

日射量・光強度の正しい測り方

岡田益己

岩手大学農学部

How to measure solar radiation and light intensity accurately

Masumi OKADA

(Faculty of Agriculture, Iwate University)

1. 日射・光センサーの種類と特性

日射や光を計測するためのセンサーには、日射計、光量子計、照度計などがある。それぞれ計測対象となる波長域や感度が異なるが、それらの違いを理解せずに誤って使用される場面も多い。光の計量法について、詳しくは高見 (2011) を参照されたい。ここでは農業や植物の分野でよく利用される全天日射計と光量子計を用いた日射量や光量子束密度の計測について解説する。なお、照度計は人間の目の波長別感度特性に合わせたセンサーであり、植物を対象とした計測 (被覆材の特性なども含む) に使用すべきでないので、ここでは扱わない。

日射計は測定原理によって2種に大別される。図1の左は熱電式の全天日射計、右は光電式の日射計である。光量子計も光電式なので、右と同様の形状である。熱電式は、受光部が吸収した日射エネルギーを熱エネルギーとして測定するもので、日射量に比例して受光部内部に温度差が生じ、その温度差を熱電堆 (熱電対を多数直列につないだもの) で計測する。広い波長域 (例えば 400 nm ~ 2800 nm) にわたって受光部表面の吸収率がほぼ一定であるため、波長の違いによる感度の偏りが小さい。

これに対して光電式の日射計や光量子計は図2に示すような波長別感度特性を持つ光電素子 (フォトダイオード) を利用する。図の縦軸は受光エネルギーあたりの出力 (電流) を示し、波長ごとにその出力が変化する。例えば光電素子 (a) は、1) 1000 nm を越える波長域のエネルギーを感知できない、2) 1000 nm 以下の波長域でも波長によって感度が異なる。市販の多くの光電式日射計はこのような特性を持つ光電素子を使用するため、利用場面を屋外の太

陽光下に限定している。すなわち太陽光の波長分布が天候や太陽の位置によって大きく変わらないと仮定し、熱電式の日射計と比較校正して出力を調整したものである。このため屋外の太陽光とは波長分布が異なる環境で使用すると、大きな誤差をもたらす。市販の光電式日射計に、植物群落や人工光源下で使用しないようにという注意書きがあるのは、このためである。

一方、光合成有効波長域 (400 ~ 700 nm) における光電素子 (a) の感度特性は、量子効率 100 % の傾きに近い。400 nm 以下と 700 nm 以上の波長域 (図2の陰影部) をフィルターで除外すれば、光合成有効波長域の光量子束密度 (PPFD) を計測できる。フィルターによって光合成有効波長域の感度も一部わずかに変形するが、光量子数を測るのに適したセンサーとなる。

可視光に比べて近赤外光をよく反射あるいは透過する植物群落において、透過光や反射光を計測する場合には、熱電式の日射計か光量子計を用いるのが適切である。ただし、日射計が太陽光の広い波長域のエネルギーを計測するのに対して、光量子計は光合成有効放射域の光量子束密度を計測するから、透過率や反射率の計測結果は両者で異なる。一般に植物群落では、光量子計に比べて日射計で測った値が



図1 熱電式の日射計 (左) と光電式の日射計 (右)

<http://www.agrmet.jp/sk/2014/A-1.pdf>

2014年3月15日 掲載

Copyright 20**, The Society of Agricultural Meteorology of Japan

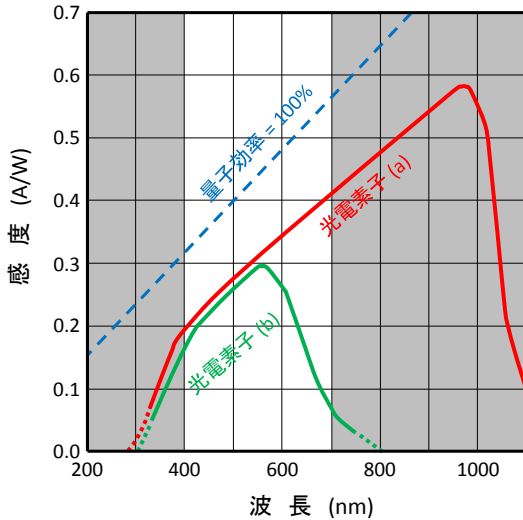


図2 光電素子の波長別感度特性例
(浜松ホトニクス (2013) より作図)

