

Quantum Sensor MIJ-14PAR 式型

日本環境計測株式会社 光合成有効放射センサー



<特徴>

- 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、 $\pm 1.5\%$ 入射角特性エラー($0\sim 80^\circ$)を実現。
- フォトダイオードはGaAsPを採用。Siフォトダイオード+フィルター群を使う場合の劣化問題を解消。
- GaAsPのスペクトルエラーは青フィルター（赤減衰）HOYA LB40を装備して抑制。
- 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可能。
- 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。
- アンプ内蔵1mVDC at $1\mu E$ の出力で、樹冠内、日の出、日の入り時などの暗い環境でも確度の高い計測が可能。
- オートゼロ回路でゼロ点は自動調整し、かつ常時計測値にフィードバックしています。
- 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。交換容易。

<仕様>

測定範囲	0~5,000 μE
出力	1.0mVDC at 1.0 μE 、最大5000.0mVDC at 5,000.0 μE
ノイズレベル	$\pm 0.05mV$ ($=\pm 0.05\mu E$) at 0及びF.S.時 (S/N比0.001% at F.S.)
計測単位	μE ($\mu mol \cdot S^{-1} \cdot m^{-2}$)
プレヒート	6~14VDC、1mA未満
立上がり時間	0.05秒 (立下がり0.90秒)
温度特性	0.15%/ $^\circ C$ 以下
入射角特性	$< \pm 2.5\%$ at $0\sim 80^\circ$ $< \pm 21\%$ at $80\sim 90^\circ$
回転角特性	アジマスエラー： $< \pm 0.5\%$ over 360° at 60° elevation
主要素材	筐体：A5056、被覆：黒アルマイト、拡散板：PTFE
使用温度範囲	$-20\sim 60^\circ C$
形状	最大外径 $\phi 54mm$ 、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-、青/電源+、茶/電源-

