

## MEMSミラー

## 目次

## 1. 概要

- p.01 1-1 構造  
1-2 動作原理  
1-3 駆動方式

## 2. 動作モード

- p.03 2-1 リニアモード  
2-2 ノンリニアモード  
2-3 ミラーの種類と動作モード

## 3. 仕様

- p.04 3-1 リニアモード1次元タイプ  
3-2 ラスタースキャン2次元タイプ  
3-3 リニアモード2次元タイプ

## 4. 使用方法

- p.19 4-1 リニアモード1次元タイプ  
4-2 ラスタースキャン2次元タイプ  
4-3 リニアモード2次元タイプ

## 5. 高精度な制御

- p.29 5-1 光学的振れ角-駆動電流特性の補正曲線  
5-2 低速動作と高速動作  
5-3 リニアモード  
5-4 リンギングの補正  
5-5 温度補正  
5-6 光学的振れ角の再現性

## 1. 概要

当社のMEMSミラーは、MEMS技術を応用した電磁式の小型ミラーです。磁石の磁界中において、ミラー周辺のコイルに電流を流すと、フレミングの左手の法則によってローレンツ力が発生し、ミラーを駆動します。MEMSミラーは、低消費電力とともに、広い光学的振れ角、高いミラー反射率といった特長をもっています。

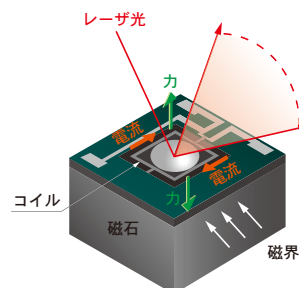
## » 特長

- ▶ 低電圧駆動
- ▶ ミラーの振れ角が大きい
- ▶ 小型
- ▶ 評価回路 (USBインターフェース)を用意 (別売)

## 1-1 構造

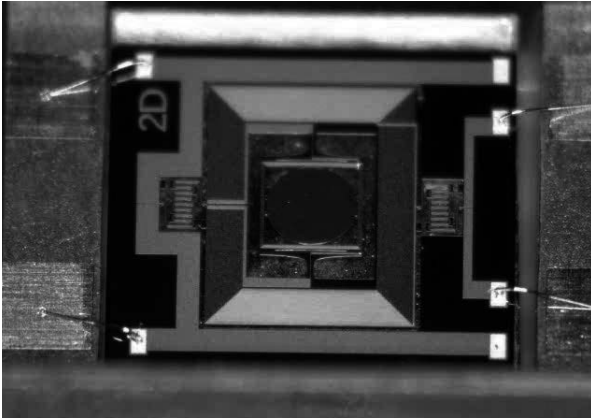
MEMSミラーは、ミラー、コイル、トーションバーから成るミラーチップと磁石から構成されています [図1-1]。ミラーチップ [図1-2]は、MEMS技術を用いて、シリコン基板の一部を薄膜化して形成されます。電磁式ミラーではミラーチップの周囲に磁石を配置する構成が一般的ですが、当社のMEMSミラーは小型で強力な磁石をミラーチップの下に配置して超小型サイズを実現しています。磁石はミラー周辺のコイルに対して最適な磁界を与えるように工夫が施されています。なおMEMSミラーには、1軸の1次元タイプと2軸の2次元タイプがあります。

[図1-1] 構造



KOTH00583B

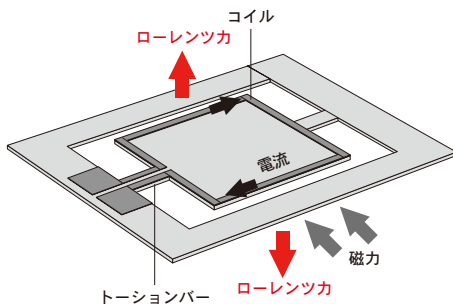
[図1-2] ミラーチップ



## 1-2 動作原理

ミラーの角度を制御する基本的な動作原理は、フレミングの左手の法則に基づいています [図1-3]。磁界に直交する方向にコイルを配置して、コイルに電流を流すとコイルに力が加わります。この力をローレンツ力と呼び、その大きさは、電流と磁界の強さに比例します。

[図1-3] 動作原理



KOTH0072JB

ミラーは、トーションバーと呼ばれる梁で支えられています。トーションバーはミラーの回転軸であるとともに、ミラーの回転を抑制する“ねじりバネ”としても機能します。ミラー周辺のコイルに電流が流れると、ミラーを回転させるトルク（ローレンツ力）とともに、トーションバーによる“ねじりバネ”の弾性力が反対方向に働き、この2つの力が釣り合ったところでミラーの回転は止まります。コイルに流れる電流の大きさを変えてトルクを制御し、ミラーの角度を変化させることが可能となります。

MEMSミラーは、質量・構造・バネ定数で決まる固有振動周波数で共振します。共振を利用すると、小さな電流で大きなミラーの振れ角を実現できるとともに、高速動作が可能となります。なお共振時は、ミラーの動きは正弦波となり、複雑な動きはできないため、共振は一定の往復運動で十分な用途に利用されます。

共振を利用する動作を共振モード、共振を利用しない

動作を非共振モードと呼びます。非共振モードは、駆動電流と光学的振れ角の優れた直線性を利用するリニア動作に使われるため、リニアモードとも呼ばれます。なお共振モードは、ノンリニアモードとも呼ばれます。

## 1-3 駆動方式

一般的なMEMSミラーの駆動方式には、いくつかの種類があります [表1-1]。当社のMEMSミラーは電磁式を採用しており、低電圧駆動ながら、共振モードまたは非共振モードで動作させることができる方式で、優れたバランスもっています。電磁式MEMSミラーは、電池駆動のポータブル機器など広い用途への応用が可能です。

[表1-1] 一般的なMEMミラーの駆動方式

駆動方式	静電式	圧電式	電磁式 (1次元タイプ)
回転トルク	小	大	中
駆動電圧	50 V~150 V	20 V~50 V	-
駆動電流	-	-	約20 mA
消費電力	<<1 mW (約0 mA)	大 (約20 mA)	約100 mW (約5 V)
光学的振れ角 (ノンリニアモード)	±10°	±25°	±25°
光学的振れ角 (リニアモード)	±5°	制御が難しい	±15°

## 2. 動作モード

「1-2 動作原理」で述べたように、MEMSミラーの動作モードには、リニアモード（非共振モード）とノンリニアモード（共振モード）の2つがあります。

### 2-1 リニアモード

リニアモードは、駆動電流によってミラーの光学的振れ角を高精度に制御する場合に用いる動作モードです。駆動電流とミラーの光学的振れ角の関係は直線性に優れ、駆動電流に対して高い角度再現性をもっています。なお、リニアモードは高速動作には適していません。ミラーが共振しないように、ミラー固有の共振周波数よりも低い周波数で駆動する必要があります。通常、共振周波数の1/10～1/5以下の周波数を推奨します。

### 2-2 ノンリニアモード

ノンリニアモードは、ミラーの共振周波数で駆動するモードです。高速動作が可能ですが、ミラーの光学的振れ角の高精度な制御はできません。ノンリニアモードは、ノンリニアモードMEMSミラー、あるいはノンリニアモード軸を駆動するとき 사용됩니다。ノンリニアモードで駆動するためには、ミラーの共振周波数と同じ周波数の正弦波または矩形波の電流信号を入力します。

ノンリニアモードでは、矩形波を入力した場合でも、ミラーの振れ角は正弦波として動作します。また、駆動電流に対して、光学的振れ角には位相遅れが生じます。

### 2-3 ミラーの種類と動作モード

MEMSミラーには、1軸の1次元タイプと2軸の2次元タイプがあります。2次元タイプには、各軸の動作モードが異なるタイプがあります [表2-1]。

現在、当社は表2-1の一部のMEMSミラーを提供しています。今後の製品化の予定については、当社営業までお問い合わせください。

[表2-1] MEMSミラーの種類

タイプ	型名	動作モード		主な用途
		第1軸	第2軸	
1次元	S12237-03P	リニアモード	—	計測
	—	—	ノンリニアモード	高速計測
2次元	S13124-01	リニアモード	リニアモード	計測
	S13989-01H	リニアモード	ノンリニアモード	画像表示
	—	ノンリニアモード	ノンリニアモード	高速画像表示

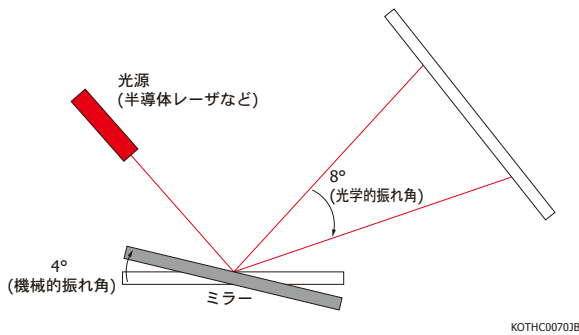
## 3. 仕様

### 3-1 リニアモード1次元タイプ

#### » 光学的振れ角の定義

当社は、MEMSミラーの振れ角を機械的振れ角でなく光学的振れ角で定義しています。光学的振れ角は、光源からの光をミラーに当てたときに入射光と反射光がなす角度で、ミラーが傾く角度である機械的振れ角の2倍です [図3-1]。

[図3-1] 光学的振れ角



#### » 絶対最大定格

MEMSミラーの絶対最大定格の例を表3-1に示します (S12237-03P: リニアモード1次元MEMSミラー)。絶対最大定格を超えない範囲でMEMSミラーを使用する必要があります。

[表3-1] 絶対最大定格 (S12237-03P)

(指定のない場合はTcase=25 °C)

項目	記号	定格値	単位
駆動電流	I <sub>s</sub>	±20	mA
光学的振れ角	θ <sub>s</sub>	±18	°
動作温度	T <sub>opr</sub>	-40 ~ +80	°C
保存温度	T <sub>stg</sub>	-40 ~ +85	°C

最大光学的振れ角は、これ以上にミラーの振れ角を大きくすると、磁石などにミラーが接触してミラーの損傷を引き起こす角度として規定しています。

最大駆動電流は、コイル配線が溶断する可能性のある電流値として規定しています。駆動電流を大きくすると、駆動電流が絶対最大定格に達する前に最大光学的振れ角に到達します。駆動電流を絶対最大定格まで大

きくしてはいけません。最大光学的振れ角を超えないように駆動電流の大きさに注意する必要があります。特に高速動作の場合、同じ電流で駆動していても、共振周波数に近づくと最大光学的振れ角を超えてミラーを破損させることがあります。特に共振周波数における振れ角は低周波の振れ角の数十倍以上になり制御が難しくなるため、リニアモードMEMSミラー・軸では、共振周波数で駆動しないでください。

ノンリニアモードMEMSミラー・軸は、必ず共振周波数で駆動する必要があります。なおノンリニアモードにおいて共振周波数で動作させたときの光学的振れ角は、他の周波数のときの光学的振れ角とは大きく異なります。共振周波数以外で駆動すると、推奨動作条件の光学的振れ角が得られるように駆動電流を調整しても、予期しない光学的振れ角となり、ミラーが破損する場合があります。

なおノンリニアモードMEMSミラー・軸を駆動する場合には、優れた温度安定性をもつ基準信号発生器から生成された駆動信号を用いてください。

#### » 推奨動作条件

推奨動作条件は「電気的および光学的特性 [表3-3]」を保証するための動作条件です。なお、推奨動作条件を若干超えても絶対最大定格を超えない範囲ならば、MEMSミラーの損傷には至りません。

表3-2にS12237-03Pの推奨動作条件を示します。推奨光学的振れ角は±15度ですが、絶対最大定格は±18度であり、約3度のマージンがあります。また推奨駆動周波数は、DC (直流) から100 Hzまでです。100 Hz以上の場合は、ノンリニアモード動作となりMEMSミラーが破損する場合がありますので、推奨動作条件の範囲で使うことを推奨します。

[表3-2] 推奨動作条件 (S12237-03P)

項目	Min.	Typ.	Max.	単位
動作モード	リニアモード			-
光学的振れ角	-15	-	+15	°
駆動周波数	DC	-	100	Hz

#### » 電気的および光学的特性

表3-3に、S12237-03Pの電気的および光学的特性を示します。

[表3-3] 電気的および光学的特性 (S12237-03P)

(指定のない場合は推奨動作条件)

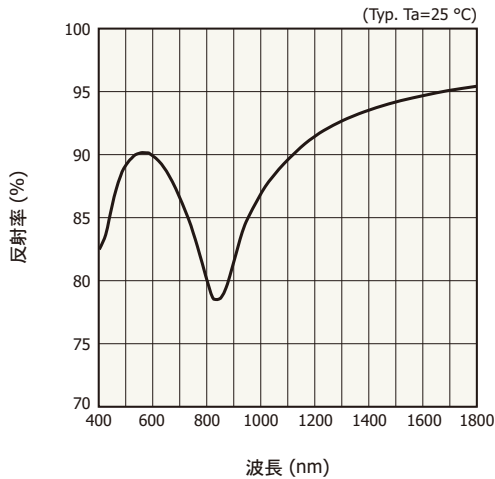
項目	記号	条件	Min.	Typ.	Max.	単位	
ミラーサイズ	A		φ2.59	φ2.60	φ2.61	mm	
駆動電流	Is	Ta=25 °C fs=DC	θs=-15°	-17	-15	-13	mA
			θs=+15°	+13	+15	+17	
共振周波数	fs-R	Is=0.6 mA p-p	500	530	560	Hz	
反射率	Or	λ=450~650 nm	80	-	-	%	
コイル抵抗	Rs	Ta=25 °C, Is=0.2 mA	135	165	195	Ω	

❁ ミラーの反射率

MEMSミラーのミラー面はアルミ金属が蒸着されており、可視域に対して高い反射率をもっています。図3-2に波長と反射率の関係を示します。赤・青・緑の3原色に対して85%以上の高い反射率を実現しています。

なおミラー部以外のチップ面の反射はゼロでないため、光源から照射されたビームサイズがミラーサイズ以上の場合、迷光としてターゲットに写ってしまいます。ビームサイズは、ミラーサイズに対して小さくなるように光学設計をしてください。

[図3-2] ミラーの反射率



KOTH80020JB

❁ 駆動電流

駆動電流は、光学的振れ角を規定する重要なパラメータです。駆動電流は、リニアモードとノンリニアモードにおいて、推奨動作条件における光学的振れ角の最小値および最大値が得られる値として規定されています。

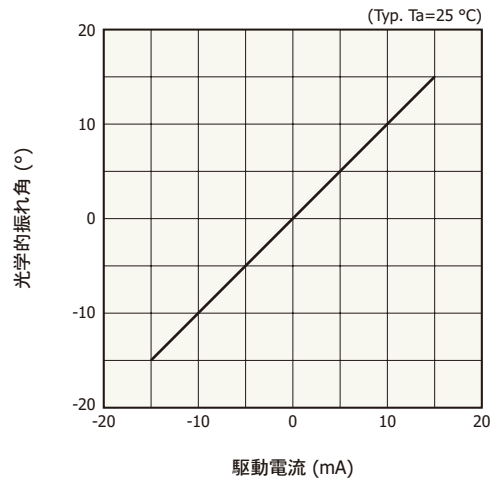
図3-3に、S12237-03Pの光学的振れ角—駆動電流特性を示します。光学的振れ角と駆動電流の関係は、直線で近似できます。最大と最小の駆動電流を直線で結んだグラフから、任意の振れ角の電流を算出できます。こ

の方法によって、1°以下の精度で任意の光学的振れ角に制御することができます（さらに高精度に制御したい場合は「5. 高精度な制御」を参照してください）。

図3-3において、駆動電流の正負は、MEMSミラーのコイルに流す駆動電流の異なる向きを表しています。駆動電流の向きにより、光学的振れ角の向きを変えることができます。図3-3では、1方向の駆動電流に対して15°の光学的振れ角が得られ、正負の2方向の駆動電流の制御により30°の光学的振れ角が得られます。

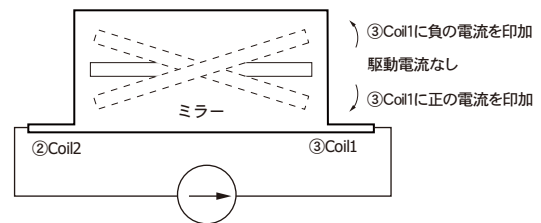
なお、リニアモードMEMSミラーの光学的振れ角特性はDC動作で測定しています。

[図3-3] 光学的振れ角—駆動電流 (S12237-03P)



KOTH80004JC

[図3-4] 駆動電流と光学的振れ角の方向 (S12237-03P)

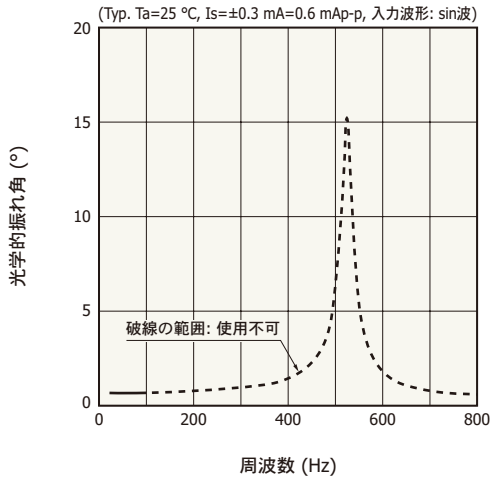


KOTH80071JC

❁ 共振周波数

リニアモードにおいて、共振周波数は駆動周波数の範囲を決める目安となります。図3-5にS12237-03Pの周波数特性を示します。共振周波数においては、0.6 mAという非常に低い駆動電流で、大きな光学的振れ角となっています。駆動電流が少しずれるだけで、光学的振れ角の絶対最大定格を超えてしまい、ミラーを破損させる危険性があります。リニアモードにおいては、決して共振周波数に近い周波数で駆動しないでください。

[図3-5] 周波数特性 (S12237-03P)

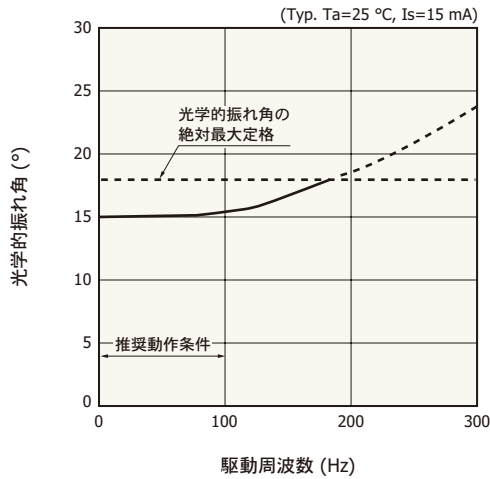


KOTHB0016JB

🔧 駆動周波数

低周波域における光学的振れ角の周波数特性を図3-6に示します。ここでは、電流振幅 15 mAの正弦波で駆動しています。駆動周波数の推奨動作条件 100 Hz以下では、ほぼ平坦な周波数特性を示していますが、駆動周波数が高くなるにしたがい光学的振れ角が大きくなります。180 Hz付近で光学的振れ角の絶対最大定格 18°に達し、ミラーが破損する可能性が高くなります。推奨動作条件（駆動周波数: DC~100 Hz）において、MEMSミラーを動作する必要があります。

[図3-6] 光学的振れ角—駆動周波数 (S12237-03P)



KOTHB0022JA

🔧 コイル抵抗

MEMSミラーのミラー周辺のコイル配線によるインダクタンス成分は非常に小さく、リニアモードMEMSミラーは数μH以下、ノンリニアモードMEMSミラーは0.1 μH以下です。このためリニアモードの周波数領域: 数百Hz付近や、ノンリニアモードの周波数領域: 数MHz付近では、コイルのインピーダンスは0.1 Ω以下で、コイルの純抵抗

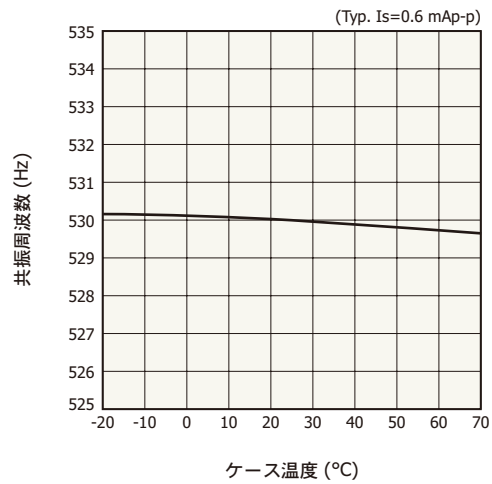
成分に比べて無視できます。ほとんどの場合、コイル抵抗は、純抵抗とみなして設計して構いません。なお電気的および光学的特性に記載されたコイル抵抗は、25 °C時の抵抗です。

🔧 温度特性

MEMSミラーにおいて、コイル抵抗、磁石の磁力、共振周波数などは温度特性をもっています。広い温度範囲で高精度にミラーの光学的振れ角の制御を行う場合には、温度特性について注意する必要があります。

