

Pyranometer MIJ-14RAD 式型/K2

日本環境計測株式会社 光電型全天日射計



MIJ-14PAR 式型の日射バージョンです。筐体、内部回路などの仕様は弊社の PAR 式型/K2 とほぼ同じですが、受光感度の波長範囲を日射計測に最適化した Si 日射計です。波長に対する受光スペクトル感度の調整を行い、熱型（サーモパイル型）の日射計と比較したスペクトルエラーを抑制している事が特徴です。また拡散板には PTFE を採用しており、アクリルに比較して紫外線領域までの感度を持ち、その幅は 300~1100nm です。受動型温度補償回路 P.T.C.C. を搭載し、温度特性が向上しています。

<特徴>

- 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 S1336-5BK + 受光感度調整デバイス + 内部乱反射防止用 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	0~2,000W/m ²
出力	代表値 10 mV @ 1000W/m ² 、校正係数を ###.## Wm ⁻² /mV の表現でラベルに記載
温度特性	±0.01%/°C 以下
計測単位	W/m ²
応答速度	0.2 μ Sec (90% 応答時間)
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&白アルマイト、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-
校正	Kipp&Zonen CMP21 を基準として、ハロゲンランプで二次校正
税別販売価格	70,000円

<標準品及びオプション>

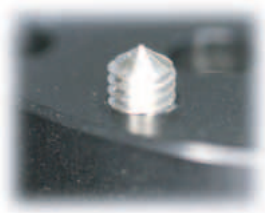
センサー本体	MIJ-14PAR 式型/K2 (アンプレス PTCC 搭載型標準品、5m ケーブル、取付用ネジ M4-30×2 付属)
中継ケーブル 5m	MIJ-14CCA



内部薬剤

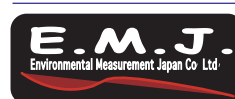


防水コネクタ



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

<日射計の定義、クラス分けとMIJ14RAD>

フォトダイオードを使用した日射計はWMOやISOでは定義付けされていないのが現状です。MIJ14RADについても、クラス表記が出来ません。その主な理由は、日射計の定義です。特に受光波長の範囲が0.3~1.5 μm at ISOもしくは、0.3~3 μm at WMOという定義があり、フォトダイオードを使う限りはその定義には決して乗りません。ところが下記の表のように比較してみると、赤い文字で記した項目以外はセカンダリースタンドアードを越えています。(スペクトル以外は検証中も含む) そもそも熱型のサーモパイルと光量子型のフォトダイオードは光強度からセンサ出力に至る過程が原理的に異なるので、相違や物性の違いが存在します。どちらが良いというよりも目的に応じた使い分けをする方が賢明です。例えば太陽光発電の分野では、応答速度やゼロオフセットが大きな問題(発電パネルとの物性の違い)になり、サーモパイル型であるというだけで、向上は可能ですが問題は永遠に残るでしょう。日射計に対するEMJの開発方針は、熱型ベースで開発を進めても、既存のものと同様の問題が残るのがゴールであり、そのときの販売価格は100万前後になるわけで、それは一般普及品とは言えない事が既知であるからには、フォトダイオードの物性から来る利点を活かし、不利な点を補う方向に進めてみよう、そうすれば熱型とは違う特徴が得られるだろうし、違う問題を解決する楽しさを体験できるであろう、そういう道を選びました。Kipp&Zonen両氏が今の時代に生きていればどっちで進んだかなあ?などと想像できるのも楽しさの1つです。

