

SPN1測定のベストプラクティス

Delta-T SPN1全天日射計を用いた太陽放射照度測定

John Wood著



SPN1 Best Practice version 3

目次

1. はじめに.....	3
2. 動作原理.....	3
3. 測定場所と設置.....	5
4. 校正チェック、ユーザーによる再校正.....	6
5. データ検証.....	13
6. 達成可能な精度.....	15
7. 誤差要因.....	18
8. 参考文献.....	19

1. はじめに

SPN1は、全天日射量および拡散日射量の水平放射照度を測定するセンサーです。SPN1には可動部品がなく、特別な極軸調整も不要で、低消費電力で動作します。そのため、遠隔地やメンテナンスが制限されている場所、さらには大規模な測定現場での運用に適しています。

測定場所の選定、運用、保守に関する一般的な考慮事項は、「気象観測機器及び観測方法ガイド」(WMO 2006)または「太陽資源データの収集と利用に関するベストプラクティスハンドブック」(NREL 2010)に記載されているため、ここでは繰り返しません。本章では、SPN1に特有の現場での運用について説明します。



2. 動作原理

SPN1は、7つのサーモパイル放射線検出器を六角形パターンで配列したもので、半球状のシャドウマスクの下に設置されています。シャドウマスクは一部が切り取られているため、太陽の位置に関係なく、以下の動作が行われます。

- ・少なくとも1つの検出器が常に直達日光に晒されます。
- ・少なくとも1つの検出器が常に直達日光から完全に遮られます。
- ・すべての検出器が、天球からのほぼ同量の拡散光を受け取ります。

半球形のシャドウマスクのカットアウェイパターンは、進化的アルゴリズムを用いてコンピュータによって生成されたもので、7つの検出器それぞれから見ると、均一な曇り空と標準的な曇り空(Moon & Spencer 1943)の両方において、受光する拡散光の割合が50%に非常に近くなるようになっています。図1は、等角投影(画像上の半径が天頂角に比例する)を用いて、各検出器から見た空の様子を示しています。どの時点においても、直達ビームから完全に遮られているものの、拡散光の空の約半分に露出している検出器が1つ以上、直達ビームに部分的に露出している検出器がいくつか、そして直達ビームと拡散光の空の約半分に完全に露出している検出器が1つ以上存在します。

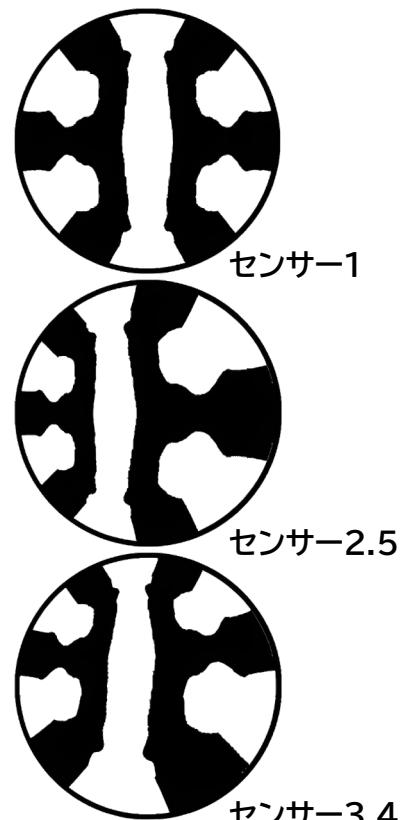


図-1

7つの検出器は、短時間で連続して測定されます。測定値が最も低い検出器(MIN)は、拡散光の50%のみに晒され、測定値が最も高い検出器(MAX)は、直達光に加えて拡散光の50%に晒されます。したがって、全体値と拡散光の値は以下のように計算できます。

$$\text{拡散光} = 2 * \text{MIN}$$

$$\text{直達光} = \text{MAX} - \text{MIN}$$

$$\text{全体値} = \text{直達光} + \text{拡散光} = \text{MAX} + \text{MIN}$$

製造公差と検出器の分光応答を考慮するために、いくつかの追加補正が適用されます。これらの補正については、SPN1のマニュアルに記載されています。図2は、晴天日中の7つの検出器の出力と、そこから算出された全体値と拡散光のグラフ例を示しています。

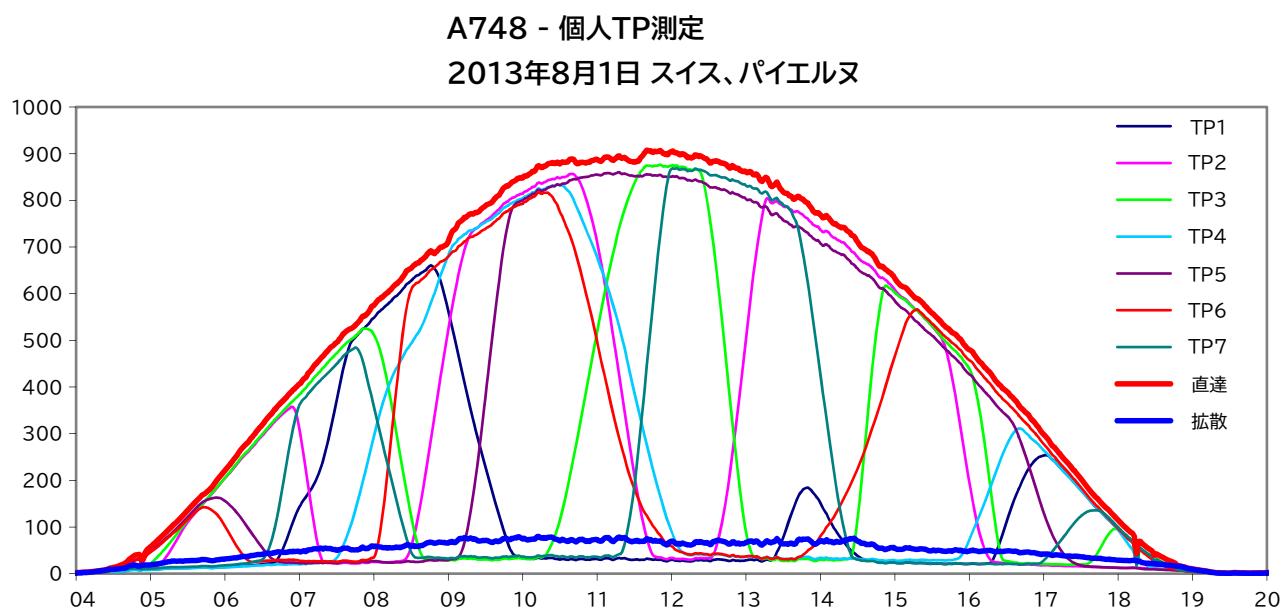


図2

表1 – メーカー提供の主な仕様

総合精度:全天日射(全球) および拡散日射	日積算値 $\pm 5\%$ 時間平均値 $\pm 5\% \pm 10 \text{ W.m}^{-2}$ 個別測定値 $\pm 8\% \pm 10 \text{ W.m}^{-2}$
精度:コサイン補正	天頂角0~90°における入射光量の $\pm 2\%$
精度:方位角	360°回転における $\pm 5\%$
温度係数	1°Cあたり $\pm 0.02\%$ (標準)
温度範囲	-20~+70°C
安定性	2年ごとの再校正を推奨します。