<標準品及びオプション>

センサー本体	MIJ-14PAR 式型 (アンプ付き標準品、5mケーブル、取付用ネジM4-30 \times 2付属)
中継ケーブル5m	MIJ-14CCA



内部薬剤



防水コネクタ



内蔵基板



分解の様子

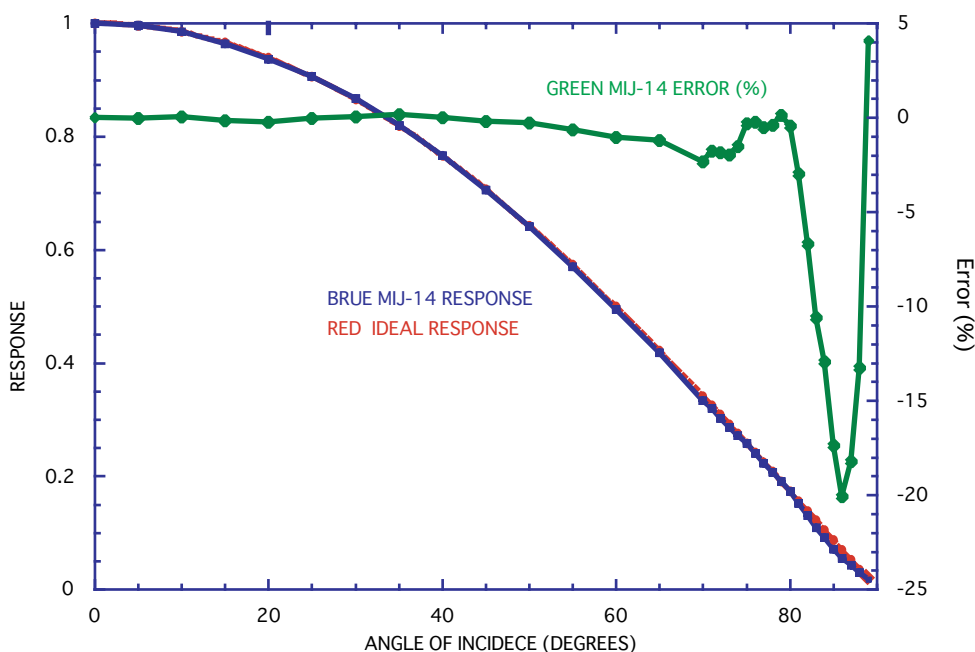
Environmental Measurement Japan



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>

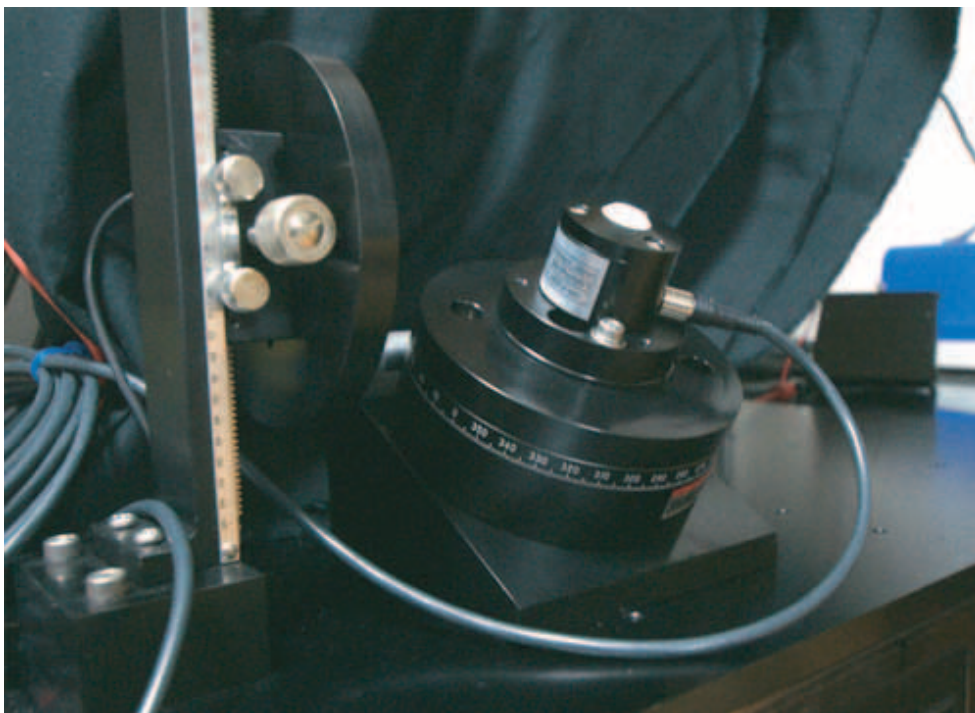
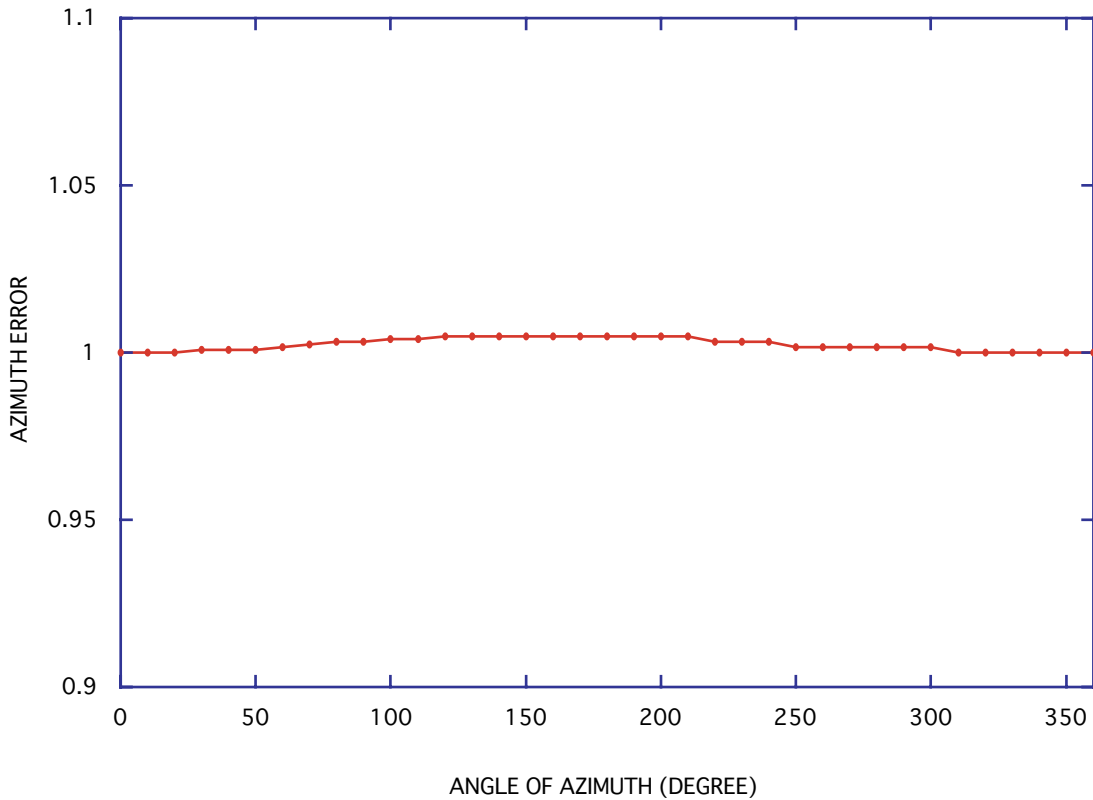
太陽光がセンサーに照射されるその入射角度は、年周期では季節変化、日周期では日の出から日の入りと、季節、時刻に応じて変化します。光センサーは入射角度に対して正しく応答しなければなりません。フォトダイオードそのままを光センサーとして使用できない理由の一つでもあります。キャンに入ったタイプもプラスチックモールド品も入射角を考慮した設計ではないからです。この応答を調節するのが拡散板と遮光リングです。形状設計の自由度は高い部品ですが、MIJ-14シリーズの拡散板では、素材そのものが持つ透過スペクトル、拡散係数、耐候性、撥水性、量産時の加工精度の限界（一般精度以内）、雨滴のスムーズな排除、乾性沈着などを考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°の範囲でダラ下りの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。これにより過小評価する事にはなりますが、そのエラーを実験値として80~89°の範囲で-20%にまで押さえています。-20%のエラーは大きいですが、太陽高度が低くなると直達成分が減少する事実、例えば夏は50%、冬は10%が直達成分の割合である事を考慮すれば、現実的には上記半分未満のエラーになります。副産物として、樹冠内部での乱反射した光の入射を抑制する役割も担っています。以下にMIJ-14シリーズの0~89°レンジでのコサイン特性、コサイン特性検査装置の写真を示します。



