

# 光軸調整用SIDMアクチュエータの性能評価

Reliability Testing of SIDM Actuators for Optical Alignment

尾 関 幸 宏\*      秦      良 彰\*\*      岩 下 淳 夫\*  
Yukihiro OZEKI      Yoshiaki HATA      Atsuo IWASHITA  
米 竹 淳一郎\*      三ツ木 直 樹\*      柴 谷 一 弘\*  
Junichiro YONETAKE      Naoki MITSUGI      Kazuhiro SHIBATANI

## 要旨

緑色合成レーザ内では赤外半導体LDとSHG結晶導波路間の光結合を最適調整する目的でSIDMアクチュエータが用いられる。今回、その信頼性評価として、環境試験及び動作寿命試験を実施した。

環境試験では、米国MIL規格 (Military standards) から試験条件を選定、各種試験においてデバイスは所定の故障率を満たすことが示された。

動作寿命試験では、適切な加速条件を考案し、試験を実施した。加速条件として連続高速駆動はデバイスに擬似的な性能劣化を引き起こす可能性があり、寿命推定の精度上好ましくないことが判明した。そこで実使用を考慮した加速条件として停止時間を含む間欠高速駆動を試験条件とした。その結果、故障までの測定時間のワイブル分析により、デバイスは所定寿命時間動作後の累積故障率としても極めて低い推定故障率を有することが示された。

## Abstract

An SIDM (smooth impact drive mechanism) actuator is used in a synthetic green laser module to optimally control the optical coupling between an infrared semiconductor and an SHG (second harmonic generation) waveguide crystal. To evaluate the reliability of the actuator, environment tests and operation-life tests were carried out. Various environment tests were carried out based on the U.S. military standards. As a result, it was shown that the actuator satisfied the prescribed failure rate. In the operation-life tests, an original and appropriate accelerated condition was identified. Initially it was found that accelerated testing employing continuous high-speed driving was inaccurate in estimating operation life because that condition caused a pseudo-degradation of the actuator's features. To rectify this and to approach real-world conditions, we adopted intermittent high-speed driving. As a result, a Weibull analysis of the amount of time it took for the actuator to fail estimated that the failure rate of the actuator was extremely low even as an accumulated failure rate after operation during the expected lifetime.

\* コニカミノルタオプト(株)  
技術開発本部 技術開発センター 事業開発部  
\*\* コニカミノルタオプト(株)  
光学事業本部 開発統括部 第1開発部

## 1 はじめに

モバイル用デジタル家電デバイスとして近年、手の平サイズの超小型マイクロプロジェクタ (以下 $\mu$ PJ) が注目を集めている。 $\mu$ PJではLED (Light emitting diode) 又はLD (Laser diode) をRGB (Red, Green, Blue) 光源としてMEMSスキャナやDMD, LCOS素子を介し画像を投影することで、小型軽量・低電力を図っている<sup>1)</sup>。LD素子は、赤 (640nm)、青 (450nm) は量産化されているが、緑 (530nm) は波長および出力パワーにおいて未だ研究開発レベルに留まっている。これに対して赤外(波長1060nm) LDからの出力をSHG結晶により緑色に変換して出力する小型の緑色合成LDが量産レベルにある。合成LDでは高効率で安定な出力を得るため、赤外LDとSHG結晶の光学結合をサブミクロンレベルで調整し安定化するアクチュエータ機構が必要となる。アクチュエータは同時に部品搭載公差を緩和し量産性を高めることも期待されている<sup>2)</sup>。

本稿ではそのような用途を念頭に開発された超小型SIDM型アクチュエータ (以下SIDM) について<sup>3)</sup>、概要紹介と、その信頼性評価及び、寿命推定を行い所要の特性を確認したので報告する。