応答時間	200ms未満
分光応答	400~2700nm
分光感度変動	10%(標準)
非直線性	1%未満
傾斜応答	無視できる
ゼロオフセット	周囲温度が5°C/時間変化した場合、3 W.m⁻²未満 暗所での測定値が3 W.m⁻²未満

3. 測定場所と設置

測定場所の選定については、WMOまたはNRELのガイドに記載されている一般的なアドバイスに従ってください。SPN1を使用することで、記載されている場所よりもアクセスや設備が劣悪な場所でも測定できる場合があります。

設置

SPN1は、ドーム内部に取り付けられた指示気泡を用いて正確に水平調整できるよう、しっかりとした支持台に固定する必要があります。Delta-T社は、この調整を容易にする調整可能なマウントを提供しています。北に対する向きは重要ではありませんが、記録しておくことで更なるデータ分析が可能になる場合があります。また、何らかの理由でセンサーを取り外す必要が生じた場合、同じ向きでセンサーを設置できます。

電源

SPN1は、コアとなる計測機能において消費電力が非常に少なく、幅広い入力電圧(5V~15Vで約2mA)に対応しています。つまり、設置に必要な電力は、主にデータロガー、その他のセンサー、通信機器の要件によって決まります。

SPN1にはヒーターも内蔵されており、露、霜、雪の拡散に効果的です。このため、12V(9V~15V)で最大1.5Aを供給できる大容量の電源が必要です。SPN1は電源が確保できる場所で使用する必要がありますが、通常は主電源への接続が必要です。

データロガー

SPN1には外付けデータロガーが必要です。0V~2Vの範囲のアナログ電圧、またはRS232経由のデジタル値として出力できます。

アナログ出力:データロガーは、0V~2Vの範囲を12ビット以上の分解能で測定できる必要があります。データロガーの入力は差動入力である必要があります。差動入力でないと、ケーブルに流れる電源電流により、SPN1または接続された他のセンサーの測定値に誤差が生じます。これは、SPN1ヒーターを使用する場合、またはケーブルが長い場合に特に問題となる可能性があります。

デジタル出力:データロガーは、RS232経由9600ボートで通信できる必要があります。SPN1は、ユーザーマニュアルに記載されているシンプルなキャラクタベースのインターフェースを使用しています。デジタル出力は、デジタル-アナログ-デジタル変換の追加段階を経ないため、アナログ出力よりも精度が高くなります。個々の検出器と機器の温度に関する追加情報も取得できます。選択できる場合は、デジタル出力を使用する必要があります。

落雷

空が見通せる場所に設置された機器は、落雷による損傷を受けるリスクがあります。SPN1ケースは、設置タワーまたはフレームを介して電気的に接地し、タワーは地中に埋設された接地棒に接地する必要があります。機器ケーブルのシールドもデータロガー側で接地する必要がありますが、データロガー自体は地面に対して浮いた状態である必要があります。そうでない場合、ケーブルに誘導電流が発生し、センサーまたはデータロガーが損傷する可能性があります。

清掃と汚れ、ヒーターまたはベンチレーター

SPN1内蔵ヒーターは、-20°CまでSPN1ドームを露、霜、氷から守るのに効果的です。可能な限りご使用ください。

SPN1は、メテオスイス社が長年にわたり独自設計のベンチレーターと組み合わせて使用しており、塵埃の付着防止にはより効果的である可能性があります。



図3 メテオスイス社に設置されたSPN1

メンテナンス

SPN1のドームは、きれいな水で定期的に洗浄し、乾いた布で磨いてください。頑固な汚れは、中性洗剤またはイソプロピルアルコールで取り除くことができます。内部の乾燥剤は、気候条件にもよりますが、1年以上持続します。内部の乾燥剤インジケーターは6ヶ月ごとに確認し、青からピンクに変わったら交換してください。

4. 校正チェック、ユーザーによる再校正

SPN1で正確な測定を行うには、7つの検出器について2つの条件を満たす必要があります。

1. 7つの検出器はすべて、同じ放射照度で同じ出力になるように正確に調整されている必要があります。
2. 7つの検出器は、世界基準スケールに正確に校正されている必要があります。

完全な校正プロセスは、メーカー製の特殊なランプと機器を使用することでのみ容易に実行できます。ただし、ユーザーは検出器の適切なマッチングを確認し、必要に応じて全体的な校正を調整することができます。このセクションで説明するプロトコルは、基準となる日射計との並列測定比較に基づいています。これにより、絶対に必要な場合を除き、SPN1を取り外すことなく校正チェックを行うことができます。このプロトコルでは、比較中に少なくとも一定期間、均一な拡散光分布を提供する明るい曇り空状態が続くことが必要です。

メーカーによる校正精度

SPN1は標準出力を得るためにメーカーにより屋内で校正されていますが、屋外では気候や製造上のばらつきにより出力に差が生じる場合があります。2010年から2014年にかけて、英国ウィンスターまたはカナリア諸島テネリフェ島において、106台の生産されたSPN1をKipp製の基準日射計と屋外で比較しました。比較期間は8日から30日間です。SPN1 Globalの出力と日射計の回帰直線の傾きを、機器の校正值としています。

