

LAI

THEORY & PRACTICE



We measure the world.

葉面積指数（LAI）は、林冠の構造を説明する際に最も広く使用される測定値の1つです。生物圏-大気圏の質量とエネルギーの交換の多くは、葉の表面で起こるため、LAIは林冠の機能を理解する際に有用となります。これらの理由により、LAIは一般に、生物地球化学的モデル、水文学モデル、ならびに生態モデルで使用される重要な生物物理学の変数とされます。LAIは一般的に、調査区から地球全体に渡る空間的スケールにおいて、作物や森林の成長や生産性を測る尺度として使用されます。

これまで、LAIの測定は難しく、時間を要するものでした。しかし、近年の理論と技術の発展により、LAIの測定がかなり簡単になり、様々なタイプの林冠の測定も可能となりました。以下の情報は、LAI測定に適用される理論および機器について、簡単に説明することを目的としています。一部のシナリオと特別な考慮事項は重複しているものがありますが、それによって個々の研究ニーズに最も即した方法を選択・利用できると考えます。

目次

1. LAIとは？	1
2. LAIの測定方法	2
2.1. 直接測定	2
2.2. 間接測定	2
2.2.1. 全天写真撮影法	2
2.2.2. 放射線透過率	3
2.2.3. 放射線反射率	4
3. LP-80 アキュパー 光合成有効放射測定装置の使用	7
3.1. 背の低い林冠	9
3.2. 背の高い林冠	9
3.3. クランピングと空間サンプリング	10
3.4. 大気の状態	11
3.5. 非光合成要素の影響	11
4. SRS-NDVIセンサーの利用	12
4.1. フィールドベースでのNDVI-LAI回帰モデルの開発	13
4.2. SRS-NDVIサンプリングにおける考慮事項	14
4.3. NDVI測定における土壌の影響	15
4.4. 高値LAI林冠におけるNDVI飽和への対処	16
参考資料	18



1. LAIとは？

葉面積指数（LAI）は、林冠の葉量を定量化したものであり、地表の単位面積に対する片側葉の面積の割合と定義される。LAIは面積比であるため、単位を持たない。例えば、LAIが1という林冠は、葉面積v.s. 地表面積の比率が1対1であることを意味する（図1a）。同様に、LAIが3の林冠は、葉の面積v.s.地表面積の比率が3対1である（図1b）。

LAIの値は世界の場所ごとに大きく変化し、砂漠の生態系でLAIが1未満のところもあれば、密林の熱帯林ではLAIが9に迫る場所もある。中緯度の森林や低木地のLAIは、典型的には3～6の間に収まる。

LAIは季節や年ごと、あるいは、落葉性林冠や耕作地などの特徴によって大きく変動する。例えば、トウモロコシの播種から成熟までのLAIは0から6の範囲で変化する。したがって、LAIは、林冠の成長と生産性に関する空間的および経時的パターンの両者を記述するのに間違いなく有用な指標である。

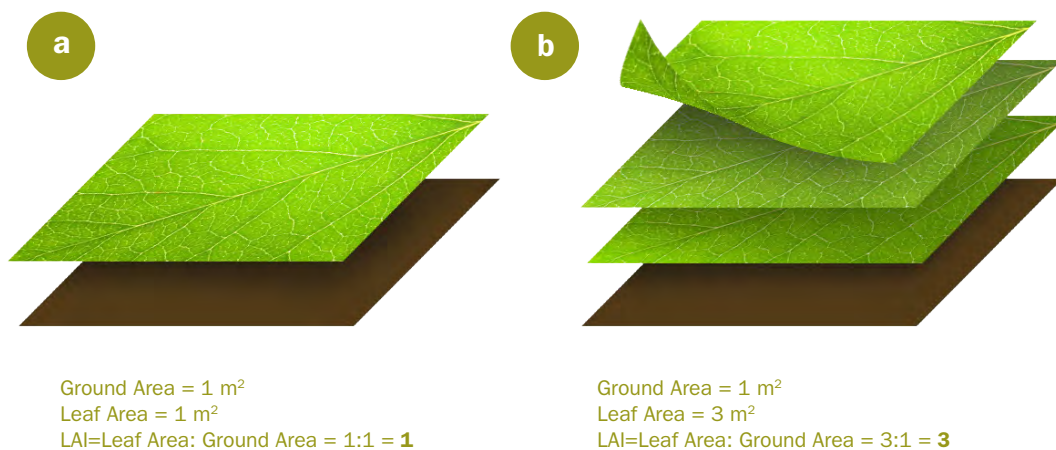


Figure 1. Conceptual diagram of a plant canopy where (a) LAI = 1 or (b) LAI = 3.



2. LAIの測定

LAIの測定に「最良」の方法はなく、それぞれの方法に長所と短所が存在する。どの方法を選択するかは研究目的に大きく依存する。例えば、単回のLAI推定値を必要とする研究者は、経時的なLAIの変化を監視する研究者とは異なる方法を使用する場合がある。同様に、草本の研究者は、樹木の研究者とは異なる方法を好むことがあるだろう。このガイドブックでは、主要な方法の理論的基礎を説明するとともに、それらの主な利点と制限を記述する。

2.1 直接測定

伝統的な手法では、研究者はプロットからすべての葉を採取し、各葉の面積を時間をかけて測定することによってLAIを測定していた。このようなプロセスは、フラットベッドスキャナのような近代機器のおかげで、より効率的に実施できるようになったが、依然として労働集約的で、時間がかかり、骨が折れる仕事である。背の高い林冠では、この方法は現実的ではないと思われる。しかしながら、個々の葉を物理的に測定するため、LAIを計算する最も正確な方法に違いない。

リタートラップもLAIの直接測定方法のひとつであるが、この方法は常緑の林冠ではうまく適用できず、老化して植物から落下した落ち葉について得られる情報のみを捉えることが可能である。

2.2 間接測定

数十年前に、林冠の研究者は、対象の生態系を破壊せず、かつ時間をかけずにLAIを測定しようと新しい方法を模索し始めた。これらの間接的な方法とは、林冠を透過した光量や林冠が反射する光量など、関連変数の測定値からLAIを推測するものである。

Figure 2.
Hemispherical photograph acquired
from a mixed deciduous forest
using a digital camera
fisheye lens.



