

MS-80 二次基準全天日射計 “産業分野での高品質な測定のために”

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

英弘精機の MS-80 は、従来の伝統的な熱式センサの常識を超えた、ニューコンセプトのセンサを採用した ISO9060 二次基準の全天日射計です。最新サーモパイル技術と石英材による光拡散技術を使用した斬新的なデザインにより、類をみないゼロオフセットの低減と高速応答性を実現しました。過酷な環境に設置されても、あらゆる大気条件下で測定不確かさを最小化し、高品質の日射データの計測を実現可能にしました。



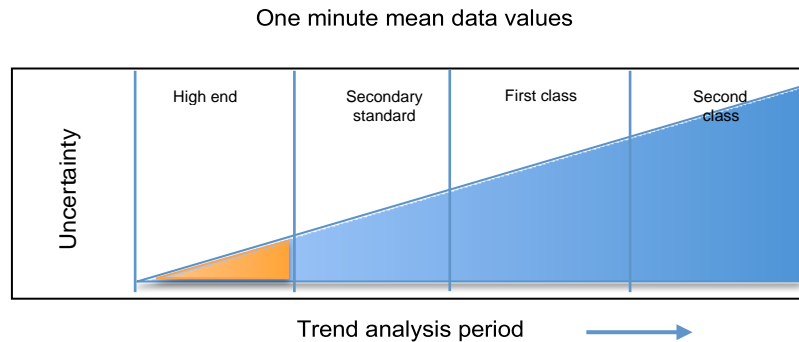
産業分野での高品質な計測のために

太陽光発電所や気象ステーションでの信頼性の高い日射強度を計測するために、ISO9060 二次基準全天日射計は最も一般的に利用されています。この分野では、ハイエンドな全天日射計のニーズが出てきています。全天日射計には幾つかの分類があり、あるものは、単に ISO9060 の要求事項を遵守し、PV 監視アプリケーションのために許容可能なように定義されていますが、最高性能の二次基準全天日射計が使用されることは、従来はまれで、高精度が必要な研究用途でのみ使用されてきました。その理由は、高価格であることが大きな要因の一つでした。

英弘精機は、ハイエンドの仕様を実現しつつ、かつ広範囲に流通できる価格の産業用途の二次基準全天日射計を開発しました。これにより、ハイエンドの全天日射計が、PV モニタリングと気象センサネットワークのアプリケーションのために、より普及することが期待されます。この英弘精機の取り組みにより、最小化された測定不確かさが実現されたニューコンセプト全天日射計が誕生しました。保証期間と推奨再校正期間は 5 年間に延長され、コストパフォーマンスが大きく向上しました。

測定不確かさが低い事による優位性

短期または長期の測定期間において測定不確かさが低い事は、何を意味するのでしょうか？短時間の日射データの傾向をつかむには、高品質の全天日射計により検出されたデータが必要になります。応答速度の遅いセンサを使用すると、測定間隔が長くなり、測定不確かさが大きくなる為、データの信頼性が低下します。データの測定点数が多くなることにより、信頼性も高まりますが、それに伴い時間も大きくかかります。このため、高速応答センサによる測定不確かさの小さな計測と、それに適合したデータ収集システムが必要とされます。



応答時間の遅い全天日射計では、数週間や数か月などの期間の計測であれば、測定不確かさの点では優れた計測をすることができます。数か月から数年に及ぶ、さらに長期間の計測になると、全天日射計の特性としての長期安定性が重要になります。PV モニタリングのアプリケーションでは、発電システムを維持、保証するために短期間の変動を検出することが有益になります。例えば、発電システムの性能が 2%変化した場合、2%以下の測定不確かさの計測が必要になります。全天日射計やモニターセルの測定不確かさが優れている場合、発電システム性能のロスを検出するのに、より多くの時間とデータ量が必要でしょう。

ユニークな全天日射計構造

典型的な二次基準全天日射計の場合は、センサとの熱バランスを保ち、且つゼロオフセットを低減するために、2つのドームを使用します。ハイエンドの全天日射計は高度な研究での特殊なアプリケーションで使用され、ドームのガラス材料としては高価なクォーツやサファイヤなどが使用されます。

一方、コンパクトな MS-80 では1つのドームしか使用しませんが、優れた光学設計によりゼロオフセットを軽減しています。それは、MS-80 が他の全天日射計と比べ、非常に低コストで高性能であることを意味しています。2つ目のドームはなしで、優れた角度特性と、285nm から 3000nm の範囲でフラットな分光特性を保てるよう設計されています。さらに、拡散板により遮蔽されたサーモパイルセンサは、熱バランスを保つために、ボディ内部の深い位置に密閉されています。長期間の検出器の応答性は改善され、紫外線や、湿度、圧力変化などの影響を受けません。このため、乾燥剤カートリッジは使われておらず、定期的なチェックや交換の必要なく、内蔵の乾燥剤で維持可能です。

卓越した性能

英弘精機では、最高水準の試験設備を保有しています。屋内外の試験設備を使用し、MS-80 のセンサ性能を定量的に検証しています。ISO9060 に定義された仕様項目は、屋内試験で検証され、屋外では、他の二次基準全天日射計との比較検証や、測定性能や測定不確かさの評価が行われました。加えて、外部試験機関や研究機関で長期安定性が検証されました。それらの試験結果は、MS-80 のセンサが、これまでの市場にある二次基準全天日射計とはまったく違うものであることを証明しています。これまでの全天日射計は、センサ構造や製造プロセスに起因して通常このような試験結果は一貫性が乏しかったですが、MS-80 の結果は一貫しています。

仕様:

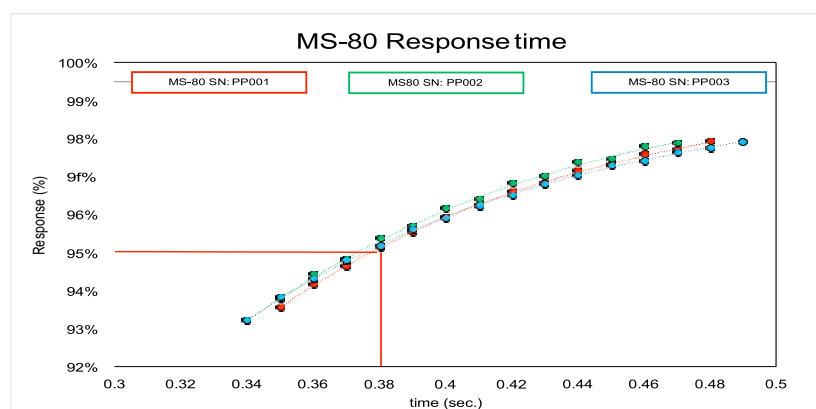
項目	MS-80	ISO 9060 二次基準
応答時間 (95%)	<0.5 Sec	<15 Sec
ゼロオフセット A (200W/m ² IR)	<1 W/m ²	<7 W/m ²
ゼロオフセット B (5 K/h)	<1 W/m ²	<2 W/m ²
長期安定性 (1 年)	<0.5 % (5 years)	<0.8 %
非直線性	<0.2 %	<0.5 %
角度特性	<10 W/m ²	<10 W/m ²
分光特性 (300nm - 1.5μm)	<3 %	<3 %
温度特性 (-20 to 50°C)	<1 %	<2 % (-10 to 40°C)
傾斜角特性	<0.2 %	<0.5 %
測定波長範囲	285 to 3000 nm	300 - 3000 nm

試験結果

英弘精機のセンサは、開発期間中あるいは開発終了後も、屋内外で広範囲で試験されます。性能は、複数のセンサの計測結果から典型的な値をベースに決められます。

最速のセンサ応答性

MS-80 のアナログサーモパイルセンサは、ほんの一瞬で応答する (99%) 高速性能を持っています。高速応答センサは、早い大気放射の変化に追従するために有益です。1 分やさらに長い平均値でも、より早い周波数でサンプリングされることで、測定不確かさが最小化されます。



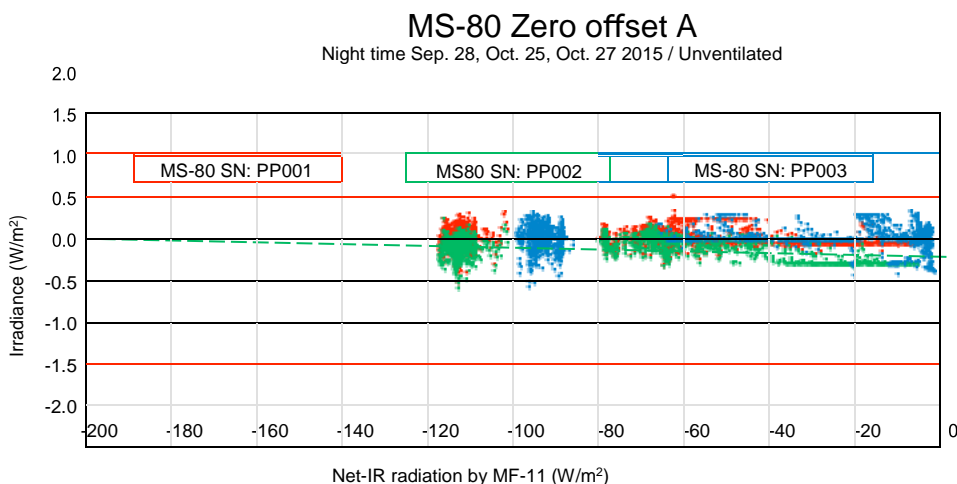
より速い計測を

英弘精機は、MS-80 に並び、直達日射計 MS-57 を発売しました。これらの日射計は、以前のモデルと比較し、更に高速でのサンプリングが可能となります。より速いサンプリングにより、大気放射の速い変動に対して、ピークの強度値を正確に捉えることができます。日射強度が 1 分平均値で安定しているような晴天日であっても、大気混濁度の影響で、数 W/m^2 レベルでの変動が見られます。そのような微小な変動を検出するためには、センサの応答時間に合ったサンプリングレートでのデータ収集システムの使用が重要です。経験則として、サンプリング時間は、センサの応答時間 ($t=63\%$) 以下であるべきです。その際に、1 分値で保存するためにデータは縮小されます。

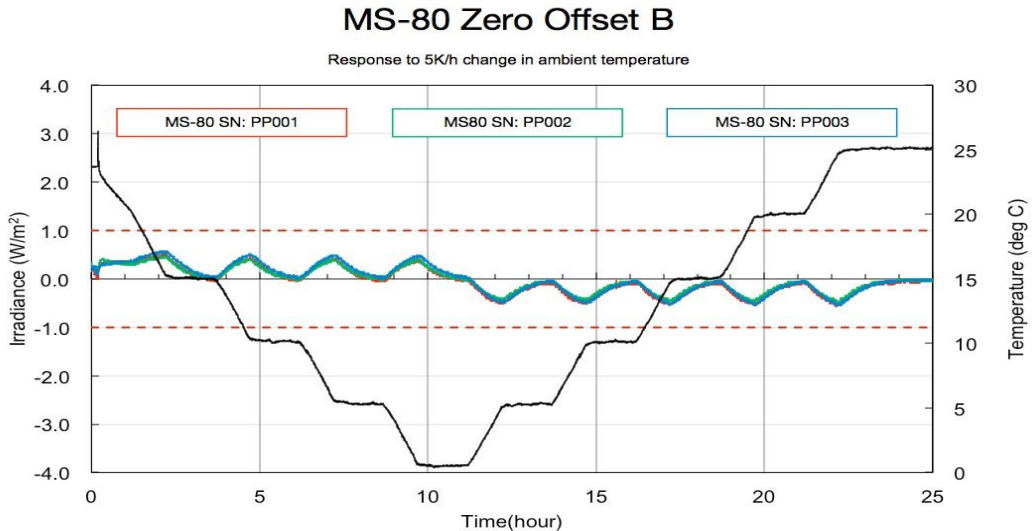
“より速い計測”のためには、より早いデータのサンプリングが必要です。従来の遅い応答センサと比較すると、システムの中で最も速いセンサに合致したデータ収集システムが必要となります。異なる時定数のセンサが互いに比較されると、同じサンプリング条件で比較されると、データの不整合や異常を引き起こします。データ収集システムが通常の 1 秒のレートを使用すると、速い応答センサは不安定な印象を与えます。一方で、遅い応答センサは実際の日射強度のようでないパターンをスムージングします。

