

高速応答の高精度直達日射計 MS-57

EKO Instruments Co., Ltd.
K. Hoogendijk / W. Beuttell / A. Akiyama

新しい直達日射計 MS-57 は、最新の全天日射計 MS-80 の技術で得られた、これまでにない低オフセット出力と高速応答を持つサーモパイル特性から発想を得て開発されました。

MS-57 の外観は従来モデルの MS-56 と殆ど変わらないものの、中味は完全に新規に開発されたセンサであり、最適化された特性は、高速応答を持つ全天日射計 MS-80 に匹敵し、同等の測定間隔で使用出来ます。応答速度をデジタル補正した直達日射計は、オーバーシュートやアンダーシュートによる誤差を生じる可能性があります。MS-57 は高速応答を持つ特殊なサーモパイル素子を検出器に使用している事から、1 秒未満の急速な日射変動を正確に捉えることが出来ます。

また、全天候に適應する MS-57 は、200~4000nm の波長範囲の日射に感度を持ち、-40°C~+80°C の厳しい温度範囲の条件下で動作することが可能です。

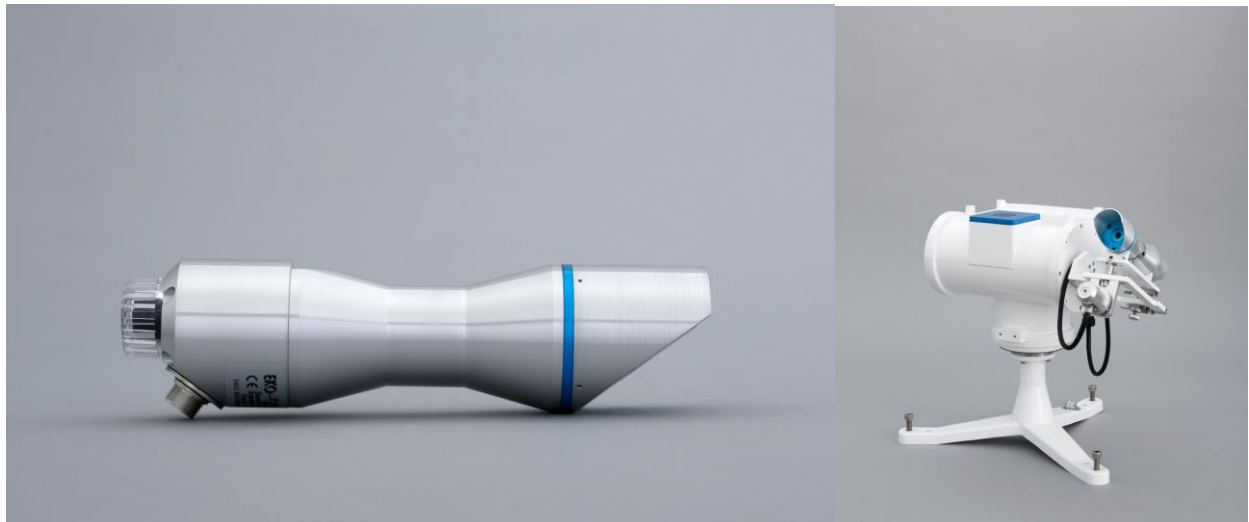


図 1. 直達日射計 MS-57

より高速な測定

直達日射計 MS-57 は、適切なデータ収集システムと組み合わせることにより、従来よりも高速にサンプリングする事が可能です。より速いサンプリングレートを選択する事により、変動する大気条件におけるピークの日射強度を、より正確に捉えることが可能です。晴天日では、日射強度は一定の様に見えますが、エアロゾルの影響で常に数 W/m^2 変動しています。1 秒未満の大気変動を検出するには、データ収集システムのサンプリングレートとセンサの応答時間を一致させる事が重要であり、経験則としてサンプリング時間はセンサの応答時間 ($t=63\%$) よりも短くする必要があります。

