

MEMS-FPI分光センサ 分光モジュール

目次

1. 概要

p.01

2. MEMS-FPI分光センサ

p.02

- 2-1 構造
- 2-2 特性
- 2-3 使用方法

3. 分光モジュール (C15712, C15713, C15714)

p.16

- 3-1 制御回路
- 3-2 評価用ソフトウェア
- 3-3 光ファイバアダプタ (別売)
- 3-4 特性
- 3-5 測定例

4. Q&A

p.20

1. 概要

MEMS-FPI分光センサは、印加する電圧を変化させて透過波長を可変できるMEMS-FPI (Fabry-Perot Interferometer: ファブリペロー干渉計)チューナブルフィルタとInGaAs PINフォトダイオードを1パッケージに収めた超小型センサです。近赤外域に感度波長範囲をもち、溶液中の物質・プラスチック・繊維の識別用、水分検出用、農業・食品分野における成分分析などの小型機器への組み込みに適しています。

MEMS-FPI分光モジュール (以下「分光モジュール」) は、MEMS-FPI分光センサ、光源、制御回路を内蔵した小型モジュールです。PCとUSB接続することによって、近赤外域のスペクトルや吸光度の測定を行うことができます。

[図1-1] MEMS-FPI分光センサ
(C13272-03, C14272, C14273)



[図1-2] 分光モジュール
(C15712, C15713, C15714)

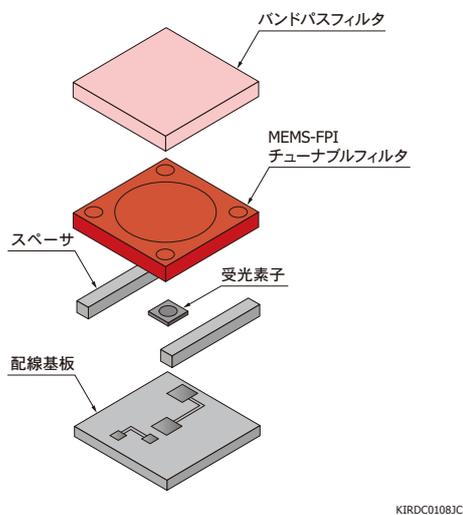


2. MEMS-FPI分光センサ

2-1 構造

MEMS-FPI分光センサは、MEMS-FPIチューナブルフィルタ、受光素子（フォトダイオード）などから成ります。光入射方向と同軸上にMEMS-FPIチューナブルフィルタと受光素子を配置したシンプルな構成です。本製品は分光センサでありながら、単素子の受光素子を使用しており、高価な多チャンネルの受光素子を使う必要がありません。

[図2-1] センサ内部構造

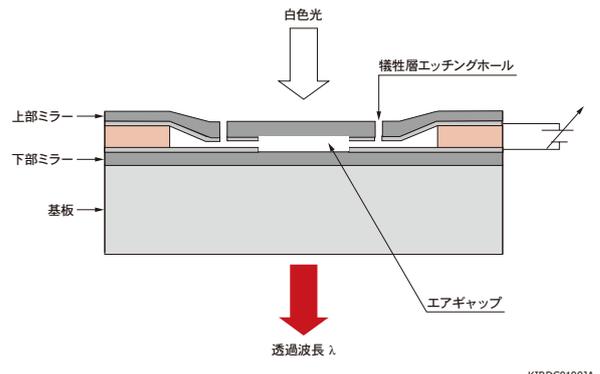


MEMS-FPIチューナブルフィルタ

MEMS-FPIチューナブルフィルタは、エアギャップを介して、上部ミラーと下部ミラーを対向させています [図2-2]。ミラー間に電圧を印加し、その静電引力によってエアギャップの調整を行います。そのため、上部ミラーはメンブレン（薄膜）構造となっています。エアギャップが $m\lambda/2$ のときに、おおむね波長 λ が透過するフィルタとして機能します（ m : 整数）。フィルタ制御電圧を大きくすると静電引力によりエアギャップは小さくなり、ピーク透過波長が短波長側へシフトします。

基板には、赤外フィルタとしてSiを用いています。ミラーには、一般的な半導体材料であるSiO₂、SiN、Poly-Siなどの誘電体多層膜が適用できます。

[図2-2] MEMS-FPIチューナブルフィルタの断面図



2-2 特性

絶対最大定格

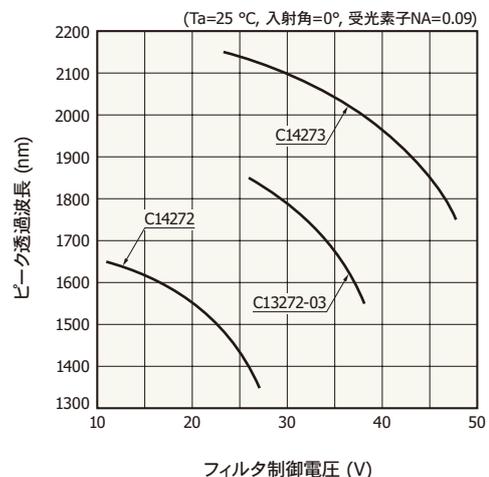
絶対最大定格を一瞬でも超えると、製品の品質を損なう恐れがあります。必ず絶対最大定格の範囲内で使用してください。フィルタ制御電圧については「4. Q&A/Q3」を参照してください。

注) MEMS-FPI分光センサは静電気管理対象品です。取り扱い時には、静電気による破壊および劣化の防止のために注意する必要があります。詳細は、製品に添付された取扱説明書を参照してください。

フィルタ制御電圧とピーク透過波長

MEMS-FPI分光センサは、フィルタ制御電圧によりピーク透過波長を可変することができますが、両者の関係は線形ではありません [図2-3]。

[図2-3] ピーク透過波長—フィルタ制御電圧 (代表例)



フィルタ制御電圧とピーク透過波長の関係を多項式でフィッティングして、その定数（電圧一波長換算係数）を求める必要があります。この多項式を用いると、フィルタ制御電圧とピーク透過波長の関係を表すことができます。

MEMS-FPI分光センサのピーク透過波長には、温度特性があります。たとえばC13272-03において、25 °Cでピーク透過波長が1550 nmとなるようにフィルタ制御電圧を印加した状態で、温度が45 °Cに変化すると、ピーク透過波長は約12 nm大きくなり約1562 nmになります。フィルタ制御電圧とピーク透過波長の関係は、常温補正定数を使用する方式と、温度補正定数を使用する方式で表されます。

⚙️ 常温の場合

MEMS-FPI分光センサの温度を常温（25 °C）に保つことができる場合、フィルタ制御電圧とピーク透過波長の関係は式 (2-1) で表されます。

$$V^2 = a_0\lambda p^5 + b_0\lambda p^4 + c_0\lambda p^3 + d_0\lambda p^2 + e_0\lambda p + f_0 \cdots (2-1)$$

V: フィルタ制御電圧
λp: ピーク透過波長 [m]

リファレンスデータシート掲載の常温補正定数 a、b、c、gと、製品の型名ごとの固定値 Aを用いて式 (2-2)～(2-12)によって、定数 a₀、b₀、c₀、d₀、e₀、f₀を算出できます。

注)

- ・式 (2-1)により算出されるフィルタ制御電圧は、参考データです。保証するものではありません。
- ・a、b、c、g（条件: T_a=25 °C, 感度波長範囲）は、個々の製品で異なります。

$$\begin{aligned} \text{C14272: } Z &= 1.5 \times 10^{-6} (1 - A), \\ \text{C13272-03: } Z &= 1.7 \times 10^{-6} (1 - A), \\ \text{C14273: } Z &= 1.95 \times 10^{-6} (1 - A) \cdots (2-2) \end{aligned}$$

$$B_0 = -a \cdots (2-3)$$

$$C_0 = 3ag + b \cdots (2-4)$$

$$D_0 = -3ag^2 - 2bg - c \cdots (2-5)$$

$$E_0 = ag^3 + bg^2 + cg \cdots (2-6)$$

$$a_n = A^5 B_n \cdots (2-7)$$

$$b_n = A^4 (5B_n Z + C_n) \cdots (2-8)$$

$$c_n = A^3 (10B_n Z^2 + 4C_n Z + D_n) \cdots (2-9)$$

$$d_n = A^2 (10B_n Z^3 + 6C_n Z^2 + 3D_n Z + E_n) \cdots (2-10)$$

$$e_n = AZ (5B_n Z^3 + 4C_n Z^2 + 3D_n Z + 2E_n) \cdots (2-11)$$

$$f_n = Z^2 (B_n Z^3 + C_n Z^2 + D_n Z + E_n) \cdots (2-12)$$

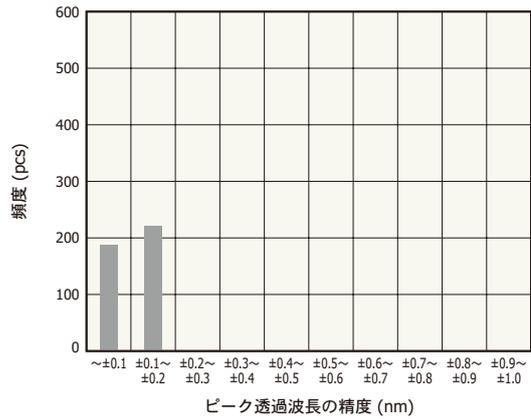
C14272: A = 1/0.755121951
C13272-03: A = 1/0.753902939
C14273: A = 1/0.751250854

式 (2-7)～(2-12)にn=0を代入して、a₀、b₀、c₀、d₀、e₀、f₀を計算します。これらの値を式 (2-1)に代入すると、ピーク透過波長に対応するフィルタ制御電圧が得られます。

25 °Cにおいて特定のフィルタ制御電圧を印加して測定したピーク透過波長と、本方式の計算式で算出したピーク透過波長とズレの測定例を図2-4に示します。±0.5 nmの範囲にズレが収まっています。

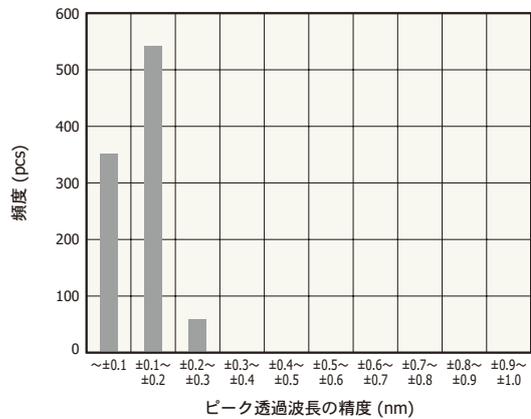
[図2-4] ピーク透過波長の精度 (常温補正定数を使用, 測定例)

(a) C14272 (サンプル数: 409)



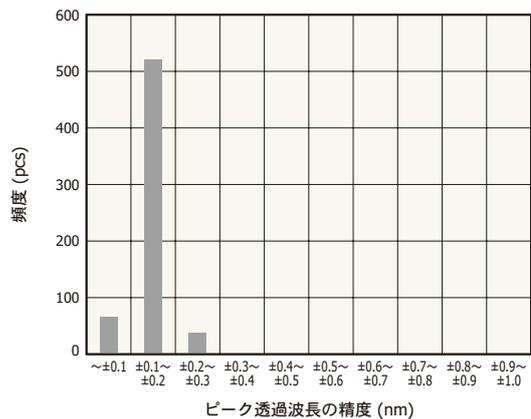
KACCB07073A

(b) C13272-03 (サンプル数: 952)



KACCB07093A

(c) C14273 (サンプル数: 625)



KACCB07093A

⚙️ フィルタ制御電圧とピーク透過波長の温度特性の補正

温度変化によるピーク透過波長の変化を、計算式により数nm以下に補正する方法を説明します。フィルタ制御電圧とピーク透過波長の関係は、式 (2-17)で表されます。常温時の式 (2-1)に、温度変化分を加えて計算します。

複雑な式を用いるため、計算を行うためのExcel®シートを用意しています。当社営業までお問い合わせください。

注) Excelは米国Microsoft Corporationの米国およびその他の国における登録商標です。

$$B_1 = -p, B_2 = -t \cdots (2-13)$$

$$C_1 = 3pg + q, C_2 = 3tg + u \cdots (2-14)$$

$$D_1 = -3pg^2 - 2qg - r, D_2 = -3tg^2 - 2ug - v \cdots (2-15)$$

$$E_1 = pg^3 + qg^2 + rg + s, E_2 = tg^3 + ug^2 + vg + w \cdots (2-16)$$

p, q, r, s, t, u, v, w: リファレンスデータシート掲載の温度補正定数

$$V^2 = a_0\lambda p^5 + b_0\lambda p^4 + c_0\lambda p^3 + d_0\lambda p^2 + e_0\lambda p + f_0 + (a_1\lambda p^5 + b_1\lambda p^4 + c_1\lambda p^3 + d_1\lambda p^2 + e_1\lambda p + f_1) \Delta T + (a_2\lambda p^5 + b_2\lambda p^4 + c_2\lambda p^3 + d_2\lambda p^2 + e_2\lambda p + f_2) \Delta T^2 \cdots (2-17)$$