## 2 SIDMの概要

SIDMは、圧電駆動と摩擦現象を利用して、可動部位が微小なスリップ・スティック動作を繰り返し、大きな移動を実現するアクチュエータである。Fig. 1に示すよ

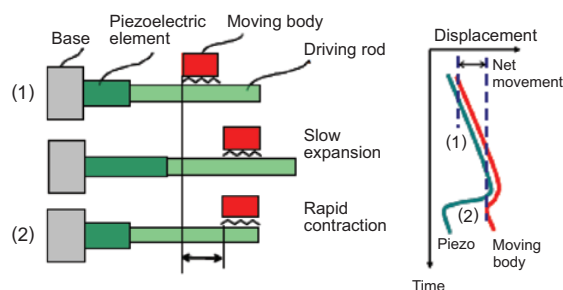


Fig. 1 Schematic of SIDM actuator, consisting of a piezoelectric element, a driving rod, and a moving body. The moving body slides over the rod with a slip-stick motion produced by the triangular vibration motion of the rod. A cycle of stick-slip motion is achieved by application of an electrical pulse to the piezoelectric element achieving expansion and contraction.

うに、光学部品を搭載できる可動部 (Moving body) は駆動軸 (Driving rod) 上に摩擦部材で搭載され、軸上を摺動する。駆動軸端には圧電素子 (Piezo) が接続され鋸歯状の振動波形を軸に加える。図で振動波形の傾きが緩やかな伸長時には移動体は摩擦により軸とともに右に移動 (スティック) するが、波形の急峻な収縮時には移動体は慣性によって軸からすべり (スリップ)、相対的に右側に移動する。非動作時には可動部はその位置を摩擦により保持するため、自己保持型となり、SIDMは光軸調整用途に適したアクチュエータである。

この特色を生かし、SIDMで緑色合成LD用に2軸調芯機能を持つアクチュエータ (以下、本デバイス) を設計した。Fig. 2にはその3面図と実物写真を示す (簡単のため移動体は省略した)。2つのSIDMを小型台座に直交に組み付けた構成で、軸上に取り付けた移動体にそれぞれコリメータレンズが付いて2次元を光軸走査できる。駆動軸 (写真中央部分) は優れた摺動性、堅牢性を持つカーボンファイバ樹脂を用い、摩擦特性安定化のため潤滑油を軸上に塗布することとした。

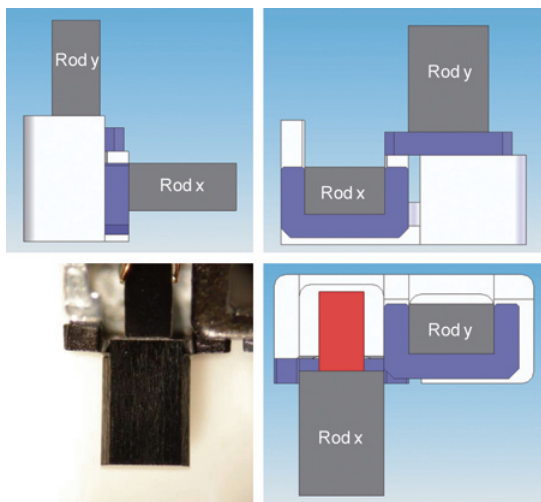


Fig. 2 Schematic of 2D implementation of an SIDM. Moving bodies are not shown. In the lower left is a corresponding photograph.

周囲の光学部品に対する影響を抑えるため、放出ガス (アウトガス) の少ないPFPE (Perfluoropolyester) 系潤滑油を選別した。潤滑油は軸表面に撥水性を付与するため<sup>4)</sup>、高湿度環境下でもSIDM動作の動作安定性の向上が期待できる。

### 3 信頼性試験

#### 3.1 動作モード

本デバイスは、光軸走査可能範囲として300 $\mu$ m以上、ステップ分解能は0.1 $\mu$ m以下の性能を有する。LD動作時の調芯維持のため要求される、アクチュエータ動作はディザ (微調) 及びスキャン (掃引) の2種類の基本動作モードの複合となる。前者は光学結合の取れた状態から