EMJ MIJ-14RAD型式/K2 Pyranometer Comparison to ISO/WMO Specifications

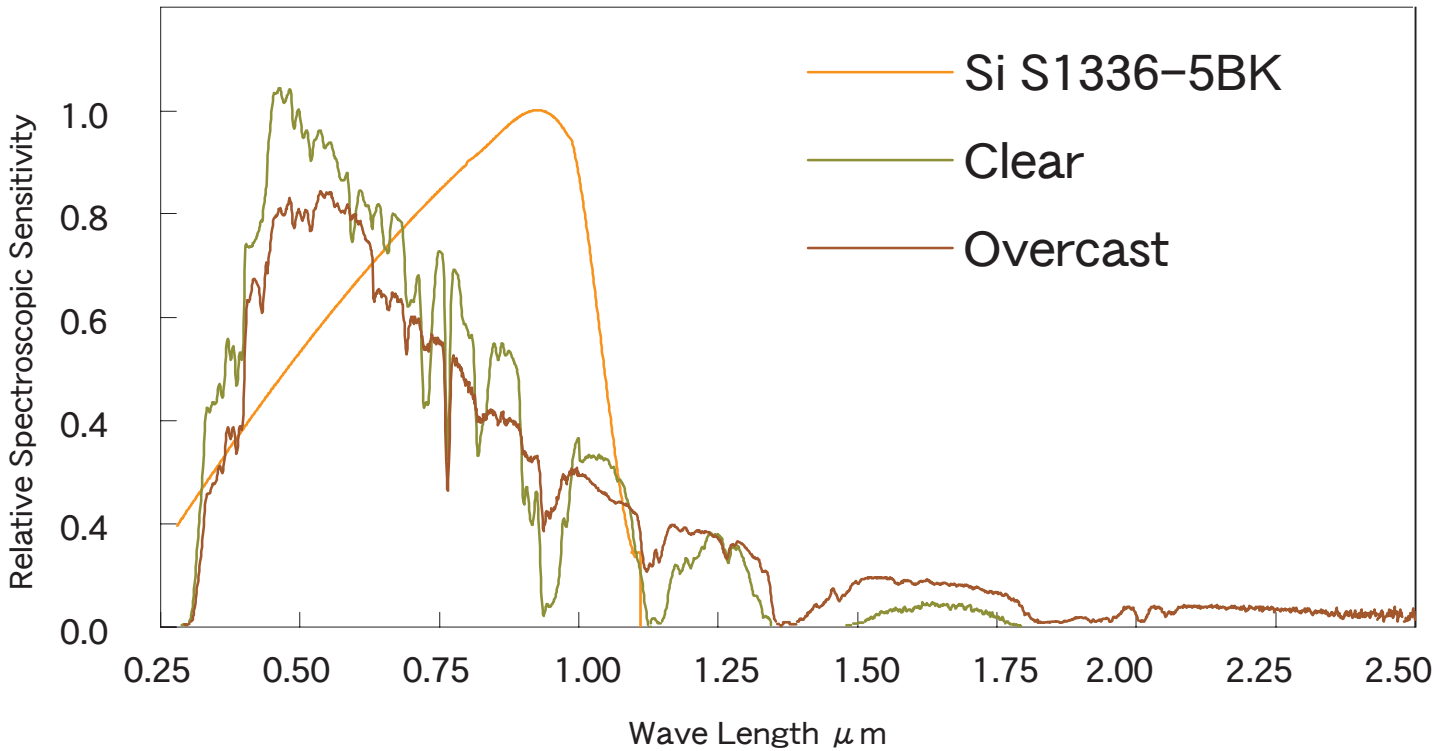
ISO Specification (ISO 9060: 1990(E))	Secondary Standard	First Class	Second Class	EMJ K2 Pyranometer (Not defined class)
WMO Characteristics (WMO Guide 6th edition)	High Quality	Good Quality	Moderate Quality	
Response time (to 95% of final value)	ISO & WMO <15 s	<30 s	<60 s	0.2 micro second (90%)
Zero offset response to 200 W/m2 net radiant loss to sky (ventilated)	ISO & WMO 7 W/m2	15 W/m2	30 W/m2	None,
Zero offset response to 5 degree/hr change in ambient temperature	ISO & WMO ±2 W/m2	±4 W/m2	±8 W/m2	None
Resolution (smallest detectable change)	WMO ±1 W/m2	±5 W/m2	±10 W/m2	Res less than ±1 W/m2 Resolution is depend on Measurement device
Non-stability (change in sensitivity per year)	ISO & WMO ±0.8%	±1.5%	±3%	Estimated ±1.0% We continue Field Test from Oct 2012 *1
Non-linearity (deviation from sensitivity at 500 W/m2 over 100 to 1000 W/m2)	ISO & WMO ±0.5%	±1%	±3%	±0.5%
Directional response for beam radiation (error due to assuming that the normal incidence response at 1000 W/m2 is valid for all directions)	ISO & WMO ±10 W/m2	±20 W/m2	±30 W/m	±9 W/m2
Spectral selectivity (deviation of the product of spectral absorptance and transmittance from the mean)	ISO (0.35-1.5 μm) ±3% WMO (0.3-3 μm) ±2%	±5% ±5%	±10% ±10%	0.3 - 1.1 μm
Temperature response (error due to 50°C ambient temperature change)	ISO & WMO ±2%	±4%	±8%	±0.01%/°C
Tilt response (deviation from horizontal responsivity due to tilt from horizontal to vertical at 1000 W/m2)	ISO & WMO ±0.5%	±2%	±5%	None
Achievable uncertainty,95% confidence level	WMO hourly totals 3% WMO daily totals 2%	8% 5%	20% 10%	Clear ±2%,(daily difference) Overcast±7% (daily difference) These test Result compared with CMP21 without ventilation *2

*1 It take more few months to fix the Non stability.