透過率，反射率ともに大きい。

光は入射角 (θ) の余弦 ($\cos\theta$) に比例して，入射面での受光量が減少する。市販の日射計や光量子計の受光面は，この余弦則に応じた感度を示すように表面が加工されている。

市販の光量子計や日射計が高価なため，その材料に使われる光電素子を購入し，光量子計などと比較校正すれば，安価に多数点の光計測ができるように記した参考書がある。しかしこのような方法では以下の二つの理由で，光量子束密度や日射量を正確に計測できない。

1) 光電素子自体は余弦則に対応した表面加工を施していないため，光の入射角補正が不適切である。通常，入射角が大きい（センサー表面に対して斜めから入射する）と反射率が余弦則で定まる値以上に大きくなるため，真の値を過小評価する。入射角は太陽高度や天候によって大きく変化するから，ある条件で光量子計と比較して校正値を得ても，他の条件ではその校正値を使用できない。

2) 屋外と群落内では波長分布が異なるため，屋外で光量子計と比較して求めた校正値を群落内に適用できない。図2の光電素子(a)は近赤外光にも反応するので，近赤外光をよく透過する群落内でその素子を使用すると，適切な光量子計で測った値に比べて出力が大きくなってしまいます。光電素子には，様々な波長特性を持つものがあるが（例えば，図2の光電素子(b)），今のところ，フィルターを装着せずに光合成有効波長域の光量子量だけを適切に測れる製品

はない。

日射計や光量子計は，熱電式でも光電式でも，長く使用するとその感度が経年変化する。このため数年に一度はセンサーを校正する必要がある。熱電式日射計は，気象業務法に則った検定（通称，気象庁検定）を受けるのが望ましい。一方，光電式日射計や光量子計の校正は，メーカーに依頼するのが一般的である。センサーの数に余裕があれば，検定済みのセンサーを1台使用せずに保管しておき，頻繁に使用するセンサーをこれと比較してときどき校正するという方法もある。

2. センサー出力の記録

図3にランプを消灯したときの熱電式日射計と光電式日射計の応答を示した。熱電式日射計は受光部が熱的平衡に達するまでに数～数十秒を要するため，応答が遅い。一方，光電式のセンサーは光電反応だから応答が早い。これらのセンサーは，屋外の日射量の変動に対しても同じように熱電式では数～数十秒の遅れを持って，また光電式では瞬時に応答する。

デジタル機器が導入される前は，激しく変動する日射を正確に計測するために，センサー出力を積分する回路を使用した。現在では，積分回路を介さずにデジタル式のデータロガーにセンサーを直接接続する使い方が一般である。この場合，データロガーがセンサー出力を読み取る間隔（以下，サンプリング間隔）をできる限り短く設定しないと，日射や光強度の変化を正確にとらえることができない。気象官署では，全天日射計の出力を1秒間隔にサンプリングしている。

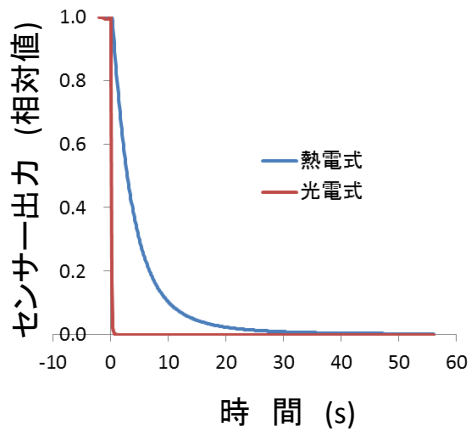


図3 熱電式日射計と光電式日射計の応答例。
時間0でランプを消灯

表 1. サンプリング間隔を変えたときに生じる
相対誤差の範囲 (最小値～最大値：%) .
1秒値を基準とした誤差

熱電式		サンプリング間隔			
		10秒	30秒	1分	10分
記録間隔	1分	-13 ~ +16	-38 ~ +61	-53 ~ +141	-
	10分	-3 ~ +2	-9 ~ +10	-19 ~ +22	-59 ~ +175
	1時間	-0.3 ~ +0.4	-2 ~ +3	-7 ~ +8	-26 ~ +47
光電式		サンプリング間隔			
		10秒	30秒	1分	10分
記録間隔	1分	-20 ~ +33	-54 ~ +96	-68 ~ +213	-
	10分	-4 ~ +4	-14 ~ +17	-23 ~ +32	-63 ~ +283
	1時間	-0.5 ~ +0.9	-3 ~ +4	-10 ~ +11	-29 ~ +65

