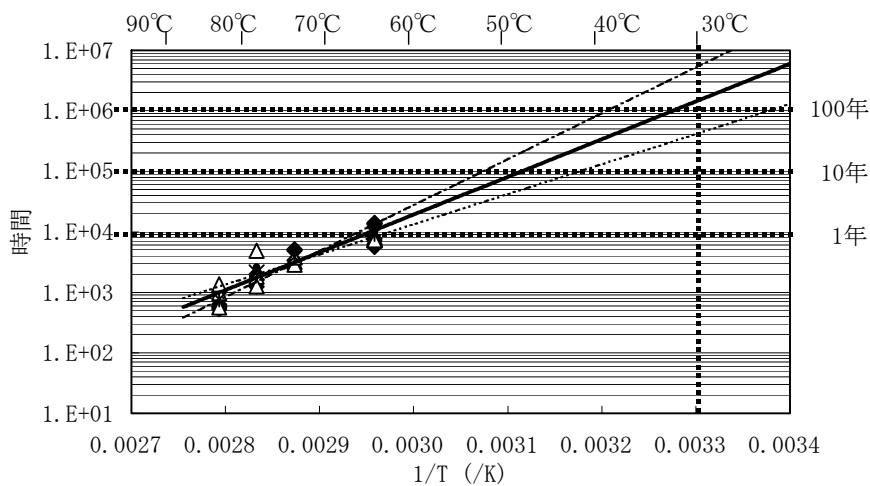


図 2-7-9(C) 台湾 C ブランド品のアレニウス・プロット (評価者 3 及び 4 の実測値使用)

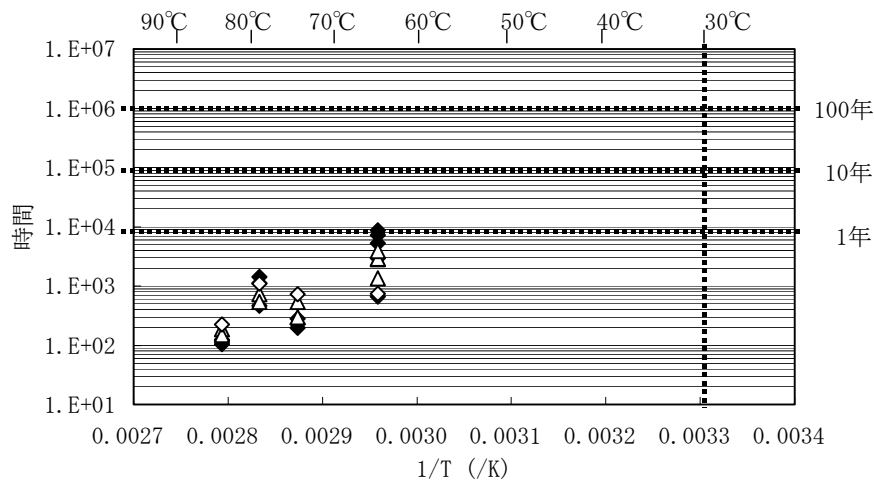


図 2-7-9(D) 台湾 D ブランド品のアレニウス・プロット (評価者 3 及び 4 の実測値使用)

国産 A ブランド及び、国産 B ブランドにおいては、評価者 3、4 の実測値のばらつきが小さく、また両者の推定寿命にも大きな差はない。国産 A ブランドは、評価者 3 による推定寿命は 1418 年、評価者 4 による推定寿命は 556 年であり、国産 B ブランドは、評価者 3 による推定寿命は 80 年、評価者 4 による推定寿命は 96 年である。これら 2 ブランドは、ディスク品質ばらつきが小さいため実測値のばらつきが小さく、アレニウス・プロットによって推定した推定寿命の信頼性は高いといえる。

台湾 C ブランドは、実測値のばらつきのため評価者 3 と 4 の推定寿命には大きな差があり、評価者 3 による推定寿命は 47 年、評価者 4 による推定寿命は 664 年と 10 倍以上の違いがある。これはディスクの品質ばらつきに起因するものと考えられ、より信頼性の高い推定寿命を行うためにはより多くのサンプルでの試験が必要であると考えられる。

台湾 D ブランド、台湾 E ブランドは実測値ばらつきがきわめて大きく、アレニウス・プロットからの寿命推定は困難である。台湾 E ブランドはそれぞれの評価者で寿命推定を行っているが、評価者 3 による推定寿命は 354 年、評価者 4 による推定寿命は 4 年と 100 倍近い違いがあり、その値の信頼性はきわめて低いといえる。これらはディスクの品質ばらつきに起因するものと考えられる。

以上より、国産 A ブランド及び国産 B ブランドにおいては、今回の試験で寿命の推定が可能、台湾 C ブランドは寿命推定は可能だが精度に問題があり、今後より精度を上げる検討が必要、台湾 D ブランド及び台湾 E ブランドは今回の試験では寿命推定は困難と結論付けられる。これらをまとめたものを図 2-7-10 に示す。

	30°C80%RH での推定寿命	備考
国内 A ブランド	(870 年)	参考値 (ハードコート白濁有り)
国内 B ブランド	85 年	
台湾 C ブランド	(47 年以上)	ディスク品質ばらつきあり推定精度問題
台湾 D ブランド	推定不可能	ディスク品質ばらつき大きく推定困難
台湾 E ブランド	推定不可能	ディスク品質ばらつき大きく推定困難

図 2-7-10 DVD-RAM 各ブランド品のアレニウス・プロットによる推定寿命 (まとめ)

(3) DVD-RW

: 外挿値

		加速劣化試験寿命 (Hr)				
		Aブランド	Bブランド	Cブランド	Dブランド	Eブランド
85 °C 80%Rh	ディスク1	110	1800	330	10	10
	ディスク2	110	1900	330	10	10
	ディスク3	120	1900	410	10	10
	ディスク4	130	2050	410	10	10
	ディスク5	150	3000	410	96	10
	平均値	124	2130	378	27	10
80 °C 80%Rh	ディスク1	320	2660 時間 経過、劣 化不足の ため外挿 不可能	600	26	10
	ディスク2	360		600	26	10
	ディスク3	410		650	45	10
	ディスク4	410		650	54	10
	ディスク5	500		650	96	10
	平均値	400		630	49	10
75 °C 80%Rh	ディスク1	700	2660 時間 経過、劣 化不足の ため外挿 不可能	1100	63	10
	ディスク2	800		1100	84	10
	ディスク3	800		1100	84	10
	ディスク4	850		1150	210	10
	ディスク5	1200		1150	450	45
	平均値	870		1120	178	17
65 °C 80%Rh	ディスク1	4545 時間 経過、寿命 を推定	4545 時間 経過、劣 化不足の ため外挿 不可能	2300	720	50
	ディスク2			2600	1000	50
	ディスク3			3100	1000	50
	ディスク4			4000	1050	50
	ディスク5			6000	1300	50
	平均値			11000	3600	1014

図 2-7-11 各ブランドの各加速条件での加速劣化試験寿命

相変化記録である DVD-RW のアーカイバルにおける PI エラー劣化の要因を、加速劣化試験の結果からまとめると、(a) 反射膜の変質、(b) 記録膜の変質、(c) 反りの変化 の3つに大きく分けられる。しかし、2.6 加速劣化試験にも述べたように同じ部位の劣化であっても劣化のメカニズムはいくつか存在しており、そのメカニズムによって PI エラーに及ぼす影響が異なる。ある劣化メカニズムは PI エラーに徐々に現れ、あるものは突然現れる。たとえば、今回の試験でも反射膜の変質としては、酸化、硫化、変移が報告された。各ブランドの製品設計の違いにより様々な要因が重なり合って、各試験条件での許容限界値 (PI エラー: 280 個) に達するまでの時間の差が現れた。加速劣化試験寿命の判定はサンプルディスク毎の内、中、外周の3点の PI エラーの平均値を、試験放置時間毎にディスク別にプロットし、各サンプルの寿命を求めた。これは、同一試験環境での加速劣化試験寿命のばらつきを示す。

これらのサンプル毎、及び平均の加速劣化試験寿命をプロットし、アレニウス法による寿命推定の検討を行った。各ブランドの各加速条件での加速劣化試験寿命をディスク別に図 2-7-11 に表した。これらより求めた各ブランドのディスクの寿命は図 2-7-12 の様になる。

ブランド	推定寿命 (年)		備考
	25°C/80%	30°C/80%	
A	-	-	データ不足により推定不可
B	-	-	寿命未達、継続評価必要
C	91	42	低温側ばらつきあり
D	X	X	ばらつきが大きく推定不可
E	X	X	初期特性、ばらつき大、推定不可

図 2-7-12 寿命推定結果

A ブランドは 65°C 以外ですべて寿命に達しており、65°C は多少劣化が始まっている PI エラーの値を関数近似による外挿をすることによりプロットを行った。75°C、80°C、85°C と試験環境の温度差が小さいが、各温度ともばらつきも少なく外挿した 65°C も直線状に並んでいるため、寿命推定が可能であるように見えるが、高温側での寿命が短いため、寿命は異常に大きな値となった。他の特性（反射率）から判断して、65°C の環境においてもディスクの劣化はかなり進んでおり、異常に長い寿命を持つと判断するにはデータ不足である。