入射角特性テスト用実験装置

<回転角特性・アジマスエラー>

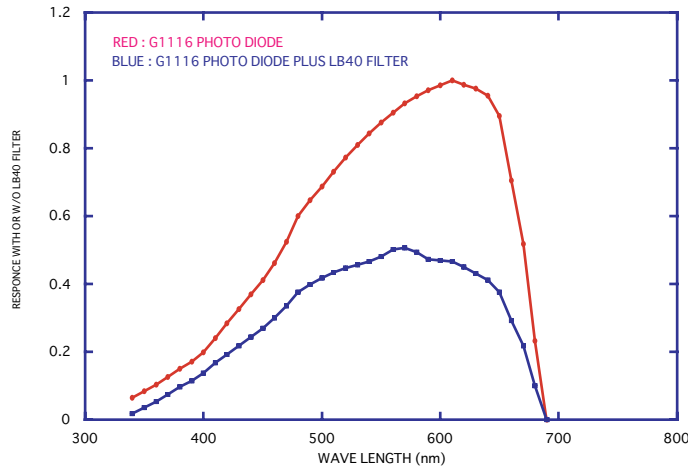
回転角に応じた感度の変動（センサーの方位特性）は、理想的には完全にフラットであることが求められます。乱れの原因として、通常フォトダイオードの受光面は製造の都合から正四角形であり、その受光面には拡散板を通過した光が入射しますが、それ故ある程度以上の入射角において、その拡散が不十分な場合に、筐体もしくはフォトダイオードのキャンの壁面で作られる影によって実効的な受光面積が変動し、回転角によって受光感度が変化してしまう結果となります。もう一つの原因は、機械加工精度です。一般公差で $\pm 0.05\text{mm}$ がその範囲です。これは、拡散板が大きいほど誤差の割合が少なくなることを意味し、例として $\phi 8\text{mm}$ 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となります。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の光量子フラックス密度 (PPFD) の測定によって行われています。一方、植物の葉は700nm以上の赤外域の光量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量子 NIR-PPFD (Near Infrared Photon Flux Density)の比率が高まります。日中の晴天時にはNIR-PPFD /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-PPFD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。そのため、UV/IRカット蒸着フィルターによってNIR-PPFD成分を強く吸収する設計が広く行われています。しかし、Si型センサーの最大感度はNIR-PPFD領域800~1000nmにあるため、光学的な副作用が生じやすくなります。また蒸着フィルター特有の経年劣化も生じます。一方、GaAsP型センサーは、680nm以上の領域に感度が無いため、このようなフィルターが不要です。GaAsP型センサーの有用性は多くの研究者によって確認されていて、この分野の第一人者であるPercy(1989)によっても推薦されています。MIJ-14シリーズではさらにHOYA-LB40を加えることで400~700nmのスペクトル感度のバランスを整え、晴天時と曇天時に生じる微妙なスペクトルエラーも抑制しています



