

修士論文

超小型分光器を用いた圃場での光環境測定システムの構築

Light-Environment Measurement System for Plants

using Ultra-Compact Spectrometers

報告者

学籍番号: 1255053

氏名: 高橋 明大

指導教員

田上 周路 准教授

令和5年2月17日

高知工科大学大学院工学研究科

基盤工学専攻電子・光工学コース

目次

第1章 序論

| | |
|--------------------------|---|
| 1.1 研究背景 | 1 |
| 1.2 目的 | 3 |
| 1.3 測定原理 | 4 |
| 1.3.1 PPFD 値の測定原理 | 4 |
| 1.3.2 SPAD 値の測定原理 | 4 |
| 1.3.3 フィトクロムによる避陰反応の測定原理 | 7 |
| 1.3.4 LAI の測定原理 | 8 |

第2章 多段式分光測定システム(MSS)の測定方法

| | |
|------------------------------|----|
| 2.1 分光器の校正 | 10 |
| 2.2 測定装置の構成 | 13 |
| 2.3 高知県農業技術センター内のビニールハウスへの設置 | 14 |
| 2.4 KUT ハウスへの設置 | 17 |

第3章 測定結果

| | |
|---------------------------------------|----|
| 3.1 PPFD 計による測定値と MSS による測定値の比較 | 19 |
| 3.2 SPAD 計による測定値と MSS による測定値の比較 | 21 |
| 3.2.1 測定位置による変化 | 21 |
| 3.2.2 各層での SPAD 計による測定値 MSS による測定値の比較 | 22 |
| 3.3 フィトクロムによる避陰反応の測定 | 24 |
| 3.3.1 各層での光強度比の比較 | 24 |
| 3.3.2 各層での光強度比の割合の比較 | 27 |
| 3.4 LAI 計による測定値と MSS による測定値の比較 | 28 |
| 3.4.1 葉の枚数変化に対する変動 | 28 |
| 3.4.2 LAI 計のセンサが影になった際の変動 | 31 |

第4章 まとめ

参考文献

謝辞

第1章 序論

1.1 研究背景

日本では農業従事者の不足や高齢化が問題となっており労働力の低下やそれに伴った収量の低下が懸念されている。

その問題を解決するため近年、スマート農業の導入が進められている。スマート農業とは IoT やドローン、AI などを活用することにより効率化や収量増加を図る農業である。

現在導入されているスマート農業の例としてドローンを用いた葉色解析サービスがある。これは株式会社スカイマティクスが提供している「いろは」というサービスでありドローンを用いて撮影した空中からの写真から作物の状態や雑草の種類を確認することができる。解析した画像から得られた作物の数や大きさ、農地の高低差などの情報は農家の人が見ても見やすいように処理をして提供される。また撮影された写真やデータはオンライン上で管理できるため実際に農地に行かなくても農地の状況や作物の状態を確認することができる。これにより農地へ行くことが困難な高齢者などにかかる負担が大幅に減少すると考えられる。

その他の例として図 1 のようなビニールハウス内の光環境測定が挙げられる。これはビニールハウス内の様々な光環境情報を測定し取得したデータから作物の健康状態などを把握して栽培に役立てていくというものである。

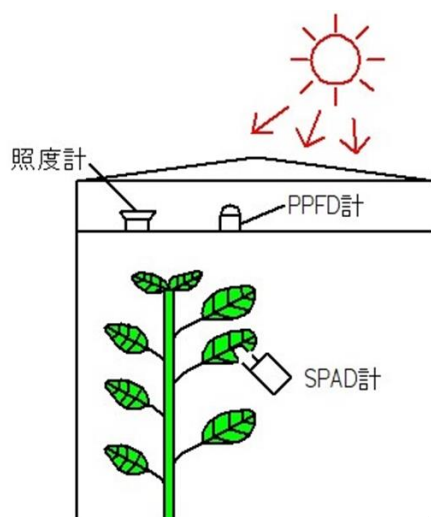


図 1. 光環境測定の実例

このとき収集する光環境情報として 400 nm から 700 nm の光合成有効波長での光量子束密度である PPFD(Photosynthetic Photo Flux Density)値や葉のクロロフィル含量と相関を持つ SPAD(Soil and Plant Analyzer Development)値、1 m² の土地に葉面積がいくらかを示す指標である LAI(Leaf Area Index)、照度計による照度などの情報がある。これらの情報を取得し管理することで圃場内の光環境や植物の光合成能力など栽培に関わる重要な情報を知ることができる。

これらの光環境情報は図 2 から図 4 に示す測定機器で測定を行うことができる。しかしこれらの測定にはいくつかの問題点がある。まずこれらの装置では測定したい情報ごとに測定装置が必要となる。それにより導入コストがかかってしまうため導入へのハードルが上がってしまう。また SPAD 計では葉を挟むことで測定を行っているがこの時 1 枚の葉のごく一部しか測定できない

ため広い圃場で測定を行う場合には人手と手間がかかってしまう。それに加えこれらの測定装置では PPFD 値や SPAD 値など限られた情報しか得ることができない。

このような問題を解決するべく高知県では IoP(Internet of Plants)に取り組んでいる。IoP ではこれまで行われてきた次世代型農業であるハウス内の環境の見える化に加え、NEXT 次世代型としてハウス内の環境情報に加え植物の生理情報を収集しビッグデータから出荷時期の予測などを行うことを目標としている。



