Explanation of LAI（Leaf Area Index）& How to use MIJ-15 LAI series

1. はじめに

葉面積指数（LAI）とは、植生群落の単位地表面積（例えば1m2）あたりの葉の投影面積の総和として定義されます。それ故m2/m2という無次元の単位を持つ指標です。植生の放射吸収、光合成・蒸散量、炭素吸収能力などを示す重要な指標として広く利用されています。

従来からの手法として対象区画に存在する全ての葉を刈り取り、その総面積から求める刈取り法が挙げられます。この方法は確かな指標で有る一方で、労力を強い、破壊を伴う手法でもあり、特に破壊が問題になることが多いです。

非破壊的手法では光学的な方法があり、群落を通って地面へ透過する放射の測定値から導くLi-Cor社LI-2000、Delta-T社Sunscan、SunfleckCeptometer、または魚眼レンズとカメラを使った群落下層での全天写真などが挙げられます。これらは光学的とは言え、モノクロによる明暗の比を計測しているので、実際のところは植物面積指数（PAI；単位地表面積あたりの葉、枯れた葉、枝、幹の投影面積比）を計測しておりLAIとは言えません。かつ、自動的な連続測定が難しいという問題が残っています。

2. 可視/近赤外のクロロフィル応答を利用した被覆率の計測手法

ほとんどの植物の葉は波長400-700nmの可視域の放射(PAR)を吸収することで光合成を行っています。一方、700-1000nmの近赤外域の放射(NIR)は利用されず、ほとんどが透過・反射されます。図1.このような生きた葉、もしくはクロロフィル独特の分光的な特徴を利用すると、植生の被覆率を得ることができます。

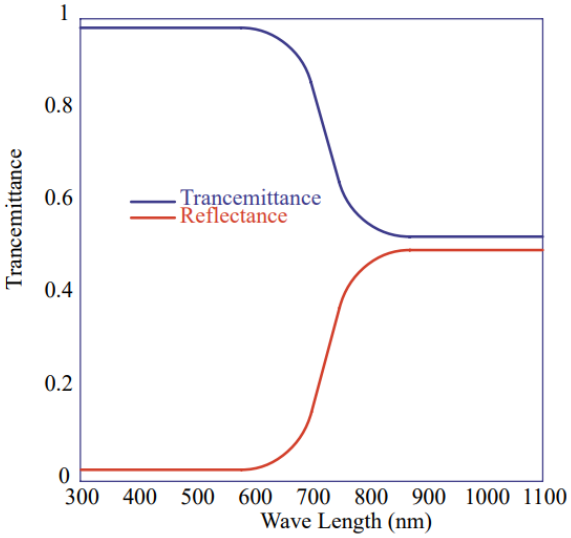


図1.
葉の透過スペクトルの模式図
Trancemittance;透過
Refrectance;反射

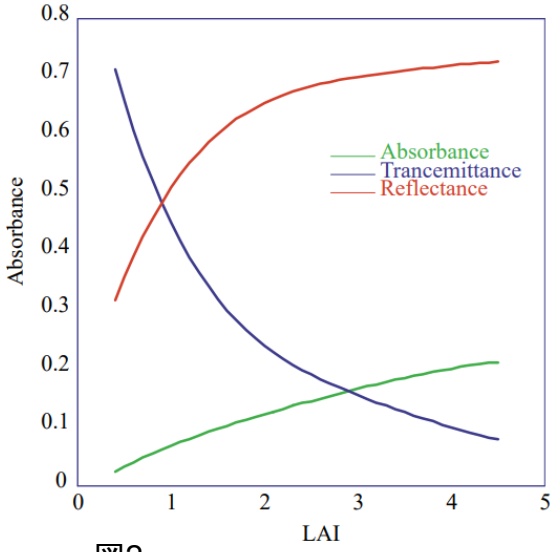


図2.
LAIと吸収、透過、反射スペクトルの模式図
Abrorbance;吸収

群落からの反射放射を利用した正規化差植生指数(NDVI)があります。この手法は植物の被覆率の測定には適していますが、葉が重なるにつれて群落表面からの反射率が飽和し、あまり変化しなくなります。図2.また、植生の背景となる土壌からの反射が大きく影響し、対象範囲の裸地土壌の割合、土壌の性質や水分状態、さらにササなどの下層植生の有無によってNDVIが大きく変動してしまいます。つまり平面的な被覆率は得られますが、立体的なLAIは得られないのです。

