

# HEMIPHOT

全天写真から  
植生の特徴、光、光の質を  
解析するプログラム

H. ter Steege

訳：洲崎燈子 早稲田大学教育学部生物学教室

Tropenbos Documents 3

まえがき .....	3
<b>1. 序文 .....</b>	<b>4</b>
<b>2. 方法 .....</b>	<b>5</b>
2.1 全天写真の撮影法 .....	5
2.2 写真の取り込みと画像処理 .....	6
2.3 画像の解析 .....	6
2.3.1 林冠植被率 .....	6
2.3.2 葉面積指数 .....	7
2.3.3 光 .....	9
2.3.4 光の質 .....	13
2.3.5 ギャップサイズ .....	15
2.4 プログラムの有効性を確認するための方法 .....	16
2.4.1 光の測定 .....	16
2.4.2 葉面積指数と光の質 .....	17
2.4.3 ギャップサイズ .....	18
<b>3. 結果と考察 .....</b>	<b>18</b>
3.1 光 .....	18
3.2 葉面積指数 .....	20
3.3 光の質 .....	21
3.4 ギャップサイズ .....	21
<b>4. 結論 .....</b>	<b>22</b>
<b>5. HEMIPHOT を使うには？ .....</b>	<b>23</b>
5.1 必要なハードウェア .....	23
5.2 ソフトウェアとインストール .....	23
5.2.1 メインメニュー .....	24
5.2.2 計算メニュー .....	24
<b>6. 引用文献 .....</b>	<b>27</b>
<b>7. 省略記号 .....</b>	<b>27</b>
付録 1 ギャップが天球上に占める面積の算出法 .....	29
付録 2 半影のジオメトリー .....	29
付録 3 TAI と BAI からの LAI の推定 .....	30

## まえがき

5年間のガイアナ滞在の間、私は森林で複数の長期実験の指揮を行った。光の測定は、ある実験では重要なファクターであり、他の場合には付加的な情報を与えてくれた。長期継続実験では、光条件が変化することが問題となる。その解決法のひとつは、データ・ロガーに複数のセンサーを接続して使用することである。しかし、例えば40ほどの地点で年間のデータをとる必要がある場合、この方法では非常に時間と費用がかかる。そこで私は全天写真を用いることにした。私たちは Robin Chazdon から SOLARCALC を得て、最初の解析に使った。しかし、SOLARCALC を正しく使用するにはいくつかの問題があった。また SOLARCALC は Macintosh 対応のソフトであり、ガイアナでは Macintosh を使用することが出来なかったため、私は 1991 年に DOS 対応のプログラム、PPFDCARC を作った。私たちはこれで、ハンディスキャナーで“ビデオに取り込んだ画像”を解析することができた。1992 年に新しいバージョンの PPF2 を作成したが、これは多少の新しいオプションに、全く新しいオブジェクト指向のユーザーインターフェースを加えたものだった。そして 1993 年に開発された最終バージョン、HEMIPHOT ではユーザーインターフェースが改良され、新しい光の算出法が加えられ、計算時間が短縮された。Borland の Turbo6 と 7 のアセンブラ、BASM の使用がこれに貢献した。HEMIPHOT の最新バージョンは Borland の Pascal で作成され、80286 モードでコンパイルされた。そのためこのプログラムを走らせるには、CPU が 80286 以上の VGA(640×480 ドット)の互換モニターを持つコンピューターが必要である。また、数値演算プロセッサがついていることが望ましい。

(謝辞：省略)

PPFD を PPF2、そして HEMIPHOT に改良し、付属資料を書いている間に、全天写真の解析に関する情報が多く出版された。そのためこのマニュアルは当初予定していたものより小さくなった。現在は全天写真を解析するためのプログラムが複数存在する (CANOPY, RICH 1989; SYLVA, Becker et al. 1989; SOLARCALC, Chazdon & Field 1987 など)。これらのプログラムは全て、太陽軌道と大気物理、魚眼レンズのジオメトリーに関する同じ法則に基づいて作成されている。全ての手法と LAI を算出するプログラムは、光が林冠の上部から指数関数的に減少するとして計算されている。HEMIPHOT はその点では、これらのよく知られたテーマのヴァリエーションである。しかし HEMIPHOT は、生態学者が興味を持つ PPF、LAI、R/FR 比、ギャップサイズなどの解析が一つのプログラムに組み合わさっているという点で他のプログラムと異なっている。HEMIPHOT は更に、グレイスケールの写真を解析して半影効果を推定できる。写真は PCX ファイルで保存することで、元のデータとは独立したものになる。

## 1. 序文

光の測定は森林生態学に幾つかの問題を提示した。光の測定は大量の設備と時間を要し、通常はどちらも不足している。PPFD の日変化を記録するためには、光量子センサーを接続したデータ・ロガーを使用するのが理想的である。この手法は瞬間値を記録するときにも使える。林内と、林冠上もしくは近隣の裸地で PPFD を測定することで相対光量子密度が得られる。光斑は周囲の散乱光よりずっと強い光である上、空間的にも時間的にも不均一に出現するため(Raich 1989, Smith 1992)、この手法を用いて測定することが困難である。更に、天候は非常に短時間で変化するため、測定は林内と林外で同時に行われなければならない。

PPFD を算出する他の方法は全天写真を使うことである。全天写真は 180 度の視野を持つ魚眼レンズによって撮影され、天球を平面上の円に投影する。このレンズについて最初に記述したのは Hill(1924)で、彼はこのレンズを雲が覆う面積と雲の高さの推定に用いた。Evans & Coombe(1959)が最初に、全天写真から林内の光を推定するための理論と方法論を発展させた。Anderson(1964)はこれらの技術を更に定量化した。その中には散乱光と直射光を分けて評価するための方法が含まれている。彼女はまた、全天写真からの算出結果はセンサーを用いた測定結果に匹敵することを示した。光以外にも、LAI や葉の角度の分布といったパラメーターが全天写真から推定できる(Anderson 1981, Chan & Chartier,1972)。

これらの理論に基づき、非常に時間のかかる手動的な解析法(Anderson 1964,1966, Madgwick & Brumfield 1969)から半自動的な解析法(Bonhomme & Chartier 1972, Bonhomme et al. 1974)、そしてコンピューターを使った解析法(Becker et al. 1989, Chan et al. 1986, Chazdon & Field 1987, Rich 1990)まで、さまざまな手法が発表された。これらの手法の中には、高価な、あるいは非常に特殊なスキャナーを必要とするものもあった。

HEMIPHOT は次の三点を主な目標として開発された。1)MS-DOS 環境下で簡単に使えること、2)スキャナーと独立した標準的な画像ファイルを使用すること、3)できるだけ多くの全天写真の解析方法を含むこと。そしてこのプログラムは、CPU が 80286 以上の IBM 互換機で走り、設置型スキャナー、ハンディスキャナー、携帯用ビデオカメラ、デジタルカメラ、作画用ソフトのいずれでも作成可能な PCX ファイルを読みこめる。またこのプログラムは、白黒二階調あるいはグレイスケールの画像から、水平面か斜面上の植被率、直射光と散乱光を算出し、LAI、葉の角度の平均値、R/FR 比、ギャップサイズほか多数の画像解析を行うことができる。

以下に写真撮影、スキャニング、解析の方法について説明する。フィールドでの測定

方法にも触れる。結果の項では理論値と実測値を比較する。第5章にプログラムの説明と使い方の全てを示す。

## 2. 方法

### 2.1 全天写真の撮影法

全天写真は魚眼レンズ(CANON, NIKON, Olympus, Soligor 他)の会社のものである)を用いて撮影される。私たちは Sigma の 8mm、f2.8 のレンズを使用した。魚眼レンズは 180 度の視野を持ち、等角、もしくは極点投影(Polar projection)する (Hill 1924, Herberd 1987)。投影面積は放射距離と天頂角の直接的な関係によって特徴づけられる(図 1)。魚眼レンズコン

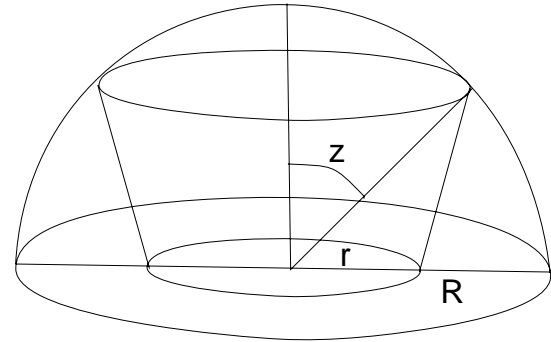


図 1 天球の等距離投影： $z/90 = r/R$

バーターを使うと視角が狭められ、歪みが生じるので(Anderson 1971, Evans et al. 1974, 未発表)用いるべきではない。高価ではあるが、真に等角の 180 度の魚眼レンズを用いるべきである。撮影には通常の白黒フィルムを使う。Kodak と Ilford のどちらを使っても解析に耐える良質でクリアな写真が撮れる。フィルム感度は ASA25-100(200)のどれでもよい。空と林冠が明瞭に区別される写真を撮るためには硬調のフィルムを使うとよい。

カメラは水準器を使って三脚に水平に固定し、どちらかの側を磁北か真の北に合わせる(カメラの近くでコンパスを使うと狂いが生じるので注意する)。写真の上面か側面を北に合わせるとその後の作業が楽である。