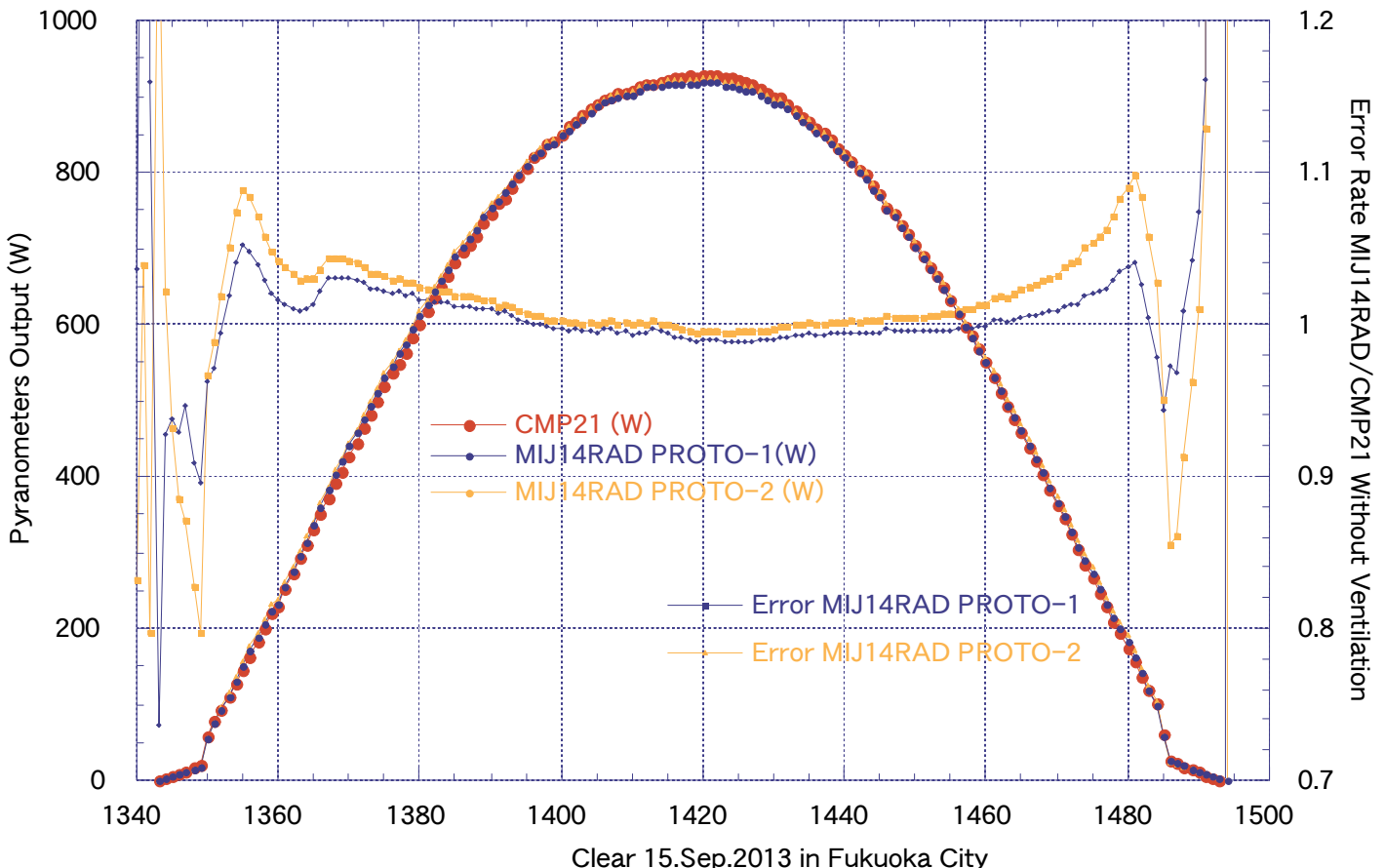
*2 We have no secondaly standard pyranometer with ventilation. This result include zero offset A&B.And numbers are situation over 200W/m2.