3. 分光光学式LAIの計測手法

上記NDVIの場合は反射率を利用しましたが、葉の透過を利用した手法ががMIJ-15LAITypeII/K2もしくはMIJ-15LAI/Pによる方法です。反射と比較して2つの利点があります。1つはLAIの増加に対して飽和しにくいこと、もう1つは、下から植生を見上げた場合、その背景は土壌や下層植生ではなく、天空となり、NIR/PARの比率が、季節や気象条件によらず極めて一定に保たれているということの2点です。

Environmental Measurment Japan
日本環境計測株式会社
〒811-0215
福岡県福岡市東区高美台二丁目52番42号
TEL:092-608-6412
FAX:092-985-7844

Explanation of LAI（Leaf Area Index）& How to use MIJ-15 LAI series

4. MIJ-15LAI TypeII/K2、MIJ-15LAI/PによるLAIの計測とその注意事項

MIJ-15LAI TypeII/K2ではデータロガーを接続して、定点観測する場合に適しています。MIJ-15LAI/Pでは移動しながらの計測に適しています。後者の場合はボタンを押すだけでLAI,NIR,PARの値を測定、自動演算でき、その変換式は以下の式を採用しています。LAIへの変換は以下の式を入力済みです。ただし、この式は落葉広葉樹に対する変換式なので、針葉樹、低生植物などへこの式をそのまま適用することは測定誤差に繋がることがあります。正確に計測するときには変換式を作成し直す、もしくは以後の研究発表で確定した樹種毎の式の公開を待つしかありません。その為にもPARとIRの実測値を捨てずに保管しておきましょう。式が変わっても量センサーの生データさえ保管しておけばLAIへの変換は後日でも可能だからです。

LAI=2.80ln(NIR/PAR)+0.69

ln：自然対数

NIR：近赤外(700～1000nmの範囲)

この式は、樹幹のクロロフィルによる太陽光の反射と吸収作用が生じ、結果的に林冠下に到達する2種類の光を計測すればLAIが算出できる事実を実測値から導いた式になります。またここではサンフレックや太陽高度(太陽の角度)の影響を減じるためにセンサーを定置に設置し、連続測定を行い、日平均値を有効とする段取りを前提としています。センサーが動かなくても太陽が動くので、ライントランセクト測定と類似の効果が得られるのです。逆に表現すればこの使い方が出来るLAIを計測できるセンサーは**MIJ-15LAITypeII/K2**だけで、その優位性が目立つ計測の手法です。一般的に林冠の植生構造は複雑なのですが、そのLAIの代表値を得ることが可能になります。

一方で、持ち運んでの計測を行うときにはセンサーが動き、かつ太陽も動くという条件に変わりますから、注意を払わねばなりません。

まず、サンフレックとは植物群落内における陽斑を示します。木漏れ日のイメージです。サンフレックがたまたまセンサーに直接照射されるとき、それはその場の代表的な光環境の計測値とは言えなくなります。次に太陽高度、これは日変化も年変化もしています。植物群落に粗密があることは多く、太陽高度の違いは、林冠を通過する太陽光のパスが異なることになります。あとは地形です。極端に言えば、北斜面と南斜面では同時刻であれば太陽光のパスが全く異なります。

記述したいずれの事項に該当する場合でも、MIJ-15LAI/Pはその瞬間、その場所における正しいLAIを計測していることは確かです。ただし、持ち運びでの計測故にその再現性が太陽と林冠とセンサーの位置関係に依存することが、全体としての再現性を低くする結果をもたらします。