データロガーには、サンプリングと同時にその信号を記録する (サンプリング間隔と記録間隔が等しい) タイプと、サンプリングを一定時間繰り返してからその平均値を記録するタイプがある。サンプリング間隔は短いほど好ましいが、前者のタイプで 1 秒間隔にサンプリングすると、記録も 1 秒ごとに行うため、メモリー容量が小さい機種では連続して計測できる時間が限られてしまう。このタイプでは、メモリー容量と記録したい時間との関係から、サンプリング間隔を決めざるを得ないので、サンプリングに伴う誤差を十分に理解しなければならない。

図 4 上に、晴れたり曇ったりを繰り返す時間帯の日射量の変化を示した。これはサンプリング間隔 1 秒で計測した日射量の 1 分平均値である。このように変動する日射量を 10 分間隔で記録するとしよう。このときサンプリング間隔を 1 分とすると (1 分値)、短時間の変動をうまくとらえきれない。このため 1 秒間隔でサンプリングした値 (1 秒値) に比べて、図 4 下のような計測誤差が生じる。誤差は応答速度の遅い熱電式でも、光電式とはほぼ同様に生じ、最大で 10% 以上となる。このように 1 分のサンプリング間隔では、10 分平均値を正確に計測できない。

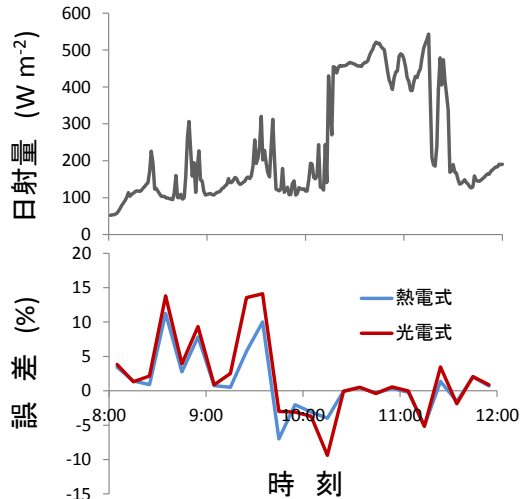


図 4 サンプリング間隔 1 秒で計測した日射量の 1 分平均値の変化 (上) と 1 分値の相対誤差 (下) . 相対誤差は 1 分値と 1 秒値の差を 1 秒値で除したもの

上記の 4 時間分のすべてのデータについて、記録間隔とサンプリング間隔を様々に変えて試行したとき (記録間隔 1 時間の場合の試行回数 10,800) の誤差を、表 1 に示した。表値は、日射の変動パターンによって大きく変わるので、あくまでも変動が激しいときの一例だが、サンプリングに伴う誤差を 1% 以内に抑えて 1 時間平均値を求めるには、サンプリング間隔を 10 秒以下にしなければならないことが、この表から分かる。光量子計による光量子束密度の計測においても、光電式日射計と同様の誤差が生じる。以上から、変動する日射量や光量子束密度について、その 1 時間平均値を扱う場合にはサンプリング間隔を 10 秒以下に、また 10 分平均値を扱う場合にはサンプリング間隔を 1 秒以下にするのが望ましい。なお表 4 から推定すると、1 分平均値を扱う場合には、サンプリング間隔を 0.1 秒程度にすべきだろう。

引用文献

高見晋一, 2011 : 生態環境としての光の計測. 生物と気象, **11**, A1-7. <http://www.agrmet.jp/sk/2011/A-1.pdf>
 浜松ホトニクス, 2013 : http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s1087_etc_kspd1039j02.pdf .