

Quantum Sensor MIJ-14PAR型式/K2

日本環境計測株式会社 光合成有効放射センサー (光量子センサー)



MIJ-14PAR型式のアンプレスバージョン、K2です。外観はアンプ搭載型の型式と相違はなく、部品の90%以上は共用ですが、アンプを搭載していない代わりに受動型温度補償回路を搭載しています。同時に光学系の見直しで、実用域の入射角特性である80°未満の範囲において、過渡特性の向上も得ています。ハイエンドなPARセンサーという要望への回答です。

<特徴>

- 新開発の受動型温度補償回路P.T.C.C.(Passive Temperature Compensation Circuit)を搭載。±0.01%/°C。
- 入射角特性を追求し、PTFE製R40の曲面を持つ大型拡散板により、±1.5%入射角特性エラー(0~79°)。
- 光学系はSiフォトダイオード+UVIRフィルター+HOYA LB40(赤減衰)+内部乱反射阻止用φ4.0アパチャー。
- 接着剤などを使った封入組立はバルクヘッドコネクタ以外は排除。全ての部品が分解可能で部分修理が出来る設計。
- 浸水の要因であるケーブル取出部はバルクヘッド防水コネクタを採用。容易にケーブルを脱着可能。
- 水平基台を組込済。3つのネジで水平出し、2つのネジで固定可能。
- 水平基台内部にモレキュラーシーブとシリカゲルを内蔵。交換は底面のネジ3本の脱着で可能。

<仕様>

測定範囲	0~5,000 μE
出力	代表値9 mV@2300 μE、校正係数を###.## μE/mVの表現でラベルに記載
温度特性	±0.01%/°C以下
計測単位	μE (μmol · S ⁻¹ · m ⁻²)
応答速度	0.2 μSec
入射角特性	< ±1.5% at 0~79° (< -50%Peak at 80~89°)
回転角特性	アジマスエラー : < ±0.5% over 360° at 60° elevation
主要素材	筐体 : A5052、被覆 : 黒アルマイト、拡散板 : PTFE
使用温度範囲	-40~80°C
形状	最大外径φ54mm、高さ38.6mm
重量	センサー部127g、ケーブル重量120g
ピンアサイン	白/出力+、黒/出力-
税別販売価格	70,000円