これらのセンサーの平均校正值は0.997、標準偏差は2.2%です。校正值の97%は基準日射計の5%以内でした。図4はこれらの値のヒストグラムを示しています。

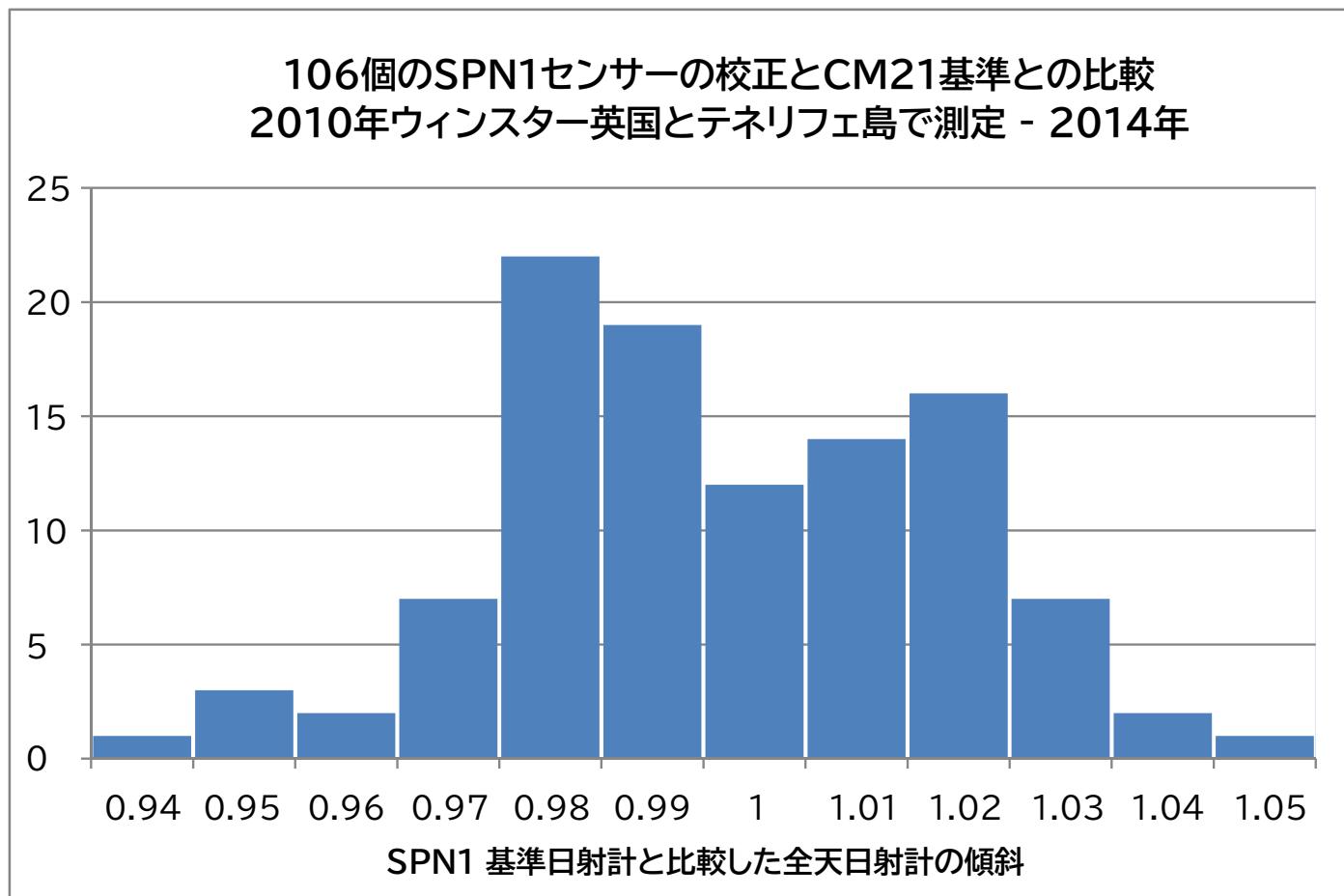


図4 – SPN1 校正分布 – メーカー提供データ

校正安定性

メーカーによる長期校正ドリフトに関するデータによると、これは通常年間1%未満です。図5のグラフは、最大7年間使用した後に再校正のために返却された50台のSPN1について、年間パーセントで計算されたドリフトを示しています。

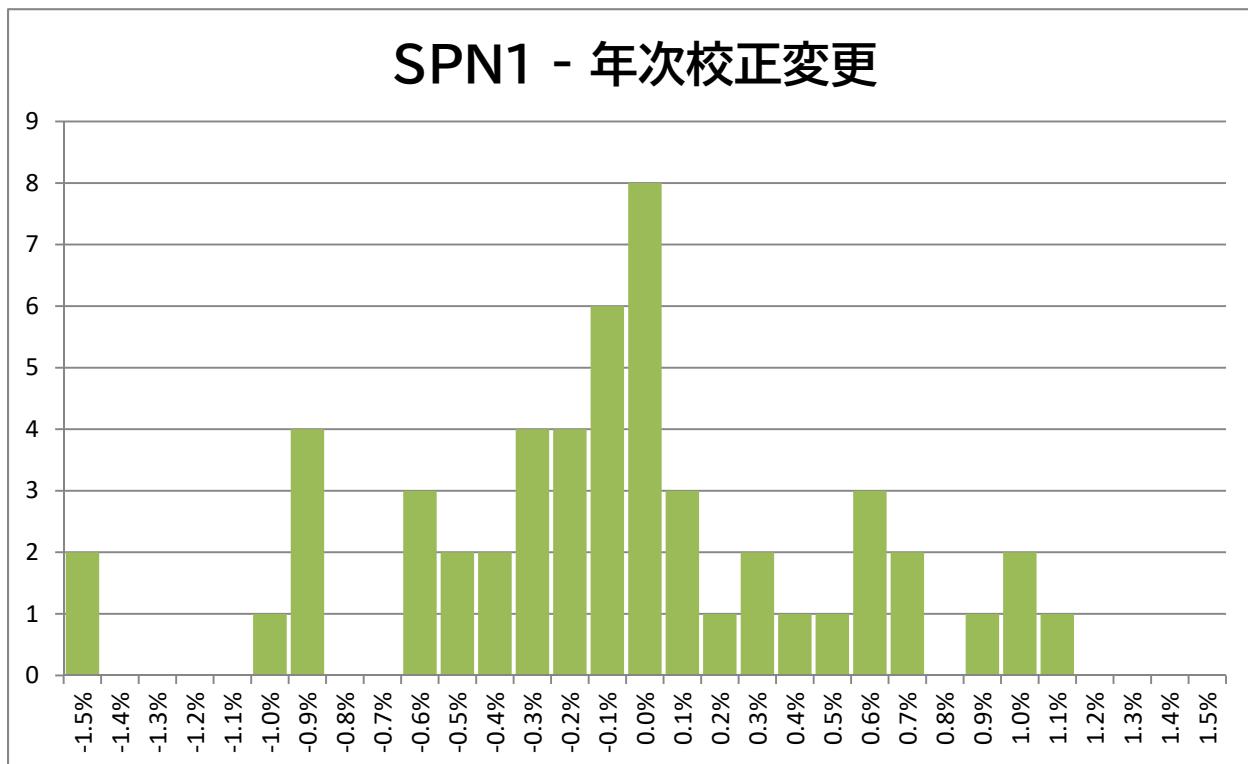


図5 – 校正ドリフト(年間%) – メーカー提供データ

最高の精度を保つには、使用目的と同様の条件で機器を再校正し、定期的に校正内容を確認することをお勧めします。2年ごとの校正点検を推奨します。

検出器のマッチング確認(現場)

均一な拡散光条件下では、すべての検出器が適切にマッチングしていれば、同じ光強度を測定するはずです。この場合、グローバル出力と拡散光出力は同じになります。検出器が適切にマッチングしていない場合、グローバル出力と拡散光出力は、7つの検出器の測定値の最大値と最小値の差の半分だけ異なります。したがって、均一な曇天条件下でグローバル出力と拡散光出力が同じであれば、検出器は適切にマッチングされていると考えられます。

これを確認するための推奨手順は以下のとおりです。

- ・数週間にわたってSPN1データセットを収集します(理想的には最近校正された日射計と併用)。このデータセットには、明るい曇りの期間を含める必要があります。データは1分平均値以下が望ましいです。データセットは可能な限り長く、少なくとも5日間は部分的に曇りの日を含むように十分な大きさにする必要があります。
- ・ $10\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 未満のデータはすべて除外します。
- ・拡散反射率と全体値の関係をグラフ化します(図6上)。データ密度プロットは、曇天時のデータポイントのクラスタリングをより明確に示します。