普通の写真と同じように、露出時間と焦点深度の間にはトレードオフが存在する。林内での撮影では露出時間を 1/125 秒程度に短くする。シャッター速度が 1/60 秒より遅いと、葉や枝の動きで写真が不鮮明になる。絞りを絞ると焦点深度が深くなるが、その分シャッター速度を遅くしてはならない。林冠高の高い林では絞り 3.5 か 5.6 が適切だが、低い林だとこれでは不十分だろう。私はシャッター速度 1/125 秒程度にして絞りを調節し、殆どの写真を撮影した。それには Olympus のカメラ、OM10 の半自動モードを利用した。また、林冠の小さな開口部の輝きを減少させるため、林外の空の明るさに合わせてシャッター速度と絞りを設定し、その組み合わせを林内で用いる方法を勧める人もいる。この方法を用いると林内部分は露出不足、林外部分はわずかに露出過剰になる。露出不足で撮影すると、林冠の小さな開口部が過大評価される後背ハロー現象 (Hutchison et al. 1980)も抑制できる。この方法を使うとシャープな写真が撮れるが、半自動モードで撮影された写真と大きな違いは認められなかった。どんな場合でも、シャッター速度と絞りの組み合わせを複数試すことで、望ましい結果が得られるだろう。

写真撮影は、この仕事をした全ての研究者が強調してきたように、空が均一に曇った日か、早朝もしくは夕方に行われなくてはならない。晴れて太陽が天頂近くにあると、林冠の小さな開口部にきらめきが生じる。中程度の、形のわかるような雲のかかった日は、たとえ太陽が厚い雲の後ろに隠れていようとも、空から不規則な光がさしてくる。このような条件で白黒フィルムを使った撮影を行うと、後で林冠の明るい部分と空の暗い部分が区別しにくい写真になることがある。

フィルム現像と紙焼きの段階で大きな誤差が生じる可能性がある。これらの手順は可能な限り標準化する必要がある。

## 2.2 写真の取り込みと画像処理

適当な写真が撮れたら、次はその写真をコンピューターで扱える画像に変換する。100-1200 dpi の解像度のスキャナーが利用可能である。スキャナーは普通、設置型 (Cutie, Hewlett Packard, Thunderscan 社製など) とハンディタイプ (Cutie, Genius, Logitech 社製など) に大別される。ハンディスキャナーは使用に当たって多少練習が必要だが、設置型よりずっと安価である。ビデオ変換器でも適切な画像が得られるが (Becker et al. 1989, Mitchell & Whitmore 1993 を参照のこと)、より高価である。TIF、GIF、PCX といった標準的なフォーマットで保存すると、画像を必要なサイズに小さくできる。そしてこれらのフォーマットの画像は、さまざまな商業用パッケージに含まれるソフトウェアで作成できる。

殆どどのスキャナーで明暗のレベルを補正し、イメージを白と黒に二値化することができる。イメージの取り込みに当たって解像度を上げるには、16、32 もしくは 256 階調のグレイスケールで取り込むとよい。また、400 dpi の二階調の白黒画像からも 100 dpi のグレイスケールの画像を得ることができる。

現在はフィルムスキャナーやビデオ変換器を使って、ネガフィルムの取り込み(と反転)を行うこともできる。この方法を使うと紙焼きの段階を省略することができる。デジタルカメラと携帯用ディスクユニットを使えばフィルム現像の段階も省けることになり、瞬時にしてコンピューター画像が得られる。しかし現時点でこれらの機器は 10000 米ドルするため、利用は難しい。

## 2.3 画像の解析

### 2.3.1 林冠植被率

天球からの放射は、主半径( $R$ 、図 1 参照)を 89 の部分に分割する 89 の同心円から成り立つと考えられる。これらの円形のベルトはそれぞれ天球の 1 度の弧に相当する。全てのベルトは面積が異なり、天頂に近づくにしたがって小さくなる。全天写真から林冠植被率を得るには、89 のベルトで植被率を計算する必要があるが、天球上の面積から実際

の面積を算出するための補正を行わなくてはならない。円形のベルトの面積は下部の角度  $\alpha_1$  と上部の角度  $\alpha_2$  によって求められる。

$$A_{\alpha_1-\alpha_2} = 2\pi \cdot R^2 \cdot (\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1) \quad (1)$$

林内では、この関係を用いてギャップが占める面積を概算することができる(付録 1 参照)。天球の全面積は  $2\pi R^2$  になることから、89 のベルトによって与えられた空の断片は次式によって求められる。

$$A_\alpha = 2\pi \cdot R^2 \cdot [\sin(\alpha + 0.5) - \sin(\alpha - 0.5)] \quad (2)$$

$\alpha$  は 0.5 から 89.5 の範囲で変化する。これらのことから、ある場所の全林冠植被率を求めるためには、それぞれの円形のベルトを覆う植被の面積を積算する必要がある。

$$\text{Canopy cover} = \sum_{\alpha=0.5}^{\alpha=89.5} [C_\alpha \cdot A_\alpha / A_{\text{tot}}] \quad (3)$$

この方法で算出される林冠植被率は天球を覆う面積であり、群集生態学でいう植被、つまり覆われた面を平面に投影した面積と正確には一致しない。林冠植被率はそれ自体独立した、林冠の特性を強く示す値であり、調査地の位置には影響されない。林冠植被率を算出するために、地理的な北を正確に合わせる必要はない。

### 2.3.2 葉面積指数

植生の葉面積指数(LAI)は光合成のモデリング、降雨の遮断、蒸発など多くの研究で重要である。植生の LAI は単位地表面積当たりの葉面積合計値と定義される。LAI を正確に測定することは、特に森林では困難である。これまでにいくつかの手法が発表されている(Norman & Campbell 1989)。全ての葉を刈り取るような直接的な測定法は間違いなく最も正確だが、圃場で行うとしても非常に労力がかかるし、熱帯林では殆ど非現実的である。間接的な測定法の多くは、葉群内の葉間隙の測定に基づいている。光は葉を透過するチャンスがあると、植生を通過して射しこむ。光が透過できるかどうかは植生を通過する距離、葉群密度、葉方位角によって決まる。もし葉が小さくてランダムに分布し、特定の方位に傾いておらず、光を通さないと仮定すると、天頂角(zenithal view angle)  $z$  における葉間隙は LAI と相関を示す。しかし、与えられた角度における葉間隙は、葉傾角分布に強く依存する。例えば、葉傾角が垂直な群落では  $z = 0$  度で葉間隙の割合が高くなるが、LAI の値が近くても葉傾角が水平な群落では、同じ天頂角における葉間隙の割合はずっと低くなるだろう。 $z = 67.5$  度における葉間隙(T)は葉傾角による影響を受け

にくく (Bonhomme & Chartier 1972, Norman & Campbell 1989, Welles & Norman 1991)、次に示すように LAI との相関がある (Bonhomme & Chartier 1972)。

$$LAI = 1.1 \cdot -\ln(T_{67.5}) \quad (4)$$

全天写真では、これが LAI を推定する最も単純な方法である。しかし、67.5 度における誤差は、レンズを通して見た植生全体の LAI の推定に影響するだろう。LAI をより正確に推定するためにより多くの天頂角を使用することや、平均葉傾角を推定することもできる。HEMIPHOT では、Welles と Norman (1991) による Li-2000 Plant Canopy Analyzer を使った手法を実行できる。すなわち Plant Canopy Analyzer のように、7、23、38、53、68 の 5 つの天頂角が使用できる。15 度の幅を持つ、それぞれの天頂角における葉間隙(開度、T)は、天球の開度の合計値と類似した方法で算出でき(式 1-3)、LAI の合計値は次式から求めることができる (Welles & Norman 1991)。

$$LAI = 2 \cdot \sum_{z=7}^{z=68} [-\ln(T_z) \cdot W_z / S_z] \quad (5)$$

z は上記の 5 つの値をとり、 $W_z$  は面積の補正項、 $S_z$  は通過距離の逆数  $1/\cos\theta_z$  である。

この方法を用いる場合の制限については Welles & Norman (1991) を参照されたい。

HEMIPHOT には、5 つの天頂角における開度から LAI を推定する手法が他に 2 つ含まれている。ひとつは葉傾角を 3 段階に分けた逆行列を使用し、もうひとつは葉傾角分布が楕円形であるとして逆行列を使用している。どちらの手法も Norman & Campbell (1989) に詳しく記述されている。HEMIPHOT では彼らの林冠構造解析の BASIC のプログラムを Pascal に書きなおしたものが使用されている。



### 2.3.3 光

#### 太陽のジオメトリー

太陽軌道は標準天球三角法(standard spherical trigonometry)(図 2、List 1984, Gates 1980 参照)から算出できる。地表面と太陽軌道のなす角度である太陽高度( $\alpha$ )は次式で求められる。

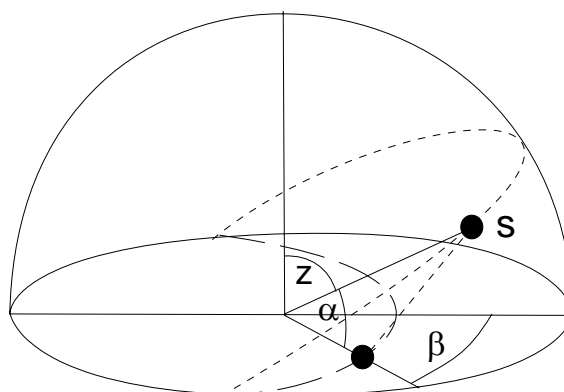


図 2 太陽の位置とその投影及び角度<sup>1</sup>

$$\sin \alpha = \sin \Psi \cdot \sin \delta + \cos \Psi \cdot \cos \delta \cdot \cos \eta \quad (6)$$