<標準品及びオプション>

センサー本体	MIJ-14PAR型式/K2 (アンプレスPTCC搭載型標準品、5mケーブル、取付用ネジM4-30×2付属)
中継ケーブル5m	MIJ-14CCA



内部薬剤



防水コネクタ



とがり先レベル調整ネジ

Environmental Measurement Japan

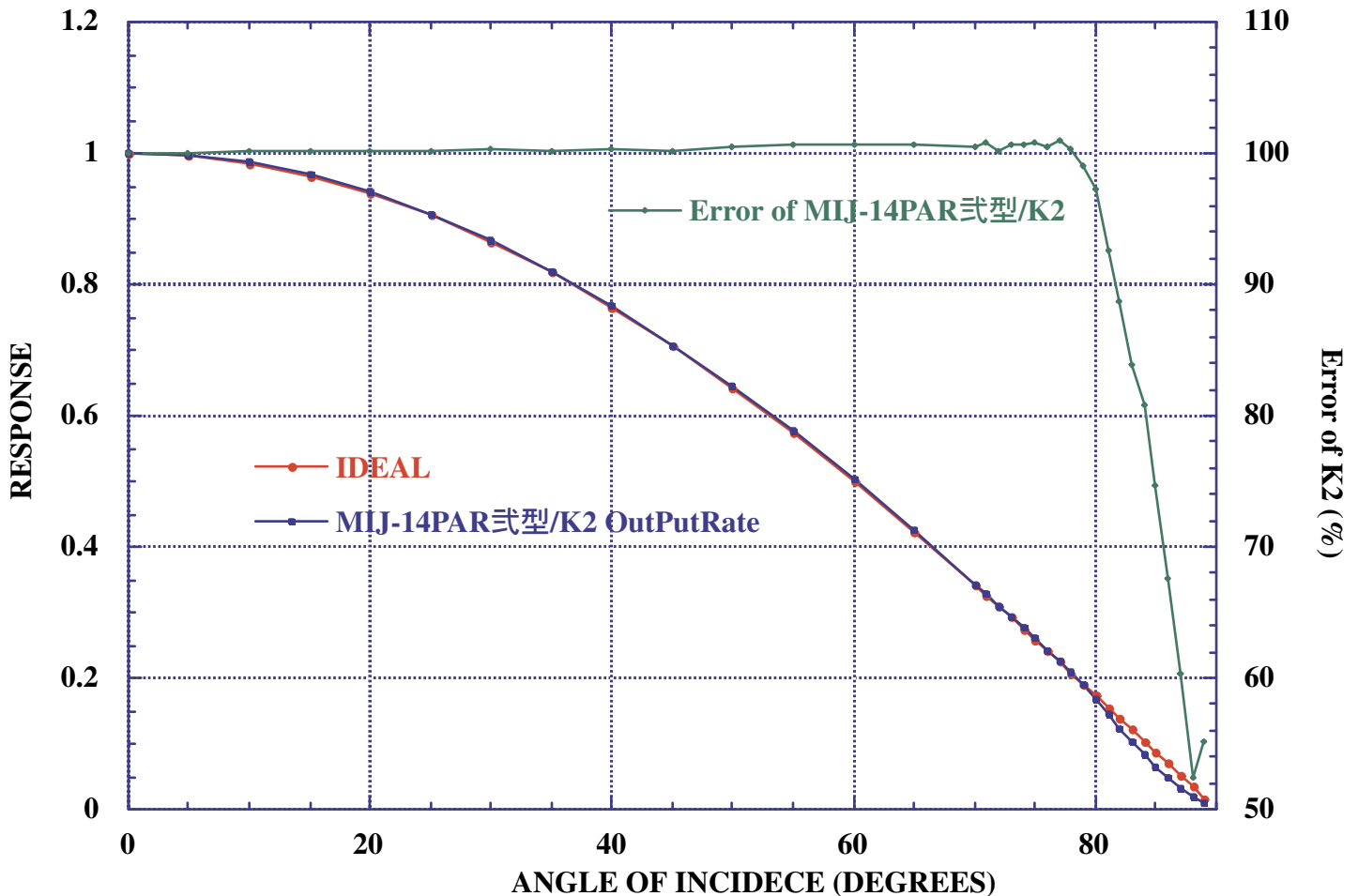


日本環境計測株式会社
〒811-0215
福岡県福岡市東区高美台二丁目52番42号
電話 : 092-608-6412
FAX : 092-985-7844
www.environment.co.jp