2.2.1 全天写真撮影法

全天写真撮影法は、間接的にLAIを推定するのに使用された初期の方法の一つである。研究者は、魚眼レンズを使用して地面から林冠を撮影する（図2）。当初は、研究者自身が写真の分析を行っていたが、今日では、ほとんどの研究者は特別なソフトウェアを用い、植生と非植生を示すピクセルを区別して画像を分析する。

メリット

全天写真撮影法には明らかな利点がある。まず、LAIの測定値以上のことを提供してくれるという点である。また、空隙分率、陽班のタイミング、および持続時間など林冠に関する測定値や、その他の林冠構造の指標を得ることが可能である。第2に、後々の研究のため、林冠の画像をアーカイブしておいたり、方法の改変やソフトウェアプログラムのアップデートがあった後でも、再度分析にかけたりすることができる。

制限事項

一方で、全天写真撮影法には欠点がある。現在では、画像がデジタル処理されるという事実にもかかわらず、ユーザーの主観の介入が重要な問題として残っている。ユーザーは、植生のピクセルと空のピクセルを区別するために、画像の明るさの閾値を選択する必要があり、そのことによって、ユーザーごとにLAIの値に変化が生まれ、または、異なる画像解析アルゴリズムの使用が必要となることがある。また、全天写真撮影法は時間がかかる方法である。現場で良質の写真を撮影するのに時間を要すばかりでなく、実験室で画像を分析するのに多大な時間が必要である。また、写真撮影中は、常に曇りの条件でなければならない。全天写真撮影法は、小麦やトウモロコシのような背の短い林冠では良好に機能しない。なぜなら、カメラ本体、レンズ、三脚が物理的に林冠の下にうまく入らない場合があるからである。

PARを測定する機器の中にはショートカットが含まれるものがある。一部のモデルでは、PARを推定するためにLAI値を使用している。この場合、PAR機器を使用することで、林冠下のPAR値を直接推定することができる。それによって、このモデルの精度が向上するであろう。

2.2.2 放射線透過率

DecagonのLP-80 アキュパー 光合成有効放射測定装置を含む市販の機器の中には、全天写真撮影法の代替となるものがある。それらでは、植物林冠を透過する光エネルギー量を用いてLAIを推定する。この概念は非常にシンプルで、綿密に密集している林冠は、隙間がある林冠よりも光を多く吸収するというものである。このことは、LAIと遮光との間に何らかの関係が存在しなければならないことを意味する。この関係性における理論的基礎はベールの法則が説明している。環境生物物理学の目的に基づき、ベールの法則は次のように定式化される：

$$\text{Equation 1 } PAR_t = PAR_i \exp(-kz)$$

PAR_tは地表面近くで測定される透過された光合成有効放射（PAR）であり、PAR_iは林冠上面に入射するPAR、zは減衰媒体を通る光子の経路長、kは消衰係数である。

植生林冠の場合では、光子が減衰されるときに通過する媒体は葉であるため、zがLAIの値となる。kが既知の値であり、PAR_tおよびPAR_iが測定済みであるならば、式Iを変形して、LAI推定値を示すzを計算することが可能である。このアプローチは一般的に、PAR変形法と呼ばれている。現実の世界では理論よりもやや複雑であるが、3節で見るように、ベールの法則は入射・透過PARの測定値を用いてLAIを推定する基礎になるものである。

メリット

PAR変形法は非破壊的な方法であり、経時的に広範囲にわたって繰り返し林冠をサンプリングすることができるという、明らかに大きな利点をもつ。PAR変形法は、放射伝達理論と生物物理学に強固な基盤を持ち、林冠の種類の多種多様性に適用可能であるため、魅力的な技術である。これらの理由から、PAR変形法は現在、非常に受け入れられている標準的な手順である。

DecagonのLP-80 アキュパー 光合成有効放射測定装置などのハンドヘルド型機器に加えて、PAR変形モデルを用いて透過放射線を測定する際には、標準的なPARセンサー（別名：量子センサー）も使用できる。特定の目的のために作られたハンドヘルド型LAI機器とは対照的に、PARセンサーを使用する利点は、PARセンサーをそのままフィールドに置きっぱなしにし、PAR透過率の変化を連続的に測定することができる点である。この方法は、林冠LAIの急速な変化を研究する場合や、ハンドヘルド型機器を用いてLAIの経時的変化を測定するのに現地に何度も足を運ぶことが現実的でない場合に有用であろう。

制限事項

PAR変形法はいくつかの制限を有し、同一または非常に類似した光条件下において、PAR透過量（林冠下）およびPAR入射量（林冠上）の両方を測定することが必要である。入射PARの測定はギャップが大きな林冠や空き地では行えるが、非常に背の高い森林の林冠ではかなりの苦勞が予想される。また、非常に密度の高い林冠では、PARがほぼすべて吸収され、林冠下では透過光をほとんど測定することができない。それによって、LAIが非常に高い場合に、LAIの変化または差異を区別することが困難となる。最後に、PAR透過量の測定から得られるLAIの推定値は、群葉密集に影響を受ける可能性がある。クランピングに関連したLAIの推定エラーを軽減するには、通常、空間内の様々な場所でPAR透過サンプルを数多く収集することで回避できる。

2.2.3 放射線反射率

LAIを推定するもう一つの方法は、透過光よりも反射光を使用するやり方である。緑色を有す健全な植物から反射された放射線は、非常に明確なスペクトルを示す(図3)。実際、科学者の中には、このユニークなスペクトル信号を探索することで、潜在的に居住可能な太陽系外の惑星を見つけようとしている。植物の典型的な反射スペクトルは、電磁スペクトルの可視部分で非常に低い反射率を有す(約400-700nm、PAR領域)。対して、近赤外(NIR)領域(> 700nm)での反射率は50%までに上る。それぞれの波長における反射率の正確な量は、クロロフィルと林冠のような構造(例えば、配置や葉層数)など、様々な群葉色素の濃度に依存する。



メリット

林冠の特性を定量化するため、分光反射率のデータを使用するという初期の試みによって、赤色およびNIR領域の反射率の比率を使用して、特定領域での林冠被覆の割合を推定できることがわかった。その後の努力によって、様々な林冠の特性に関連する種々の波長の組み合わせが生み出されている。これらの波長の組み合わせ、あるいはスペクトル植生指数は、現在ではLAIのプロキシとして日常的に使用され、さらには経験的モデルを通して、LAIを直接推定するために使われている。

最近まで、反射率データを収集する数少ない方法の一つは、ハンドヘルド型分光計—現場ではなく、実験室での使用を念頭に置いて設計された、高価かつ繊細な機器—を用いることだった。しかしながら、センサーの選択肢が広がり、特定の植生指数を測定できる軽量型のマルチバンド放射計が開発された。これらの小さなセンサーは安価で、電力をそれほど必要としないため、現場でのモニタリングに絶好のツールとなった。

LAIの経時的変化を監視したい研究者、例えば、生物季節学的側面、林冠の成長、林冠のストレスと衰退の同定、罹患植物の検出などに興味を持つ研究者にとって、これは喜ばしいニュースである。

植生指数は別の利点も提供する。すなわち、Quickbird、Landsat、MODISのような多くの地球観測衛星は、植生指数の計算に使用可能な反射率を測定しているのである。これらの衛星は広範囲を観察しているので、局所規模で行われた観察尺度をより広い領域まで応用することができるだろう。逆に、マルチバンド放射計を使用して局所的に行われた測定結果は、衛星由来の植生指数のグランド・トゥールース・データの有用な情報源であり得る。