V: フィルタ制御電圧

λp : ピーク透過波長 [m]

ΔT : 25 °Cに対する温度変化量 (T - 25 °C)

"a0, b0, c0, d0, e0, f0" "a1, b1, c1, d1, e1, f1" "a2, b2, c2, d2, e2, f2":

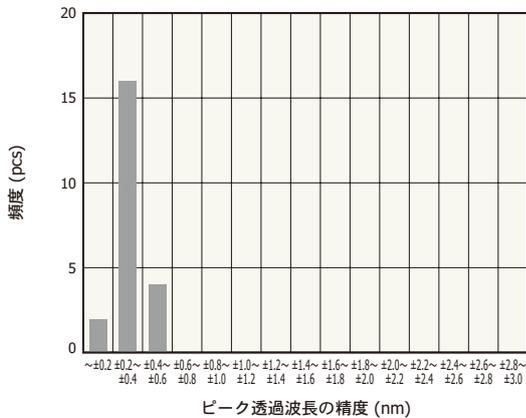
それぞれ式 (2-7) (2-8) (2-9) (2-10) (2-11) (2-12) から求めます。

すべてのサンプルにおいて温度特性を測定すると非常に時間がかかるため、同様の特性が予想される同一ロット品などにおいて、リファレンスデータシート掲載の温度補正定数を用いて温度補正をすることを推奨します。測定したピーク透過波長と、温度補正定数を用いて算出したピーク透過波長とズレの測定例を図2-5に示します。

上記の温度補正定数は、当社の評価条件において求めたものです。お客様が使用する条件において、保証できるものではありません。

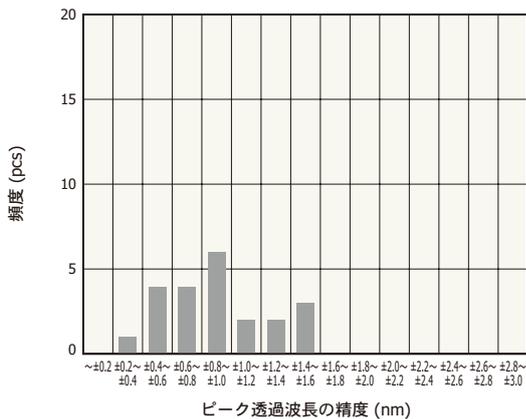
[図2-5] ピーク透過波長の精度 (温度補正定数を使用, 測定例)

(a) C14272 (+5~+45 °C: ズレ=±0.6 nm以内, サンプル数: 22)



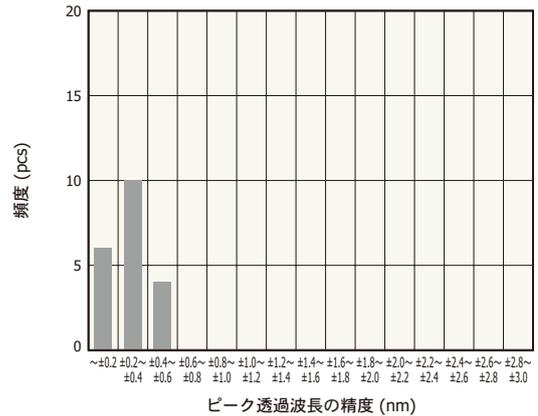
KACCB0710JA

(b) C14272 (-20~+85 °C: ズレ=±1.6 nm以内, サンプル数: 22)



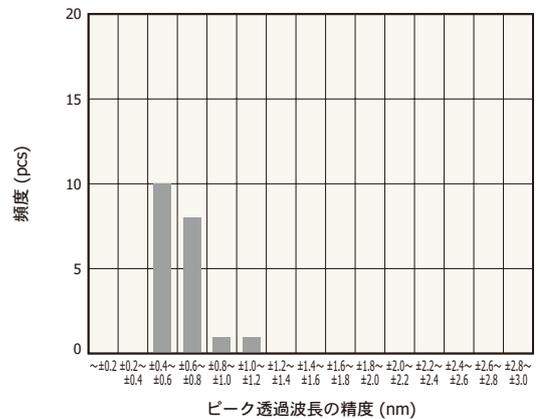
KACCB0711JA

(c) C13272-03 (+5~+45 °C: ズレ=±0.6 nm以内, サンプル数: 20)



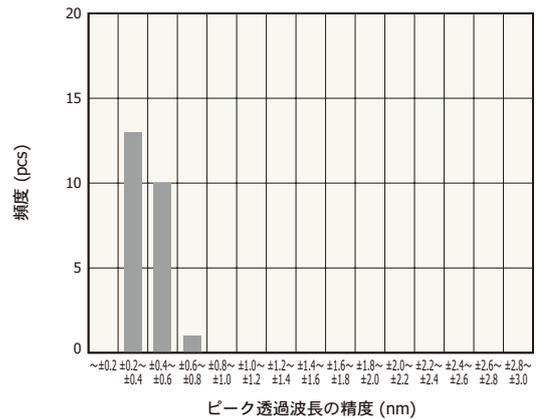
KACCB0712JA

(d) C13272-03 (-20~+85 °C: ズレ=±1.2 nm以内, サンプル数: 20)



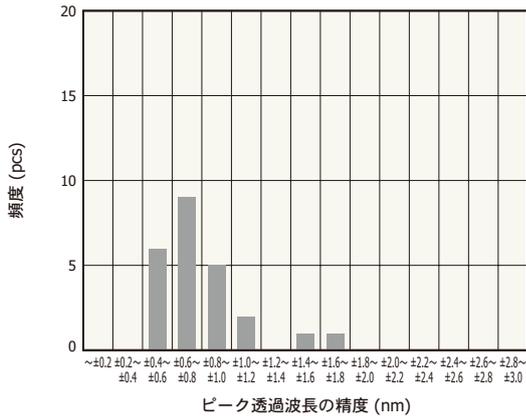
KACCB0713JA

(e) C14273 (+5~+45 °C: ズレ=±0.8 nm以内, サンプル数: 24)



KACCB0714JA

(f) C14273 (-20~+85 °C: ズレ=±1.8 nm以内, サンプル数: 24)



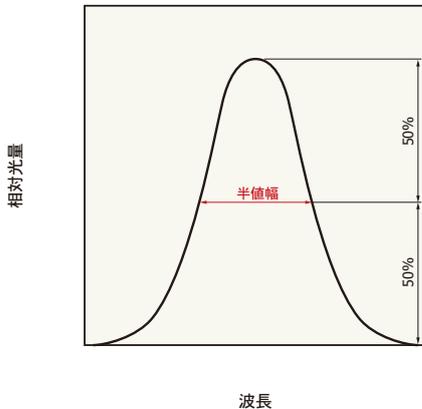
KACCB0715JA

▶ 波長分解能

MEMS-FPIの波長分解能は、スペクトルの半値幅 (Full Width Half Maximum) に基づいて定義されています [図2-6]。スペクトルのピーク値に対する50%の部分のスペクトルの広がりとして定義します。

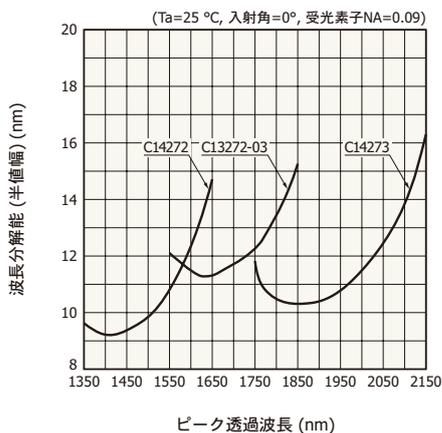
図2-7にMEMS-FPI分光センサの波長分解能の測定例を示します。

[図2-6] 半値幅の定義



KACCC0320JB

[図2-7] 波長分解能—ピーク透過波長 (代表例)



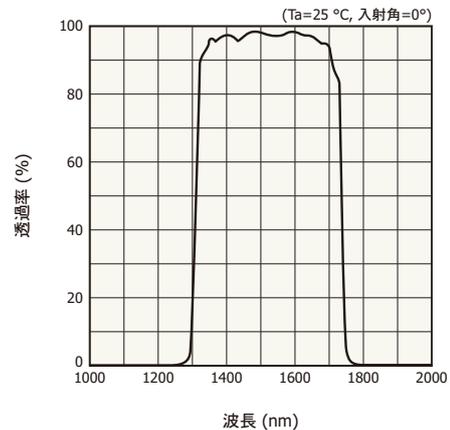
KACCB0483JD

▶ バンドパスフィルタの分光透過率

MEMS-FPI分光センサには、感度波長範囲以外をカットするバンドパスフィルタを内蔵しています。バンドパスフィルタの分光透過率特性を図2-8に示します。

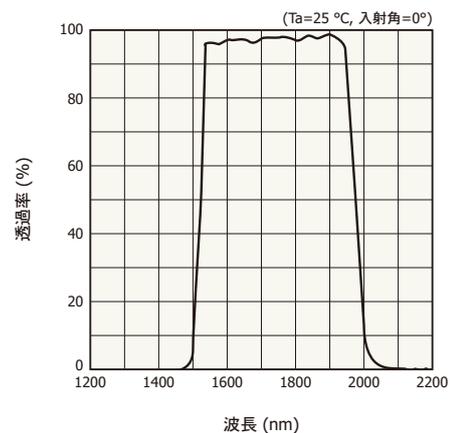
[図2-8] 内蔵バンドパスフィルタの分光透過率特性 (代表例)

(a) C14272



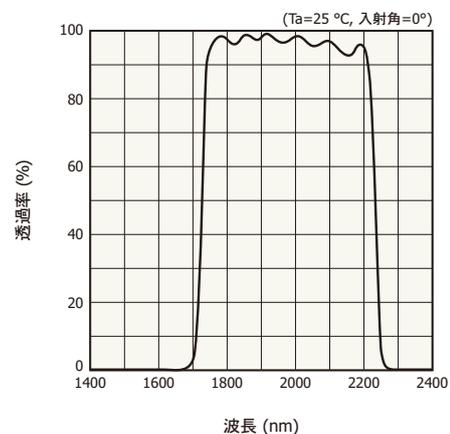
KACCB0476JB

(b) C13272-03



KACCB0433JD

(c) C14273



KACCB0507JA

▶ Pull-in現象

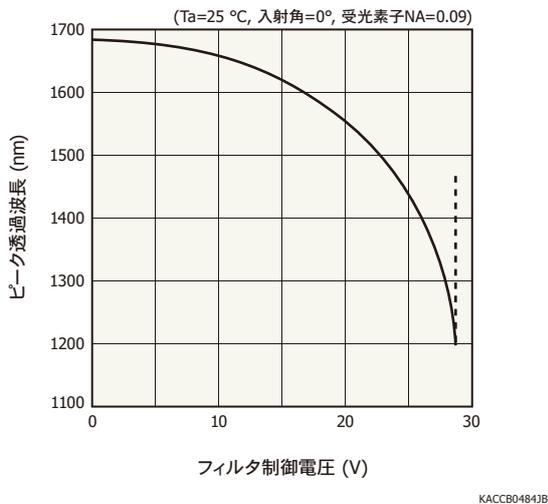
MEMS-FPIチューナブルフィルタを動作させる上で、Pull-in現象について注意する必要があります。Pull-in現象は、電界によりミラーが引き合う静電引力と上部ミラーがもつバネの力の釣り合いが取れなくなることによって発生します。通常は、上記の2つの力が釣り合った場合にMEMS-FPIチューナブルフィルタの上部ミラーの位置が決定され、そのエアギャップに伴った波長を透過させることができます。しかし、フィルタ制御電圧がある値以上になると静電引力の方がバネの力よりも強くなり、力のバランスが崩れ、上部ミラーが下部ミラーに貼り付いてしまいます。この現象がPull-in現象です。下部ミラーに貼り付いた上部ミラーは、容易には剥がれません。このため、MEMS-FPIチューナブルフィルタを駆動させる際には、フィルタ制御電圧に注意する必要があります。なおPull-in現象が発生するエアギャップは、エアギャップ初期値の2/3程度です。

MEMS-FPIチューナブルフィルタのフィルタ制御電圧とピーク透過波長の関係を図2-9に示します。フィルタ制御電圧を増加させてミラー間のエアギャップが初期値の2/3付近になるとPull-in現象が発生し、ピーク透過波長が急激に変化します（破線部分）。フィルタ制御電圧の精度は重要であり、Pull-in現象が発生する付近では特に注意する必要があります。なおPull-in現象が発生するときのフィルタ制御電圧は、製品ごとに異なりますので、注意してください。