<入射角特性・コサインエラー>

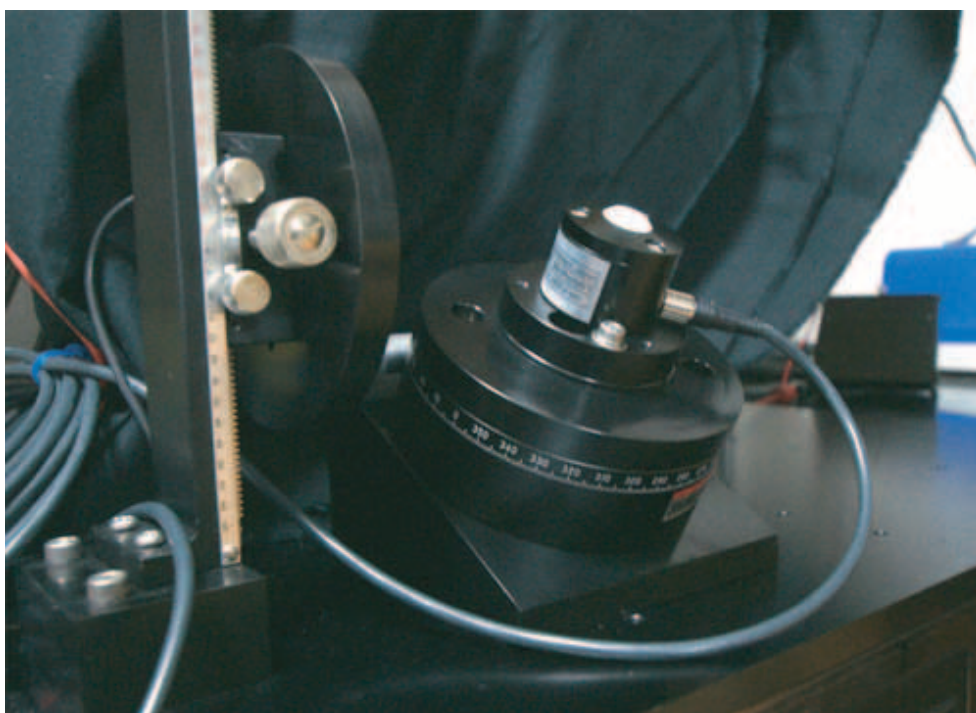
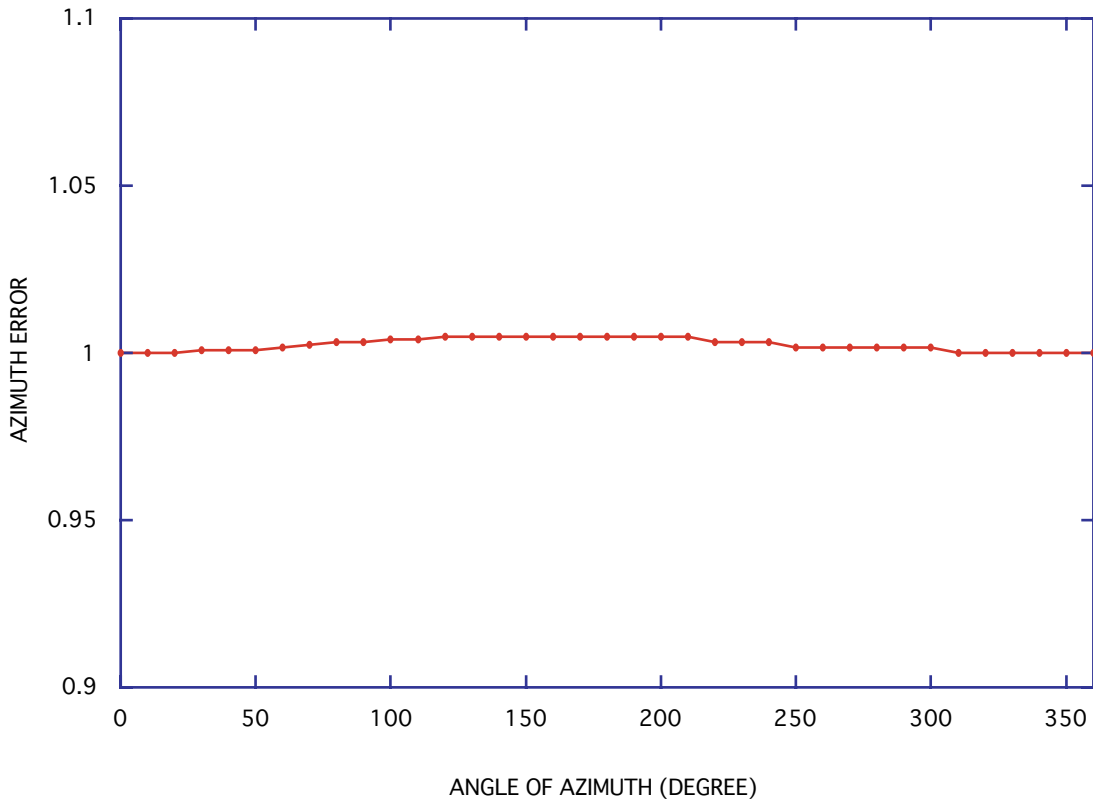
太陽光がセンサーに照射されるその入射角度は、年周期では季節変化、日周期では日の出から日の入りと、季節、時刻に応じて変化します。光センサーは入射角度に対して正しく応答しなければなりません。フォトダイオードそのままを光センサーとして使用できない理由の一つでもあります。キャンに入ったタイプもプラスチックモールド品も入射角を考慮した設計ではないからです。この応答を調節するのが拡散板と遮光リングです。形状設計の自由度は高い部品ですが、MIJ-14シリーズの拡散板では、素材そのものが持つ透過スペクトル、拡散係数、耐候性、撥水性、量産時の加工精度の限界（一般精度以内）、雨滴のスムーズな排除、乾性沈着などを考慮して設計しました。その結果、PTFEを素材に選定、φ14mm、突出し量1.3mm、表面曲率R40、最低肉厚4.5mmという形状に至りました。曲率については、フラットな形状に比較すると、入射角特性は不利な条件を生じますが、降雨で問題となり得る雨滴のレンズ効果による過大評価を抑えるために、雨滴のスムーズな排除を目的として設定しています。最低肉厚は素材の拡散係数と実験結果から、十分な拡散はPTFEの場合4.0mmが境界であることを確認、4.5mmに決定しています。ここで言う十分な拡散とは、拡散板を透過した光を例えば拡散板内部から観察した場合に入射角度に応じて光強度にムラが存在しない状態を指します。拡散板の下にフィルターとフォトダイオードが存在する構成である限り、そのムラが存在すると、入射角特性に癖があるフォトダイオードの応答に影響し、コサインエラーを生じます。拡散板が入射角特性に対して担う角度の範囲は実験的に0~80°であることが確認できており、これ以上の角度では拡散板が筐体から付き出す形状である限り、理想的な応答+100%を越える過大な応答を示します。逆に拡散板が筐体とフラットな位置関係の場合には、無限平面で無い限りは、15~90°の範囲でダラ下がり過小評価になります。MIJ-14では実用的な筐体サイズの範囲で、このエラーの抑制の為に拡散板外周に遮光リングを設置しています。