最小のゼロオフセット

ゼロオフセットは、光学系（ドームや拡散板）と検出器の間の熱バランスに起因し、放射条件や対流の因子（放射強度/放射収支/温度など）により影響を受けます。全天日射計のゼロオフセットを最適化するために、英弘精機は、光学系と検出器の間の温度影響を除くために全天日射計の構造や形状を変えました。一般的に、小さな径のドームは、大きな 2 重構造のドームと比較して、より低い熱損失や冷却効果を生じます。拡散板と隔離された検出器の組み合わせにより、MS-80 センサは、様々な大気環境の下で、適切な熱バランスを保つことができます。ドーム冷却効果で知られるゼロオフセット A は、MS-80 では発生せず、 $-200W/m^2$ までの放射収支範囲で、 $1W/m^2$ 以内の測定不確かさを保っています。（ベンチレーション付き、もしくはなし）



ゼロオフセット B は、周囲温度変化や日射の暴露により起こる検出器の応答として定義されています。MS-80 の代表的なゼロオフセット B は$1\text{W}/\text{m}^2/5\text{k}/\text{時}$です。

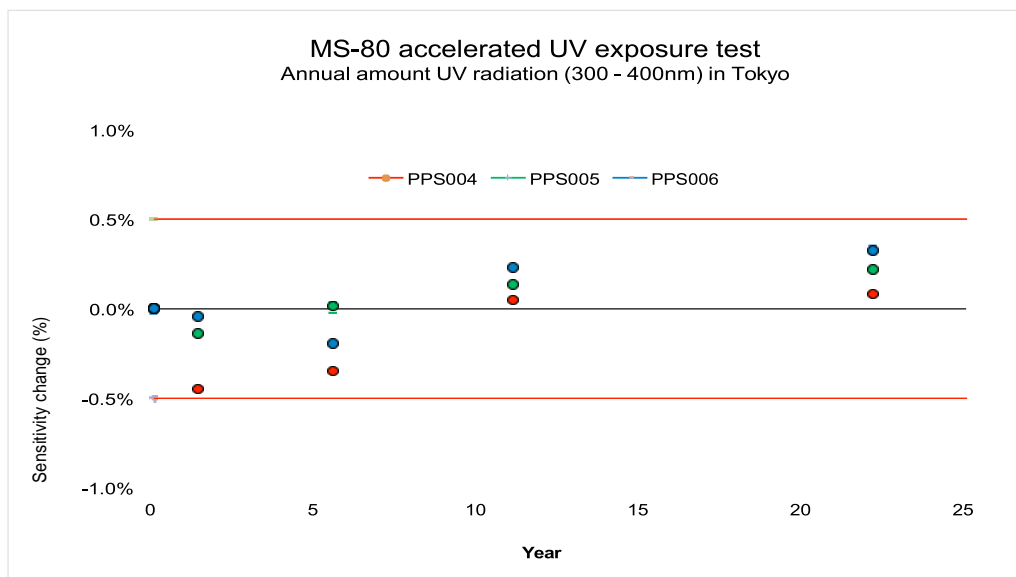


長期安定性

長期間のフィールドでの使用時のセンサ性能をシミュレーションし検証するために、第三者試験機関で紫外線安定性試験（JIS B7751 “紫外線カーボンアーク灯式の耐光性試験機及び耐候性試験機”）と熱サイクル試験が行われました。その結果、測定不確かさを考慮しても、0.5%以上の検出器の劣化は見られませんでした。

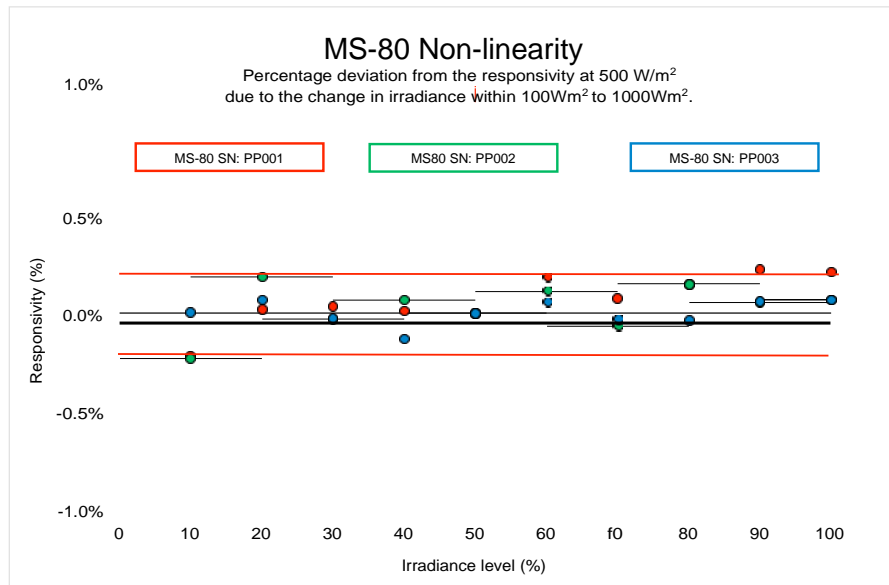
市販の他の全天日射計と比較して、MS-80 は長期安定性が優れています。そのため、推奨の再校正の期間は、従来の市販の全天日射計では 2 年間でしたが、5 年間に拡張することができました。5 年間でのセンサ感度の長期安定性は 0.5%以下です。

密封された構造と高品質なセンサ部品が使用されているため、保証期間は 5 年間です。MS-80 では乾燥剤のカートリッジはなく、乾燥剤の交換は不要です。このようなすべての特徴を踏まえて、最もコストパフォーマンスの高い全天日射計といえます。