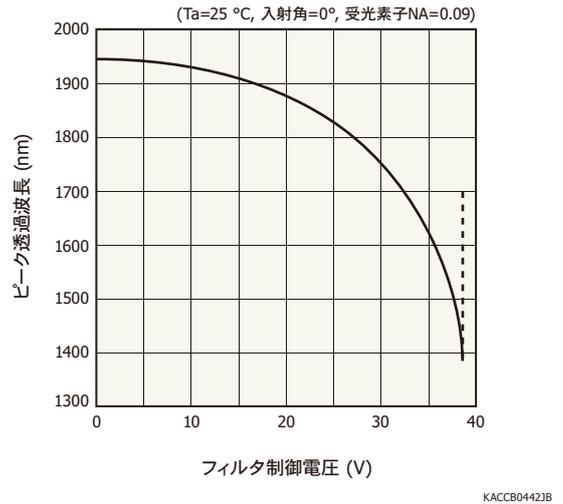
フィルタ制御電圧の絶対最大定格以下では、Pull-in現象は発生しません。フィルタ制御電圧を必ず絶対最大定格より低い値に設定してください。

【図2-9】 Pull-in現象 (破線部分)

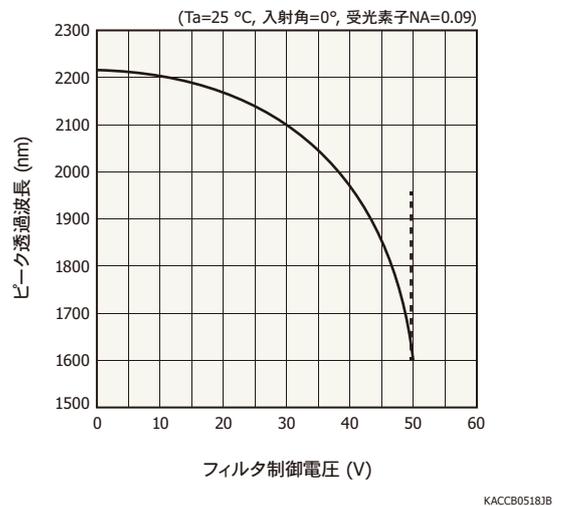
(a) C14272



(b) C13272-03



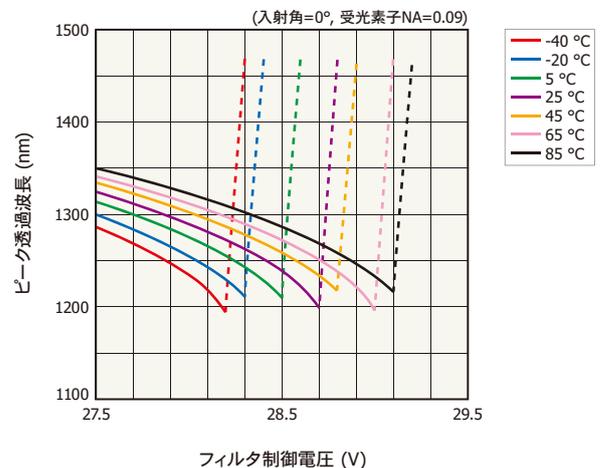
(c) C14273



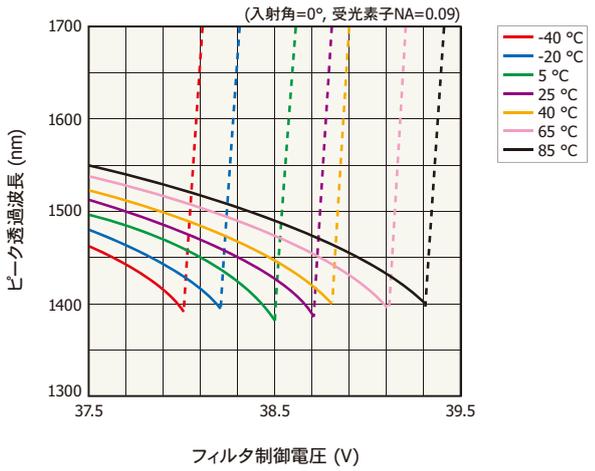
Pull-in現象が発生するフィルタ制御電圧は温度によって変化しますので、注意する必要があります。図2-10にPull-in現象の温度依存性を示します。

【図2-10】 Pull-in現象の温度依存性 (代表例)

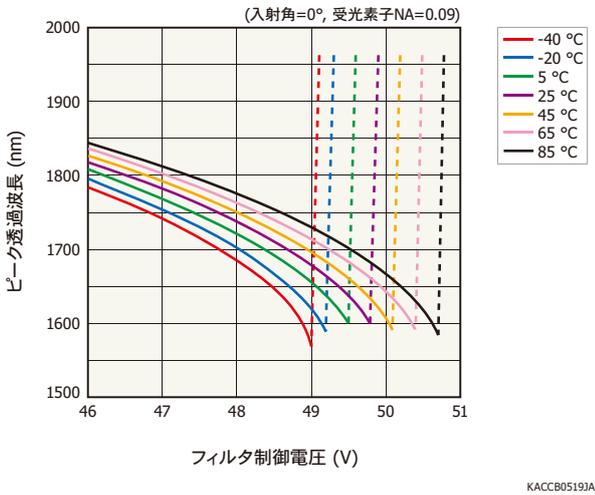
(a) C14272



(b) C13272-03



(c) C14273



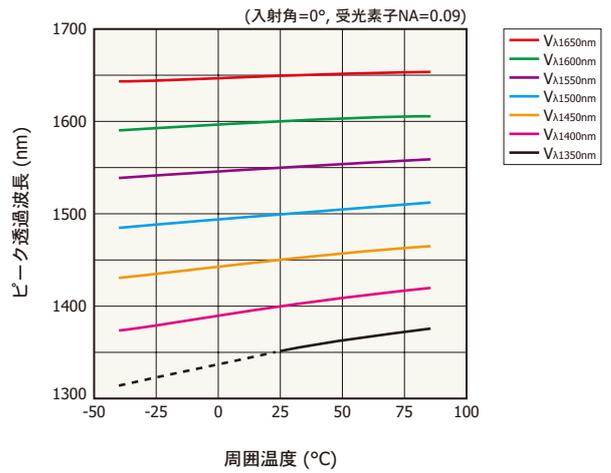
温度特性

MEMS-FPI分光センサのピーク透過波長には、温度依存性があります。

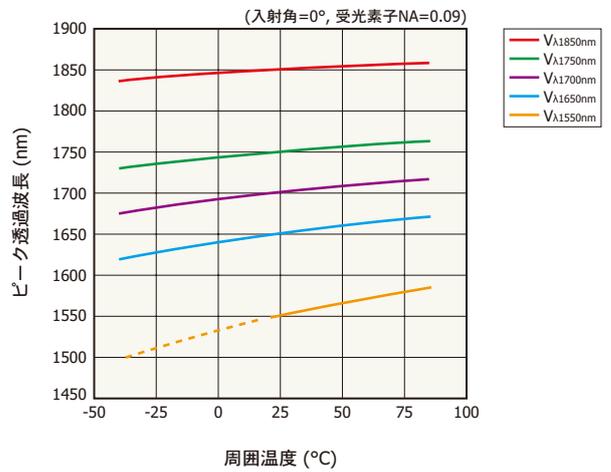
- ・C14272: 0.3 nm/°C typ. ($\lambda=1500$ nm)
 - ・C13272-03: 0.4 nm/°C typ. ($\lambda=1700$ nm)
 - ・C14273: 0.3 nm/°C typ. ($\lambda=1950$ nm)
- フィルタ制御電圧を一定にした場合のピーク透過波長と周囲温度の関係を図2-11に示します。

[図2-11] ピーク透過波長—周囲温度 (代表例)

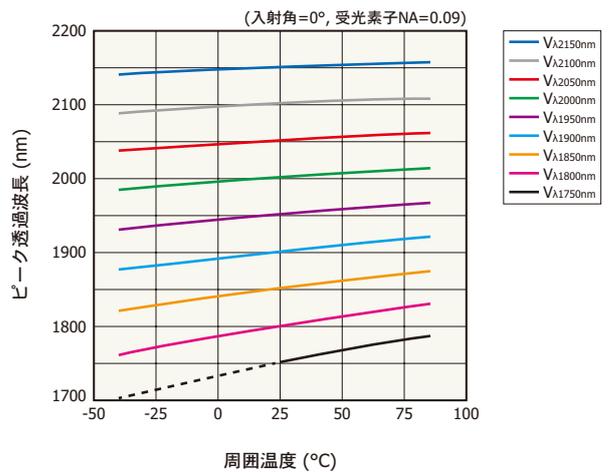
(a) C14272



(b) C13272-03



(c) C14273

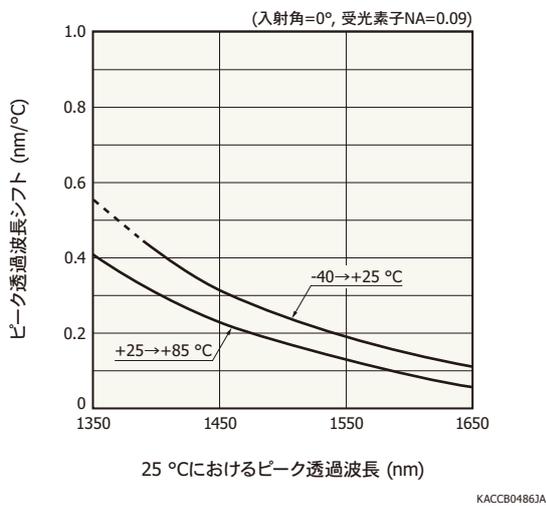


また、温度変化時 [低温側 (-40→+25 °C)と高温側 (+25→+85 °C)]のピーク透過波長シフト (図2-11のデータを用いて算出)を図2-12に示します。ピーク透過波長が短くなるにつれて波長シフトは大きくなります。また、高温側よりも低温側の方が波長シフトは大きくなります。なお、図2-11、図2-12の破線部分は、内蔵のバンドパスフィルタを外した場合のデータです。

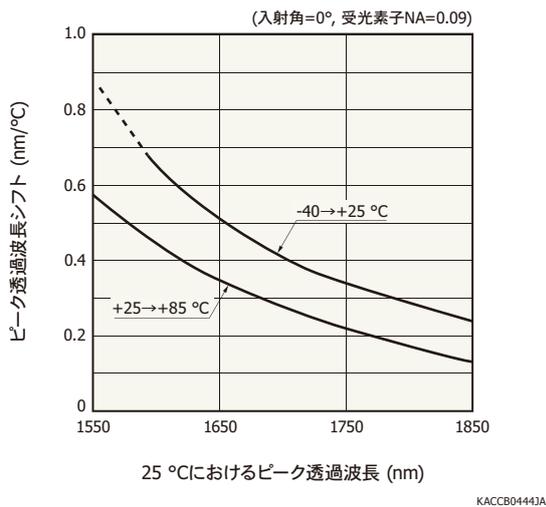
図2-11、図2-12の破線部分ではピーク透過波長を正確に検出できません。これは、周囲温度が25 °Cより低い場合、MEMS-FPIチューナブルフィルタのピーク透過波長が、バンドパスフィルタの透過波長範囲外になるためです。

[図2-12] ピーク透過波長シフトーピーク透過波長 (代表例)

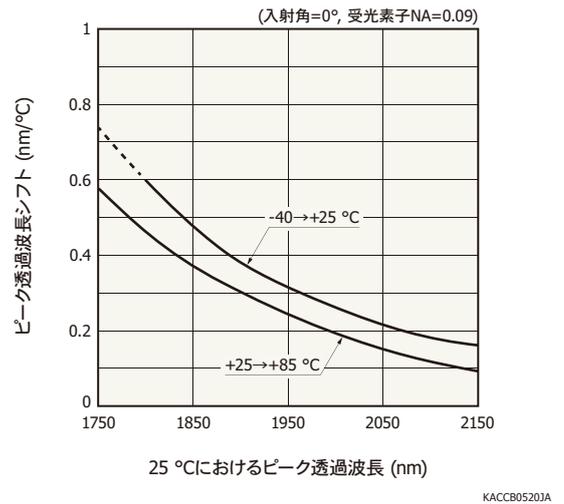
(a) C14272



(b) C13272-03



(c) C14273

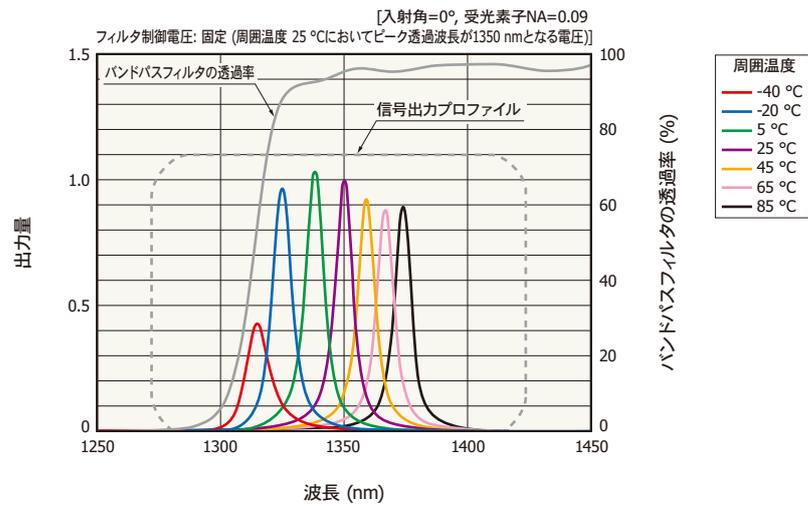


MEMS-FPI分光センサのフィルタ制御電圧を固定した場合の波長プロファイルの温度特性を図2-13に示します。

それぞれに内蔵するバンドパスフィルタの透過率も示しています (バンドパスフィルタの透過率の温度依存性は、ほとんどありません)。周囲温度が低くなると、波長プロファイルが短波長側に移動します。25 °Cより低くなると、波長プロファイルはバンドパスフィルタの透過率が低い波長域になるため、正確にピーク透過波長を検出できません。