<受光スペクトル感度の最適化、熱型（サーモパイル型）日射計との実際の比較を基に>

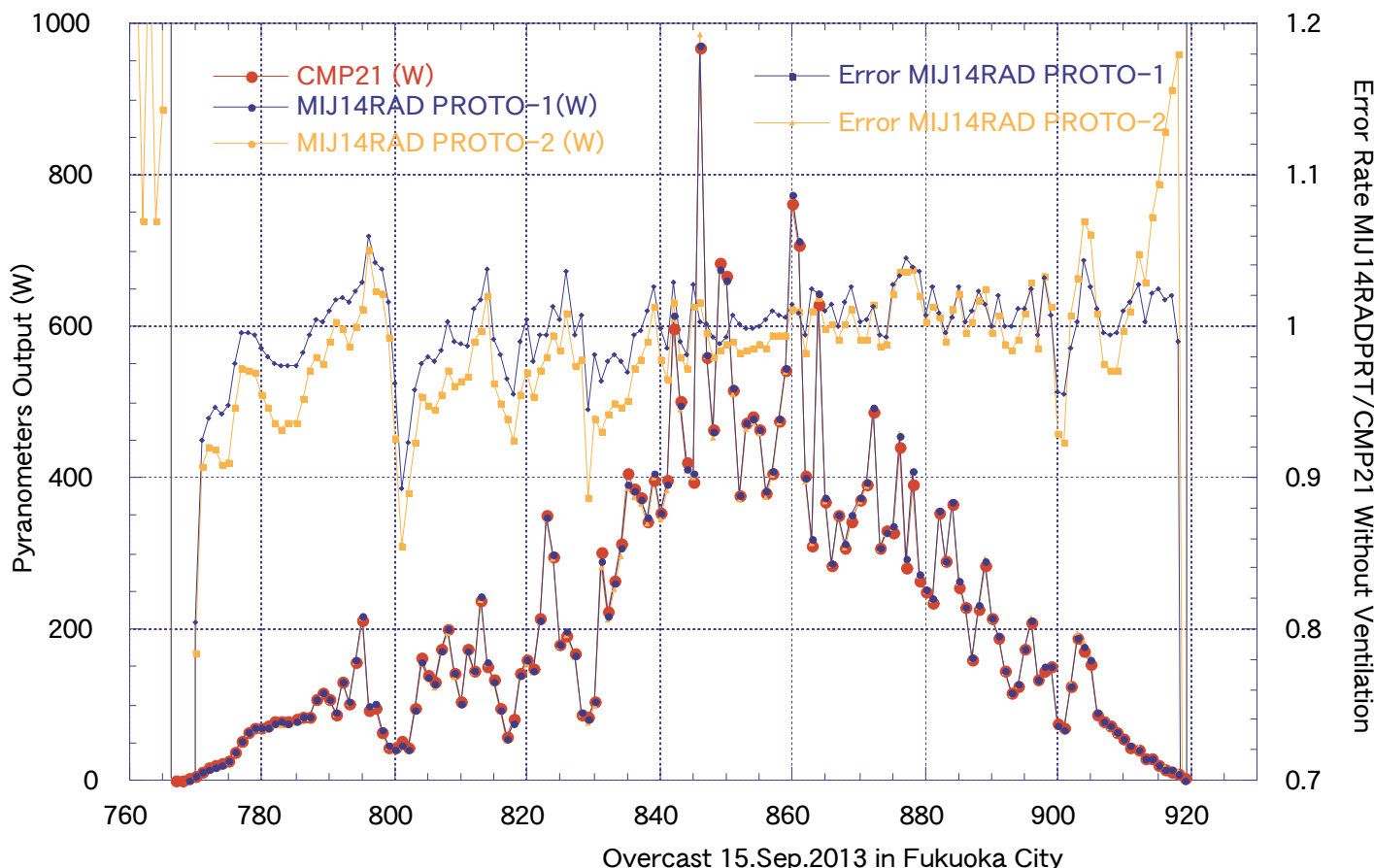
熱型の日射計の歴史は古く、150年にも及びます。一方、Si日射計の歴史は20年ほどしかなく、開発途上の領域から脱していない状況です。それ故、解決すべき課題は沢山残っており、第一に耐候性、第二に受光スペクトル感度の最適化が上げられます。それ以外にも入射角特性、回転角特性、温度特性他の基本的な要素もありますが、これらと第一の課題はMIJ-14PAR弐型/K2のマニュアルに記載の通りで、弊社としては解決済みです。基本的には受光スペクトル感度(Spectral selectivity)はSiフォトダイオードを使う限りは永遠に熱型を越える特性を得られることはありません。ただし、屋外での実効値としてどこまで熱型に近寄れるかについては挑戦した例がとてつもなく少なく、歴史的に結論は出ていませんからやる価値はあります。下に示すのが晴天と曇りの日の地上での太陽光の分光スペクトルになります。実際は長波長側に永遠に続きます。Siは感度の波長域が狭く、感度もフラットではない事が見て取れます。



恐らくその両方が熱型に比較してエラーの要因になっていると想像できます。PARでは400~700nmの範囲をフラットな感度に仕上げる事が肝要です。ここで、同じ発想で300~1100nmをフラットに近づけるとどうなるでしょう。その結果を示します。PROTO-1は感度調整した試作品、PROTO-2は感度調整していない比較対照です。言い換えるとPROTO-2は一般市販品のSi日射計と同等の分光感度特性と解釈してください。結果として調整代（伸び代）はまだあると思いますが、エラーを半分以下に押さえる効果を得ています。面白いのは日の出、日の入り時のマイナス側に出るエラーです。これはMIJ14の入射角特性の80度越えたあたりの特徴(グラフのみ下記)ですが、そのエラーも小さくなる傾向に見えます。



目で見て赤以上波長の割合が増加する時刻ですが、PROTO-2はその辺に相対的に強い感度を持つためにエラーが強くなる解釈して良いでしょう。次に、曇りの日を見てみましょう。晴天時よりエラーが増えますが、やはりPROTO-1の方がエラーが少なくなります。