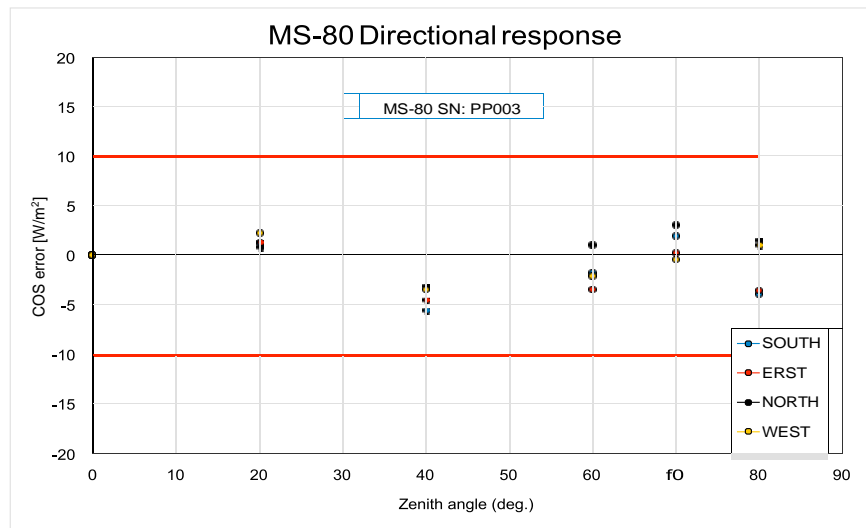
非直線性

検出器の応答性は、100~1000W/m² の範囲で、測定不確かさとして<0.2%の直線性を持っています。性能を評価するために、英弘精機は屋内外での検証を行う正確な試験方法を開発しました。



角度特性

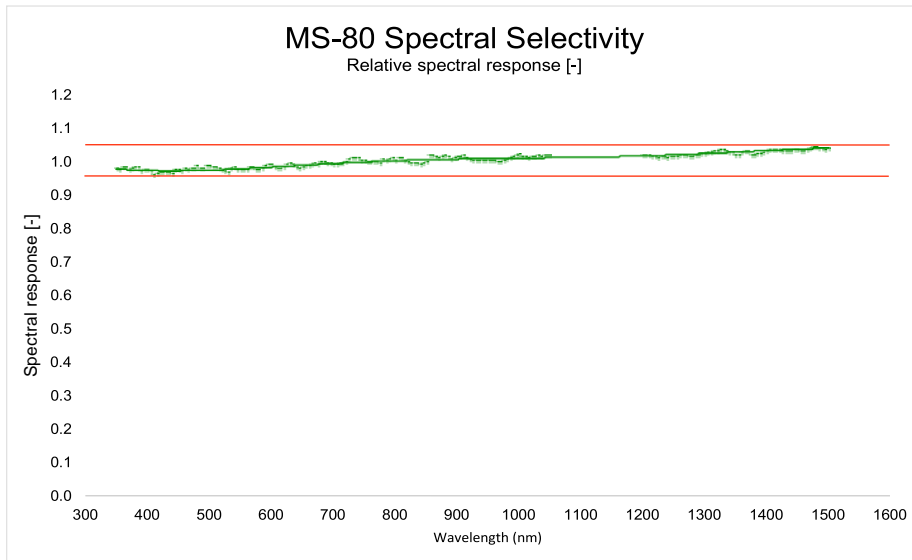
単一のガラスドームと拡散板の構造は、他の二次基準の全天日射計と比べユニークな側面で、それにより、安定した角度特性を得られます。下図は角度特性の理論値とのばらつきをプロットしたデータです。



各センサの角度特性は、80° まで 4 つの方位でテストされています。試験結果レポートはすべての MS-80 に付属して出荷されます。

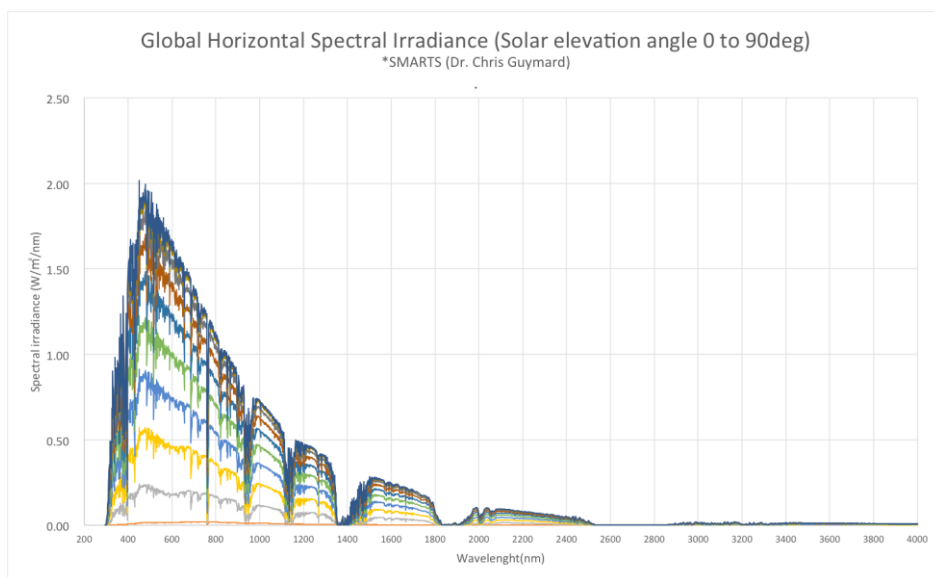
分光特性

MS-80 はサーモパイルセンサと石英の拡散板を持ち、太陽光の全波長範囲に応答します。分光特性は ISO 9060 に規定され、350nm から 1500nm の範囲の分光吸収と分光透過による分光放射感度の偏差と定義づけられています。MS-80 の相対的な分光特性は下図の通りです。

