

3

微氣象觀測

3.1 放射

Radiation

絶対温度 0K 以上の温度を持つすべての物質は、電磁波の形でエネルギーを放出している。そのエネルギー量は物質の絶対温度の 4 乗に比例する (Stefan-Boltzmann の法則)。太陽からの放射は、約 5,800K の物質の黒体放射の理論値に近く、波長 $0.5\mu\text{m}$ 付近にスペクトルのピークを持ち、 $0.15\sim 3\mu\text{m}$ の範囲にそのエネルギーの 99%が含まれる。一方、地球大気系の温度は 300K 前後であり、波長 $10\mu\text{m}$ 付近にスペクトルのピークを持ち、大部分のエネルギーは $3\sim 100\mu\text{m}$ の範囲に含まれる。

地上においては、上述の太陽起源の放射と、地球大気系起源の両方が観測される。ここでは、これらの放射量の測定方法について述べる。

3.1.1 日射量

概要

日射は太陽放射と同義である。太陽起源の放射は大気に進入した後、空気分子や水蒸気、塵などにより部分的に吸収・散乱される。地表面に到達する太陽放射はその波長特性から短波放射とも呼ばれ、 $0.3\sim 3\mu\text{m}$ (または $0.29\sim 3\mu\text{m}$) の波長範囲に分布する。

日射は直射光成分の直達日射と散乱光成分の散乱日射に分けられる。直達日射と散乱日射をあわせたものを全天日射と呼ぶ。

測器の種類

世界放射センターにより維持管理されている絶対日射計を基準にして、校正体系が確立している。また、世界標準化機構 (ISO) により、日射計の性能基準が定められている。

一般的なサーモパイル (熱電堆) 型と、簡易タイプのフォトダイオードを用いた量子型のセンサがある。サーモパイル型は日射エネルギーに比例した温度の取り出し方によって、ヒートシンク型、白黒型などに分けられる (大谷, 1999a)。現在市販されているほとんどはヒートシンク型である。

全天日射計

全天日射計は様々なタイプのセンサが市販されている (Table 3.1-1, Photo 3.1-1)。サーモパイル型では、受熱板の被覆に半球型のガラスドームが用いられる。防霜ファンを取り付けることにより、霜の影響を除去するだけでなく、ゼロオフセットの問題も軽減する。また、湿雪以外の冠雪の影響も軽減できる。

市販されている日射計は、最も精度の高い ISO 二次準器をはじめとして、ISO1 級、2 級、さらに簡易型のセンサがある。

Table 3.1-1 代表的な日射計の特性

機種	メーカー	感度 [mV(kWm ⁻²) ⁻¹]	波長範囲 [nm]	ISO クラス
MS-802	英弘精機	7	305 ~ 2800	二次準器
PSP	EPPLEY	約 9	285 ~ 2800	二次準器
CMP 21	Kipp & Zonen	7 ~ 14	310 ~ 2800	二次準器
MS-402	英弘精機	7	305 ~ 2800	1 級
SR-11	Hukseflux	15	305 ~ 2800	1 級
CMP 6	Kipp & Zonen	5 ~ 16	310 ~ 2800	1 級
MS-601	英弘精機	7	300 ~ 2800	2 級
LP02	Hukseflux	15	305 ~ 2800	2 級
CMP 3	Kipp & Zonen	5 ~ 15	310 ~ 2800	2 級
ML020VM	英弘精機	約 7	400 ~ 1100	-
SP Lite2	Kipp & Zonen	60 ~ 100	400 ~ 1100	-
PCM-01	ブリード	7 または 10	305 ~ 2800	-