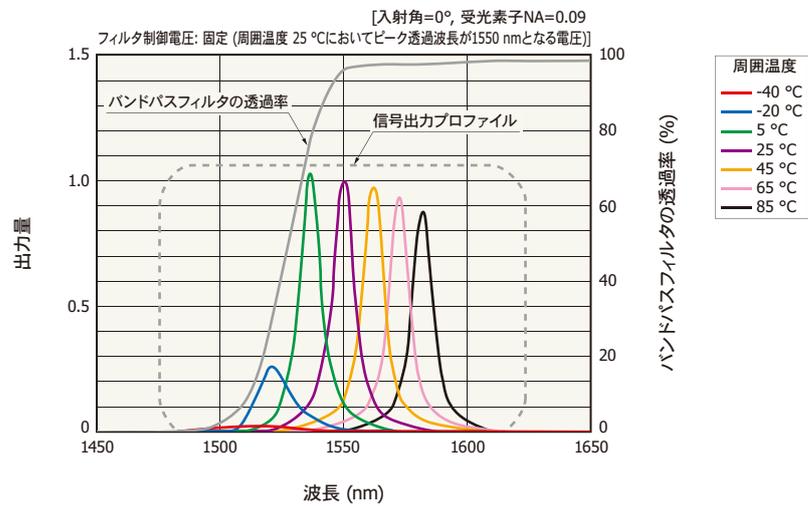
[図2-13] 波長プロファイルの温度特性 (代表例)

(a) C14272



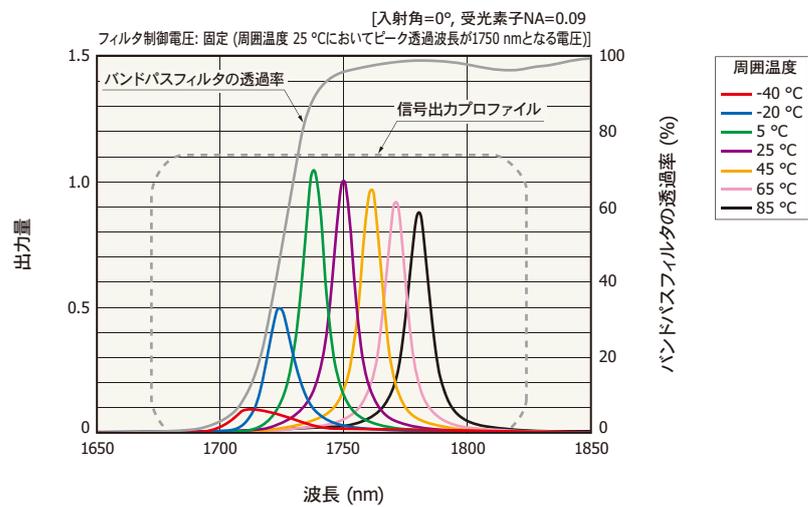
KACCB04871A

(b) C13272-03



KACCB04453B

(c) C14273

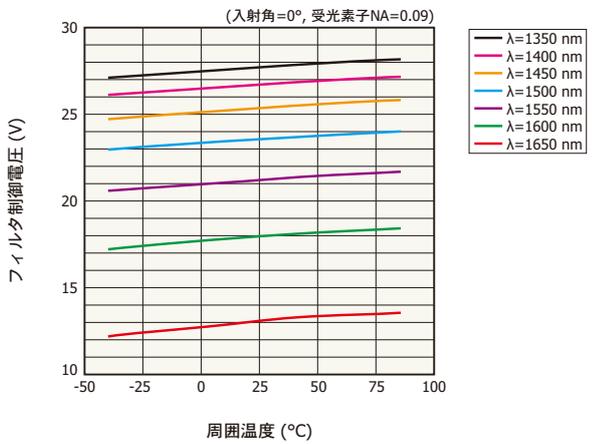


KACCB05211A

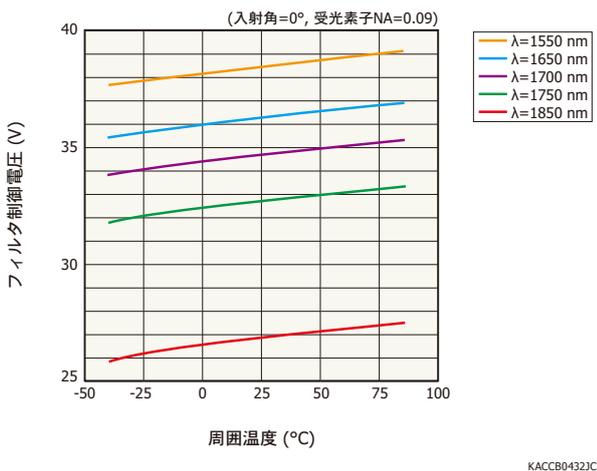
フィルタ制御電圧を周囲温度に対して補正することによって、バンドパスフィルタの影響を受けることなく、動作温度範囲 (-40~+85 °C)において感度波長範囲で正確にピーク透過波長を検出することが可能になります。フィルタ制御電圧と周囲温度の関係を図2-14に示します。また、温度変化時 [低温側 (-40→+25 °C)と高温側 (+25→+85 °C)]のピーク透過波長 (25 °C)におけるフィルタ制御電圧シフト [図2-14のデータを用いて式 (2-18)で算出]を図2-15に示します。フィルタ制御電圧シフトは、ピーク透過波長が短くなるにつれて小さくなり、高温側よりも低温側の方が大きくなります。特に短波長域または低温において、Pull-in現象に対する注意が必要です。

【図2-14】フィルタ制御電圧—周囲温度 (代表例)

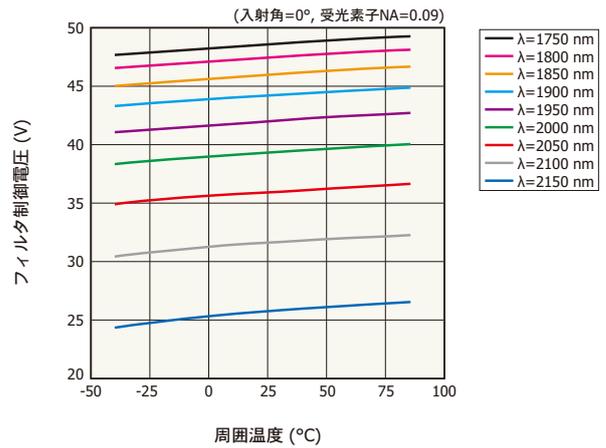
(a) C14272



(b) C13272-03

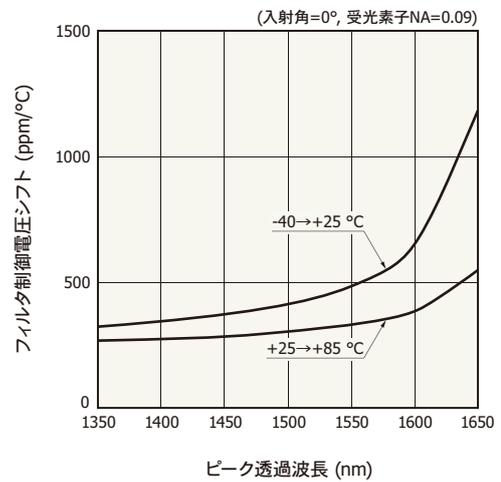


(c) C14273

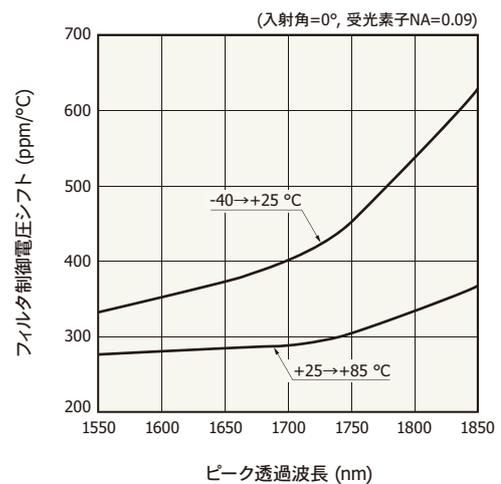


【図2-15】フィルタ制御電圧シフト—ピーク透過波長 (代表例)

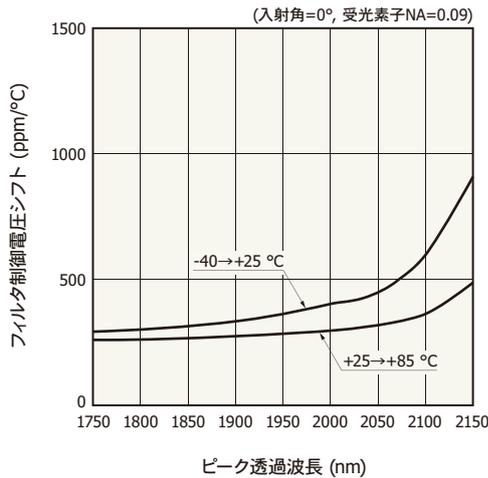
(a) C14272



(b) C13272-03



(c) C14273



KACCB05223A

フィルタ制御電圧シフトの計算方法を式 (2-18) に示します。

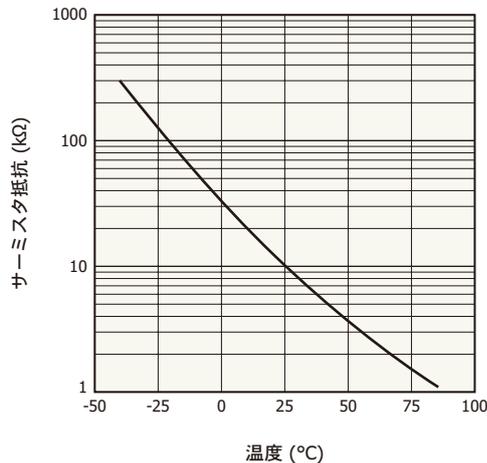
$$\text{フィルタ制御電圧シフト} = \frac{(V - V_0)}{(T - T_0)V_0} \times 10^6 \text{ [ppm/}^\circ\text{C]} \dots (2-18)$$

T: 周囲温度
 T₀: 周囲温度 (25 °C)
 V: フィルタ制御電圧
 V₀: フィルタ制御電圧 (25 °C)

» サーマスタ特性

サーミスタ抵抗と温度の関係を図2-16に示します。

[図2-16] サーマスタ抵抗—温度 (代表例)



KACCB0404B

式 (2-19) のSteinhart-Hart式を用いると、サーミスタ抵抗から温度を換算することができます。

$$1/T = A + B[\ln(R)] + C[\ln(R)]^3 \dots (2-19)$$

T: 温度 [K]
 R: サーマスタ抵抗 [Ω]

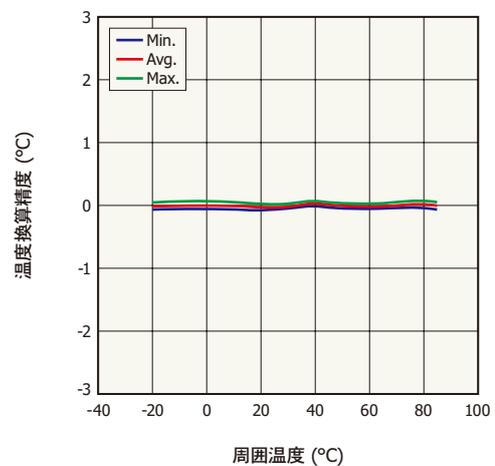
抵抗値の範囲を区切って式 (2-19) の定数 A、B、C を求めると、換算の精度を高めることができます。その参考例を表2-3に示します。

[表2-3] Steinhart-Hart式の定数 (参考例)

抵抗値の範囲 (kΩ)	定数		
	A	B	C
(300.3)~96.1	3.53348×10^{-3}	-7.87463×10^{-5}	8.74259×10^{-7}
96.1~32.9	1.46516×10^{-3}	1.85960×10^{-4}	2.32844×10^{-7}
32.9~5.3	1.09316×10^{-3}	2.40113×10^{-4}	6.28813×10^{-8}
5.3~(1.1)	1.05955×10^{-3}	2.44870×10^{-4}	5.14556×10^{-8}

次に、サーミスタ抵抗値を使った温度測定の例を示します。-20~+85 °Cを3つの温度範囲に分割して、30個のサンプルごとに測定を行い定数 A、B、Cを求めて換算した温度と、周囲温度の実測値の差を図2-17に示します。