K2型では、ハイエンドユーザーの要望を理由に、実用範囲の0~79°のフルフラット化もしくは素直な特性になるべくという事項を優先し、80~89°の特性を多少犠牲にしたセッティングです。この調整は、主に内径φ4のアパチャーを増設した事によるわずかな効果で、意味があるかないかが問われる程度のセッティングです。



<回転角特性・アジマスエラー>

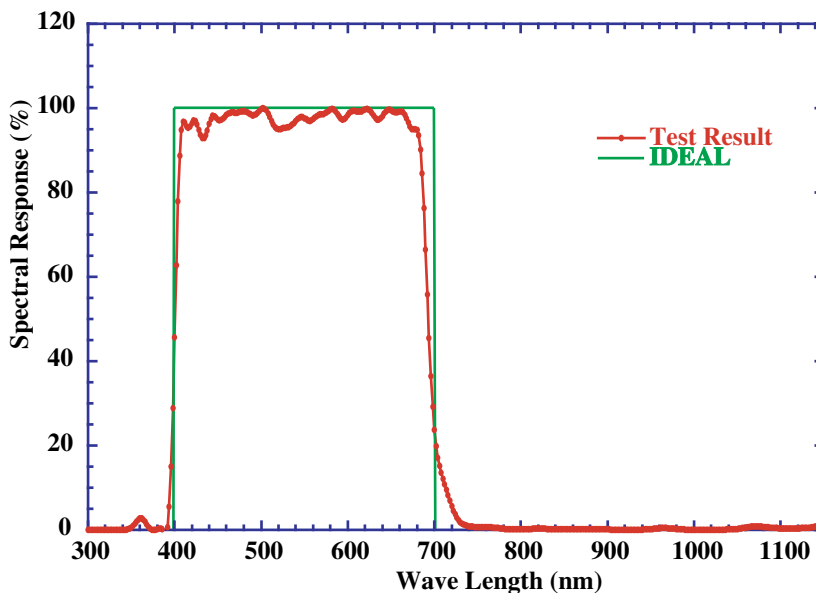
回転角に応じた感度の変動（センサーの方位特性）は、理想的には完全にフラットであることが求められます。乱れの原因として、通常フォトダイオードの受光面は製造の都合から正四角形であり、その受光面には拡散板を通過した光が入射しますが、それ故ある程度以上の入射角において、その拡散が不十分な場合に、筐体もしくはフォトダイオードのキャンの壁面で作られる影によって実効的な受光面積が変動し、回転角によって受光感度が変化してしまう結果となります。もう一つの原因は、機械加工精度です。一般公差で $\pm 0.05\text{mm}$ がその範囲です。これは、拡散板が大きいほど誤差の割合が少なくなることを意味し、例として $\phi 8\text{mm}$ の拡散板で最大 0.05mm の寸法誤差が生じると、 0.6% のアジマスエラーの要因になります。MIJ-14シリーズではこの点を考慮し、 $\phi 14\text{mm}$ としています。その結果、乱れの実測値は最大 0.48% です。以下にMIJ-14シリーズの 60° 傾斜時におけるアジマス特性、アジマス検査装置の写真を示します。