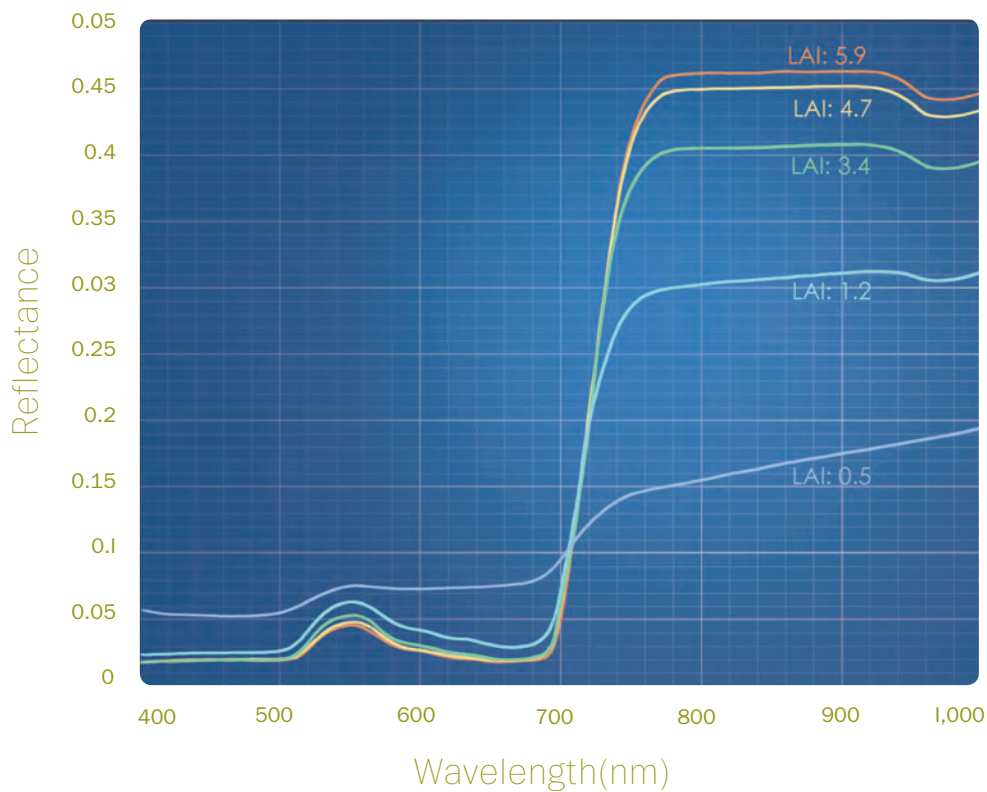


Figure 3. Reflectance Spectra obtained at different stages of canopy development. Note the distinct difference between visible and near infrared (NIR) reflectance that develops as LAI increases.

また、マルチバンド放射計は、短茎草本の草原や広葉草本など、極端に背の低い林冠を測る「トップダウン」の選択肢も提供する。LAIの測定機器はかなり大きく、林冠の下に完全に設置することができないため、LAI推定方法が使用できなければ、推定値を算出することが困難である。植生指数は、林冠をトップダウンから観察するセンサーを使って測定されるため、これらの林冠の場合は有効な代替手段となる。

制限事項

植生指数の最大の制限の一つは、この指数が単位のない値であるということで、単独で使用した場合、LAIの絶対的な尺度を示さないことである。絶対的なLAI値を必要としない場合は、LAIのプロキシとして植生指数を使用できるが、LAIの絶対値が必要な場合は、経験的モデルを生成するのに必要な、同一場所での十分なデータが収集されるまで、植生指数と関連する別のLAI測定方法を使用する必要があるだろう。

また、この方法はセンサーの位置に制限される。その性質上、反射率は林冠の上から測定しなければならず、背の高い林冠では実施不可能な場合がある。

3. LP-80 アクユパー 光合成有効放射測定装置の使用

DecagonのLP-80 アクユパー 光合成有効放射測定装置は、LAI計算に際してPAR変形法の技術を使用している。LP-80は Norman & Jarvis (1975)が開発した林冠光透過・散乱モデルの修正版を使っている。入力値として使用される5つの重要な変数について、以下で説明する。

τ (入射PARと透過PARの比) : 任意のPAR変形モデルを使用してLAIを決定する最も影響力のある要因は、入射PARで透過される比率である。この比率 (τ) は、林冠上での入射PARと地表面近くでの透過PARの測定値を用いて計算される。

τ は比較的、直感的な変数と解釈される。LAIが低い場合、ほとんどの入射放射線は、吸収あるいは反射されるというよりも、林冠を抜けて透過される。したがって τ は1に近い値となる。林冠の葉量が増えるにつれて、光の吸収量が比例して増加し、地面に透過される光の割合は減少する。LP-80は、間隔をあけて直線的に設置された80のPARセンサーと外部のPARセンサーを持つライトバーで構成されている。典型的に、このライトバーは林冠下でのPARの測定を想定しているのに対し、外部センサーは、林冠上または開拓地のいずれかで入射PARを定量化することを意図している。3.1節と3.2節では、その他の測定シナリオを説明している。

θ (太陽天頂角) : θ は、任意の時点、日付、および地理的位置における太陽の天頂角度の高さ、あるいは、頭上の太陽の場所を示すものである (図4)。

太陽天頂角は、林冠を抜ける光子の軌道の長さを説明する為に使用され (例: 閉鎖林冠では、太陽が水平線に近づくにつれて経路長が長くなる)、光線放射と葉の向き (後述) との相互作用を決定するために利用する。

θ は現地時刻、日付、緯度、および経度を入力することで、LP-80が自動的に算出される。

したがって、これらの情報がLP-80設定メニューで正しく設定されているかを確認することが重要である。

f_b (光線分率) : 屋外環境において、短波放射の絶対源は太陽である。雲がなければ、ほとんどの放射線は太陽からの直接光線として照射される (図5a)。雲や霧の存在下では、光線放射の一部は大気内の水蒸気およびエアロゾルによって拡散される (図5b)。この拡散成分は拡散放射と呼ばれる。 f_b は、拡散放射と光線照射との比として計算される。LP-80は、地球大気表面上での任意の時間および場所において、(晴天を仮定して) 太陽光エネルギーの既知の値である太陽定数に対する入射PARの測定値を比較することにより、 f_b を自動的に算出する。