図 2. 市販の PPFD 計 Apogee INSTRUMENTS 製 MQ-200

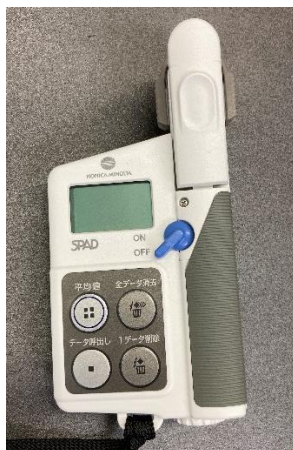


図 3. 市販の SPAD 計
コニカミノルタ製 SPAD-502Plus



図 4. 市販の LAI 計
日本環境計測株式会社製 LAI-15 LAI/P

そこで IoP の取り組みの一環として超小型分光器を用いた自動測定が可能な光環境測定システムを圃場内に構築し得られたスペクトル情報から光環境情報を換算することでこれらの問題を解決することができると考えられる。この測定システムでは比較的安価に入手が可能な超小型分光器を使用することでコスト面の問題を解決し、測定を自動にすることで測定の手間の問題点を解決できる。

また分光器を用いることで照度計では得られなかったスペクトル情報を取得可能になり図 5 に示す赤色光と近赤外光の比が変化を光受容体であるフィトクロムが感知することで引き起こされる避陰反応などの測定も同時に行えると考えられる。

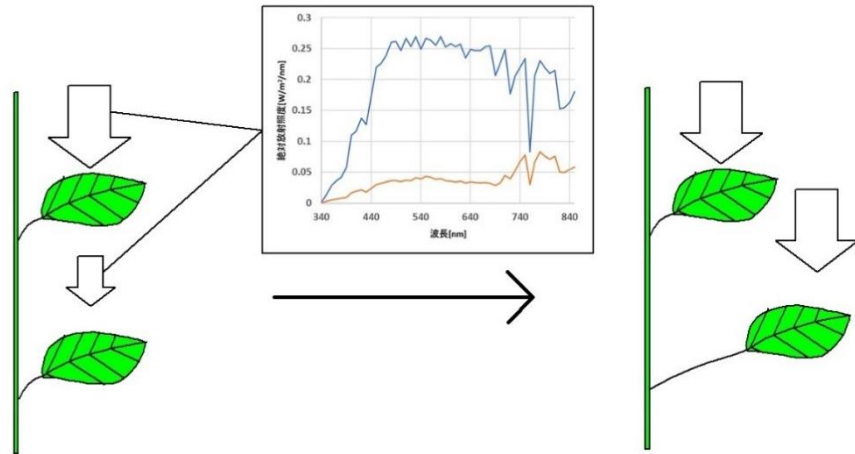


図 5. フィトクロムによる避陰反応

1.2 研究目的

本研究では圃場内に図 6 のような超小型分光器を用いた多段式分光測定システム(MSS : Multistep Spectroscopy System)を構築し、測定システムから得られたスペクトル情報から複数の光環境情報への換算を可能とすることを目的とする。この測定システムでは受光素子としてコサインコレクタを 4 つと超小型分光器を 4 つ使用する。1 つは圃場内に入射する太陽光のスペクトルを測定するために作物上部の骨組みに設置する。3 つのコサインコレクタは葉を透過した透過光を測定するため縦方向に高さを変えて設置する。分光器はそれぞれのコサインコレクタと光ファイバーを用いて接続する。また圃場内の高温多湿な環境を考慮し、分光器は乾燥 BOX 内に格納して設置する。そして分光器を測定用 PC と接続し自動でデータを収集できるように設定する。

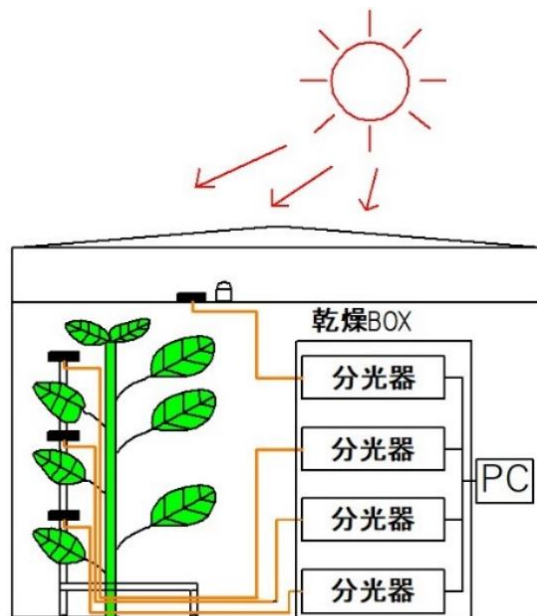


図 6. 圃場内に設置する多段式分光測定システム

このように構築した測定システムから得られたスペクトルをもとに PPFD 値や SPAD 値、赤色光と近赤外光の透過率比、LAI の換算を行い従来の専用の測定装置で得られた測定結果との比較を行う。

1.3 測定原理

1.3.1 PPFD 値の測定原理

光合成は葉に光子が当たることで引き起こされる。そのため光合成の評価を行う際はエネルギーではなく光合成有効波長での光子の数である光合成光量子束密度で評価を行う。

市販の PPFD 計ではセンサで得られた出力に係数をかけることで太陽光測定用に校正を行い簡単に測定が行えるようになっている。しかしこの時太陽光スペクトルの形状を仮定して校正を行っているためスペクトル形状の変化が測定誤差になる可能性がある。またこの PPFD 計では対象の波長を図 7 に示す 410 nm から 650 nm としている。