S12237-03Pの共振周波数の温度特性を図3-7に示します。

[図3-7] 共振周波数の温度特性 (S12237-03P)

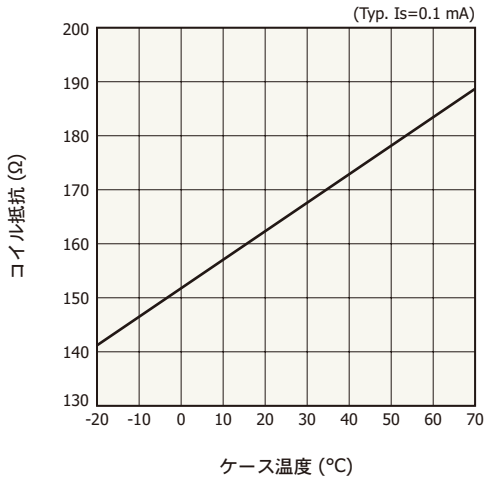


KOTHB0019JB

動作温度範囲において、共振周波数は0.1~0.2%程度の変動をし、特性への影響は無視できます。

S12237-03Pにおけるコイル抵抗の温度特性を図3-8に示します。電圧源でMEMSミラーを駆動する場合には、コイル抵抗の温度特性を無視することはできません。電流源でMEMSミラーを駆動する場合には、コイル抵抗の温度特性を無視することができます。このため、電流源でMEMSミラーを駆動することを推奨します。

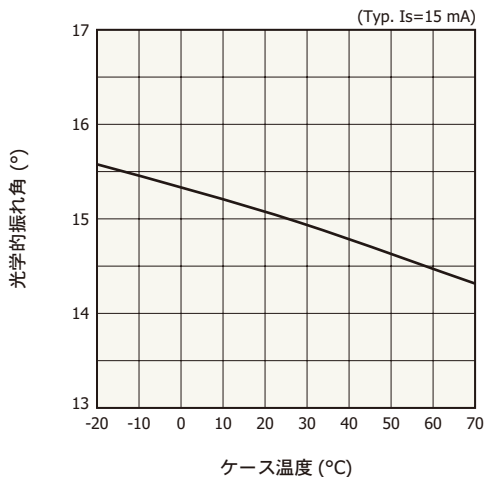
[図3-8] コイル抵抗の温度特性 (S12237-03P)



KOTHB00183B

磁石の磁力の温度特性を測定することは容易ではありません。そのため、磁石の温度による磁力の変化は、温度による光学的振れ角の変化から推定します。温度に対する光学的振れ角の変化を図3-9に示します。

[図3-9] 光学的振れ角の温度特性 (S12237-03P)



KOTHB00861A

図3-9の測定時には電流源を用いています。電流は、コイル抵抗の温度変化による影響を受けません。したがって、温度による磁力の変化によって、光学的振れ角が変化しているものと考えられます。

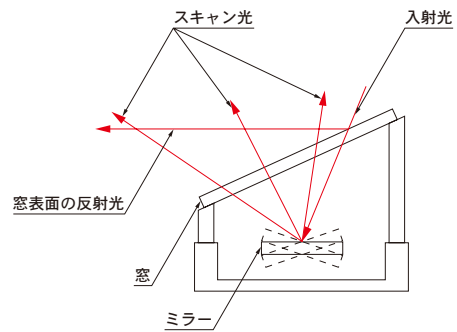
図3-9では、温度による磁力の変化によって±0.5°程度の振れ角誤差が生じていることが分かります。コイル抵抗は温度によって変化するため、コイル抵抗を読み取ることでチップの温度をモニタすることができ、温度補正が可能となります。

## 3-2 ラスタースキャン2次元タイプ

### 》 光学的振れ角の定義

ラスタースキャン2次元タイプMEMSミラー S13989-01Hには、高信頼性の気密パッケージとするために、低速軸走査方向に対して20°傾斜した窓材が付いています。窓の表面または裏面で反射したレーザー光が、ミラー走査の投影範囲に入らないように窓材の傾斜を設定しています [図3-10]。

[図3-10] 窓材の傾斜による効果

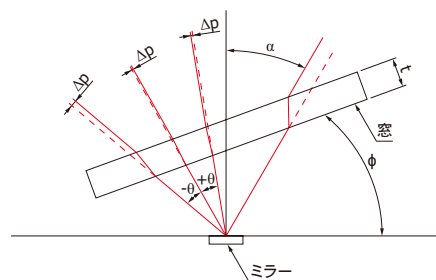


KOTH00821A

MEMSミラーの光学的振れ角は、機械的振れ角の2倍に定義しています。

傾斜した窓材をレーザー光が透過するときに屈折するため、ミラーに対するレーザー光の入射角や機械的振れ角によって、ミラーの反射光の光路にズレが生じます [図3-11]。この「ミラー反射光の光路ズレ量」の計算方法を示します。

[図3-11] ミラー反射光の光路ズレ



KOTH00833A

光路ズレ量  $\Delta p$  [mm]は式 (3-1)で表されます。

$$\Delta p = \frac{t \sin\{\gamma - \arcsin(\frac{\sin\gamma}{n})\}}{\cos\{\arcsin(\frac{\sin\gamma}{n})\}} \dots\dots\dots (3-1)$$

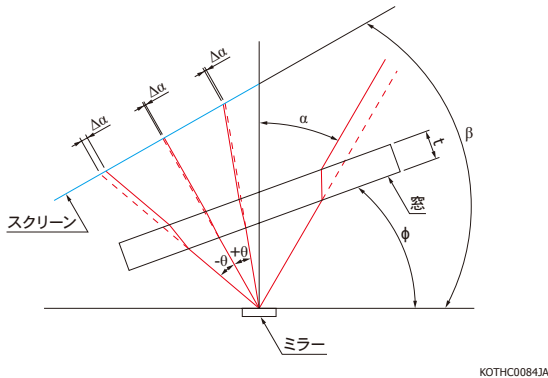
- t: 窓材厚さ [mm]
- $\gamma$ :  $(\alpha - \phi) - \theta$
- $\alpha$ : ミラーに対するレーザー光の入射角 [°]
- $\phi$ : ミラーに対する窓材の角度 [°]
- $\theta$ : ミラーの反射光の光学的振れ角 [°]
- n: 窓材屈折率 ( $\lambda=546$  nmのとき1.526)

図3-12において、ミラー（機械的振れ角: 0°）に対してβ°傾いた平坦なスクリーンへレーザー光を投影することを想定します。スクリーン上における位置のズレ量Δα [mm]は式(3-2)で表されます。

$$\Delta\alpha = \frac{\Delta p}{\cos\eta} \dots\dots\dots (3-2)$$

$$\eta = (\alpha - \beta) - \theta$$

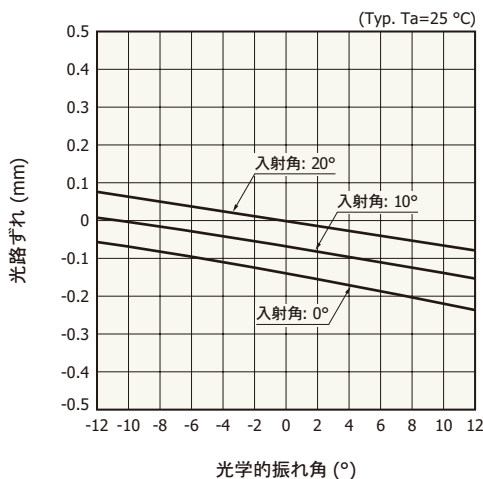
[図3-12] スクリーン上の位置のズレ



ミラーに対するレーザー光の入射角や機械的振れ角に応じて、窓材透過時の屈折による光路のズレを考慮する必要があります。

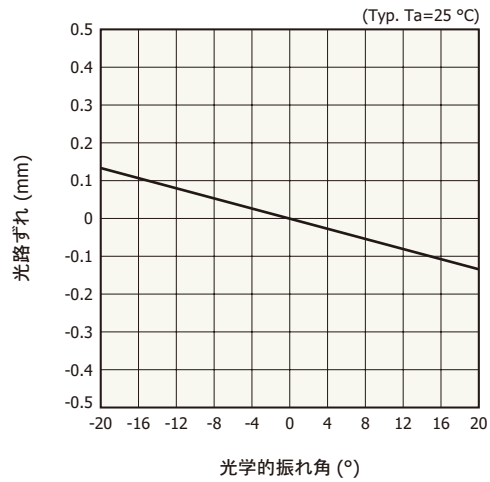
低速軸走査方向で光学的振れ角が変化したときの光路ズレを図3-13に示します。ミラーに対する入射角20°の場合、光路ズレは±100 μm以下です。

[図3-13] 光路ズレ—光学的振れ角 (低速軸)



高速軸走査方向で光学的振れ角が変化したときの光路ズレを図3-14に示します。光路ズレは、ミラーに対する入射角度の影響を受けません。なお、窓材による光の屈折により、光路ズレは発生します (±180 μm以下)。

[図3-14] 光路ズレ—光学的振れ角 (高速軸)



### ▶ 絶対最大定格

2次元タイプMEMSミラー S13989-01Hの絶対最大定格を表3-4に示します。絶対最大定格を超えない範囲でMEMSミラーを使用する必要があります。

[表3-4] 絶対最大定格 (S13989-01H)

(指定のない場合はTa=25 °C)

項目	記号	定格値	単位
高速軸	光学的振れ角	θf	±22 °
低速軸	駆動電流	Is_dc	±100 mAdc
	光学的振れ角	θs_max	±14 °
消費電力	Pcoil	520	mW
動作温度	Topr	-20~+60	°C
保存温度	Tstg	-40~+85	°C

高速軸はノンリニアモード専用軸で、必ず共振周波数で駆動する必要があります。共振周波数以外で駆動したときの光学的振れ角は、共振周波数で駆動したときの光学的振れ角とは大きく異なります。共振周波数以外で駆動すると、推奨動作条件の光学的振れ角が得られるように駆動電流を設定しても、予期しない光学的振れ角となり、ミラーが破損する場合があります。

低速軸は、リニアモード専用軸です。光学的振れ角が絶対最大定格を超えないように駆動電流を設定する必要があります。また、高速動作の場合、共振周波数に近づくとき最大光学的振れ角を超えてミラーが破損することがあります。共振周波数のときの光学的振れ角は低周波数のときの光学的振れ角の数百倍になり制御できなくなるため、低速軸を共振周波数で駆動しないでください。

絶対最大定格の低速軸の駆動電流は、配線が損傷す



る直流電流値です。直流電流による低速軸の駆動は寿命低下の恐れがあるため、交流電流による駆動を推奨します。

消費電力は、高速軸・低速軸のコイルの消費電力の合計を示しています。コイルの発熱により配線が損傷する恐れがありますので、消費電力の絶対最大定格を超えないように高速軸と低速軸の駆動電流を設定してください。消費電力は、式 (3-3) で表されます。

$$P_{coil} = (R_s \times I_{s\_rms}^2 + R_f \times I_{f\_rms}^2) \times X \times 1000 \text{ [mW]} \dots\dots\dots (3-3)$$

- R<sub>s</sub> : 低速軸のコイル抵抗 [Ω]
- I<sub>s\_rms</sub>: 低速軸の駆動電流の実効値 [A]
- R<sub>f</sub> : 高速軸のコイル抵抗 [Ω]
- I<sub>f\_rms</sub>: 高速軸の駆動電流の実効値 [A]
- X : 補正係数 (=2)

低速軸を任意の波形の駆動電流で動作させる場合、I<sub>s\_rms</sub>は式 (3-4) で表されます。

$$I_{s\_rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} I_s(i)^2} \dots\dots\dots (3-4)$$

- i: データ指標
- n: 駆動電流のデータ数
- I<sub>s</sub>(i): i番目の駆動電流 [A]

### ▶ 推奨動作条件

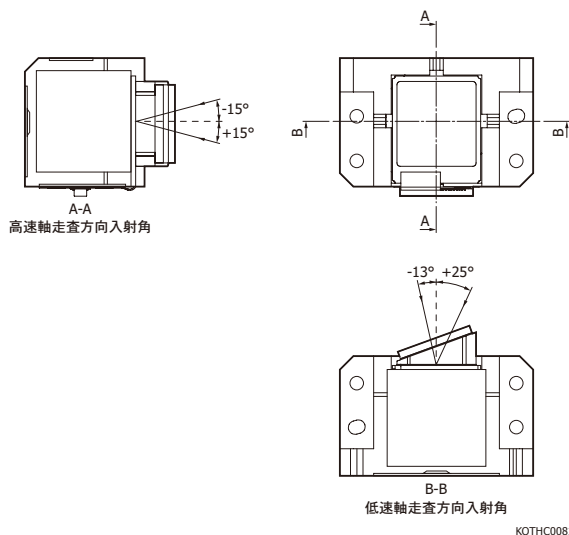
推奨動作条件 [表3-5] は、電気的および光学的特性 [表3-6] を保証するための動作条件です。推奨動作条件を若干超えても絶対最大定格を超えない範囲であれば、MEMSミラーの損傷には至りません。なお、低速軸の駆動周波数が100 Hzを超えるとノンリニアモードとなり、MEMSミラーが破損する場合がありますため推奨動作条件 (100 Hz以下) で使うことを推奨します。

[表3-5] 推奨動作条件 (S13989-01H)

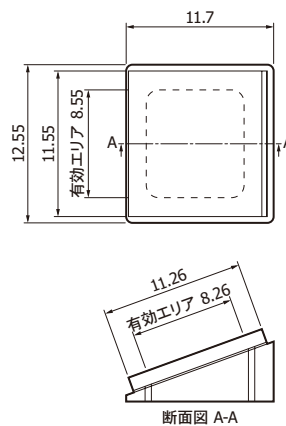
項目	Min.	Typ.	Max.	単位	
高速軸	入射角	-15	0	+15	°
	光学的振れ角	-20	-	+20	°
	駆動周波数	共振周波数		Hz	
低速軸	入射角	-13	+20	+25	°
	光学的振れ角	-12	-	+12	°
	駆動周波数	10	-	100	Hz

推奨動作条件の入射角は、光学的振れ角 0° のミラーに対する入射光の角度で、φ1 mmにコリメートされたレーザーをミラーに入射し、推奨光学的振れ角で走査した場合にレーザー反射光が窓材の有効エリアを通過できる角度です。入射角の定義を図3-15に示し、窓材の有効エリアを図3-16に示します。

[図3-15] 入射角の定義



[図3-16] 窓材の有効エリア



### ▶ 電気的および光学的特性

S13989-01Hの電気的および光学的特性を表3-6に示します。

[表3-6] 電気的および光学的特性 (S13989-01H)

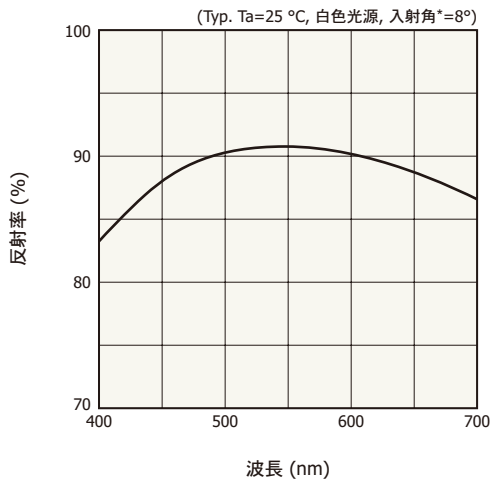
(指定のない場合は推奨動作条件)

項目	記号	条件	Min.	Typ.	Max.	単位
ミラーサイズ	A		φ1.21	φ1.23	φ1.25	mm
窓材の透過率	T	$\theta_{in}=0\sim+43^\circ$ $\lambda=460\sim640\text{ nm}$	95	-	-	%
振 動 軸	共振周波数	ff-r Ta=25 °C, $\theta_f=\pm 20^\circ$ Is=0 mA, 矩形波	28.6	29.3	30.0	kHz
	駆動電流	If Ta=25 °C, ff=ff-r $\theta_f=\pm 20^\circ$ , Is=0 mA 矩形波	12	22	34	mAmp.
	コイル抵抗	Rf Ta=25 °C, If=0.1 mA Is=0 mA	7.5	10.5	13.5	Ω
低 速 軸	共振周波数	fs-r Ta=25 °C Is=±0.3 mA 正弦波	525	575	625	Hz
	駆動電流	Is Ta=25 °C fs=60 Hz 正弦波 If=0 mA	$\theta_s=+12^\circ$ 140	175	210	mAmp.
		$\theta_s=-12^\circ$ -210	-175	-140		
コイル抵抗	Rs Ta=25 °C, If=0 mA Is=0.1 mA	6	8	10	Ω	

✿ ミラーの反射率

S13989-01Hのミラーはアルミ合金が蒸着されており、可視域で高い反射率をもっています。赤・青・緑において80%以上の反射率を実現しています [図3-17]。入射光のビームサイズがミラーサイズよりも大きいと、ミラー部以外のチップ面で反射した迷光が生じます。ビームサイズがミラーサイズよりも小さくなるように光学設計をする必要があります。

[図3-17] ミラーの反射率-波長



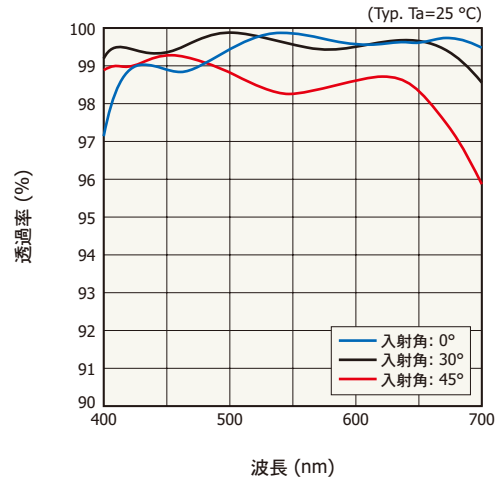
\* ミラーに対する光の入射角

KOTH800603A

✿ 窓材の透過率

S13989-01Hの窓材の分光透過特性を図3-18に示します。

[図3-18] 窓材の分光透過特性



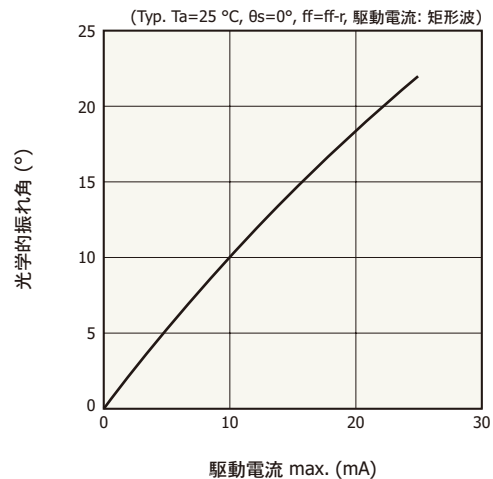
注) 入射角=窓材に対する光の入射角

KOTH800613A

✿ 駆動電流 (高速軸)

電気的および光学的特性の高速軸の駆動電流は、推奨動作条件において光学的振れ角の最大値が得られる値として規定しています。高速軸を単軸で駆動したときの光学的振れ角-駆動電流特性を図3-19に示します。高速軸では、駆動周波数を共振周波数にする必要があります。高速軸の光学的振れ角-駆動電流の関係は、非線形になります。

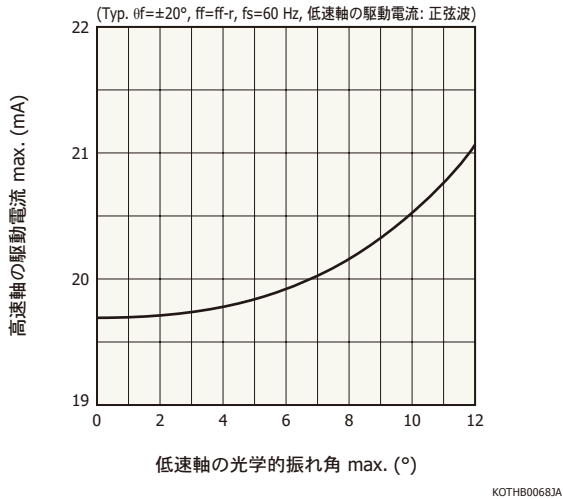
[図3-19] 光学的振れ角-駆動電流 (S13989-01H, 高速軸)



KOTH800623A

高速軸の駆動電流は、低速軸の光学的振れ角、駆動電流の周波数によって変化します。低速軸の光学的振れ角が変化したときの高速軸の駆動電流の変化を図3-20に示します。この要因は、低速軸の駆動電流によりコイルの発熱量が変化し、トーションバーの機械特性が変化するためです。低速軸の駆動電流により、高速軸の駆動電流と光学的振れ角の関係が変化するため、高速軸の駆動電流を調整する必要があります。

[図3-20] 駆動電流 (高速軸)－光学的振れ角 (低速軸)