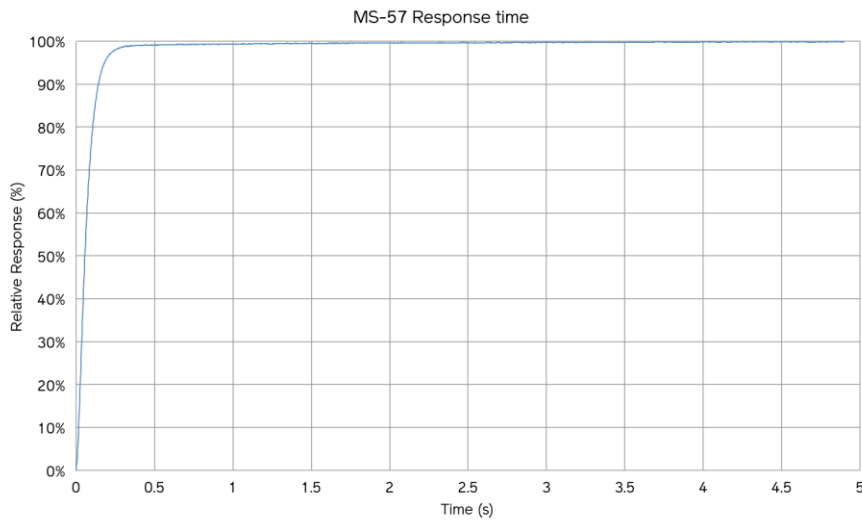
「より高速な測定」を実現するためには、データの高速サンプリングが必要です。1 秒以下の高速センサと従来の応答が遅いセンサを比較する場合、データ収集システムは、測定系内の最も速いセンサと一致させる必要がありますが、時定数の異なるセンサの比較では、サンプリング条件で、大きな不一致や異常が発生してしまいます。一般的に、データ収集サンプリング時間を 1 秒に設定すると、高速なセンサは不安定であるという印象を与えますが、逆に、応答が遅いセンサは実際の日射の不規則なパターンを検出出来ず、平滑化してしまうこととなります。

試験結果

直達日射計 MS-57 は、屋内外で様々な試験が行われ、各特性値は複数のセンサによって測定された典型的な値に基づいています。

応答時間

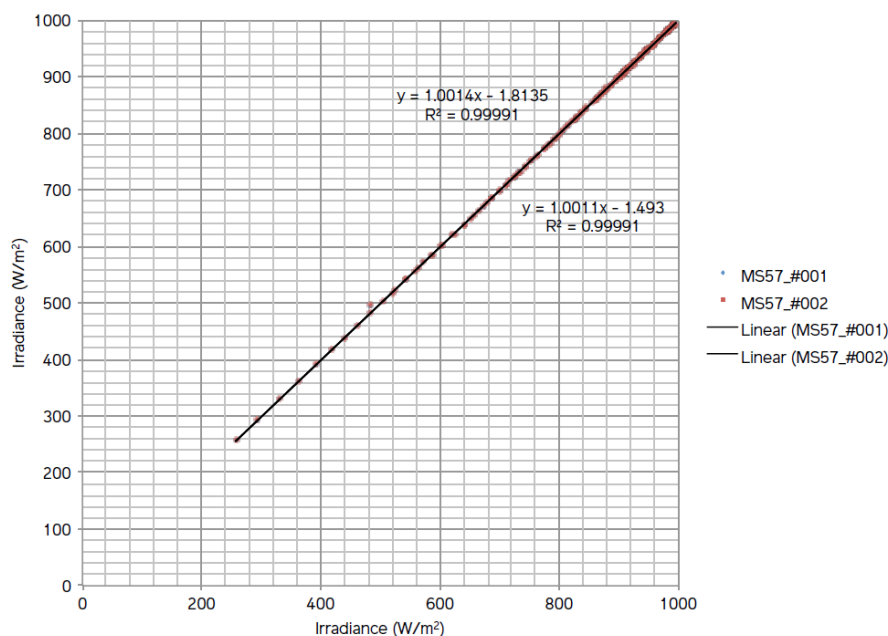
MS-57 はアナログ出力のサーモパイルを備えており、その応答時間は非常に高速 (<0.5 秒/ 99%) です。急激な大気変化と完全に同期した計測に有利であり、より高い周波数でのデータサンプリングで、1 分以上の平均値に対する測定不確かさを最小に抑えることができます。