B ブランドは 85°C の一部が約 2000 時間で寿命に達しただけで、他の温度条件では外挿できる変化が現れていない。よって、寿命に達するまでの更なる劣化試験の継続が必要である。

C ブランドはすべてのサンプルで寿命に達した。プロットは A ブランドと逆に、高温での寿命は比較的長い、低温側で短い結果となった。多少 65°C にばらつきが大きい傾向は直線状である。

よって、推定寿命は短めの 30°C で 42 年となる。これは温度よりも時間の寄与が大きい劣化があるのではないかと考える。

D ブランドはすべてのサンプルで寿命に達した。各条件の平均値でプロットすると推定寿命は 70 年ほどになるが、65°C 以外の高温度側の寿命のばらつきが大きく、これらを使って寿命推定を行うことは困難である。

E ブランドはすべてのサンプルで寿命に達した。しかし、ほとんどのサンプルが一回目のデータ取りで寿命に達してしまうなど、あまりにも品質が悪く、初期値の大きいばらつきを見ても、推定に値しないと判断する。

これらのアレニウス法による寿命推定の検討から言えることは次のとおりである。

- ① 初期値が大きくばらつくサンプルは、加速劣化試験でもばらつき、推定できない。
- ② 高温だけの評価ではアレニウスの近似線が逆転することもあり、室温での寿命の推定ができない。
- ③ 初期値、加速劣化試験のばらつきが少ないサンプルは、2 環境で寿命の推定が可能である。
- ④ 高温でも耐久時間の長いものがあり、限られた時間で寿命を推定できない場合がある。

これらの条件を満たせば、寿命の予測は可能であると判断する。

2.8 試験データから見た劣化要因の検討

(1) DVD-R

(a) 評価者 1 の場合

温湿度試験での外観の変化の様子を図 2-8-1 にまとめた。ディスク A、E、F、G、H は外観の変化が認められた。ディスク H については、昨年度の分析で色素記録層と金属反射層の両方がダメージを受けていることがわかっている。それぞれのディスクで外観の変化が違うことから、劣化メカニズムも異なることが推測される。

また、ディスク H は、耐光性試験でも記録層の褪色が確認され、色素の劣化が発生したと考えられる。その他のディスクについては、外観上の大きな変化は認められなかった。

	Disc A	Disc B
85°C80%RH	特に変化なし (275 時間)	特に変化なし (1275 時間)
80°C80%RH	特に変化なし (625 時間)	特に変化なし (1875 時間)
75°C80%RH	斑点が全面に発生 (1500 時間)	特に変化なし (4500 時間)
65°C80%RH	変化無し (2616 時間)	変化無し (2616 時間)
温湿度条件	Disc C	Disc D
85°C80%RH	特に変化なし (1275 時間)	特に変化なし (1150 時間)
80°C80%RH	特に変化なし (1875 時間)	特に変化なし (1875 時間)
75°C80%RH	特に変化なし (4500 時間)	特に変化なし (4000 時間)
65°C80%RH	変化無し (2616 時間)	変化無し (2616 時間)
温湿度条件	Disc E	Disc F
85°C80%RH	中心部分が変色 (1275 時間)	特に変化なし (525 時間)
80°C80%RH	中心部分が変色 (1875 時間)	3 枚中 1 枚のみ 記録面の一部が変色 (1375 時間)
75°C80%RH	中心部分が変色 斑点が全面に発生 (400 時間)	特に変化なし (2000 時間)
温湿度条件	Disc G	Disc H
85°C80%RH	記録面の一部が変色 (1275 時間)	記録面からスクリーンの メッシュ跡が見える (400 時間)
80°C80%RH	記録面の一部が変色 (1875 時間)	直径状に線が入りその線で分けられた 半面に斑点が見える (625~1625 時間)
75°C80%RH	記録面の一部が変色 (4500 時間)	直径状に線が入りその線で分けられた 半面に斑点が見える (2000 時間)

図 2-8-1 温湿度試験ディスクの外観変化

(b) 評価者 2 の場合

温湿度試験での外観変化の様子を図 2-8-2 にまとめた。ディスク A、D、E、F、G、H には加速試験での劣化と思われる外観の変化が認められ、なかでも台湾ブランド 4 社品は顕著であった。B の気泡については接着層の気泡と思われ、加速試験により成長したものか定かでない。

外観の変化は、色素記録層及び金属反射層、またはどちらか一方が変質して変色していく変化と、欠陥が成長してく変化とに大別された。

	Disc A	Disc B
85°C80%RH	全面に斑点発生、中心部やや大きい (2570 時間)	レーベル面側気泡 (2570 時間)
80°C80%RH	全面に斑点発生、中心部やや大きい (2050 時間)	レーベル面側気泡 (2050 時間)
75°C80%RH	全面に斑点発生、中心部は気泡状 (2408 時間)	レーベル面側気泡 (2408 時間)
65°C80%RH	特に変化なし (2619 時間)	特に変化なし (2619 時間)
温湿度条件	Disc C	Disc D
85°C80%RH	特に変化なし (2570 時間)	外周部若干変色 (2570 時間)
80°C80%RH	特に変化なし (2050 時間)	特に変化なし (2050 時間)
75°C80%RH	特に変化なし (2408 時間)	特に変化なし (2408 時間)
65°C80%RH	特に変化なし (2619 時間)	特に変化なし (2619 時間)

温湿度条件	Disc E	Disc F
85°C80%RH	外周部に斑点発生 中心部にひび状の模様 (2570 時間)	色素変色、レーベル面の文字が記録面から見える (2 枚) (2570 時間)
80°C80%RH	外周部に斑点発生 中心部に気泡状の模様 (2050 時間)	斑点発生、レーベル面の文字が記録面から見える (1 枚) (2050 時間)
75°C80%RH	外周部に斑点発生 中心部に気泡状の模様 (2408 時間)	特に変化なし (2408 時間)
65°C80%RH	—	—
温湿度条件	Disc G	Disc H
85°C80%RH	外周部に斑点 (2570 時間)	中心に線が入り、変色発生 (2570 時間)
80°C80%RH	外周部に斑点発生、レーベル面の文字が記録面から見える (1 枚) (2050 時間)	中心に線が入り、変色発生 (2050 時間)
75°C80%RH	特に変化なし (2408 時間)	中心に線が入り、変色発生 (2408 時間)
65°C80%RH	—	—

図 2-8-2 温湿度試験ディスクの外観変化 DVD-R

(2) DVD-RAM

(a) 評価者 3 による検討

今回の加速劣化試験において劣化現象の指標とした特性は BER (バイトエラーレート) である。DVD-RAM の BER 評価については全ユーザーゾーン (Zone 0~34) の各ゾーン中央部付近において連続した 32ECC ブロックの信号を 1 回記録し、以降同一箇所の繰り返し再生の BER 評価を行った。ゾーン毎の BER 値についてはデータ数が 35 組と多く、1~2 章における検討では測定結果の複雑化を避けるためにも全ゾーン総平均値での検討を行ってきたが、考察ではもう少し詳細な BER 分布状態についても検討しておく必要がある。

高温の 85°C や低温の 65°C では BER の許容限界値、BER 増加変化点のばらつきも大きかったため、評価者 3 は 4 つの加速温湿度環境での実測データの中からほぼ全ブランドのディスクで明確な BER 増加変化が確認され、かつ同じ時間軸で 5 ブランドの相対評価が可能な 80°C80%RH の 1040Hr ポイントでのデータ及び測定サンプル中心に着目して観察を行った。

最内周部 Zone. 0~最外周部 Zone. 34 範囲での各ゾーン BER 平均値をプロットしているので BER 値のディスク半径方向分布状態、初期から 1040Hr 後への増加部分の傾向を読み取ることができる。途中経過については厳密な推定はできないが初期値、増加率の違いはあるものの台湾 E ブランドを除いて 4 ブランドでは局所ゾーンでの増加ではなく、全ゾーン (ディスク全面) での増加傾向と考えられる。E ブランドの図の中で「1040H 実質」と特別な線を付加したのはこのブランド品ではかなりのゾーン (このディスクでは 12 個/全体 35 個) で ECC ブロック全体のリードエラーが発生し、(計測ソフト上リードエラー部が) BER 計算値から除外されていた。除外されていた部分をエラーとしてカウントして再計算した結果をプロットしたものが「1040H 実質」である。みかけの (リードエラー部が除外された) BER 値が比較的低いものの、再計算値は全体平均値を 2~3 桁上昇させるほどのレベルにあり、台湾 D ブランドと同等レベルの実質 BER と考えた方が良い。このリードエラーの発生は Zone. 23~34 (中周~外周) 付近に局所集中傾向が見受けられた。

次に図示した BER 値の現物ディスクについてその信号記録面から (光学顕微鏡による) 表面を観察した。

1040Hr 保存後時点では国内 A ブランド品には BER 増加同様、顕著な特徴がなかったものの、台湾 C,D,E ブランド品にはそれぞれ異なった特徴的な (スパッタ面) 表面変化が観察された。