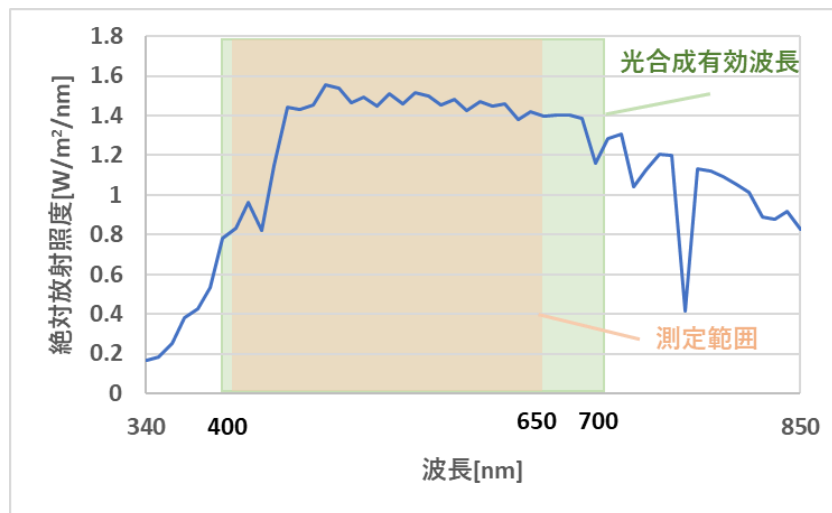


図 7. 太陽光スペクトルと PPFD 値の対象波長域，測定範囲

今回行うスペクトルからの換算では分光器から得られた太陽光スペクトルを用いて対象波長域の各波長で以下の式(1)を用いて算出を行う。そして最後に積算を行うことで PPFD 値の換算を行った。

$$PPFD_{MSS}[\mu mol m^{-2} \cdot s^{-1}] = \int_{410}^{650} \frac{i(\lambda) \cdot \lambda}{h \cdot c \cdot N_A} d\lambda \quad (1)$$

式(1)中で $i(\lambda)$ は分光絶対放射照度， λ は波長， h はプランク定数， c は光速， N_A はアボガドロ数を表している。

1.3.2 SPAD 値の測定原理

今回用いる市販の SPAD 計ではクロロフィルの吸収を利用することで測定を行っている。図 8 にクロロフィルの吸収スペクトルを示す。クロロフィルは光合成のために 400 nm から 500 nm 付近の青色光と 600 nm から 700 nm 付近の赤色光に吸収を持っている。またクロロフィルは赤外光

をほとんど吸収せずに透過させるという特性を持っている。SPAD 計ではこの赤色光と近赤外光の吸収と透過の特性を用いて測定を行っている。青色光を用いないのはクロロフィル以外の色素の吸収もあり青色光では正確な測定ができないためである。

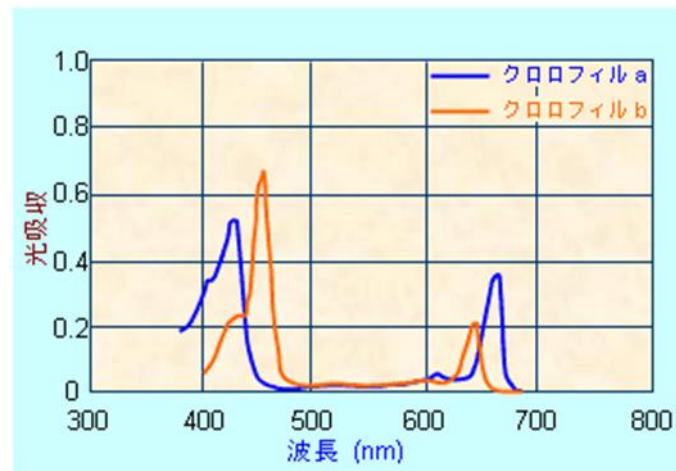


図 8. クロロフィルの吸収スペクトル[1]

図 9 に SPAD 計の構造を示す。SPAD 計では葉を挟んだ際に発光窓から 650 nm の赤色光と 940 nm の近赤外光が照射される。そして葉を透過した透過光を受光窓で受光し以下の式(2)から SPAD 値を算出する。

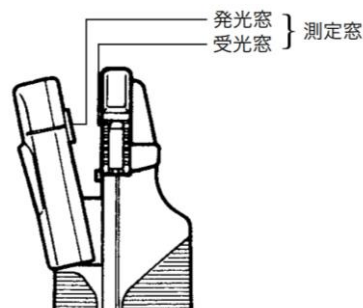


図 9. SPAD 計の構造 [2]

$$SPAD = k \log_{10} \frac{I_{t(940)}/I_{o(940)}}{I_{t(650)}/I_{o(650)}} \quad (2) [3]$$

式(2)中の $I_{t(940)}$ と $I_{o(940)}$ はそれぞれ 940 nm の透過光強度と照射光強度を表している。また $I_{t(650)}$ と $I_{o(650)}$ は 650 nm の透過光強度と照射光強度を表しており、 k は実測より求められた定数である。このように SPAD 計では 650 nm と 940 nm の光の吸光度の差を用いて測定を行っている。

今回行う換算では図 10 に示す黒い線で表わされた 650 nm と 850 nm の 2 波長を用いて換算を行う。650 nm の線を見るとクロロフィルの吸収が確認できる。また SPAD 計では赤外光で 940 nm を使っていたが赤外光の吸収がほとんどないという特性から 850 nm でも問題はないと考える。

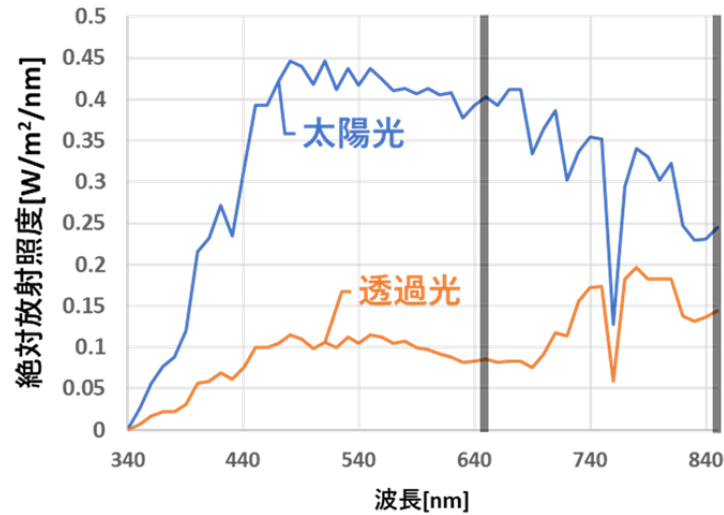


図 10. 太陽光と透過光のスペクトル

換算は以下の式(3)を用いて行う。

$$SPAD_{MSS} = \log_{10} \frac{I_{t(850)}/I_{o(850)}}{I_{t(650)}/I_{o(650)}} \quad (3)$$