Photo 3.1-1 代表的な日射計。左：MS-402（写真：英弘精機㈱提供）。右：CMP 6（写真 Kipp & Zonen B. V.提供）。

直達日射計

直達日射計には MS-56（英弘精機㈱）や CHP 1（オランダ Kipp & Zonen B.V.）、NIP（米国 THE EPPLLEY LABORATORY, INC.）などがある。太陽周辺光の影響を除去するため、開口部を小さくし内部反射を抑制した円筒が用いられる。連続測定には、自動的に太陽を追尾する装置（英弘精機製 STR-21、Kipp & Zonen 製 SOLYS 2、EPPLLEY 製 SMT-3 など）を用いる（Photo 3.1-2）。



Photo 3.1-2 直達日射計（MS-56）。太陽追尾装置（STR-21）にとりつけたもの。（写真：英弘精機㈱提供）

散乱日射計

直達光を取り除くため、遮蔽バンドあるいは遮蔽板（球）（㈱プリード製 PSB-100, Kipp & Zonen 製 CM 121B, EPPLEY 製 SBS など）を全天日射計に取り付けて測定する。連続測定には、太陽の位置によって自動的に遮蔽板の傾きが変わる装置（Kipp & Zonen 製 SOLYS 2, 英弘精機製 STR-22）を用いる（Photo 3.1-3）。



Photo 3.1-3 散乱日射測定の様子。左：SOLYS 2（写真：Kipp & Zonen B. V.提供）、右：STR-22（写真：英弘精機㈱提供）

Tips!

スイス・ダボスにある世界放射基準センターにおいて絶対放射計準器が維持されている。世界気象機関（WMO）の各地区協会毎に WMO 地区放射センターが指定されている。地区放射センターは地区準器を維持し、地区内の放射測器の相互比較をするとともに、5 年に 1 回開催される国際比較観測において、世界準器と比較校正を行っている。アジアの地区放射センターは日本およびインドにある。

Tips 3.1-1

測定方法

全天日射量を測定する場合は、日射がいずれの方位からも遮蔽されない場所を選び、水平に設置する。地表面の放射エネルギー収支やアルベドを測定する場合には、特性の揃った 2 台の全天日射計を上向き・下向きに設置する。上向き・下向き日射計が一体になったアルベドメータも市販されている。ガラスドームの汚れは誤差の原因となるため、定期的にキムワイプ（日本製紙クレシア㈱）、あるいはアルコールと脱脂綿などを使用して清掃する。

一般に日射計の出力は $7\text{mV}(\text{kWm}^{-2})^{-1}$ 程度と小さく、また、外来ノイズを避けるため、長い距離を伝送する場合には、シールド付きの太い信号線を使用する。長期間の観測の際は、誘導雷などによる破損を防ぐため、端子台に避雷器を設置することが望ましい。

Tips!

分解能 0.01mV のデジタルマルチメータ（テスタ）が一台あると、出力の小さい放射計の出力チェックに便利である。

Tips 3.1-2

校正

日射量は、地表面のエネルギー収支を対象とする際、非常に重要な要素であることから、測定精度の維持には細心の注意を払う必要がある。南中時前後時間帯の測定値を信頼性の高い日射計と比較し、校正を行う。(Appendix 3.1-1 を参照。)

以前は受熱板の塗料の劣化によって経年変化するため、2～3 年毎に検定を受けることが推奨されていたが、現在発売されている測器の多くは、経年変化の程度は軽減されている。

3.1.2 長波放射量

概要

大気自身や地表面が射出する、日射と比べて波長の長い放射 (3～100 μm) を長波放射または赤外放射と呼ぶ。

測器

日射計のヒートシンク型と同様に受光面とヒートシンクとの温度差をサーモパイル (熱電堆) で測定する。ただし、センサ風防用のドームはガラスではなく、日射を反射し長波放射のみを透過するシリコンドーム (ウィンドウ) である。また、受感部は Stefan-Boltzmann 法則によって放射エネルギーを射出しているため、ドームを通過する長波放射 R_d [Wm^{-2}] は以下の式で求められる。