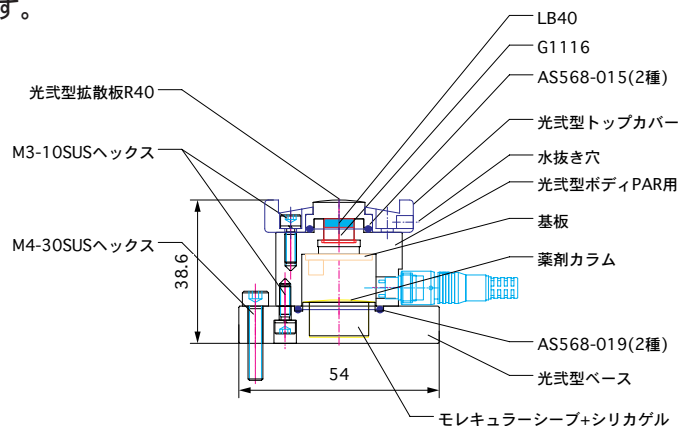
<センサーの劣化要因とその対策>

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。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の対策は前項記述のGaAsP型フォトダイオードを採用してフィルターそのものを削除しました。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、更に内部に乾燥剤を入れることで対策しています。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。



<内蔵アンプ>

オートゼロアンプを採用しました。通常のOPアンプでは低オフセット品でも0.1mV以下のものはそうありません。そのまま増幅するとオフセット電圧も利得倍されますので、オフセット電圧0.1mVのOPアンプであっても、利得10倍で使用すれば1mVのオフセット電圧が出てきます。さらに、温度ドリフトの影響を受けますので、周囲温度変化が著しい屋外での使用には不利です。これらの欠点を解決するために作られたのがオートゼロアンプです。増幅用のメインアンプに加えてオフセット調整用のアンプを持つデュアルアンプにより、オフセット調整と通常の信号増幅を交互に行う動作を行なっています。オフセット電圧を常時計測し、フィードバックされた信号を計測値として出力するため、オフセット電圧を小さくするだけでなく、温度ドリフトの影響が非常に小さいという特徴も持っています。この効果はゼロ点、スパン点の両方に効果があります。

校正時のスパン調整（絶対値調整）は、多回転トリマを操作することで行なっていますが、トリマは比較的溫度特性が悪いので、溫度特性が良い固定抵抗（薄膜抵抗）60%+トリマ40%程度の比に設定しています。結果、溫度ドリフトを最小限にし、かつ0.1mV（0.1μmol）単位での調整を可能としました。

外来ノイズへの耐性を物理的に向上させるために、フォトダイオードとアンプ回路までの距離は最短（約4mm）となるように実装しています。

フォトダイオード両端の電位差を差動増幅する構成を採り、一般的なフォトダイオード用アンプとは若干構成が異なっています。オートゼロアンプによってオフセット電圧、溫度ドリフトの影響がほとんどないのは前述の通りです。また、同相信号除去比は通常のOPアンプよりも高くしていますが、電源環境によってはコモンモードノイズの影響を受け、0.4~1mV未満のオフセットが現れることもあります。この対策として、本機はアクティブグランド回路を採用することで、差動入力時の基準電位を電源GNDと分離、コモンモードノイズの影響を低減させ、遮光時の出力が0.05mV未満（5m標準ケーブル時）を達成しています。一般的な光センサーでは、電流/電圧変換を抵抗のみで行う仕様が良く見られます。この場合のF.S.10mV、ノイズ0.05mV、S/N比0.5%程度ですが、本機のS/NはF.S.5,000mV、ノイズ0.05mV、S/N比0.001%となります。ノイズレベルの一例として、日の出時刻の実際の計測値を示します。