温度、経時による微小な位置ずれを補正するため、0.1 $\mu$ m程度の狭範囲で移動するモードである。調芯位置近傍でステップ分解能と同程度の移動を前後に繰り返す。後者は光学結合を最初に見つけるため、SIDMの動作可能全範囲を往復運動させるモードである。1方向に連続駆動し高速な往復移動が必要で、SIDMにとって負荷の重いモードであるが、光学結合が大きく外れることは実際の用途では少なく頻度は前者に比べて少ない。

このような事情を考慮し、本デバイス仕様規定では、ディザモードとスキャンモードの2動作モードについて別々に移動量範囲 (動作特性) と累積動作時間 (寿命仕様) を規定している。

#### 3.2 試験方法と評価結果

本デバイスの信頼性評価として、ディザモード及びスキャンモードのそれぞれで保存環境試験 (耐環境性) と動作寿命試験 (耐久性) を実施した結果を以下に示す。

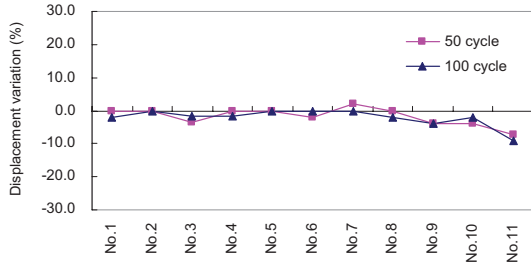
##### 3.2.1 保存環境試験

SIDMの動作変動は、摺動条件や構成部品の変化などに起因すると考えられ、外的擾乱として高温環境、低温環境、高湿環境、温度変動、機械振動、機械衝撃などを与えた。具体的な試験条件として米国MIL規格を参照し、Table 1に示す諸条件で保存環境試験を実施した。評価項目として、試験前、中、後において2動作モードでの移動量の変動を測定、その変動率を評価基準とした。試験中・後の変動率が50%以内であればそのサンプルは良品となる。試験サンプル数は2軸ペア換算で、信頼率90%のロット不良率20%以内 (LTFR (Lot tolerance failure rate) = 20% with (Confidence level) = 90%) を保証する数量とした。例えば、Table 1の温度サイクル (Heat cycle) のように11台 (22軸: 1台あたりx/yで2軸) のサンプル全数が良品の場合、その試験項目は合格 (PASS) 判定となる。

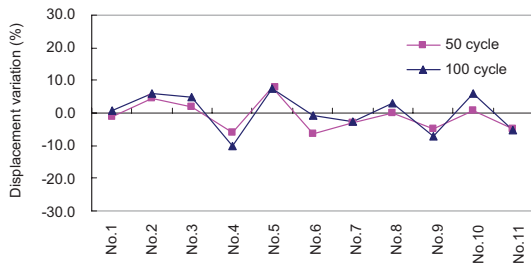
Table 1 SIDM environment test results. Damp heat, high temperature storage, low temperature storage, heat cycle, thermal shock, mechanical vibration, and mechanical shock tests were performed on predetermined numbers of the sample actuator. They passed the test in terms of LTFR of 20% at a 90% confidence level.

Test items & specifications		Sample	Pass / Fail	Comment
Storage environment test	Damp heat storage	60C/93%RH, specified period	35/36	Pass MIL 202G
	High temp storage	85C, specified period	22/22	Pass N/A
	Low temp storage	-40C, specified period	22/22	Pass N/A
	Heat cycle	-40~85C, specified cycles	22/22	Pass MIL883F
	Thermal shock	-32~70C, specified cycles, temperature ramp rate within 1min	22/22	Pass MIL-202
	Mechanical vibration	20Hz~2kHz, random,	22/22	Pass MIL 810F
	Mechanical shock	3000G, duration 6 faces x 5 times each	22/22	Pass MIL 883F

Fig. 3には、温度サイクル試験(a)ディザモード、(b)スキャンモードの移動量変動率を50サイクル、100サイクル後の2回の測定について、11台のサンプル番号を横軸にプロットした。全サンプルで各々の変動率は基準の50%以内に収まり本試験項目は合格判定であった。