1) 台湾 C ブランド品：腐食と推定される信号記録面上に散在する微小突起

2) 台湾 D ブランド品：腐食と推定されるディスク全面の微小扁平状凹凸

3) 台湾 E ブランド品：信号記録面上の同心円状亀裂（クラック）

* この亀裂が台湾 E ブランド品のみが発生した BER 測定時のリードエラー原因と推定される。

国内 B ブランド品にも表面の数、サイズは異なるものの台湾 C, D ブランド表面類似の微小突起又は微小扁平状凹凸が観察された。寄与率までは不明だが各ブランド品についての BER 分布、表面状態観察結果から、BER 値増加（劣化）の主原因になっているのはこの表面状態変化と推定される。なお、上記台湾 C, D, E 各ブランド品同一環境条件保存品について表面の n 増し観察を行ったが、類似表面変化が各 n=3 全数で観察された。

平成 15 年度に行った 3 水準温湿度（85℃、80℃、75℃各湿度 80%RH）による加速環境試験、アレニウス・プロット寿命推定の精度を向上するとともに推定結果を検証するために定義寿命（BER=9E-04）に到達していなかったサンプルディスクの環境保存・評価を継続した。それとともにより低温水準にあたる 65℃80%RH 環境を追加し、各ブランド n=5 の追加条件試験を実施した。

この追加試験により、昨年度中の試験では見出すことができなかつたいくつかの現象が確認された。

1) 特に顕著な表面変化は認められず、BER 増加が一番少ない傾向にあった国内 A ブランド品ディスク表面に白濁が発生し、評価用ドライブでの認識、評価が不能になった。

評価者 3 が確認できた内容

① 5 ブランドのディスクの中で国内 A ブランドのみで発生した。

② 85℃80%RH 環境 1000Hr 以内（各ブランドのほとんどのディスクが定義寿命 BER 到達）では国内 A ブランド品でもこの現象は発生しなかった。

③ 80℃80%RH 環境では約 1700Hr、75℃80%RH 環境では約 3000Hr 以上で国内 A ブランドディスク全数傾向で同現象が確認された。

④ 評価者 4 の評価でも同様な現象は確認されており、評価者 4 の解析から基板表面ハードコート層の凝集物と推定される。

2) 台湾ブランド E ディスクで特徴的に観察されたディスク記録面の亀裂現象。

評価者 3 が確認できた内容

① 5 ブランドのディスクの中で台湾 E ブランドのみで発生した。

② 85℃80%RH 環境 1000Hr 以内、80℃80%RH 環境 1500Hr 以内で発生した。（全数傾向）

③ 75℃80%RH 環境 5400Hr、65℃80%RH 環境 4000Hr（現時点）では台湾 E ブランド品でも同亀裂現象は発生していない。

昨年度の報告書でも考察されているように複数の劣化要因をもつディスクにおいては単純モデルでのアレニウス・プロットによる寿命推定は難しい。すなわち、上記 2 つのブランド品については複数の劣化要因を持っていると推定されるので精度の高い寿命推定は期待できないと考えられる。

(b) 評価者 4 による検討

評価者 3 と同様に、温湿度試験における BER の上昇の主原因について考察を行うため、各ブランドのディスクの BER が各ゾーンでどのように変化しているかを調べた。

評価者 4 においては、BER が 9E-4 (9×10^{-4}) を超えるサンプルを実際に確保できた環境が 85℃80%RH であったため、85℃80%RH のサンプルの結果について示す。

BER の変化はほぼディスク全面にわたって平均的に起こっており、内周部あるいは外周部から悪くなっていくなどの大きな半径依存は見られない。ただし、台湾 E ブランド品においては内周部に局所的に BER が劣化している個所が見られる。温湿度試験後の台湾 E ブランド品を顕微鏡で観察したところ、信号記録面上に亀裂状の欠陥が観察された。

1 章 1.2 において、DVD-RAM の寿命劣化要因として、非晶質マークの結晶化によるもの、酸化などの腐食によるものを検討した。これらの要因はどちらも反応速度論にしたがって生じる現象であり、ある活性化エネルギーを有するアレニウスの関係式に従う。

国内 A ブランド、国内 B ブランドにおいては、評価者 3 と評価者 4 のアレニウス・プロットはほぼ一致した結果が得られており、活性化エネルギーを持つ過程で劣化が起こっていると考えことに十分妥当性がある。したがって、アレニウス・プロットからの外挿した推定寿命の値にも妥当性があると考えられる。なお、アレニウス・プロットから活性化エネルギーを求めると、国内 A ブランドは 1.34eV、国内 B ブランドは 1.28eV であった。

国内ブランドに関して、寿命推定をより確実なものとするには、より低温での寿命試験を行う必要がある。1 章 1.2 で検討したように、活性化エネルギーを持つ過程として結晶化と酸化の 2 要因を挙げ、実験ではこれら 2 つを切り分けて測定できないことを述べた。また、これらはそれぞれ異なる活性化エネルギーを持っている可能性がある。このように、異なる 2 要因による劣化過程がある場合には、実験的にはどちらか一方の要因での劣化のみの測定しかできないので、高温での測定から求めたアレニウス・プロットをそのまま外挿できない可能性がある。そのことを図 2-8-3 を用いて説明する。

図 2-8-3 に示すのは、2 つの要因によるアレニウス・プロットを模式的に表したものである。図中、要因 1 と要因 2 は異なる活性化エネルギーを持つものとした。その場合、2 つの直線は交差する。これを実験的に測定すると、それぞれの温度において先に劣化する要因が見えてくるので、図の実線のように、途中で折れ曲がったものが得られることになる。この交差点が、寿命を推定したい温度よりも高い温度域にある場合、より高温での測定結果から求めた直線（図 2-8-10 中の要因 1）を外挿した寿命よりも、実際の寿命が短くなってしまふ。

以上の観点から、寿命推定をより確実なものとするためにはより低温での試験を行う必要があり、図 2-8-10 のように折れ曲がってしまうことがないことを確認するか、もし折れ曲がってしまう場合には、より低温で求めた活性化エネルギーを用いて寿命推定を行う必要がある。

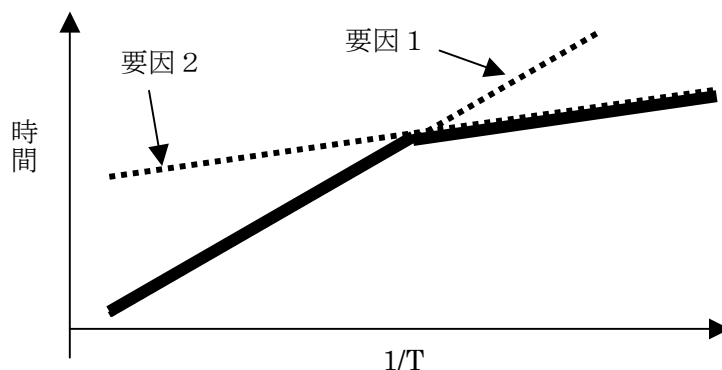


図 2-8-3 2 つの要因がある場合のアレニウス・プロット模式図

一方、台湾ブランド品においては、評価者 3 と評価者 4 の結果が大きく異なるケース（図 2-7-9(C)）や、より低温での保存寿命のほうが短いアレニウス・プロットの逆転現象（図

2-7-9(D))などが見られた。そのため、活性化エネルギーの値に妥当性があるとは言いがたく、したがってアレニウス・プロットから求めた推定寿命の妥当性に疑問が残る。評価者による結果の違いや、アレニウス逆転現象の原因としては、ディスク間の品質ばらつきが考えられる。また、台湾Eブランド品に見られた亀裂状欠陥のように(図 2-8-9)、アレニウス・プロットには従わない、破壊のような現象による劣化が生じている可能性もある。品質ばらつきについては、n数を大きくする、あるいはディスクに記されている製品管理番号のより近いものを用いる、など、より精度を上げる方法を検討する必要がある。またアレニウスに従わない破壊などの劣化要因については、そのメカニズム検討を行うことも重要であるが、破壊が起こらないより低温での試験も有効と考えられる。

(3) DVD-RW

劣化要因については 2.6.3(3)で述べたものが見出されたが、この章では、膜の変化が認められたサンプルについての分析から劣化の要因を検討した。

加速劣化試験において、外観上の変化が認められたサンプルは、C,D,Eの3ブランドである。

① Eブランド 65°C80%Rh500 時間試験品

このサンプルは、外観でディスク全面に金属が腐蝕したように見える。ディスクをスパッタ膜に沿って剥がし、その剥離面をSEM-EDS(Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive Spectrometer)で分析した。得られたスペクトルより剥離した箇所は反射膜と隣接する誘電体層の間と判断した。元素のマッピングを作成したが、その結果として

- ・ 腐蝕の発生した部分の反射膜からAgがなくなり、誘電体膜上にAgを検出した。
- ・ 誘電体膜側で検出されたAgに応じて、SやOが多く検出されることはない。
- ・ 反射膜のAgが失われて部分からはOが多く検出されている。