χ (葉の角度分布) : 葉の角度分布パラメータ (χ) は、表面上への葉面積の投射を意味する。例えば、光源が真上にあると想像してみたい。この場合、縦向きの葉が投影する影は、水平方向に広がる葉が投影する影よりもはるかに小さくなるだろう。自然界の林冠では、典型的に、葉の向きは縦横が入り混じっている。この混合状態は、しばしば球状群葉分布と表現され、 χ 値 = 1 (LP-80のデフォルト) と記述される。イチゴのように、主に水平配向を有する群葉は χ 値 > 1 となり、一部の草本のように、主に縦向きの群葉では χ 値 < 1 となる。



86.5 cm

Extensive details about the LP-80's LAI model are provided in the user's manual: www.decagon.com/education/lp-80-manual/

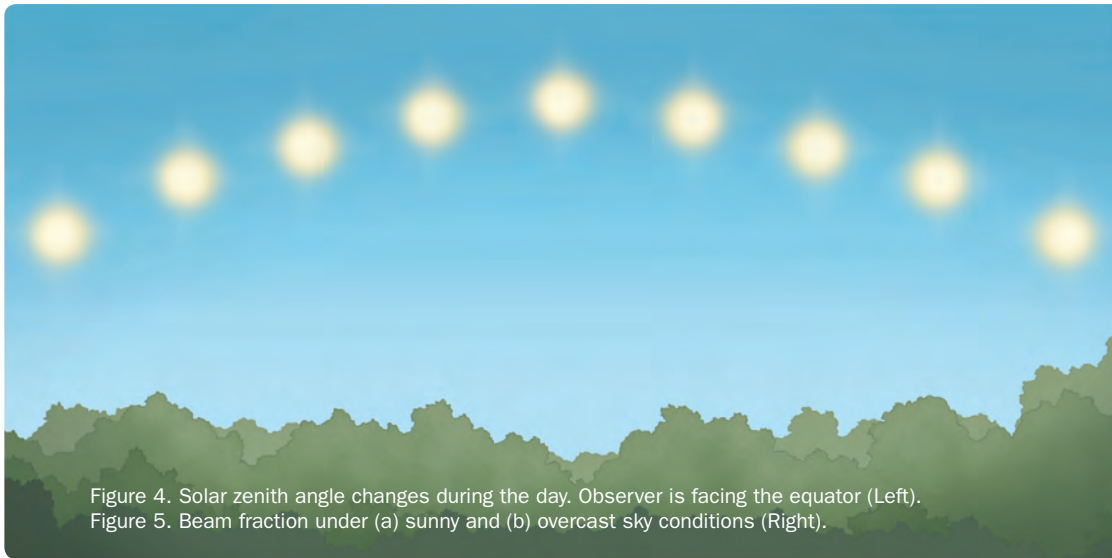
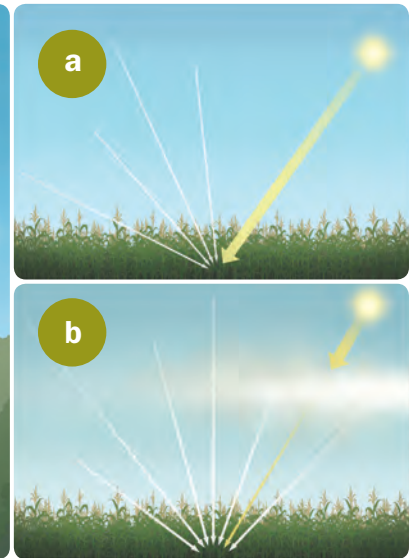


Figure 4. Solar zenith angle changes during the day. Observer is facing the equator (Left).
Figure 5. Beam fraction under (a) sunny and (b) overcast sky conditions (Right).



一般的に χ は、太陽が空を横切るのに伴い、一日の異なる時間で林冠の葉がどれほど光を吸収するかを示す。PAR変形法を用いたLAIの推定は、不変の乱反射条件下でサンプリングする場合は特に、 χ 値にそれほど敏感ではない(Garrigues et al., 2008)。林冠の葉の向きが極端に垂直的あるいは水平的であり、fbが約0.4未満である晴天条件下で作業する場合、 χ 値は最も重要である。葉の角度分布の詳細については、Campbell & Norman (1998)を参照いただきたい。

K (吸光係数) : 林冠の吸光係数Kは、所定の太陽天頂角と林冠群葉の角度分布を元に、林冠で放射線がどれほど吸収されたかを示す。吸光係数の概念はベールの法則 (式1) に基づいている。吸光係数を詳細に説明しようとする、たちまち複雑な話になる。LAI推定においては、光子が葉によって遮断される確率を決定する際に、太陽光線透過の角度が、葉の角度分布と相互作用していることを理解しておけば十分である。LAIを推定する目的において、Kは次のように算出される：

$$\text{Equation 2} \quad K = \frac{\sqrt{\chi^2 + \tan^2 \theta}}{\chi + 1.744 (\chi + 1.182)^{-0.733}}$$

この式から明らかなことは、所定の林冠において、Kは太陽の移動が伴う場合に限り変化するという点である。LP-80は、LAIを測定する都度、Kを自動的に計算する。

Kが計算され、他のすべての変数が定量化されると、LAIは次のように算出される：

$$\text{Equation 3} \quad L = \frac{[(1 - \frac{1}{2K}) f_b - 1] \ln \tau}{A(1 - 0.47f_b)}$$

LはLAIであり、Aは葉の吸収率である。LP-80のデフォルトでは、Aは0.9に設定されている。ほとんどの健全な緑色の群葉にとって、葉の吸収率は非常に一貫性の高い特性であり、0.9という値はほとんどの状況で起こり得る近似値である。極端な場合 (例：極度に若い葉、細軟毛で覆われた葉やワックスがかかった葉、老化した葉)、Aの値は0.9から逸脱する可能性があり、LAIの推定に誤差を引き起こす。非典型的な条件下でLP-80を使用している場合、LP-80の数値と修正したA値をマニュアルで組み合わせて、LAIを算出する必要性が出てくる場合がある。



3.1 背の低い林冠（穀物、草原など）におけるLP-80の使用

一般的な想定における最善の方法は、セプトメーターを林冠下の一定の高さの位置に設置し、付属の外部PARセンサーを林冠上部に設置することである。ライトバーと外部PARセンサーがそのまま維持されていることを確認するため、付属のバブルレベルを使用する。作物が列状に並び、またはサンプルプロットが小さい場合、大抵は、列の間あるいは林冠上部に三脚を立てて外部センサーを取り付けるであろう。LP-80は、ボタンを押すたびに林冠上および林冠下のPAR値を同時測定し、光の条件変化に対応する。林冠の背が低い場合、セプトメーターを使って林冠の上下両方を測定すると、なお簡単である。林冠上にLP-80をかざし、入射PAR値を測定する。林冠上部での測定を数分ごとに行うか、天候条件の変化（例：変数となる雲の発生）によって測り直す。いずれの場合も、3節で説明した他のすべての変数は自動的に測定・計算され、LAIは林冠下での測定ごとに更新される。