- ・赤い枠内のデータポイントは曇天期間です。右側のポイントは晴天期間です。曇天期間におけるポイントの傾きを確認する必要があります。
- ・シリアルポートデータの場合は $\text{Global} = \text{Diffuse} + 3\text{W.m}^{-2}$ 、アナログデータロガーの場合は $\text{Global} = \text{Diffuse} * 1.01 + 3\text{W.m}^{-2}$ にリミットラインを設定します。(3W.m⁻²は内部の電子的影響による最悪のオフセットであり、追加の傾き項はデジタル-アナログコンバータの規定出力誤差を考慮しています。)
- ・点群の最も密度の高い部分の左端がリミットラインの左側にある場合、検出器は適切に整合しています。点群の左端とリミットラインの間にギャップがある場合、検出器は不整合であり、メーカーによる再校正が必要です。
- ・より詳細な情報を確認するには、Global-Diffuseの差をGlobalに対してプロットするとより明確になります(図6下部)。
- ・限界線は、 $\text{Limit} = 3\text{W.m}^{-2}$ (デジタル測定値)または $\text{Limit} = \text{Global} * 0.01 + 3\text{W.m}^{-2}$ (アナログ測定値)となります。これは赤い破線で示されています。
- ・点の最高密度は限界線より下、傾きがゼロになるはずです。この例は、検出器のマッチングが適切に行われたSPN1を示しています。
- ・図7は同じデータセットですが、検出器のマッチング誤差が生じています。上のプロットは検出器のミスマッチが±2%であることを示していますが、これはこの手法でかろうじて検出可能です。下のプロットは検出器のミスマッチが±5%であることを示していますが、これは明らかに許容限界を超えています。

SPN1 拡散光 vs 全天光量(ペイエルヌ 2012~13年)

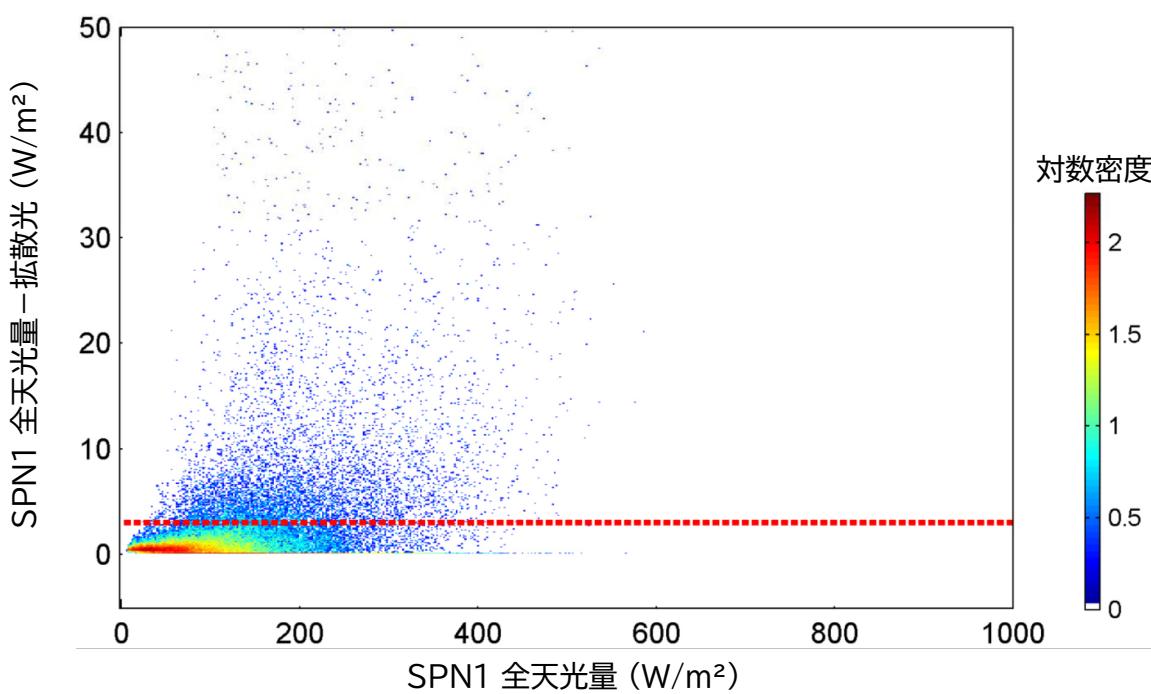
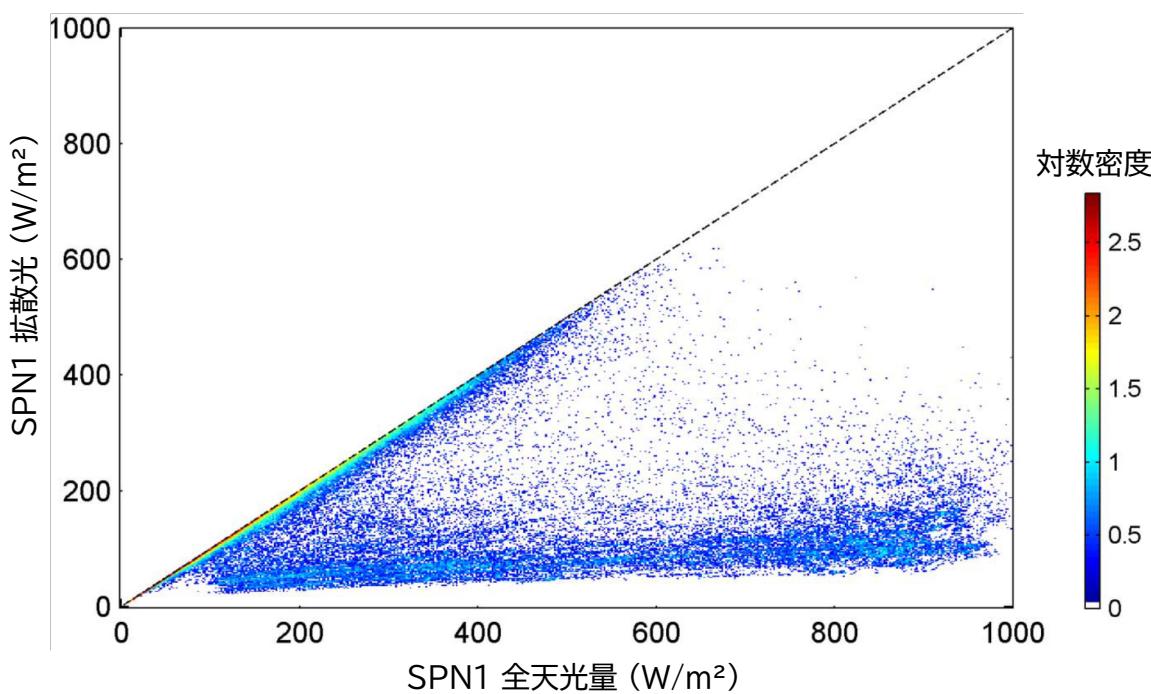


図6 上段 - SPN1拡散放射量と全天放射量の相関図

下段 - 全放射量と拡散放射量の相関図(1分平均値、デジタル取得データ)