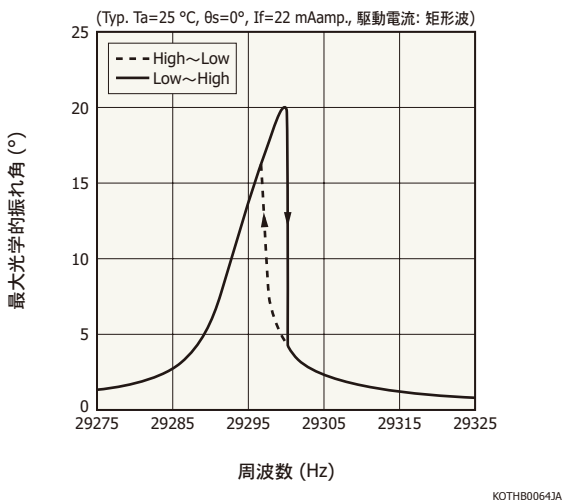


⚙️ 共振周波数 (高速軸)

ノンリニアモード専用の高速軸は、共振周波数で駆動させる必要があります。共振周波数付近の高速軸の周波数特性を図3-21に示します。図3-21は、周波数特性が高周波数側に傾いた特性（ハードニング）を示しています。ハードニングは、トーションバーの機械特性により発生します。駆動周波数が共振周波数よりも高周波側にずれると、光学的振れ角が急激に低下します。

共振周波数は、光学的振れ角振幅、低速軸の駆動条件、周囲温度、トーションバー機械特性の経時変化によって変化します。高速軸を共振周波数で安定して動作させるためには、共振状態かどうかをモニタして駆動周波数を共振周波数に合わせるためのフィードバック制御が必要です。

[図3-21] 光学的振れ角－駆動周波数 (高速軸)



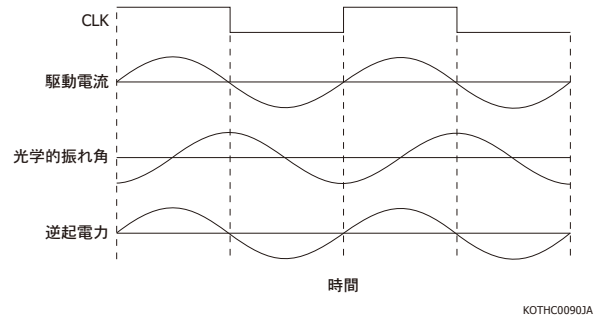
⚙️ 逆起電力 (高速軸)

高速軸が共振周波数で動作しているとき、高速軸と低速軸のコイルに逆起電力が発生します。この逆起電力の

振幅をモニタすることで、高速軸の光学的振れ角の振幅が分かります。

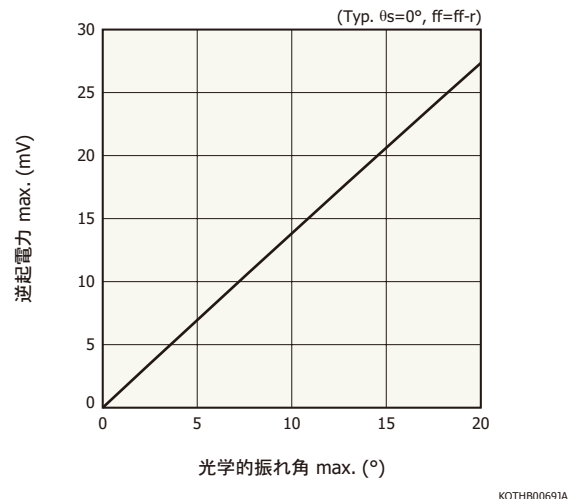
駆動電流・光学的振れ角・逆起電力のタイミングチャート (高速軸)を図3-22に示します。高速軸が共振周波数で動作していると、逆起電力と駆動電流のタイミングは同じで、これらに対してミラーの位相は90°遅れます。駆動周波数 (共振周波数)の1/4周期のポイントで逆起電力をモニタします。

[図3-22] 駆動電流・光学的振れ角・逆起電力のタイミングチャート (高速軸)

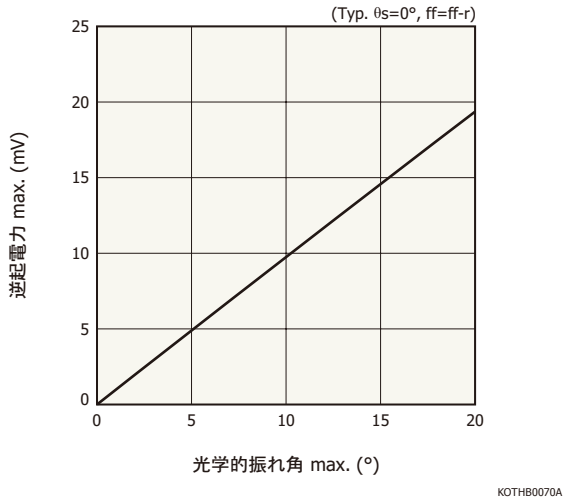


高速軸・低速軸の逆起電力と光学的振れ角の関係を図3-23・図3-24に示します。この関係は線形で、逆起電力を高速軸の光学的振れ角に換算することができます。なお、逆起電力は磁力に関係しており、磁力は周囲温度により変化するため、正確な逆起電力を得るためには、温度補正が必要です。

[図3-23] 逆起電力－光学的振れ角 (高速軸)



[図3-24] 逆起電力－光学的振れ角 (低速軸)



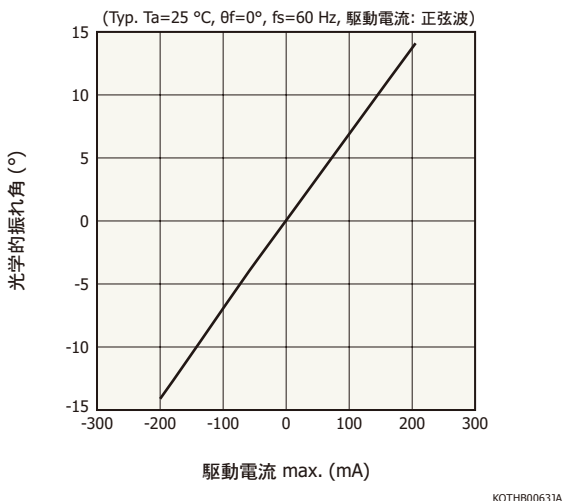
❖ 駆動電流 (低速軸)

電気的および光学的特性の低速軸の駆動電流は、リニアモードにおいて、推奨動作条件の光学的振れ角の最小値および最大値が得られる電流値として規定されています。

低速軸を単軸で駆動したときの光学的振れ角－駆動電流特性 [図3-25]は直線に近似できます。駆動電流の最大値と最小値を直線で結んだグラフから、任意の光学的振れ角における駆動電流を算出できます。この方法によって、 $1^\circ$ 以下の精度で光学的振れ角を制御できます。厳密には3次多項式関数で近似できるため、高精度に制御する場合は3次多項式関数を用いる必要があります。

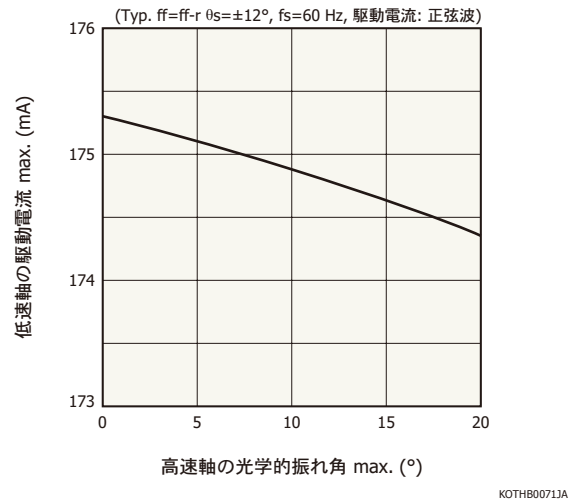
図3-25において、駆動電流の正負は、低速軸コイルに流す駆動電流の向きを表しています。駆動電流の向きにより、光学的振れ角の向きを変えることができます。1方向の駆動電流に対して $12^\circ$ の光学的振れ角が得られ、両方向の駆動電流に対して $24^\circ$ の光学的振れ角が得られます。

[図3-25] 光学的振れ角－駆動電流 (低速軸)



低速軸の駆動電流は、高速軸の光学的振れ角によって変化します [図3-26]。高速軸の光学的振れ角に対する低速軸の駆動電流の変化は小さくなっています。

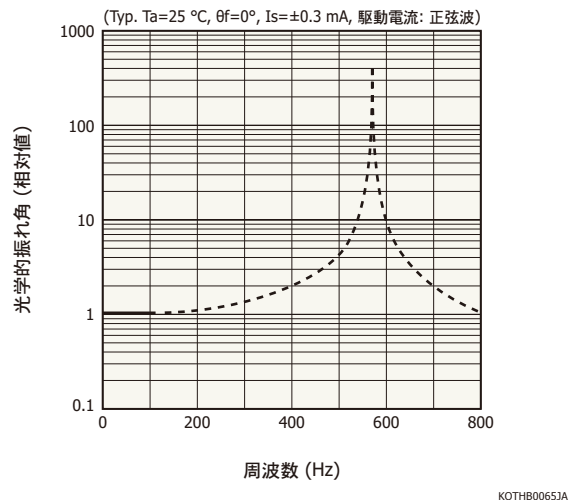
[図3-26] 駆動電流 (低速軸)－光学的振れ角 (高速軸)



❖ 共振周波数 (低速軸)

低速軸の周波数特性を図3-27に示します。低速軸はリニアモード専用軸のため、駆動周波数を100 Hz以下にする必要があります (図3-27の実線)。低速軸の共振周波数は約575 Hzです。100 Hzよりも大きくすると、光学的振れ角が大きくなり、可動部を破損する可能性があります。

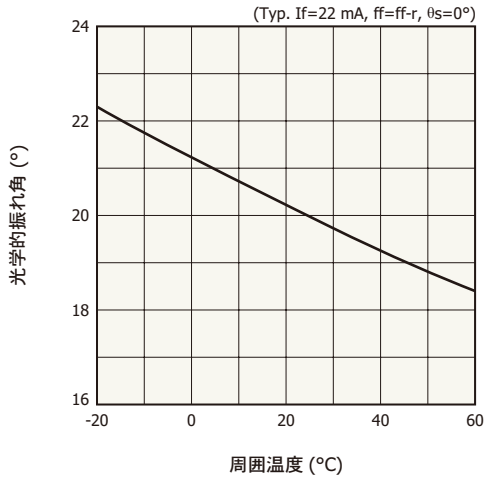
[図3-27] 光学的振れ角－駆動周波数 (低速軸)



❖ 温度特性

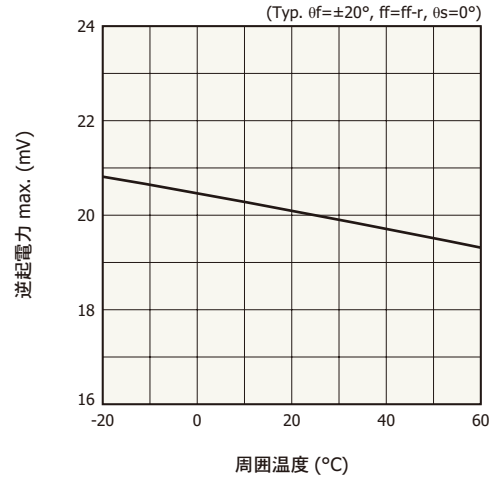
S13989-01Hの高速軸・低速軸について、それぞれ単軸で駆動したときの温度特性を図3-28～図3-37に示します。磁石の磁力・共振周波数・コイル抵抗は温度特性をもちます。温度により磁力が変化するため、光学的振れ角・逆起電力は変化します。

[図3-28] 光学的振れ角の温度特性 (高速軸)



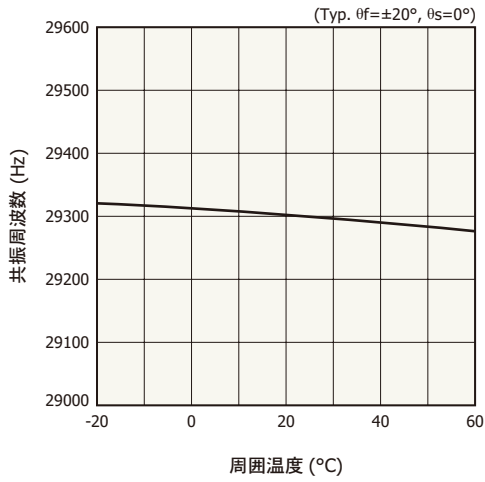
KOTH80072JB

[図3-31] 高速軸の動作で発生する低速軸の逆起電力の温度特性



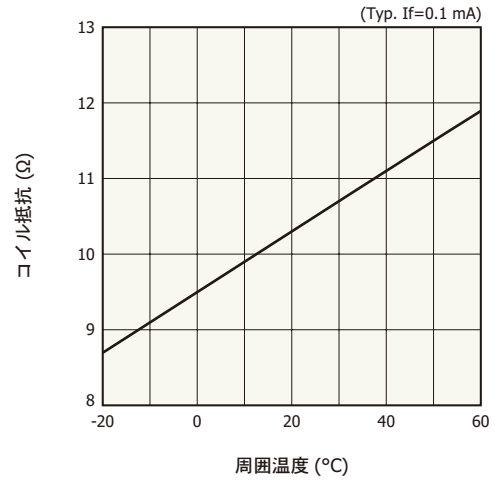
KOTH800753A

[図3-29] 共振周波数の温度特性 (高速軸)



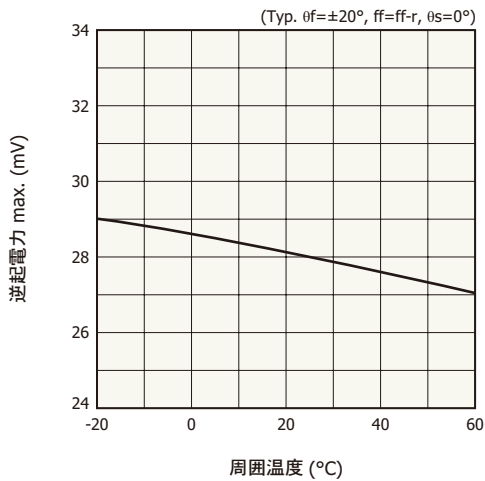
KOTH80073JA

[図3-32] コイル抵抗の温度特性 (高速軸)



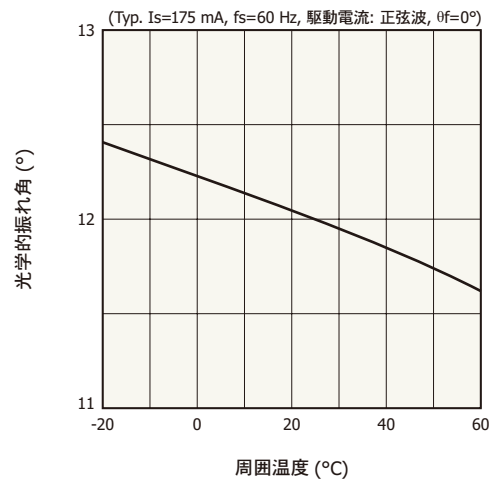
KOTH800763A

[図3-30] 逆起電力の温度特性 (高速軸)



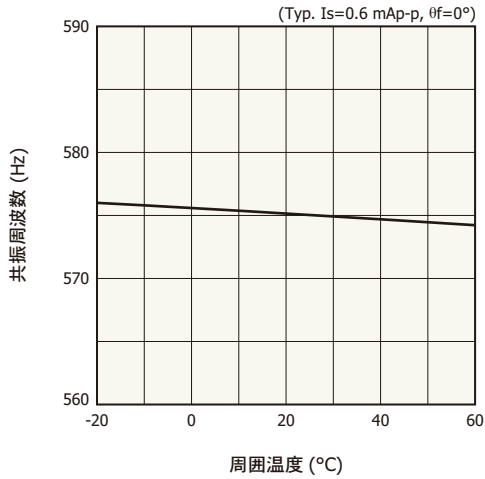
KOTH80074JA

[図3-33] 光学的振れ角の温度特性 (低速軸)



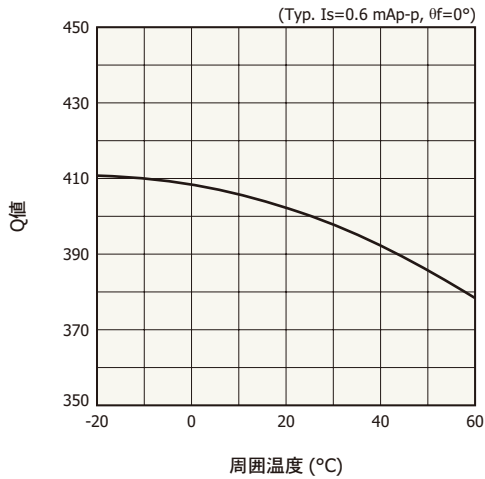
KOTH80077JB

[図3-34] 共振周波数の温度特性 (低速軸)



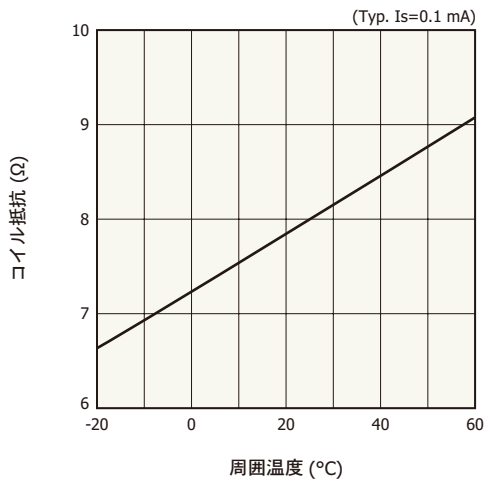
KOTHB00783A

[図3-35] Q値の温度特性 (低速軸)



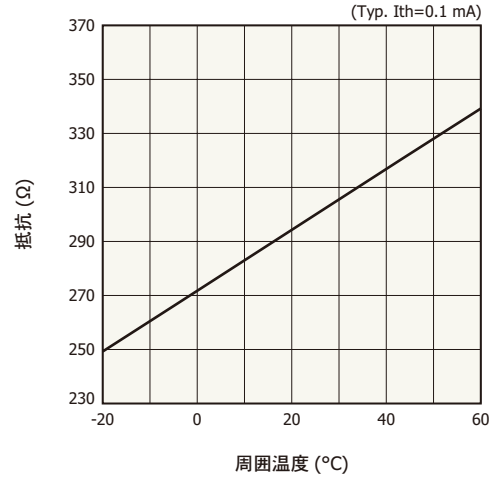
KOTHB00793A

[図3-36] コイル抵抗の温度特性 (低速軸)



KOTHB00803A

[図3-37] 温度センサ抵抗の温度特性



KOTHB00813A

### 3-3 リニアモード2次元タイプ

#### » 光学的振れ角の定義

リニアモード2次元タイプMEMSミラー S13124-01には、ミラー部への異物付着を防ぐために窓材が付いています。窓の表面または裏面で反射したレーザー光がミラー走査の投影範囲に入らないように、窓材の傾斜を設定(第1軸走査方向に対して20°)しています。

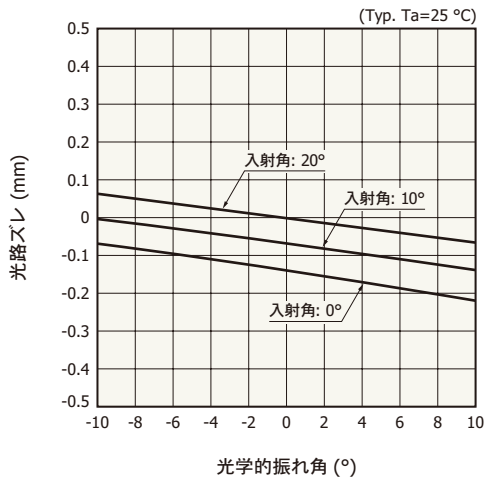
傾斜した窓材をレーザー光が透過するとき屈折するため、ミラーに対するレーザー光の入射角や機械的振れ角によって、ミラーの反射光の光路にズレが生じます。このズレ量の計算方法については、図3-11・図3-12を参照してください。

第1軸走査方向で光学的振れ角が変化したときの光路ズレを図3-38 (a)に示します。ミラーに対する入射角20°の場合、光路ズレは±0.1 mm以下です。

第2軸走査方向で光学的振れ角が変化したときの光路ズレを図3-38 (b)に示します。この光路ズレは、ミラーに対する入射角の影響を受けません。なお、窓材における光の屈折により、±0.1 mm以下の光路ズレが発生します。