3.2 背の高い林冠（例：森林、水辺地帯）におけるLP-80の使用

背の高い林冠では、1つの機器で林冠上下のPARを測定するのは大抵、現実的でない。背の高い林冠でLP-80を使用して、林冠上下でのPARを測定するには、いくつかの選択肢がある。

1つは、空に遮るものが何もない広い開拓地、または林冠上にPARセンサーを取り付けることである。この方法では、のちにデータの事後処理が必要となるが、良好な結果を得ることができる。PARセンサーは、規則的な間隔（例：1～5分ごと）で測定値を取得できるように専用のデータロガーに接続する必要がある、それによって、環境光のレベルの変動を捉えることができる。セプトメーターを使って、通常どおりに林冠下の測定値を収集した後、タイムスタンプ機能を使って、林冠上下それぞれの測定値をペアリングするために事後処理を行って、データを統合させる。各ペアに対する τ を計算し、その値を式3の入力値として使用する。



2つ目の選択肢は、林冠上部にPARセンサーを設置できないとき、あるいは、PARセンサーやデータロガーが手に入らない時に有用な手段である。この場合、空に遮るものが何もない条件下で、林冠の外側での入射PARを測定するのにLP-80を使用する。測定モードは、入射放射線を測定するのか、透過放射線を測定するのか選択できる。LP-80を使って林冠上下での測定値を読む場合は、天候条件の変動性を考慮する必要がある。

晴天の日は、20～30分間で光量に変化することはほとんどないため、日中にかけてサンプルを収集するのが最も簡便である。空が一様に曇っているときは、PARの条件をより長い期間、式6を維持し、林冠上部での測定を再度行わなくていいように、長いスパンで測定する。

天候が非常に変わりやすい場合、入射PAR測定値が常に更新できない限り、この方法は推奨しない。LP-80は、保存済みの入射PAR測定値を使用し、林冠下の測定値ごとにLAIを自動的に計算する。LAI算出エラーを避けるため、光の具合が変化した（例：雲が太陽面を妨害する、または約20～30分経過後）場合、任意の時点で入射PAR測定値を再取得する。

3.3 クランピングと空間サンプリング

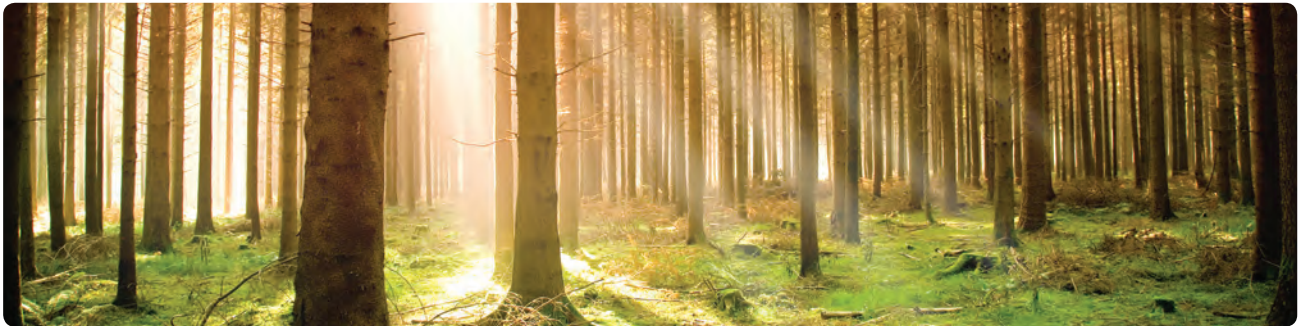
ほとんどの林冠のLAIは、空間ごとに異なる。例えば、列状に配置された作物のLAIは、1mの距離内で0から2～3のばらつきがある。森林やその他の自然林冠においても、木々の間隔、枝の特性、茎に対する葉の位置が異なり、クランピングが生じる。このことは、ポイントベースのLAI測定では、かなりの偏りが生まれることを意味する。Lang & Yueqin (1986)は、水平トランセクト方向で測ったいくつかの測定値を平均すると、微細な空間尺度でクランピングに関連した偏りを軽減できると指摘した。

LP-80では同様のアプローチを使用し、80cm長のプローブに位置する10のセンサーのうち、8グループで光を測定して、その測定値を平均化する。このアプローチでは局所スケールでのエラーは軽減できるが、林冠スケールでのLAI変化を考慮できない場合がある。サンプリング方式を開発する際は、林冠LAIの空間的変動性を考慮しなければならない。一般的に、林冠全体を表すLAI値を得るためには、林冠が不均一であればあるほど、空間横断的なLAIの測定が求められる。



3.4 大気の状態

LP-80では、晴天および曇天の両条件においてLAIを正確に測定できる。これは、LP-80が使用するLAIモデルが拡散光線放射線 (f_b)、太陽天頂角 (θ) の変化に対応しているからであり、林冠上でPARセンサーを使用する場合、入射および透過放射線を同時に測定できるためである。晴天条件下でサンプリングした場合は、葉の角度分布 (χ) の誤特定に関連するエラーが最も顕著に起こり得る(Garrigues et al., 2008)。これは、単一角度からの放射線（太陽からの直接的放射線）の割合が大きいためである。これらの条件下では、葉の角度と光線透過角度の相互作用について、正確にモデリングすることが重要である。したがって、晴天条件下でサンプリングする場合は、適切な χ 値を使用するように留意する。



3.5 非光合成要素の影響

森林や低木地、あるいは、木本種が存在する領域でLP-80を使う場合、葉以外の要素に影響を受けるだろう。例えば、樹幹、枝、あるいは茎が一部の放射を妨げると、PAR変形法を使用して得られるLAI値の推定に影響を及ぼす。実際、研究者の中には、測定値に対する葉以外の物質の影響を見極めるため、LP-80や同様の機器から得られた測定値に対し、LAIではなく植物面積指数 (PAI) に注意を向ける研究者もいる。任意の生態系においてLAIよりもPAIが高くなることは驚くことではない。しかしながら、葉面積は一般的に、枝領域よりもはるかに大きく、枝の大部分は葉の影になっていることから、PAIとLAIの値は多くの場合、それほど違いがない(Kucharik et al., 1998)。落葉性の生態系では、「落葉」段階での測定値を取得することによって木本の特性の影響を説明できる。

In depth technical SRS-NDVI specifications and operating details are provided in the manual, which can be accessed on the web decagon.com/support/manual-spectral-reflectance-sensor-srs/



4. SRS-NDVIセンサーの利用

SRS-NDVIセンサーは、赤色およびNIR（近赤外）波長での林冠反射率を測定するものであり、正規化差植生指数（NDVI）を計算することが可能になる。したがって、NDVIはLAIの推定に使用できる。ここでは、SRS-NDVIの動作理論の概要を説明する。