ここで  $\Psi$  は緯度、 $\delta$  は太陽の赤緯、 $\eta$  は時角を示す。太陽高度はしばしば仰角(Angular elevation)や太陽角(solar angle)とも呼ばれるが、 $1/2 \pi - z$  ( $z =$  天頂角)に等しく、 $\sin \alpha$  は  $\cos z$  に等しい。太陽と南北を通る線のなす角度、太陽方位( $\beta$ )の正弦および余弦は次式によって求められる(Campbell 1981)。

$$\begin{aligned} \sin \beta &= -\cos \delta \cdot (\sin \eta / \cos \alpha) \\ \cos \beta &= -(\sin \delta - \sin \Psi \cdot \sin \alpha) / (\cos \Psi \cdot \cos \alpha) \end{aligned} \quad (7)$$

太陽の赤緯は 1 年のうちのどの日かで決まる変数であり、Campbell(1981,1985)によると次式で求められる。

$$\delta = 0.39785 \cdot \sin[4.869 + 0.0172 \cdot \text{day} + 0.03345 \cdot \sin(6.224 + 0.0172 \cdot \text{day})] \quad (8)$$

ここで  $\text{day}$  はユリウス日、 $0.0172$  ( $2\pi/365$ )はユリウス日を日角に変換する定数である。赤緯は夏至、6月21日の23.5から冬至、12月21日の-23.5の範囲で変化する。夏至と冬至の日の値を除き、全ての赤緯の値が年に2度現われる。3月21日の春分と9月21日の秋分の日、赤緯の値は0になる。

#### 直射光

直射光の推定にはいくつかの段階を踏む必要がある。まず最初に、大気圏外に到達する日射量を求める必要がある。その日射量、太陽定数( $S_0$ )は太陽放射の量と太陽と地球

<sup>1</sup>  $\alpha$ は訳者が追加

との間の距離によって決まり、ほぼ  $1360\text{Wm}^{-2}$  に等しい(Gates 1980)。しかし太陽のまわりを回転する地球の軌道は円というより楕円形で、太陽はその楕円軌道の正確な中心には位置していないので、大気圏外に到達する日射量は 1 日毎に計算しなければならない(Kreith & Kreider 1978)。

$$S_{out} = S_c \cdot [1 + 0.034 \cdot \cos(2\pi \cdot day/365)] \quad (9)$$

従って  $1360\text{Wm}^{-2}$  の誤差は±3.4%となる。次に、大気中での吸収および拡散による日射の減少量を推定しなければならない。透過率と大気を通過する距離が、光に垂直な面が受ける直射光の量に影響している(Gates 1980)。

$$S_{no} = S_{out} \cdot \tau^M \quad (10)$$

ここで  $\tau$  は光が最短距離(1 光学的空気量、南中時)の大気を通過するときの透過率である。 $\tau$  は通常 0.5 から 0.8 の間の値をとり(ただし熱帯では 0.4 以下となりうる、Whitmore et al. 1993)、多くの場合 0.6 程度で(Gates 1980)、 $M$  は空気を通過する相対的な距離を表わし、南中時の 1 から日の出および日没時の 36 まで変化する(List 1984)。 $M$  は太陽高度が 30 度以上(天頂角が 60 度以下)の場合、 $1/\cos(z)$  で正確に求めることができる。List(1984、表 137)は太陽高度が 30 度以下と、それ以外の全ての角度をとった場合のデータを示している。 $M$  はまた、太陽高度がどの値をとっても次式から正確に算出できる(Kreith & Kreider 1978)。

$$M = \sqrt{1229 + (614 \cdot \sin \alpha)^2} - 614 \cdot \sin \alpha \quad (11)$$

$M$  は高度によって補正できる(Kreith & Kreider 1978)。

$$M_h = M_0 \cdot P_h / P_0 \quad (12)$$

ここで  $P_0$  は海面の高さの気圧、 $P_h$  は高度  $h$  における気圧を示す。

$P_h/P_0$  は国際航空委員会、ICNA の標準大気から算出される(List 1984、表 64)。

$$P_h/P_0 = [(288 - 0.0065 \cdot h) / 288]^{5.256} \quad (13)$$

空気量は明らかに気圧の影響を受けているが、HEMIPHOT ではその効果に関しては省略している。最後に、地表面における直射光の量( $S_{dir}$ )を求めるにはコサイン補正を行うことが必要で、それは次式で表わされる。

$$S_{dir} = S_{no} \cdot \sin \alpha \quad (14)$$

なお、全ての値は短波放射(300-3000nm)を  $\text{Wm}^{-2}$  で表わしたものである。熱帯では日射のほぼ 51%が PAR であるが(400-700nm, Stigter & Musabilha 1982)、厚い雲の下では 61%まで高くなる。 $\text{Wm}^{-2}$  に 4.6 を掛けると  $\mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  の概算値になる(McKree 1981)。

上記の方法によって直射光の量を算出する。そして、その日の太陽軌道に沿って動く太陽の位置を通常 1 分から 3 分間隔で計算して、その位置のピクセルが開放されているか(白)覆われているか(黒)を決める。ここではもし太陽が遮られていなければ直射光が入り、林冠によって太陽が遮られれば直射光は入らないと仮定している。雲、半影の効果、林冠下での光の散乱の影響は無視されている。太陽の投影面積は 0.5 度で、これは直径 360 ピクセルの画像のほぼ 1 ピクセルに相当するので、かなり正確な推測が行えるといえる(Chazdon & Field 1987、しかし後述の半影効果を参照)。

### 散乱光

散乱光は、直射光が大気によって拡散されることで生じる。晴天日の空における光の拡散は曇りの日とは異なるがこれは光に対する性質が異なるためである(Gates 1980 参照)。ほとんどの場合、晴天下で地表面が受ける散乱光の量は、同じ地表面が受ける直射光の量に 15% プラスした量だとする推定法が適用できる(Gates 1980)。しかし、太陽高度が低い場合は散乱光の量はもっと多くなるだろう(50%以上)。従って、次式から晴れた、塵のある日の散乱光の量をより正確に(経験的に)推定できる(Liu & Jordan、Gates 1980 より引用)。

$$S_{dif} = S_{out} \cdot (0.271 - 0.294 \cdot \tau^M) \cdot \sin \alpha \quad (15)$$

Goudriaan(1977)も同様の観察を行っている。散乱光は天球に均一には分布していない(Gates 1980)。しかし Standard Overcast Sky(SOC)は、この状態をそれほど正確さを失うことなく単純化できる。SOC はある天頂角  $z$  からの光( $I_z$ )を次式で示す(Anderson 1971)。

$$I_z = I_Z \cdot (1 + 2 \cdot \cos z) / 3 \quad (16)$$

SOC は、天頂からの光が側方からの光の 3 倍明るいとしている。Uniform Overcast Sky(UOC、Monsi & Saeki 1953)は、全ての方向から同じ強さの光がくるとしている。ギャップが主として上方にあり、天頂に散乱光だけが存在するとき(しばしば高緯度で起こる)、どちらのモデルを採用するかで受光量の推定値は大きく異なる(例: Madgwick & Brumfield 1969)。実際には、殆どの散乱光は太陽の投影面の 10 度付近から発しており、SOC と UOC はどちらも太陽高度の影響を考慮していないため、瞬間的な散乱光の推定には適切でないとする指摘もあるが(Hutchison et al. 1980)、長期間のデータを平均すれば

誤差は小さくなる。

全天写真の解析では、Anderson(1964)に基づき、しばしばindirect(diffuse) site factor(ISF)、direct site factor(DSF)、total site factor(TSF)といった用語が用いられる。これらの数値は、林内の直接、間接、そして全日射量の、林冠上の値に対する相対値を示している。DSF、ISF、TSF はしばしば強い相関を示す(Turner 1990, Whitmore et al. 1993, ter Steege 1993, ter Steege et al. 1993)。indirect site factor は散乱光を算出する際に重要である。

ある場所の indirect site factor、最終的に散乱光の量( $D_u$ )は UOC で

$$D_u = S_{dif} \sum_{\alpha=0.5}^{\alpha=89.5} [C_{\alpha} \cdot (A_{\alpha} / A_{tot}) \cdot \sin \alpha] \quad (17)$$

となり、SOC では

$$D_u = S_{dif} \sum_{\alpha=0.5}^{\alpha=89.5} [C_{\alpha} \cdot (A_{\alpha} / A_{tot}) \cdot (1 + 2 \sin z) \cdot \sin \alpha] \quad (18)$$

となる。群落内では、葉による光の拡散(反射と透過)によっても散乱光が生じる。閉鎖した群落内では散乱光の量はかなり多くなる(43%以上、Mitchell & Whitmore 参照)。散乱光の増加を含む複層林冠モデルは存在するが(例、Goudriaan 1977)、HEMIPHOTには含まれていない。HEMIPHOTはシンプルな減衰モデルを使って透過光を推定している(下記を参照)。

最終的に、直射光に散乱光を加算して全日射量を算出する。2分毎の測定値を積算し、 $2 \times 60$  倍(60秒 $\times$ 2(分))して1日の全日射量を求める。