これらのグラフを読む際の注意は、熱型、光電型の両方に異なる性質のエラーが内包されている事です。ゼロオフセットは熱型にしか存在しませんし、温度特性、応答速度も大きく異なります。入射角特性だけはスペクトル感度の調整を目的にPROTO-1&2をCMP21に意図的に合わせて試作（太陽高度が低いとドラ下がりの方向）しています。特にゼロオフセットについては、7W@200W時がベンチレーション付きの仕様ですがここではベンチレーションされていないCMP21を使っていますのでっと大きな誤差要因になっているはずで、1~5%を議論すべき上記結果では論外だと判断できます。この理由で、「現段階での」を先に示しています。ここまでのテストでも感じるのですが、熱型と光電型は、物性から来る特徴に違いこそあれ、どちらが良い悪いというものでも無いと思われれます。

<センサーの劣化要因とその対策>

一般的な光電型センサーは、筐体、**アクリル製拡散板**、Siフォトダイオード、シャント抵抗(電流出力の場合無し)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拡散板になります。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。

MIJ-14シリーズではこの対策として、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。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。これらの乾燥剤は交換可能で、1年に一回は交換頂くことを推奨します。

<日射強度の瞬時値と積算値>

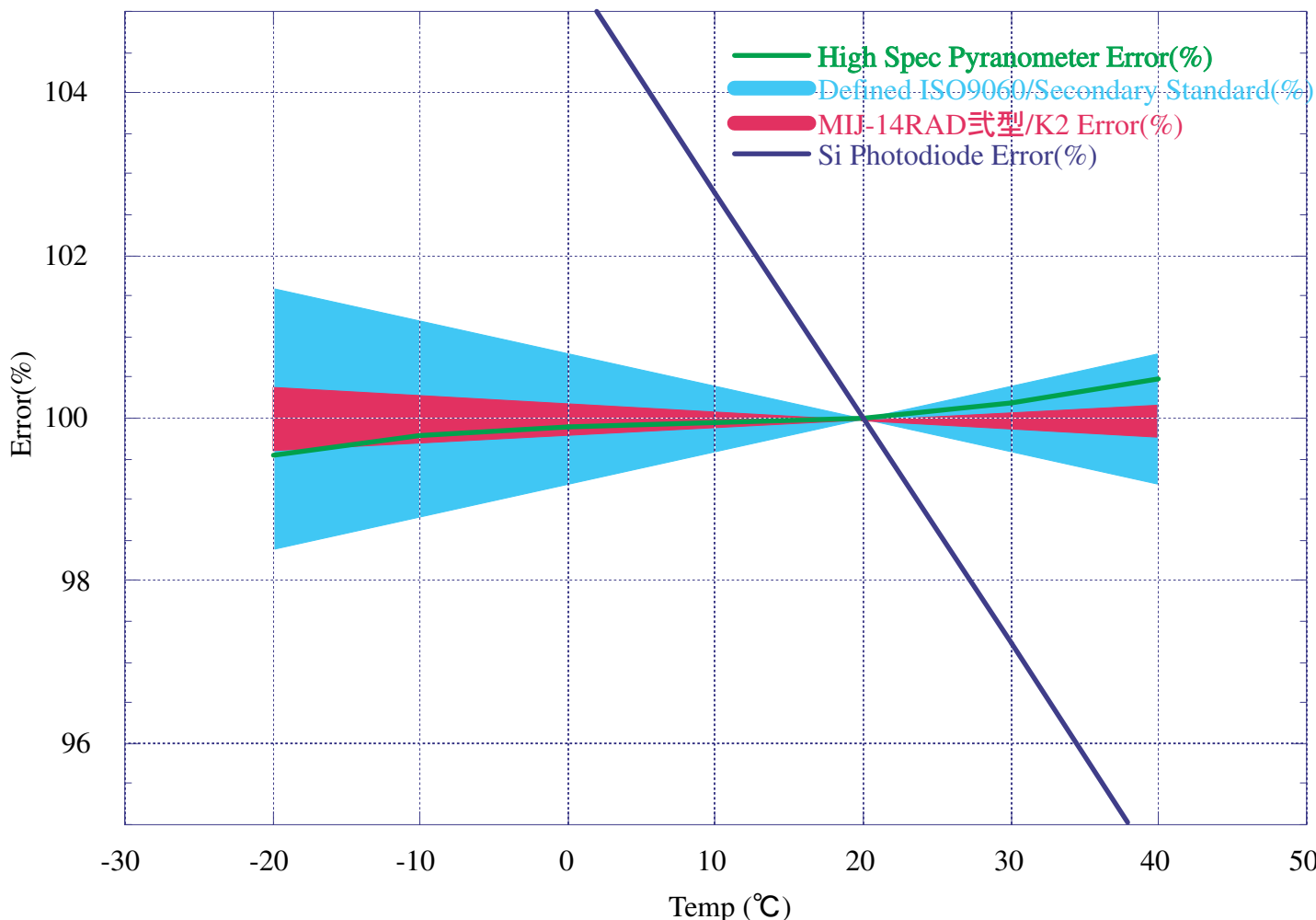
日射強度の瞬時値の計測は、特性や性能の評価ではよく使いますが、通常の研究や業務では積算日射量として、日、月、年積算値を使うことの方が多いでしょう。上記した晴天時と曇天時のデータ(インターバル5分)を使って日積算値を求めると、どの程度の差が熱型との間に出てくるかを演算した結果を下の表に示します。PROTO1と熱型との差は1%未満です。ただし、ここにも注意点があり、それはログの記録間隔です。インターバルは機器の応答速度より長く取る必要があります。近年の熱型ではその改善がなされておりますが、それでも10秒未満程度で、一方。光電型ではマイクロ秒なので、対等な比較が出来るかという点が無理があり、故にどちらが正しいとは判断しがたい所です。特に曇天時の日射強度の変動は激しいので、エラーの解釈には注意が必要となるでしょう。