SRS-NDVIは、赤色およびNIR波長での林冠反射率を測定し、その測定値はLAIを算出あるいは近似するために使用できる。以下の式に赤とNIRの反射率を当てはめ、NDVIを算出する：

$$\text{Equation 4} \quad NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + \rho_{red}}$$

ρ は、NIRと赤の波長の反射率パーセントを表す。数学的には、NDVIの範囲は-1から1までとすることができる。LAIが大きくなるにつれて、林冠の葉緑素含量が増加することから、赤色の反射率は一般的に減少する。それに対し、葉肉細胞が拡張し、林冠構造の複雑性が増すことから、NIR反射率は増加する。したがって、一般的なフィールド条件下でのNDVI値は通常、0から1のあたりに収まり、それぞれLAIの低値および高値を示す。

LAIの絶対値を必要としない「常緑」型の表現型や生物季節学的な表現型では、NDVI値をLAIのプロキシとして直接使用できる。例えば、林冠の成長および老化の経時的パターンの追跡（図6）が研究目的の場合には、単にNDVIを指標として適切に使用できる。実際のLAIの推定値を必要とするような研究の場合、NDVIをLAIに変換するような林冠固有モデルを確立することが可能である。この方法については、次節で説明する。

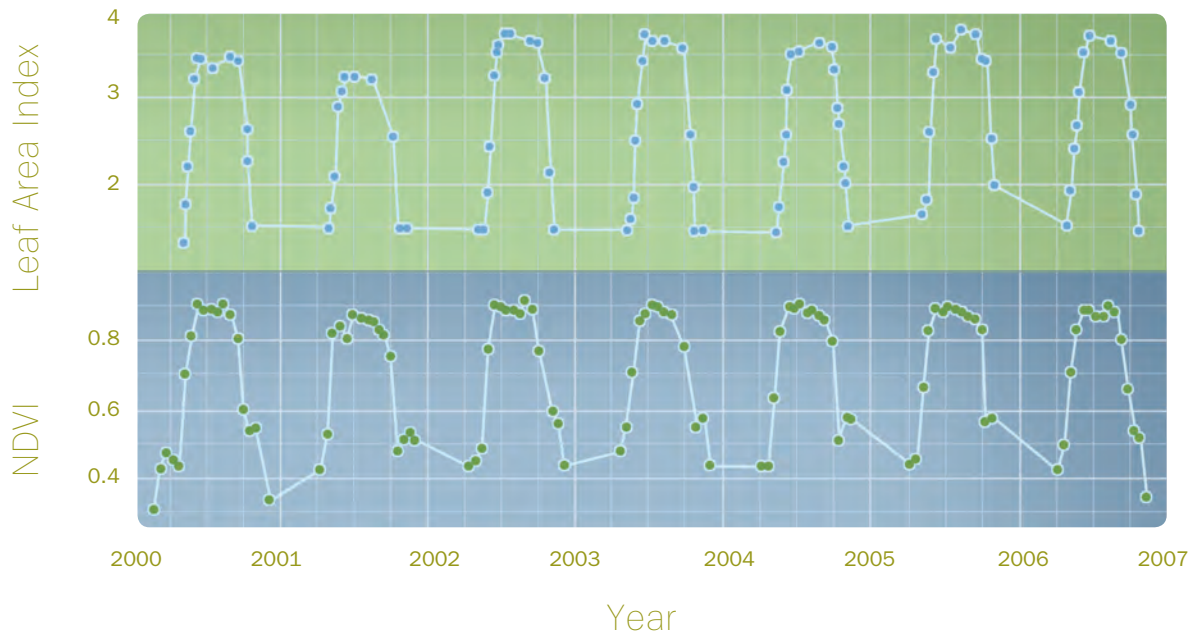


Figure 6.
NDVI closely tracks the year-to-year seasonal dynamics of LAI in a mixed deciduous forest.

4.1 フィールドベースでのNDVI-LAI回帰モデルの開発

NDVI値を使用してLAIを直接推定するには、現場固有または作物固有の相関関係を開発する必要がある。最良の方法は、（例えばLP-80を使用して）同一位置でNDVIとLAIの測定を行うことである。例えば、林冠が急速に成長する期間には、同一位置でLAIとNDVIが測定できる。データを線形モデルに適合させるため、最小二乗回帰を使用した（図7）。このモデルでは、独立した測定を行うことなく、NDVIを使ってLAIを予測する。

堅牢な経験的モデルを開発するには多少の努力を必要とするが、一旦モデルが完成すれば、SRS-NDVIセンサーを使い、調査対象区や林冠について長期間に渡ってLAIの変化を継続的に監視できる。この方法は、結果的に、長期的に見て多大な労力と時間を節約することができる。

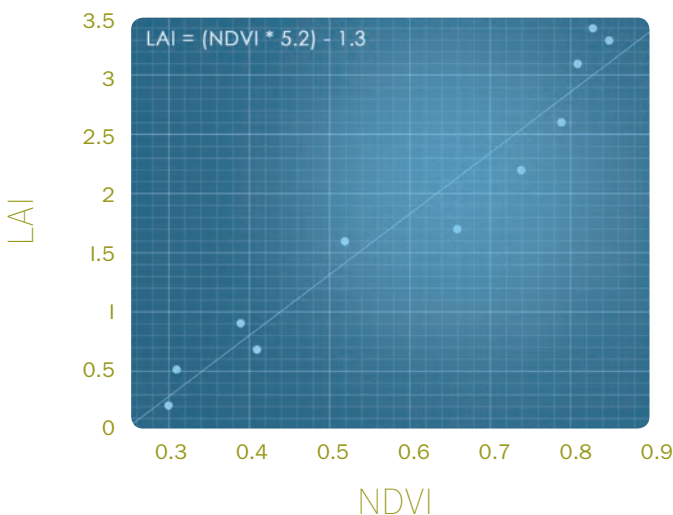


Figure 7.
Relationship between NDVI and LAI. The fitted linear regression model (solid line) can be used to predict LAI from NDVI measurements.