誘電体膜上のAgに応じてSは検出されていない。反射膜のAgが失われた部分にOが検出されたことで、ポリカ側からの水分の進行でAgの酸化が発生したと推測する。

② Dブランド 65°C80%Rh3883 時間試験品

このものは、外観で金属が腐蝕したように見える。信号読み出し面側から、全面に異状が認められる。反対側からは印刷により確認できない。剥離させた後、光学顕微鏡、SEM-EDSでの分析を行った。光学顕微鏡で見ると、異状な部分は円形に変色したものの集合体であり、この部分の存在によって膜の剥れ方が変化している。SEM-EDSでの分析では、剥離面に露出している層は反射膜か、誘電体膜である。元素毎のマップを形成してみると、以下のことがわかる。

- ・ ダミー基板側剥離面の反射膜のAgが失われている部分がある。
- ・ 信号基板側剥離面において、Agがない部分は、CやOが検出されており、Zn、Sbなどの記録層、誘電体層に含まれる元素が検出されていない。
- ・ 同じであるはずのZnとSの分布に違いがある。
- ・ Agは腐蝕した部分では全スパッタ層にわたって存在している。

これらのことから、Agの硫化が進み、この過程で記録層の両側にある誘電体膜に含まれるSと結合し、全層にわたってAgSを形成したと推測する。

③ Cブランド 85°C80%Rh500 時間試験品

外観上、中外周部分にしみのようなものが認められる。このディスクを剥がして剥離面をSEM-EDSで分析した。剥離面の元素より、反射膜と誘電体の界面で剥れたことが確認できた。異状な部分では、誘電体側が凸、反射膜側が凹の形状変化が発生している。元素マップによれば、誘電体膜側の凸に応じて、記録層の組成物であるSbが確認できた。反射膜の凹の部

分は、他元素が認められず、酸化、硫化の発生は無いと判断する。

④ Cブランド 65°C80%Rh3883 時間試験品

このサンプルは外観上、最内周部分で金属が腐蝕したように見える部分がある。光学顕微鏡で見ると、頻度は少ないが外周部分にも確認できる。このディスクを剥離すると反射膜と誘電体膜の間に剥れた。異状な部分は反射膜側でのみ認められ、誘電体側には、この異状な部分に対応したものは認められなかった。

Cブランドについては、65°Cと85°Cの2環境を分析した。双方とも反射膜の表面に形状の変化を生じている。65°C試験品は、反射膜の形状変化の初期段階であり、進行したものが85°C試験品ではないかと推測する。境界面の形状が変化し、組成的には酸化、硫化を含めて変化がない。A gの性質から変移が発生したのではないかと推測する。

第3章 寿命試験規格のまとめ

3.1 光ディスク取扱規格調査結果

光ディスク取扱規格及びデータ長期保存に関連した国際光ディスク規格を作成している委員会は I S O - T C 42, I S O - T C 171 がある。平成 16 年度には

- (1) T C 42 では IS18934 ” Imaging material - Multiple media archives - Storage environment ” が提案された。博物館などで同一の場所に写真、フィルム、磁気テープ、紙、ガラス板などを保存する場合の保管環境に関するものである。光ディスクとしては 0° ~8°C、湿度が 30% から 50% と比較的低温を指定している。日本で担当している情報処理学会規格調査会 S C 2 3 専門委員会としては了承の回答を行っている。
- (2) T C 171 では DIS12024 ” Electronic Imaging - Verification of information stored on CD media ” を審議している。記録したデータの誤り率を基準に保存している記録済み媒体の余命を評価している。しかし、バックグラウンドデータが不明なので、フランス、米国から反対の意見が提出されている。日本は J I I M A が T C 171 の窓口になっており、情報処理学会 S C 23 専門委員会からフランスと同様な意見を提出したが、国際会議には反映されていなかった。今後 S C 2 3 専門委員会との賢見を強化するために、リエゾンをおくことになった。DIS12024 はその後取り扱いが T C 171 の中で中止された。
- (3) 光ディスクの取扱規格
米国では A E S と I 3 A との共同委員会である J W G が詳細な規格を作成している。日本では J I I M A がウェブ上に掲載する光ディスク取扱指針を作成している。

3.2 光ディスク加速寿命評価試験の国際標準化の動向

光ディスクの加速寿命試験に関しては、昔に CD 関係の試験方法が米国から提案されたが、評価試験時間が 1 年以上と非常に長期な時間を必要とするために産業界では使用されてはいない。試験時間を短縮するために、寿命予測ではなく、ある基準よりも寿命が長いかを判定する簡便法が DVD に対して試験方法の標準化を目指して検討が行われている。

一番組織的にデータを収集しつつ進めているのは DCAJ とと思われる。

大学では大阪産業大学の入江先生が DVD - R A M を使用して同様な試験を行って、DVD にも適用が可能であるとの報告を国際光ディスク学会である I S O M で行っている。

米国では NIST (National Institute of Standard and Technology) が OSTA と組んで同様な検討を行っている。

欧州ではプラズモン社が中心になって ECMA にて TG2 を設立し試験方法の検討を行っている。

3.3 アレニウス法を適用して寿命推定するに際しての留意事項

アレニウス法は非結晶質相の状態が結晶相の状態に変化する現象は反応速度論に従っていると考えられ、エラーは時間に対して指数関数的に劣化が進むものとした法則である。

この法則に従ってDVD媒体の寿命をアレニウス法で確定するには以下の条件を満足する必要がある。

- ① 限界値に達するまでの時間が指数関数に従って劣化すること。
- ② 加速劣化試験において温湿度によるエラー曲線に逆転現象が発生していないこと。
- ③ 各温度でのアレニウスプロットした結果が比較的直線上にのっていること。
- ④ 恒温槽の温度が均一でないことを考慮し、なるべく温度幅考慮すること。
- ⑤ 各温度における寿命が未達の場合にデータの外挿を行うことが難しいこと。

また、一般にDVDとしてDVDフォーラムで規格化がなされている。よって、以下の規格も満足する必要がある。

- ① DVDフォーラムの規格を満足していること。
- ② 初期値測定で基準を満たしていること。

※ DVD媒体の寿命をアレニウス法にて推測する方法の一つとしてジッタ値を許容限界値として判断している企業もある。

第4章 光ディスク寿命評価法の確立と長寿命光ディスクの開発

4.1 長期保存のための光ディスク媒体の検討

(1) DVD-R

温湿度加速試験において、ディスクAについては、劣化曲線に不連続点があり、劣化が複合要因によって進んでいることが予見できた。Asymmetryの初期値の温湿度試験への影響を確認するため、記録パワーを振って記録し、Asymmetryを変化させたディスクについて、80°C80%RHでの加速劣化試験を行った。その結果を図4-1-1 (A)に示す。初期にAsymmetryが低く記録されたことが、温湿度試験におけるPIエラーの上昇に大きな影響を与えていないことが確認された。