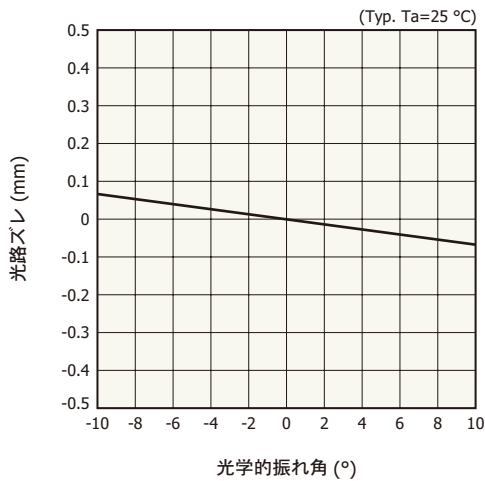
[図3-38] 光路ズレ—光学的振れ角

(a) 第1軸



KOTHB01073A

(b) 第2軸



KOTHB01083A

## ▶▶ 絶対最大定格

S13124-01の絶対最大定格を表3-7に示します。絶対最大定格を超えない範囲でMEMSミラーを使用する必要があります。

[表3-7] 絶対最大定格 (S13124-01)

(指定のない場合はTa=25 °C)

項目	記号	定格値	単位
第1軸	光学的振れ角	$\theta_{1\_max}$	°
	駆動電流	$I_1$	mA
第2軸	光学的振れ角	$\theta_{2\_max}$	°
	駆動電流	$I_2$	mA
動作温度	$T_{opr}$	-20 ~ +80	°C
保存温度	$T_{stg}$	-40 ~ +85	°C

第1軸・第2軸はリニアモード専用軸です。高速動作の場合、駆動周波数が共振周波数に近づくにつれて光学的振れ角が大きくなります。共振周波数のときの光学的振れ角は、駆動周波数が低いときの数百倍になり制御できなくなるため、共振周波数では駆動しないでください。

絶対最大定格の駆動電流は、配線が損傷する直流電流値です。直流電流による駆動は寿命低下の恐れがあるため、交流電流による駆動を推奨します。なお交流電流がプラス・マイナスのどちらかに片寄っていると、電流の流れる向きが片側になり配線の寿命低下の恐れがあるため、プラス・マイナス両方向を使用した交流電流を推奨します。

## ▶▶ 推奨動作条件

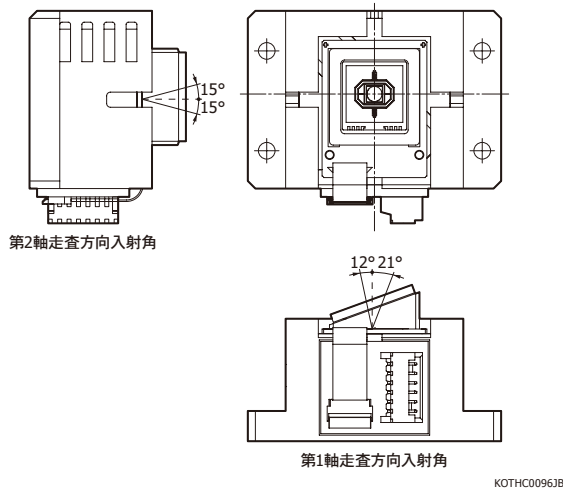
推奨動作条件 [表3-8]は、電気的および光学的特性 [表3-9]を保証するための動作条件です。推奨動作条件を若干超えても絶対最大定格を超えない範囲であれば、MEMSミラーの損傷には至りません。駆動周波数が90 Hzを超えるとノンリニアモードとなり、MEMSミラーが破損する可能性があるため推奨動作条件 (90 Hz以下)で使うことを推奨します。

[表3-8] 推奨動作条件 (S13124-01)

項目	Min.	Typ.	Max.	単位	
第1軸	入射角	-12	+20	+21	°
	光学的振れ角	-10	-	+10	°
	駆動周波数	DC	-	90	Hz
第2軸	入射角	-15	0	+15	°
	光学的振れ角	-10	-	+10	°
	駆動周波数	DC	-	90	Hz

推奨動作条件の入射角は、光学的振れ角 0°のミラーに対する入射光の角度で、 $\phi 1.95$  mmにコリメートされたレーザーをミラーに入射し、推奨光学的振れ角で走査した場合にレーザー反射光が窓材の有効エリアを通過できる角度です。入射角の定義を図3-39に示します。

[図3-39] 入射角の定義



## 電氣的および光学的特性

S13124-01の電氣的および光学的特性を表3-9に示します。

[表3-9] 電氣的および光学的特性 (S13124-01)

項目	記号	条件	Min.	Typ.	Max.	単位
第1軸	コイル抵抗	R1 I1=0.1 mA I2=0 mA	125	155	185	Ω
	共振周波数	F1-r I1=0.12 mA <sub>p-p</sub> I2=0 mA	450	480	510	Hz
	品質係数	Q1 I1=0.12 mA <sub>p-p</sub> I2=0 mA	100	120	140	-
第2軸	コイル抵抗	R2 I1=0 mA I2=0.1 mA	70	90	110	Ω
	共振周波数	F2-r I1=0 mA I2=0.16 mA <sub>p-p</sub>	940	1000	1060	Hz
	品質係数	Q2 I1=0 mA I2=0.16 mA <sub>p-p</sub>	140	165	190	-
駆動電流	I1	f1=f2=DC θ1=+10° θ2=+10°	11.5	15	18.5	mA
	I2		14	18	22	
	I1	f1=f2=DC θ1=-10° θ2=-10°	-18.5	-15	-11.5	
	I2		-22	-18	-14	

### ミラーの反射率

S13124-01のミラーはアルミ合金が蒸着されており、可視域で高い反射率を持っています。赤・青・緑において80%以上の反射率を実現しています [図3-17]。入射光のビームサイズがミラーサイズより大きいと、ミラー部以外のチップ面で反射した迷光が生じます。ビームサイズがミラーサイズより小さくなるように光学設計をする必要があります。

### 窓材の透過率

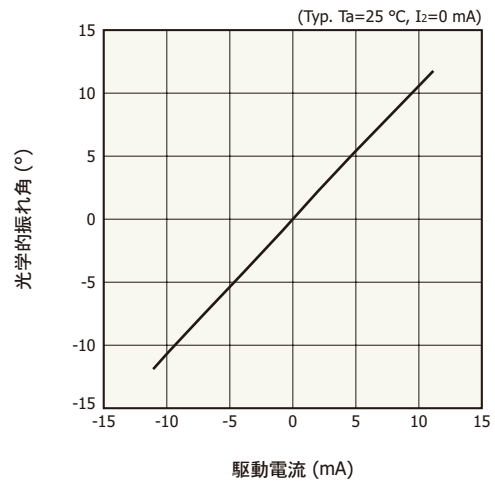
S13124-01の窓材の分光透過特性については図3-18を参照してください。

### 駆動電流

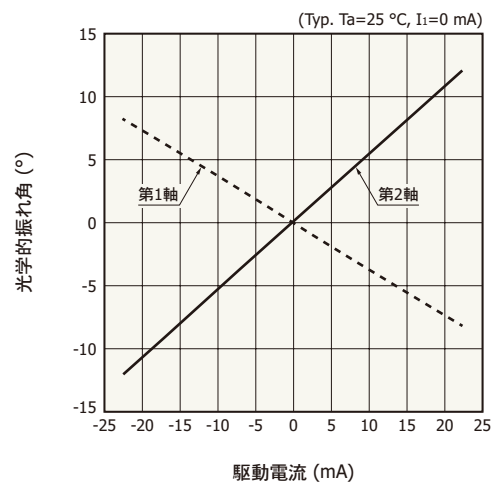
電氣的および光学的特性の駆動電流は、リニアモードにおいて、推奨動作条件の光学的振れ角の最小値および最大値が得られる電流値として規定されています。第1軸コイルに電流を流したときの光学的振れ角-駆動電流特性を図3-40 (a)に示します。第1軸コイルに電流を流すと、ミラーは第1軸を回転します。第2軸コイルに電流を流したときの光学的振れ角-駆動電流特性を図3-40 (b)に示します。第2軸コイルに電流を流すと、第2軸に対して斜めにミラーが回転します。

[図3-40] 光学的振れ角-駆動電流

(a) 第1軸コイル



(b) 第2軸コイル



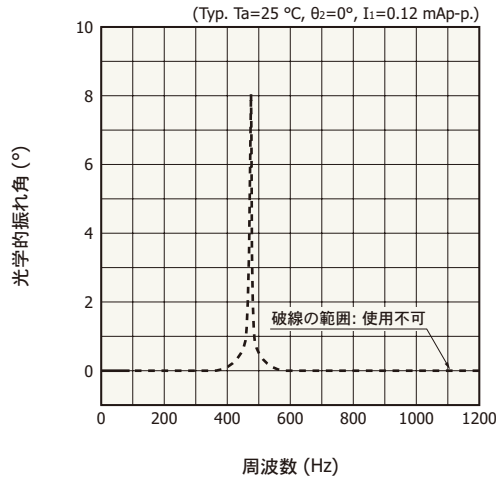


## 共振周波数

S13124-01の周波数特性を図3-41に示します。

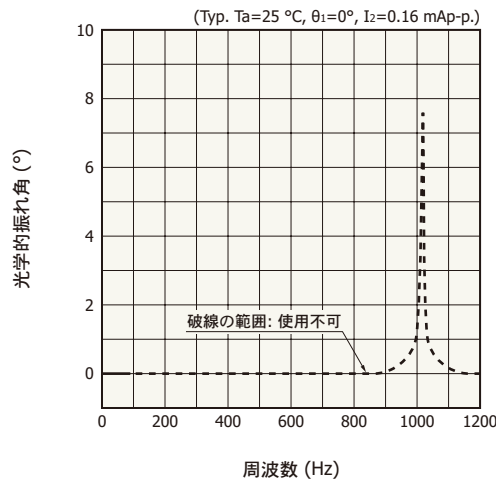
【図3-41】 光学的振れ角－駆動周波数 (S13124-01)

### (a) 第1軸



KOTHB00893A

### (b) 第2軸



KOTHB00903A

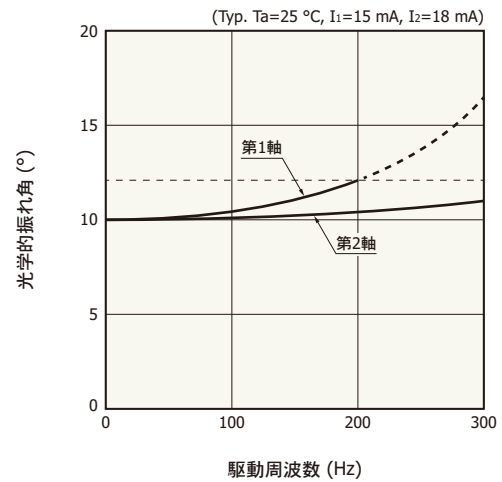
共振周波数においては、非常に低い駆動電流（第1軸: 0.12 mA, 第2軸: 0.16 mA）で大きな光学的振れ角となります。駆動電流が少し変化するだけで、絶対最大定格の光学的振れ角を超えてミラーが破損する危険性があります。リニアモードでは、共振周波数に近い周波数で駆動しないでください。なお、第2軸の駆動電流に第1軸の共振周波数を誘起する信号が含まれていると、第1軸が共振する場合があります。

## 駆動周波数

低周波領域における各軸の光学的振れ角の周波数特性を図3-42に示します。推奨動作条件の「駆動周波数: DC~90 Hz」では、ほぼ平坦ですが、駆動周波数が高くなると光学的振れ角が大きくなります。第1軸は195

Hz付近で光学的振れ角の絶対最大定格 $12^\circ$ に達し、ミラーが破損する可能性が高くなります。

【図3-42】 光学的振れ角－駆動周波数 (S13124-01)



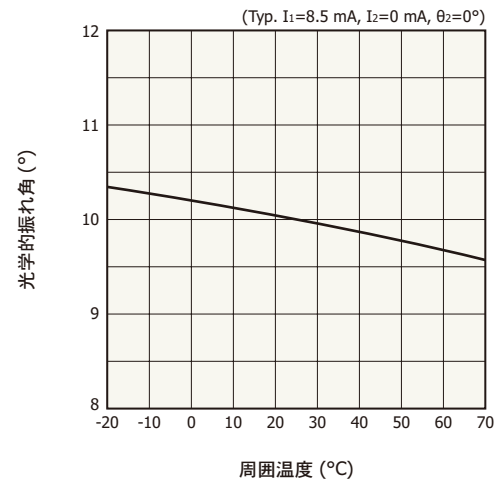
KOTHB00913A

## 温度特性

光学的振れ角・共振周波数・コイル抵抗は温度特性をもっています。S13124-01の温度特性を図3-43~49に示します。

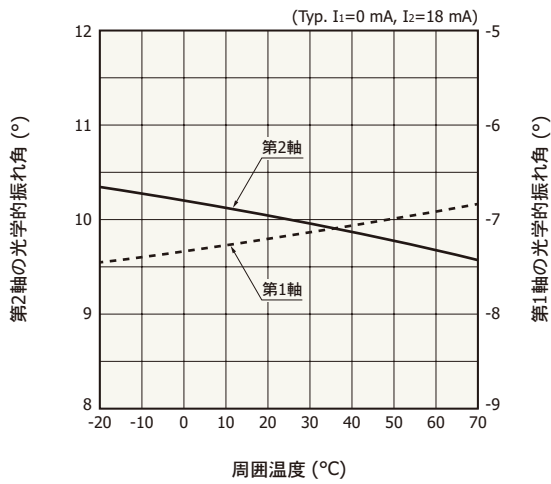
【図3-43】 光学的振れ角の温度特性 (S13124-01)

### (a) 第1軸



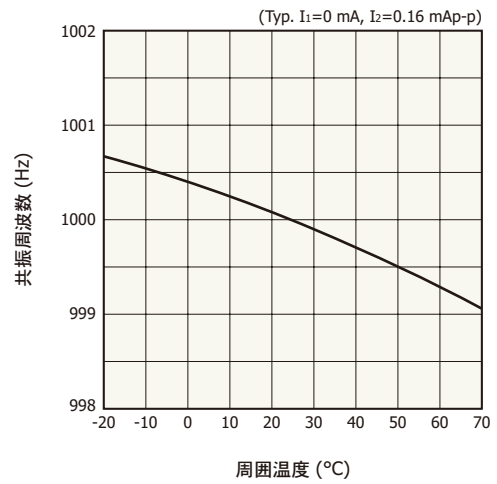
KOTHB00923A

(b) 第2軸



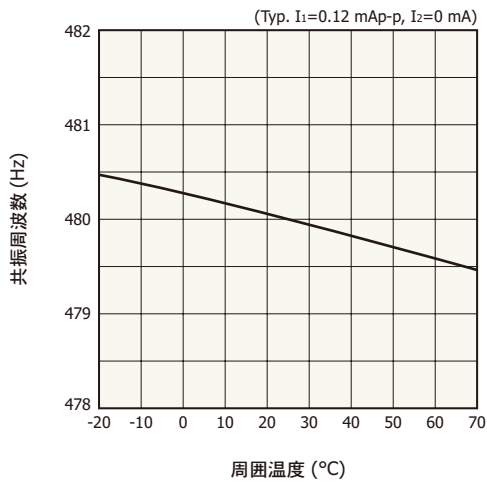
KOTHB0093JA

[図3-46] 共振周波数の温度特性 (第2軸)



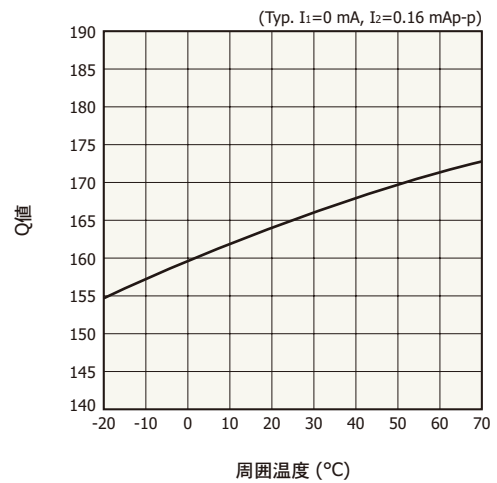
KOTHB0097JA

[図3-44] 共振周波数の温度特性 (第1軸)



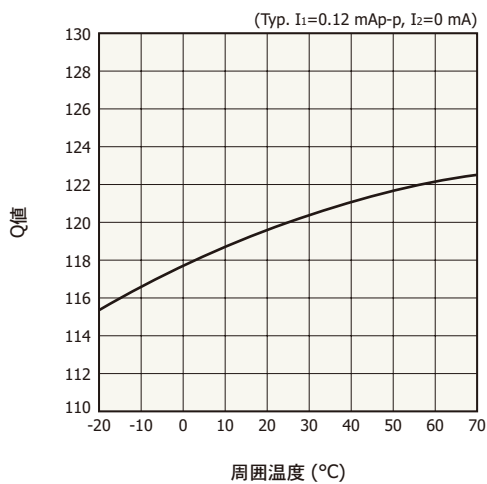
KOTHB0095JA

[図3-47] Q値の温度特性 (第2軸)



KOTHB0098JA

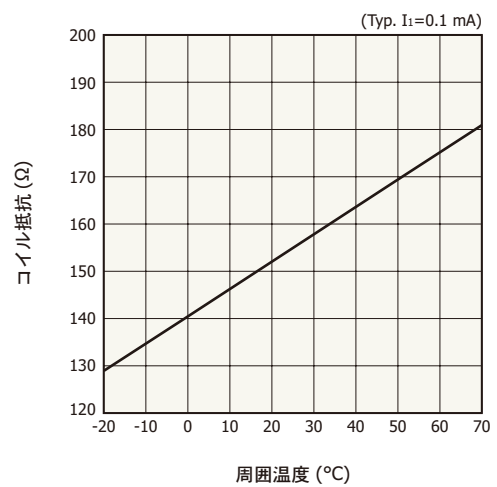
[図3-45] Q値の温度特性 (第1軸)



KOTHB0096JA

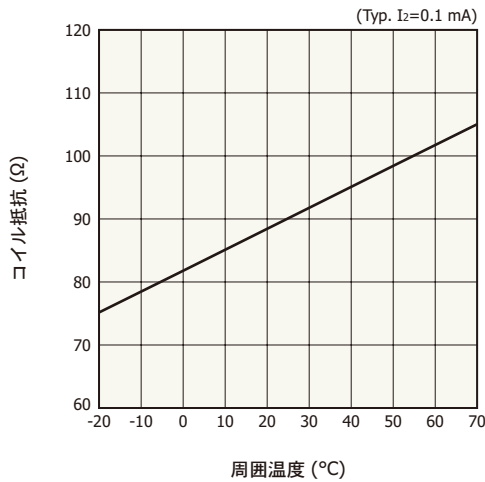
[図3-48] コイル抵抗の温度特性

(a) 第1軸



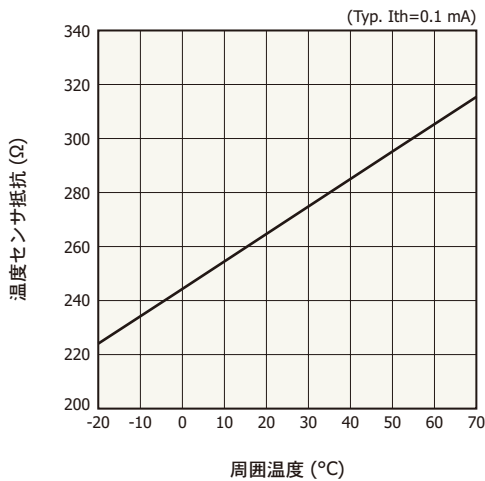
KOTHB0099JA

(b) 第2軸



KOTHB01003A

[図3-49] 温度センサ抵抗の温度特性



KOTHB01013A

## 4. 使用方法

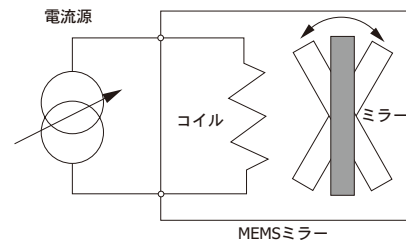
### 4-1 リニアモード1次元タイプ

#### » 駆動方法

電圧源を用いて駆動電流を制御する場合、印加電圧とコイル抵抗により駆動電流が決定されます。駆動電流による発熱、周囲温度によりコイル抵抗は変化します。このため、電圧源を用いて所定の電流を流すためには、コイル抵抗をモニタして電圧を調整する必要があります。なお光学的振れ角を連続的に変化させる場合には、逆起電力も考慮する必要があります。MEMSミラーをリニアモードで動作させる場合は駆動周波数が比較的低いため逆起電力は非常に小さく、無視できる場合がありますが、ノンリニアモードで動作させる場合は、ほとんどの場合は無視できません。電圧源を用いると、実際のコイルの印加電圧は、印加電圧から逆起電力分を引いた電圧になり、駆動電流の制御が難しくなります。