4.2 SRS-NDVIサンプリングにおける考慮事項

SRS-NDVIはデュアルビューセンサーとして設計されている。したがって、全天を捉えるセンサーのうち1つは、空の方向に対して取り付ける必要がある。もう1つのセンサーは視野36°（片側18°）を有し、林冠に対して下向きに取り付ける必要がある。各センサーから収集された下向きおよび上向き方向の測定値は、赤色およびNIR帯域の反射率を計算するために使用する。反射率は、NDVI方程式（式4）の入力値として使用される。

上向きのセンサーは、センサーがクリアに空を捉えられるよう、任意の障害物の上に設置する必要がある。下向きのセンサーは、測定したい林冠領域が真下にくるように調整すべきである。下向きセンサーによって測定される領域の広さは、林冠上のセンサーの高さに依存する。下向きセンサーのスポット径は、次のように計算される：

$$\text{Equation 5 Spot Diameter} = (\tan(\gamma) \times h)^2 \times \pi$$

γ は視野の半分の角度（SRS-NDVIでは18°）、 h は林冠上のセンサーの高さである。式5は、下向きセンサーが真下を向いている（すなわち、天底視野角）ときにスポット径を測定する際に有効である。下向きセンサーがオフナディア方向を指す場合、スポットが斜めになり、式5で算出される値よりも大きくなる。

LAIの空間的変動性を定量化するため、複数の下向きセンサーを設置し、林冠の異なる部分を監視することができる。例えば、落葉樹木の林冠上部に複数のセンサーを取り付け、複数の樹木に関する春の生物季節学的な違いをモニタリングできる。NDVIの測定によって、樹木間で葉の成長のタイミングや大きさの違いが明らかになっている（図8）。また、実験操作対象の個々のプロットにおける植物の応答をモニターする場合や、異なる農業ユニット全体での成長パターンを監視する場合も、同様のアプローチを利用できる。

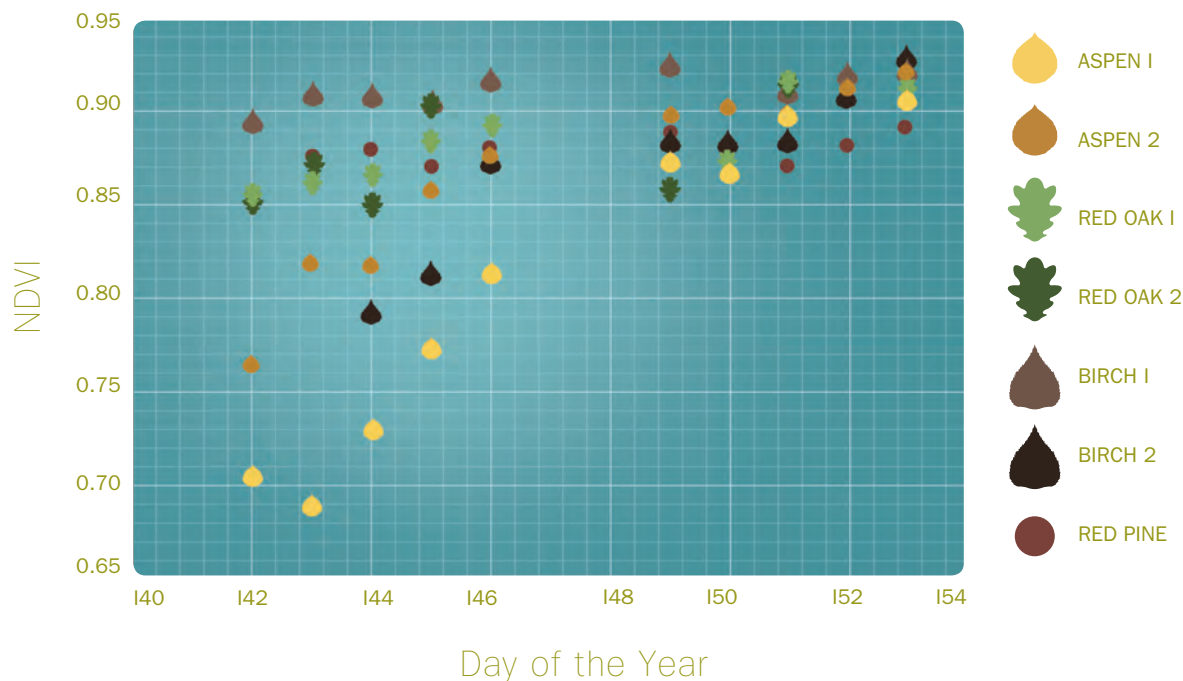


Figure 8. Spatial variability of NDVI during spring green up. The variability is driven by differences in the timing of leaf development among individual trees and tree species.

4.3 NDVI測定における土壌の影響

土壌がSRS-NDVIセンサーの視野内にある場合、あるいは林冠の成長に伴い、センサーの視界に入る現場の土壌量が増加する場合（例えば、成長期の早期から後期）、NDVIの測定値にかなりの誤差が発生する可能性がある。Qi et al. (1994)は、NDVIが土壌組成および土壌水分の両方に敏感であると指摘している。この土壌の感受性のため、異なる場所、または年の異なる時期に収集したNDVI値を比較するのは困難である。また、4.1節で説明したように、信頼性の高いNDVI-LAI回帰モデルを確立するのが困難となる。Qi et al. (1994)は、土壌の感受性にほぼ影響されない植生指数として、修正土壌調整植生指数 (MSAVI) を開発した。MSAVIは次のように計算される：

$$\text{Equation 6} \quad MSAVI = \frac{2\rho_{NIR} + 1 - \sqrt{(2\rho_{NIR} + 1)^2 - 8(\rho_{NIR} - \rho_{red})}}{2}$$

MSAVIのメリットは、(1) 土壌のパラメータ調整を必要とせず、(2) NDVI (赤色およびNIR反射率) と全く同じ入力値を使用することであり、任意のNDVIセンサーの出力値から計算できる点である。

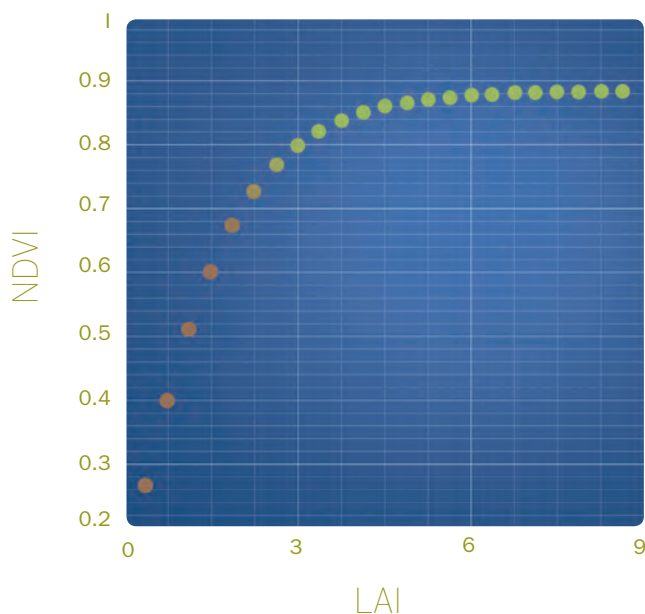


Figure 9.
NDVI has limited sensitivity to LAI values greater than 3-4.