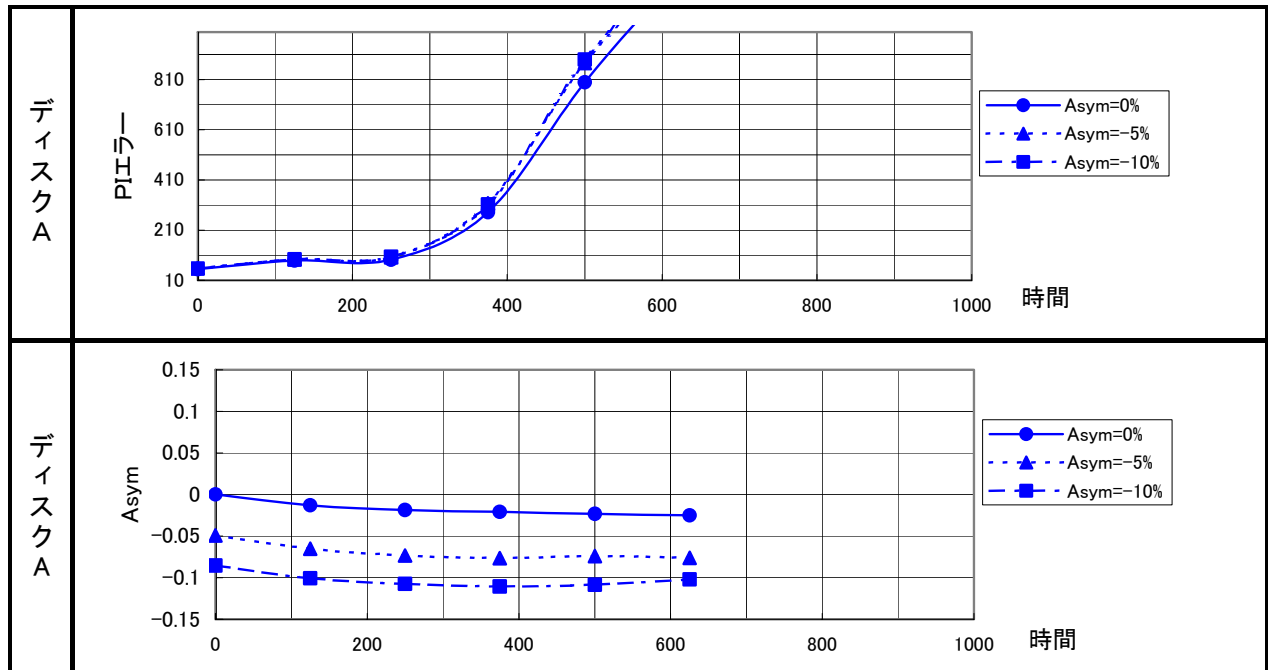


図 4-1-1 (A) ディスク A

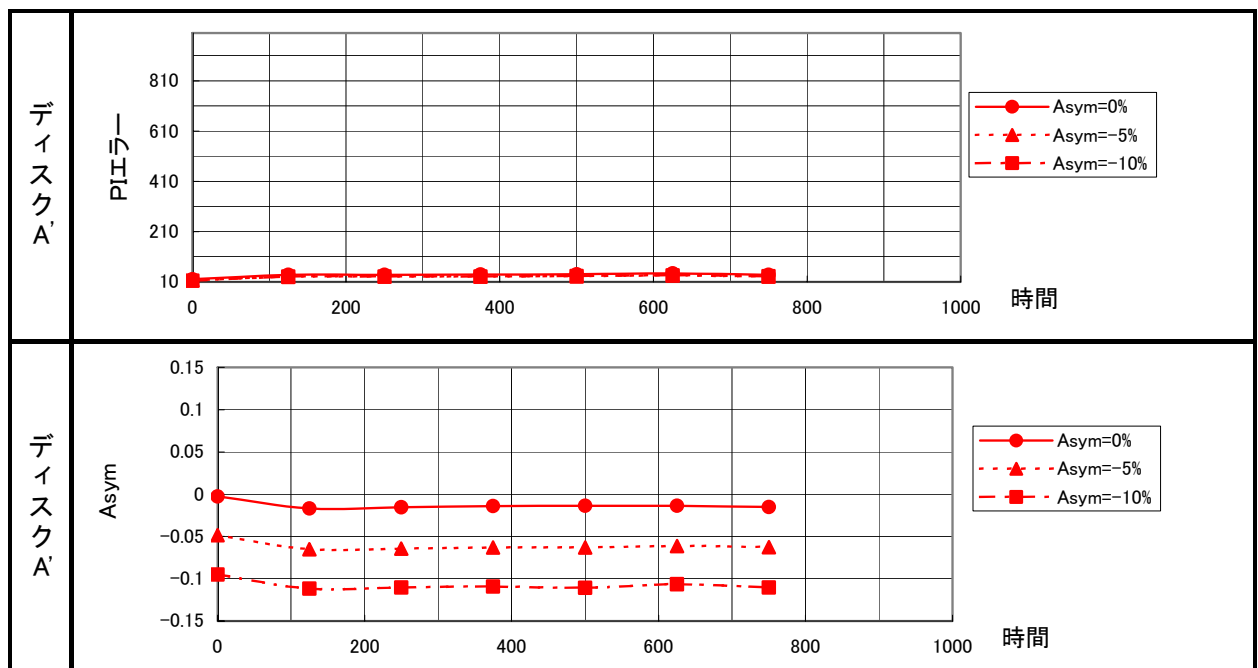


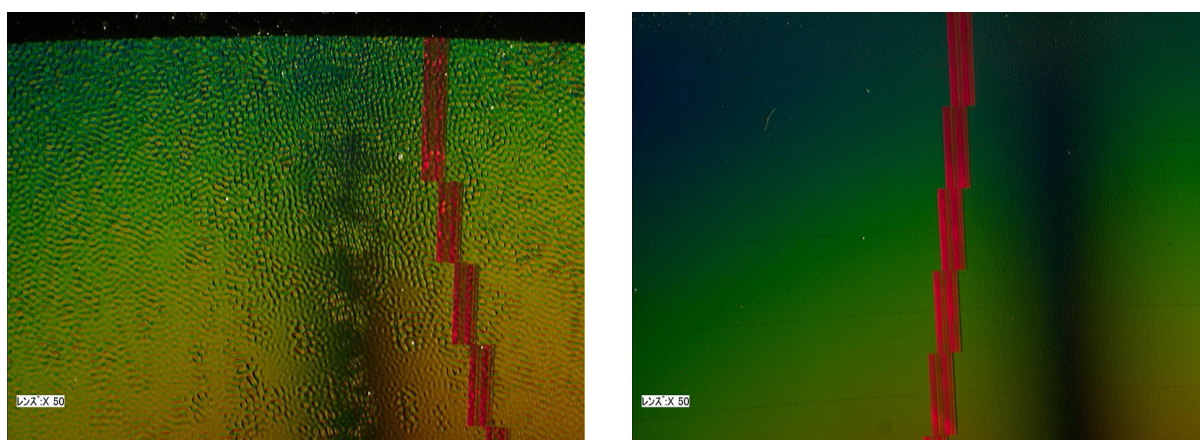
図 4-1-1 (B) 接着剤のみを変更したディスク A

続いてディスクAと接着剤のみを変更したディスクA' について、記録パワーを振って記録し、80°C80%RHでの加速劣化試験（Asymmetryの影響を確認するために行った試験と同じ試験）を行った結果を図4-1-1（B）に示す。ディスクAは、375時間からPIエラーが上昇し始めたのに対し、接着剤を変更したディスクA' は、750時間後もPIエラーの上昇が見られず、ディスクAよりも劣化が抑えられていることがわかる。ディスクA' については、一条件での温湿度試験（80°C80%RH）のみであり、アレニウスプロットによる寿命推定はできないが、接着剤はディスクの劣化に大きな影響を与えており、接着剤の改良は長寿命ディスクを開発する上で重要な要素であることを明らかにすることができた。

(2) DVD-RAM

国内 A ブランドディスクについては、継続して行った本年度の試験を推進するうちに、評価者3、評価者4いずれにおいてもハードコートの凝集が原因と思われる不具合が発生し、エラーレートの測定ができなくなった。そこで、ハードコートの凝集を第2の要因と位置づけ、この要因を取り除くことによって長寿命化が図れるのではないかと考えて次の実験を行った。すなわち、ハードコートの改良による加速劣化試験の違いを測定した。ハードコート層のみを変更したディスク A' について、85°C80%RH、80°C80%RH、75°C80%RH、65°C80%RH の4条件で加速劣化試験を行った結果を図4-1-2に示す。

ディスク A においては、80°C80%RHで1736時間後、75°C80%RHでも1736時間後にディスク表面に白濁が生じ、ディスクをドライブ検知することが不可能になって、エラーの測定が不可能になった。一方、新しいハードコートを用いたディスク A' においては、85°C80%RHで1185時間後、80°C80%RHで1565時間後、75°C80%RHで1791時間後、65°C80%RHで2105時間後でもディスク表面に白濁は生じておらず、現在試験を継続中である。ディスク A の、80°C80%RH1736時間後の表面顕微鏡写真と、ディスク A' の、80°C80%RH1565時間後の表面顕微鏡写真を図4-1-3に示す。



(A) 現行ハードコート材料（ディスク A） (B) 新ハードコート材料（ディスク A' ）

図 4-1-3 国内 A ブランドディスクの表面顕微鏡写真

ディスク A においてはハードコートの凝集によって表面が乱反射している様子が観察されるが、ディスク A' においてはハードコートの凝集はまったく見られないことがわかる。80°Cにおけるディスク A' の試験時間（1565時間）は、ディスク A で白濁が生じた試験時間（1736時間）にまだ達していないが、①図 4-1-3（B）の顕微鏡写真より白濁の兆候がまったく見えないこと、②75°Cの試験ではディスク A で白濁が生じた時間（1736時間）を超えても（1791時間）白濁がまったく生じていないことから、ディスク A に対して改善されている可能性が極めて高い。したがって、ディスク A' の試験を継続することによって、2つの劣化モードのうち、一つの要因を取り除いた寿命推定を行うことが可能になると考えられる。