### 半影

太陽は完全な点光源ではない。太陽は地球から  $149 \cdot 10^9$  m の距離にある半径  $696 \cdot 10^6$  m の球であるから、天球上でほぼ 0.5 度の投影面となる。半影効果は太陽が完全な点光源ではないために生じる(例、Anderson & Miller 1974, Miller & Norman 1971)。半影効果を見無視すれば、光の強さは直射光ないし直射光に散乱光を加算するだけで求めることができる。直径 300 から 400 ピクセルの画像では、1 ピクセルはほぼ太陽の投影面と同じ大きさになる。太陽があるピクセルから次のピクセルに移動すると、そのピクセルは完全に現われるか、植生によって完全に遮られる。PPFD の日変化は、データロガーでとった値と比較的よく一致するが(Chazdon & Field 1987)、ここでは太陽の投影面の大きさから生じる段階的な変化が無視されている。さらに低い解像度で取り込まれた白黒写真では、密な林冠の小さな開口部がつぶれてしまう。

林床の光斑は全光から成り立ち、段階的に本影(umbra)に変化する。その段階的に変化する半影の範囲では、光の強さ( $Dir_{pen}$ )はその地点で“見える”太陽の投影面積によって

決まる(Miller & Norman 1971)。

$$Dir_{pen} = Dir \cdot [1 - (U \cdot \sqrt{1-U^2} - \arccos(U)) / \pi] \quad (19)$$

半影面積の大きさは林冠高によって決まるが、林冠の開口部の面積からは影響されない(付録2参照)。全光(numbra)を受ける面積は林冠の開口部の面積と林冠高の両方の影響を受ける。“光斑”は林冠の開口部の面積と林冠高の比、D:Hが0.01なら、全て半影によって構成される(付録2、Smith et al. 1989)。

写真の解析に半影効果を含めることを考慮するなら、400 dpi の 2 階調の白黒の画像から 100 dpi の 256 階調のグレイスケールの画像を得ることができる。この 256 階調のグレイスケールの画像は、HEMIPHOT で計算のため 16 階調(0-15)に変換される。もしあるピクセルが 5 の値をとるなら、そのポイントでは太陽の 5/15 番目の部分を見ることができる。太陽の投影面積を受光量と関連づけることも可能である(式 19、図 3)。光の強さと、葉の縁で直線的に遮られた太陽の投影面積との関係は直線的ではないが(式 19)、直線で回帰しても全体的に見ればそれほど大きな誤差はない。その上、開口部の縁は必ずしも直線で構成されているわけではなく、複数の葉で構成されているかもしれない。従ってあるピクセルが  $x(0 \leq x \leq 15)$  の値をとるとき、ある時間と場所で林冠を通る光の量はほぼ  $S_{dir} \cdot x / 15$  となる。

### 2.3.4 光の質

群落内の光の質は、林冠上やギャップ内の光の質と著しく異なる(例、Schulz 1960、Lee 1987、Brown 1993)。この点で最もよく使われている変数は赤色光(655-665nm)と遠赤色光(725-735nm)の光量子の比、R/FR 比である。光の質の違いは、特に先駆種の形態(Smith 1982)と発芽(Vasques-Yanes & Olozco-Segovia 1984)に大きく影響する。

光は植生を通過するとき、葉によって遮られる。植生が、傾きが水平な葉で形成された(n)層の小さな葉層で構成されており、全ての葉層は LAI の合計値に対して同じ比をとり、その葉面積  $L=LAI/n$  になると仮定する。これらの葉層によって光線が遮られない確率は  $1-L$  となる。 $n$  層の下まで光が遮られない確率は  $(1-L)^n$ 、もしくは林冠から  $n$  層目の光強度の林冠上の値に対する比は次式で示される。

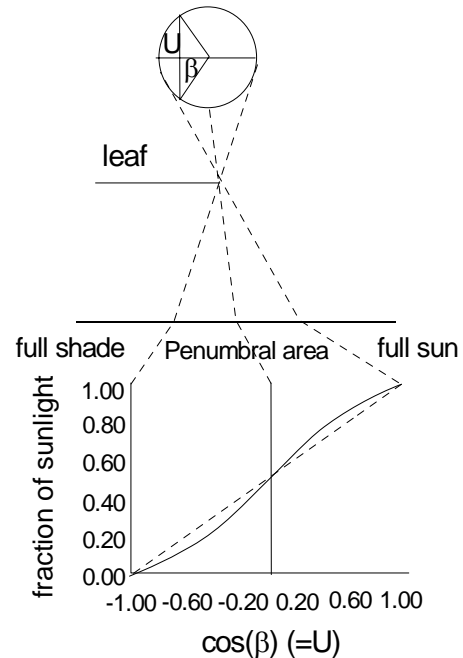


図 3 半影内の位置の関数としての光強度

$$I_n = I_0 \cdot (1 - L)^n \quad (20)$$

これを指数回帰式で示すと次式のようなになる。

$$I_i = I_0 \cdot e^{n \cdot \ln(1 - L)} \quad (21)$$

通常この式は、次の形で表わされる(例、Monsi & Saeki 1953)。

$$I_i = e^{-k \cdot LAI} \quad (22)$$

もし葉が全く光を通さないと仮定するならば、光は植生の LAI に対して指数関数的に減衰し、光の質は変化しない。しかし後者は明らかに正しくない。葉は多少の光を通す(そして同様に多少の光を反射する)。その上、透過と反射は波長依存である。赤色光および青色光は緑色光および遠赤色光よりもずっとよく吸収される(例、Gates 1980、Lee 1987)。林内の光は林冠上と比較して、緑色光を除くと遠赤色光に富んでいる。葉における赤色光域および青色光域の透過率はほぼ 2-5% で、遠赤色光の透過率は 55% 以上である(例、Goudriann 1977、Gates 1980、Lee 1987)。このことから光が葉層を通過するに従って、遠赤色光の比率が増大する。もし林冠が、小さくてランダムに分布する葉で構成されているとすると、x 枚(x は 0 から 10 以上)の葉を通過する光線の変化はポアソン級数に従い、光が x 枚の葉によって遮られる確率は次式によって示される。

$$P_x = e^{-\mu} \cdot \mu^x / x! \quad (23)$$

また、葉層を通過する光の総量は次式によって示される。

$$T = \sum_{x=1}^{x=n} [e^{-\mu} \cdot (\tau \cdot \mu^x) / x!] \quad (24)$$

Alexandre(1982)も同様の結論を示している。 $\mu$  は上記に示したように LAI に従って変化する。Alexandre は、葉が全てのスペクトルの光に対して同じ透過率を示すわけではないので、 $\tau$  の値は葉層ごとに異なると論じている。更に Alexandre は、与えられた LAI をもつ林冠下で用いるために  $\mu = -kF$  とする補正を行った。しかし全天写真を使うときには、葉に光線が当たらない確率を求めることが可能である。その値は林冠開度、 $\theta$  に等しく、次式で求められる。

$$\theta = e^{-\mu} \rightarrow \mu = -\ln(\theta) \quad (25)$$

$T_0$ から以下の全ての変数が算出できる。HEMIPHOTは10枚までの葉を通過する光の総量を計算できる(葉が10枚以上になると透過する光の量は無視できる値になる)。赤色光の透過率は5%、遠赤色光は45%としている。しかしこの比は、他の環境に合うように変えることができる。ここでは葉が0から10枚の場合の散乱光の合計値を使う(式24)。直射光の算出には太陽のジオメトリーと林冠構造に関する情報を用いる。光が葉層によって遮られなければR/FR比は林冠上と類似した値をとり、光が葉層によって遮られると式24に従って葉が1枚から10枚の場合を計算し、 $P_0$ は散乱光の算出値に近い値をとる。

同じ手法を用いて最小限、散乱光成分の一部の推定を考慮に入れて、透過したPPFDの合計値を算出することができる。林内の反射光も求めることができる(Goudriann 1977)。明るい色の幹が直接反射した光をモデルで再現するのは容易ではない。

### 2.3.5 ギャップサイズ

ギャップサイズは生態学で頻繁に用いられる用語である。林内でギャップサイズを計測するのは難しく、この用語を定義したものは少ない。最初にこの概念を統一化したのはBrokaw(1982)である。それによると、「ギャップとは、地上から平均2m以上に展開した森林の『穴』である。」ギャップサイズはギャップの縁を8方向で記録し、この8点を結んだ八角形から算出する。Brokawは“ギャップの形の不規則性は無視できる”と推測した。Popma et al.(1988)は、倒木の影響を受ける面積は通常、Brokawの手法による推定値よりずっと大きくなることを示した。Runcle(1981)は同様のギャップサイズの推定法を示し、ギャップは、ギャップの外縁を形成する高木の基部に囲まれた範囲であると定義した。1本の木の最小サイズはDBH20cmとされている。測定法が異なると推定されるギャップサイズも大きく変化し(Van der Meer、準備中)、林内における回復時間の推定値も大きく異なってくる。

植物は明らかにギャップサイズそれ自体よりも、ギャップサイズの違いに基づく微環境の違いの影響を強く受けている。ギャップサイズが大きくなると光のレベル、地温、気温が上昇し、湿度が低下する傾向がみられる(Schulz 1960, Chazdon & Fetcher 1984, Whitmore et al. 1993, Brown 1993)。林冠開度やサイト・ファクターと比較すると、物理的なギャップサイズから微環境の変数を予測するのはずっと難しい(Whitmore et al. 1993)。従って、“生態学的ギャップサイズ”は林冠開度の算出値から推定するほうがよい。更に、構造的なギャップサイズの算出法は林冠高を考慮に入れていない。もしギャップサイズが光のレベルの上昇に与える影響に興味を持つならば、これは重大な欠点だろう(Van der Meer、準備中、Whitmore et al. 1993)。

構造的なギャップサイズの推定法はそれでも、攪乱を受けた面積に関する普遍的な概念を提供し、そのため様々な研究を比較するのに重要だと考えられる。全天写真からも、ギャップサイズを $m^2$ 単位で推定することができる。