$$R_d = \frac{\Delta E}{k} + \sigma T_b^4 \quad (3.1-1)$$

ここで、 ΔE はサーモパイルの出力電圧 [mV]、 k はサーモパイルの感度 [$\text{mV}(\text{Wm}^{-2})^{-1}$]、 σ は Stefan-Boltzmann 定数 ($5.67051 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$)、 T_b はセンサボディの温度 [K] である。また、シリコンドームの使用によって日射吸収によるドーム加熱の影響は軽減されているが、完全ではないことが多く、正確な測定には加熱されたドームによる放射を補正する必要がある。一般的に用いられている補正式は以下の Albrecht et al. (1974) の式である。

$$R_d = \frac{\Delta E}{k} + \sigma T_b^4 + k_d \sigma (T_b^4 - T_d^4) \quad (3.1-2)$$

ここで、 k_d はドーム係数、 T_d はドームの温度 [K] である。

廣瀬・柴田 (2000) が提案した次式 (3.1-3) を用いた値は、2006 年に制定された世界基準による観測値と良い一致がみられた (大河原・高野, 2008)。ただし、一般的には高層気象台が所有する赤外放射計検定装置による検定を行うことは難しいため、上述の 2 式のいずれかを用いる場合が多い。

$$R_d = \frac{\Delta E}{k} (1 + k_1 \sigma T_b^3) + k_2 \sigma T_b^4 + k_3 \sigma (T_b^4 - T_d^4) \quad (3.1-3)$$

ここで、 k_1 , k_2 , k_3 : 赤外放射計の温度に関する係数である。

市販されている主な測器を Table 3.1-2, Photo 3.1-4 にあげる。

Table 3.1-2 代表的な赤外放射計の特性。

機種	メーカー	感度	波長範囲	ドーム加熱によるオフセット	温度依存性	ドーム温度の測定
		[mV(kWm ⁻²) ⁻¹]	[nm]	[Wm ⁻²]	[%°C ⁻¹]	
MS-202	英弘精機	約 4	3,000 ~ 50,000	-	-	有
PIR	EPPLEY	約 4	3,500 ~ 50,000	-	1 (-20 ~ 40°C)	有
CGR 4	Kipp & Zonen	5 ~ 10	4,500 ~ 42,000	4 以下	1 (-20 ~ 50°C)	無
CGR 3	Kipp & Zonen	5 または 7	4,500 ~ 42,000	15 以下	5 (-10 ~ 40°C)	無

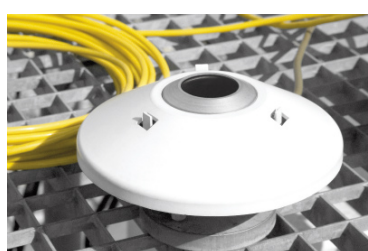


Photo 3.1-4 赤外放射計。左：CGR 4。（写真：Kipp & Zonen B. V.提供），右：EPPLEY 製 PIR。

測定方法

下向きの放射を測定する場合、いずれの方位からも遮蔽されない場所を選び、上向き水平に設置する。上向きの放射を測定する場合は、測器を下向きに水平に設置する。上向き放射の測定の場合は、測定高度にも注意を要する。高すぎると測定対象外の影響受け、低すぎる場合は放射計自信の影響を強く受ける場合がある。

Tips!

PIR 用温度変換器 IRI-01（プリード）は、アンプによってサーモパイルの電圧を 1000 倍に増幅して出力している。アンプの使用は、しばしばノイズの原因となる。また、増幅時の誤差が含まれる場合がある。直流標準電圧発生器（3K02, NEC Avio 赤外線テクノロジー㈱）などを用いて、アンプを経由した場合の出力をチェックしておく必要がある。

Tips 3.1-3

校正

センサの感度は経年変化するため、定期的な検定が必要である。また、上向きと下向きの長波放射量の差は、日射量の場合ほど差が生じないため、器差による影響がないように、十分器差の有無を調べておく必要がある。