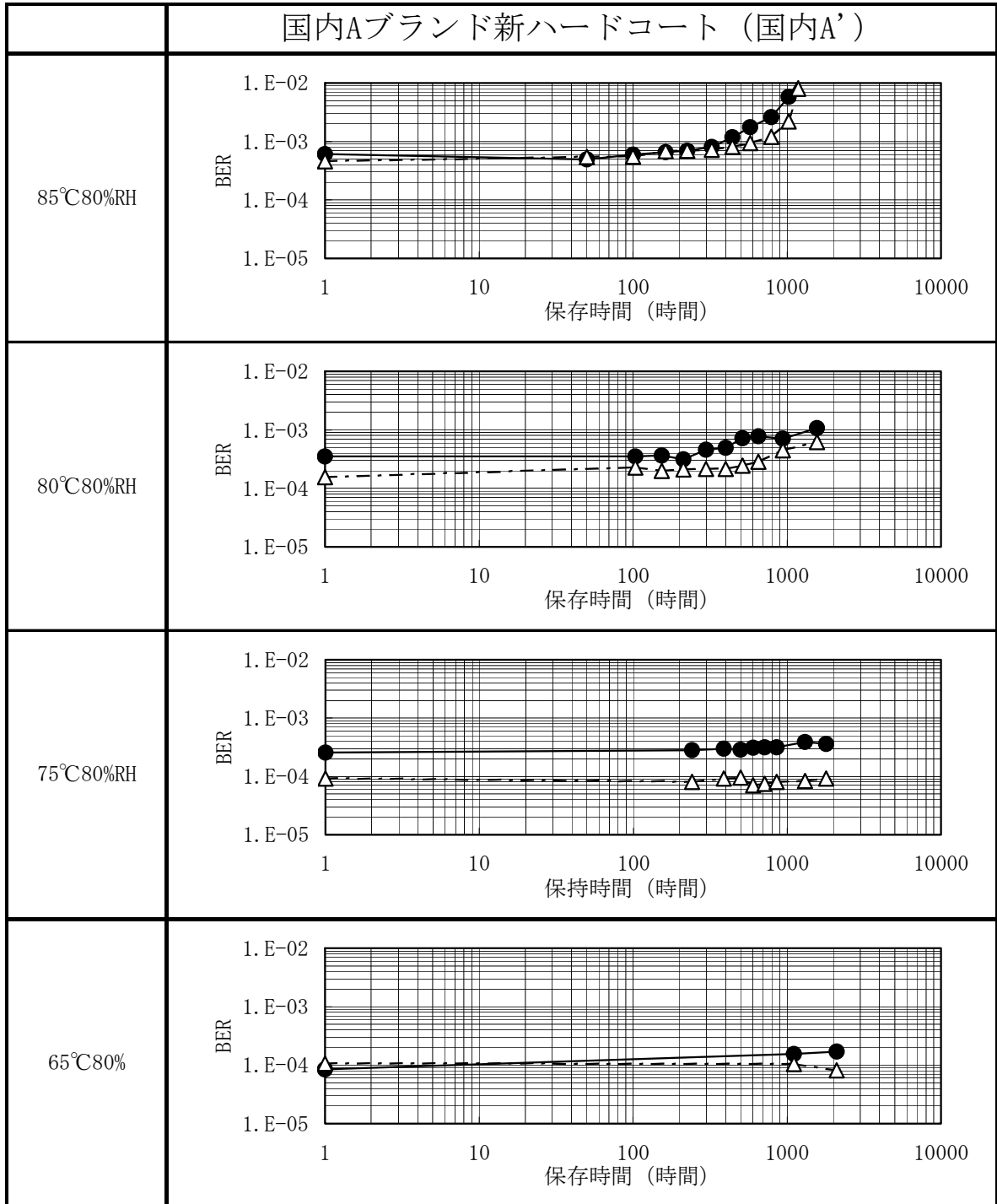


図 4-1-2 新ハードコートを用いた国内 A ブランドの BER 変化

現在、ディスク A' については、表面白濁のない状態で温湿度試験を継続中である。85°Cでは2枚のディスクで BER が許容限界値を超え加速劣化寿命の実測が可能になった。80°Cでは1枚のディスクで加速劣化寿命の実測が、もう1枚では実測データからの関数近似による推定が可能になった。75°Cでは1791時間、65°Cでは2105時間試験を行ったが、まだ BER 変化が小さく、これらの環境では加速劣化寿命の推定は不可能であった。これらをまとめて図 4-1-4 に示す。またこの図には白濁の生じたディスク A の加速劣化寿命の平均値をあわせて示す。

表 4-1-4 新ハードコートを用いたディスクの加速劣化寿命

		BER=9E-4 到達時間実績 (Hr)	
		ディスク A' (新ハードコート)	ディスク A (現行ハードコート)
85°C	ディスク 1	360	
	ディスク 2	535	
	平均値	448	747
80°C	ディスク 1	1304	
	ディスク 2	1975	
	平均値	1640	1697
75°C	ディスク 1	推定不可 (>1791)	
	ディスク 2	推定不可 (>1791)	
	平均値	推定不可 (>1791)	1931
65°C	ディスク 1	推定不可 (>2105)	
	ディスク 2	推定不可 (>2105)	
	平均値	推定不可 (>2105)	15279

ディスク A' において、85°Cの加速劣化寿命は 448 時間と、ディスク A の 747 時間に対して短くなったが、これは試験を行ったディスクの初期 BER が悪かったことに起因していると考えられる。初期 BER が悪かった原因は新ハードコートの欠陥によるものであり、新ハードコートディスクの試作を試作ラインで行ったことによると考えられる。

80°Cでの試験においては、加速劣化寿命がディスク A' では 1640 時間となり、ディスク A の平均値 1697 時間と近くなった。このことは、ディスク A においては、BER 劣化の 2 つの要因、記録膜劣化とハードコート凝集が、ほぼ同じ時間で BER に影響を及ぼしていることを示していると考えられる。

75°Cでの試験においては、ディスク A' の加速劣化寿命推定がまだ不可能であるが、1791 時間試験を行っても BER 変化がほとんどないことから、ディスク A で得られた加速劣化寿命 1931 時間を上回る可能性が高い。いずれにせよ、継続試験が必要である。

65°C試験においてもさらなる継続試験が必要である。

今回行った試験では、新しいハードコート材料を用いたディスク A' において、現時点で白濁は生じておらず、要因の切り分けを行った試験を継続できていると言える。今後この試験を継続し複合要因によって劣化を生じたディスク A との比較を行っていく必要がある。

4.2 長寿命光ディスク開発の指針

前項に示したように、加速試験における劣化の様子を見ると、劣化のカーブが不連続になる場合がある。このような不連続が現れた場合、その時点から後はそれまでと違った 2 つ目の要因が支配的になることを示している。前項に示したように、2 つ目の要因が何であるのかを分析し、その要因を除くことができればより長寿命のディスクを得ることができる。ただし、このような分析のできるディスクは、生産管理、品質管理精度が高く、かなりの信頼性を確保してあるディスクであることを知っておかなければならない。

4.3 光ディスクの寿命評価法

4.3.1 加速試験による寿命評価法

これら加速試験データや劣化要因の分析、寿命劣化の改良などから、現時点で得られているDVD-Rディスク、DVD-RAMディスク、DVD-RWディスクについて、寿命評価の妥当性の検証と今後の対応について検討してみた。

(1) DVD-R ディスク

国内4社、台湾4社の合計8社のブランドディスクについて、評価者1と評価者2の2社で加速試験を実施した。台湾E社、F社、G社、H社のディスクは、初期特性が悪く、また高温での加速試験でばらつきが大きくかつ寿命が短いことなどから、以下の検討から外した（図2-6-2-2(A), (B)参照）。そのため、以下では国内3社、台湾1社の4社のブランドディスクについて検討した。

国内A社ディスクは、評価者1及び評価者2ともに85°C～75°Cの加速試験で寿命に達したが、まだ65°Cでは寿命に達していない。このため、30°Cでの寿命予測は確定しない。しかし、85°C～75°Cでの寿命及び65°Cの推定寿命のいずれでもC社ディスクより大幅に悪いにもかかわらず、30°Cでの予測は100年程度と長い。このディスクは、接着剤の改良で高温での寿命が長くなることが確認されている。来年度、65°Cでの寿命が確定すれば、アレニウス法を使って30°Cでの寿命推定は可能となるが、その寿命推定が正しいかは、PIエラー以外の評価項目なども考慮する必要がある。今後、ディスクCと比較しながら劣化メカニズムを解明することで、低温での寿命予測をする上で貴重なデータが収集できる可能性がある。

国内B社ディスクは、評価者1、評価者2ともに2000H以上の加速試験を行っているが、すべての試験温度で寿命の確定も予測もできないなど、温・湿度加速試験に対し、極めて安定なディスクである。来年度、引き続き加速試験を継続するが、85°C～65°Cで寿命が確定し、そしてアレニウス図から寿命が予測できるかはわからない。寿命の確定と低温での寿命推定ができるようになれば、このディスクをレファレンスとして、DVD-Rの寿命推定ができる可能性は高い。

国内C社ディスクは、評価者1では85°Cで寿命が確定したものの80°C、75°Cではまだ確定せず、推定値である。評価者2では85°C～75°Cで寿命がすべて確定し、65°Cについて推定値である。高温での寿命は900Hを超えるが、85°Cと75°Cとの寿命が近い。これを基にアレニウス図から予測すると、30°Cで36年となるが、評価者1のデータも含めると、ばらつきは大きくなるが、推定寿命はもっと長くなりそうである。来年度、65°Cまでの寿命が確定すれば、寿命推定は可能と考えられる。

国内D社ディスクは、85°C～75°Cで、評価者1及び評価者2ともに寿命は確定した。85°Cでの寿命は500Hを超え、75°Cでは1800H程度で、85°C～75°Cの範囲で、国内A社ディスクの寿命を上回っている。65°Cは寿命の推定値ではあるが、これを入れたアレニウス図からの30°Cでの寿命を予測すると、評価者1は118年、評価者2は13年となり大きな差がでた。来年度、65°Cでの寿命が確定すれば寿命推定は可能になると考えられる。

以上の寿命考察から、85°C～65°Cの範囲で、国内B社ディスクの寿命が確定すれば、これを寿命推定のレファレンスとして使用できそうである。国内C社ディスクは、65°Cでの寿命が確定すれば、高温側の寿命が900Hを超えていることから、もう一つのレファレンスとして使える可能性があると考えられる。

(2) DVD-RAM ディスク

国内2社、台湾3社の合計5社ブランドディスクについて、評価者3と評価者4の2社で加速試験を実施した。65°Cでの加速試験で、5枚のディスクすべてが寿命に達したのは、評価者3で