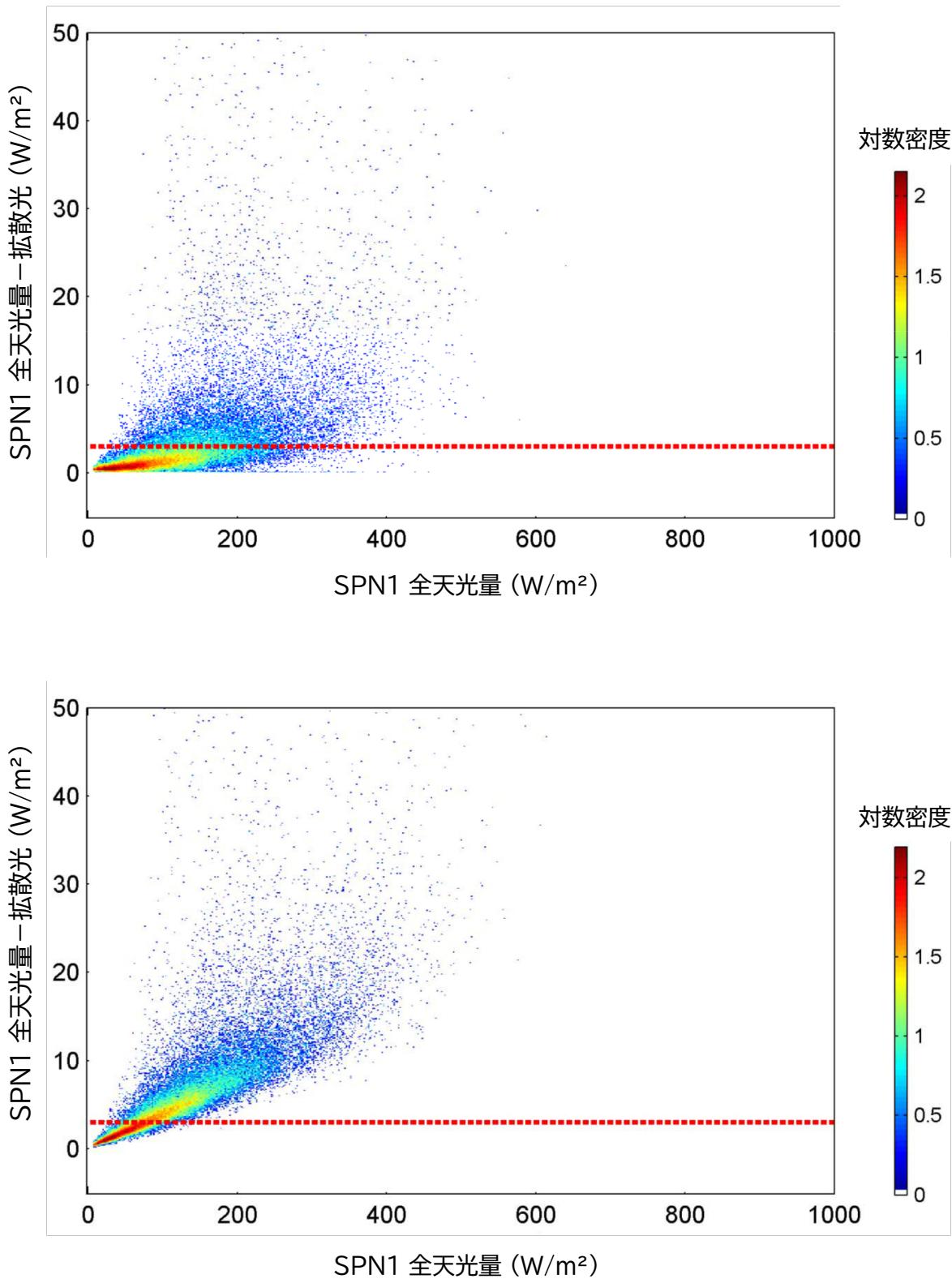


図7 – 全天 - 拡散差分と全天の相関図
上段 - ±2% 検出器マッチング誤差
下段 - ±5% 検出器マッチング誤差

正確な校正のための現場確認

検出器のマッチング確認が良好であれば、SPN1 全天の出力を、良好な校正が既知の同じ場所に設置された基準日射計と(少なくとも)2~4週間比較し、データに線形回帰近似を適用します。線形回帰の傾きが1から大きく異なる場合、メーカーから入手可能なソフトウェアを使用して、SPN1の出力を定数倍で増減できます。

注意:回帰直線をゼロに強制的に通過させないでください。一般に、日射計とSPN1の間には最大5W/m²のオフセットが生じます(SPN1はわずかに正の電気的オフセットを持ち、日射計はわずかに負のIRオフセットを持ちます)。このオフセットは、回帰直線をゼロに強制的に通過させると校正值に影響を及ぼします。

期間と季節による校正值の変動

異なる校正期間における変動を示すために、複数の長期データセットが分析されました。図8は、コロラド州ゴールデンのNRELにおいて15ヶ月間にわたり、1週間、2週間、4週間のあらゆる校正期間における長期平均値との差を示しています。

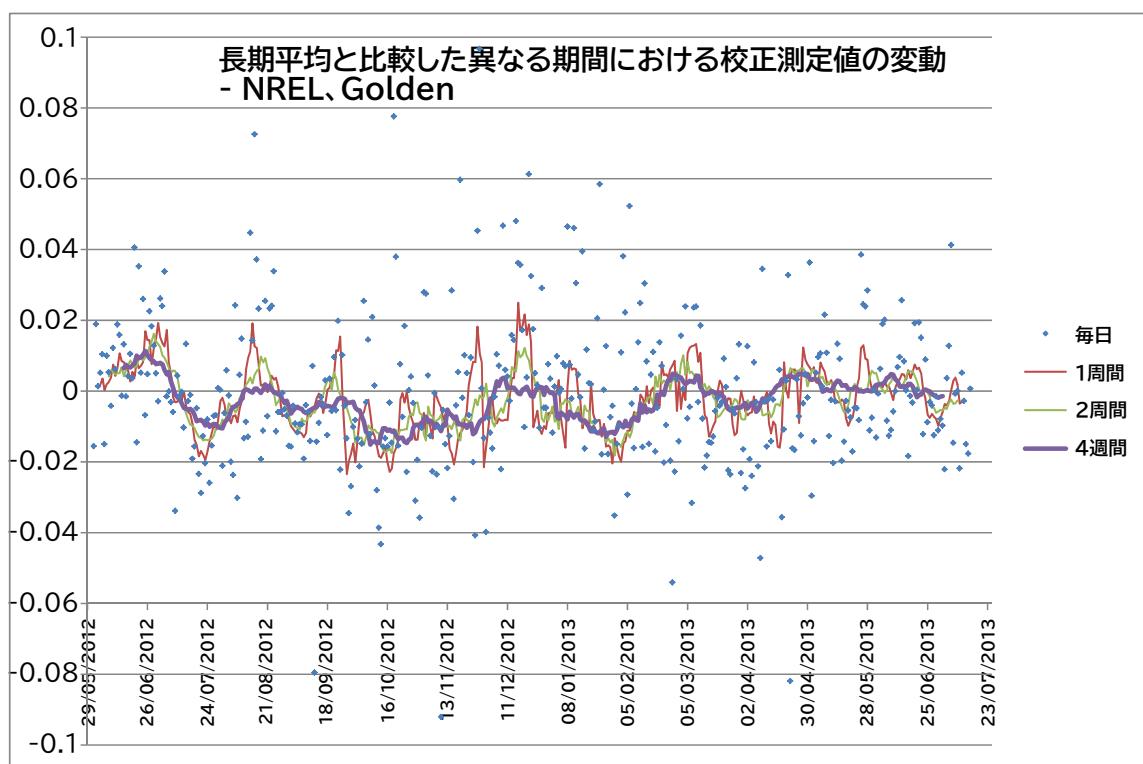


図8 コロラド州ゴールデンにおける校正変動

同様の分析が他の観測地点でも実施されています。図9は、これらの観測地点すべてにおいて、期間が長くなるにつれて校正変動がどのように減少するかを示しています。四角はすべての観測期間における標準偏差を示し、ヒゲは最も極端な値を示しています。4週間を超えて観測期間を延長しても、精度が大幅に向上的可能性は低いでしょう。校正は、太陽が最も高い夏季に実施する必要があります。校正変動は一般的に夏季に低くなります。