式(3)中の $I_{t(850)}$ と $I_{o(850)}$ は式(2)と同様にそれぞれ 850 nm の透過エネルギーと照射エネルギーを表している。また $I_{t(650)}$ と $I_{o(650)}$ は 650 nm の透過エネルギーと照射エネルギーを表している。SPAD 計の換算式である式(2)と異なり定数 k が定まっていないため定数 k は 1 として換算を行う。図 11 に SPAD 計と MSS の測定方法の違いを示す。SPAD 計が 1 枚の葉を対象に測定を行っているのに対し MSS ではコサインコレクタを用いることで一度に多くの葉を対象として測定を行っている。また SPAD 計では葉を挟んで測定を行うことで外光を遮断した状況で測定を行うが MSS では周囲の光も含めて測定を行っている。このような測定方法の違いから SPAD 計での測定値とスペクトルからの換算値では結果に差が生じると考えられる。しかし今回設置する MSS では広い範囲を一度に測定することから 1 枚の葉ではなく全体の SPAD 値を測定できる可能性がある。

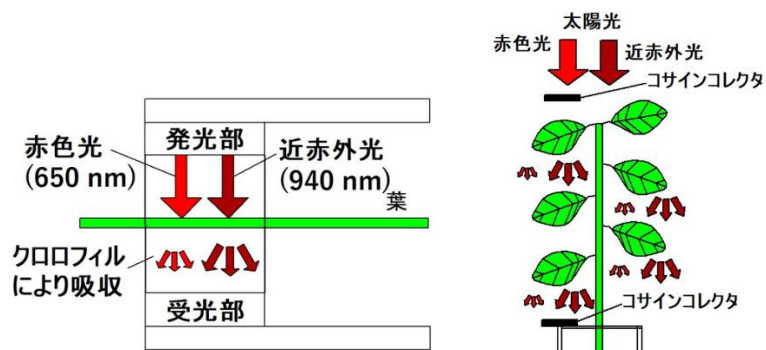


図 11. SPAD 計と測定システムでの測定方法の違い

1.3.3 フィトクロムによる避陰反応の測定原理

フィトクロムの避陰反応は赤色光と近赤外光の変化することがきっかけで起こる。図 12 に Pr 型フィトクロムと Pfr 型フィトクロムの吸収スペクトルを示す。Pr 型フィトクロムは 660 [nm] 付近に吸収のピークを持っており Pfr 型フィトクロムは 730 [nm] 付近に吸収のピークを持っている。Pr 型フィトクロムは 660 [nm] 付近の赤色光を吸収することで Pfr 型フィトクロムに変換される。逆に Pfr 型フィトクロムは 730 [nm] 付近の近赤外光を吸収することで Pr 型フィトクロムに変換される。このように葉はフィトクロムの変換によって自身に照射されている光の赤色光と近赤外光の比の変化を感じ取っている。

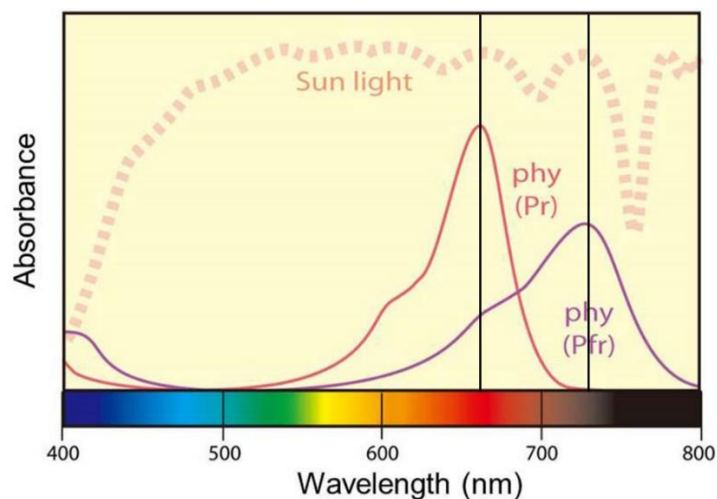


図 12. Pr 型, Pfr 型フィトクロムの吸収スペクトル [4]

そこで図 13 に示す太陽光スペクトルと透過スペクトルから 660 nm の赤色光と 730 nm の近赤外光の光強度比を算出しその変化から避陰反応が起こる時期を推定するための指標とすることができると考えられる。