は、台湾 D、評価者 4 では台湾 E で、それ以外はすべて予測値となっている。評価者 3 及び評価者 4 のデータをまとめて、アレニウスプロットした図が、図 2-7-13(A)～(E)である。

国内 A は、80℃、75℃の加速試験で 1700H を超えたところで、ディスク表面にハードコートの凝集（白濁）が生じ寿命が確定できなくなった。また、65℃では寿命に達せず、寿命は推定値である。このため、30℃での寿命予測値（図 2-7-14）は、現時点では参考データである。なお、このディスクではハードコートを改良することで、80℃、75℃で寿命が延びることが確認された。来年度も加速試験を継続することで、65℃の寿命データを得ることができ、寿命推定が可能になるものと考えている。

国内 B は、2 社間の測定のばらつきが小さく、極めて安定したディスクである。65℃での寿命は、まだ推定値ではあるが、30℃での寿命推定値として 85 年が得られている。2 社のデータを合わせてもばらつきが少ないことから、かなり高い確度で寿命予測が可能と見られる。このディスクは、DVD-RAM の寿命推定のレファレンスディスクとして使用可能と思われる。

台湾 C については、30℃で 103 年程度と推定したが、65℃が推定値で、各温度での寿命にもばらつきがある。このディスクは、高温側でレファレンスとなる国内 B メディアより寿命が長いですが、データのばらつきが大きい。65℃の寿命データが確定すれば、寿命推定が可能かも知れない。しかし、ばらつきが大きいことから、このタイプのディスクはレファレンスとしては使えないものと思われる。

台湾 D については、65℃で寿命が確定しているため、確定値として推定が可能のはずである。しかしながら、各温度での寿命データが大きくばらついているため、30℃での寿命推定は困難である。また、85℃、80℃、75℃のすべてで、他社ブランドより寿命が短いので、保存メディアとしては適さないと考えてよさそうである。

台湾 E については、65℃での寿命が評価者 3 で確定していない。また、各温度での寿命データにばらつきがある。無理して 30℃での寿命を推定すると、数年～100 年となり、有効な見積もりとは言えない。このブランドは、85℃、80℃での寿命の平均値が高いが、一方ばらつきが大きいので、このようなディスクは長寿命メディアとしては適さない。

以上の寿命考察から、DVD-RAM については、65℃での寿命が確定すれば、5 社のうち 3 社のディスクについて寿命予測が可能であり、推定寿命も 100 年程度はあるものと思われる。

一方、レファレンスと考えられる国内 B ブランドは、85℃での寿命が 500H 以上ある。寿命の平均値がこの時間を大きく下回るディスクやばらつきの大きいディスクは保存に適さないと考えられる。

(3) DVD-RW ディスク

国内 3 社、台湾 2 社の合計 5 社ブランドについて、評価者 5 が 85℃80%、80℃80%、75℃80%、65℃80%の温度で加速試験を実施した。85℃～75℃での加速では、B ブランドを除き、他の 4 社のブランドはすべて寿命に達した。また、65℃での加速試験では A 社及び B 社ディスクを除き、すべての温度で寿命に達している。図 2-7-17 にこれらのアレニウスプロット図を示す。なお、D 社及び E 社のディスクは、PI エラーの初期特性が悪くまた各々の温度での寿命のばらつきも大きい。寿命予測が困難なディスクなので、以下の考察から外した。

国内 A 社ブランドのディスクは、85℃、80℃、75℃の寿命が全体的に短い。特に 85℃での寿命は、B 社ディスクの 1/18 以下の 110H 程度しかないなど、特異なディスクではあるが、測定のばらつきは少ない。65℃の寿命は、まだ寿命に達していないので、推定値である。この推定値を用いて 30℃での寿命を予測すると、極めて大きな数値となり、アレニウス法による寿命推定に疑問が残る。初期の反射率が規格の最低値(18%)を下回り、また 65℃では PI エラー（図 2-6-2-6）がまだ寿命に達してはいないものの、中には R14H（反射率）が 12%まで低下するサンプルもある。劣化のメカニズムはまだ解明できていないが、3T 信号が劣化していることから記録マークの消失などが生じていると予測できる。また、R14H 信号のレベルが規格値の 18%を大きく下回るこ

とから、記録膜全体の変質も考えられる。反射率が大きく低下すれば、読めない装置も出てくるので、このような場合、PI エラーだけで判断してよいかは疑問が残る。この種のディスクでは、65℃よりもっと低温側で加速試験をする必要があろう。

国内 B 社ブランドは、85℃で寿命 (2000H) に達したものの、80℃、75℃では、2600H 経過してもまだ寿命に達していない。また、65℃では 4500H 経過でも寿命劣化の変化は見られない。このため、アレニウス法で寿命予測するのに必要なデータが得られていないことから、引き続き加速試験を継続する必要がある。現時点でわかったことは、A 社ディスクに比べ、高温でも極めて寿命が長いことである。65℃の寿命が確定すれば、このディスクを DVD-RW ディスクの寿命予測のためのリファレンスメディアとして使用できる可能性がある。

国内 C 社ブランドは、すべての加速試験温度で寿命となっており、30℃80%での寿命を 42 年と推定できた。このディスクは、85℃では、A 社ディスクよりも 3 倍も寿命が長い、一方 65℃では 2700H 程度で、A 社ディスクのそれよりも低い。加速試験の劣化ディスクは、目視でもしみが見え、反射膜の腐食が生じているものと見られる。

以上の考察から、高温で長寿命の B 社ディスクは、65℃で寿命が確定すれば、このディスクを DVD-RW ディスクのレファレンスとして用いることができそうである。一方、A 社ディスクは、高温での寿命試験から得た寿命から 30℃の寿命予測をするには疑問があり、低温側での加速試験が必要であろう。また、反射率の大幅な低下もあることから、PI エラーだけで寿命予測してよいか、という疑問も残る。

4.3.2 簡易寿命評価法

これまで、記録形 DVD ディスクの保存寿命をアレニウス法によって推定できないか、加速試験を行ってきた。しかしながら、すでに 4000H 以上の加速試験を行ってもまだ結論が出ていない。もし、短期間の加速試験などで、記録形 DVD の寿命推定できれば貴重な情報を長期間保存するユーザにとっては、大きな恩恵である。

今までの加速試験でわかったことは、DVD-R ディスク及び DVD-RW ディスクのブランドの中には、85℃～75℃で 2000H 以上の加速試験でもまだ寿命に達しないディスクがあることである。他のブランドのディスクに比べ、高温での寿命が極めて長い。今後も加速試験を続け、65℃での寿命が求めれば、これらのディスクを寿命推定のレファレンスとして使用できる可能性は高い。

その一方で、85℃の寿命が極めて短いにもかかわらず、そのまま寿命推定を行うと、30℃での推定寿命が極端に長くなるディスクがあることもわかった。この種のディスクは、低温側の加速試験による寿命データがない限り、高温だけの加速試験データだけで寿命を推定することは困難と思われる。

DVD-RAM ディスクは、DVD-R ディスクや DVD-RW ディスクよりばらつきが小さく、寿命推定が容易と思われる。85℃～75℃の加速試験で、各々の温度で寿命が確定し、また 65℃での寿命も、来年度には確実に得られそうである。現在、レファレンスとして使えそうなブランドが見つかっており、これと比較することで、簡易寿命評価が可能になるものと思われる。

この他ディスク全体に言えることは、データの信頼性を表す重要項目の初期特性が規格値を満足するか、耐光性試験や耐ガス試験で大きな変化がないか、そして、高温で加速試験を行ったとき、寿命のばらつきが水準以下か、重要項目が初期値と比較して大きく変化していないか、ディスクの表面や記録膜などに大きな変化が生じていないか、などを検討することで、簡易寿命評価の判断基準に組み込むことも可能である。また、車載機器などのアプリでは、高温での動作や保存を必要としていることから、高温試験での寿命を、判断基準に組み入れることも一つの方法であろう。

いずれにしても、来年度は 65℃での加速試験に目処をつけ、寿命推定が容易なブランドと難しいブランドとの特徴を明確化し、簡易評価方を提案したい。

4.3.3 長期保存ディスクの管理法（ドライブとの関係を考慮したエラーレート管理）

日本画像情報マネジメント協会では、電子化文書の長期保存に関する JIS 規格をまとめている。ここでは、企業が説明責任を果たすための文書、特許情報や、法律で長期保存を義務付けられている重要な文書を保存する場合の規格が議論されている。ここでは、長期とは 10 年～30 年と定義されている。このような目的の保存媒体として DVD ディスクを用いる場合には細心の注意を払ってディスクの取り扱いをするとともにドライブと関連させたメンテナンスを考えて行く必要がある。

(1) 保存媒体の選定

保存媒体として DVD ディスクを選ぶ場合には、本報告で示したような試験を行い、十分な寿命を持つことが明らかにされたものを選ぶことが重要である。

(2) 記録媒体の保存

まず、記録済みのディスクそのものについては、記録メディア工業会が示すような環境条件（同工業会ホームページ参照）を保つことが重要である。しかし、同工業会が示す 15℃～25℃に保つことが難しい場合には、本報告で行った寿命試験の対象温度である 30℃位まで範囲を広げても良いと思われる。ただし、この場合は、後で示す定期点検を行うことにより、保存を確実なものにすることも重要である。