3.1.3 正味放射量

概要

日射と長波放射を区別せず、すべての波長域の放射を全波放射と呼ぶ。下向き全波放射と上向き全波放射の差し引きを正味放射と呼ぶ。

測器の種類

正味放射量を直接出力するタイプ（放射収支計）と、下向き・上向き短波放射計および下向き・上向き赤外放射計が一体となったタイプ（4成分放射計）がある。

放射収支計

上下に受光面を持ち、その温度差をサーモパイルで測定するものである（Table 3.1-3, Photo 3.1-5）。風防のために全波長を透過するポリエチレンドームが取り付けられている。従来型（例えば英弘精機製 MF-11）は、ポリエチレンドームが柔らかいため、内部を乾燥空気で加圧している。Q*7（米国 Radiation and Energy Balance Systems, Inc., REBS）は硬質のポリエチレンドームを採用することによって、加圧すること無しに測定することが可能である。また、NR Lite2（Kipp & Zonen）は、ポリエチレンドームの代わりに、受光面をテフロンコーティングすることによって、メンテナンスの労力を軽減している。

Table 3.1-3 代表的な放射収支計

機種	メーカー	波長範囲 [μm]
MF-11	英弘精機	0.3 ~ 30
NR Lite2	Kipp & Zonen	0.2 ~ 100
Q*7	REBS	0.25 ~ 60

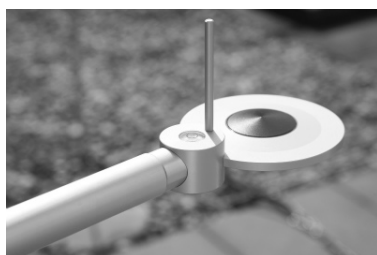


Photo 3.1-5 放射収支計。左：NR Lite2。（写真：Kipp & Zonen B. V.提供）、右：MF-11。（写真：英弘精機(株)提供）。

Tips!

一般に放射計はカラスなどの鳥によって破損する場合があります。特に、ポリエチレンドームを使用する場合は、センサの周辺に針金を数本立てたり、鳥の留まりそうなところに釣り糸を張り巡らせるなどして、防御策をとる必要があります。

Tips 3.1-4

4 成分放射計

比較的小型の日射計および赤外放射計がそれぞれ上向き・下向きに取り付けられたセンサである（Table 3.1-4, Photo 3.1-6）。容易に放射の4成分およびそれぞれを足しあわせることによって正味放射量を求めることが出来るため、近年は、上記の放射収支計に代わって用いられることが多い。

Table 3.1-4 代表的な4成分放射計

機種	メーカー	波長範囲[μm]		赤外放射計の温度センサ
		日射計	赤外放射計	
MR-60	英弘精機	0.305 ~ 2.8	5 ~ 50	受感部
CNR 1（製造終了）	Kipp & Zonen	0.305 ~ 2.8	5 ~ 42	受感部
CNR 2	Kipp & Zonen	0.310 ~ 2.8	4.5 ~ 42	無し
CNR 4	Kipp & Zonen	0.300 ~ 2.8	4.5 ~ 42	受感部
NR01	Hukseflux	0.305 ~ 2.8	4.5 ~ 50	受感部



Photo 3.1-6 4成分放射計。左：CNR 4。（写真：Kipp & Zonen B. V.提供），右：MR-60。（写真：英弘精機(株)提供）。

測定方法

他の放射成分測定と同様、いずれの方位からも遮蔽されない場所を選び、水平に設置する。ポリエチレンドームあるいはセンサの風防部の汚れは誤差の原因となるため、定期的にアルコールとキムワイプなどを使用して清掃する。

ポリエチレンドームは、劣化が早いので、頻繁に交換する必要がある。

データ処理

放射収支計の場合、出力電圧とセンサの感度定数で、正味放射量が求まる。

4 成分の放射収支計，あるいは個別に下向き・上向き短波放射および下向き・上向き長波放射を測定した場合，以下の式によって正味放射量を計算する。

$$R_{\text{net}} = S\downarrow - S\uparrow + L\downarrow - L\uparrow \quad (3.1-4)$$