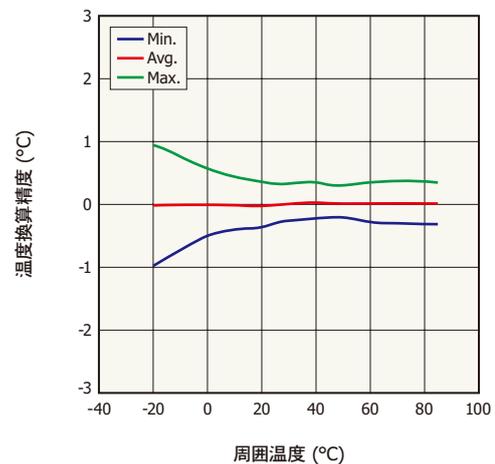
[図2-17] サーマスタ抵抗値から換算した温度と実測値の差 (測定例, サンプル数: 30)



KACCB05233A

同一のロットの製品など、一定の傾向が予想される場合の例を示します。30個のサンプルで、3つの温度範囲において定数A、B、Cを求めて、30個の平均の値 A'、B'、C' を求めます。定数A'、B'、C' から換算した温度と、実測値との誤差を図2-18に示します。これは、個別に温度換算を行うよりも精度は劣りますが、短時間でのキャリブレーションが可能となります。

[図2-18] サーマスタ抵抗値から換算した温度と実測値の差 (測定例, 平均した定数から換算, サンプル数: 30)



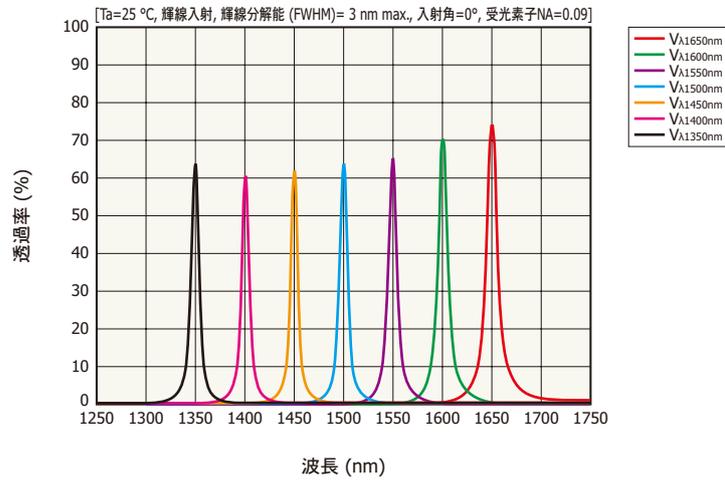
KACCB05243A

MEMS-FPIチューナブルフィルタの透過率

MEMS-FPIチューナブルフィルタの透過率特性を図2-19に示します。感度波長範囲において、透過率のピークが50%を超えています。なお透過率特性は、使用条件によって異なります。

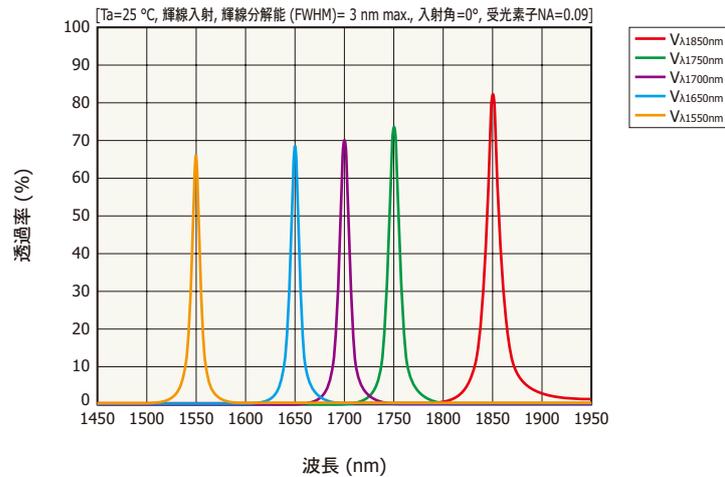
[図2-19] MEMS-FPIチューナブルフィルタの透過率—波長 (代表例)

(a) C14272



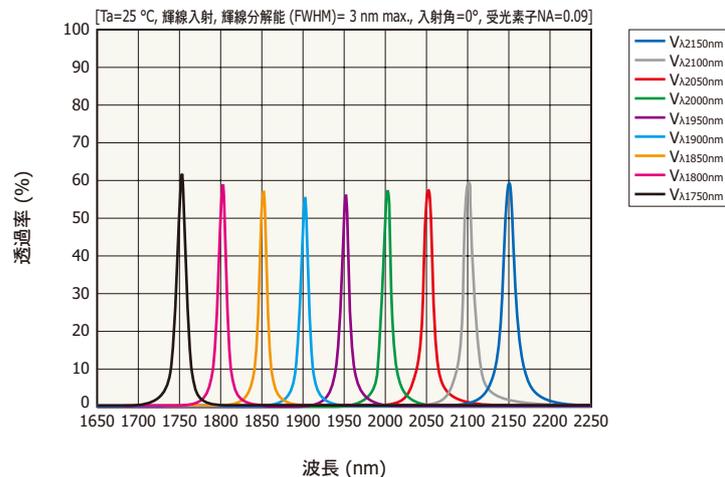
KACCB04773A

(b) C13272-03



KACCB04053A

(c) C14273



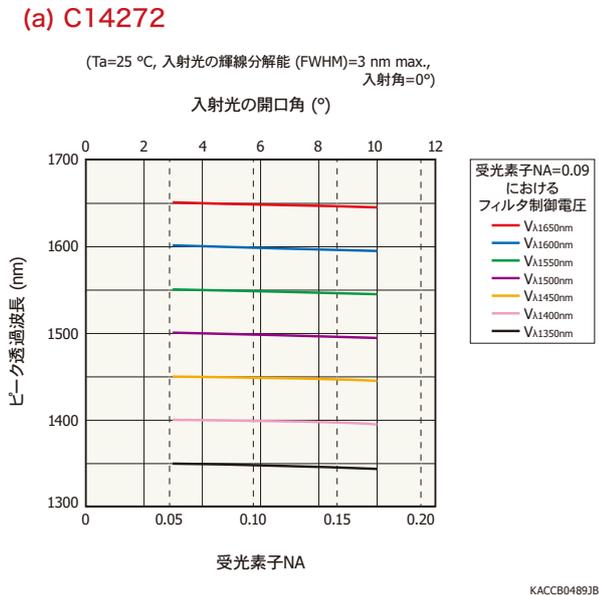
KACCB05083A

入射光の開口角

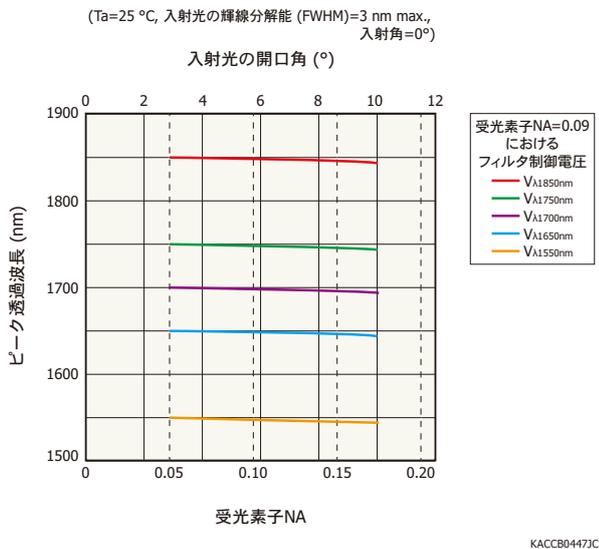
入射光の開口角は、MEMS-FPI分光センサの特性に影響を与えます。入射光の開口角がピーク透過波長に与える影響を図2-20に、波長分解能に与える影響を図2-21に示します。入射光の開口角が大きくなると、ピーク透過波長は短波長側に移動し、波長分解能は大きくなります。このため、入射光の開口角を十分に小さくしてください（受光素子NA \leq 0.09を推奨）。また、MEMS-FPI分光センサにできるだけ垂直（入射角=0°）に光を入射してください。

MEMS-FPI分光センサの出荷検査は、受光素子NA=0.09、入射角=0°で行っています。

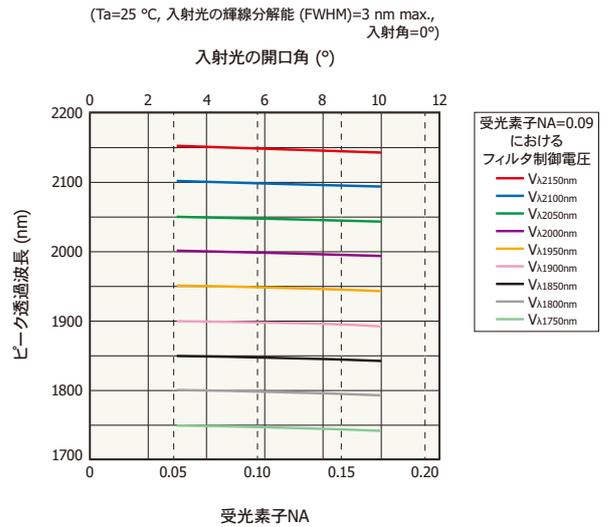
【図2-20】ピーク透過波長—入射光の開口角, 受光素子NA (代表例)



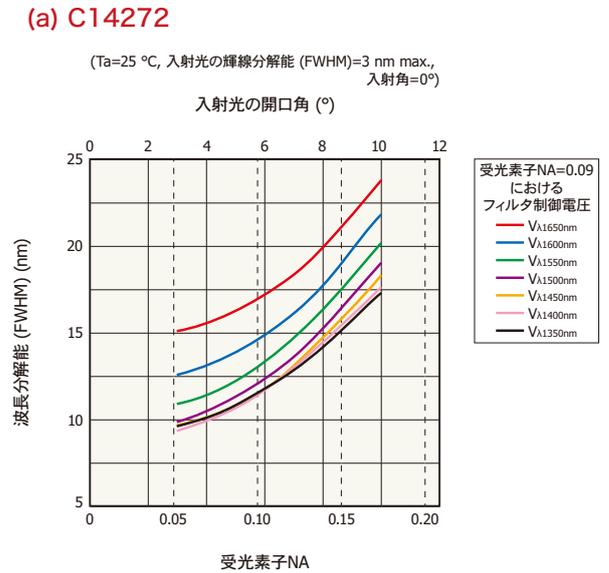
(b) C13272-03



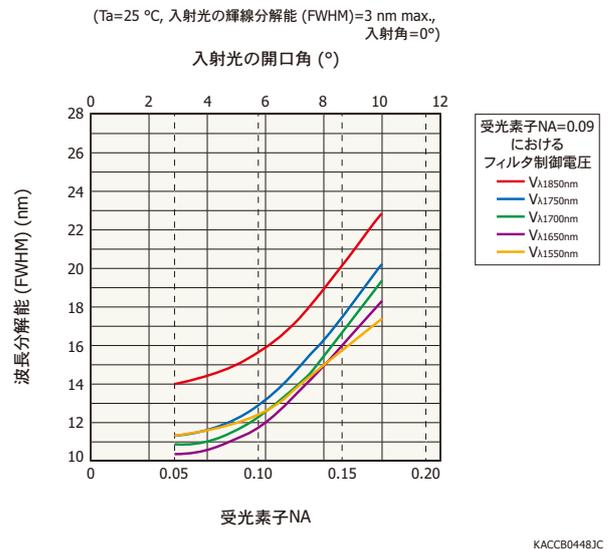
(c) C14273



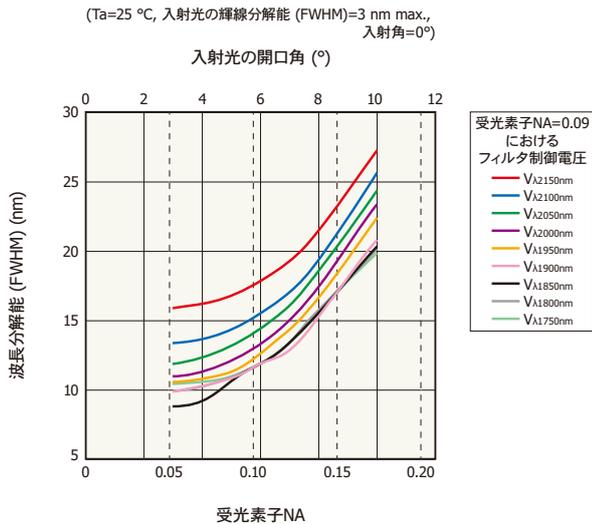
【図2-21】波長分解能—入射光の開口角, 受光素子NA (代表例)