非直線性

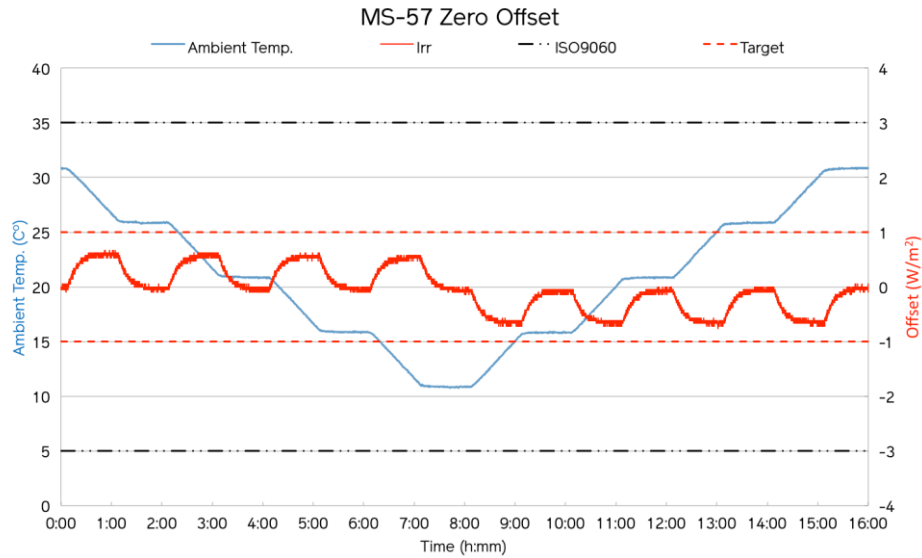
MS-57 の非直線性の更なる改善に先行して、屋内外での検出器の非直線性を測定する信頼性の高い試験方法が開発されました。その結果を絶対放射計 PMO-6 と屋外で比較検証し、日射強度 100 ~ 1000W/m² の範囲で 0.1% の非直線性の結果を得ました。

直達日射計 MS-57 vs 絶対放射計 PMO-6



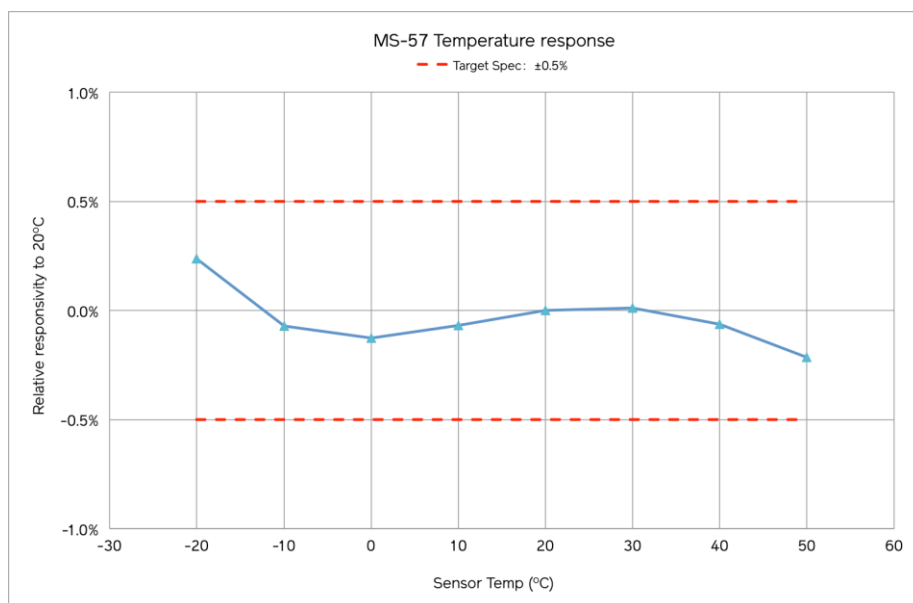
ゼロオフセット

ゼロオフセットは、光学系と検出器間の温度差の結果であり、これらは様々な条件での放射量および対流要素(日射/赤外収支/温度)の変動に影響を受けます。検出器とその周囲が熱的に隔絶されていると、ゼロオフセットは無視出来る程度に小さくなる為、様々な温度条件下で安定した出力を得る事が出来る事となります。