(a) Dither motion change



(b) Scan motion change

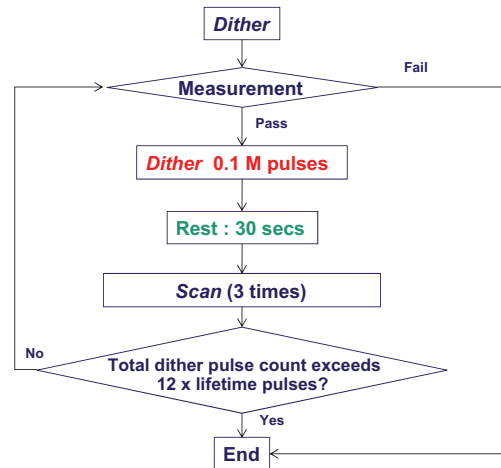
Fig. 3 Displacement change for 11 samples over heat cycle test. (a) Dither motion, 2-pulse drive displacement, change from the initial value, (b) Scan motion, 20-pulses drive displacement, change from initial value. Two curves are at 50th or 100th cycles of the heat cycle. The changes are contained within +/-50% criteria.

その他の高温保存、低温保存、機械振動、機械衝撃、熱衝撃試験においても、それぞれ全11サンプルが良品となり、合格判定となった。唯一、高温高湿保存において、11サンプル中、1サンプルで基準外が発生したが、7台の追加サンプルが全て良品となり、ロット不良率20%以下の条件で、合格判定となった。Table 1には各々の試験条件と評価結果を合せて示すが、本デバイスは米国MIL規格準拠保存環境試験において所定の不良率条件下で合格することが確認された。

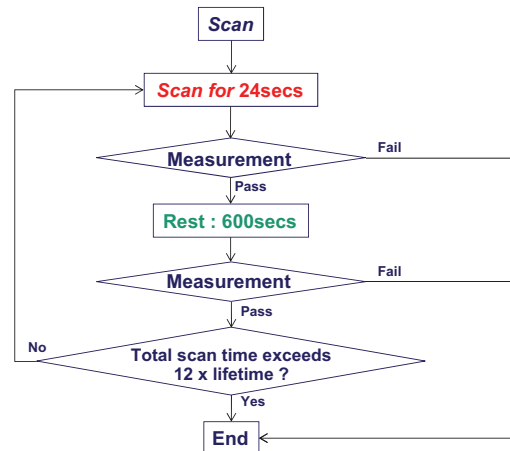
### 3.2.2 長期動作試験

SIDM特性変動は、外部環境によるもの以外に、デバイスの長期動作による摩耗症状によるものもある。摺動面（真実接触点の集まり）での摩耗や磨減が原因で摩擦変化を介して、移動量が変動し、最終的に移動体の停止（固着故障）に至ることもある。長期動作試験はこのような固着故障に対する信頼性を確かめることを目的に、移動量の変動率を長期間の動作にわたって測定した。デバイスの実際の動作をどのように模擬するかが問題となるが、ここでもディザモードとスキャンモードに分けて別々に試験を実施した。

長期動作試験をできるだけ短期で行うため、加速試験として当初、連続高速駆動を用いたが、実使用条件では発生しえない擬似的故障が発生した。これを排し、より確からしい動作寿命評価のため、Fig. 4 (a), Fig. 4 (b)に示すような、連続高速駆動の合間に周期的に停止時間（Rest）を入れる間欠高速駆動条件を提案した。動作寿命となる累積駆動時間は、測定時間から停止時間を除いた正味の動作時間となる。試験では打ち切り時間として、仕様寿命の12倍を設定し、その間の移動量変動を測定した。周囲温度は最大温度の60°Cとした。



(a) Dither operation test flow with a rest time and scan



(b) Scan operation test flow with a rest time

Fig. 4 Measurement flow chart for (a) SIDM dither operation mode and (b) scan operation mode. Each procedure contains a rest period long enough to avoid spurious failure and short enough to accelerate the test.