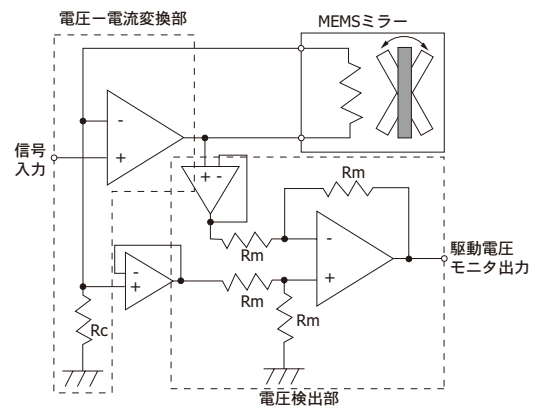
そのため、MEMSミラーを駆動するには、電流源を用いてコイルに流す電流を制御します [図4-1]。駆動回路例を図4-2に示します。

[図4-1] 駆動例



KOTHC00731A

[図4-2] 駆動回路例



KOTHC00731A

MEMSミラーを駆動するためには、電圧-電流変換部だけで十分です。さらに電圧検出部を加えると、逆起電

力やコイル抵抗を検出することができます。図4-2におけるMEMSミラーの駆動電流は、入力電圧  $V_s$  を用いて式(4-1)で表されます。

$$I_s = \frac{V_s}{R_c} \dots\dots\dots (4-1)$$

$I_s$ : 駆動電流  
 $R_c$ : 電流検出用抵抗

電流検出用抵抗として温度係数の小さい金属皮膜抵抗を用いると、動作温度範囲で駆動電流を0.1%以下に制御することができます。電圧検出部は、MEMSミラーのコイル端子間に実際に印加される電位差を検出し、駆動電圧モニタ出力端子に出力します。この電圧を、式(4-1)で求められる駆動電流値で割ることにより、コイル抵抗を求めることができます。

### ▶ ミラーサイズとビームサイズ

MEMSミラーとともに用いる光源としては、半導体レーザーを推奨します（特定の光源を使う必要がある場合を除く）。光源のビームサイズがミラーサイズより十分小さくなるように光学設計をする必要があります。小さいビームサイズを実現するためには、半導体レーザーが適しています。

MEMSミラーのミラーサイズは、必要とされる光学的振れ角—駆動電流特性、周波数特性を実現できる範囲で、可能な限り大きくなるように設計されています。たとえばS12237-03Pのミラーサイズはφ2.6 mmで、広い用途において半導体レーザーなどのコヒーレントな光源と組み合わせて使うのに十分なサイズです。しかし用途によっては、ミラーサイズが十分でない場合もありますので、MEMSミラーが必要な性能を発揮できるかどうかを事前に確認する必要があります。MEMSミラーで光をスキャンする場合、光源からミラーまでの距離、および投影スクリーンまでの距離を確認する必要があります。

コリメータレンズを用いても、レーザー光を理想的な平行光にすることはできません。理想的なガウシアンビームのビームサイズは、回折のためビームウェストからの距離によって変わります。ビームの半径  $\omega$  は、式(4-2)で表されます。

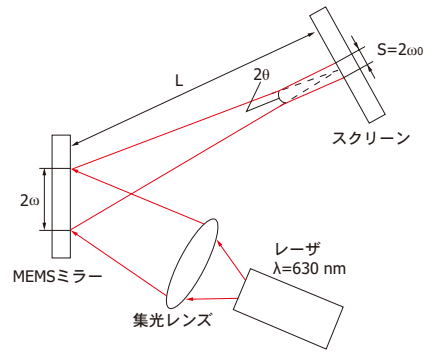
$$\omega = \omega_0 \cdot \sqrt{1 + \frac{\lambda L}{\pi \omega_0^2}} \dots\dots\dots (4-2)$$

$\lambda$ : レーザ光の波長 [μm]  
 $\omega_0$ : ビームウェスト [μm]  
 $L$ : ビームウェストからの距離 [μm]

ビームウェストは、レーザー光を光学系で集光した場合の焦点位置におけるビームの半径です。ビームウェストをできるだけ大きくして、平行光に近づけるように光学設計をします。

図4-3では、波長 630 nmのレーザービームが集光されてミラーで反射し、ミラーからの距離  $L$ のスクリーン上に焦点が合っている光学系を表しています。スクリーン上におけるビームサイズは、 $S (=2\omega_0)$  となっています。このとき、ミラー面上でのビームサイズが、ミラーサイズより小さいかどうかを検証します。

[図4-3] 光学系



KOTH00743A

スクリーンまでの距離  $L$ が100 mmでスクリーン上で  $S = \phi 100 \mu\text{m}$  で集光する場合、ビームウェスト  $\omega_0 = 50 \mu\text{m}$  となります。式(4-2)に  $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$  を入れると、ミラー位置におけるビームの半径は  $400 \mu\text{m}$  となり、ビームサイズは  $\phi 800 \mu\text{m}$  となります。ビームサイズは通常、ピークパワーの  $(1/e)^2$  のエリアで定義されるため、ビームの広がりも考慮しても、S12237-03Pのミラーサイズ  $\phi 2.6 \text{ mm}$  は十分な大きさです。

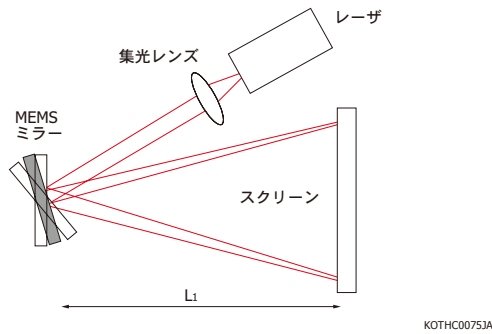
スクリーンまでの距離  $L$ が1 mでスクリーン上において  $\phi 100 \mu\text{m}$  で集光したい場合には、必要なミラーサイズを同様に計算すると  $\phi 8 \text{ mm}$  以上となり、S12237-03Pのミラーサイズではカバーできません。しかし、スクリーン上で  $\phi 1 \text{ mm}$  で集光してよい場合には、ミラー位置では  $\phi 1.3 \text{ mm}$  であり、S12237-03Pのミラーサイズでカバーできます。

このように必要なビームサイズおよび、ミラーとスクリーンの距離を考慮して、MEMSミラーのミラーサイズが十分かどうかを確認します。

### ▶ 光学的振れ角—駆動電流特性の測定系

「3-1 1次元タイプ／電気的および光学的特性」で説明したように、光学的振れ角と駆動電流の関係を直線で近似することによって、光学的振れ角を  $1^\circ$  以下に制御することができます。さらに高精度に光学的振れ角を制御するためには、光学的振れ角と駆動電流の関係を高精度に測定する必要があります。その測定系の例を図4-4に示します。

[図4-4] 光学的振れ角—駆動電流特性の簡易測定系



レーザ装置から出力された光は集光レンズで集光されます。焦点位置は、ミラーの先にあるスクリーン面に設定します。ミラーからの反射光は、その光学的振れ角に応じて、スクリーン上の特定の位置に投射されます。その位置を検出して、光学的振れ角を測定します。

スクリーン上の投射位置がわかるように、目盛の付いたスクリーン（方眼紙など）を用います。スクリーン上で1 mm程度の分解能で位置を検出するためには、ビームサイズを500 μm程度にすることを推奨します。ビームサイズを小さくしすぎると回折のために、ミラー面でのビームサイズが大きくなってしまいます。波長 632 nmでビームサイズ 500 μmのとき、集光NAは $8 \times 10^{-4}$ 程度です。なお平行光のレーザを使う場合には、集光レンズの前にビームエキスパンダを入れて、ビームを広げた方がよい場合があります。

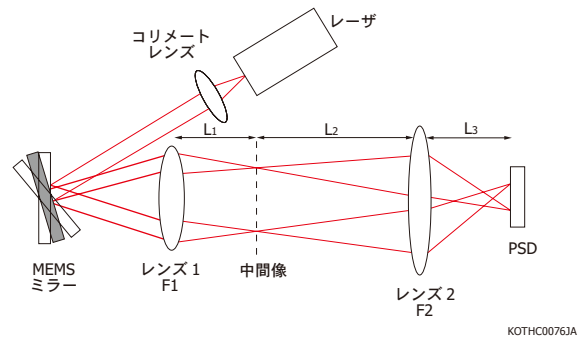
スクリーン上のビーム位置 Pと光学的振れ角  $\theta$ には、式 (4-3)の関係があります。

$$P = L_1 \times \tan(\theta) \dots\dots\dots (4-3)$$

図4-4において $L_1=30$  cmで、スクリーン上の投射位置を分解能 1 mmで測定したとき、光学的振れ角の分解能は $0.2^\circ$ です。 $L_1$ を長くすることによって、光学的振れ角の分解能を改善することができます。光学的振れ角の分解能をさらに改善したり、自動で光学的振れ角のデータを取得したりする場合には、投射位置を検出する光センサ [イメージセンサまたはPSD (Position Sensitive Detector)] をスクリーンに使う必要があります。なお、光センサの受光面サイズは大きくないため、光学系を使い投射範囲を縮小する必要があります。

光センサとしてPSDを用いた場合の測定系を図4-5に示します。

[図4-5] 光学的振れ角—駆動電流特性の測定系 (PSDを使用)



レーザビームは、コリメートレンズで平行光に近づけられます。その後、MEMSミラーで反射され、レンズ1によって、ビームの振れ角情報が中間像位置で位置情報に変換されます。レンズ1から中間像までの距離  $L_1$ は、レンズ1の焦点距離に等しくします。このときの像サイズ Aは式 (4-4)で表されます。

$$A = 2 \times F_1 \times \tan(\theta_{\max}) \dots\dots\dots (4-4)$$

$F_1$  : レンズ1の焦点距離  
 $\theta_{\max}$ : 光学的振れ角の半値全幅

たとえば $F_1=30$  mm、 $\theta_{\max}=15^\circ$ の場合、像サイズ  $A=8$  mmとなります。このサイズを検出できるPSDを中間像位置に置いて計測すれば、後段の光学系は不要です。PSDの受光面サイズが小さい場合には、レンズ2を用いて像を縮小します。中間像からレンズ2までの距離を  $L_2$ 、レンズ2からPSDまでの距離を  $L_3$ とすると、レンズ2の焦点距離は式 (4-5)の $F_2$ にする必要があります。

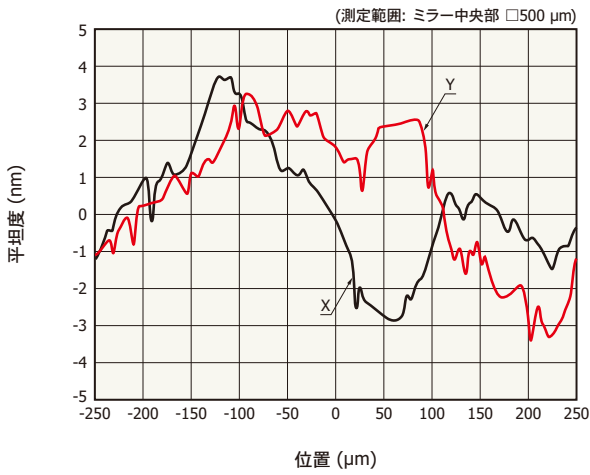
$$\frac{1}{F_2} = \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} \dots\dots\dots (4-5)$$

このときの中間像は $L_3/L_2$ 倍されてPSD上に像が形成されます。なおPSDを使う場合は、当社製PSDモジュール C10443シリーズを推奨します。

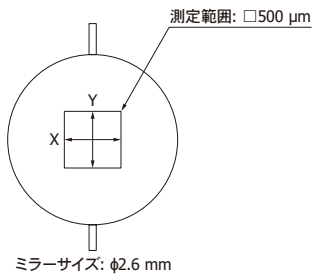
### 》 ミラーの平坦度と反り

S12237-03Pのミラーの平坦度 [図4-6]と反り [図4-7]を示します。

[図4-6] ミラーの平坦度: Ra=1.3 nm (S12237-03P, 測定例)

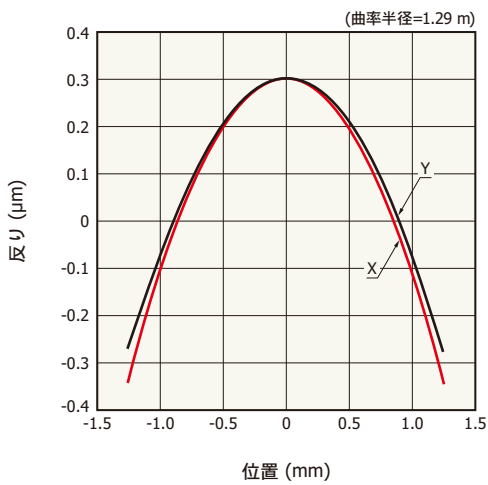


KOTHB0039JA

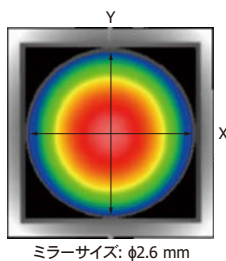


KOTHC0086JA

[図4-7] ミラーの反り (S12237-03P, 測定例)



KOTHB0040JA

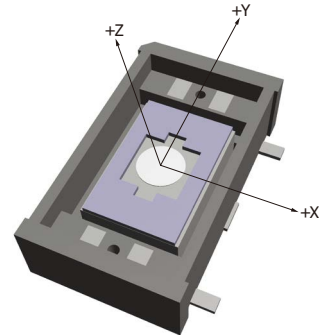


KOTHC0087JA

## 磁界

S12237-03Pに内蔵している磁石の磁界のシミュレーションデータを図4-9に示します。

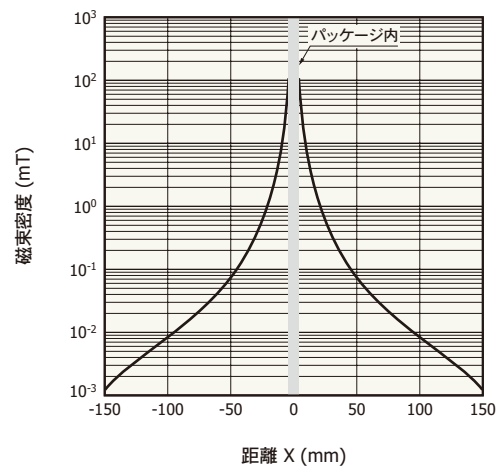
[図4-8] 磁界の方向 (S12237-03P)



KOTHC0088EA

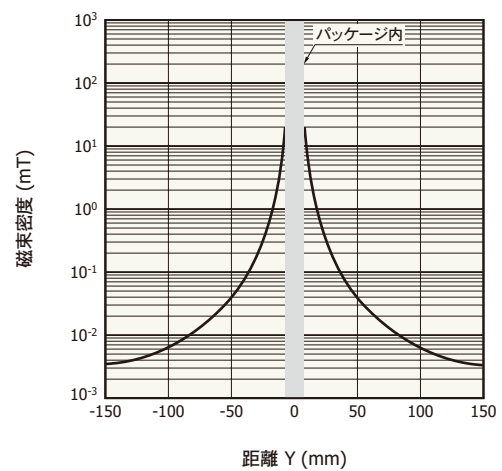
[図4-9] 磁束密度-距離 (S12237-03P, シミュレーション結果)

(a) X方向



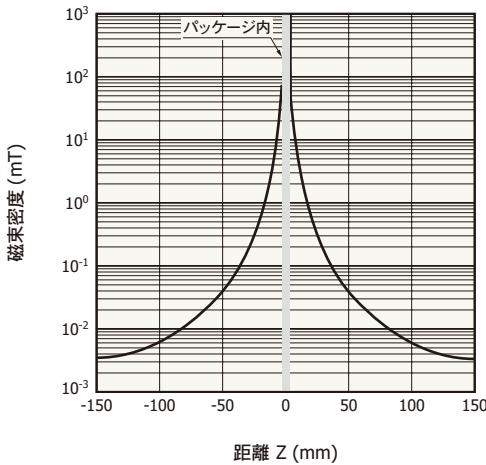
KOTHB0041JA

(b) Y方向



KOTHB0042JA

(c) Z方向



KOTHB00433A

» 高温による減磁

MEMSミラー内蔵の磁石は、長時間高温にさらされると減磁が起こります。MEMSミラーのはんだ付け時の熱や時間によって減磁が起こり、特性（特に電流-光学的振れ角特性）が変化します。はんだごてを使ってはんだ付けをする場合、ピンセットなどを用いて製品が動かないようにしてください。そうしないと、こて先を製品に近づけたときに磁力で製品が引き寄せられて、製品が破損する場合があります。

推奨はんだ付け条件を表4-1に示します。この条件が満たされない場合は、パッケージに熱が伝わりにくいようにリード根元をピンセットなどでつまんで放熱してください。なお、リフローはんだ付けをしないでください。

[表4-1] 推奨はんだ付け条件

はんだ温度	はんだ時間
260 °C以下	10秒以内

4-2 ラスタースキャン2次元タイプ

» 駆動方法

⚙️ 高速軸

高速軸はノンリニアモード専用軸のため、共振周波数で駆動する必要があります。正弦波または矩形波の駆動電流で動作させます。

駆動電流が矩形波の場合、推奨動作条件の光学的振れ角 (±20°)で駆動するためには、製品添付の検査成績書に記載された駆動電流 Ifを入力します。一方、駆動電流が正弦波の場合、駆動電流をIf × 4/πにします。な

お高速軸は、駆動電流に対して位相が90°遅れます。

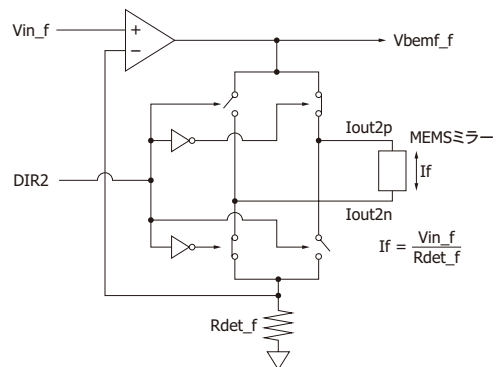
高速軸の共振周波数は、Q値が非常に大きいため、動作時間、周囲温度、低速軸の動作条件によって変化します。駆動周波数を共振周波数に合わせるためのフィードバック制御が必要で、高速軸の動作をモニタする必要があります。そのとき、コイルに発生する逆起電力を使用します。逆起電力は、高速軸と低速軸のコイルに正弦波として現れます。逆起電力の位相は、高速軸が共振状態のとき、駆動電流と同相になります。逆起電力の位相をモニタすることによって、高速軸が共振動作をしているかどうか分かります。駆動電流・光学的振れ角・逆起電力のタイミングチャートについては、図3-22を参照してください。

高速軸駆動回路の例を図4-10に示します。この回路は、V/I変換回路とHブリッジ回路（スイッチング回路）で構成されています。Vin\_fに印加した電圧が電流に変換され、高速軸コイルに流れます。Hブリッジ回路のスイッチング信号（DIR2）の周波数が駆動周波数となり、高速軸コイルに矩形波電流が供給されます。

駆動周波数が共振周波数のときの逆起電力波形を図4-11に示します。オレンジ色で囲まれた信号が、高速軸動作により発生した逆起電力です。Hブリッジ回路を使用しているため、逆起電力としてDC電圧上に正弦波の半波がVbmf\_f端子に繰り返し現れます。逆起電力により、高速軸が共振動作をしているかどうかや光学的振れ角の振幅をモニタできます。逆起電力振幅 Vf [図4-11]と光学的振れ角の関係は線形特性を示します [図3-23]。この関係は式 (4-6)で表され、検査成績書に係数（製品ごとに異なる）が掲載されています。

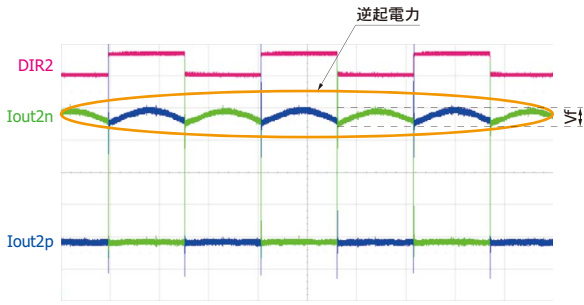
$$\theta_f = e(1, 0) + e(1, 1) \cdot V_f \dots\dots\dots (4-6)$$

[図4-10] 駆動回路例 (高速軸)



KOTHC01033A

[図4-11] 逆起電力波形 (高速軸)



❁ 低速軸

低速軸はリニアモード専用軸で、駆動周波数 10~100 Hzの任意波形の駆動電流で動作します。低速軸の光学的振れ角は、駆動電流に対して、ほぼ直線的に変化します [図3-25]。正弦波以外の三角波・のこぎり波などの駆動電流で任意の動作をします。

低速軸駆動回路の例を図4-12に示します。Vin\_sに電圧を印加して低速軸を制御します。低速軸の駆動電流と光学的振れ角の関係は、多項式 (4-7)で表されます。検査成績書に係数が掲載されています。

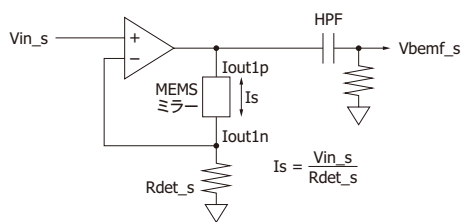
$$I_s = k(3, 0) + k(3, 1) \cdot \theta_s + k(3, 2) \cdot \theta_s^2 + k(3, 3) \cdot \theta_s^3 \dots (4-7)$$