ここで， R_{net} は正味放射量 [Wm^{-2}]， $S\downarrow$ は下向き短波放射量（全天日射量） [Wm^{-2}]， $S\uparrow$ は上向き短波放射量（反射日射量） [Wm^{-2}]， $L\downarrow$ は下向き長波放射量 [Wm^{-2}]， $L\uparrow$ は上向き長波放射量 [Wm^{-2}] である。

3.1.4 光合成有効放射量（光合成有効光量子束密度）

概要

光合成有効放射（PAR）はクロロフィルが吸収できる 400～700nm の波長帯の放射を指す。光合成有効光量子束密度（PPFD）とも呼ばれる。一般に単位は $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を用いるが， Wm^{-2} への変換が可能である（Appendix 3.1-2）。

測器の種類

測定には，波長別の放射量を測定できる分光放射計や，400～700nm の光のみを測定する光量子計を用いる。

分光放射計

全天候型の分光放射計は，回折格子型の MS-700（英弘精機製，測定波長範囲は 350～1050nm）などがある。MS-700 を使用する際は，測定制御・データ保存のためにパーソナルコンピュータ（PC），もしくはデジタル I/O ポートを持つロガー（米国 Campbell Scientific, Inc. 製 CR1000 など）が必要である。

分光放射計による測定は，リモートセンシング分野でよく用いられる葉の波長特性を示す NDVI などの指標も求めることができるが，このマニュアルでは取り上げない。

光量子計

光量子計は，Table 3.1-5，Photo 3.1-7 に示すように多くの種類がある。日射計のような世界準器および世界基準（World Radiometric Reference, WRR）がないため，各メーカーのセンサ間では，値に差が生じる。同じタイプのセンサ間でも，器差が大きく経年変化が大きいことから，器差，経年変化の影響を補正するため，基準器を設けて定期的に比較する必要がある。

Table 3.1-5 光量子計。

機種	メーカー
LI-190SA	LI-COR
ML-020P	英弘精機
IKS-27	コイト電工
PQS 1	Kipp & Zonen
PAR-01	プリード
SKP215	Skye



Photo 3.1-7 光量子センサ。左：LI-190 (LI-COR)，右：ML020P (英弘精機)。

測定方法

植物キャノピーに入射する光合成有効放射量を測定するためには、キャノピー高より高い位置にセンサを水平に設置する。

植物キャノピーが吸収する放射量 (Absorbed PAR: $APAR$ [$\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$]) は、以下のようにして求められる。リモートセンシングの分野では、植物キャノピーより上の位置で測定された下向きの PAR ($PAR_{\downarrow\text{above}}$ [$\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$]) と反射 PAR ($PAR_{\uparrow\text{above}}$ [$\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$]) の収支を $APAR$ として計算する。

$$APAR = |PAR_{\downarrow}|_{\text{above}} - |PAR_{\uparrow}|_{\text{above}} \quad (3.1-4)$$

農業・森林気象や生態学の分野では、より厳密にキャノピー下端での $PAR_{\downarrow\text{below}}$ [$\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$] と $PAR_{\uparrow\text{below}}$ [$\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$] も考慮して計算することが多い。

$$APAR = (|PAR_{\downarrow}|_{\text{above}} - |PAR_{\uparrow}|_{\text{above}}) - (|PAR_{\downarrow}|_{\text{below}} - |PAR_{\uparrow}|_{\text{below}}) \quad (3.1-5)$$