60° アジマス特性テスト用実験装置

<波長感度特性・スペクトルエラー>

光合成有効放射（PAR）の評価は400～700nmの光子フラックス密度（PPFD）の測定によって行われています。一方、植物の葉は700nm以上の赤外域の光子を良く透過するため、植生内では光合成には利用できない赤外域の光子 NIR-PFD（Near Infrared Photon Flux Density）の比率が高まります。日中の晴天時にはNIR-PFD / PPFDは0.9位であるのに対して植生中では6.0近くまで上昇するので、NIR-PFDを少しでも感じてしまうセンサーでは植生内の正確なPPFDの測定が行えません。K2型では、ハイエンドユーザーの要望を理由に、MIJ14の初期型（絶版）で採用した、UV/IRカット蒸着フィルター+色ガラスHOYA-LB40+Si素子の組み合わせによる調色感度を再現しています。実際の感度特性は以下のように、ほぼ理想的な特性を実現しています。



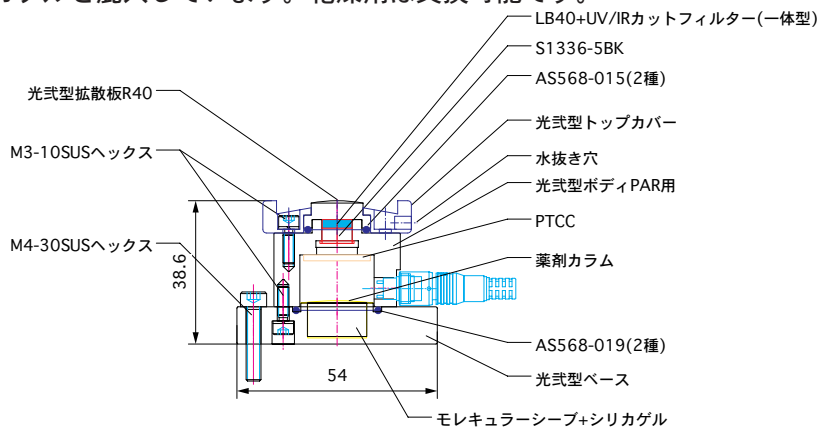
<センサーの劣化要因とその対策>

一般的なPARセンサーは、外部に筐体、**アクリル製拡散板**、内部にSiフォトダイオード、**UV/IRカットフィルター**、赤色感度調整用の**青フィルター**、シャント抵抗(電流出力の場合は無し)という構成が採られています。経年劣化に関する主な部品は赤字で記載した部品になります。以下の表に各部品の劣化の要因をまとめました。

部品	要因	劣化の影響方向
1 拡散板	紫外線、水蒸気、温度変化	～2年未満程度は過小評価、それ以上は過大評価
2 UV/IRカットフィルター	水蒸気、酸化	過小評価
3 青フィルター	水蒸気、温度変化	過小評価