4.4 高値LAI林冠におけるNDVI飽和への対処

土壌の感受性に加えて、林冠の状態に依存してLAIが約3~4よりも高い場合、NDVIはLAIの変化を受けて感受性が欠如する（図9）。高値LAIでNDVIの感度が低くなるのは、葉緑素が赤領域の放射線を非常に効率的に吸収するという事実に起因する。したがって、ある意味において、（例えば、葉材料の添加などによって）林冠にクロロフィルを追加しても、赤色の反射率をはっきりと変化させることはできないだろう（図3参照）。

NDVI飽和に対するいくつかの解決策が開発されている。最も単純な解決策の一つは、式4の分子と分母の両方に対し、近赤外反射率に適用される重み係数を使用することである。これによって導かれる指標は、ワイドダイナミックレンジ植生指数(WDRVI; Gitelson, 2004)と呼ばれる。重み係数は、0と1の間の任意の数とすることができる。重み係数が0に近づくにつれて、まばらな林冠ではLAI変化に対する感度が低くなるかわりに、WDRVI-LAI関連の線形性は増大する傾向にある。

強化された植生指数（EVI）は、NDVIと比較して高値LAIに対して高い感受性を持つ植生指数である。EVIはもともと、衛星からの測定を念頭に置いて設計されたものであり、軌道から地表面を大気圏越しに観察する際の問題を軽減するためのインプットとして、青色帯域を含んでいる。最近では、青色帯域を必要としない新しいEVIの数式が開発されている。この修正版EVIはEVI2(Jiang et al., 2008)と呼ばれている。4.3節で取り上げたMSAVI指標と同様に、EVI2はNDVI（赤および近赤外反射率）とまったく同じ入力値を使用し、次のように算出される：

$$\text{Equation 7} \quad EVI2 = 2.5 \times \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + (2.4 \times \rho_{red}) + 1}$$

EVI2のもう一つの利点は、NDVIと比較して土壌への感受性が低いことである。EVI2は、土壌への感度が低く、LAIと線形関係を有することから、LAIを推定するオールラウンド型の良好な植生指数である。

このガイドでは、LAI測定時に使用する一般的な方法をいくつか紹介した。下記のクイックリファレンスガイドは、ユーザーの状況に最も適した方法を選択する際に参考としてもらうため、作成した。使用する方法を決定する際には、この表だけでなく、上記の情報を参照しながら判断していただきたい。



Steven Garrity, Ph.D
Canopy Scientist & Product Manager

Quick LAI Method Comparison Chart

Method	Relative Cost	Temporal Sampling <small>Single or Continuous Measurements</small>	Suitability for Tall Canopies	Suitability for Short Canopies	Spatial Scaling	Ease of Collecting Samples	Vertical Profiling Samples
Destructive Harvest	H*	Single	L	H	L	VL	Yes
Litter Traps	M*	Single	H	L	L - M	M	No
Hemispherical Photography	M	Single	H	L	M	M	No
PAR Inversion (LP-80)	M	Both*	H*	H	M	H	Yes
Vegetation Index	L - VH	Continuous	M**	VH	M - H	VH	No
	* Labor Intensive	** Single with LP-80 Continuous with subcanopy PAR sensors.	* Requires access to top of canopy or large open area. ** Requires access to top of canopy.				

Key | VL = very low, L = low, M = moderate, H = high, VH = very high

SRS Multiband Radiometer

Accuracy: 10% or better for spectral irradiance and radiance values.
Dimensions: 43 x 40 x 27 mm.
Calibration: NIST traceable calibration to known spectral irradiance and radiance.
Measurement Time: < 300 ms.
Connector Type: 3.5 mm (stereo) plug or stripped and tinned wires.
Communication: SDI-12 digital sensor.
Data logger compatibility: (not exclusive) Decagon Em50 series, Campbell Scientific.
NDVI bands: Centered at 630 nm and 800 nm with 50 nm and 40 nm Full Width Half Maximum (FWHM), respectively.

LP-80 Ceptometer

Operating environment: 0 to 5°C, 0 to 100% relative humidity.
Probe length: 86.5 cm.
Number of sensors: 80.
Overall length: 102 cm (40.25 in).
Microcontroller dimensions: 15.8 x 9.5 x 3.3 cm (6.2 x 3.75 x 1.3 in).
PAR range: 0 to >2,500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.
Resolution: 1 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.
Minimum spatial resolution: 1 cm.
Data storage capacity: 1MB RAM, 9000 readings.
Unattended logging interval: User selectable, between 1 and 60 minutes.
Instrument weight: 1.22 kg (2.7 lbs).
Data retrieval: Direct via RS-232 cable.
Power: 4 AA Alkaline cells.
External PAR sensor connector: Locking 3-pin circular connector (2 m cable).
Extension cable option: 7.6 m (25 ft).



References

- Campbell, G.S., Norman, J.M. (1998) An Introduction to Environmental Biophysics. 2nd Edition. Springer-Verlag, New York, NY U.S.A.
- Garrigues, S., Shabanov, N.V., Swanson, K., Morisette, J.T., Baret, F., Myneni, R.B. (2008) Intercomparison and sensitivity analysis of Leaf Area Index retrievals from LAI-2000, AccuPAR, and digital hemispherical photography over croplands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148:1193-1209.
- Gitelson, A.A. (2004) Wide dynamic range vegetation index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation. *Journal of Plant Physiology*, 161:165-173.
- Hyer, E.J., Goetz, S.J. (2004) Comparison and sensitivity analysis of instruments and radiometric methods for LAI estimation: assessments from a boreal forest site. *Agricultural and Forest Meteorology*, 122:157-174.
- Jiang, Z., Huete, A.R., Didan, K., Miura, T. (2008) Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sensing of Environment*, 112:3833-3845.
- Kucharik, C.J., Norman, J.M., Gower, S.T. (1998) Measurements of branch area and adjusting leaf area index indirect measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 91:69-88.
- Lang, A.R.G., Yueqin, X. (1986) Estimation of leaf area index from transmission of direct sunlight in discontinuous canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 37: 229-243.
- Norman, J.M., Jarvis, P.G. (1974) Photosynthesis in Sitka spruce (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.) III. Measurements of canopy structure and interception of radiation. *Journal of Applied Ecology*, 12:839-878.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W. (1973) Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Third ERTS Symposium, NASA SP-351 I, 309-317.
- Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A.R., Kerr, Y.H., Sorooshian, S. (1994) A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 48:119-126.

DISTRIBUTED BY AINEX Co., Ltd

日本語訳

アイネクス株式会社

〒144-0035 東京都大田区南蒲田 2-16-1

NOFテクノポートカマタセンタービル5F

TEL:03-5713-0388 FAX:03-57131388

email: info@ai-nex.co.jp

Web: www.ai-nex.co.jp

2365 NE Hopkins Ct. Pullman, WA 99163

email: instruments@decagon.com

phone: 1-509-332-2756

fax: 509-332-5158

web: www.decagon.com



We measure the world.