	CMP21	PROTO1	PROTO2
Clear (KJ/m2)	1972.48	1974.50	1993.31
Errorr (%)	-	+0.10	+1.05
Overcast (KJ/m2)	789.21	783.74	783.07
Error (%)	-	-0.69	-0.77

<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の温度特性は負の値を持ち、実測値で-0.225%/°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1000W/m2時に、 $1000W/m2 \times -0.225\%/^{\circ}C \div 100\% \times 30^{\circ}C = -67.5W/m2$ 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 $\pm 0.04\%/^{\circ}C$ 、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 $0.017\%/^{\circ}C$ (-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。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Si日射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。

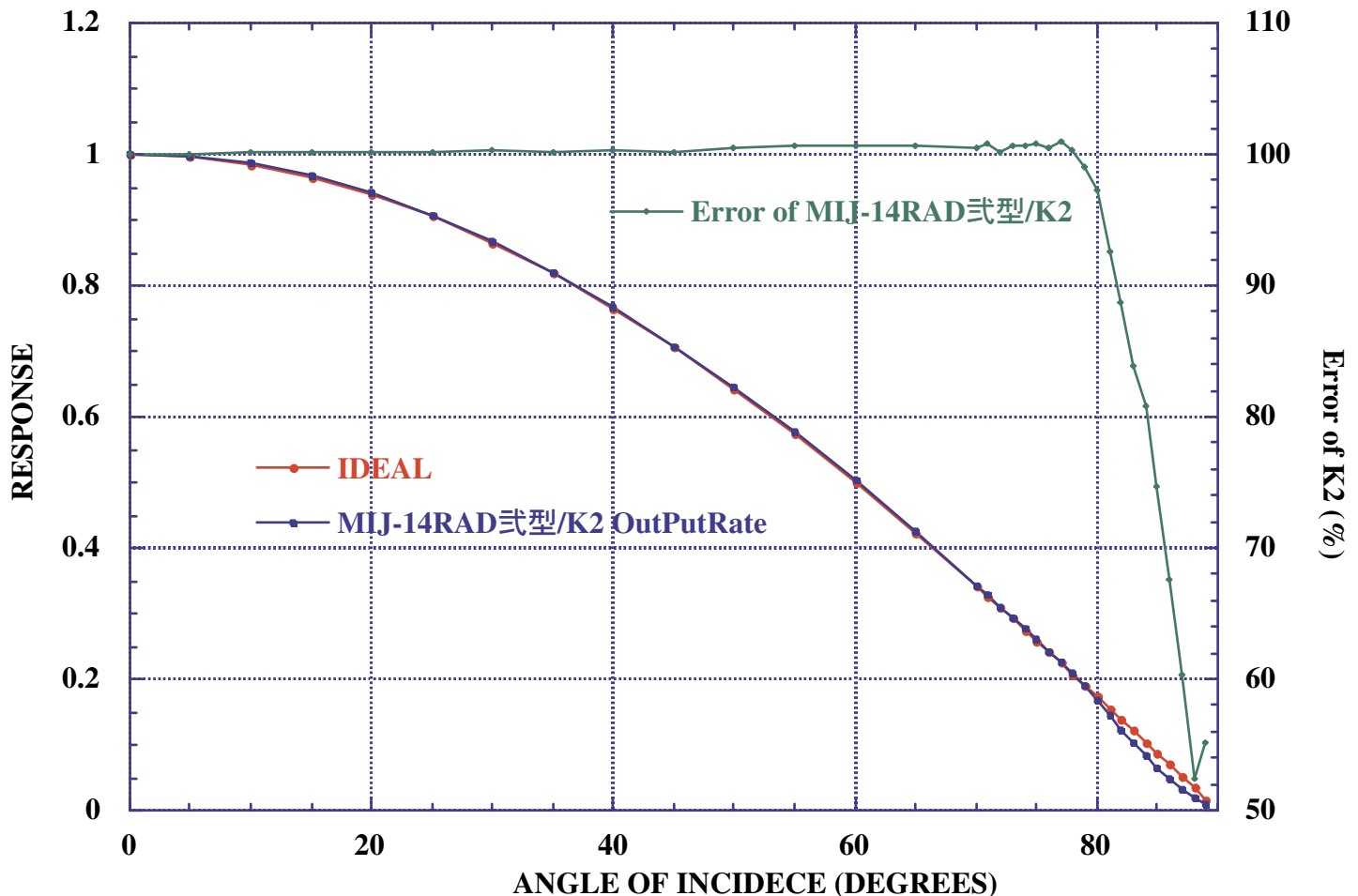
K2型では、量産時スペックとして $0.01\%/^{\circ}C$ 以下を実現し、温度による誤差は上記条件時に $1000W/m2 \times \pm 0.01\%/^{\circ}C \div 100\% \times 30^{\circ}C = \pm 3W/m2$ に押さえています。参考として、この回路特性を追い込み、 $\pm 0.001\%/^{\circ}C$ のEverest型も製造は可能ですが、環境試験器で5~8回の試験結果のフィードバックと回路調整が必要となる理由で、量産は困難なため、積極的に受注する事は出来ません。