以下の事項をなるべく守るようにしていただくことで、再現性を高くすることは可能です。複数の場所(ただし、毎回同じ場所)を日にちを変えて何回も年間を通して計測し、広範囲のLAIを計測することを仮定したときの説明になります。

a. なるべく午前10時から午後3時頃までの測定を行う。
b. 場所の再現性を高めるためになるべく同じ場所、同じ時刻になるように配慮する。可能ならGPSで位置を確認する。
c. 1箇所で少しだけセンサーの位置を変え何回かの計測を行い、最後にその平均値を有効値とする。
d. 葉以外の日射を遮る大きな物体の近くで計る場合、計測者の立ち位置はその物体の側に、センサーは反対側に。
e. もし、可能で有れば曇天時に計測すればa.とc.とdを気にしなくて構わない

aは太陽高度に関する再現性を高め、かつ、人間が行動しやすい時間帯であることを満たします。bは位置的再現性を高める配慮です。cはサンフレックの影響を減らす配慮。dは通常はあまり考えなくて構わないのですが、例えば巨大な壁面の近くで計測する場合の配慮です。eは曇天時には照射する太陽光そのものが既に拡散した光になっているので、自然とa.c.dによる影響が少なくなることを意味しています。

一方で持ち運びでの計測故にセンサーに光が当たる様子を確認出来やすいメリットがあります。特に計測の再現性を阻害するのはサンフレックの影響です。この具体的な例として、NIRもしくはPARセンサーの片側や両方にサンフレックつまり、直射日光が照射されている状態を挙げます。言い換えると葉の隙間をくぐり抜けた太陽光の一部がセンサーに照射されている状況とも言えます。この状態はセンサーに届く光が葉に無関係な状況であり、LAIの計測もうまくいきません。両方に直射日光が当たらないような位置で計測してください。なお、この状況は曇天時には生じず、晴天時のみの注意点です。以下の写真は正しく測定されていない状態です。必ず両センサーに直射日光が当たらないようにして下さい。

図3両側に直射日光が当たっている

図4.片側に直射日光が当たっている.

Environmental Measurment Japan
日本環境計測株式会社
〒811-0215
福岡県福岡市東区高美台二丁目52番42号
TEL:092-608-6412
FAX:092-985-7844

5. 対象とする植物に適したLAI変換式の作成

落葉広葉樹の式は4.の式で十分なのですが、それ以外の植生を正しく計測するには変換式を新たに作成した方が良い結果に繋がります。一番確実なのは刈り取り法を行いつつ、MIJ-15の計測を行い、プロットを作成して回帰曲線を得る方法です。もう一つは葉を直接センサーの拡散板に張り付けて、1枚、2枚、3枚と増やしていったときのプロットを得る方法です。この場合は、晴天時、三脚に固定したセンサーの向きを太陽光に向け、葉を乗せて計測すると多くの枚数のデータが得られ、その分広範囲なLAIの変換式を作成できます。

6. LAIの歴史と定義

測最初に定義は1947年Watsonによって定義されたのが始まりでし。その後手法もしくは研究者の都合によってLAIの定義は何種類か存在しましたがWatsonの定義が一番広く知られています。多くの定義はJonckheere etal.(2004)によって分類されましたが、地面の単位面積に対する葉の存在面積という定義は最もよく使われています。
LAI=totalone-sidedarea of photosynthetic tissue/unitground surface area 訳すと、葉面積指数=葉の片側面積の合計/単位地表面積と表現できます。ここでの葉の面積というのは葉の両面の面積を考えず片側の面積のみを考えます。このことをイラストで表現すると以下のイメージになります。重要なのは、LAIの定義は、葉の重なりを指標とする値であることです