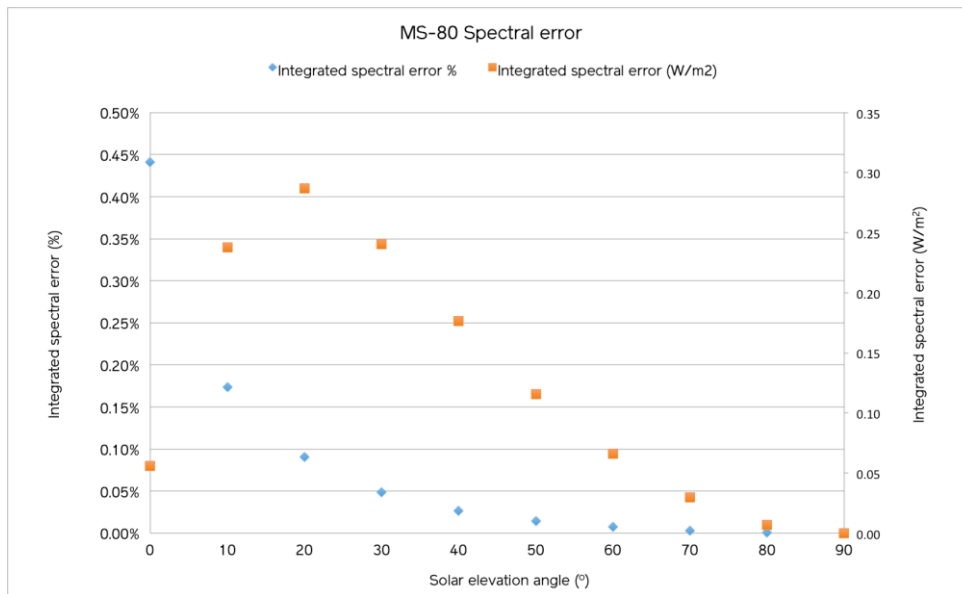


MS-80 分光特性

分光感度特性から、太陽光の波長範囲（295nm～4000nm）の分光誤差が計算できます。太陽光のスペクトルは一様ではなく、大気の経路や大気成分の濃度により変化します。分光エラーの積分値は、SMART モデル（Dr. Christian Guymardにより開発）を用いて、エアマス（AM1 から AM38）の関数として計算され、相対的および絶対的な分光誤差は、AM1.5 で校正された太陽高度での関数として計算されます。



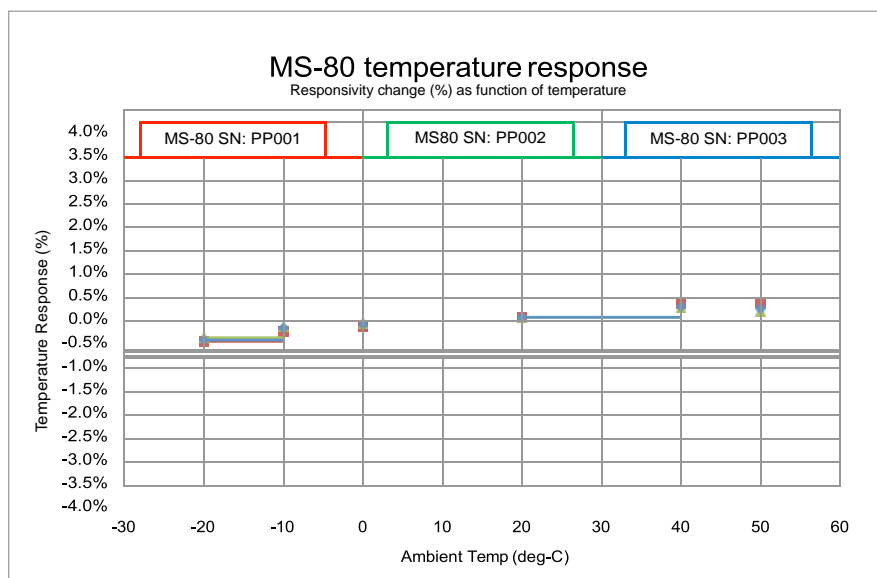
SMARTS spectra (AM1 – AM38)



MS-80 Spectral error

低い温度特性

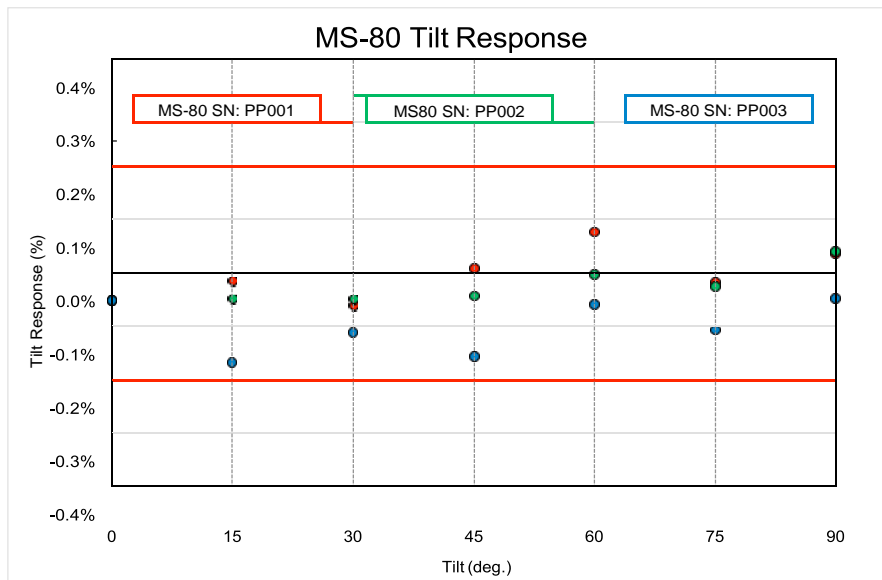
MS-80 は、内蔵された温度補償回路により、センサは極めて低い温度特性で、広い温度範囲において、日射強度に対してデータ補正の必要なく、高い直線性を持っています。