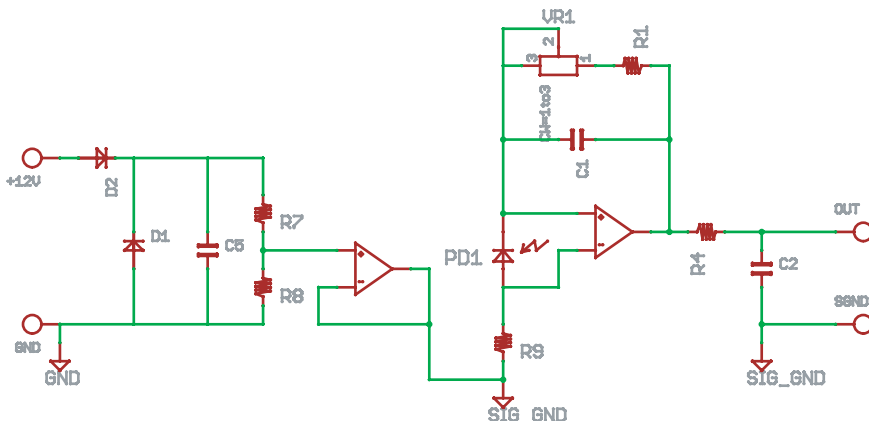
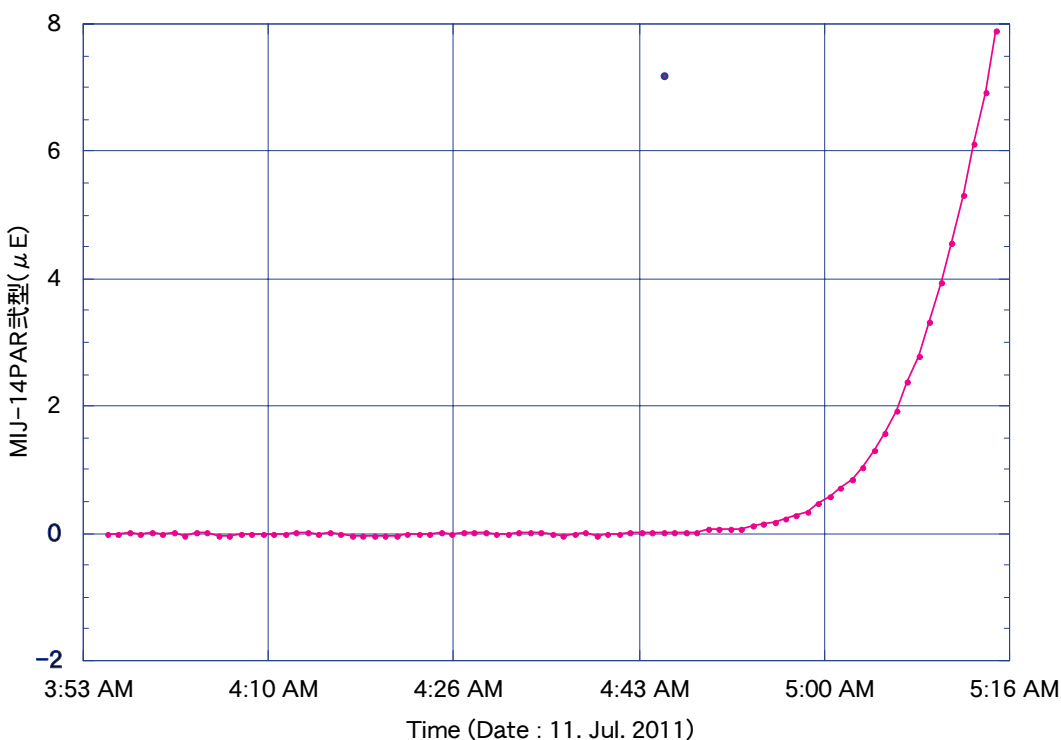