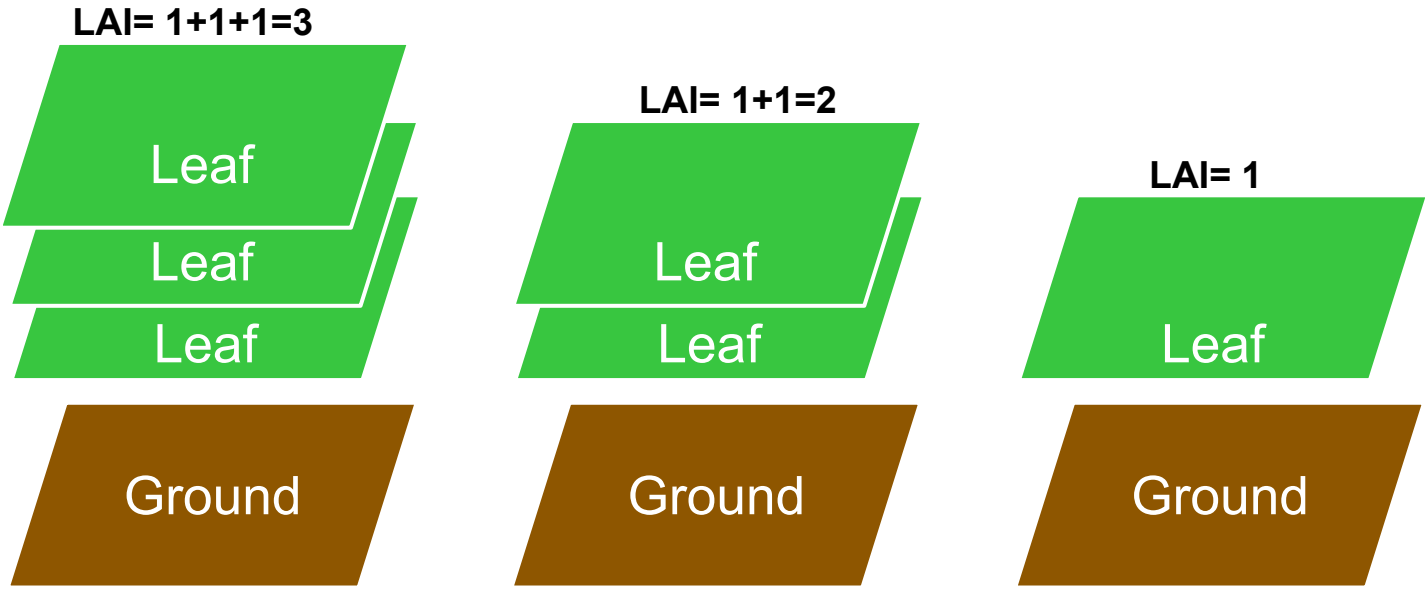


図5. LAI定義の模式図。1層に巨大な1枚の葉が存在していると仮定

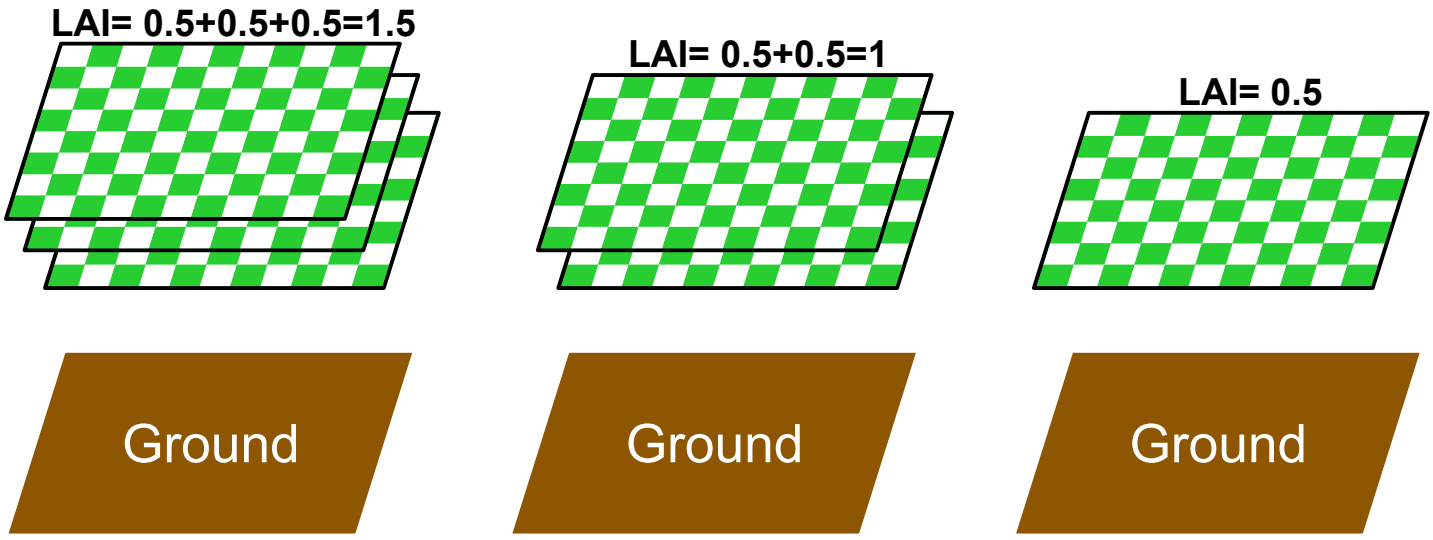


図**6.** 1層がLAI=0.5相当の葉が分布していると仮定

図5と図6の大きな違いは、地面に対して木漏れ日があるかないかというところになります。現実の森林や植生ではご存じのように木漏れ日は確実に存在していますし、図のように層に分割できる分布をしているわけでもないし、かなり複雑な葉の分布で有ることは目視だけでも認識できると思います。この図のイメージは次項11の理解に必要になります。