それぞれ6台のサンプルで、12軸について測定した結果をFig. 5 (a)ディザモード、(b)スキャンモードについて示す。横軸は累積時間を仕様寿命で正規化した数値、縦軸は試験開始時を1とした場合の各累積時間での移動量である。全サンプルで仕様寿命の12倍でも、固着故障はなく各々の変動率も評価基準である50%以内に十分収まっていた。

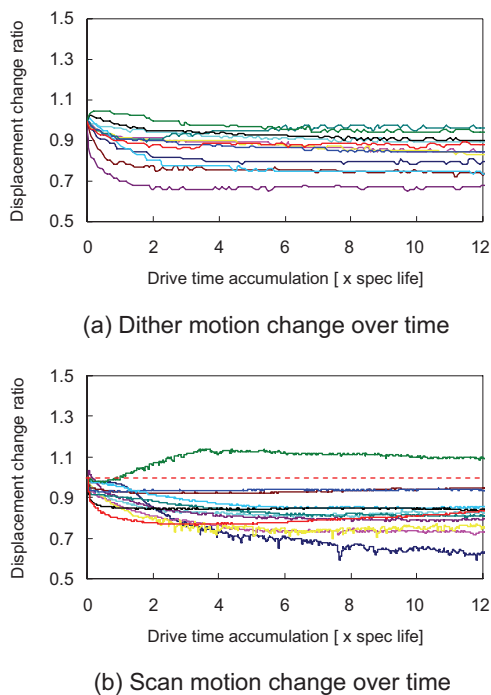


Fig. 5 Dither (2-pulse displacement) or scan (20-pulse displacement) is plotted as monitored during the operational test. Each graph has 12 curves for 12 axes tested. The operation period was 12 times the specification fixed lifetime. All samples' variations from initial displacement were within +/-50%.

これらの条件と結果はTable 2に纏めたが、デザイナーモードとスキャンモードの両モードで全12軸において良品となり、長期動作試験はロット不良率20%以下の条件で合格判定となった。

Table 2 Accelerated operation life test results of SIDM actuators. Scan motion and dither motion tests in Fig. 4 are performed on predetermined numbers of samples. Corresponding plots are in Fig. 5.

Test items & specifications		Sample	Pass /Fail	Comment	
High-temperature operation life	Scan life test at 60C	60C, 24s-drive & 600s-rest until 12 x lifetime	12/12	Pass	Per application note
	Dither life test at 60C	60C, 0.1 Mpulses-drive, 30s-rest & 3 scan until 12 x lifetime	12/12	Pass	Per application note

## 4 考察

前節では、長期動作試験の加速試験として、Fig. 4に示す間欠高速駆動条件を用いた。加速方法として連続高速駆動は測定時間を短縮し試験効率に優れるため、連続駆動による評価を始めたが、その過程で擬似的故障が発生している可能性が判明した。評価サンプルの幾つかで固着故障が発生したが、それは一時的な現象であり、暫く放置すると元の正常な動作に復帰することがわかった。連続駆動により、通常使用では発生しない故障モードを誘発されていると考え、本デバイスの連続駆動時の摩擦の動的変化を観察した。Fig. 6にはSIDMの連続駆動時の移動体と駆動軸の摩擦の変化を駆動時間に対して測定

した結果を示す。横軸は仕様寿命で正規化してある。内挿した直線で示すように、連続駆動時間に比例して摩擦が単調に増加している。このサンプルは18x仕様寿命で一時的な固着故障（擬似的故障）が発生した。摩擦が臨界点に達すると移動体はスリップできなくなるためSIDM原理から動作不能、停止（固着）することになる。

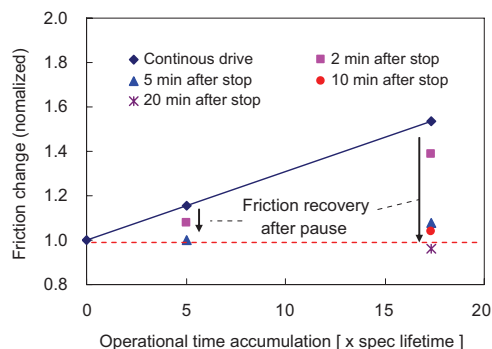


Fig. 6 Friction change versus operation time and the friction level's recovery after operation stop. The friction increases as the SIDM is continuously operated, but the friction level recovers to its starting value when SIDM is stopped for 10mins. If friction continues to increase, the SIDM stalls suddenly at its critical friction value.