図. MIJ-14シリーズの内部回路



Time	μE	Time	μE
3:55 AM	-0.01	4:35 AM	-0.02
3:56 AM	-0.02	4:36 AM	-0.03
3:57 AM	0.01	4:37 AM	-0.02
3:58 AM	-0.02	4:38 AM	0.01
3:59 AM	0.02	4:39 AM	-0.03
4:00 AM	-0.02	4:40 AM	0.00
4:01 AM	0.01	4:41 AM	-0.02
4:02 AM	-0.03	4:42 AM	0.01
4:03 AM	0.01	4:43 AM	0.03
4:04 AM	0.01	4:44 AM	0.01
4:05 AM	-0.03	4:45 AM	0.03
4:06 AM	-0.04	4:46 AM	0.03
4:07 AM	-0.02	4:47 AM	0.01
4:08 AM	-0.01	4:48 AM	0.01
4:09 AM	-0.02	4:49 AM	0.06
4:10 AM	-0.01	4:50 AM	0.07
4:11 AM	0.00	4:51 AM	0.08
4:12 AM	0.01	4:52 AM	0.07
4:13 AM	0.02	4:53 AM	0.12
4:14 AM	-0.02	4:54 AM	0.16
4:15 AM	0.02	4:55 AM	0.18
4:16 AM	-0.02	4:56 AM	0.23
4:17 AM	-0.03	4:57 AM	0.29
4:18 AM	-0.03	4:58 AM	0.34
4:19 AM	-0.03	4:59 AM	0.47
4:20 AM	-0.03	5:00 AM	0.59
4:21 AM	-0.03	5:01 AM	0.72
4:22 AM	0.00	5:02 AM	0.85
4:23 AM	-0.02	5:03 AM	1.05
4:24 AM	-0.02	5:04 AM	1.30
4:25 AM	0.01	5:05 AM	1.57
4:26 AM	-0.02	5:06 AM	1.94
4:27 AM	0.01	5:07 AM	2.38
4:28 AM	0.01	5:08 AM	2.80
4:29 AM	0.01	5:09 AM	3.33
4:30 AM	-0.02	5:10 AM	3.94
4:31 AM	-0.02	5:11 AM	4.57
4:32 AM	0.01	5:12 AM	5.32
4:33 AM	0.01	5:13 AM	6.12
4:34 AM	0.02	5:14 AM	6.93
		5:15 AM	7.90

図. 実際の計測例 ノイズレベル実測値と数μE時を表示

<ゼロ&スパン調整>

上記の通り、ゼロ調整は不要でマニュアルによるゼロ調整も不可です。スパン調整は内部回路のトリマを回すことで調整可能です。MIJ-14を天地逆さまにして、蓋を開け、トリマを時計回りでゲインが増加、反時計回りで減少します。ただし、ここは出荷時に調整済みですので、標準となる光源、標準となるセンサーを準備できるユーザーのみ実施してください。以下に手順を記載します。同時に、内部薬剤の交換目安と手順、拡散板の交換目安と手順を示します。

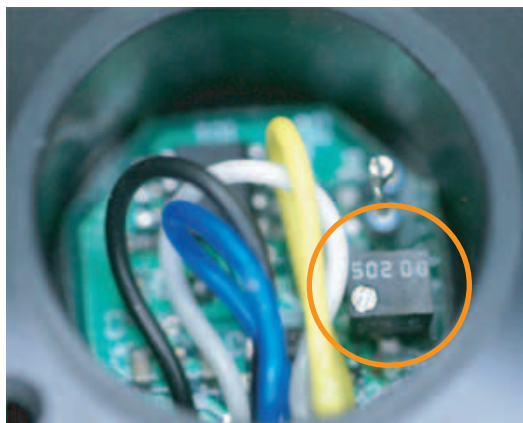
1. 対辺2.5mmのヘックスレンチを使って、底面のネジ3カ所を外します。



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. コネクタを下に見て右下にトリマが配置されています。マイナスインドクタ0.9~1.2mmのマイナスインドクタ(眼鏡用など)を使います。写真の状態時計回りがゲイン増加、反時計回りが減少です。



4. 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5、6に従ってください。



5. 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。



6. 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。シリカゲルの色の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。



7. 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。



8. 青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。



<データロガーなどへの配線>

MIJ-14シリーズの標準品では電源が必要です。DC12Vを配線して使用し、その消費電流は1mA未満となっています。連続、プレヒート（エキサイテーション）どちらの駆動方法でも対応し、ディファレンシャル、シングルエンドの両方で使用できますが、以下に各配線時の注意事項を記載します。