温度特性

MS-57 は内部に組み込まれたアナログの温度補償回路により、広い温度範囲における温度特性が優れている為、データ補正を必要としません。社内の検査設備によって個々の検出器の温度特性が測定され、 $-20^{\circ}\text{C} \sim +50^{\circ}\text{C}$ での厳しい温度範囲での仕様に適合するように調整されています。



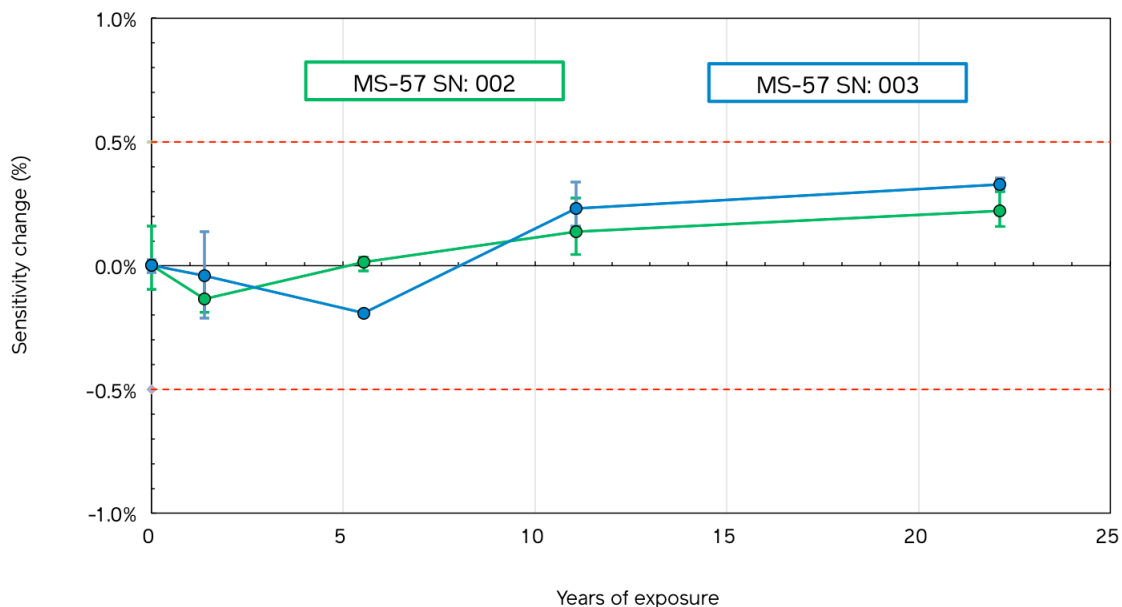
長期安定性

MS-57 は長期間のフィールド測定における安定性をシミュレーションし、外部試験機関にて、UV 加速劣化試験 (JIS B7751「耐光性試験機及び耐候性試験機」)、およびサーマルサイクル試験を実施して検証しています。その結果、センサの劣化は測定方法の不確かさを考慮しても、0.5%未満であることが示されました。

MS-57 の感度の長期安定性は、5 年で 0.5%未満であり、市販されている全ての直達日射計と比較して、長期安定性が優れています。それにより、市販の他のモデルの推奨される再校正期間が通常 2 年であるのに対し、MS-57 は 5 年に延長しております。

MS-57 は気密封止された構造と高品質のセンサ部により、標準保証期間は 5 年であり、費用対効果に優れた最新の直達日射計と言えます。

MS-57 accelerated UV exposure test
Annual amount UV radiation (300 - 400nm) in Tokyo



測定不確かさ

直達日射計の測定性能は、世界放射基準(WRR: World Radiometric Reference)に対し最も小さい測定不確かさを持つ絶対放射計と比較して決定出来ます。実際、規則的な比較測定によって直達日射計が適切に校正されている場合、センサは絶対放射計に対する直達日射強度(DNI:Direct Normal Irradiance)の測定不確かさ $\pm 1\%$ を達成出来ます。