Fig. 6には連続駆動を止めた瞬間からの摩擦の時間変化の測定結果も重畳（点の列）した。駆動停止時点から摩擦は低下を始め10分後にはほぼ駆動前の値に戻ることが判明した。固着につながる比較的短期の駆動時間での摩擦上昇は一時的で可逆な現象と考えられる。

この現象を説明する仮説として、Fig. 7のような摺動面（真実接触点の集まり）での潤滑状態を考える。長期間の連続動作が継続すると、接触界面の潤滑油がその粘度にもよるが、漸次に掃き出され、潤滑機能が失われて摩擦係数が増大すると考えられる。摩擦がスリップ臨界点に達すると固着停止する。一方、連続動作を止めると、掃き出されて周辺に溜まっていた潤滑油が毛細現象により漸次摺動面に戻ってくるため潤滑機能が回復し摩擦が低下、SIDM条件が正常化すると考えられる。

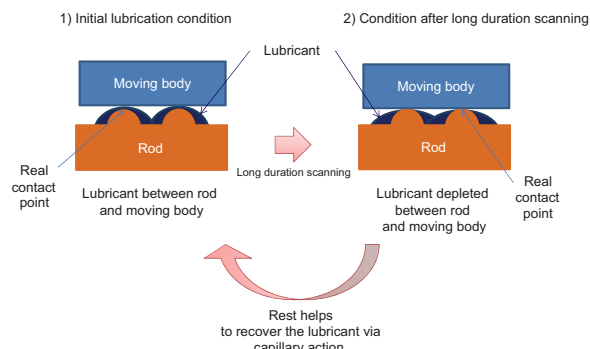
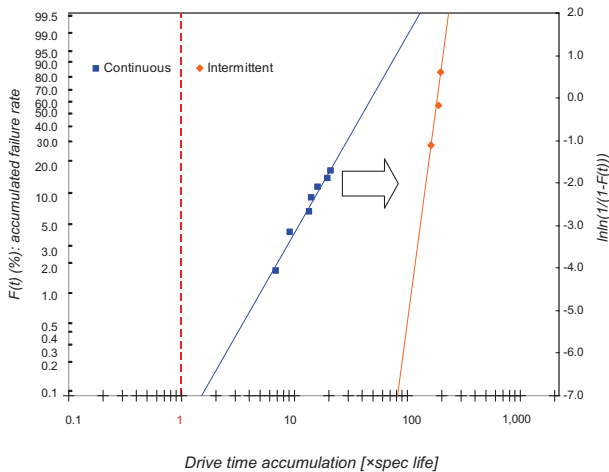


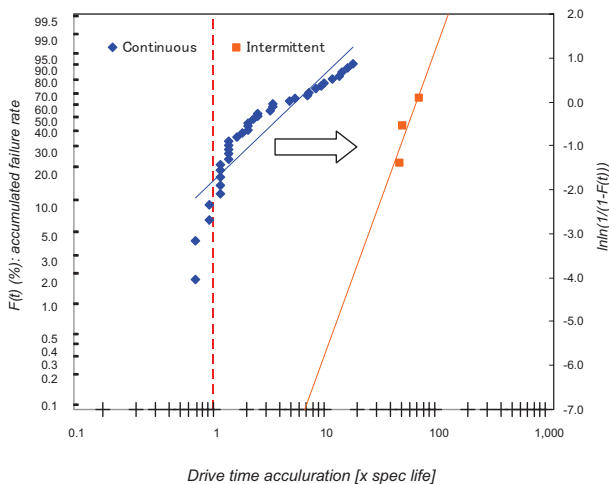
Fig. 7 Schematics of lubricant depletion model. Viscous lubricant layer is gradually depleted at the real contact points over the course of long, continuous scanning motion, leading to frictional increase and eventual failure such as stall. The proper rest time during scan motion helps lubricant recover its lubricity through capillary action.