<入射角特性・コサインエラー>

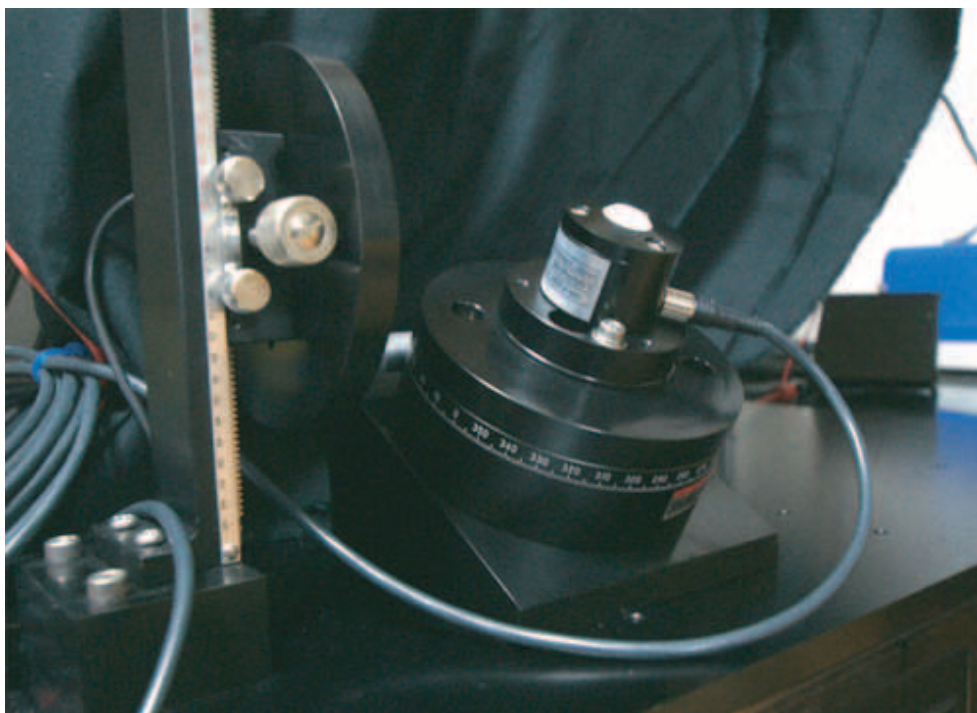
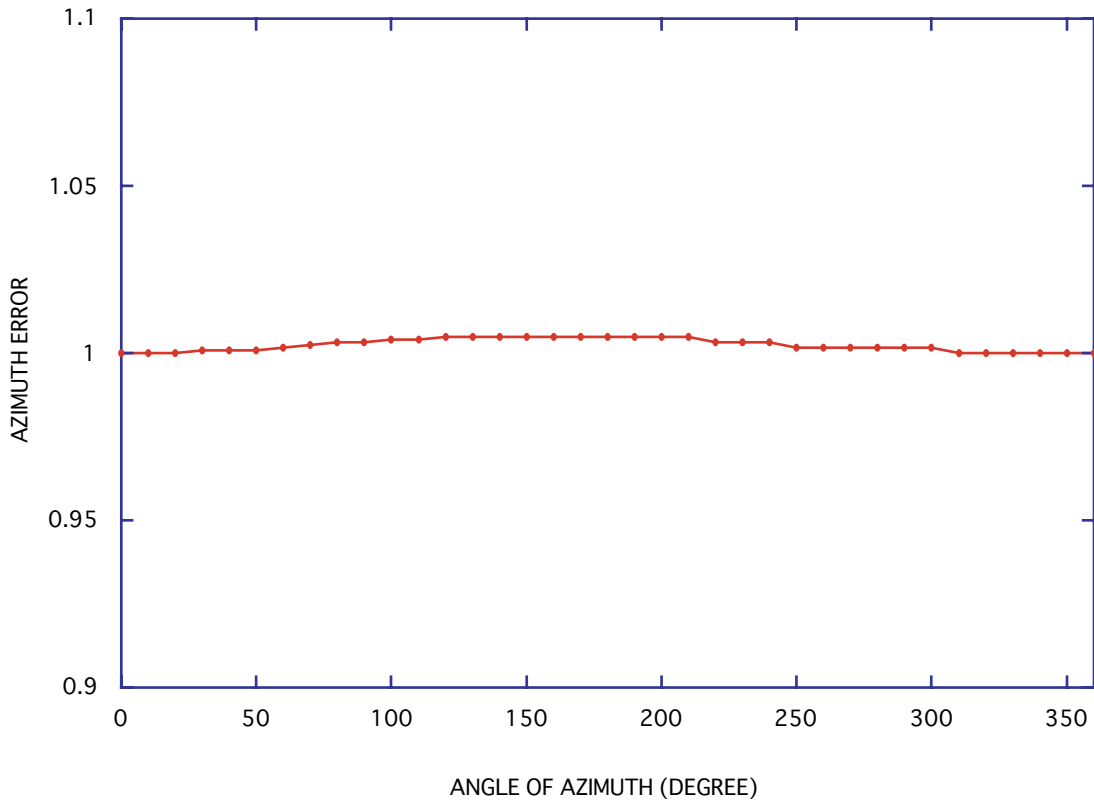
太陽光がセンサーに照射されるその入射角度は、年周期では季節変化、日周期では日の出から日の入りと、季節、時刻に応じて変化します。光センサーは入射角度に対して正しく応答しなければなりません。フォトダイオードそのままを光センサーとして使用できない理由の一つでもあります。キャンに入ったタイプもプラスチックモールド品も入射角を考慮した設計ではないからです。この応答を調節するのが拡散板と遮光リングです。形状設計の自由度は高い部品ですが、MIJ-14シリーズの拡散板では、素材そのものが持つ透過スペクトル、拡散係数、耐候性、撥水性、量産時の加工精度の限界（一般精度以内）、雨滴のスムーズな排除、乾性沈着などを考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。