MS-57 は測定不確かさが小さく、絶対放射計に近い測定結果を得ることが出来ます。

表 1 に日射測定に影響を及ぼす各特性を含めた直達日射計の不確かさを示します。これら特性による個々の誤差は小さく、測定時に同時に影響する事は稀です。しかしながら、個々の測定条件を分離して、誤差を決定することはほぼ不可能であり、合成された測定不確かさを計算することは非常に困難となります。しかし ISO9060 に準拠する 1st クラス直達日射計の各仕様値から検討すれば、測定不確かさを評価することは可能となります。この分析のために、測定および校正の不確かさと条件を考慮して、各仕様に関して、いくつかの仮定をしました。ISO 9060 に準拠する直達日射計の仕様は、一般的な市販モデルの仕様に基づいており、表に示す通り、MS-57 の仕様は、ISO 9060 で定義されている要求仕様よりも全般的に優れています。

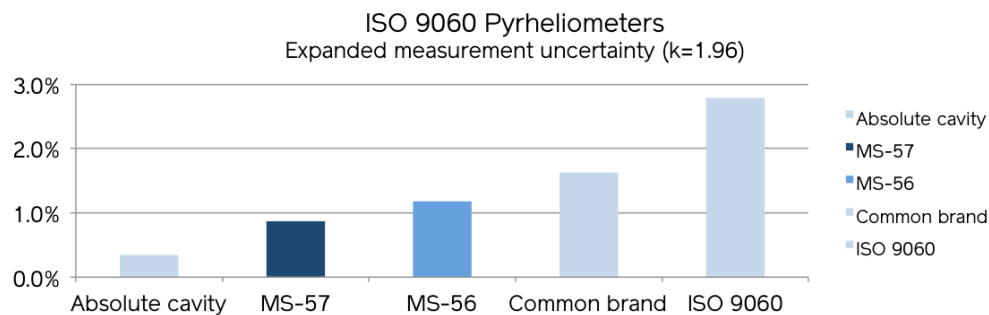


表 1. 1st クラス直達日射計の拡張測定不確かさ

	絶対放射計	MS-57	MS-56	一般的な直達日射計	ISO 9060
校正精度* (%)	0.3	0.7	0.7	1.0	1.0
ゼロオフセット (W/m ²)	0.0	1.0	1.0	1.0	3.0
長期安定性 (%)	0.1	0.2	0.5	0.5	1.0
非直線性 (%)	0.1	0.2	0.5	0.2	0.5
分光特性** (%)	0.0	0.2	0.2	0.2	0.2
温度特性*** (%)	0.0	0.5	0.5	1.0	2.0
角度特性(%)	0.1	0.2	0.2	0.2	0.5
拡張測定不確かさ (k=1.96)	0.34%	0.9%	1.2%	1.6%	2.8%

上記、ISO9060 1st クラス直達日射計の拡張測定不確かさは、個々の不確かさの二乗和の平方根として計算された最悪値を見做した値です。

* 市販の一般的な校正不確かさ(英弘精機での校正の不確かさ= 0.7%, k = 1.96)

** センサのスペクトル選択性の影響

*** 校正基準温度 20°C (-20°C ~ +50°C)

(応答時間は考慮されていない)

直達日射計の校正方法

英弘精機製の MS-57 は、ゼロオフセット、雰囲気温度と角度特性の影響を受けにくいいため、全て屋外で校正されます。英弘精機の校正機関は ISO17025 の認定を受けて、ISO9059 に基づき直達日射計の校正を実施しています。

英弘精機の校正機関は、校正と試験に関連する ISO/IEC17025 の要求に従い、PJLA (Ref: #74158) に認定を受けて全天日射計と直達日射計の校正を実施しております (ISO/IEC17025 校正はオプション設定)。英弘精機は全天日射計と直達日射計を社内で製造し、且つ校正サービスを提供出来る唯一の業者です。英弘精機は認定された校正方法に基づき、国際規格 ISO/IEC17025/9847 (屋内方式) と ISO9059 (屋外方式) に準拠した最高品質の日射計の校正を提供しております。校正値の移し込みの不確かさとして表される校正の不確かさは、0.63% です。