ギャップの外縁の高さが比較的均一であると仮定すると(そうでない場合がしばしばあることに注意!), 魚眼レンズの等角投影を用いてギャップサイズを算出することができる。林冠高を  $H$  とし、放射上に位置する林冠の外縁が  $r/R$  の距離を置くとすると(ただし  $R$  は天球の半径)、林冠のその一点から写真の位置までの水平距離は次式によって求められる。

$$D = H \cdot \tan(r \cdot 90 / R) \quad (26)$$

$r \cdot 90/R$  は天頂角であることに注意する。あるポイントの方位は投影写真における天頂 ( $\beta$ ) の位置によって与えられ、フィールドにおけるそのポイントの座標は ( $D \cdot \cos \beta$ 、 $D \cdot \sin \beta$ ) で求められる。HEMIPHOT ではギャップサイズを求める 2 つの手法を使うことができる。1) Brokaw の手法に基づくギャップサイズの推定法、林冠で 8 点の高さを確認し、8 方向の線上に林冠の位置をプロットする。2) 1 つの林冠平均高を求め、複数のギャップ外縁のポイントを決める。ギャップ面積の合計値は次式の通りになる。

$$\text{Gap Area} = \left| \sum_{i=1}^{i=n} [(x_{i+1} - x_i) \cdot (y_{i+1} + y_i)] / 2 \right| \quad (27)$$

最終点(n+1)は開始点と同一になる。

## 2.4 プログラムの有効性を確認するための方法

### 2.4.1 光の測定

#### *データの取り込みと瞬間値の測定*

HEMIPHOT の精度を確認するために、ガイアナのマブラ・ヒルにある TROPENBOS の生態保護区が多雨林で、光環境の測定を行った。2 個の光量子センサー(Li-Cor 社、Li-191SB)をデータロガー、Li-1000(Li-Cor 社)に接続し、1 分間隔で光を測定した。また、私製の R/FR センサーをカレント・モードにした Li-1000 に接続し、1 分間隔で R/FR 比を測定した(Pons 1983)。測定は林床、小ギャップ内、大ギャップ内で数日ずつ行った。晴天日には上記の装置で、林床の影の部分、様々な大きさの光斑部分、小ギャップと大ギャップが影になったときと日向になったときに、光と R/FR 比を手動で測定した。

#### *年間の日射量の測定*

1990 年、生態保護区の北端に小さな気象測定ステーションが設置された。2 年間にわたって、日射量が複数の方法で 1 時間毎に測定された(Jetten 1993a, b)。前述した方法でこれらの測定結果( $Wm^{-2}$ )を PAR に変換した。日射センサーが設置されているのと正確に



同じ場所で全天写真の撮影を行い、HEMIPHOT を用いて 1 年の全ての日について PPFD を計算した。

### 日射と日照時間

ガイアナの気象局は長期間にわたって日射量の測定を行っている。近年、日射を記録するネットワークが設置された(Persaud 1982)。4 つのステーションがマブラ・ヒルの比較的近くにあり、マブラ・ヒルを囲んでいる。日射が記録されていないときは直射光が当たっていないという仮定のもとに、1 月当りと 1 年当りの平均日照時間を使って直射光の量を補正した。従って、直射光の量は[日射が当る可能性のある時間/実際の日照時間]を掛けることで算出された。更に、ジョージタウンのデータは 1 日当りの日射量と日照時間を含んでいる。このデータは、日照時間と日射量の関係を見るために使用した。

## 2.4.2 葉面積指数と光の質

### 葉面積指数

葉傾角分布が球形であるという仮定のもとに、LAI が 1 から 10 の仮想の林冠の画像を作成した。画像上のどのポイントも、視角とその視角の平均理論的開度( $T_z = e^{[-LAI/2]\cos(z)}$ )によってランダムに黒か白のピクセルとなる。複数の画像を使って、HEMIPHOT に含まれる 4 つの LAI の推定法を比較した。写真を使う手法以外にマブラの林の LAI を推定する試みは行わなかった。

### 葉の透過率と赤色光/遠赤色光比

林冠に優占する樹種の葉を採取し、PAR、赤色光、遠赤色光の透過率を測定した。12 ボルトの石英ハロゲン灯の光が、内側は明るい白色、外側は黒色の小さなチューブを通して Li-191SB センサーに当るようにした。センサーの周囲はチューブの開口部に密着させた。センサーからの出力値を測り、センサー上に葉を置いて再度測定を行った。同様にセンサーを変えて赤色光、遠赤色光の透過率を測定した。この測定により得られた値は、R/FR 比のデータロガーによる測定値と瞬間の測定値に対し、HEMIPHOT の算出値を確認するために使用した。

### 2.4.3 ギャップサイズ

#### ギャップサイズの実測値と算出値の比較

ギャップサイズを実測した複数のギャップ内で全天写真を撮影した。最初の数ギャップ(David Hammond の好意による)では Brokaw の手法により、8 方向に延ばした線上でギャップ外縁の中央からの距離と高さを測定した。また栄養塩のバランスを調べるため人工的に作った2カ所のギャップでは、グリッドを引いて注意深く測定を行い(Leo Brouwer の好意による)、中央部で全天写真を撮影した。これらのギャップではデータロガーによる測定も行った(上記参照)。最後にワーヴェニンヘンの Peter van der Meer から、フランス領ガイアナのギャップの全天写真と実測データを得た。これらのデータに基づき、ギャップサイズの実測値と HEMIPHOT の算出値を比較した。また、ギャップサイズが増大する仮想の円形のギャップからも算出を行った。

## 3. 結果と考察

### 3.1 光

広いオープンサイトにおける PPF<sub>D</sub> の算出値は実測値と非常によく適合した。図 4 は広いオープンサイトの算出値と実測値を示している(植被率 44%)。8 時から 9 時の間に雲がかかっており、1 日を通じて何回か雲が空を覆った。15 時から 16 時 15 分には 2 本の林冠木が太陽軌道にかかり、この影響は HEMIPHOT でもよく再現された。不定期に雲に覆われることで、日総光量子数の算出値と実測値が合わなくなる(実測値は  $37.5 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 、算出値は  $40.9 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ )。更に、実測された最大値は算出された最大値より高かった。これは、雲が直射光を反射したことの影響だと考えることで部分的に説明できるが(Gates 1980)、朝は特に大気の透過率( $\tau$ )が 0.6 以上に高くなるため、実測値は一貫して算出値より高い。

図 5 は林冠下のプロットの結果である。16 階調のグレイスケールの画像の解析結果は、白と黒の二階調の画像の結果よりも実測値に近い値を示した。12 時から 14 時の間に現われた小さなピークは、グレイスケールの画像の解析結果でよく再現された。日総光量子数については前のギャップと同様、予測不能な雲の覆いのために実測値と算出値が一致しなかった。

一般的に、PPFD の年平均値は算出値と文献値でよく一致する(Chazdon & Fetcher 1984, Oberbauer & Strain 1985, Raich 1989)。しかし、雲が空を覆うタイミングを正確に予測することと散乱光条件下の空の状態のモデリングや精密な分類を行うことが不可能なため、PPFD の日変化を算出することはできるが、信頼できる値ではない。

図 6 に示した、気象ステーションのある大きなギャップ内の日総光量子数をみると、

算出値は 1991 年と 1992 年の実測値と正確には一致しないことが分かる。実測値は算出値より常に低く、決して算出値を超えることがない。この原因として複数の要因が考えられる。まず HEMIPHOT が本来、雲の覆いの効果に関する補正を行わないこと。次に、散乱光の量が直射光の量の 15% ではない可能性があること、第三に、低緯度の熱帯では  $\tau$  が 0.6 ではなくなる可能性があることである(Whitmore et al. 1993 参照)。Steege et al.(1994)が提案したように、単純な補正の方法は、実際の日照時間と日射が当る可能性のある時間の比を掛けることだろう。この手法を用いた結果を示したのが図 7(左図)である。この補正を行った結果は実測値よりずっと低い(図 7、中央)。PPFD の日平均値は年間を通じて約  $30\text{mol m}^{-2}\text{day}^{-1}$  であることに注意されたい。Raich(1989)も同様の観察を行っている。雲が薄くかかっている時間は日照時間として記録されていないが、この雲を通して射してくる光はおそらく周囲の散乱光よりずっと強いだろう(個人的な観察による)。従って、日射量が低くて Campbell-Stokes 式日射計には記録されない場合、直射光は当たっているが  $\tau$  は 0.6 よりずっと低くなる。Whitmore et al.(1993)はボルネオの調査地( $4^{\circ} 54'N$ )で同様の観察を行い、彼らが“かすんだ空”と呼んだ気象条件下で  $\tau$  が平均 0.4 であると算出した。更に、散乱光は直射光の 15%以上に達しているだろう(Whitmore et al. 1993、Brown 1993、下記参照)。