(3) 記録媒体と記録再生ドライブ

重要な情報を保存する場合、信頼性の高い光ディスクを選択することが重要であるが、一方では、書き込みや読み出しを行うドライブの品質についても十分に配慮する必要がある。非常に多数の製品が販売されているだけに、その品質をユーザーが的確に把握することはなかなか難しい。そこで、エラーレートを測定できるドライブを選ぶとともに、次のような手順でエラーレートをチェックすることを推奨する。

(a) 記録時のエラーレートチェック

情報を書き込んだ時点で、しっかりと書き込まれたことを確認する。そのためにエラーレートを測定しその値が基準値を上回る場合には、再度書き込みを行う。この場合、書き込みには最初にかき込んだのとは異なるドライブを用いることが望ましい。基準値としては、本研究でエラーレートの許容限界値とした値の 1/3 程度の値とすることが望ましい。すなわち、PI エラー：100 以下、BER：3E-4 以下とする。十分な寿命を持つ良質なディスクであれば、エラーレートはこの値以下になることが我々のデータにより示されている。

(b) 定期点検

特に法律に保存を定められた重要な情報などを保存する場合には、書き込んだ後も定期的にエラーレートを点検することが望ましい。例えば、3～5 年ごとにエラーレートをチェックし、その値が基準値を超えているような場合には、次の(c)項に示すチェックをした後、速やかに新しい光ディスクに書き直すことが望ましい。この場合にエラーレートの基準値は許容限界値の 1/2 程度とすることが望ましい。すなわち、PI エラー：140 以下、BER：4.5E-4 以下としたい。「速やかに」の意味は「3～5 年後の次の点検までに」と考えてよい。エラーレートが上記の値以下であれば、次の 3～5 年は余裕を持ってデータを保持できる。

(c) エラーレートが基準値を超えた場合の処置

エラーレートが基準値を超えた場合には、まず、その原因がディスクにあるのか、ドライブにあるのかを判断しなければならない。一般の人が行える簡単な方法としては、ドライブを複数台用意しておき、エラーレートが基準値よりも大きくなった場合には、他のドライブで同様

のチェックを行い、それでもエラーレートが大きければディスクの劣化と判断して、データを他の媒体に書き換える。判断が難しい場合にはドライブのメーカーの専門家に判断を求める必要がある。

(d) エラーレートチェックのできるドライブ

現在のところは、エラーレートを測定できるドライブは限られているが、エラーレートを測定するためのソフトが市販されているので、これを使ってエラーレートを測定することもできる。しかしながら、ドライブとソフトの組み合わせで、測定値として得られるエラーレートが大きく異なる場合があり、正確を期すためには、ドライブメーカーが自発的にソフトを添付するか、適切なソフトを推奨することが必要である。われわれも、このような事実を周知させドライブメーカーのエラーレート測定に向けた動きが出てくるように推進していきたい。

第5章 今後の課題及び展開

5.1 課題のまとめ

(1) 長期保存に関する国際標準化

OSTA を中心に光ディスクの寿命評価法を標準化しようとする動きが始まっている。評価法についてはNIST が中心になっていると考えられるが、NIST とは昨年度の調査を行う際に訪問し議論しており、今後の標準化に関しても我が国が主導的な立場を取りつつ協力していきたい。

(2) 加速試験による光ディスクの寿命評価

昨年度はDVD-R、DVD-RAM についての寿命評価試験を行ったが、本年度は、DVD-RW の寿命評価を加えた。また、昨年度の温湿度加速試験では、研究期間が限られていたこともあって、できるだけ短時間のうちに寿命評価を行うことを目的に、85℃、80℃、75℃の3つの温度による試験を行ったが、本年度はこれに加えて、比較的低温の65℃における試験を追加し、昨年度の寿命試験の妥当性を検証した。また、昨年度は比較的高い3つの温度による試験を行ったにもかかわらず、試験の期間中には寿命限界に達しないディスクがあった。それらのディスクについては本年度も継続して同じ条件における加速寿命試験を行った。

5℃刻み、トータル10℃の温度幅で行った昨年度の加速寿命試験に比べると、本年度はトータル20℃の温度幅での試験を行ったわけで、より、精度の良い寿命推定を行うことができた。しかし、ばらつきの少ないディスクについては、昨年度行った3つの温度による加速試験でも寿命の目安は得ることができる。

その結果、DVD-R、DVD-RW、DVD-RAM とともに100年前後の寿命を持つディスクが存在することが明らかとなった。しかし、このような寿命推定ができるのは、ばらつきの小さいディスクに限られる。中には、DVD-RW において、10,000年の寿命が推定されるディスクが存在したが、このディスクは反射率の低下が大きく、ドライブによってはデータの読み出しができなくなる可能性もあるので、さらに検討が必要である。

今年度までの、寿命試験ではDVD-R、DVD-RAM については6サンプル（2評価者トータル）、DVD-RW については5サンプルによる試験を行った。しかし、製品によってはばらつきの多いものもあり、寿命の推定が困難なものがあった。今後は、さらに多くのサンプルを使用するか、統計的な手法を使った寿命推定を行う方法を検討する必要がある。なお、ばらつきの大きなディスクについては、寿命の推定を無理に行っても推定寿命自体にもばらつきが大きくなり、余り意味がないのかもしれない。

本年度に行った寿命推定は多大の時間をかけて行ったわけであるが、次々に出てくる新製品の寿命評価を適正なタイミングで効率よく行うためには、簡便で短時間に実施できる寿命評価法の開発が重要である。

(3) 長寿命光ディスクの開発

本報告では、長寿命光ディスクの開発指針を示した。評価した光ディスクの中には、ばらつきが小さく品質は良いと考えられるものの、さらに、長寿命化できる可能性を持った光ディスクがある。第4章で、DVD-R、DVD-RAM それぞれ一つのディスクを例にとり寿命が改善できることを実例として示した。これらのディスクは、温湿度加速試験によるエラーレートの劣化カーブに不連続点が見られ、不連続点以降はそれ以前と異なる要因による劣化が急速に進むことを示している。その劣化要因を分析して対策すればさらに長期の寿命を達成できる。それぞれのメーカーでこの手法を参考にしていきたい。ただし、この手法は、生産管理、品質管理がかなり良くなされており、ばらつきが少ない製品についてのみ適用可能なものであり、ばらつきが大きく品質の悪い製品では要因の分析が難しく改善策を立てるのも難しい。

5.2 今後の展開

早急に明らかにすべき課題は以下のとおりである。

(1) 寿命評価法の確立

統計的手法を導入し、製品のばらつきが大きい場合も含めて光ディスクの寿命を推定する方法を確立することが必要である。また、DVD ディスクについては書き込み速度の向上などの製品改良が頻繁に行われるので、できるだけ簡便な手法で、できるだけ短時間のうちに寿命を評価する手法を確立することが重要である。

また、アレニウスプロットによる寿命推定を行うのに適したディスクであるか否かを判定するための条件についても明らかにする必要がある。

(2) DVD ディスクの寿命推定手法の標準化

光ディスクの寿命評価法をベースとして JIS や ISO の標準規格としてまとめていきたい。この規格を明確にすることによって、重要なデータを長期保存するのに適した光ディスクをユーザーが的確に選択できる環境を作ることができる。このためにも今後とも産官学が協力してより標準としての内容を詰めていくべきである。

(3) 光ディスクとドライブの関係

重要な情報を保存する場合、信頼性の高い光ディスクを選択することが重要であるが、一方では、書き込みや読み出しを行うドライブの品質についても十分に配慮する必要がある。非常に多数の製品が販売されているだけに、その品質をユーザーが的確に把握することはなかなか難しい。そこで、4.3.3 に示した次の手順でエラーレートをチェックすることを推奨する。

- (a) 情報を書き込んだ時点で、しっかりと書き込まれたことを確認する。そのためにエラーレートを測定しその値が基準値を上回る場合には、再度書き込みを行う。
- (b) 法律に保存を定められた特に重要な情報を保存する場合には、書き込んだ後も定期的エラーレートを点検することが望ましい。例えば、3～5年ごとにエラーレートをチェックし、その値が基準値を超えているような場合には、新しい光ディスクに書き直すことが望ましい。

現在のところは、エラーレートを測定できるドライブは限られているが、エラーレートを測定するためのソフトが市販されているので、これを使ってエラーレートを測定することもできる。しかしながら、ドライブとソフトの組み合わせで、測定値として得られるエラーレートが大きく異なる場合があり、正確を期すためには、全てのドライブメーカーが自発的にソフトを添付するか、適切なソフトを推奨することが必要である。われわれも、データを提供することによりこのようなドライブの普及を支援していきたい。

— 禁無断転載 —

システム開発 16-F-9

長期保存のための光ディスク媒体の開発に関する
フイージビリティスタディ 報告書(要旨)

平成17年3月

作 成 財団法人 機械システム振興協会
東京都港区三田一丁目4番28号
TEL 03-3454-1311

委託先 財団法人デジタルコンテンツ協会
東京都千代田区麴町5丁目7番地
秀和紀尾井町 TBR ビル 815 号室
TEL 03-3512-3905