ISO/IEC17025 は、管理および技術的要件を規定する世界的に受け入れられた試験所認定です。

英弘精機が持つ校正機関で校正を実施することにより、下記が可能となります。

- 適用された校正方法と精度を明確に識別可能
- 定義された工業規格により世界放射基準 (WRR) にトレーサブル
 - 直達日射計を用いた全天日射計の ISO9846 校正
 - 基準全天日射計との比較による全天日射計の ISO9847 校正
 - 基準直達日射計との比較による直達日射計の ISO9059 校正 - 毎年、第三者認証機関により要件に厳密に準拠していることを審査され、一貫性のある手順により、信頼性のある校正試験結果を得ている

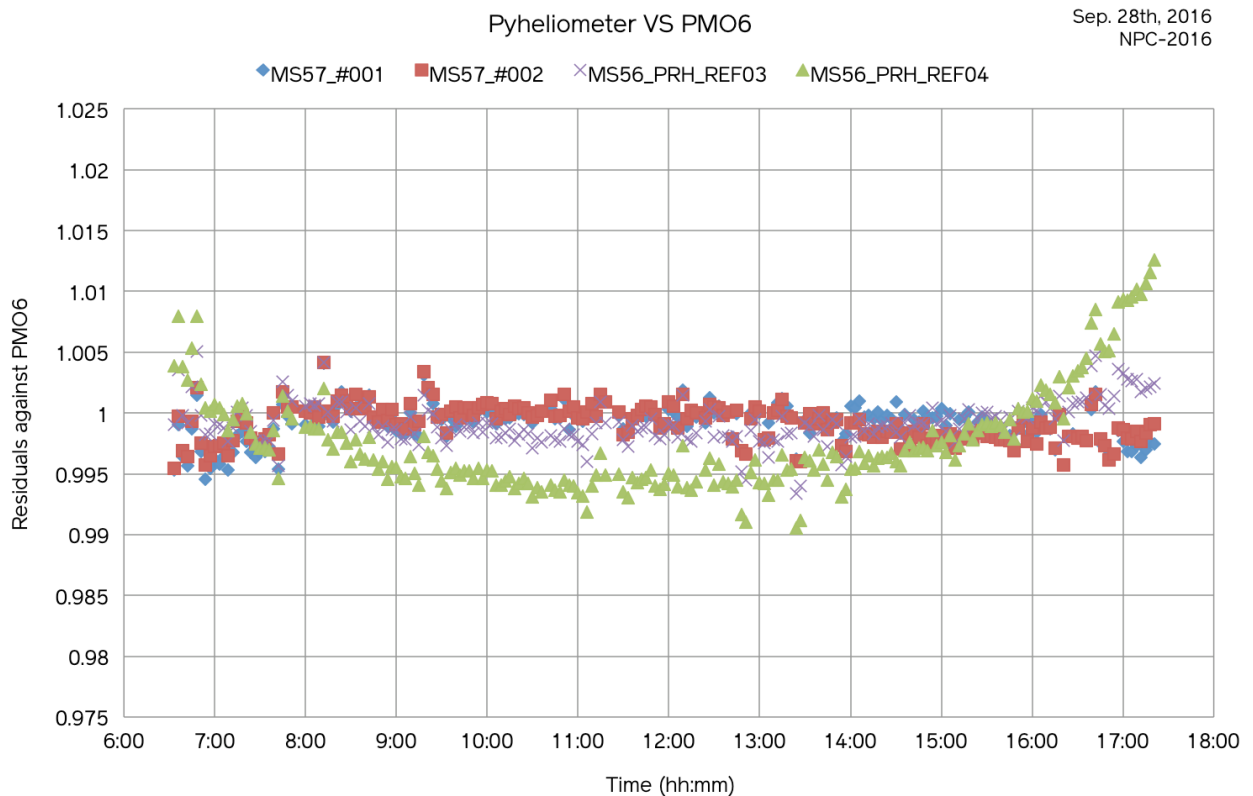
英弘精機の顧客は、最高レベルの信頼を得ることが出来る ISO/IEC17025 校正されたセンサをオプションで選択することが出来ます。EKO の認定された校正機関は、定期的に再審査され、技術的および管理的基準を維持しています。

優れたパフォーマンス

US NREL(National Renewable Energy Laboratory)が 2016 年に主催した直達日射計比較測定会(*NPC: NREL Pyeheliometer Comparison)の期間中に、MS-57 は英弘精機の基準器である絶対放射計 PMO-6、および各参加者がエントリーした基準放射計に対して広範に試験されました。