(b) C13272-03



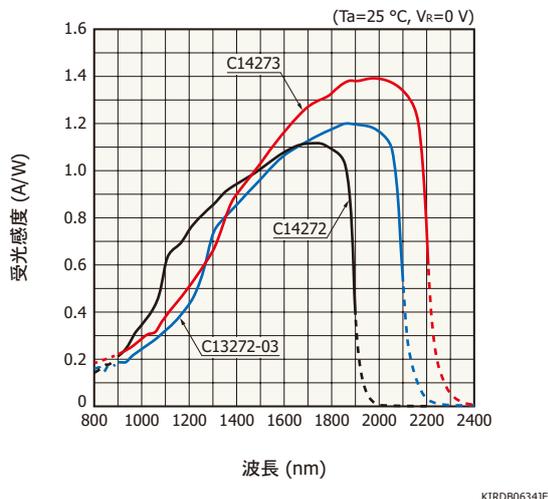
(c) C14273



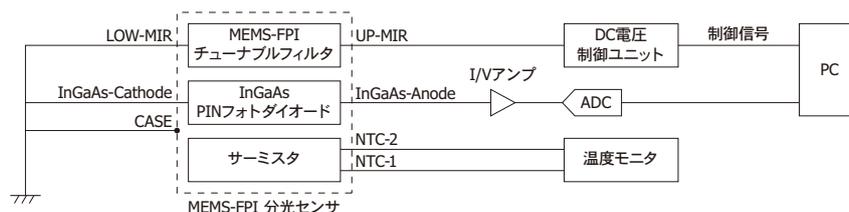
▶ InGaAs PINフォトダイオード

MEMS-FPI分光センサには、当社製InGaAs PINフォトダイオードを受光素子として内蔵しています。内蔵しているInGaAs PINフォトダイオードの分光感度特性を図2-22に示します。

[図2-22] 内蔵InGaAs PINフォトダイオードの分光感度特性 (代表例)



[図2-23] 接続例



2-3 使用方法

▶ 接続例

MEMS-FPI分光センサの接続例を図2-23に示します。また、この接続例で使う装置の例を表2-4に示します。

[表2-4] 接続例 [図2-23]で使う装置の例

装置	型名	メーカー
DC電圧制御ユニット*	6156	株式会社エーディーシー
I/Vアンプ	C4159-03	浜松ホトニクス株式会社

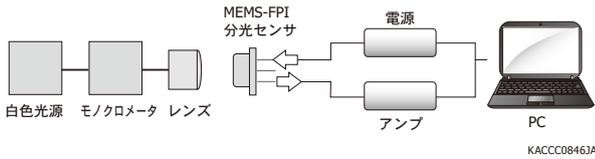
* 2台を直列接続

▶ 評価系の例

❖ モノクロメータを使う場合

MEMS-FPI分光センサの評価系の例を図2-24に示します。ハロゲンランプなどから出射された白色光を、モノクロメータで単一波長光にします。単一波長光を光ファイバを經由してレンズに導入し、レンズからMEMS-FPI分光センサに光を入射します。センサの信号は、アンプを介して出力されます。MEMS-FPI分光センサのフィルタ制御電圧を固定してモノクロメータの波長をスキャンすることにより、固定されたエアギャップにおける波長プロファイルを取得することができます。その後、フィルタ制御電圧を変化させて同様にデータを取得することで、複数のスペクトルの情報が得られます。

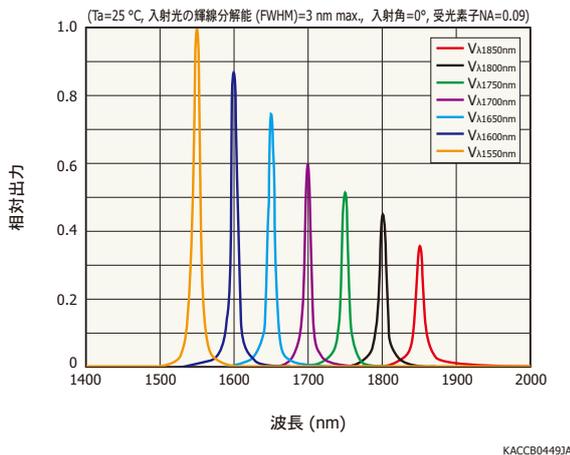
【図2-24】 評価系の例 (モノクロメータによる単一波長光)



代表例として、MEMS-FPI分光センサ C13272-03の評価結果の例を図2-25に示します。各フィルタ制御電圧における波長プロファイルは、 $V_{\lambda 1550 \text{ nm}}$ における出力の最大値で規格化しています。なお出力値は、測定系、MEMS-FPIチューナブルフィルタの透過率特性、受光素子の分光感度特性が関係しています。

また、波長プロファイルをガウスフィッティングして、FWHM (Full Width Half Maximum)を求めることによって波長分解能を求めることができます。感度波長範囲(1550~1850 nm)において波長分解能が20 nm以下であることを確認できます [図2-7]。

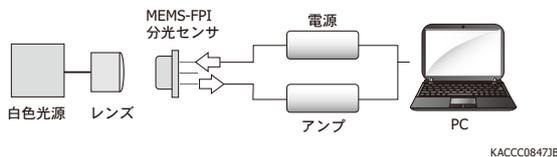
【図2-25】 波長プロファイル (C13272-03, 代表例)



❖ モノクロメータを使わない場合

モノクロメータを使わなくても、MEMS-FPI分光センサの評価系を構成することができます。

【図2-26】 評価系の例 (白色光源)



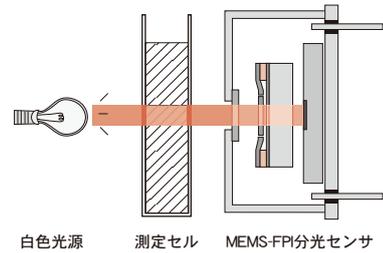
» 応用例

MEMS-FPI分光センサを用いた吸光度測定の実例を図2-27に示します。測定セル内の試料を透過した光をMEMS-FPI分光センサに照射して、特定の単一波長の透過光強度 (I)を取得します。測定セルに試料がない場合をリファレンス (入射光強度 I_0)とした場合、式(2-20)によって単一波長における試料のおおよその吸

光度 (A)を求めることができます。

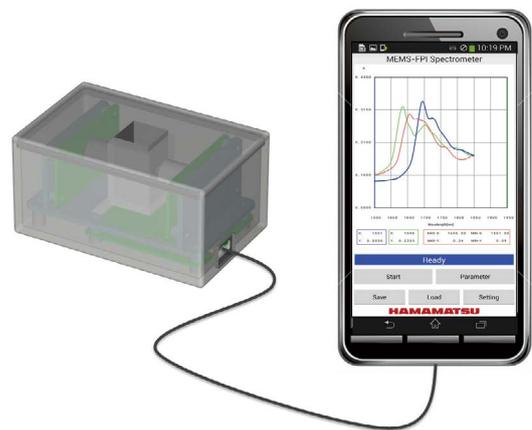
$$A = -\log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right) \dots (2-20)$$

【図2-27】 MEMS-FPI分光センサを用いた吸光度測定の実例



MEMS-FPI分光センサは非常に小型であるため、小型装置への組み込みや、携帯端末との連携による応用が期待できます。スマートフォンと小型モジュールを接続したイメージ図を図2-28に示します。

【図2-28】 小型モジュールのイメージ図



3. 分光モジュール (C15712, C15713, C15714)

印加する電圧を変化させて透過波長を可変できるMEMS-FPIチューナブルフィルタとInGaAs PINフォトダイオードから成るMEMS-FPI分光センサ、光源、制御回路を内蔵した小型モジュールです。PCとUSB接続することによって、近赤外域のスペクトルや吸光度の測定を行うことができます。周囲温度の変化によるピーク透過波長シフトを制御回路により補正します。本製品には、測定条件の設定、データの取得・保存、グラフ表示などの機能をもつ評価用ソフトウェアが付属されています。また、DLL (Dynamic Link Library)の関数仕様を公開しているため、ユーザーサイドで独自の計測ソフトウェアを作成できます。

3-1 制御回路

分光モジュールのブロック図を図3-1に示します。制御回路では、MEMS-FPIチューナブルフィルタに印加する電圧の制御に加えて、センサ内蔵のInGaAs PINフォトダイオードのアナログ出力を16ビットA/D変換器にてデジタル信号に変換します。また、サーミスタ抵抗値を読み取って、温度によるピーク透過波長シフトを抑制するためのフィードバック制御を行います。外部インターフェースには、マイコンを搭載し、PCとUSBケーブルで接続します。

また、UARTインターフェースへのカスタム対応が可能です（数量が多い場合）。詳細は、当社営業までお問い合わせください。

3-2 評価用ソフトウェア

分光モジュール付属の評価用ソフトウェアを用いて、USB接続したPCから分光モジュールの操作および計測データの取得・保存を行います。

評価用ソフトウェアをPCにインストールすることにより、以下の基本的な操作を行うことができます。

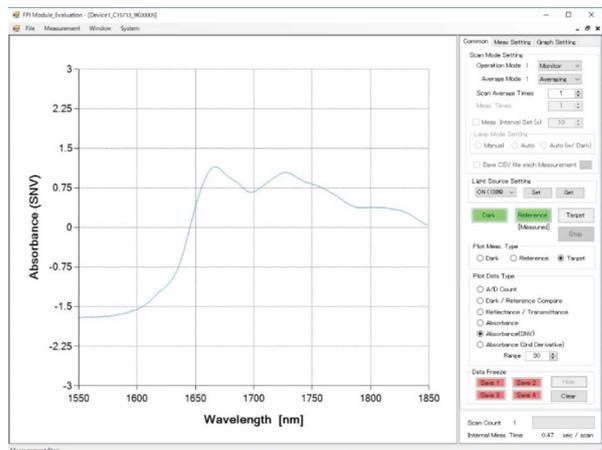
- 測定データの取得・保存
- 測定条件の設定
- 内蔵ランプの設定
- モジュール情報（型名、シリアル番号、感度波長範囲など）の取得
- グラフ表示
- 演算機能
リファレンスデータとの比較（反射率、吸光度など）

1台のPCに最大8台までの分光モジュールを接続して使用することが可能です。

対応OS: Microsoft® Windows® 10 (32-bit, 64-bit)

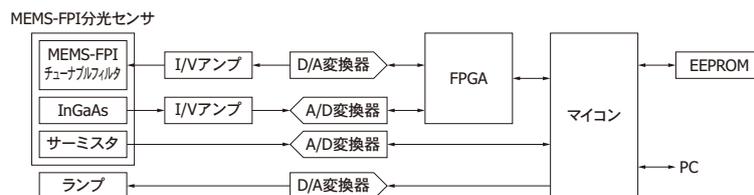
Microsoft Windows 11

【図3-2】 評価用ソフトウェアの画面例



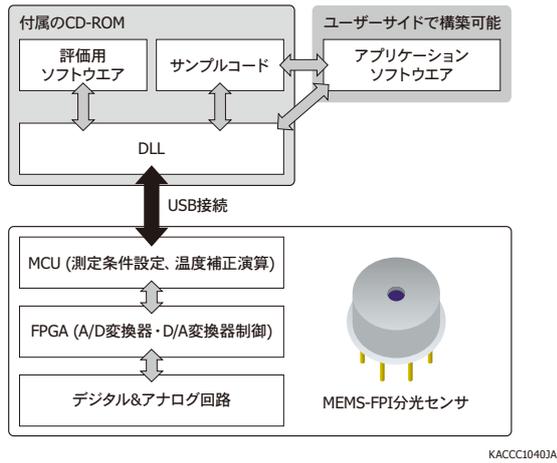
分光モジュール付属のCD-ROMには、評価用ソフトウェア、DLL、サンプルソフトウェアが含まれています。評価用ソフトウェアによって、分光モジュールを制御するためにDLLを利用します。評価用ソフトウェアでは直接I/Oやメモリにアクセスできないため、DLLから必要な関数を呼び出し、デバイスドライバやUSBインターフェースを介して分光モジュールを制御します。DLLを用いてユーザー独自のソフトウェアを開発することも可能です。なお、関数仕様書・ソフトウェア取扱説明書がCD-ROMに保存されています。

【図3-1】 ブロック図



KACCC10393A

[図3-3] ソフトウェア構成



3-3 光ファイバアダプタ (別売)

分光モジュールに、SMAコネクタ付光ファイバを簡易的に結合するためのアダプタ [図3-4]を用意しています。付属のネジで分光モジュールに固定します。内蔵ランプは使用しないで、センサと光ファイバを結合する場合 (透過光計測など)に使用してください。