野外では不定期に雲がかかるため、全く雲のない晴天日を除き、コンピューターで信頼できる予測を行うことは困難である。そのため平均的な散乱光の比率と大気の透過率を入力して計算を行っても、得られた値は近い場所間の比較にしか使えないだろう。異なる緯度の調査地間で比較を行う場合、全天写真を用いた簡単な解析結果だけでは不十分である(Whitmore et al. 1993)。Mitchell & Whitmore (1993)と Whitmore et al. (1993)は、全天写真から光の絶対量を推定する2つの手法を提案している。第一の手法を用いるには、林冠上の直射光と散乱光の量を測定することが必要である。どちらの手法もより信頼できる PPFD 値を推定するために、それぞれのサイト・ファクターを掛けている。これらの手法にも、依然として雲のかかるタイミングを予測できないことによる誤差が含まれている。従って、太陽軌道が隙間を通過するのが朝だけで、午後は通過しない場合、雲が存在したりしなかったりするために何らかの誤差が生じる。Whitmore et al.(1993)は年平均値の算出に当たって、このことは重要ではないと考えた。もし直射光と散乱光を分けてとったデータが利用できないなら、林冠上の日平均光量子数を total site factor に掛ける。第二の手法を用いるには、1日のうち一定の時間(1-2時間)の正確な日照時間を知ることが必要であり、この間の雲に覆われた時間を直射光から引く。散乱光は、直射光から UOC か SOC のいずれかの条件で算出する。ガイアナでは直射光と散乱光を分けて測ることはできないが、ジョージタウンの気象データには日照時間と日射量のデータが含まれている(Hydromet 1976)。このステーションの 1974 年からの日射量のデータを図 8 に示す。このデータの示す値は不自然に高い。全ての観察結果が理論上の最大値以下の値になる(図 8 の上の線)大気の透過率は 0.7 以上と推量される。0.85 を掛けて補正する

と、殆どの観察結果が理論上の最大値以下の値となる(大気の透過率は0.6)。日平均値は  $30\text{mol m}^{-2}\text{day}^{-1}$  となり、マブラ・ヒルの気象ステーションのデータと一致する。マブラ・ヒルのギャップ内の気象ステーションのデータに見られるように、実測値はしばしば算出値よりかなり低くなる。しかしどちらも同じ時期にピークのある二山型を示す点では一致しており、これは六次の多項式で回帰することができる。

実測された日総光量子数(月平均値)は1日当りの日照時間と強い正の相関を示す(図9)。1日中曇った日でも  $19\text{mol m}^{-2}\text{day}^{-1}$  の光を受ける(未補正の場合  $23\text{mol m}^{-2}\text{day}^{-1}$ )。これは Whitmore et al.(1993)及び Brown(1993)の値と一致する。直射光の量は主として実際の日照時間の影響を強く受けるので(薄い雲がかかっている場合、直射光が射していても Campbell-Stokes 式日射計には記録されないが)、直線回帰式から、散乱光の量は常時  $19\text{mol m}^{-2}\text{day}^{-1}$  と、かなり一定していることが予測される。Whitmore et al.(1993)のデータによると、1日当りの総受光量に対して散乱光の減少量は実際かなり少ない(図9参照)。マブラの複数の調査地では各月の1日当りの平均日照時間が分かっているため、直射光に対する散乱光の量を推定することができる。森林調査ベルトにおける実際の日照時間はほぼ47%であり(5.7時間、ter steege 1993、ter steege et al. 1993、ここでは11時間当たり5.2時間と示されている)、このことから日平均値は  $30\text{mol m}^{-2}\text{day}^{-1}$ (図8より、未補正の場合  $35\text{mol m}^{-2}\text{day}^{-1}$ )、うち散乱光は  $19\text{mol m}^{-2}\text{day}^{-1}$  となる(総量の66%)。Brown (1993)は散乱光の割合が58%であると報告している。日平均値の  $30\text{mol m}^{-2}\text{day}^{-1}$  という値はわれわれの気象ステーションにおけるデータとよく一致する( $29.9\text{mol m}^{-2}\text{day}^{-1}$ 、図9)。この値は1日当りの実際の日照時間が47%、1日当たり5.7時間、日平均値は  $35.3\text{mol m}^{-2}\text{day}^{-1}$  うち散乱光は61%とした Whitmore et al.(1993、ボルネオ)及び Brown(1993、同上)のデータと非常に近い。他の熱帯の調査地で報告されている日平均値は以下の通りである。コスタリカ、 $33\text{mol m}^{-2}\text{day}^{-1}$ (Chazdon & Fetcher 1984)、コスタリカ、 $27\text{mol m}^{-2}\text{day}^{-1}$ (Oberbauer & Strain 1985)、ボルネオ、 $31.2\text{mol m}^{-2}\text{day}^{-1}$ (Raich 1989)。

### 3.2 葉面積指数

コンピューター上で作成した仮想の林冠の画像からの LAI の算出値を表1に示す。HEMIPHOT は LAI の値が4までの場合、かなり正確に予測を行うことができる。LAI が6付近の値をとるとやや過小評価になり、8以上だとあまり正確な予測を行えなくなる。

予測された通り、67.5度という1つの天頂角だけで LAI の推定を行うと大きな誤差が生じる。他の手法は林冠植被率が高いと、高い天頂角の小さな差異を敏感にとらえる。この場合、高いほうの3つの天頂角を使用するとより正確な推定が行える。また、このプログラムのオプションではないが、葉傾角分布が楕円形であるとして LAI の算出を行うと、透過率も見ることが出来る(5.2.2参照)。仮想の林冠の解析結果から、このプログラムが林冠植被率を99.5%まで非常に正確に算出できることが分かる。従って、100dpi

の画像からの林冠植被率の算出値は写真の質と取り込み時の解像度の両方の点から見て正確であることが期待できる。

ガイアナの森林で撮影した全天写真を用いた結果、算出された LAI は 3.5 から 7 の値を示した。これはアマゾニアの多雨林で報告された値の範囲内になる(Saldarriaga & Luxmoore 1991, McWilliam 1993)。

LAI の算出に関する問題の 1 つに写真上の幹と枝の量がある。温帯や熱帯の落葉樹林が調査対象である場合、LAI が実質的に BAI(枝・幹面積指数)となる落葉期と、真の LAI と BAI の和となる葉のある時期の全天写真を比較することで補正を行える(付録 3 参照)。類似した林分構造を持つ熱帯林と落葉樹林を比較すれば、少なくとも真の LAI からの誤差が推定できる。これ以外の制限項目については以下の文献を参照されたい(Norman & Campbell 1989, Welles & Norman 1991)。

### 3.3 光の質

幾つかの種の赤色光、遠赤色光、PAR の透過率を表 2 に示した。全ての種が遠赤色光よりずっと多くの赤色光を吸収した。総光合成有効放射量の吸収率は高かったが、赤色光よりは低かった。これらの結果は全て予測と完全に一致し(Gates 1980, Lee 1987 参照)、R/FR 比の算出に用いられた。林内で 2 日間、R/FR 比の瞬間値を測定した結果、算出値に近い値が得られた(表 3)。マブラにおける R/FR 比は全光条件下で 1.2 から 1.3、大ギャップ内が影になったときは 0.9 から 1.1、雲の下で 1.0、林内の 1-2 m<sup>2</sup> の光斑部分では 0.8 から 1.0、林床では林のタイプにより 0.1 から 0.4 の幅があった。複数の異なった調査区で撮影した全天写真から HEMIPHOT を用いて算出した日平均値は、Lee(1987)の経験式から得られた値より実測値に近かった。大ギャップ内では“ポアソン・モデル”と“Lee”のどちらを用いても R/FR 比は 1.2 に近く、ギャップサイズが小さくなるに従って低下した。林床の数少ないプロットでは 2 つの光量子センサーと、赤色光と遠赤色光のセンサーを用いて最終的に 3 つの終日のデータが得られた。結果は表 3 の通りである。

日光量子数は林床で過大評価されたが、その理由は 1)雲の覆いに関して補正を行っていないためと、2)ハロ-現象によって密な林冠の小さな開口部が過大評価されたためである。後者による影響は特にプロット 3 で顕著だった。R/FR 比は直射光量の一部として計算されるため、更に過大評価される。しかしその傾向は Lee(1987)の経験式よりは低く、そのことを念頭に置けばこの手法は少なくとも R/FR 比の概算値を得るのには有効である。

### 3.4 ギャップサイズ

もし一般的なギャップサイズ概念だけを考えるなら、仮想のギャップは HEMIPHOT で正確に扱うことができる。仮想のギャップは完全な円となるので、8 角形法で測定す

るとギャップサイズは常に 25%過小評価される。ギャップサイズが小さくなると、多点法の誤差は増大する。誤差は常に、線が各点の間の最短距離を通ることによってサイズが過小評価されることで生じる。

このことから、一般的にギャップを 8 角形法で測定すると、ギャップサイズが過小評価されることが推測される。現実のギャップは写真からの測定がより困難である。

HEMIPHOT による大ギャップの面積の推定値は  $3440 \text{ m}^2$  で、 $2800\text{-}4000 \text{ m}^2$  の幅があり、最も小さいギャップは  $730 \text{ m}^2$ 、 $800\text{-}1000 \text{ m}^2$  の幅があった<sup>2</sup>。実測データが利用できる(Devid Hammond、Peter van Der Meer の好意による)他のギャップでは、ギャップサイズは更にばらついた。問題は、林内ではどこが正確なギャップの境界かということである。8 点法と多点法では大きな違いが生じる。ギャップを 8 点のみで測定すると、不定形のギャップでは 300%の誤差が生じることがある。このことはギャップ内の、縁から離れた部分に多少植生が残っている非常に大きいギャップの面積を推定するのが不可能であることを証明している。以上の結果をまとめると、HEMIPHOT では技術的には、物理的なギャップサイズの測定が可能である。不定形のギャップでは、ギャップの縁を決定する際に問題が生じるため、この手法の実用性は低くなる。

#### 4. 結論

質のよい林冠の画像があれば、HEMIPHOT で殆どの計算に用いられる林冠植被率(もしくは林冠開度)を正確に推定できる。林冠開度は全ての変数の中で最も曖昧さが少ない。光、サイト・ファクター、LAI、R/FR 比は植被率と直線的もしくは指数関数的に高い相関を示すので、他の情報が欠落している場合はこれを用いるのが最も確実な推定法である。