1は面白い劣化を示します。拡散板に良く用いられるオパール（白色）のアクリルは紫外線を原因とした経年劣化が原因で、光の透過率が徐々に落ちていき、それはセンサー出力を減少させていきます。その一方で、素材そのものが吸湿性を持ち合わせており、吸湿と乾燥を繰り返すことで、表面から徐々に崩壊していきます。崩壊した表面は艶が落ち、これは反射率を下げ、結果としてセンサー出力を増加させます。上記両方の効果が相殺され、バランスが取れてしまう個体もありますが、崩壊は拡散板の形状を乱してしまいます。2は筐体のどこから、通常はケーブル取出部のささやかな隙間や拡散板の接着部から水蒸気や水が進入し、一方で、筐体内部の酸素と相まって金属蒸着面を腐食します。腐食したフィルターの透過率は大きく落ち、かつ透過スペクトルも乱れます。3は通称ゼラチンフィルターと呼ばれるプラスチック製のフィルターを使用した場合に生じる現象で、透過率を落とします。

MIJ-14シリーズでは1の対策として、PTFE製の拡散板を採用しています。製造側のデメリットは接着剤の使用が不可能なことで、そのためにOリング、トップカバー、ネジを使った締結が必要になり、高コストになります。2の対策は、金属蒸着そのものの耐水性に関する品質の向上と、乾燥剤を封入することで対処。3はガラス製青フィルターを採用し、解消。他にも、ベースの締結にもOリングを設置、埋込みコネクタは充填剤で埋設するなどの防水対策、組立時もしくは、設置後にOリングからごく微量透過する大気中の水蒸気の対策として、ガス透過係数の低いII種のNBR製Oリングを使い、更にOリングにはバキュームグリスを塗布する対策を行っています。モレキュラーシーブ1粒は、MIJ-14のデッドボリュームに30℃、60%RHの水蒸気が入った場合、DP-50℃まで乾燥出来ますが、これを約100粒を内蔵し、交換の目安を色で判断できるように数粒のシリカゲルを混入しています。乾燥剤は交換可能です。