本デバイスの寿命推定間欠高速駆動による改善効果の仮説検証を兼ねて、連続高速駆動と間欠高速駆動の2条件でサンプル寿命試験を実施した。50%変動率の超える時点を故障とし、それまでの累積動作時間をワイブル分析した。その結果をFig. 8 (a) ディザモード, (b) スキャンモードそれぞれについて示す。



(a) Comparison of dither operation failure time between continuous and intermittent operation test. In terms of MTTF, 20-time fold improvement by the intermittent condition was achieved.



(b) Comparison of scan operation failure time between continuous and intermittent operation test. In terms of MTTF, 30-time fold improvement by the intermittent condition was achieved.

Fig. 8 Weibull plots for dither and scan operation life test with two drive conditions, continuous and intermittent as defined in Fig. 4. In both dither and intermittent, life-time improved by a factor of approx. 30. This was due to avoidance of spurious failure mode by the introduction of rest time.

擬似的故障を回避する間欠連続駆動条件を用いた結果、動作寿命は20倍以上改善することが判明した。この駆動条件は実使用を考えて、より確度の高い寿命推定を与える条件でもある。本デバイスは所定の寿命時間での累積故障率で見ても0.1%以下と十分に小さく、その長期動作信頼性でも性能が十分実証された。

## 5 まとめ

緑色合成LD内で光軸調整に用いる超小型SIDM型アクチュエータを開発し、その信頼性試験を実施した。

米国MIL規格などを参考にした、保存環境試験で、所定の不良率 (LTFR=20%以下) を満足することが示された。

動作寿命性能については、実使用を考慮した停止時間を含む加速駆動条件 (間欠高速駆動条件) を導入し、擬似的故障の少ない加速試験により、デバイス故障までの累積時間を測定、そのワイブル分析を行った。その結果、推定寿命は20倍程度的大幅な改善が見られ、所定の仕様寿命時間後の累積故障率でも0.1%以下の低故障率となることが示された。本デバイスは目的となる用途において仕様を十分満足する信頼性が確認された。

なお、連続駆動条件下での擬似的故障確率を改善するには、仮説で示した潤滑油の掃き出しを抑えるのが有効であり、ハードディスク基板などに用いられる潤滑油の化学吸着<sup>5)</sup>等のハードコート方法などが対策として考えられる。コストも含めて今後の課題としたい。

### ●参考文献

- 1) 金野, 久保, レーザー走査式超小型プロジェクタ, Konica Minolta Tech. Rep. 7 (2010) 130.
- 2) V. Bhatia, S.J. Gregorski, D. Pikula, S.C. Chaparala, D.A.S. Loeber, J. Gollier, J.D. Gregorski, M. Hempstead, Y. Ozeki, Y. Hata, K. Shibatani, F. Nagai, N. Mori, Y. Nakabayashi, N. Mitsugi, S. Nakano, Efficient and compact green laser for microprojector applications, J. Soc. Info. Display 17 (3) (2009) 1.
- 3) Y. Ozeki, Y. Hata, K. Shibatani, F. Nagai, N. Mori, Y. Nakabayashi, et al., Miniature multiple-axes adaptive optics unit employing SIDMs and its application to an efficient green laser module, Konica Minolta Tech. Rep. 6 (2009) 82.
- 4) B. Bhushan, H. Lee, S.C. Chaparala, V. Bhatia, Nanolubrication of sliding components in adaptive optics used in microprojectors, Appl. Surf. Sci. 256 (2010) 7545.
- 5) T. Kato, M. Kawaguchi, M. M. Sajjad and J. Choi, Friction and durability characteristics of ultrathin perfluoropolyether lubricant film composed of bonded and mobile molecular layers on diamond-like carbon surfaces, Wear, 257, (2004) 909.