○ディファレンシャル接続

理想的な結線は、ディファレンシャル接続です。茶と黒が分離している配線になります。

- 茶/電源- (DC GRAND)
- 白/信号+
- 青/電源+ (+12VDC)
- 黒/信号-

○シングルエンド接続の場合

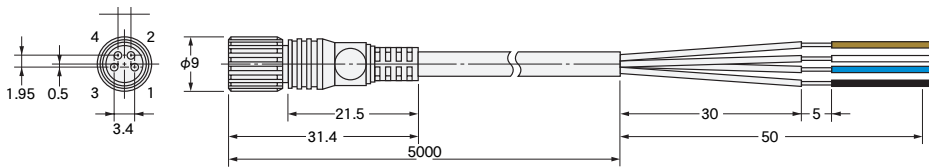
一部のデータロガーなど、内部でシングルエンド接続になっている事があります。（茶と黒が共通のコモンになる配線）この時、MIJ-14の出力は約2.5mV（2.5μE相当）シフトします。出力から2.5mVを引いた値を計測値としてください。このシフトは真っ暗でも明るいときでも同じ値でシフトしています。Y=AX+BのBに相当。（MIJ-14ではA=1）

例1) 明るいとき。出力2002.5mVのとき、2002.5-2.5=2000.0μEが計測値。

例2) 真っ暗なとき。出力2.5mVのとき、2.5-2.5mV=0μEが計測値。

- 茶/電源 (COM GRAND)
- 白/信号+
- 青/電源+ / (+12VDC)
- 黒/信号 (COM GRAND)

上記は5m標準ケーブルの時の値であり、延長するとシフトの値は変わります。簡単な方法として、センサーを真っ暗な環境に置いて、そのときの値を計測し、それをシフトした値と見なす事ができます。



Differential Wiring

- 1.BROWN / POWER DC GRAND
- 2.WHITE / SIGNAL POSITIVE+
- 3.BLUE / POWER +12VDC
- 4.BLACK / SIGNAL GRAND-

Single-End Wiring

- 1.BROWN / POWER COM GRAND
- 2.WHITE / SIGNAL POSITIVE+
- 3.BLUE / POWER +12VDC
- 4.BLACK / SIGNAL COM GRAND-

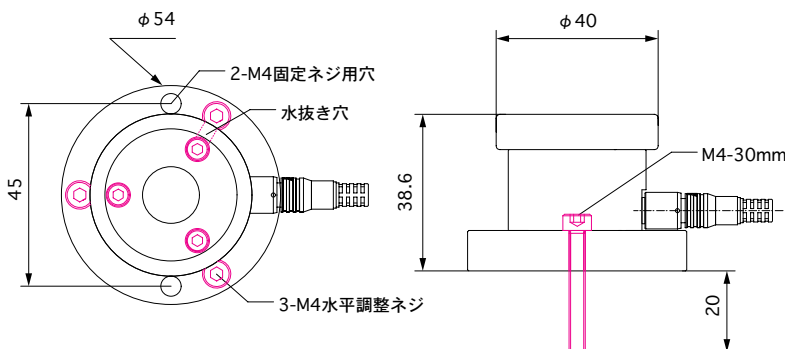
○樹冠下での測定時にお奨めする配線

MIJ14シリーズはSNが良い事が特徴の一つですが、実際の計測時には使用するデータロガーの分解能に依存してしまいます。2600μEをフルスケールとして計測するには±5Vスケールに設定して使うことになりませんが、13bit 時で分解能1.22μEという低い光量での計測時に十分な分解能を得られない事があります。この場合、2chを消費しますが、MIJ-14の出力を例えば1chを±5Vレンジに設定し、2chを±20mVに設定し、MIJ-14の出力を両チャンネルに分岐して接続します。2chは20μEより大きい入力時には記録不能になりますが、1chが分解能1.22μE、2chが分解能0.0048μEで計測出来るというメリットが出ます。注意点は全チャンネル絶縁仕様のロガーの場合にこの方法が使えるという点です。

ロガー分解能(分解数)	10bit(1024)	12bit(4096)	13bit(8192)	14bit(16384)	16bit(65536)	18bit(262144)
±20mVスケール時のmV/digit	0.0390625	0.009765625	0.004882813	0.002441406	0.000610352	0.000152588
±5Vスケール時のmV/digit	9.765625	2.44140625	1.220703125	0.610351563	0.152587891	0.038146973