S13989-01Hの構造上、高速軸が共振周波数で動作しているとき、低速軸コイルに高速軸動作に同期した正弦波状の逆起電力が発生します。この逆起電力は小さく、低速軸動作に比べて高速 (約29.3 kHz)のため、低速軸の動作には影響しません。この低速軸コイルの逆起電力によって、高速軸が共振状態かどうかと光学的振れ角をモニタできます。Iout1p端子 [図4-12]からは、この逆起電力と低速軸駆動信号の合成波が出力されます。このためHPF (ハイパスフィルタ)によって低速軸駆動信号を除去する必要があります。

逆起電力 Vbemf\_sと高速軸スイッチング信号 (DIR2)は同相です [図4-13]。低速軸の逆起電力振幅 Vsと高速軸の光学的振れ角の関係は式 (4-8)で表され、検査成績書に係数が掲載されています。

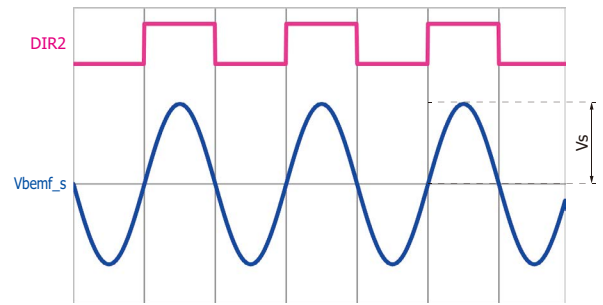
$$\theta_f = s(1, 0) + s(1, 1) \cdot V_s \dots (4-8)$$

[図4-12] 駆動回路例 (低速軸)



KOTHCO1043A

[図4-13] 逆起電力波形 (低速軸)

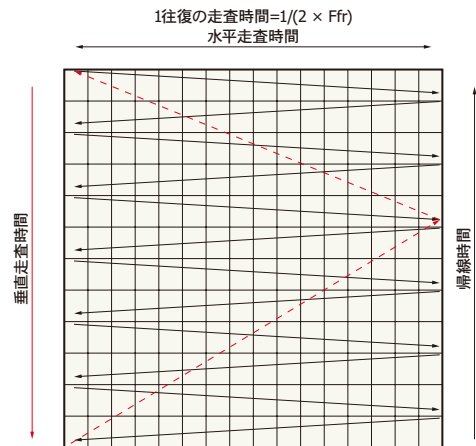


➤ ラスタスキャンにおける垂直解像度とフレームレートの関係

ラスタスキャンにおける垂直解像度とフレームレートはトレードオフの関係にあります。ラスタスキャンの走査イメージを図4-14に示します。水平方向は高速軸の動作で、垂直方向は低速軸の動作 (駆動電流: のこぎり波)です。低速軸の走査波形を図4-15に示します。

水平方向の走査時間は、高速軸の共振周波数で決まります。垂直解像度は、低速軸が移動する間に高速軸が何回往復できるかで決まります。高速軸の共振周波数は固定されているため、垂直解像度を上げると、走査時間が長くなり、フレームレートは下がります。帰線時間を短くするとフレームレートが上がりますが、低速軸の共振周波数の周期よりも短くするとリングングが発生します。垂直解像度とフレームレートの関係を表4-2に示します。

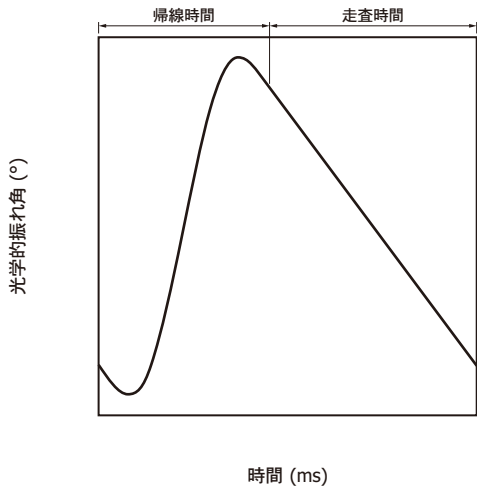
[図4-14] ラスタスキャンの走査イメージ



KOTHCO0913A



[図4-15] ミラーの動作 (低速軸, ラスタスキャン時)



KOTHB0082JB

[表4-2] 垂直解像度とフレームレート (S13989-01H, 帰線時間: 1.78 ms)

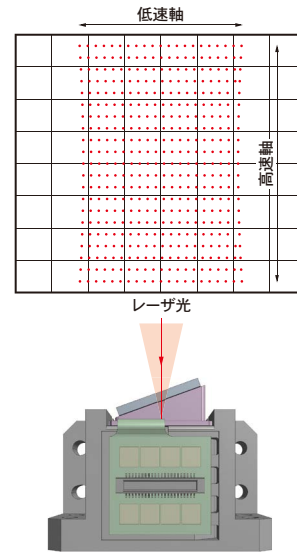
垂直解像度 (単位: ピクセル)	256	512	720	1024	2048
フレームレート (単位: frames/s)	115	76	60	46	25

## » ディストーション

S13989-01Hのミラーに対して、光の入射角度が $0^\circ$ 、 $20^\circ$ のときのスクリーン投影像を図4-16に示します。入射角度 $0^\circ$ の場合、ほぼ左右対称に投影されますが、糸巻状のディストーションになります。一方、入射角度 $20^\circ$ の場合、大きく湾曲したディストーションになります。このように、ミラーに対する光の入射角度によって、投影像の形状が変化します。ディストーションを抑えるためには、スクリーンとMEMSミラーの間に補正用の光学系を設ける必要があります。

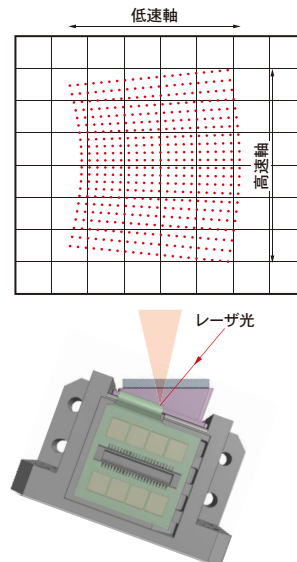
[図4-16] スクリーン投影像

(a) 入射角度:  $0^\circ$



KOTHC0092JB

(b) 入射角度:  $20^\circ$

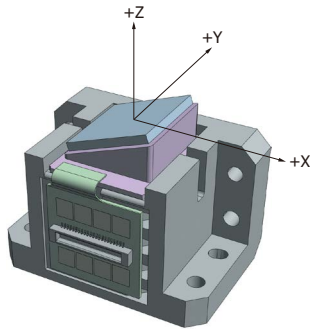


KOTHC0093JB

## » 磁界

S13989-01Hは、強力な磁場をもつ磁石を使用しています。周囲の磁場分布のシミュレーション結果を図4-18に示します。

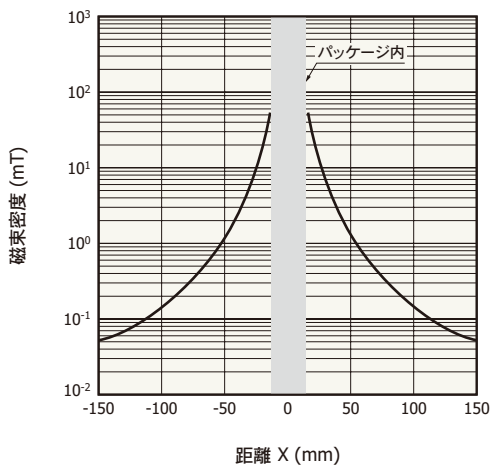
[図4-17] 磁界の方向 (S13989-01H)



KOTH00943B

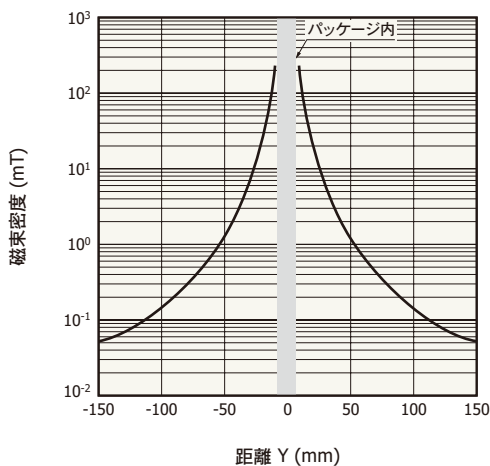
[図4-18] 磁束密度-距離 (S13989-01H, シミュレーション結果)

(a) X方向



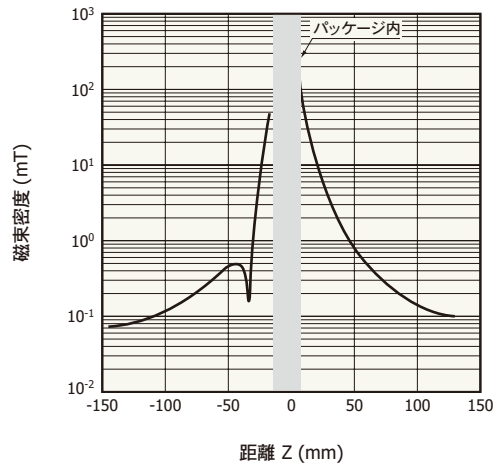
KOTH00833A

(b) Y方向



KOTH00843A

(c) Z方向



KOTH00853A

### 製品固定時の注意

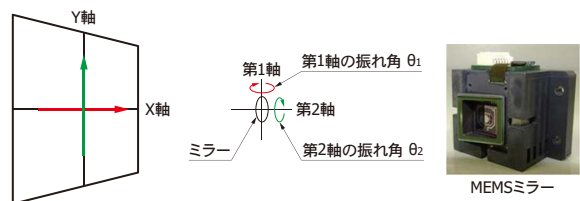
S13989-01Hには、固定用のネジ穴があります。樹脂パッケージのため、ネジを強く締め付けすぎると、振動時にパッケージが破損する恐れがあります。締め付けトルクを0.088 N・m以下にしてください。製品内部には強力な磁石が入っています。製品に磁性体を近づけると製品を破損させる恐れがありますので、固定の際には非磁性のネジ、ドライバを使用することを推奨します。

## 4-3 リニアモード2次元タイプ

### 駆動方法

2次元リニアモードタイプ S13124-01をスクリーン前に設置した場合の動作を図4-19に示します。スクリーン上のX/Y軸は、MEMSミラーの反射光が投影される向きを示しています。X軸は、ミラーが第1軸を回転したときの投影方向です。第1軸コイルの電流の向きが正のとき、ミラーは赤矢印の方向に回転し、X軸の矢印方向に投影されます。Y軸は、ミラーが第2軸を回転したときの投影方向です。第2軸コイルの電流の向きが正のとき、ミラーは緑矢印の方向に回転し、Y軸の矢印方向に投影されます。

[図4-19] リニアモード2次元タイプの動作

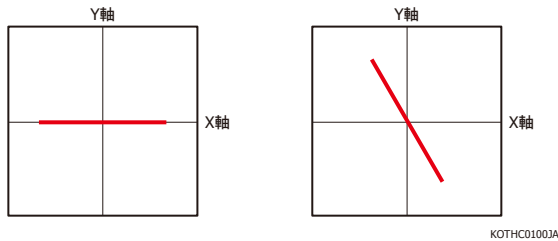


KOTH00993A

S13124-01の第1軸／第2軸コイルに電流を流したときのスクリーン上の走査像を図4-20に示します。第1軸コイルのみに電流を流すと、X軸に沿った走査像となります [図4-20 (a)]。一方、第2軸コイルのみに電流を流すと、Y軸に対して傾いた走査像になります [図4-20 (b)]。

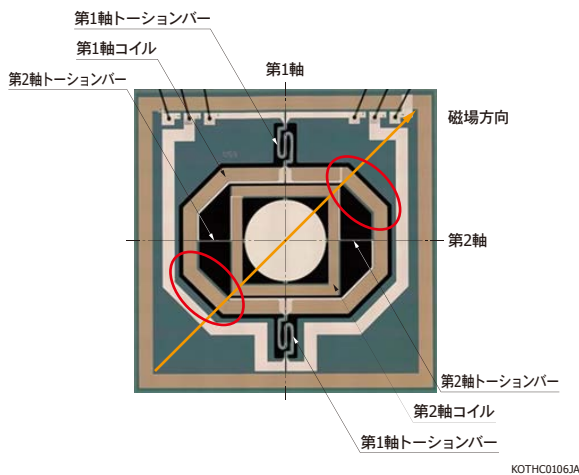
[図4-20] 投影スクリーン上の走査像

(a) 第1軸コイルに電流を流す場合 (b) 第2軸コイルに電流を流す場合



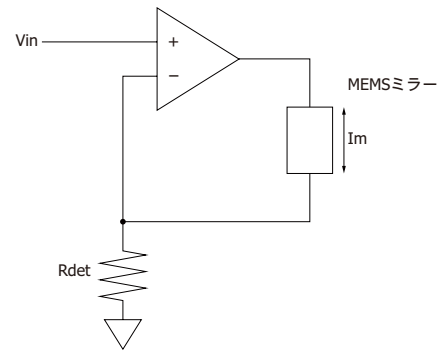
S13124-01のミラーチップの写真を図4-21に示します。オレンジ線の方法に磁場方向をもつ構造のため、第1軸／第2軸コイルに電流を流すと、赤枠で発生するローレンツ力が大きくなり、第1軸に対して斜めに回転する力が第1軸／第2軸コイルに発生します。第1軸コイルは1対のトーションバーで保持されているため、第1軸コイルに電流を流すとミラーは第1軸を回転します。一方、第2軸コイルは2対のトーションバーで保持されているため、ミラーは第1軸と第2軸を回る力を受けて、第2軸とともに第1軸を回転します。このため、図4-20 (b)のようにY軸に対して傾いた走査像になります。正常に駆動するためには、第1軸コイルに流す電流を補正する必要があります。

[図4-21] チップ拡大図 (S13124-01)



S13124-01の駆動回路例を図4-22に示します。第1軸と第2軸のそれぞれに駆動回路を用意して、2軸のコイルに流す電流を制御します。

[図4-22] 駆動回路例 (S13124-01)



KOTHCO1073A

MEMSミラーに供給する駆動電流  $I_m$  は式 (4-9) で表されます。温度係数の小さい電流検出用抵抗を用いることによって、動作温度範囲で駆動電流の変動を最小限に抑えられます。

$$I_m = \frac{V_{in}}{R_{det}} \dots\dots\dots (4-9)$$

$I_m$  : 駆動電流  
 $V_{in}$  : 入力電圧  
 $R_{det}$  : 電流検出用抵抗

リニアモードの場合、駆動電流に共振を誘起する周波数成分 (共振周波数の奇数分の1付近) や共振周波数が含まれていると、リングングが発生します。

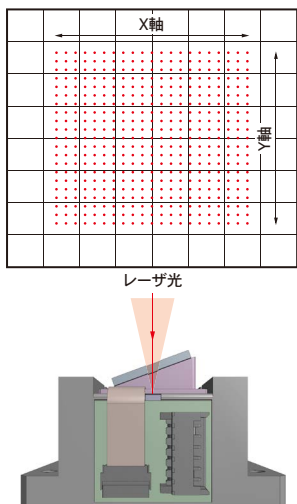
## » ディストーション

ミラーに対する光の入射角度や窓材の屈折などにより、投影像の形状が変化します。光の入射角度が  $0^\circ \sim 20^\circ$  の場合のスクリーン投影像を図4-23に示します。

入射角度  $0^\circ$  の場合、ほぼ正方形に投影されますが、わずかに糸巻状のディストーションが生じます。一方、入射角度  $20^\circ$  の場合、大きく湾曲した投影像になります。ディストーションを抑えるために、補償光学系を設けるか、ディストーション補正を考慮した駆動電流を設定する必要があります。

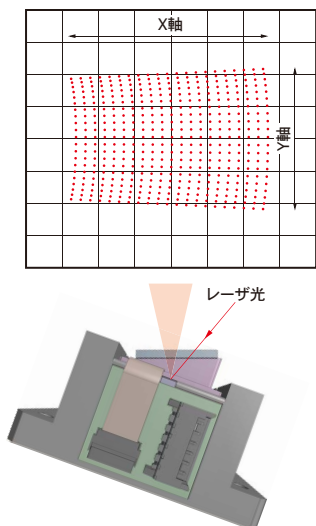
[図4-23] スクリーン投影像

(a) 入射角度: 0°



KOTH0101JB

(b) 入射角度: 20°

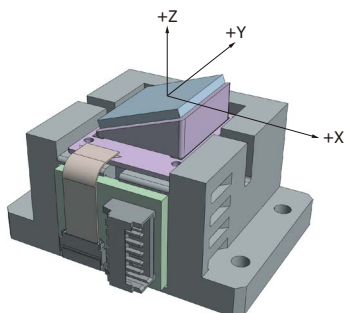


KOTH0102JB

## » 磁界

S13124-01は、強力な磁場をもつ磁石を使用しています。製品周囲の磁場分布のシミュレーション結果を図4-25に示します。

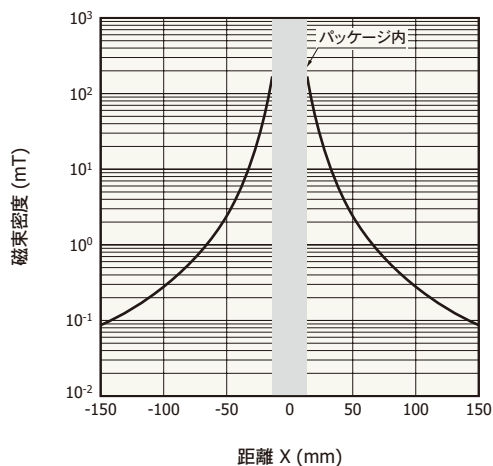
[図4-24] 磁界の方向 (S13124-01)



KOTH0105EA

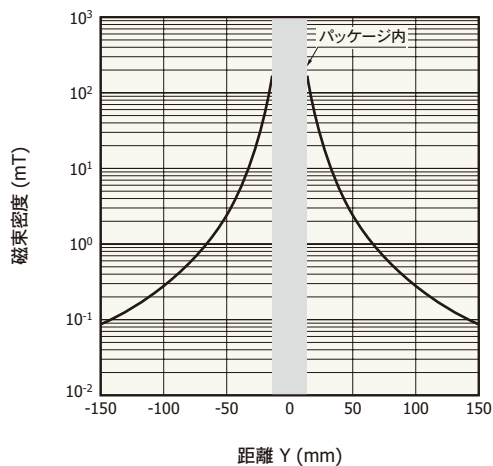
[図4-25] 磁束密度-距離 (S13124-01, シミュレーション結果)

(a) X方向



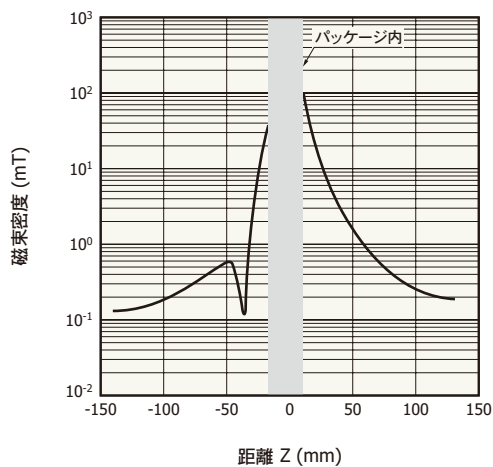
KOTH0102JA

(b) Y方向



KOTH0103JA

(c) Z方向



KOTH0104JA

## 製品固定時の注意

S13124-01には、固定用のネジ穴があります。樹脂パッケージのため、ネジを強く締め付けすぎると、振動時にパッケージが破損する恐れがあります。締め付けトルクを0.088 N・m以下にしてください。製品内部には強力な磁石が入っています。製品に磁性体を近づけると製品を破損させる恐れがありますので、固定の際には非磁性のネジ、ドライバを使用することを推奨します。

## 5. 高精度な制御

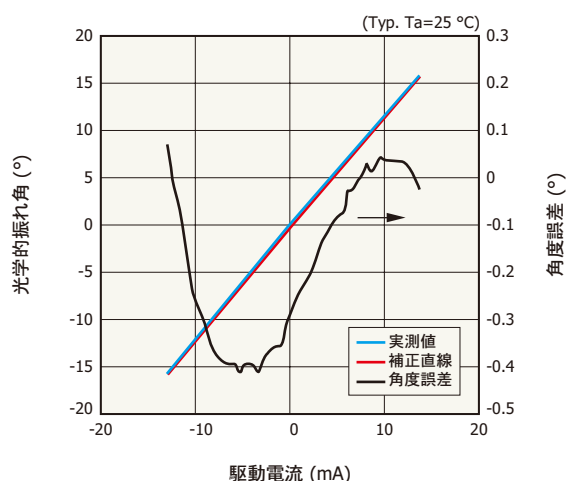
MEMSミラーを高精度に制御する場合に必要なパラメータについて説明します。これらのパラメータを考慮することによって、光学的振れ角に対する動作温度の影響をある程度、補正することができます。さらに高精度に制御する必要がある場合には、動作条件において必要なパラメータを取得して、その値をフィードバックします。