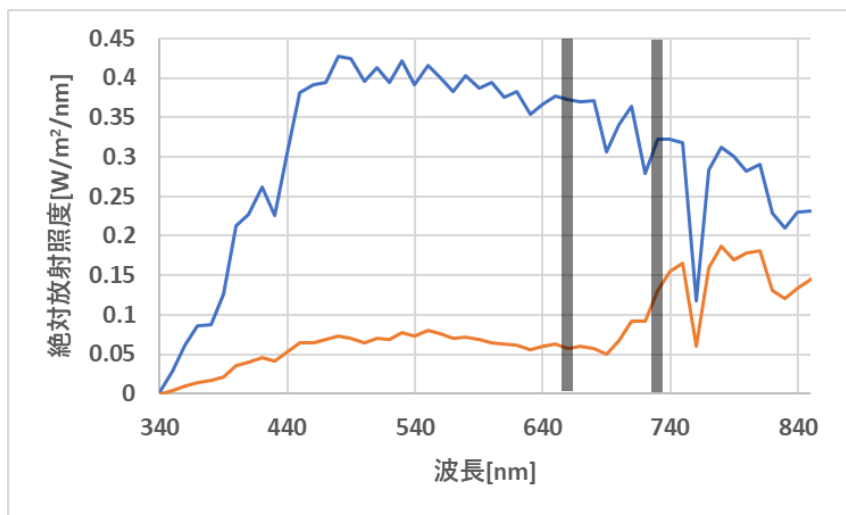


図 13. 太陽光と透過光のスペクトルと換算に用いる波長

赤色光と近赤外光の光強度比の割合は以下の式(4)から算出する。

$$R_T = \frac{T_{660}}{T_{730}} \quad (4)$$

式(4)で R_T は光強度比の割合、 T_{660} は 660 nm での光強度比、 T_{730} は 730 nm での光強度比を表している。

1.3.4 LAI の測定原理

LAI の測定は大きく分けて直接的な測定法と間接的な測定法がある。直接的な測定法とは実際に葉を刈り取って面積を測定して LAI を算出する手法のことである。間接的な測定法とはカメラ等で取得した画像から空と葉の部分に分けて画像の中で葉が占める割合から算出する手法やクロロフィルの吸収特性を利用した分光手法である。今回使用したのは分光手法を用いた LAI 計である。

今回利用する LAI 計である MIJ-15 LAI/P では SPAD 値や透過率比と同様にクロロフィルが青色光と赤色光を吸収し近赤外光を透過するという特性と透過光の比が LAI に相関を持っていることを利用している。400 nm から 700 nm の成分である光合成有効放射(PAR)と 700 nm から 1000 nm の成分である NIR の 2 つを図 14 に示すセンサで測定し LAI の算出を行う。



図 14. MIJ-15 LAI/P の PAR センサと NIR センサ

算出は以下の式(6)を用いて行う。

$$LAI = 2.8 \times \ln\left(\frac{I_{NIR}}{I_{PAR}}\right) + 0.69 \quad (5)$$

式(5)で I_{PAR} は 400 nm から 700 nm の放射強度を表し I_{NIR} は 700 nm から 1000 nm の放射強度を表している。このとき I_{PAR} と I_{NIR} の単位は $[\mu E/m^2/s]$ であり E は 1mol の光子が持つエネルギーを表している。つまり I_{PAR} と I_{NIR} の比は光子数の比を表している。

図 15 に分光器で取得した太陽光、透過スペクトルと PAR,NIR の範囲を示す。PAR と NIR は各範囲で積算することで求めた。今回使用する分光器は 850 nm の波長までの測定しか行うことができないため NIR は 700 nm から 850 nm で積算を行った。

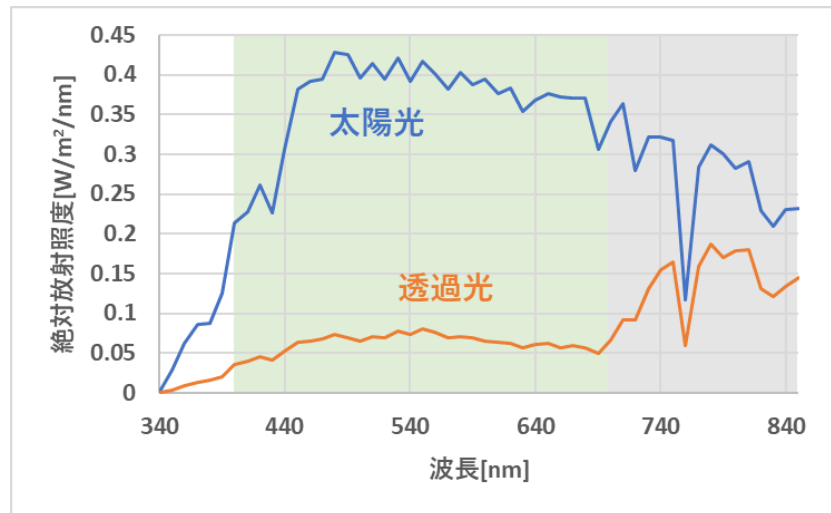


図 15. 太陽光，透過スペクトルと PAR,NIR の範囲

分光器から得られたスペクトルからの換算は以下の式(6)を用いて行う。

$$LAI_{MSS} = \ln\left(\frac{T_{NIR}}{T_{PAR}}\right) \quad (6)$$

式(6)で T_{PAR} は 400 nm から 700 nm での強度比を表し T_{NIR} は 700 nm から 850 nm での強度比を表している。透過率はそれぞれ対象の波長域で太陽光と透過光の放射照度を積算して比をとることによって求めた。

第2章 多段式分光測定システム(MSS)の測定方法

2.1 分光器の校正

本研究では図 16 の浜松ホトニクス製の超小型分光器 C12880MA を搭載した図 17 の ATSYSTEM 製カラーコンパス MF を測定に用いた。この分光器の専用アプリでは CMOS リニアイメージセンサの各チャンネルの出力電圧を 12bit で AD 変換して縦軸が強度 [count]で示されている。そのため図 18 に示す Ocean Optics 製の校正用光源である DH-2000 と図 19 に示す Ocean Insight 製の分光器 FLAME-T を用いて縦軸の単位を分光絶対放射照度 [$\mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{nm}$]に校正する。

校正を行うためにまず DH-2000 の光源の電源を入れる。DH-2000 は光源のウォームアップが必要なため電源を入れた後 15 分程度放置する。



図 16. 超小型分光器 C12880MA(浜松ホトニクス製)[5]
 $20.1 \times 12.5 \times 10.1$ [mm]