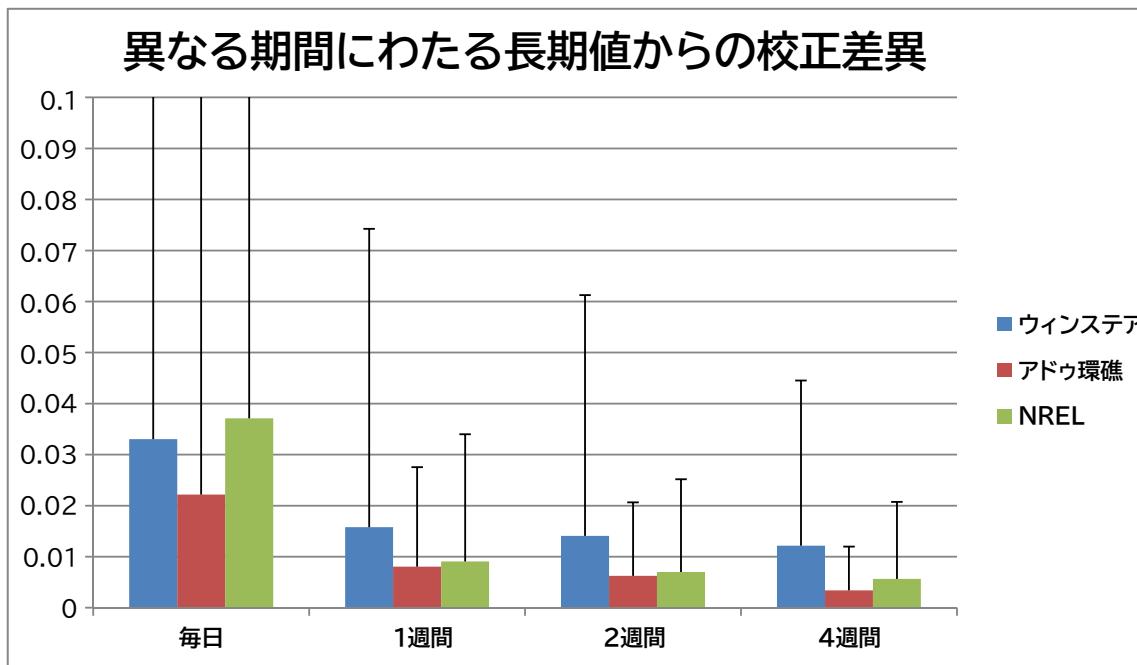


図9 期間と季節による校正変動
(ボックスは標準偏差、ヒゲはデータセット全体の最悪ケースを示す)

5. データ検証

夜間の測定値

夜間の測定値を記録し、確認することをお勧めします。これらの測定値は、センサーの配線やデータロギング設定に問題があるかどうかを最も明確に示してくれることがよくあります。通常の使用状況では、SPN1は温度が安定している夜間に 0W.m^{-2} ~ 3W.m^{-2} の測定値を示しますが、温度が急激に低下している場合は、それより多少高い値を示すことがあります。 6W.m^{-2} を超える値、または 0W.m^{-2} 未満の値は設置ミスの兆候であるため、調査が必要です。

BSRN制限値

標準的なBSRN試験制限値のサブセット(表2にまとめられています)をSPN1データに適用できます。これにより、出力値における重大な誤差が明らかになります。SPN1は、1分間値において99%以上でこれらの試験に合格すると予想されます。