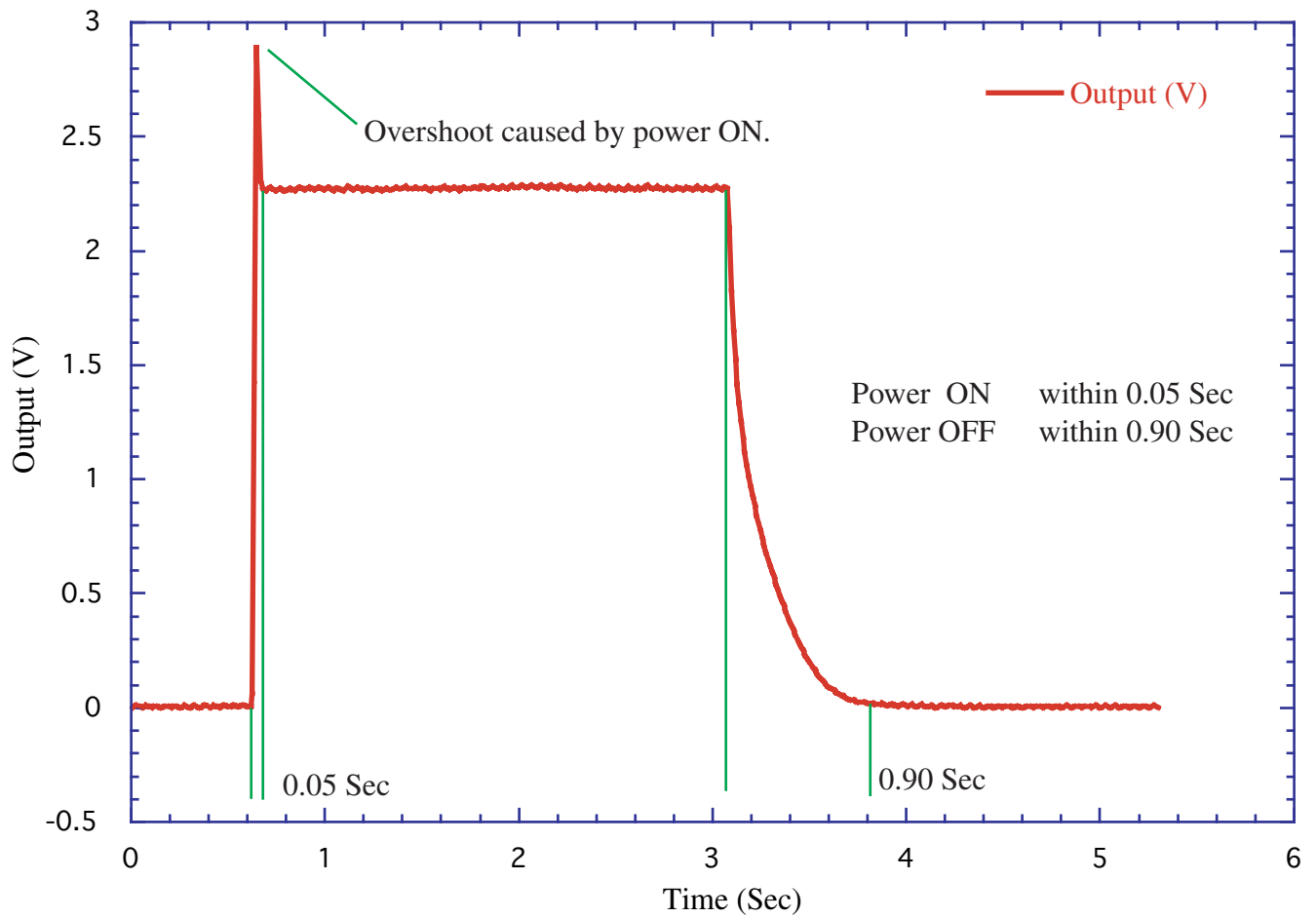
<設置>

設置は確実に、かつ水平に固定してください。MIJ-14の底部は水平器台になっています。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φ4~5mm程度の穴、もしくは、M4のメスネジを開け、固定します。



<立ち上がり、立ち下がり時間（プレヒート時間の注意）>

MIJ-14シリーズは電源投入後0.05秒経過後以降の出力値を有効としてください。電源遮断後は0.90秒かけて出力が0になる特性を持っています。



Response time to stable when the sensor powered ON and OFF.
(Be care. This is not response for the light intensity change.)