一般に、閉鎖した着葉期の森林内では $PAR_{\uparrow\text{below}}$ は、非常に小さい値をとる場合が多く、この値を考慮しないこともある。

植物キャノピーの下にセンサを設置する場合、場所による値のばらつきが大きいため、複数点の測定値の平均を求めることが望ましい。

ここでは、最も多く使用されている拡散板が表面に露出しているタイプの LI-190SA (米国 LI-COR,

Inc.)と、コレクターとして拡散板を覆うガラスドームが使われている ML-020P（英弘精機）の使用方法について述べる。

LI-190SA

- 1) センサは電流出力のため、電圧測定ロガーの場合は温度係数の小さい精密抵抗（抵抗値 $1\text{k}\Omega$ 程度、精度 0.1%、金属皮膜または巻き線抵抗）を挿入し、ロガーの直前で電圧に変換する（Fig. 3.1-1）。
- 2) 延長ケーブルが必要な場合は、太めの同軸ケーブル（たとえば規格：RG58A/U）を使用する。
- 3) 防水性のない BNC コネクタが使用されているため、自己融着テープをまき、その上からビニールテープを巻いて防水処理をする（Photo 3.1-8）。できれば、直接水がかからないように簡易な箱に入れるのが望ましい。
- 4) 拡散板は定期的に清掃する。このとき、アルコールは使用してはならない。

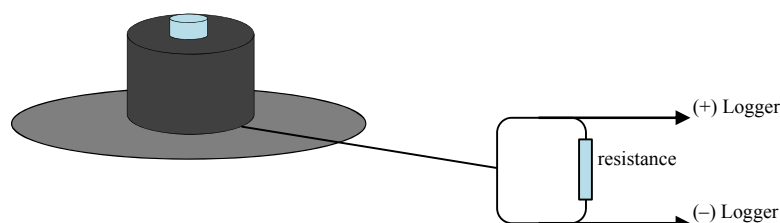


Fig. 3.1-1 LI-190（電流出力）と抵抗による電圧測定の方法



Photo 3.1-8 LI-190 のケーブル延長の方法。左： BNC コネクタ部分の防水のため、自己融着テープを巻く。右：メスコネクタ（延長ケーブル側）とオスコネクタ（センサ側）。

💡 Tips!

LI-190 に延長ケーブルを取り付ける場合、BNC コネクタのメス側（BNC-R）を取り付ける。（Photo 3.1-8）

Tips 3.1-5

 Tips!

このセンサは内蔵した干渉フィルタを用いて透過する波長帯を選択しているが、一般的に干渉フィルタは水分への暴露により劣化することが知られている。このため、高温多湿な条件下で LI-190 を使用する際は、センサ底部（特にケーブル取り付け部分）にシーラントを塗り、防水性を高めると良い。

Tips 3.1-6

 Tips!

気温が低く筐体の温度が下がっている場合、純水で湿らせたキムワイプ（あるいは脱脂綿）で拡散版の清掃を行うと、氷の膜を作ってしまうことがあるので、注意を要する。

Tips 3.1-7

ML-020P

- 1) センサ自体は電流出力であるが、放射計内部に挿入された抵抗によって電圧出力に変換されている。そのため、長いケーブルを使用する場合は、出力の電圧降下に注意する必要がある。
- 2) 定期的にガラスドームをキムワイプ、あるいはアルコールと脱脂綿などを使用して清掃する。

 Tips!

雪の重みによってセンサ設置台が傾くことがある。積雪の多い地域では、設置台が積雪・融雪時にも水準が保たれるよう、通常よりも頑丈なものにし、雪解けの後は水準が保たれているか確認する必要がある。

Tips 3.1-8

校正

器差が大きいため、測定開始前に器差を調べておく必要がある。また、経年変化も大きいので、定期的にメーカ検定を受けるか、基準器を設けてチェックする必要がある。

Appendix 3.1-1: 太陽位置を求めるために必要な値

任意の日時・地点における太陽位置を求めるために必要な値の計算方法を示す。

均時差 Ω [h]：平均太陽時（天の赤道を等速で移動すると仮定したときの時角）と真太陽時（実際の太陽の時角）との差。様々な推定式がある（松本，2005）が，ここでは以下の簡易式を例に示す。

$$\Omega = \frac{1}{60} [0.528276 \cos(\omega J) - 3.354103 \cos(2\omega J) - 0.086077 \cos(3\omega J) - 0.137550 \cos(4\omega J) \\ - 7.341887 \sin(\omega J) - 9.338832 \sin(2\omega J) - 0.304815 \sin(3\omega J) - 0.170209 \sin(4\omega J)]$$