各センサの温度特性は-20°Cから50°Cの温度範囲でテストされ、試験結果レポートはすべてのMS-80に付属して出荷されます。

傾斜角特性

傾斜角特性は、1000W/m²照射下で、0° から 90° まで傾斜角を変化させ水平での応答との誤差を示します。



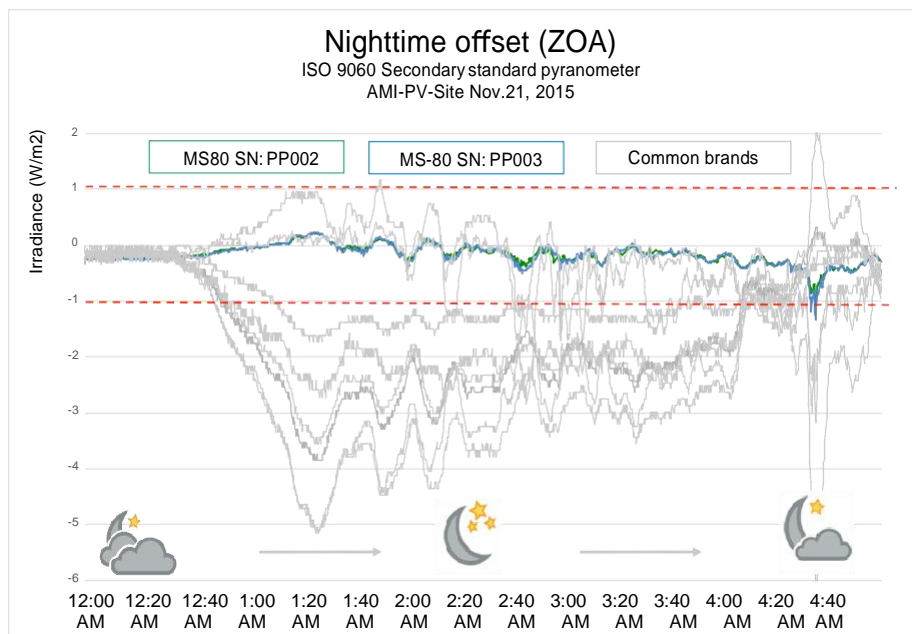
屋外性能

屋外で、市販されている他の二次基準全天日射計と並べて、複数の MS-80 の全天日射強度の計測が行われました。

下図は、日中および夜間での計測結果です。すべての MS-80 が、様々な大気環境下で昼夜に渡って一致した結果を示しています。

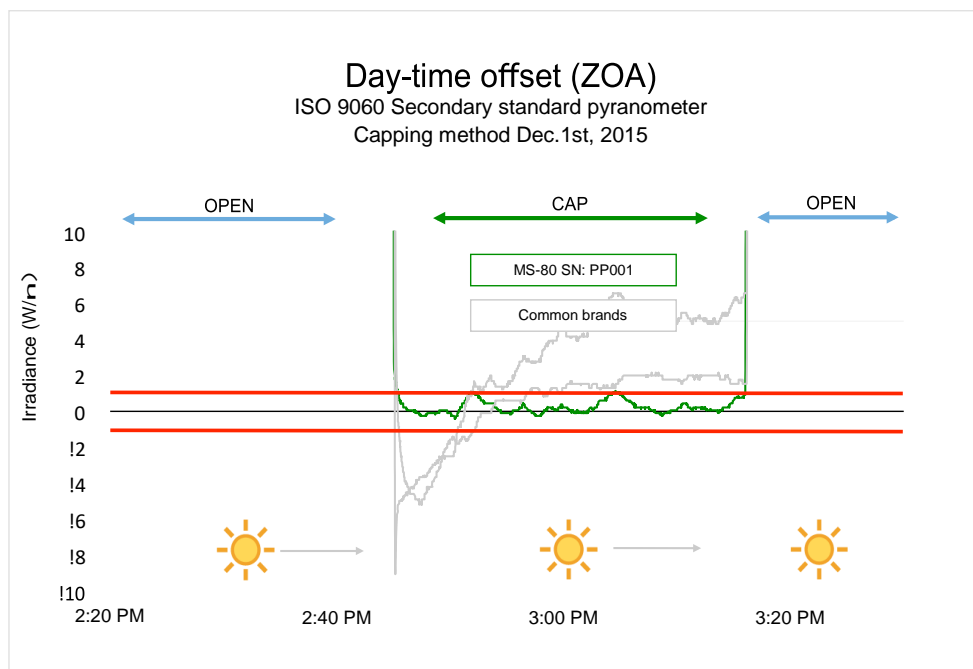
夜間ゼロオフセット

通常、全天日射計は、夜間にゼロオフセット A として知られるマイナスの日射強度を出力する傾向があります。それは、従来のサーモパイル式の全天日射計で典型的にみられる誤差要因の一つです。夜間のゼロオフセットは、センサの熱バランスとオフセットへの感受性に対する明確な性能を示すインジケータです。曇天時には全天日射計のゼロオフセットは 0 ですが、晴天時は、放射収支量 (W/m^2) に比例して生じます。MS-80 は夜間でも、極めて低いゼロオフセットの値を示しています。