### 5-1 光学的振れ角-駆動電流特性の補正曲線

MEMSミラーにおける光学的振れ角-駆動電流特性は、厳密には直線ではありません。直線であるとしてMEMSミラーを駆動すると、光学的振れ角にずれが生じます。これを回避するためには、光学的振れ角の推奨動作条件の範囲で、光学的振れ角と駆動電流についての複数のデータを取得して、そのデータをもとに補正曲線を算出し、これを用いて駆動電流を調整する必要があります。

光学的振れ角の推奨動作条件 ( $\pm 15^\circ$ ) における駆動電流を直線で結ぶことにより補正直線を作成した場合の角度誤差を図5-1に示します。

[図5-1] 補正直線と角度誤差



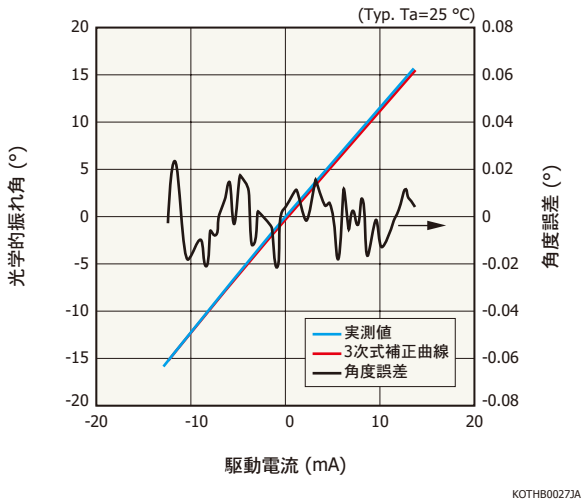
KOTH800263A

図5-1では、実測値に対して補正直線が、特に駆動電流がマイナスの領域でずれています。角度誤差は、光学的振れ角の推奨動作条件の範囲で最大0.4°程度です。なお、個体差や温度特性を考慮すると、この補正方法による角度誤差は $\pm 1^\circ$ 程度が限界と考えられます。

さらに高精度な補正を行うためには、3次多項式で近似した補正曲線を用いる必要があります [図5-2]。図5-2の角度誤差は0.03°以下です。この測定系の分解能は $\pm 0.03^\circ$ 程度であり、角度誤差は測定系の分解能程度

に補正されていることとなります。MEMSミラーは、駆動電流に対する光学的振れ角の再現性が高いため、このような補正曲線を用いて駆動電流を制御すると高精度な光学的振れ角が得られます。

[図5-2] 3次式補正曲線と角度誤差



## 5-2 低速動作と高速動作

MEMSミラー駆動時のミラーの動きには、低速動作と高速動作があります。低速動作は、ミラーが特定の角度に低速で傾いて静止する動作です。高速動作には、特定の角度の範囲で高速で動き続ける動作と、特定の角度に高速で傾いて静止する動作（ステップ動作）があります。

低速動作の場合には、前述の補正曲線を使用することによって、光学的振れ角を高精度に制御することができます。また、ミラーの絶対角度があまり重要でない場合には、ミラーの角度を実現する駆動電流と駆動周波数をあらかじめ取得して、その値を実運用に適用する方法もあります。

### » 高速動作時の周波数特性

MEMSミラーは機械であるため、周波数特性を数式で表すことができます。この数式は、特定の動作条件において、ある程度、実際の動作に合ったものです。MEMSミラー（S12237-03P）を共振周波数よりも十分に低い周波数で駆動する場合には、簡単な測定で得られるパラメータを使って周波数特性を式（5-1）、式（5-2）で表すことができます。

$$|T(\omega)| \cong 1 + \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 \dots\dots\dots (5-1)$$

$$\arg\{T(\omega)\} \cong \tan^{-1} \left\{ \frac{\frac{1}{Q} \cdot \frac{\omega}{\omega_0}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} \right\} \dots\dots\dots (5-2)$$

$$T(\omega) = \frac{\theta_{ac}(\omega)}{\theta_{dc}(\omega)} \dots\dots\dots (5-3)$$

$$Q = \frac{\omega_0}{\omega_2 - \omega_1} \dots\dots\dots (5-4)$$

- T(ω): 伝達関数
- ω<sub>0</sub>: 共振周波数
- θ<sub>dc</sub>: 低速動作の光学的振れ角
- θ<sub>ac</sub>: 高速動作の光学的振れ角
- Q: Q値
- ω<sub>1</sub>: 低周波側で共振時に光学的振れ角の1/√2のときの駆動周波数
- ω<sub>2</sub>: 共振周波数より高周波側で共振時に光学的振れ角の1/√2のときの駆動周波数

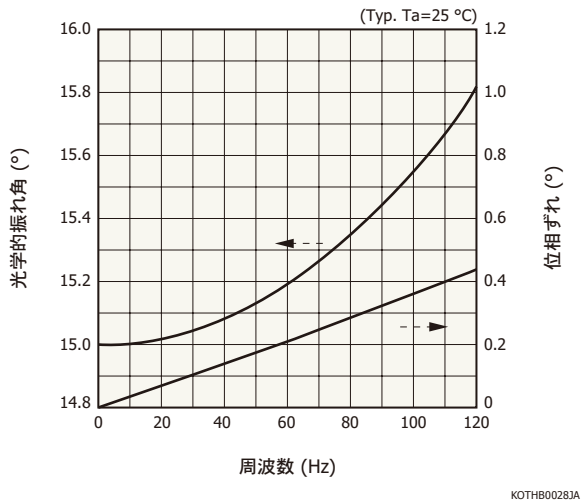
式（5-1）は伝達関数の絶対値を表し、式（5-2）は光学的振れ角の位相遅れを表します。これらは、すべて測定可能なパラメータであり、「[図4-4] 光学的振れ角-駆動電流特性の簡易測定系」を使って取得できます。なお、式（5-1）、式（5-2）は、S12237-03Pの駆動周波数の推奨動作条件 DC~100 Hzにおける平均的なQ値（数十）の場合の式です。

## 5-3 リニアモード

### » 周波数範囲

式（5-1）、式（5-2）を用いて計算した周波数特性を図5-3に示します [ω<sub>0</sub>≈約530 Hz, Q=30 (S12237-03Pの標準的な値)]。光学的振れ角の推奨動作条件 15°を基準にしています。駆動周波数 50 Hz（共振周波数の約1/10）以下では光学的振れ角は15° ± 0.2°で、光学的振れ角の推奨動作条件の範囲では0.2°以下の角度誤差になっています。100 Hz（共振周波数の約1/5）以下では角度誤差 0.6°以下になっています。角度誤差 0.5°以下の精度が必要な場合は駆動周波数 50 Hz以下、1°以下の精度が必要な場合は100 Hz以下を推奨します。

[図5-3] 周波数特性 (S12237-03P)



駆動周波数 100 Hz以下では、位相遅れは $0.4^\circ$ 以下であり、多くの用途では無視できるレベルです。リニアモードの場合でも、駆動周波数に応じて角度誤差が生じるため、その大きさに注意する必要があります。

なお、推奨動作条件の駆動周波数よりも高い周波数で動作させると破損する危険性があるため、推奨動作条件の範囲で使用してください。

### リニアモードの使い方

前述のとおりリニアモードでは、駆動周波数の推奨動作条件（共振周波数の $1/10 \sim 1/5$ ）にすると、光学的振れ角—駆動周波数特性は、優れた直線性をもっています。このため、駆動信号の周波数成分を駆動周波数の推奨動作条件にすることを推奨します。

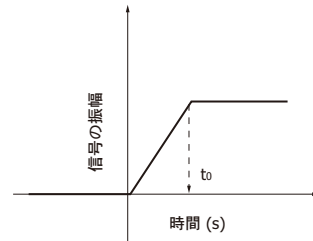
特定の光学的振れ角に傾けて止めるステップ動作の場合、立ち上がり駆動信号を駆動周波数の推奨動作条件の範囲だけで生成すると、駆動信号の立ち上がりが非常に遅くなってしまいます。これでは用途により不十分な場合があります。

さらに高速にステップ動作をさせるためのステップ信号・周期的波形の応答について説明します。

### ステップ信号の応答

立ち上がりに傾斜のあるステップ信号を入力したときのミラーの動きについて説明します [図5-4]。

[図5-4] ステップ信号

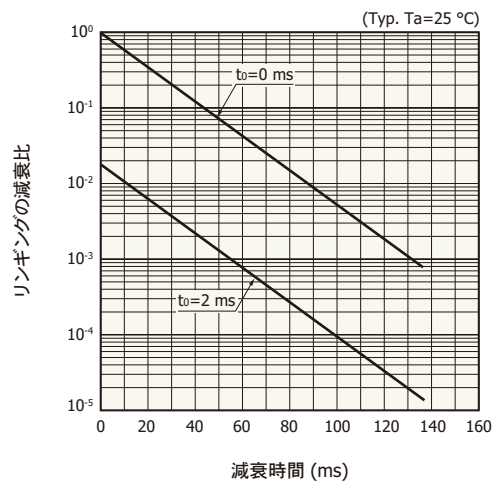


KOTH00773A

ステップ信号には、多くの高周波成分が含まれています。共振周波数成分が含まれると、その周波数でリングングが発生し、所定の光学的振れ角に落ち着くまでに時間がかかります。共振周波数成分を含まないためには、上昇時間  $t_0$  を非常に長くする方法と、 $t_0$  を共振周波数の逆数の整数倍にする方法があります。後者の場合、 $t_0$  が共振周波数の逆数の整数倍からずれるとリングングが発生するため、できる限り近づけることが重要です。この方法によって、ステップ信号から共振周波数成分をほぼ除去することができます。ただし完全には除去できないため、いくらかのリングングが発生します。このリングングは非常に小さいため、若干の待ち時間で所定の光学的振れ角に収束します。

図5-5は、共振周波数 500 Hz、 $Q=30$  の場合のリングングの減衰比と減衰時間の関係を表しています。

[図5-5] リングングの減衰比—減衰時間

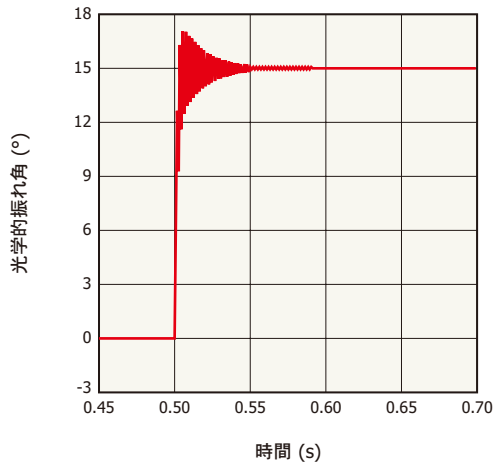


KOTH00293A

リングングの減衰比を $1/100$ にしたいときの減衰時間は、 $t_0=0$  msの場合は87 msで、 $t_0=2$  ms (=共振周波数の周期)の場合は10 msです。たとえば光学的振れ角を $0^\circ$ から $10^\circ$ に変化させる場合、ステップ信号を $t_0=2$  msで上昇させて、その8 ms後に光学的振れ角は $10^\circ \pm 0.1^\circ$ 以内に安定します。 $1^\circ$ ごとに角度を変化させる場合には、上昇時間の2 msのみで、ほぼ $\pm 0.1^\circ$ 以内の精度で制御することができます。

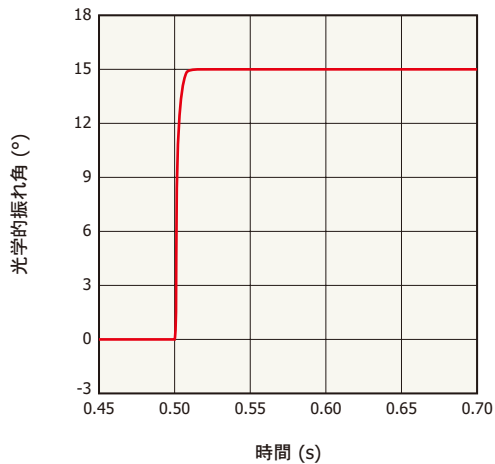
S12237-03Pを用いて、ステップ信号の応答を観測した結果を図5-6・図5-7に示します。

[図5-6] ステップ信号の応答 ( $t_0=0$  ms, 代表例)



KOTHB00303A

[図5-7] ステップ信号の応答 ( $t_0=2$  ms, 代表例)



KOTHB00313A

## 》 周期的波形の応答

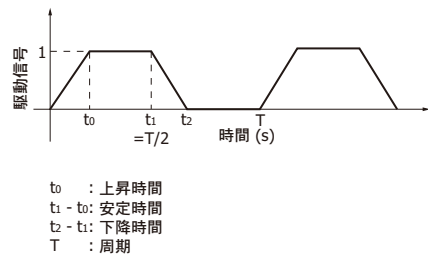
周期的波形の入力時の応答も、ステップ信号の場合のように、駆動信号に共振周波数成分を含まず、さらにその周辺の周波数成分を小さくすることで最適化することができます。

特定の周期的波形の周波数成分は、フーリエ級数展開で求められます。入力信号を周波数成分に分解して、共振周波数成分および周辺の周波数成分が含まれているならば、入力信号のパラメータを変えて調整する必要があります。

### (1) 矩形波

矩形波（デューティ比: 50%, 上昇時間・下降時間が同じ）の場合について説明します [図5-8]。このとき、 $t_2 - t_1 = t_0$ ,  $t_1 = T/2$  となるため、独立したパラメータは  $t_0$  と  $T$  の 2 つになります。この矩形波の周期を共振周波数の周期の整数倍以外に設定すると、矩形波の周波数成分に共振周波数は含まれません。しかし、共振周波数付近の周波数成分が含まれる可能性があり、この成分の影響をできるだけ小さくする必要があります。そのために  $t_0$  を共振周波数（または、その付近の周波数）の周期に設定します。

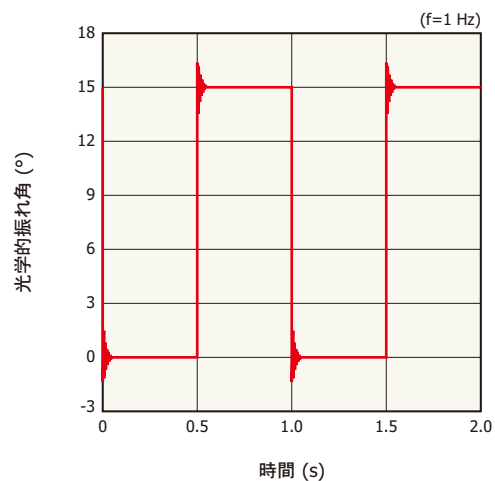
[図5-8] 矩形波 (デューティ比: 50%)



KOTHC00783A

S12237-03P（共振周波数: 530 Hz）を用いて矩形波の応答を観測した結果を、図5-9 ( $t_0=1$  ms)、図5-10 ( $t_0=2$  ms) に示します。 $t_0=1$  ms ではリングングが観測されますが、共振周波数の周期に近い 2 ms ではリングングは抑えられています。なお、 $t_0$  は共振周波数の周期に完全に一致していませんが、完全に一致した方がよい場合と、若干ずらした方がよい場合があります。これは、矩形波の駆動周期と共振周波数の関係に依存します。

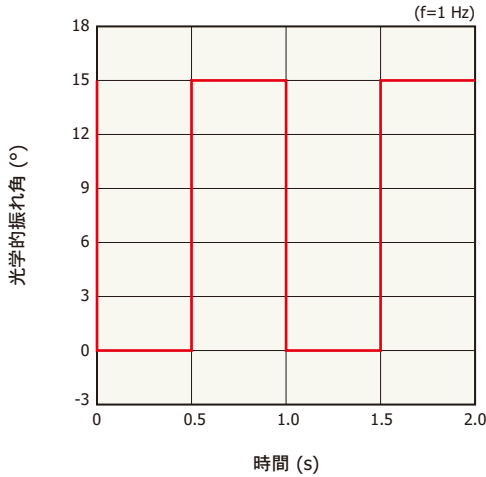
[図5-9] 矩形波の応答 ( $t_0=1$  ms, 代表例)



KOTHB00323B



[図5-10] 矩形波の応答 ( $t_0=2$  ms, 代表例)



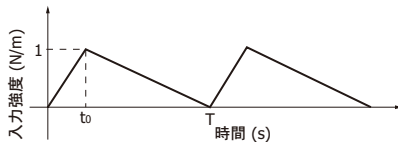
KOTHB00333B

(2) のこぎり波

のこぎり波 [図5-11]は、図5-8の矩形波の $t_0$ 、 $t_1$ 、 $t_2$ を変換すれば得られ、基本的には矩形波と同じように扱うことができます。 $t_1=t_0$ 、 $t_2=T$ の場合には、のこぎり波形となります (このときのパラメータは2つです)。のこぎり波においては、矩形波と同様に以下の手順でリングングを最小にすることができます。

- ① 周期を共振周波数の周期の整数倍以外に設定する
- ② 上昇時間  $t_0$ を共振周波数の周期の整数倍にする

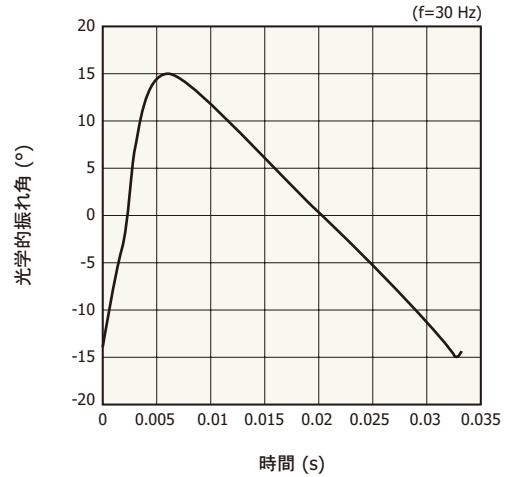
[図5-11] のこぎり波



KOTH00793A

S12237-03P (共振周波数: 500 Hz)にのこぎり波 (周期: 30 Hz)を入力したときの光学的振れ角の変化を図5-12に示します。共振周波数の周期の2倍である約4 msに駆動信号の上昇時間を設定しています。図5-12では、のこぎり波に対して、きれいな応答が得られています。なお、立ち上がり時の応答のうねりは、抑えることができません。立ち下がりの応答を利用してください。

[図5-12] のこぎり波の応答 ( $t_0=4$  ms, 代表例)



KOTHB00343A

5 - 4 リンギングの補正

MEMSミラーは機械であるため、共振周波数があります。MEMSミラーをリニアモードで駆動する場合、共振周波数の影響を避けるため、駆動周波数を共振周波数の1/5以下にします (S12237-03P: 100 Hz以下)。駆動周波数を共振周波数の1/5以下にした場合でも、駆動電流にMEMSミラーの共振を誘起する周波数成分が含まれていると、リングングが発生します。あらかじめ駆動電流からMEMSミラーの共振を誘起する周波数成分を除去することによって、リングングを抑制できます。

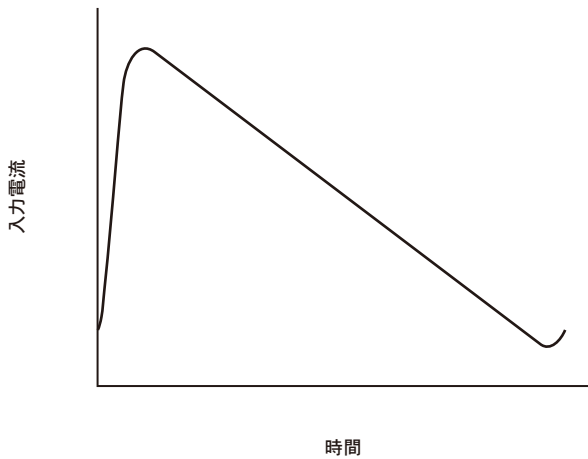
図5-13はリングングの補正を示しています。リニアモードでMEMSミラーに(a)の駆動電流 (光学的振れ角の理想波形と同じ波形)を入力すると、光学的振れ角は(b)の黒線になることが理想ですが、実際には赤線のようにリングングが発生します。

(c)の黒線は、(b)の光学的振れ角の理想波形を周波数を横軸にして表したものです。(c)の赤線は、MEMSミラーの理想の駆動周波数波形を示しています。共振周波数付近に、光学的振れ角の理想波形の周波数成分があります。このため、光学的振れ角の理想波形の駆動電流をMEMSミラーに入力すると、共振周波数付近の周波数成分が増幅され、リングングが発生します [(d)の赤線]。