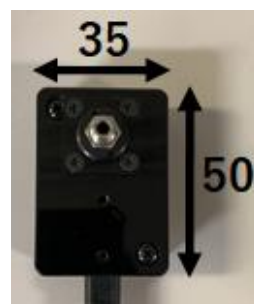


図 17. カラーコンパス MF(ATSYSTEM 製)



図 18. Ocean Optics 製 DH-2000



図 19. Ocean Insight 製 FLAME-T

ウォームアップが終了したら光ファイバーを用いて DH-2000 とカラーコンパスを接続する。それと同時にカラーコンパスを PC と接続する。このとき接続には図 20 に示す THORLABS 製でコア径 $400\ \mu\text{m}$, NA 0.5 の光ファイバーである M45L02 を用いた。



図 20. THRLABS 製 M45L02

接続が完了したら PC でカラーコンパスの測定用ソフトを起動する．そして起動したソフトを用いて DH-2000 のスペクトルを測定する．測定から得られたスペクトルを図 21 に示す．

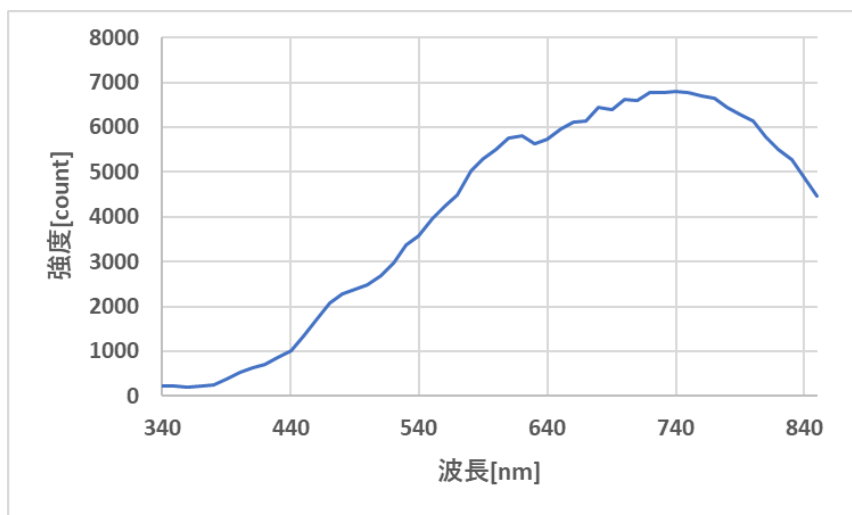


図 21. カラーコンパス MF で得られた DH-2000 のスペクトル

カラーコンパスでの DH-2000 のスペクトル測定が完了したら次に FLAME-T を用いて DH-2000 のスペクトルの測定を行う．測定の際はカラーコンパス MF と同様に THORLABS 製 M45L02 で DH-2000 と FLAME-T を接続する．接続後，FLAME-T の測定用ソフトである OPwave+ を起動する．起動後は DH-2000 に付属している光源のデータを用いて分光絶対放射照度への校正を行う．校正が完了したら DH-2000 のスペクトルの測定を行う．

図 22 に FLAME-T で測定した DH-2000 のスペクトルを示す．分光絶対放射照度に校正されカラーコンパス MF で得られたスペクトルと比較するとスペクトルの形状が異なり右肩上がりのスペクトルになっていることが分かる．

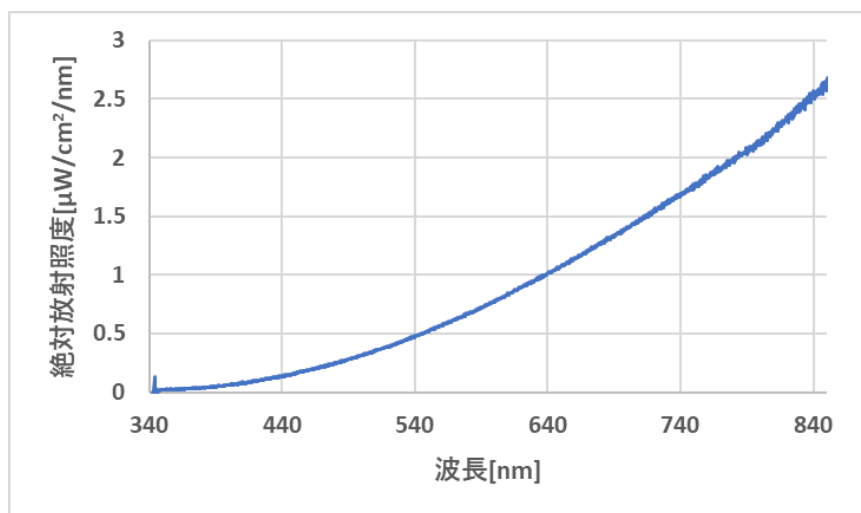


図 22. FLAME-T で得られた DH-2000 のスペクトル

次にカラーコンパス MF と FLAME-T で得られた 2 つのスペクトルから校正係数を算出する。校正係数算出の際は以下の(7)式を用いて各波長で校正係数を算出する。この時カラーコンパス MF の分解能が 10 nm 間隔であるのに対し FLAME-T では分解能がカラーコンパス MF よりかなり細かいため対象の波長の強度を抜き出して算出を行う必要がある。波長ごとに算出した係数をかけることで校正を行う。

$$k_c(\lambda) = \frac{\text{FLAME-T で得られた絶対放射照度}[\mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{nm}]}{\text{カラーコンパスMF で得られた出力}[\text{count}]} \quad (7)$$

図 23 にカラーコンパス MF 校正後の DH-2000 のスペクトルを示す。校正係数を適応したことによりスペクトル形状と強度が FLAME-T と一致していることが分かる。