表2. BSRN Global Network推奨QCテストV2.0より。C N Long & E G Dutton

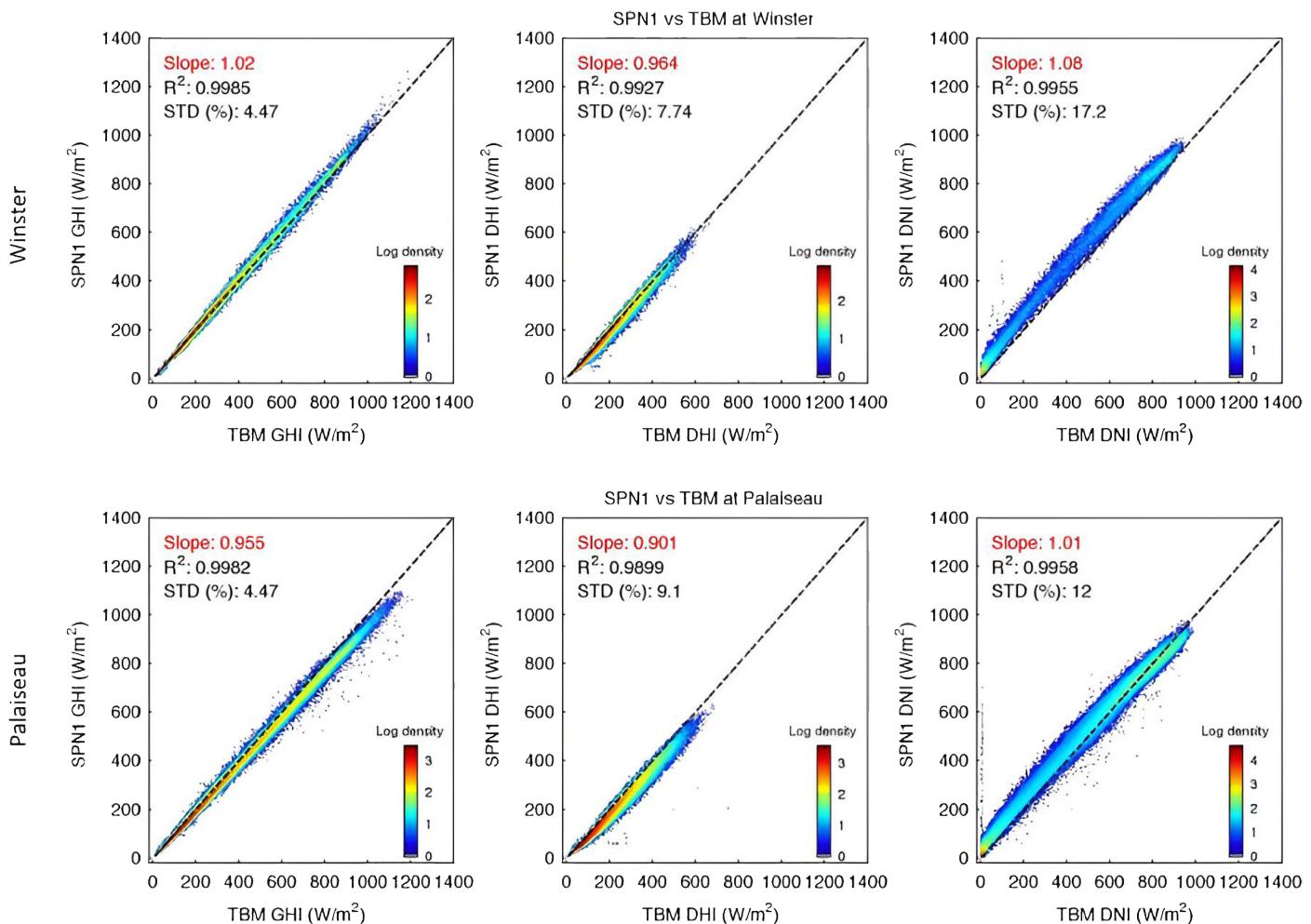
定義	
SZA	= 太陽天頂角
μ_0	= $\cos(SZA)$ 注:以下の式において、 $SZA > 90^\circ$ の場合、 μ_0 は0.0とします。
S0	= 平均地球・太陽間距離における太陽定数
AU	= 天文単位での地球・太陽間距離、1 AU = 平均東南距離
Sa	= $S0/AU^2$ = 地球・太陽間距離で調整された太陽定数
GHI	= 全天水平放射照度、短波300nm～3000nm
DHI	= 拡散水平放射照度
DNI	= 直達放射照度、法線放射照度 SPN1の場合、 $(GHI - DHI) / \cos(SZA)$ として計算されます。
極めて稀な限界 – GHI	最小値: -2W.m^{-2} 最大値: $Sa * 0.75 * \mu_0 1.2 + 50\text{W.m}^{-2}$
極めて稀な限界 – DHI	最小値: -2W.m^{-2} 最大値: $Sa * 0.75 * \mu_0 1.2 + 30\text{W.m}^{-2}$
極めて稀な限界 – DNI ((Global-Diffuse)/ μ_0 として計算)	最小値: -2W.m^{-2} 最大値: $Sa * 0.95 * \mu_0 0.2 + 10\text{W.m}^{-2}$
拡散反射率	$(DHI)/(GHI) < 1.05$ $SZA < 75^\circ, GHI > 50\text{W.m}^{-2}$ の場合 $(DHI)/(GHI) < 1.10$ $SZA > 93^\circ, SZA > 75^\circ, GHI > 50\text{W.m}^{-2}$ の場合 $GHI < 50\text{W.m}^{-2}$ の場合、試験は実施できません

6. 達成可能な精度

Badosa (2014) は、6つの異なるサイトにおけるSPN1の精度について、トラッカーベースの参照データとの長期比較を含む詳細な分析を行っています。これらの結果は表3にまとめられ、図10にグラフ化されています。

表3 – 全サイトのGHI、DHI、DNIの回帰傾き、およびGHI傾きの再較正後のDHIおよびDNI傾き

線形回帰の傾き	GHI (傾き/ 標準偏差(%))	DHI (傾き/ 標準偏差(%))	DNI(傾き/ 標準偏差(%))	校正後のGHI 勾配に対する DHI勾配	校正後のGHI 勾配に対する DNI勾配
ワインスター	1.017/4.4%	0.966/7.8%	1.076/15.7%	0.950	1.058
パレゾー	0.955/4.5%	0.901/9.1%	1.009/12.0%	0.944	1.057
ペイエルヌ	1.002/3.7%	0.940/8.9%	1.052/10.5%	0.937	1.049
ゴールデン	1.021/4.2%	0.976/9.1%	1.055/8.8%	0.956	1.033
アッドウ環礁	1.011/3.4%	0.913/9.2%	1.062/9.5%	0.903	1.051
ロゼレー	0.993/3.8%	0.916/9.0%	1.043/11.8%	0.922	1.050