HEMIPHOT は、全ての場所、全ての日の光レベルの潜在的な最大値を正確に推定できる。PPFD の絶対値を知るためには、林冠上部の散乱光成分と直射光成分を知る必要がある。光は必要な時期に必要な期間モニターする必要がある。直射光はデータロガーとセンサーを用いて直接測定することができる(手法は Pearcy 1989 を参照)。散乱光はセンサーを直射光から帯状に遮るバンドを用いて測定する。直射光の推定は日照時間と PPFD の値から算出することもできる。密な林冠下の PPFD は主として写真(ハロー現象)あるいは取り込みの際に生じる問題によって、このプログラムからは正確に推定することができない。PPFD の日変化はグレイスケールの画像からより適切に再現できると考えられるが、全面的に信頼できる値とはいえない。

LAI は 6 までは、やや過小評価されるが正確に推定できるが、8 以上は精度が低くな

---

<sup>2</sup>  $730\text{m}^2$  もしくは  $800$  のいずれかの値は誤りであろう。

る。LAI が 8 以上になると HEMIPHOT では扱えない。幹と枝の面積による補正が行える場合もある。

R/FR 比は指標として推定できる。これは部分的に直射光と散乱光の算出値に基づいているので、PPFD の推定法と同じ制限がある。

普通のギャップのギャップサイズは比較的簡単に算出できるが、不定形のギャップについてはできない。ギャップサイズからはあまりよく微環境を予測できないので、この目的に用いることは勧められない。

## 5. HEMIPHOT を使うには？

### 5.1 必要なハードウェア

HEMIPHOT を使うためには以下の最小限の機械構成が必要とされる。CPU が 80286 以上の IBM 互換機、VGA(640×480 ドット)の互換モニターで、HEMIPHOT はもっと高い解像度が使用できる場合でも 640×480 モードを選択する。必ずしも必要ではないが、80x87 の数値演算プロセッサがついていると計算がスピードアップする。例えば 80486SX の 33MHz より、80387 が装着された 80386 の 25MHz のコンピューターの方がずっと計算速度が速い。HEMIPHOT はマウスが付いたコンピューターでのみ使用可能であり、マウスドライバーがなければ起動しない。マウスドライバーがインストールされていてもマウスが付いていなければ、プログラムは起動できるが動かさない(ctrl-alt-del で抜けられる)。どのようなスキャナーも使用可能であり、1 ピクセル当り 1 ビットもしくは 8 ビットで、400×430 ピクセル以下の PCX ファイルを作ることにもできる。HEMIPHOT は 256 色、もしくはグレイスケールの画像を 16 階調のグレイスケールの VGA 画像に変換できるので、パレットは必ずしも必要ではない。

### 5.2 ソフトウェアとインストール

HEMIPHOT の入ったフロッピーディスクをディスクドライブ(a:)に入れ、ログインすれば HEMIPHOT がインストールできる。DOS モードにして install(return)と入力する。C ドライブに HEMIPHOT というサブディレクトリが作られ、そこに必要なファイルが移される。そのディレクトリにログインすると、そこにコピーした PCX ファイルを見ることができる。C:、CD HEMIPHOT、HEMIPHOT(return)と入力するとプログラムが立ち上がる。立ち上がったらロゴボックスの OK ボタンをマウスの左ボタンで押すと、プログラムがスタートする。

### 5.2.1 メインメニュー

トップメニューバーから好きなボタンを選んでマウスの左ボタンを押す。幾つかはファイルを選択した後に機能する。Quit(プログラムを終了する)、Mem(RAMの空容量を表示する)、Disk(ディスクの空容量を表示する)、About(ロゴのポップアップを表示する)はそのまま機能する。ファイルを選択するにはFileボタンを押し、ファイルフォーマットを選択する。ファイルフォーマットは通常はPCXである(GRBはPPFDCALCの古いタイプのファイル)。もしファイルが20以上あるなら、右の三角形のボタンを使ってページを上下に移動できる。写真は左側に表示され、Editボタンを選択すれば編集できる。B/Wモードでは色指定で白黒だけを変えられるが、グレイスケールモードでは色指定で左側のパレットから色を選択できる。色指定した後、マウスの左ボタンで場所を選択する。1ピクセルを変えるにはマウスの右ボタン、数ピクセルを1度に変えるにはマウスの左ボタンを押す。グレイスケールモードでは画像の全部あるいは一部の四角形で明るさとコントラストを変えることができる。画像の一部のコントラストを変えるにはマウスの左ボタンを押し、四角形を広げて再びマウスの左ボタンを押す。画像を消去するならば、トップメニューのスクエアボタンをクリックしてキーボードのescキーを押す。undoを押すと“了解”の操作以後に行われた全ての変更が取り消される。それまでに“編集操作”で了解していなければ、全ての変更が取り消される。編集したファイルはメインメニューのSaveボタンで保存できる。HEMIPHOTは下部のラインでファイル名を聞いてきて、もし同じ名前のファイルがあれば上書きしていいか警告してくる。名前をいれる途中でescキーを押せばキャンセルできる。ロゴを見れば我々のアドレスが分かる。

計算を行うためには画像の方向を正し、解析の対象とする範囲を指定する必要がある。Alignボタンを押すと、HEMIPHOTは写真の北(真の北あるいは磁北)がどこか指定するように言ってくる。マウスを動かしてそのポイントを指定し、左ボタンをクリックするか、上下左右の矢印のボタンを押して10ピクセルずつ移動し、Endキーを押す。次にマウスを動かすか、上記と同じキーを使って円を描く。U(上)、D(下)、L(左)、R(右)のキーを押すと、南北の方向はそのまま円全体を各々の方向に移動できる。円が描けたらマウスの左ボタンを押して決定する。円が小さすぎるかはみ出す場合は受け入れられず、新たに北を指定するように言ってくる。円がうまく描けたら計算メニューが現われる。

### 5.2.2 計算メニュー

画像の方向を正し、解析の対象とする範囲を指定したら計算を行うことができる。計算を始める前に、オプションが適切にセットされているかどうか確認する。Optionsボタンを押せば全てのオプションが現われる。全ての値は指定された範囲内で変更できる。

Latitude            -90(南極)から 90(北極)。[度、分]の順で入力する。



Longitude	-180(東経)から 180(西経)。[度、分]の順で入力する。
Time zone	-12 から 12。HEMIPHOT は各々の経度で標準時間帯を計算する。西半球ではマイナス、東半球ではプラスの値になる。もし調査地の時間帯が標準時間帯(STZ)に該当しなかったら、補正するか地図上で確認する。夏時間に注意する。[度、分]の順で入力する。
Altitude	海拔高度、-10m(オランダの低地帯)から 8848m(エベレスト山頂だが、この値は始終変更されているようである)。十進法・メートルで入力する。
Number of days	(1)か(7)。簡便に年平均値を知りたいなら 7、ある日について知りたいなら 1 を選択する。どちらかの欄をクリックする。
Day	1 日を 1 とするなら 1 から 365。ユリウス日で入力する。もしある日がユリウス日で何日目になるか分からない場合は、JDAY.EXE を使う。
Sky type	Uniform Overcast Sky(UOC)か Standard Overcast Sky(SOC)。どちらかの欄をクリックする。
Trans Red	0.005 から 0.9。1 枚の葉の赤色光の透過率。十進法で入力する。
Trans Farred	0.005 から 0.9。1 枚の葉の遠赤色光の透過率。十進法で入力する。
RFR	1 から 2。林冠上の赤色光/遠赤色光比。十進法で入力する。
Diffuse part	0.05 から 0.5。直射光に加算される散乱光の量。晴天では 15%が適切である。十進法で入力する。
Tau	0.1 から 1、標準値は 0.6。1 光学的空気量の透過率(もし大気圏上部の光量を知りたいなら 1 を入力する)。十進法で入力する。
Magn. Corr	-90 から 90。写真が真の(地図上の)北でなく、磁北に合わせて撮影された場合にこの磁気補正を行う。もし磁北が真の北の左方(反時計回り)にずれているならこの値はマイナスになる。[度、分]の順で入力する。
Leaf Ang	0 から 90。葉の傾きの角度。[度、分]の順で入力する。
Leaf Azim	0 から 90。葉の方位角。[度、分]の順で入力する。

正しい値を選択した後に計算を行う。Calc ボタンをクリックする。

Cover	89 の同心円のピクセル数を用い、面積補正を行って全天球面積から算出する(式 3)。
PPFD	散乱光が直射光の 15%であるとした Gates(1980)の方法に基づいて算出される。天球上の散乱光の分布は空のタイプ(UOC、式 17、SOC、式 18)によって異なる。Model は散乱光を式 15 により求める。extinction は散乱光を、式 24 の赤色光/遠赤色光比の算出法に従って求める。最後の方法はかなり閉鎖した林冠のみで用いる。PPFD は 2 分間隔で算出される。
Year data	365 日の PPFD を計算し、拡張子 YRD を使ってコンマで区切られたファイルに 1 日毎のデータを蓄積する。このデータを使ってグラフを作成で