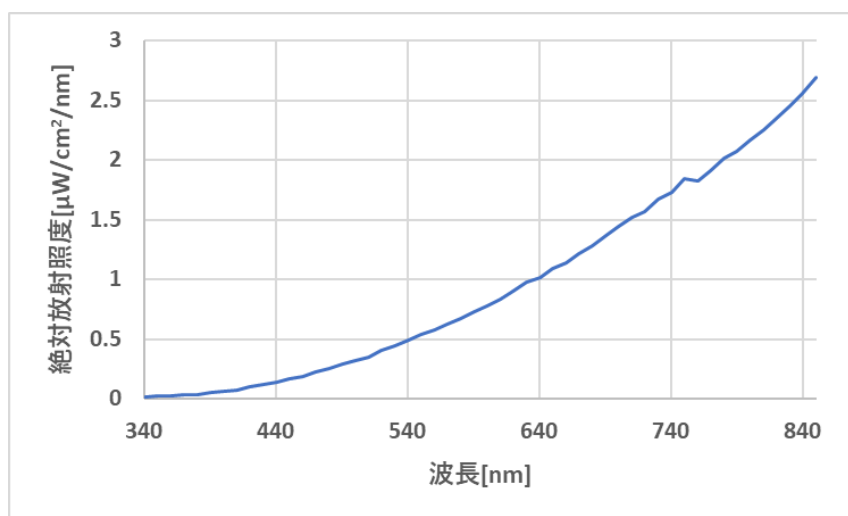


図 23. カラーコンパス MF 校正後の DH-2000 のスペクトル

次に使用するコサインコレクタの透過特性の校正を行う。今回使用する THORLABS 製 CCSA2 には図 24 に示すように長波長になるほど透過率が上がる透過特性がある。そこで波長ごとにこの透過特性を補正する係数をかけることで校正を行った。

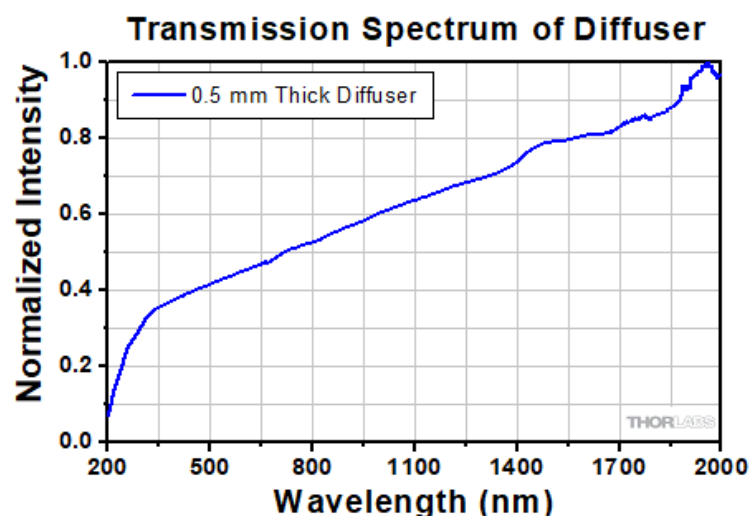


図 24. CCSA2 の透過特性[6]

最後に光ファイバーとコサインコレクタの接続部での損失の補正を行う。今回算出した校正係数は DH-2000 に光ファイバーをそのまま接続し測定を行った。しかし実際は光ファイバーとコサインコレクタを接続して測定を行うのに加え光ファイバーとコサインコレクタの接続部で損失がある。そこで Ocean Photonics 製のコサインコレクタである CC-3 を用いて校正を行った FLAME-T と CCSA2 を接続したカラーコンパスで太陽光スペクトルを同じタイミングで測定し損失を補うように補正を行った。

以上の校正を 4 セットのコサインコレクタ、光ファイバー、分光器のそれぞれに行って分光絶対放射照度を測定した。

2.2 測定装置の構成

圃場内に設置する測定システムの図を図 25 に示す。まず受光素子としてコサインコレクタを 4 つ使用した。1 つは入射する太陽光を測定するために骨組みに設置した。残りの 3 つは葉を透過した透過光を測定するために縦方向に高さを変えて設置し、それぞれ上層、中層、下層とした。また骨組みに設置したコサインコレクタの横に PPFD 計を設置し PPFD 値を測定可能とした。コサインコレクタはそれぞれ光ファイバーを用いて分光器と接続した。圃場内は高温多湿な環境であるため分光器を保護するために乾燥ボックス内に格納した。分光器は測定用 PC と USB ケーブルで接続し自動で測定が行えるようにした。

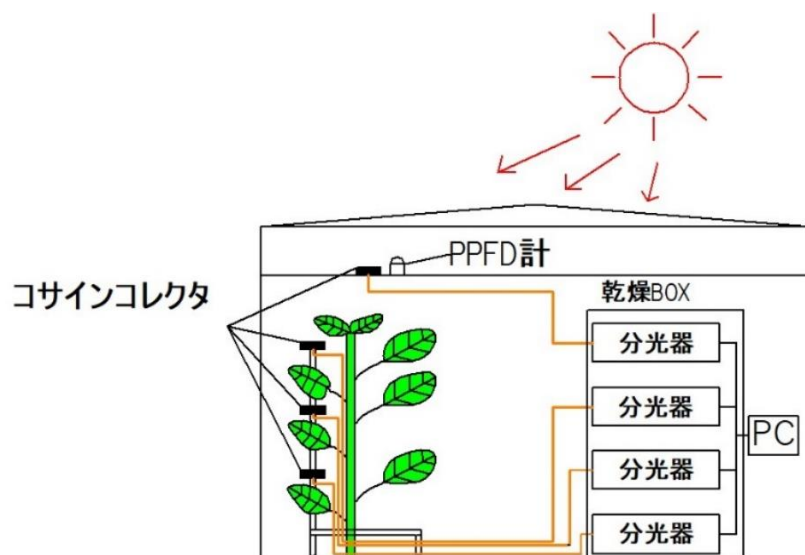


図 25. 圃場内に構築した多段式分光測定システム

2.3 高知県農業技術センター内のビニールハウスへの設置

図 25 に示した測定システムを実際に高知県農業技術センター内にあるナスを栽培しているビニールハウス(西 232)に設置した。

図 26 に太陽光のスペクトルを測定するためのコサインコレクタと PPFD 計の設置状況を示す。設置にはマグネットとクランプを用いた。コサインコレクタと PPFD 計は太陽光を測定するために上向きに設置を行った。PPFD 計には図 1 に示す Apogee INSTRUMENTS 製の MQ-200 を用いた。PPFD 値測定は実際に現地に向かいコントローラーの測定ボタンを押して行った。