日中ゼロオフセット

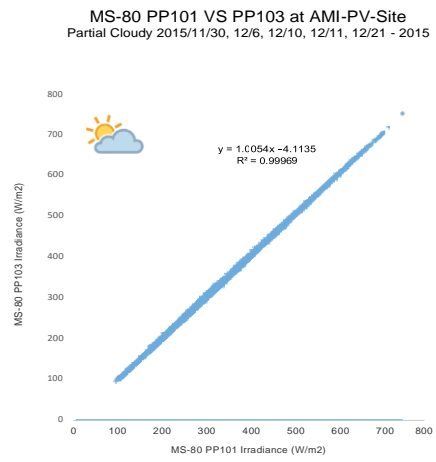
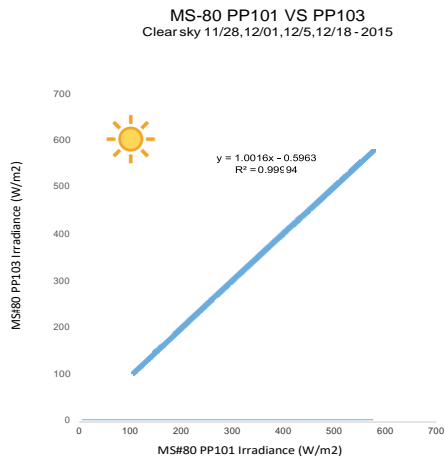
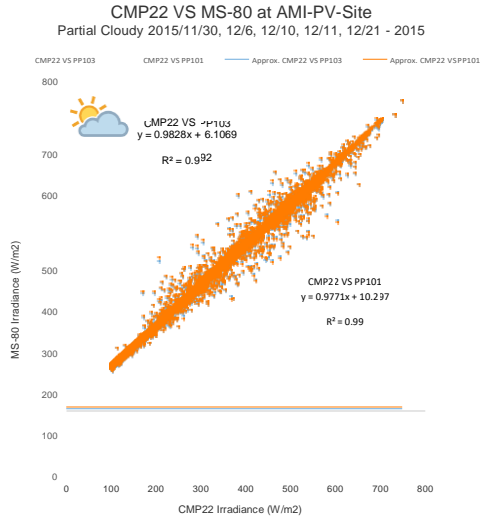
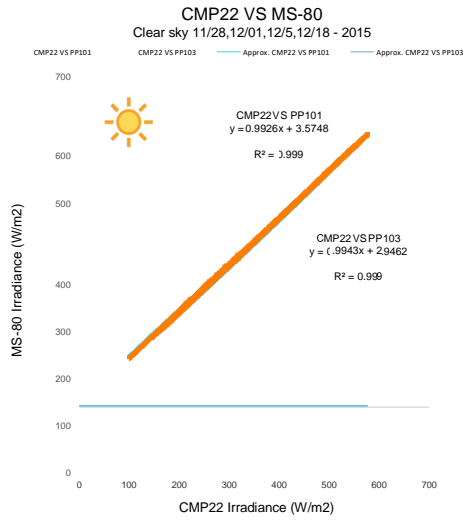
全天日射計のゼロオフセットは、通常、日射強度と合わせて得られるため、日中は見分けにくい特性です。晴天時には、通常は日射強度を低く出してしまう。“キャッピング方法”と呼ばれる方法で、隠れたゼロオフセット A を明らかにすることが可能です。下図に、MS-80 では日中でのゼロオフセットも非常に小さいことを示します。一般的に、ゼロオフセットは、気温が上昇し太陽がセンサを温めることによって大きくなります。大きな温度差が、放射収支量の上昇を引き起こします。



MS-80 は、低いゼロオフセットの特性のため、散乱日射計測にも非常に適しています。晴天や曇天下では、全天日射強度に対してわずかな量で、全天日射計のゼロオフセットが測定不確かさに大きく影響を及ぼします。散乱日射計測のためには、太陽追尾装置とシャドーボールシステムが必要となります。

日射強度計測

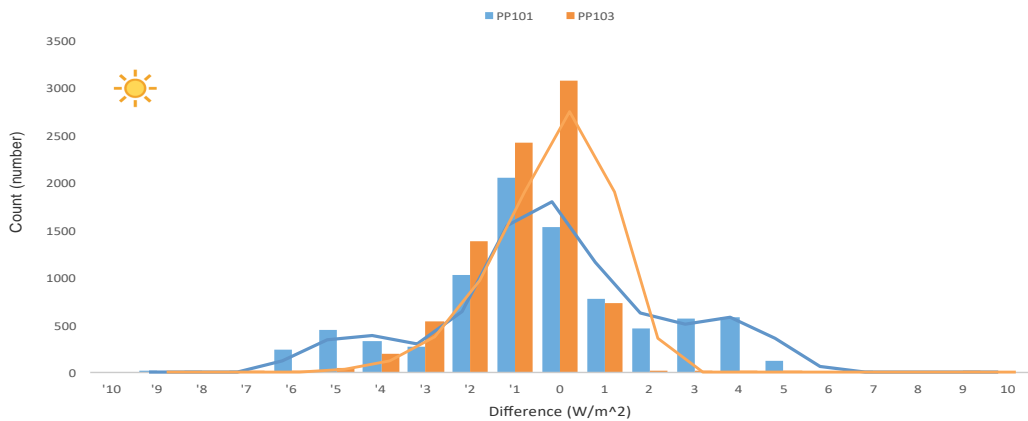
日射強度データは、10 秒ごとに計測され、様々な天候の下で、特に晴天下と部分的に曇りの状況で比較されています。MS-80 は、ハイエンドの全天日射計に対して、両方の天候下で優れた相関性を示しています。部分的に曇りの状況では、速いセンサの応答性に起因して、違いが見られますが、2 台の MS-80 は高い相関性を示しています。



MS-80 VS CMP22

Clear sky 11/28,12/01,12/5,12/18 - 2015

PP101 STDEV = 2.63 / PP103 STDEV = 1.96



拡張測定不確かさ

表 1 に日射量測定に影響を及ぼす MS-80 の仕様をリストアップしました。幸いにも、これらのすべては小さな値で、同時に測定に影響を及ぼすことはまれです。しかし、これら一つ一つの誤差を特定するために個別に隔離して測定することは、ほとんど不可能です。このことが、測定不確かさを求めることの難しさと複雑さを示しています。そこで、これらの全天日射計の仕様値を使うことにより、ISO9060 二次基準全天日射計の測定不確かさを審査することができます。この分析のために、測定と校正の不確かさと条件を考慮して、個々の仕様値の関する仮設が建てられました。ISO9060 各クラスの仕様値は、市場での市販モデルの仕様に基づいています。一般的に、センサの仕様は、ISO9060 で定義された最低値と比べやや高い値になっています。

表 1: 二次基準全天日射計の拡張不確かさ

	MS-80	ハイント ^o	一般 モデル	ISO 9060
校正精度* (%)	0.7	1.2	1.2	1.2
ゼロオフセット A (W/m ²)	1.0	3.0	7.0	7.0
ゼロオフセット B (W/m ²)	1.0	1.0	2.0	2.0
長期安定性 (%)	0.5	0.5	0.5	0.8
非直線性 (%)	0.2	0.2	0.2	0.5
角度特性 (W/m ²)	10.0	5.0	10.0	10.0
分光特性** (%)	0.4	0.4	0.4	0.7
温度特性*** (%)	0.5	0.5	1.0	1.0
傾斜角特性 (%)	0.2	0.2	0.2	0.5
拡張不確かさ (k=1.96)	1.6%	1.6%	2.3%	2.5%

*通常に定められた校正精度 (英弘精機 校正精度 = 0.7% K=1.96)