なお、光ファイバアダプタには、集光レンズなどの光学部品、光ファイバを付属していません。

[図3-4] 光ファイバアダプタ A15719



3-4 特性

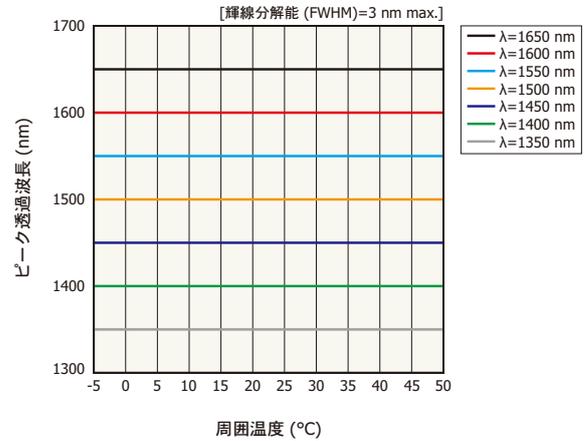
MEMS-FPI分光センサには、ピーク透過波長の温度依存性があります (「2-2 特性/温度特性」参照)。温度変化の影響を補正しない場合、MEMS-FPI分光センサの周囲温度とピーク透過波長の関係を図2-11に示しています。これに対して、温度変化の影響を補正した場合の本モジュールの周囲温度とピーク透過波長の関係を図3-5に示します。

本モジュール内の制御回路により、周囲温度 (動作温度範囲)の変化に対してMEMS-FPIチューナブルフィルタへの印加電圧のフィードバック制御を行い、ピーク透

過波長シフトを抑制します。中心波長 (C15712: $\lambda=1500$ nm, C15713: $\lambda=1700$ nm, C15714: $\lambda=1950$ nm)における波長温度依存性は ± 0.1 nm/°C以下です。

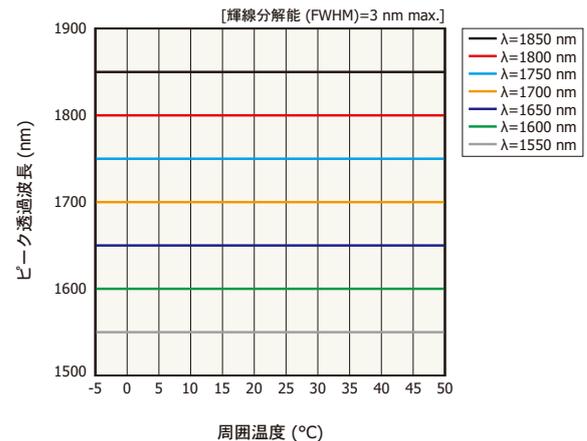
[図3-5] ピーク透過波長—周囲温度 (代表例)

(a) C15712



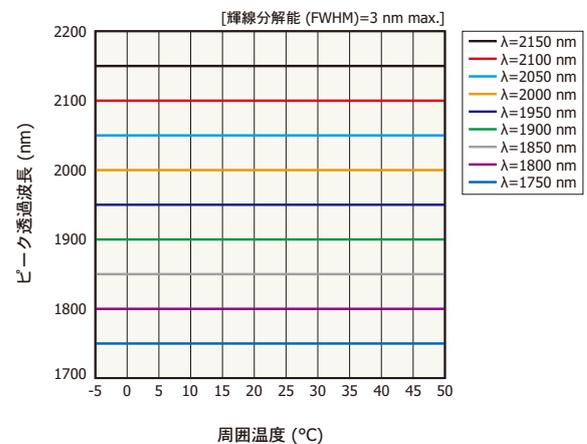
KACCB06333B

(b) C15713



KACCB06341B

(c) C15714

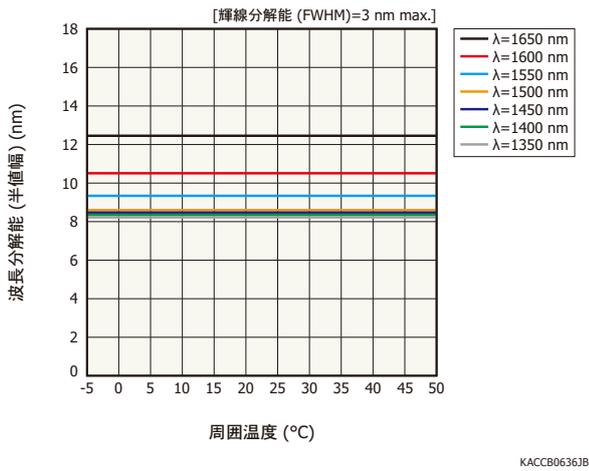


KACCB06351B

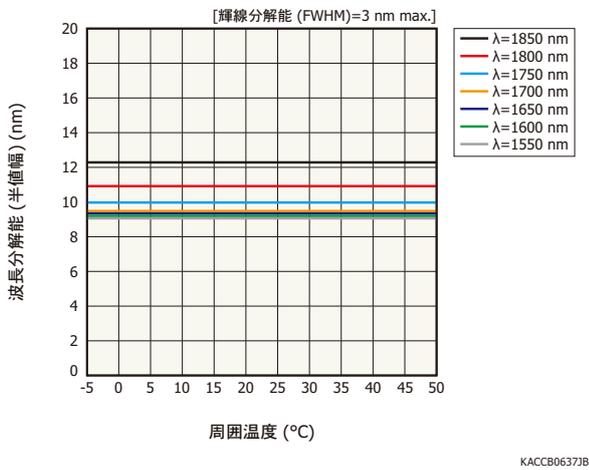
波長分解能 (FWHM)の温度依存性を図3-6に示します。波長分解能は、温度が変化しても、ほぼ一定です。

[図3-6] 波長分解能—周囲温度 (代表例)

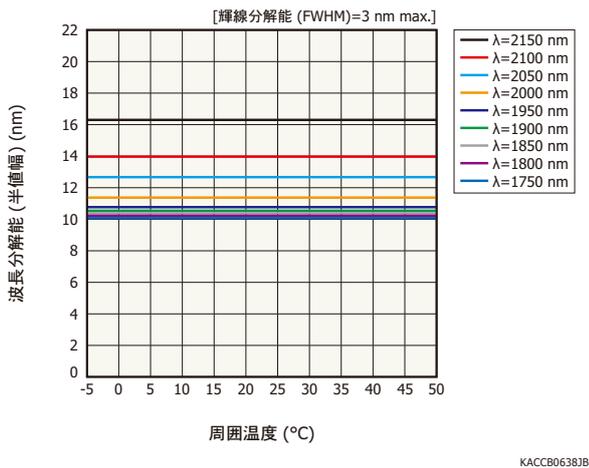
(a) C15712



(b) C15713



(c) C15714



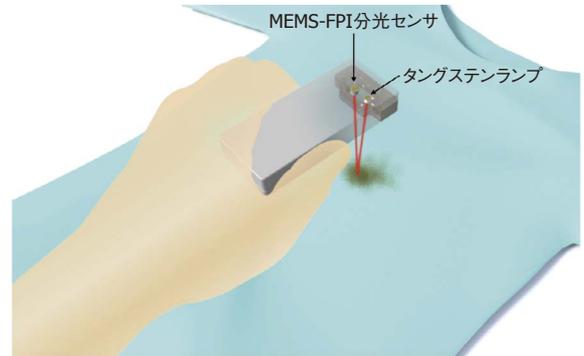
3-5 測定例

近赤外分光分析では、測定した分光スペクトルから吸光度を換算し、標準正規化 (SNV: Standard Normal Variate) や2次微分などの手法を用いて、データ解析を行います。

▶ 反射光測定

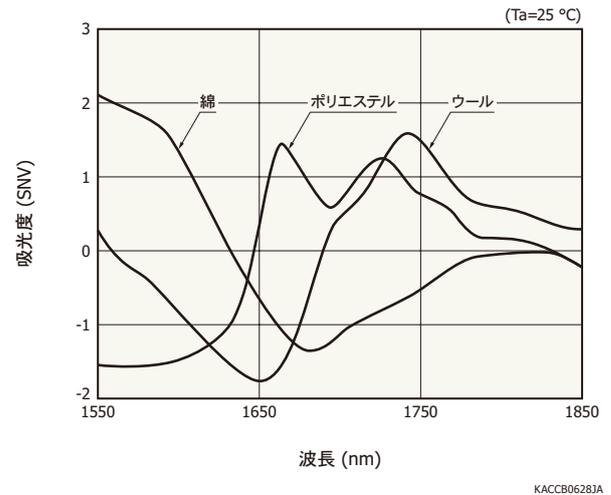
本モジュール内蔵のランプを用いて、反射光測定を行うことが可能です。その測定例を図3-7に示します。

[図3-7] 反射光測定例

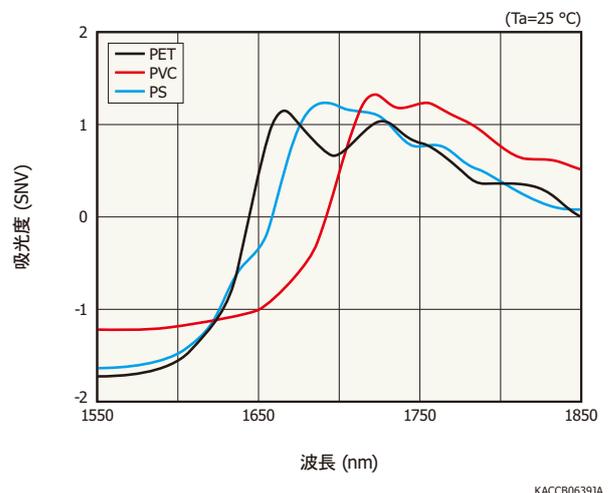


布とプラスチックの吸光度の測定例を図3-8と図3-9に示します。近赤外域において、材質により異なるスペクトルが確認されるため識別が可能です。

[図3-8] 布の吸光度スペクトル (測定例)



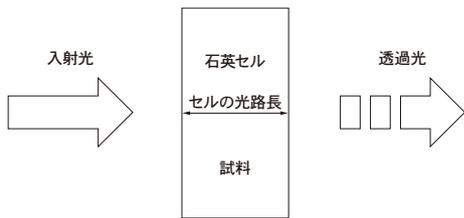
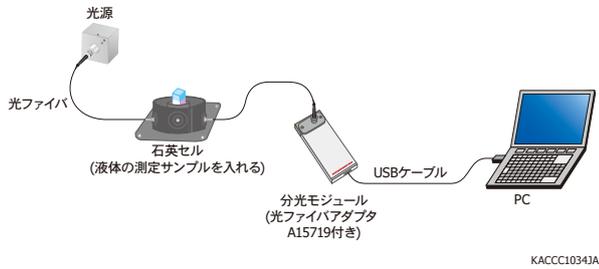
[図3-9] プラスチックの吸光度スペクトル (測定例)



透過光測定

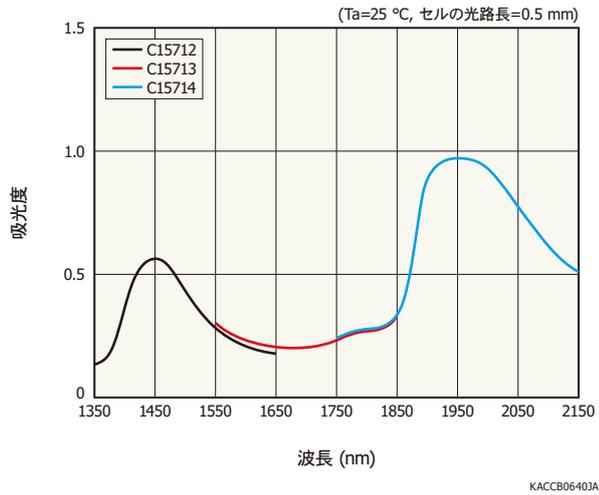
透過光を用いたスペクトルの測定系を図3-10に示します。このとき本モジュール内蔵の光源を使用していません。別途、光源を用意する必要があります。

[図3-10] 透過光測定の測定系

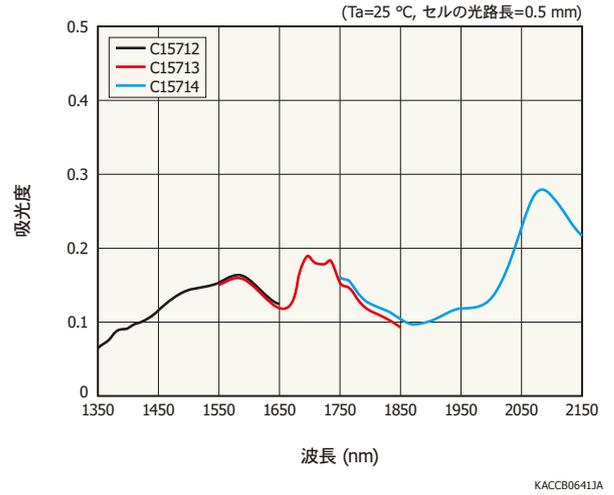


純水の吸光度測定例を図3-11に示します。1450 nm・1940 nm付近をピークとするOH基による吸収を検出しています。また、エタノールの場合 [図3-12]には、1700 nm付近などに純水とは異なる吸収があります。

[図3-11] 純水の吸光度スペクトル (測定例)



[図3-12] エタノールの吸光度スペクトル (測定例)



4. Q&A

[Q1] 分光モジュールとFTIRエンジンの違いを教えてください。

分光モジュールとFTIRエンジンの比較を表4-1に示します。分光モジュールは、MEMS-FPI分光センサ・光源・制御回路を内蔵した小型・低価格のモジュールです。FTIRエンジンは、広い感度波長範囲をもち、優れた波長分解能を実現しています。