Environmental Measurment Japan
日本環境計測株式会社
〒811-0215
福岡県福岡市東区高美台二丁目52番42号
TEL:092-608-6412
FAX:092-985-7844

Explanation of LAI（Leaf Area Index）& How to use MIJ-15 LAI series

7.測定手法とその分類

LAIの測定方法は直接的手法と間接的手法に2分されます。

直接的手法

・収穫法（刈り取り法）と呼ばれる手法

複数の植生が群をなしている場合、その中の1本の植生について、全ての葉を収穫し、その面積の総和を求める。
当然ながら、刈り取った葉が存在している地面の面積も計測し、上記10で定義した式を使ってLAIを求めます。
モデルツリー法とも呼ばれています。

・非収穫法: Leaflitter（落ち葉）をトラップする手法

トラップの構造には定義が無いのが現状ですが、上面解放、壁面を備えた解放面の面積が特定された箱を準備し、その中に蓄積する落ち葉の面積の総和を求め、LAIを求めます。風が葉の補足率に影響するところが不確実性に関与します。

間接的かつ接触的な手法

・ポイントフレーム法

数センチ升目上に多くの穴を開けた2枚の平行な板を貫通する長い針を使って、全部の穴に対して針を通す。植物の上部から鉛直方向に針を刺すのだが、その先端が葉に当たった回数と全部の穴の数の割合からLAIを推定する手法。比較的背の低い植物で使われる手法。

間接的かつ非接触的な手法

上記の各手法はいずれもとても手間がかかるので、現実的ではない場合が多く、ここ20年の間に試行錯誤が繰り返されている方法が間接的かつ非破壊的な手法になります。

・ギャップの分布(Gap fraction distribution)

前項図6で説明した木漏れ日(ギャップ)の面積の総和と葉によって遮光された面積の総和を検出できれば、それはLAIに相関が出るであろうという原理です。具体的には樹幹外の光量と樹幹内の光量の比を計測したり、魚眼レンズを装備した全天カメラでモノクロ画像を撮影し、その比を計測します。この代表的な機材としてLAI-2200、全天カメラが挙げられます。
枝、幹も葉として検出してしまうので、冬に完全に落葉したときの計測値を用いて補正をかけるのが重要です。それ故に落葉しない植物の計測には向きません。

・ギャップのサイズ (Gap size distribution)

ギャップのサイズはLAIに相関があるであろうという原理です。代表的な機材として、TRAC(Tracing Radiation and Architecture of Canopies)という装置が挙げられます。計測したい場所を面的に走査する手法なので、おそろしく走り回る必要があり、そこが体力的に厳しい手法です。

・分光的手法

葉の反射と透過の関係が波長によって大きく異なる性質を活用したLAIの計測手法です。(詳細は本カタログ前半に記載しています。)代表的な機材としては**MIJ-15LAI**しかありません。

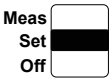
8.How to use Logger(FTjr) for MIJ-15LAI/P

Take Measurement（操作方法）

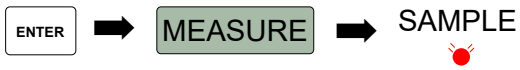
1. センサー、ロガーを箱から取り出し、センサーにケーブルを接続します。
ケーブルの赤はNIR に、もう一方は PAR に接続します。センサーのキャップを外します。

2. グリップは任意の角度に調整できますので、使いやすい方向へ固定してください。

3. ロガーのスライドスイッチを SET に設定します。何も操作を行わない時間が 60 秒経過すると自動で表示が消えます がいずれかのボタンを押すと再起動します。