**センサの分光特性の効果

***校正基準温度 20°C (-20°C to 50°C)

ISO9060 全天日射計で関連付けられる拡張不確かさは、個別の不確かさの二乗和の平方根として計算され、最悪のケースとして考慮されています。

校正

MS-80 全天日射計は、屋内で光源（ISO 9847 に基づく方法）としてソーラシミュレータ（1000 W/m² AM1.5 class AAA）を用いて、校正された基準の MS-80 に対して校正されます。全天日射計は水平なテーブルの上に置かれ、上記で述べたいくつかの誤差要因を除いて、垂直に照射されるようセットされます。基準全天日射計と校正される全天日射計の位置を入れ替えることにより、両方の全天日射計の出力値が記録され、基準全天日射計の値と比較することにより、校正する全天日射計の感度値が求められます。計測条件（周囲温度や照射条件など）は一定に保たれ、そのため、全天日射計の不確かさの値は、基準全天日射計の不確かさ（Ur）、温度の不確かさ（Ut）、再現性（Ur）と正規分布（d）の積の総和により決定されます。

1) 日射計準器の不確かさ (Ur)	0,31%	全天日射計の感度値に関連した拡張不確かさは、レポートされる不確かさ： $1.96 \times \sqrt{((Ur^2 + Ut^2 + Ur^2 + d^2))}$ の二乗和の平方根として計算される。
2) 周囲温度の不確かさ (Ut)	0,14%	
3) 再現性 (Ur)	0,04%	
4) ばらつき (d)	0,03%	
不確かさの合計 (Uc)	0,34%	
拡張不確かさ (U)	0,69%	

MS-80 二次基準全天日射計の準器は、ISO 9846 に準拠した sun-and-shade 方法で、一時準器の PM0-6 と比較され校正されています。一時準器は世界放射基準（WRR）に直接トレーサブルであり、5年ごとに開催される国際直達日射計比較（IPC）で基準放射計群と校正され維持されています。英弘精機は、米国再生可能エネルギー研究所（NREL）で開催される直達日射計比較（NPC）でも毎年準器をチェックしています。

英弘精機の校正ラボは、PJLA (Ref:#74158) で認証を受け、ISO/IEC 17025 の要件を満たして全天日射計、直達日射計の校正を行っています。

英弘精機は製造メーカーとして、全天日射計と直達日射計の校正サービスを社内で行っています。その校正方法に基づき、ISO/IEC 17025/9847（屋内方法）と 9059（屋外方法）により定義された国際基準に準拠し、最高品質の日射計の校正を提供しています。

ISO/IEC 17025 は、管理と技術要件を規定した試験所認証のためのグローバルな基準です。

英弘精機のラボで実施された校正により、お客様に次のことを提供します：

- ・ 校正方法と精度の明確化
- ・ 以下の工業基準として定義された世界放射基準（WRR）に対するトレーサビリティ：
 - ISO9846 Calibration of a pyranometer using a pyrhelimeter
 - ISO9847 Calibration of field pyranometer by comparison to a reference pyranometer
 - ISO9059 Calibration of field pyrhemeters by comparison to a reference pyrhelimeter
- 要件への適合を毎年の認証機関による監査受け、一貫した方法で再現性かつ信頼性のある校正

お客様は ISO/IEC 17025 認証の校正の日射計を購入されることにより、最高水準の信頼を得ることができるでしょう。英弘精機の認証ラボは、定常的に審査を受けており、技術的かつ管理面での専門性の基準を維持しています。

MS-80 の市場価値

MS-80 全天日射計は、MV-01 ヒーター付きベンチレーションユニットや各種インターフェース（4-20mA や MODBUS®）などを追加することが可能です。

MS-80A は、MS-80 に 4-20mA 変換器を内蔵した全天日射計です。非常に小さな温度依存性と、低い非直線性のために、どのような環境下でも、高性能の変換データを出力します。出力は、標準では 0-1600W/m² を 4-20mA に変換し、また、USB コントローラとソフトウェアを使用すれば、その他のレンジへの変換も可能です。これらのツールは、定期的な再校正で感度が変わる場合にも使用できます。

MS-80M は、MS-80 に MODBUS® RTU 485 変換器を内蔵した日射計です。MS-80A と同様に、どのような環境下でも高品質の変換データを出力します。MS-80M は、最大 100 台までネットワークに接続が可能で、それぞれのユニットが並列に接続されます。感度定数が変換器に設定され、センサからの mV の出力が 0-1600W/m² の日射強度に変換されます。この設定は、USB コントローラとソフトウェアを用いて自由に変更可能で、再校正の際にも使用できます。

MS-80 は、厳しい品質検査と性能評価のもとで、一貫した方法で製造されています。角度特性と温度特性の試験は、全数行われ、そのレポートがセンサといっしょに出荷されます。英弘精機は ISO/IEC 17025/9847 認証の校正証明書の発行を行うことができます。

MS-80 は、汎用的なデザインとともに突出した性能、安定性を持つために、市場において最も特徴ある全天日射計として位置づけられます。MS-80 のセンサの構造や新しい光学系デザインが他の全天日射計との違いを明確にしています。応答時間、長期安定性、ゼロオフセットなどの主な性能が向上しました。MS-80 は、英弘精機にとっての新しい世代の全天日射計であるとともに、新しい全天日射計開発の序章となります。



MS-80 とコンパクトなヒーター付きベンチレーションユニット MV-01 の組み合わせにより、ファンによる送風が効果的に温められ、ドームへの結露、霜、氷結、積雪など冬季の厳しい環境下から防ぐことが可能です。MS-80 のゼロオフセットの特性は、MV-01 と組み合わせられても変わらず、7Wの消費電力で周囲温度より 1~2°C 温度上昇をさせるだけのため、影響がありません。MV-01 は、結露、霜、積雪やほこりなどの影響のある場所での使用には特にお勧めできません。

ご質問の際は、ご遠慮なく下記の英弘精機のオフィスにお問合せください。

日本 : info@eko.co.jp / www.eko.co.jp
 Europe: info@eko.eko-eu.com / www.eko-eu.com
 USA: info@eko.eko-usa.com / www.eko-usa.com