MEMS-FPI分光センサは単素子フォトダイオードを用いたシンプルな構成で、小型パッケージで検出装置に組み込みやすいというメリットを持っています。

[Q2] MEMS-FPI分光センサの波長分解能は、透過光の波長によって変化しますか？

MEMS-FPI分光センサの波長分解能は、透過光の波長によって変化します。図2-7に代表例を示します。

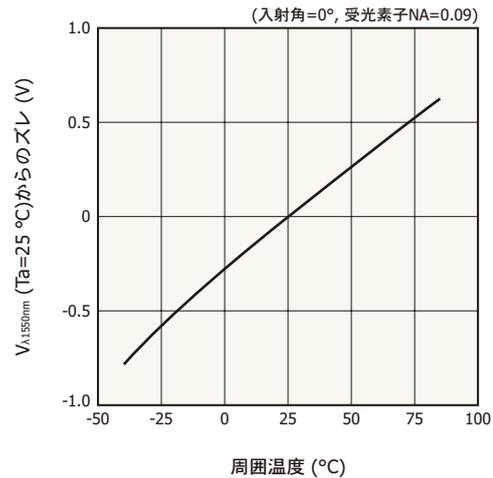
[Q3] MEMS-FPIチューナブルフィルタが破損しないために、どのようなことに注意する必要がありますか？

MEMS-FPIチューナブルフィルタが破損しないようにするため、必ずフィルタ制御電圧を絶対最大定格以下にしてください。この値を超えると、MEMS-FPIチューナブルフィルタが破損します。なおフィルタ制御電圧の絶対最大定格は製品ごとに異なり、温度によって変化するため、注意する必要があります。

C13272-03における $V_{\lambda 1550 \text{ nm}}$ ($\lambda=1550 \text{ nm}$ の光を透過させるためのフィルタ制御電圧)の温度特性を代表例として図4-1に示します。C13272-03のフィルタ制御電圧の絶対最大定格は、 $V_{\lambda 1550 \text{ nm}} + 0.5 \text{ V}$ です。特定の温度における $V_{\lambda 1550 \text{ nm}}$ に0.5 V以上を加えると、MEMS-FPIチューナブルフィルタが破損する恐れがあることを示しています。

またMEMS-FPI分光センサ内蔵のフォトダイオードは静電気に非常に弱いため、取扱説明書を参照して静電気対策を行ってください。静電耐圧については、データシートまたは取扱説明書を参照してください。

[図4-1] $V_{\lambda 1550 \text{ nm}}$ の温度特性 (C13272-03, 代表例)



なお分光モジュールを用いると、周囲温度の変化に合わせてMEMS-FPIチューナブルフィルタのフィルタ制御電圧を制御回路で自動調整するため、フィルタの破損の恐れがありません。

[Q4] 周囲温度によってMEMS-FPI分光センサの特性は変化しますか？

MEMS-FPI分光センサは温度特性をもっているため、周囲温度によって特性が変化します (図2-11, 図2-14)。計算式を用いて温度補正を行うことが可能です (2-2 特性/フィルタ制御電圧とピーク透過波長/フィルタ制御電圧とピーク透過波長の温度特性の補正)。必要に応じて、できるだけ精密な測光を行うために、お客様によって特性の変化を補正していただく必要があります。

なお分光モジュールを用いると、周囲温度の変化による影響を制御回路で補正することができます。

[表4-1] 分光モジュールとFTIRエンジンの比較

項目	分光モジュール			FTIRエンジン
	C15712	C15713	C15714	C15511-01
内蔵センサ	C14272	C13272-03	C14273	-
感度波長範囲	1.35~1.65 μm	1.55~1.85 μm	1.75~2.15 μm	1.1~2.5 μm
波長分解能 (FWHM) max.	18 nm	20 nm	22 nm	8 nm
小型サイズ		☆☆☆		☆☆
コストメリット		☆☆☆		☆☆

[Q5] MEMS-FPIチューナブルフィルタの透過波長とフィルタ制御電圧には、どのような関係がありますか？

MEMS-FPIチューナブルフィルタにおいては、上下2つの高反射ミラーがエアギャップを介して対向しており、そのエアギャップをフィルタ制御電圧で調整して透過波長を変更します。フィルタ制御電圧を上げるとエアギャップが狭くなり、透過波長が短波長側にシフトします。ミラーやエアギャップには個々の製品で、ある程度のバラツキがあるため、製品ごとでピーク透過波長とフィルタ制御電圧の関係は異なります。このため、感度波長範囲の最小値および最大値におけるフィルタ制御電圧 (Ta=25℃) を記載した検査成績書を個々の製品に添付しています。さらに、透過波長とフィルタ制御電圧の関係を計算で表すための4つの定数 (電圧一波長換算係数) を参考データとして添付しています。なお、これらのデータは当社の検査条件におけるものであり、お客様の使用環境 (光学環境、温度など) において保証するものではありません。精密な測光を行うために、お客様の使用環境におけるキャリブレーションが必要な場合があります。なお、必ずフィルタ制御電圧を絶対最大定格以下にしてください。

[Q6] MEMS-FPI分光センサを評価するために、何を留意する必要がありますか？

「2-3 使用方法 / 接続例 / 評価系の例」を参照してください。MEMS-FPI分光センサ、タンダステンランプ、制御回路を内蔵した分光モジュール C15712、C15713、C15714 (別売) を用いると、MEMS-FPI分光センサを簡単に評価できます。

[Q7] 推奨光源を紹介してください。

測定方法 (反射・透過など)、測定対象などの条件によって、最適な光源は異なります。一般的にハロゲン光源などの白色光源を推奨します。また、MEMS-FPI分光センサの感度波長範囲のすべてをカバーすることはできませんが、近赤外LED [例: 当社製L10660シリーズ (ピーク発光波長: 1450 nm, 半値幅: 120 nm), L12509シリーズ (ピーク発光波長: 1550 nm, 半値幅: 120 nm), L13895シリーズ (ピーク発光波長: 1450 nm, 半値幅: 120 nm)] が適している場合もあります。

[Q8] 測定時間をどこまで短縮できるでしょうか？

高速動作を実現するために、まずは分光モジュールを評価することを推奨します。分光モジュールの初期設定の1回の測定時間は、C15712・C15713では約0.4 s (300 nm幅を1 nmステップで測定した場合)、C15714では約0.6 s (400 nm幅を1 nmステップで測定した場合) です (グラフデータの計算および表示にかかる時間はPCの性能によって異なるため除く)。

平均化回数 (Point Average Times) を減らすと、さらに測定時間を短縮できます。そのときノイズが上昇する場合がありますため、適切に設定する必要があります。

注) 分光モジュールの評価用ソフトウェアの初期設定

- Min. Wavelength (nm): 感度波長範囲の最小波長
- Max. Wavelength (nm): 感度波長範囲の最大波長
- Step (nm): 1
- Point Average Times: 128
- Meas. Interval (μs): 2.5

[Q9] 任意の波長ポイントに限定した測定は可能ですか？

分光モジュール C15712・C15713・C15714では、波長ポイントを最大10まで指定して、測定を行うことが可能です。

MEMS-FPI分光センサ用の回路・ソフトウェアの設計用として、フィルタ制御電圧を変化させてステップ動作を行うときの応答速度の参考例 (C13272-03を使用した場合) を以下に示します。

300 nm幅を1ステップ (例: 1550 nm~1850 nm) として動作する場合のセtring時間 (99%) は、1 ms typ. (参考値) です。また、5 nm幅の4ステップ (例: 1550 nm~1555 nm, 1645 nm~1650 nm, 1745 nm~1750 nm, 1845 nm~1850 nm) として動作する場合の各ステップのセtring時間 (99%) は、0.2 ms typ. (参考値) です。

その他のMEMS-FPI分光センサを使用した場合も、同様にセtring時間に配慮する必要があります。なお、実際の測定時間はお客様による回路・ソフトウェアに大きく依存します。

[Q10] 分光モジュール C15712・C15713・C15714のDLLを提供していますか？

分光モジュールではDLLを提供しています。このため、ユーザーサイドで独自のソフトウェアを作成することが可能です。

[Q11] 大面積MEMS-FPI分光センサの開発の予定はありますか？

現在、大面積MEMS-FPI分光センサの開発の予定はありません。MEMS-FPIチューナブルフィルタには、静電方式 (当社採用) とピエゾ方式があり、それぞれ表4-2のような特徴を持っています。当社は、静電方式によるメリット (低コスト、低電圧動作) を生かしていく予定です。

[表4-2] 静電方式とピエゾ方式の比較 (MEMS-FPIチューナブルフィルタ)

項目	静電方式 (当社)	ピエゾ方式
メリット	低コスト、低電圧動作	大面積化が可能
デメリット	大面積化が困難	高コスト、高電圧が必要

[Q12] MEMS-FPI分光センサを量産用の装置で使用する際に、シリアル番号を2次元コードで管理したいのですが、可能でしょうか？

メタルパッケージの上面にDataMatrix (2次元コード)、型名、シリアルNo.をマーキングしてあります。DataMatrixには、型名とシリアルNo.が入力されていますので、ご利用ください。マーキング情報の詳細については、データシートまたは取扱説明書を参照してください。

[Q13] 新たな感度波長範囲に対応するカスタム製品の作製は可能ですか？

当社製品の製品ラインアップの波長範囲が希望を満たさない場合、当社営業までお問い合わせください。波長範囲、用途、期待されるビジネス規模によってカスタム化を検討します。

[Q14] 感度波長範囲の幅: 約300~400 nmを広げることができるでしょうか？

MEMS-FPIチューナブルフィルタは、ファブリペロー干渉計の原理を用いており、上部ミラーと下部ミラーのエアギャップが $m\lambda/2$ のときに、おおよね波長 λ が透過するフィルタとして機能します (m : 整数)。また、透過波長に対して異なる次数の光成分もMEMS-FPIチューナブルフィルタを透過します。このため、理論的に感度波長範囲を広げることができません。なお、異なる次数の光成分は、内蔵されたバンドパスフィルタによって遮断されます。

[Q15] MEMS-FPI分光センサまたは分光モジュールを購入する前に、基本特性を確認したいのですが、デモ機はありますか？

デモ機を用意しています。当社営業所へご相談ください。

[Q16] MEMS-FPI分光センサに添付される検査成績書およびリファレンスデータシートの内容と、それぞれのデータの形式を教えてください。

検査成績書には、以下の検査項目が掲載されています。

[C14272]

- ・ピーク電圧 ($\lambda=1650$ nm)
- ・ピーク電圧 ($\lambda=1350$ nm)
- ・暗電流 ($V_R=0.5$ V)
- ・サーミスタ抵抗

[C13272-03]

- ・ピーク電圧 ($\lambda=1850$ nm)
- ・ピーク電圧 ($\lambda=1550$ nm)
- ・暗電流 ($V_R=0.5$ V)
- ・サーミスタ抵抗

[C14273]

- ・ピーク電圧 ($\lambda=2150$ nm)
- ・ピーク電圧 ($\lambda=1750$ nm)
- ・暗電流 ($V_R=0.5$ V)
- ・サーミスタ抵抗

測定条件は、入射角度 0° 、受光素子NA 0.09、入射輝線分解能 (FWHM) 3 nm max.、周囲温度 25 °Cです。検査成績書は、紙の書類で製品に添付されます。

リファレンスデータシートには、上記の測定条件によるシリアルナンバーごとの常温補正定数と温度補正定数 (「2-2 特性/フィルタ制御電圧とピーク透過波長」参照) が記載されています。リファレンスデータシート (Microsoft Excelのデータ) を保存したCDが製品に添付されます。

[Q17] 分光モジュールには3波長帯のタイプがありますが、1つを購入して、異なるタイプのMEMS-FPI分光センサに交換して使用できますか？

分光モジュールでは、MEMS-FPI分光センサを交換することはできません。必要な波長帯の分光モジュールを購入する必要があります。

[Q18] 分光モジュール内蔵のランプの寿命を教えてください。

ランプの寿命の目安は、40000時間です。なお使用条件により寿命は変動します。

[Q19] 分光モジュールのS/Nは、どの程度でしょうか？

周囲温度: 25 °C、ゲイン設定: Middle (初期設定)の場合、S/N=10000 typ.です (C15712, C15713, C15714で同程度)。

S/Nは式 (4-1) で表されます。

$$S/N = \frac{\text{最大レンジの75\%の光入射時のカウント値} - \text{ダーク平均値}}{\text{ダーク標準偏差} \cdots (4-1)}$$

ノイズ成分を減らすためには、ポイント平均回数を増やしてください (測定時間は長くなります)。さらにノイズ成分を減らすためには、スキャン平均回数を増やしてください。

・初期設定

Min. Wavelength (nm): 感度波長範囲の下限
Max. Wavelength (nm): 感度波長範囲の上限
Step (nm): 1
Point Average Times: 128
Meas. Interval (μ s): 2.5

本資料の記載内容は、令和4年8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

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