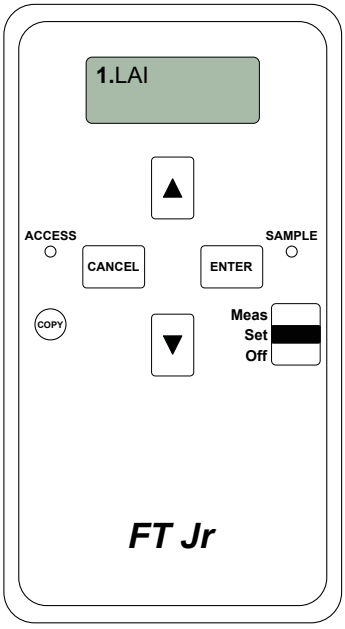


4. 計測は ENTER ボタンを長押し、ロガーがその操作を受け付けると SAMPLEのLED が点灯、同時にディスプレイに MEASURE を表示します。これで計測は完了し、データは保存されます。



5. ENTER ボタンを長押しではなく瞬間的に押す。
1. LAI の値、2. NIR の値、3.PAR の値、P. は内蔵電池の電圧を示しています。

6. 計測を終わるときはスライドスイッチを **OFF** に設定します。ケーブルを外し、キャップを付けて収納します。



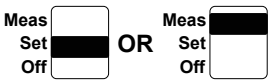
Environmental Measurment Japan
日本環境計測株式会社
〒811-0215
福岡県福岡市東区高美台二丁目52番42号
TEL:092-608-6412
FAX:092-985-7844

Explanation of LAI（Leaf Area Index）& How to use MIJ-15 LAI series

Data Collecting: 2ways (USB memory or Cable；データの回収は以下の 2 通り)

USB メモリーを使う場合:

1. スライドスイッチを SET もしくは MEAS の位置にして、お手持ちの USB メモリーを左側面に刺してください。



2.COPY ボタン (COPY) を押してください。USB メモリーにデータを回収できます。

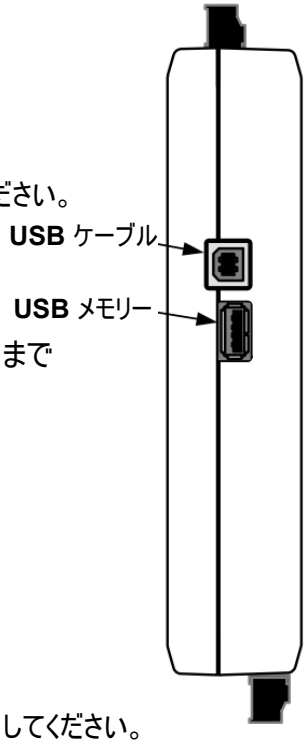
*このとき USB メモリー内に数多くのファ イルが存在している場合、ロガーがタイムアウトと判断すること があるので、なるべくファイルが少ない状態にしてく ださい。

USB ケーブルを使って **PC** に直接データ回収する場合:

1. www.mcs-fs.com からロガーソフト for FT シリーズをダウンロードしてお使いのPC へインストールしてください。

2. 付属の USB ケーブルを使って PC へ接続します。ソフトを立ち上げます。

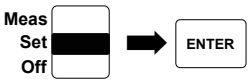
3. 接続メニュー →データ回収で完了します。



Data deletion(データ消去):

基本的にはデータ回収後にデータの消去を行いますが、行わなくてもデータは **125,000** 回の測定まで記録できますから、任 意に判断してください。

1. スライドスイッチを SET に、ENTER を押します



2. 上下どちらかの矢印キーを繰り返し押すと Data Clr の表示が出ますので、そこで ENTER を押します。

3. ▲ボタンで消去の実行。▼ボタンで消去のキャンセルとなります。

その他詳細設定> ロガーの詳細は付属の「FtJr 取扱説明書」を参照してください。
「ロガーソフト forFT シリーズ」の詳細は「ロガーソ フト for FT シリーズ操作説明書」をダウンロードして参照してください。

参考文献
Kume et al.(2010) 九州大学演習林研究発表会「林床設置型 LAI センサーの開発」
Kume et al.(2011)JPlant Res124:99_106.
Kume et al.(2013)森をはかる 68:39_40.

Environmental Measurment Japan
日本環境計測株式会社
〒811-0215
福岡県福岡市東区高美台二丁目52番42号
TEL:092-608-6412
FAX:092-985-7844