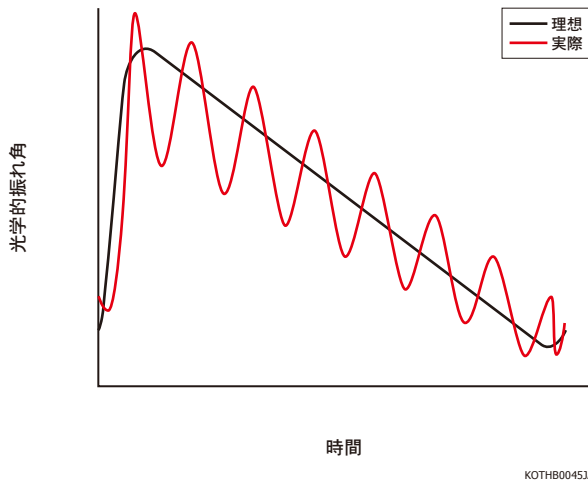
光学的振れ角の理想波形の駆動電流から、共振周波数付近の周波数成分を減らすことによって、リングングを抑制できます [(e)の赤線]。この周波数特性をもつ駆動電流を時間軸に変換すると(f)のようになります。この駆動電流をMEMSミラーに入力すると、(b)の光学的振れ角の理想波形を実現できます。

[図5-13] リンギングの補正

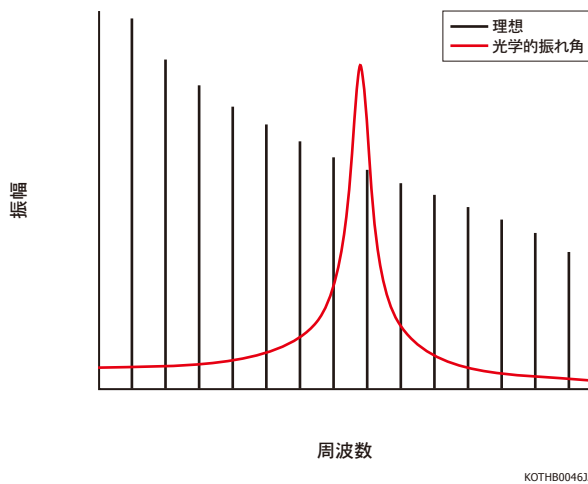
(a) 駆動電流-時間 (光学的振れ角の理想波形と同じ波形)



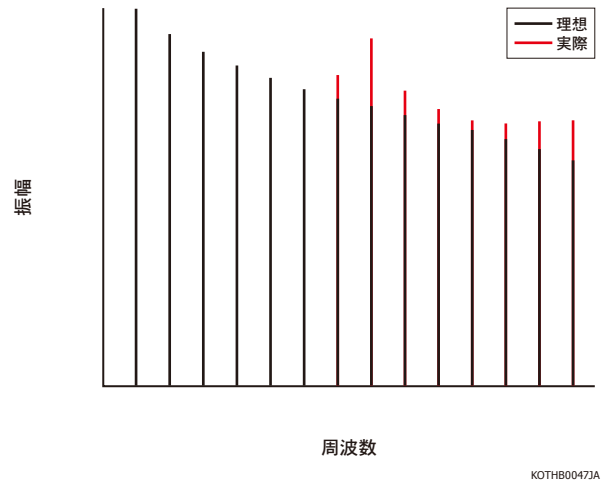
(b) 光学的振れ角-時間  
[駆動電流 (光学的振れ角の理想波形と同じ波形)入力時]



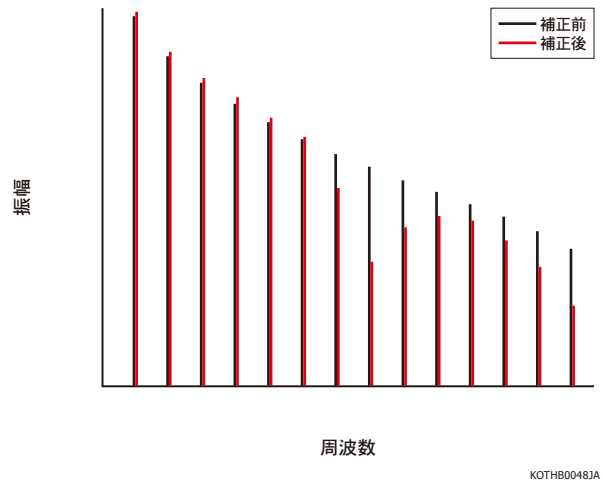
(c) 理想の駆動周波数波形と周波数成分



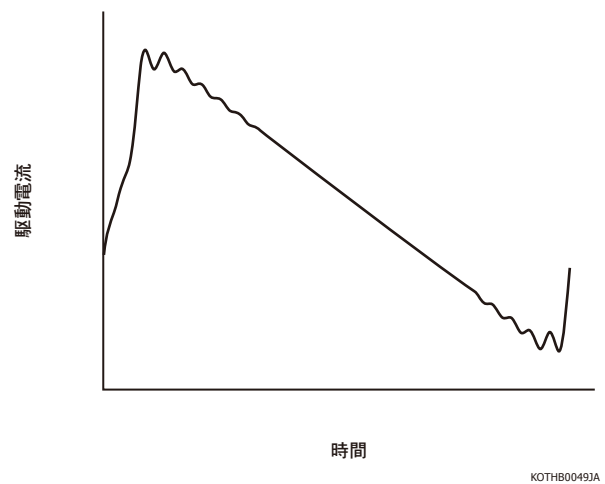
(d) 駆動周波数の周波数成分



(e) 駆動周波数の周波数成分 (リンギング補正の前後)



(f) 駆動電流-時間 (リンギング補正後)



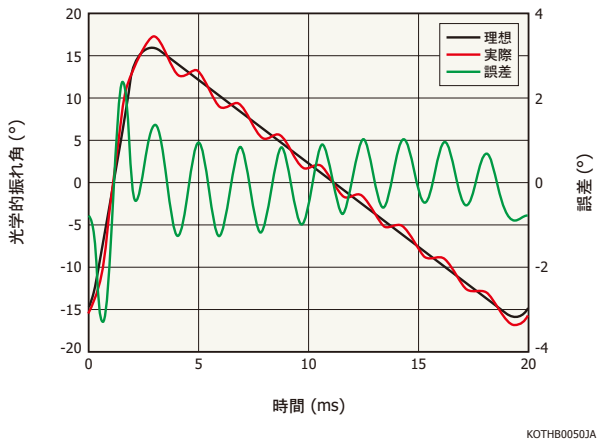
リンギング補正の効果を図5-14に示します。図5-14 (a)は、光学的振れ角の理想波形と同じ駆動電流を入力した結果です。理想の光学的振れ角に対して、立ち下がり部分で $\pm 1^\circ$ 程度の誤差が生じています。また、図5-14 (b)は、リンギング補正した駆動電流を入力した結果です。光学的振れ角の理想波形に対して、立ち下がり部

分で±0.03°以下の誤差に抑えられています。なお、この光学的振れ角の測定系の精度は±0.03°であり、その精度までリングングが抑制されています。

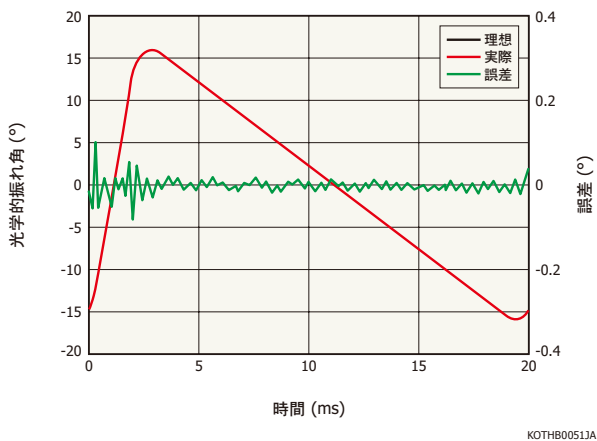
図5-14 (b)では、光学的振れ角の実際の周波数特性に合わせるため、(a)から誤差を測定してリングング補正に反映させています。この操作を複数回 [図5-14 (b): 4回]繰り返すことによって、処理しきれなかった周波数成分を除去して、リングングをさらに抑えることができます。

[図5-14] リングング補正の効果 (測定例)

(a) リングング補正前



(b) リングング補正後



## 5-5 温度補正

電磁式MEMSミラーは、磁石の磁界とコイルを流れる電流によりローレンツ力を発生させてミラーを動かしています。周囲温度が上昇すると光学的振れ角が小さくなるため、駆動電流を大きくする必要があります [図3-9]。この駆動電流の温度特性は、磁力の温度特性に依存します。磁石の磁力は、周囲温度が上昇すると低下します。このため、周囲温度が変化するとき光学的振れ角を一定にするためには、温度をモニタして駆動電流を補正する必要があります。MEMSミラーを実装する筐

体・基板で、MEMSミラーにできるだけ近いところに温度センサを設置する必要があります。MEMSミラーS12237-03Pの光学的振れ角の温度係数を表5-1に示します。

[表5-1] 光学的振れ角の温度係数

(S12237-03P, 線形値,  $\theta_s = \pm 15^\circ$ , 代表値)

温度範囲	温度係数 $\alpha$ Typ.
-20~+70 °C	-0.095%/°C
-20~+25 °C	-0.085%/°C
+25~+70 °C	-0.105%/°C

表5-1の光学的振れ角の温度係数  $\alpha$ は、駆動電流が一定のときの値で式 (5-5)で表されます。

$$\alpha = \frac{\theta_s(I_s, T_2) - \theta_s(I_s, T_1)}{T_2 - T_1} \times 100 \dots\dots\dots (5-5)$$

$T_1 \sim T_2$  : 温度範囲  
 $\theta_s(I, T)$  : 光学的振れ角 (I: 駆動電流, T: 温度)

表5-1に示すように、-20~+25 °C、+25~+70 °Cでは光学的振れ角の温度係数は異なり、非線形な特性となっています。温度補正を高精度に行う場合、式 (5-6)の2次多項式で、光学的振れ角の温度係数を計算する必要があります。2次多項式の補正係数を表5-2に示します。

$$\beta = 1 + \alpha_1 \Delta T + \alpha_2 \Delta T^2 \dots\dots\dots (5-6)$$

$\Delta T$  :  $T - T_{std}$   
T : 周囲温度  
 $T_{std}$  : 基準温度 (25 °C)

[表5-2] 光学的振れ角の温度係数の2次多項式補正係数

(S12237-03P, 代表値)

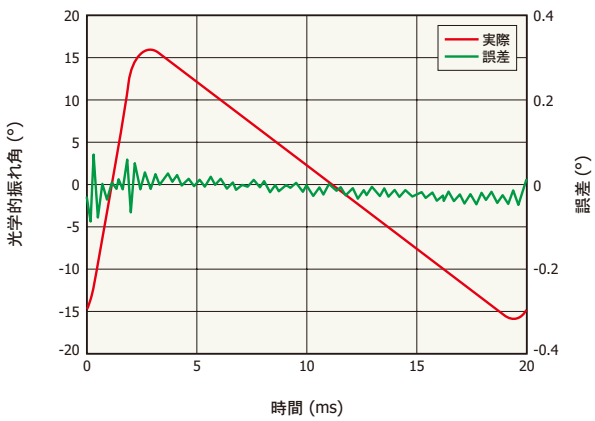
補正係数	値
$\alpha_1$	$-9.4 \times 10^{-4}$
$\alpha_2$	$-1.81 \times 10^{-6}$

実際の温度補正では、光学的振れ角を一定に保つため、駆動電流を $\beta$ で割ります。式 (5-6)の $\alpha_1$ に表5-1の $\alpha$ を代入して、 $\alpha_2$ に0を代入すると $\beta$ が求められます。

上記のように駆動電流による温度補正を行うとともに、リングング補正 (「5-4 リングングの補正」参照)を行った結果を図5-15に示します。周囲温度 70 °Cにおいても、駆動電流による補正のみで室温と同等の動作を実現しています。

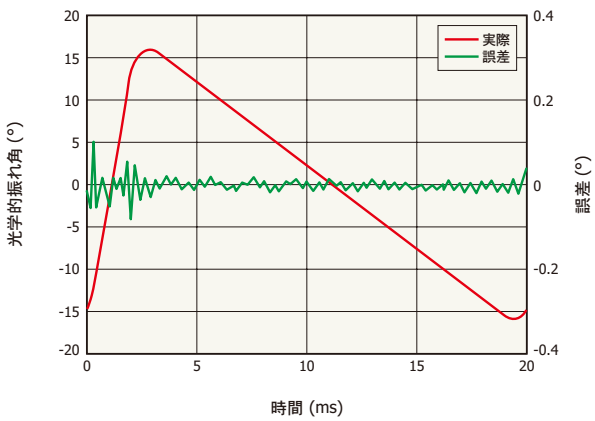
[図5-15] 温度補正結果 (リングング補正時, 測定例)

(a) Tcase=25 °C



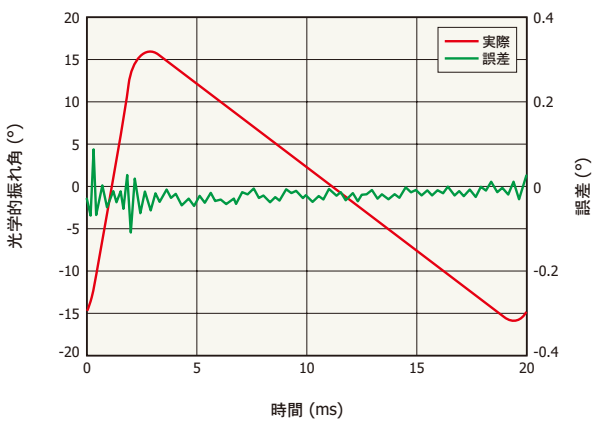
KOTHB0052JA

(b) Tcase=-20 °C



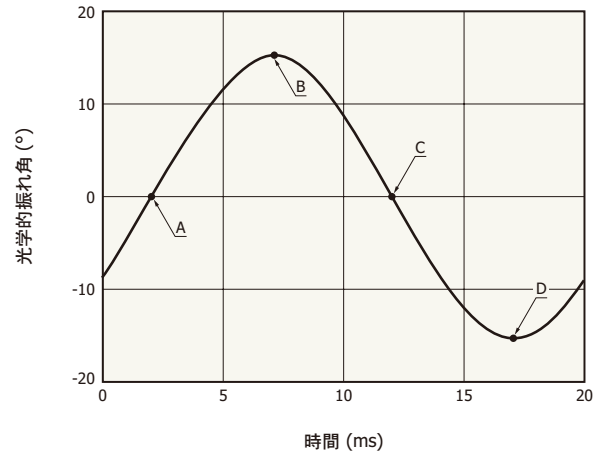
KOTHB0053JA

(c) Tcase=70 °C



KOTHB0054JA

[図5-16] 光学的振れ角-時間



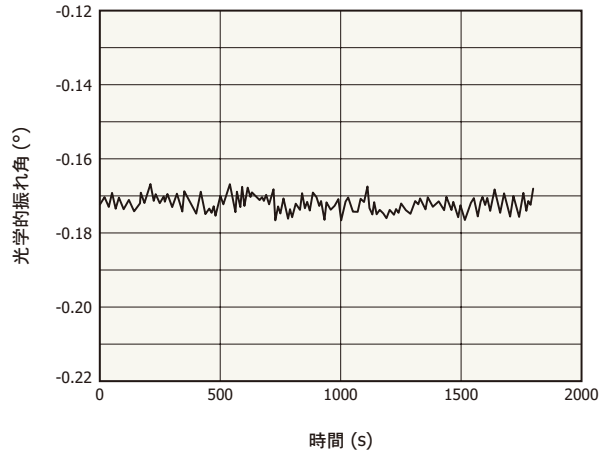
<測定条件>

- ・駆動波形: 正弦波
- ・駆動周波数: 50 Hz
- ・駆動電流振幅: 15 mA
- ・測定時間: 30 min
- ・測定間隔: 1 s
- ・測定装置の測定精度:  $\pm 0.03^\circ$

KOTHB0055JA

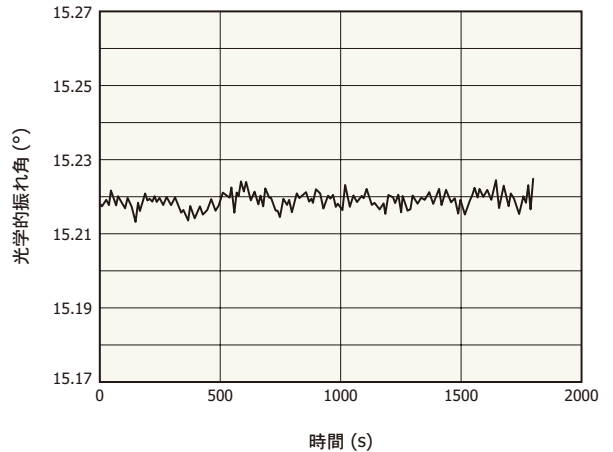
[図5-17] 光学的振れ角の再現性の例

(a) A付近



KOTHB0056JB

(b) B付近

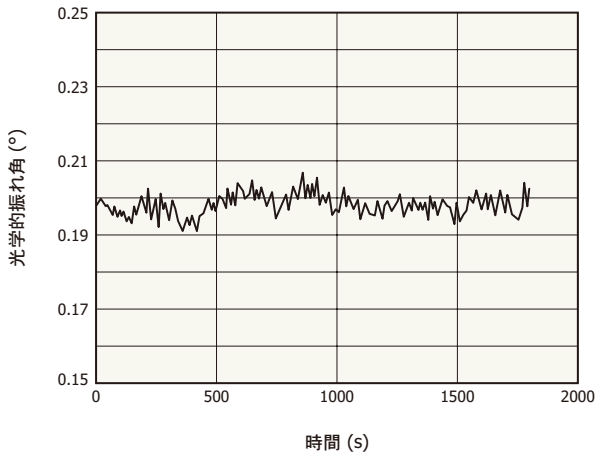


KOTHB0057JB

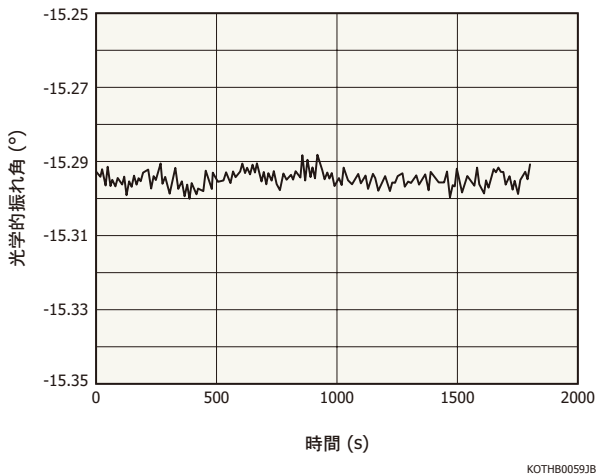
## 5-6 光学的振れ角の再現性

図5-16のA~Dについて、経時的な再現性の例を図5-17に示します。このデータは、MEMSミラーを30分間、動作させたときの光学的振れ角の変化量で、 $\pm 0.01^\circ$ 以下の安定性があることを示しています。

(c) C付近



(d) D付近



本資料の記載内容は、令和5年5月現在のものです。

製品の仕様は、改良などのため予告なく変更することがあります。本資料は正確を期するため慎重に作成されたものですが、まれに誤記などによる誤りがある場合があります。本製品を使用する際には、必ず納入仕様書をご用命の上、最新の仕様をご確認ください。

本製品の保証は、納入後1年以内に瑕疵が発見され、かつ弊社に通知された場合、本製品の修理または代品の納入を限度とします。ただし、保証期間内であっても、天災および不適切な使用に起因する損害については、弊社はその責を負いません。

本資料の記載内容について、弊社の許諾なしに転載または複製することを禁じます。

## 浜松ホトニクス株式会社

[www.hamamatsu.com](http://www.hamamatsu.com)

仙台営業所	〒980-0021 仙台市青葉区中央3-2-1 (青葉通プラザ11階)	TEL (022) 267-0121 FAX (022) 267-0135
筑波営業所	〒305-0817 つくば市研究学園5-12-10 (研究学園スクウェアビル7階)	TEL (029) 848-5080 FAX (029) 855-1135
東京営業所	〒100-0004 東京都千代田区大手町2-6-4 (常盤橋タワー11階)	TEL (03) 6757-4994 FAX (03) 6757-4997
中部営業所	〒430-8587 浜松市中区砂山町325-6 (日本生命浜松駅前ビル)	TEL (053) 459-1112 FAX (053) 459-1114
大阪営業所	〒541-0052 大阪市中央区安土町2-3-13 (大阪国際ビル10階)	TEL (06) 6271-0441 FAX (06) 6271-0450
西日本営業所	〒812-0013 福岡市博多区博多駅東1-13-6 (いちご博多イーストビル5階)	TEL (092) 482-0390 FAX (092) 482-0550

固体営業推進部 〒435-8558 浜松市東区市野町1126-1 TEL (053) 434-3311 FAX (053) 434-5184