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

<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。シリカゲルの色に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. 感度調整用の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、埃がつ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。

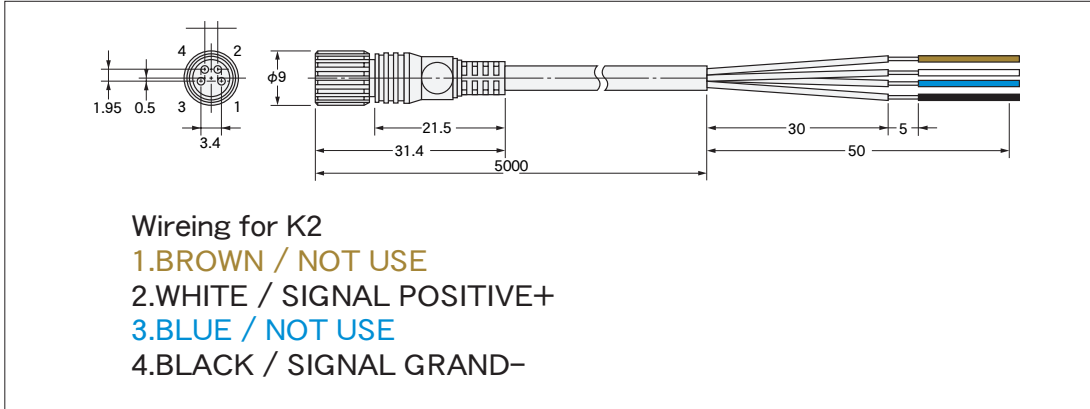
<データロガーなどへの配線>

K2型は電源不要です。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-

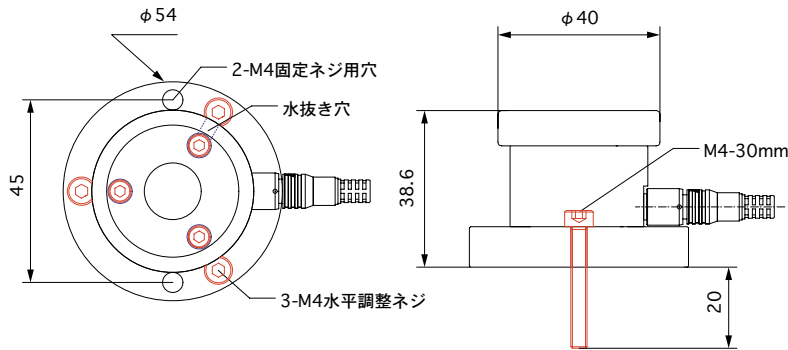
<信号出力(mV)からW/m²への換算>

本体ラベルの三行目に、例えば100.00Wm⁻²/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W/m²になります。



<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φ4~5mm程度の穴、もしくは、M4のメスネジを開け、固定します。



<内部構造と構成部品>

以下に示すような内部構造になっています。