きる。365日のデータを12ヶ月の平均値に換算するにはYEAR2MON.EXEを使用する。

- LAI “67.5°”は式4に従い、天頂角67.5度のLAIと葉間隙を算出する。“LiCor”は式5に従い、5つの天頂角のLAIを算出する。“Inversion”は5つの天頂角と3段階の葉傾角で算出した葉間隙の逆行列である(Norman & Campbell 1989 参照)。“Ellipsoid”は楕円形の葉傾角分布モデルに基づく(Norman & Campbell 1989 参照)。
- R/FR “Model”はR/FR比を式24のポアソン分布に従って算出する。一方“Lee”(1987)は植被がR/FR比に及ぼす影響から導いた経験的な算出法である。どちらの算出法も1日のR/FR比だけを算出する(7日の設定になっていたら最後の日について計算する)。
- SubCircle 天球の一部について計算を行う。下部の線上でどの天頂角について計算するかを聞いてくる。
- GapSize Brokaw(1982)の手法か任意の一点から算出するが、ギャップの縁の高さは一定とする。下部の線上で情報を入力するように言うてくる。

Show ボタンを押すと様々なグラフが作成できる。

- Grayscale 그레이スケールの画像のピクセルのヒストグラムを作成する。白と黒の2階調の画像では0と15のみのヒストグラムになる。
- Suntracks ある緯度におけるある日の、もしくはある期間の太陽軌道を表示する。
- PPFD site 最後に計算の対象となった日、あるいは7日間の最後の日のPPFDの日変化を表示する。
- PPFD leaf 与えられた傾きと方位を持つ葉に当るPPFDの日変化を同様に表示する。
- Sunflecks 2分間隔でカウントした光斑の数のヒストグラムを作成する。1年のうちの11日について作成する。
- Gap frac 天頂角当りの葉間隙を表示する。
- Year data 対象とする場所の日総光量子数が計算された拡張子YRDファイルなどが存在する場合、林冠上と林冠下の日総光量子数を表示する。
- Circles 植被率と散乱光の計算に用いた全ての円を表示する。
- All tracks 365日の計算に用いた全ての軌道を表示する。

Append ボタンを押すと、Show のオプションで表示される殆ど全てのデータを、同じ名前のコンマで区切られたファイルで保存できる。また、天球の画像に太陽軌道を描き足したPCXファイルを作成することもできる。データファイルは全ての算出データをHEMIPHOT.DAT.という標準ファイル名で保存する。データはファイル名で区別できる。プリントのオプションを使うと様々なグラフと太陽軌道をプリントアウトできるが、EPSON

のドット・マトリクス・プリンターを使う場合に限られる。データをコンマで区切られたファイルに保存し、グラフの作成に適したプログラムに移すほうがずっとよい。太陽軌道を描き足した PCX ファイルは殆どの DOS と WINDOWS のドロー系のプログラムで編集・印刷できるし、例えばワードパーフェクトなどにインポートすることもできる(図 10 参照)。

次の画像解析に移りたかったら Return を選ぶとメインメニューに戻れる。前の解析結果はクリアされる。

## 6. 引用文献

(省略)

## 7. 省略記号

$A_{\alpha}$	太陽高度 $\alpha$ における天球の面積
$A_{tot}$	全天球面積
$D_u$	diffuse (indirect) site factor
$D_{ir}$	直射光量
$Dir_{pen}$	半影内の直射光量
DSF	direct site factor
day	ユリウス日
ISF	indirect (diffuse) site factor
$I_0$	林冠上の光強度
$I_n$	n 層の葉層の下の光強度
$I_z$	天頂角 $z$ における散乱光成分
$I_z$	天頂における散乱光成分
L	部分葉面積
LAI	葉面積指数
M	(光学的)空気量
$P_h$	海拔高度 $h$ における気圧
PPFD	光合成有効光量子密度
R/FR	赤色光/遠赤色光比
$S_c$	太陽定数( $1360 \text{ Wm}^{-2}$ )
$S_{dir}$	直射光
$S_{no}$	光線に垂直な面に当たる直射光量
$S_{out}$	大気圏上部の直射光量
$S_z$	LAI の算出における通過距離補正

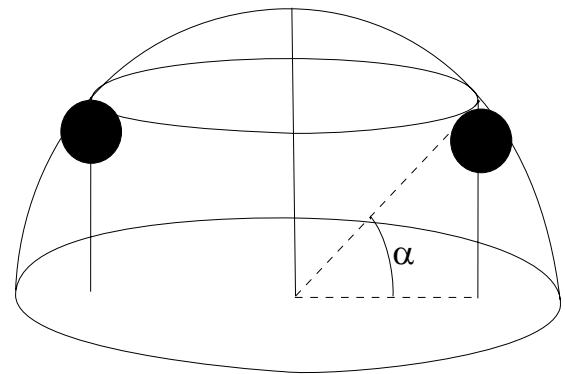
SOC	Standard Overcast Sky
STZ	標準時間帯
$T_{\alpha}$	太陽高度 $\alpha$ における林冠開度(葉間隙)
$T_{\text{tot}}$	全林冠開度
TSF	total site factor
U	葉によって遮られた太陽の投影面積
UOC	Uniform Overcast Sky
$W_z$	LAI の算出における天頂角 $z$ の(面積に関する)重み付け
$z$	天頂角
Z	天頂
$\alpha$	太陽高度
$\beta$	太陽方位
$\delta$	太陽の赤緯
$\eta$	時角
$\gamma$	(1 空気量当り)大気の透過率
$\phi$	緯度

## 付録1 ギャップが天球上に占める面積の算出法

式2をもとに、“準円形”のギャップの面積が求められる。ギャップ下部の角度では植被率が0なので、式3は以下のように単純化できる。

$$\text{cover} = A_{\alpha} = \sin \alpha$$

(図11参照)下の表に5%毎に区切った林冠植被率とギャップサイズを示す。



## 付録2 半影のジオメトリー

図12から、

$$\sin \alpha = (r - \frac{1}{2}O) / d = P_1 / h$$

だから、

$$P_1 = h \cdot (r - \frac{1}{2}O) / d$$

そして、

$$\sin \beta = (r + \frac{1}{2}O) / d = P_2 / h$$

従って、

$$P_2 = h \cdot (r + \frac{1}{2}O) / d$$

全半影面積は

$$P = P_1 + P_2$$

従って、

$$P = 2 \cdot h \cdot r / d$$

従って、半影面積は林冠開口部の面積には影響されないが、 $h$ によって変化する。本

図11 大ギャップ内の林間開度の推定

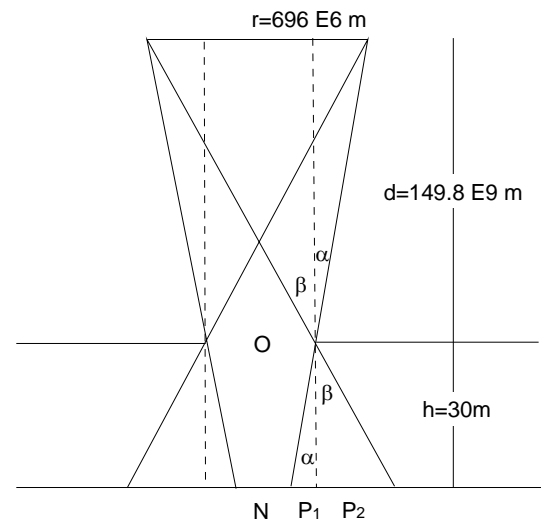


図12 半影のジオメトリー

影面積は次式に示すように、林冠開口部の面積の影響を受ける。

$$U = O - 2P_1$$

$N = 0$  のときは本影がなくなるので、

$$O = 2 \cdot h \cdot r / (d + h)$$

$h = 30\text{m}$  のとき  $O = 0.28\text{m}$  となる。より一般的には  $O : h \approx 0.01$  である。Smith et al. も 1989 年に同様の結果を示している。30m の林冠の 0.3m の開口部はほぼ 0.3 度、もしくは太陽の投影面積よりやや小さく、直径 360 ピクセルの画像の 1 ピクセルに該当する。従って 0.25m 以下のギャップは取り込みの解像度が 100dpi 以下の場合、0.5 ピクセル以下となって認識されない。取り込みの解像度が 400dpi になれば、理論上は 30m の林冠の 0.06m のギャップを認識できる。

### 付録 3 TAI と BAI からの LAI の推定

林冠全体の投影面積が、葉面積 LAI と枝面積 BAI を足した全面積指数 TAI であると仮定する。以下は式 5 に基づいている。2 枚の全天写真があり、1 枚には葉と枝(TAI)が、1 枚には枝と幹(BAI)が写っているとする。

この林冠は

$$TAI = LAI + BAI$$

式 19 から、

$$TAI = 2 \cdot \sum [-\ln(T_{i,TAI}) \cdot W_i / S_i]$$

そして

$$BAI = 2 \cdot \sum [-\ln(T_{i,BAI}) \cdot W_i / S_i]$$

$$LAI = TAI - BAI = 2 \cdot \sum [-\ln(T_{i,TAI}) \cdot W_i / S_i] - 2 \cdot \sum [-\ln(T_{i,BAI}) \cdot W_i / S_i]$$

$W_i$  と  $S_i$  はそれぞれの  $i$  において BAI と TAI に近く、LAI は

$$LAI = 2 \cdot \sum [-\ln(T_{i,TAI}) - \{-\ln(T_{i,BAI})\}] \cdot W_i / S_i$$

もしくは

$$LAI = 2 \cdot \sum [-\ln(T_{i,TAI} / T_{i,BAI}) \cdot W_i / S_i]$$

5つの視角における  $T_i$  は、両方の全天写真から葉傾角分布が楕円形であるとして LAI を算出することで得られる。 $W_1$  から  $W_5$  は 0.034、0.104、0.160、0.218、0.494、 $S_1$  から  $S_5$  は 1.007、1.086、1.269、1.661、2.670 となる。