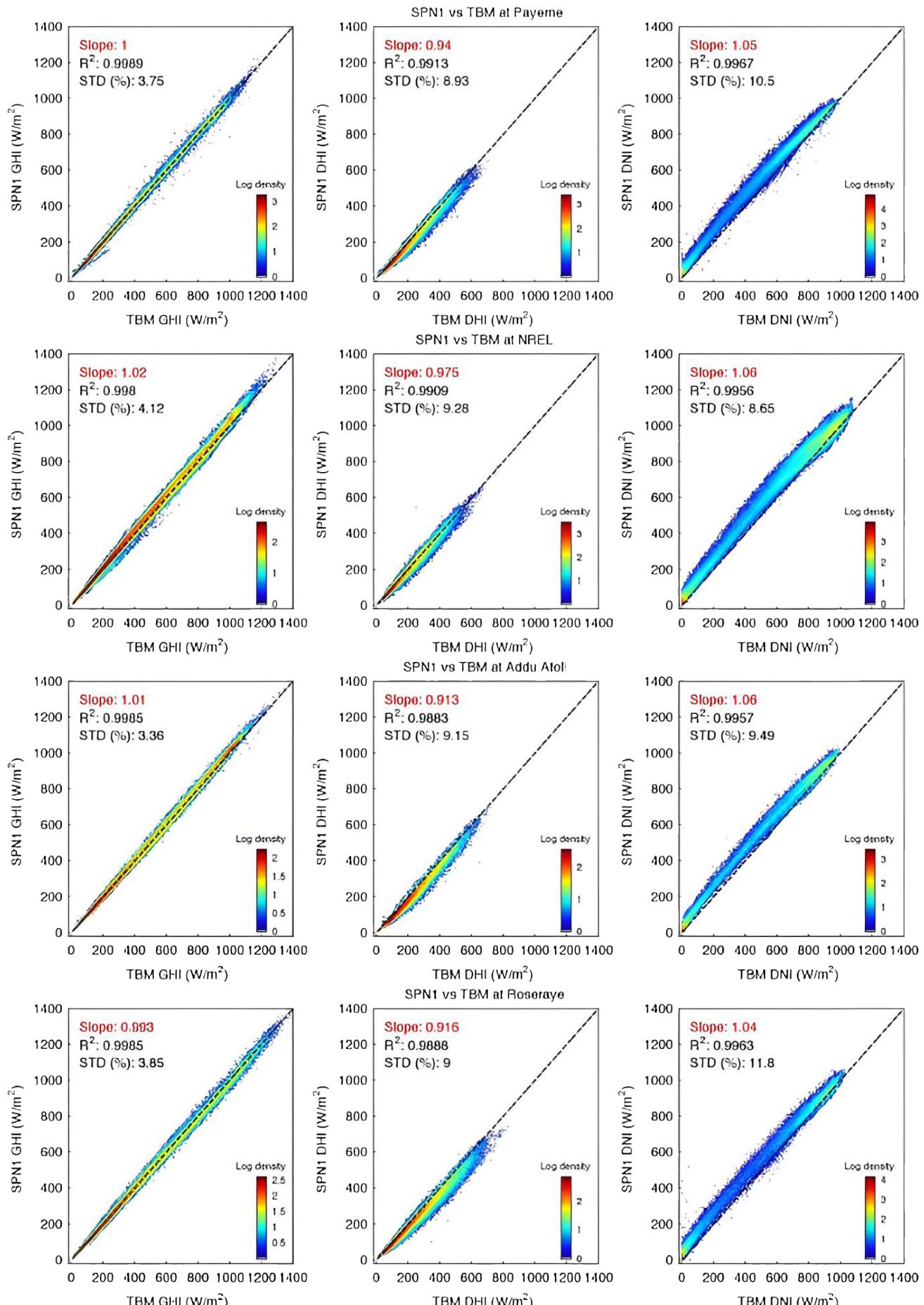


図10 – 6サイトにおける品質管理済みデータのXYプロット

これは標準的なSPN1の典型的な性能を示しています。グローバル精度は良好ですが、トラッカーベースのシステムと比較すると、拡散反射率は通常過小評価され、DNIは過大評価される傾向があり、それぞれ約5%程度です。

この差の大部分は、SPN1の有効開口角が大きいことに起因しています。つまり、太陽周縁オーロラの大部分がSPN直接測定に含まれるのに対し、トラッカーベースのシステムでは拡散反射測定に含まれます。オーロラの強度は、条件に応じて最大 $100\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ に達することがあります。状況によっては（例えば、平面パネルの放射照度のモデリング）、オーロラを直接ビームに含めることが適切ですが、他の状況（例えば、CSPシステムのモデリング）では、拡散反射測定に含める必要があります。

SPN1とトラッカーベースの測定値の一致性は、DHIおよびDNI値に単純な補正係数を適用するか、トラッカーベースのシステムに対して動作条件に合わせて校正を行うことで改善できます。

表4は、メーカーから受領したSPN1について、全地点における測定値の差と、各地点におけるGlobalおよびDiffuse勾配の線形補正を行った結果を示しています。

表4: 勾配校正前後のSPN1とTBMの比較スコア（各セルに3つの値があり、それぞれGHI、DHI、DNI日射量に対応）

SPN1データには補正を適用していません

	平均TBM (W/m ²)	MAE (W/m ²)	rMAE %	MBE (W/m ²)	rMBE %	RMSE (W/m ²)	rRMSE %
ワインスター	312/183/215	10/11/30	3.3/5.9/14	3.8/-7.6/30	1.2/-4.2/14	15/16/44	4.9/8.8/21
パレゾー	318/160/281	16/18/22	4.9/11/7.8	-14/-17/14	-4.4/-11/4.8	23/24/34	7.3/15/12
ペイエルヌ	358/160/314	8.3/13/28	2.3/8/8.9	0.77/-11/27	0.21/-7/8.6	13/18/41	3.8/12/13
ゴールデン	471/154/514	18/10/44	3.7/6.6/8.5	11/-4.6/41	2.4/-3/8	23/15/58	4.9/9.6/11
アッドウ環礁	532/221/426	15/23/42	2.8/11/9.8	4.6/-22/41	0.86/-10/9.6	19/30/53	3.6/14/12
ロゼレー	467/231/326	13/21/31	2.8/9.2/9.4	-2.7/-19/29	-0.58/-8.4/8.9	18/31/44	3.9/13/14

全天・拡散反射SPN1データの勾配補正後

	平均TBM (W/m ²)	MAE (W/m ²)	rMAE %	MBE (W/m ²)	rMBE %	RMSE (W/m ²)	rRMSE %
ワインスター	312/183/215	9.3/10/19	3/5.5/9	-1.4/-1.4/8.9	-0.44/-0.77/4.1	14/15/30	4.4/8/14
パレゾー	318/160/281	8.8/11/22	2.8/6.7/7.8	0.31/-1.7/10	0.098/-1.1/3.6	15/16/34	4.7/10/12
ペイエルヌ	358/160/314	8.2/11/22	2.3/6.6/7	-0.023/-1.5/7.8	-0.006/-0.97/2.5	13/15/31	3.7/9.5/9.8
ゴールデン	471/154/514	15/10/30	3.1/6.5/5.8	1.1/-0.92/18	0.23/-0.6/3.4	19/14/42	4.1/9.3/8.1
アッドウ環礁	532/221/426	14/16/25	2.6/7.2/5.8	-1.1/-3.3/4.9	-0.2/-1.5/1.1	18/22/32	3.3/10/7.6
ロゼレー	467/231/326	13/15/24	2.7/6.6/7.3	0.46/-0.04/4.8	0.097/-0.016/1.5	18/23/33	3.9/9.8/10

キー

TBM:2台の日射計(DHIおよびGHI用)と1台の日射計(DNI用)を用いて実施したトラッカーベース測定

平均TBM:SZA < 80°におけるTBM測定日射照度の平均値

MAE:平均絶対誤差

MBE:平均バイアス誤差

RMSE:平均二乗平均平方根誤差

rMAE:平均TBM測定値に対するMAEの相対値

rMBE:平均TBM測定値に対するMBEの相対値

rRMSE:平均TBM測定値に対するRMSEの相対値

7. 誤差源

Badosa(2014)は、SPN1測定における主な誤差と差異を詳細に特定しています。ここでは、それらを要約します。

1. 検出器間の校正ミスマッチにより、太陽が空を移動すると、出力の直達部分にジャンプが生じ、どの検出器が完全に露出するかが変わります。
2. ガラスドームによる光のレンズ効果により、太陽の位置に応じて変化する検出器間のさらなるミスマッチが生じる可能性があります。
3. 検出器のコサイン応答により、太陽の天頂角に応じて変化する直達ビームセンサーの応答が変化する可能性があります。
4. SPN1拡散板は青色光の透過率が低いです。そのため、青空と曇り空の間で拡散感度に差が生じますが、この差は機器によって完全に補正されません。
5. シャドウマスクパターンの形状により、実効開口角は太陽の位置によって±5°から±20°の範囲で変化します。これにより、太陽の光輪が大きい場合、測定される直達光と拡散光の比率が変わります。
6. 温度変化、内部電子機器、時間応答、汚れによる影響は小さくなります。

これらの影響の一部に対する修正が開発中です。

8. 参考文献

世界気象機関(ジュネーブ)(2006年)「気象観測機器及び観測方法ガイド」第7版、2006年

NREL(2010年)「集光型太陽光発電:太陽資源データの収集と利用に関するベストプラクティスハンドブック」技術報告書 NREL/TP-550-47465

Moon, P. & D.E. Spencer(1942年)「非均一な空からの照明」Trans. Illum. Eng. Soc. NY 37, 707

Delta-T Devices Ltd.(2007年)「全天日射計 SPN1 UM v3.0 ユーザーマニュアル」
<https://kyokko.com/products/chemistry/meteorology/spn1/>

Badosa et al(2014年) SPN1放射計を用いて測定された太陽放射照度:不確実性と開発への手がかり(Atmos. Meas. Tech., 7, 4267-4283, 2014)



AT
Delta-T Devices

SPN1 Best Practice version 3

 旭光通商株式会社
www.kyokko.com