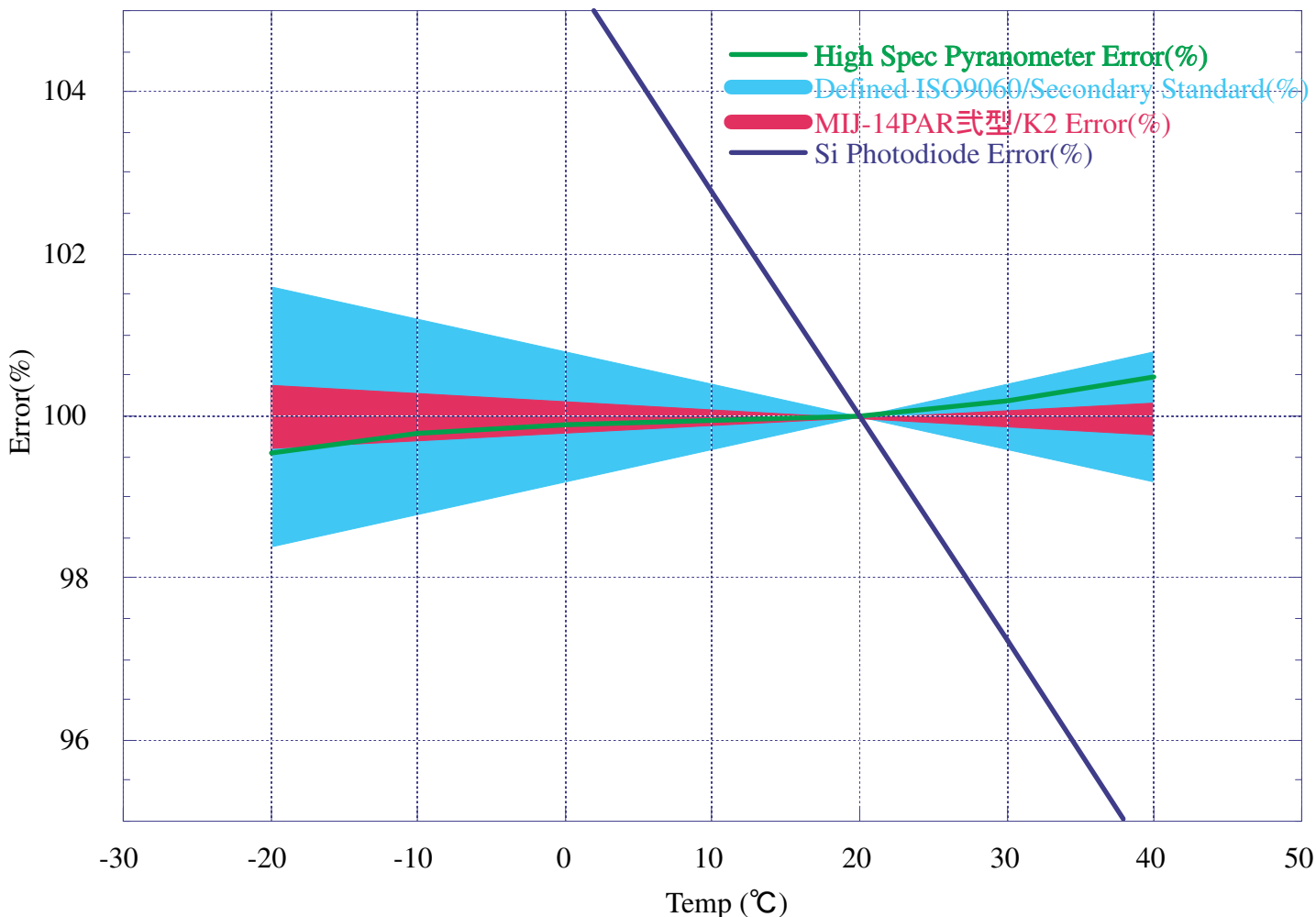


<受動型温度補償回路 P.T.C.C. Passive Temperature Compensation Circuit>

K2型で採用しているSi型フォトダイオードにUV/IRカットフィルターを重ねた状態での、つまりSiの受光範囲である280~1100nmのうち400~700nmのみを受光範囲としたセッティングにおいて、その温度特性は負の値を持ち、実測値で-0.276%/°Cを得ています。環境の温度変化が30°C生じるのは年変動としては良くある範囲であり、上記温度特性から計算すると、例えば2000μE時に、 $2000\mu E \times -0.276\%/^{\circ}C \div 100\% \times 30^{\circ}C = 165.6\mu E$ という大きな誤差が生じます。従来、この温度特性を解消する手法は確立されておらず、150年の歴史を持つサーモパイル型日射計のISO9060規格の中で最高ランクのセカンダリースタンド(準器)においてさえ±0.04%/°C、この中でも飛び抜けて信頼性の高いオランダの某日射計の一番良いモデルでも0.017%/°C (-20~40°C平均値)です。冷接点の外気や日射による温度変化が与える温度特性故、それは線形なのに、非線形の振る舞いをするサーミスタで温度補償する手法としてはとても良い値だと言えます。一方、K2型に搭載されるPTCCではSiの負の線形な温度特性に対して、正の線形な温度特性を掛け合わせるシンプルな回路なので、結果を出しやすい手法だとも言えます。ところがこのPTCCでは負の補正を与えることが出来ないという特徴があり、それゆえK2型ではSi素子を採用したという理由も述べておきます。GaAsP素子の温度特性は正の温度特性なのです。下に示した図は、ISO9060で規格化されたセカンダリースタンドの温度特性の許容範囲、K2の温度特性範囲、世界一クラスの日射計の代表的な温度特性、世界中で一般的にPARセンサーで使用されているSiフォトダイオードの電流値、もしくはSiに抵抗を並列に接続してIV変換した状態での電圧値における温度特性を示しています。

K2型では、量産時スペックとして0.01%/°C以下を実現し、温度による誤差は上記条件時に $2000\mu E \times \pm 0.01\%/^{\circ}C \div 100\% \times 30^{\circ}C = \pm 6\mu E$ に押さえています。参考として、この回路特性を追い込み、±0.001%/°CのEverest型も製造は可能ですが、環境試験器で5~8回の試験結果のフィードバックと回路調整が必要となる理由で、量産は困難なため、積極的に受注する事は出来ません。