(A3.1-1)

ここで， $\omega = 2\pi/365$ or $2\pi/366$ とし， J は 1 月 1 日 0 時 0 分からの積算日数（実数，たとえば 1 月 1 日 12:00 は $J=0.5$ ）である。

*1998 年～2005 年までの 8 年間の理科年表データから算出

時角 ζ_a [°]：太陽の南中後，地球が地軸の周りを回転した角度。南中時の時角は 0°，南中前は負，南中後は正の値を取り，1 時間に 15° の割合で増加する。

$$\zeta_a = 15(t_s - 12 + e) + \gamma - \gamma_0$$

(A3.1-2)

ここで， t_s は標準時における時刻 [h]， γ は経度 [°]， γ_0 は子午線 [°] である。

太陽赤緯（日赤緯） δ [°]：天球上の太陽の位置を表す。春秋分に $\delta=0^\circ$ ，夏至に $\delta=-23.44^\circ$ ，冬至に $\delta=23.44^\circ$ 。ここでは以下の簡易式を例に示す。

$$\delta = 0.38145 - 22.95333 \cos(\omega J) - 0.38122 \cos(2\omega J) - 0.153343 \cos(3\omega J) \\ - 3.77859 \sin(\omega J) - 0.034839 \sin(2\omega J) - 0.078079 \sin(3\omega J)$$

(A3.1-3)

*1992 年～2005 年の理科年表データから算出

南中時刻 t_a [h]：観測地点で太陽が真南になる時刻。

$$t_a = 12 - \frac{(\gamma - \gamma_0)}{15} - \Omega$$

(A3.1-4)

天頂角 β [°]：天頂と太陽のなす角度。

$$\cos \beta = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \zeta_a$$

(A3.1-5)

ここで， φ は緯度 [°] である。

太陽高度 ζ_s [°]：観測地点から見た太陽と地平線の角度。

$$\sin \zeta_s = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \zeta_a$$

(A3.1-6)

Appendix 3.1-2: 単位の変換

単波長のモル光子束密度 F_{Q_λ} [$\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$] と放射束密度 F_{E_λ} [Wm^{-2}] との関係は (A3.1-7) 式で表される。

$$F_{Q_\lambda} = \frac{\lambda \cdot F_{E_\lambda}}{A \cdot h \cdot c_1} \quad (\text{A3.1-7})$$

ここで、 λ は波長 [m]、 A はアボガドロ数 ($6.023 \times 10^{23} \text{mol}^{-1}$)、 h はプランク定数 ($6.626 \times 10^{-34} \text{Js}$)、 c_1 は光速 ($2.9979 \times 10^8 \text{ms}^{-1}$) である。したがって、PAR 波長域で積分した光子束密度 F_{Q_λ} [$\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$]

と放射束密度 F_{E_λ} [Wm^{-2}] との関係は (A3.1-8) 式で表される。

$$F_Q = 8.36 \times 10^{-9} \int_{400}^{700} \lambda F_{E_\lambda} d\lambda \quad (\text{A3.1-8})$$

光子センサーで測定された PAR は、積分された値のみで各波長の値はわからないため、放射束密度への変換は、McCree(1972)などの実験値から便宜的に定数 α (自然光の場合 4.24~4.57) を与えて (A3.1-9) 式で計算されることが多い。

$$F_Q = \alpha \times F_E \quad (\text{A3.1-9})$$

しかし、大気の状態等によって波長毎の放射エネルギーは変化するため、定数は一定ではないことを念頭に置く必要がある。