* NPC: NREL が維持管理している直達日射基準である絶対放射計群と比較校正をする年 1 回のイベント

下のグラフでは、英弘精機の基準器である絶対放射計 PMO-6 と各直達日射計の相対比をプロットしたもので、MS-57 は PMO-6 との優れた一致を示しています。NPC の報告書に記載されている MS-57 の測定不確かさ(%U95)は、MS-56 の値(0.54~0.65)と比較して、それぞれ 0.41~0.43 で改善した結果を示しました。



MS-56 と MS-57 の特性比較

	MS-56	MS-57
ISO 9060 等級	1 st クラス	1 st クラス
検出器	サーモパイル	サーモパイル
測定波長範囲	200~4000 nm	200~4000 nm
応答時間(95%)	< 1 s	< 0.2 s
ゼロオフセット A/放射収支量 200W/m ² 時	0 W/m ²	0 W/m ²
ゼロオフセット B/周囲温度 5K/hr 変化時	< +/- 1 W/m ²	< +/- 1 W/m ²
長期安定性 (変化率/年)	< 0.5 %	< 0.5 % / 5 年
非直線性 (100~1000W/m ²)	< 0.5 %	< 0.2 %
入射角特性	N/A	N/A
分光選択性 / (0.35~1.5μm)	< 1 %	< 1 %
温度特性 (-20°C~+50°C)	< 0.5 %	< 0.5 %
傾斜角特性 (0-90° 1000W/m ²)	< +/- 0.2 %	< +/- 0.2 %
日射計測範囲 (W/m ²)	0 to 2000	0 to 4000
感度定数 (μV/W/m ²)	6 - 10	7 - 8
内部抵抗	< 5 kΩ	< 15 kΩ
使用温度範囲	-40~+80°C	-40~+80°C
入射窓ヒータ / 消費電力 12VDC	あり / 0.3W	あり / 0.3W
内部温度センサ	YSI 44031	YSI 44031
校正認証 / 校正方法	ISO17025/9059	ISO 17025/9059

MS-57 の市場価値

測定精度に関しては、新しい直達日射計 MS-57 が、ISO 9060 ファーストクラス直達日射計と一次基準センサ(絶対放射計)の間のギャップを埋める事が可能になります。これは、英弘精機によって開発された最新の熱隔離されたセンサ技術と専門知識の進化による賜物であります。

応答速度が速ければ、実際の変化する日射をより正確に測定出来る事になり、これは短期間の動向を検出するアプリケーションにとって最も重要です。何十年もの間、ブロードバンドの日射測定を 1 秒未満のレベルで行うのは不可能でした。検出器技術には、限定的な要素ですが、データ収集システムは基本的に高周波数サンプリングに制限がありません。今、すべての日射要素(法線面直達日射 DNI、水平面全天日射 GHI、水平面散乱日射 DHI)は、MS-57 直達日射計と MS-80 セカンダリースタンドアード全天日射計を使って、1 秒未満のスケールで測定が可能となりました。

直達日射計は、一般的に精度が重要な、最も要求の厳しい研究プロジェクトで使用されます。MS-57 は、その範囲内で、最も小さい測定不確かさを示します。

MS-57 は、ユーザが後処理での温度補正を行う代わりに、アナログ温度補償回路が温度補正をしてくれます。ユーザは MS-57 の内部温度をモニター出来ますが、データの後処理での温度補正は必要はありません。MS-57 は、一貫した方法で製造され、厳格な品質検査と性能評価が行われています。各センサについて温度特性が測定され、製品に添付の測定レポートで確認する事が出来ます。

MS-57 は、直達日射計の規格で定義された全開口角 5°と傾斜角 1°を持ち、英弘精機製の太陽追尾装置 STR-21(G)または STR-22(G)と組み合わせることで高い性能を示します。内蔵された低電力の窓用ヒータは、窓の外側に生じる結露や着霜を防ぎ、過酷な環境での使用に適しています。

MS-57 は、スイスのダボスにある PMOD/WRC(Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos / World Radiation Center)で管理されている WRR(World Radiometric Reference)まで、完全にトレーサブルな英弘精機のリファレンスに対して、英弘精機内で校正、試験しております。