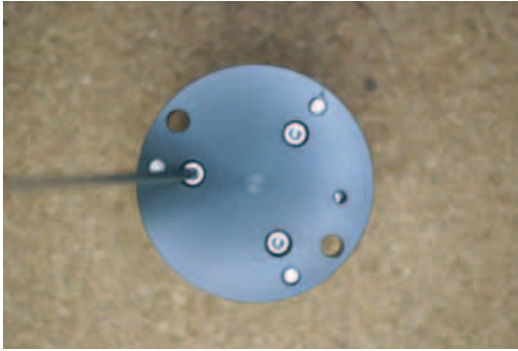
注意：PARセンサーというジャンルでは、温度特性についての積極的な補正、議論はあまりなされていない状況下、仕方なく日射計を比較対象に説明しましたが、価格帯が一桁違う、計測しているパラメータが違うという理由で、本来は比較するべきものではないことを断っておきます。



<メンテナンス、分解方法>

内部薬剤と拡散板の交換目安と手順を示します。

1. 対辺2.5mmのヘックスレンチを使って、底面のネジ3カ所を外します。



2. ベースを外します。通常は何故か本体側にOリングが残りますので、無くさぬよう注意。



3. 乾燥剤の交換手順は、前記1&2は共通作業です。ここで水平器側中央のプラスチックキャップを外します。このまま引き出すと中の薬剤がこぼれますので、ステップ4、5に従ってください。



4. 水平器を図のように逆さまにし、プラスチックキャップを引き抜きます。へりに爪をかけ、鉛直下向きに引き出します。



5.. 内部にモレキュラーシーブとシリカゲルが入っています。モレキュラーシーブは水を吸っても変色しないので目視では判断できません。シリカゲルの色が変色している場合には交換します。黄色は乾燥した色です。交換後は、前記の逆の手順で組み立てて終了です。



6. 拡散板は容易に交換できます。大きな傷などを付けてしまった場合以下の手順で交換します。交換による校正値のずれは $\pm 5 \mu E$ 未満です。対辺2.5mmのヘックスレンチを使って、トップカバーのネジ3カ所を外します。



7. UV/IRフィルターと拡散板の内側は触れないように注意します。拡散板の下にOリングがありますので、紛失に注意してください。



8. 組立は上記の逆の手順を踏みます。得にOリングにはゴミ、埃が噛まないように注意すべきです。Oリングに、バキュームグリスを再塗布するのは、防水性能に関して、より良い結果を生むでしょう。

<データロガーなどへの配線>

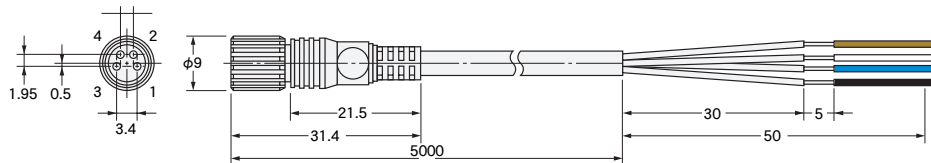
MIJ-14PAR型式は電源不要です。データロガーの入力に対して以下のピンアサインに従って接続してください。

白/信号+

黒/信号-

<信号出力(mV)から μE ($\mu\text{mol} \cdot \text{S}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$)への換算>

本体ラベルの三行目に、例えば255.55 μE /mVという記載が、センサー個別に印字されています。センサーから出力される電圧値(mV)にこの計数を掛け合わせると μE になります。



Wiring for K2

1.BROWN / NOT USE

2.WHITE / SIGNAL POSITIVE+

3.BLUE / NOT USE

4.BLACK / SIGNAL GRAND-

<設置>

設置は確実に、かつ水平に固定してください。MIJ-14の底面部品には水準器が装備されています。120°で配置された3本のM4ネジを使って水平を決めます。固定は付属の30mm長さのM4ネジ2本で行います。下の図のように固定ネジ穴のP.C.D.は45mmです。固定する相手に45mm間隔で $\phi 4 \sim 5\text{mm}$ 程度の穴、もしくは、M4のメスネジを開け、固定します。