図 26. 骨組みに設置したコサインコレクタと PPFD 計

透過光測定用のコサインコレクタ 3 つは図 27 のように設置した。設置にはアルミ製の骨組みを使用し上層と中層，中層と下層の間隔を 37 cm とした。また下層のコサインコレクタは地面から 60 cm の高さに設置した。



図 27. 透過光を測定するためのコサインコレクタ

図 28 に分光器を格納した乾燥ボックスを示す。乾燥ボックス内には乾燥材を入れて湿度が上がりすぎないようにした。乾燥ボックスは格納した分光器の USB ケーブルと光ファイバーが通せるように 2 か所に穴あけ加工を行い、開けた穴から水などが透過侵入しないように USB ケーブルと光ファイバーを通した後に接着剤で穴を塞いだ。



図 28. 分光器を格納した乾燥ボックス

設置した 4 つコサインコレクタは光ファイバーでそれぞれ乾燥ボックスに格納した 4 つの分光器と接続した。その際ファイバー 1 本では分光器に届かなかったため図 29 と図 30 に示す光ファイバーの接続コネクターを用いてファイバーを複数本繋げることで分光器と接続した。



図 29. THORLABS 製 ADASMAB3



図 30. THORLABS 製 ADASMA-10

また校正係数を算出する際には光ファイバー1本の条件で算出を行った。しかし光ファイバーを複数本接続して使用すると図 31 のように接続部で損失が生まれてしまう。そのためあらかじめ光ファイバー1本の時に図 32 に示す THORLABS 製の LED 光源である M530L3 のピーク波長である 520 nm の強度を測定しておき光ファイバーを複数本接続した後同じように強度を測定し損失を補正するために係数を算出し強度の校正を行った。この時光源の駆動電流は 0.7 A とした。

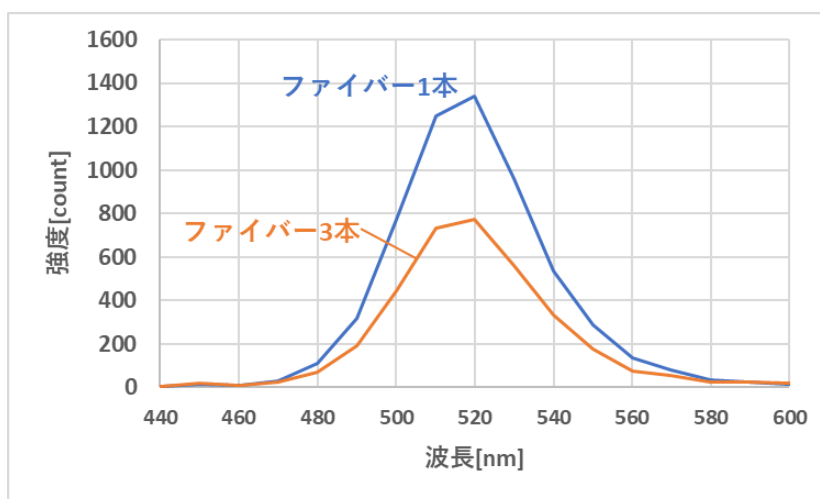


図 31. ファイバーを 3 本接続し M530L3 を測定した際の接続部による損失



図 32. THORLABS 製 M530L3

図 33 に測定用ソフトを示す。このソフトを測定用 PC で起動し USB ケーブルを用いてカラーコンパス MF4 台を PC と接続した。ソフト上で測定間隔の設定をできるため今回は 1 時間ごとに自動で測定を行うように設定した。

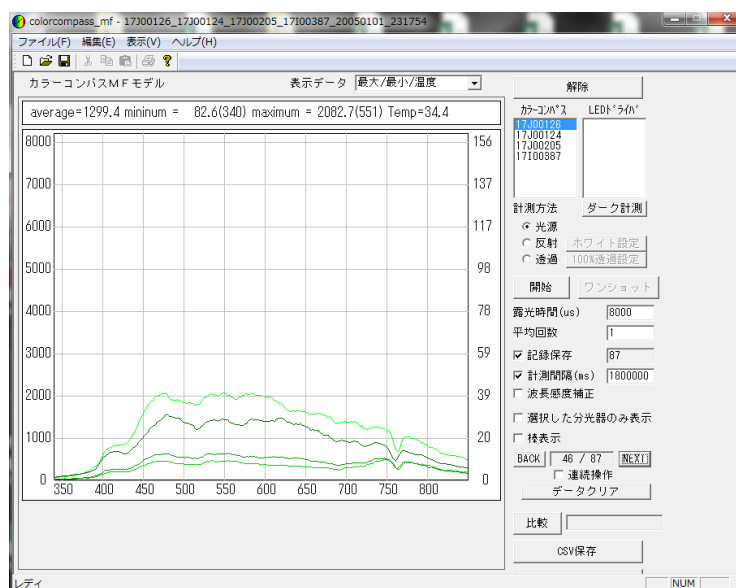


図 33. 測定用ソフト

また構築した測定システムとは別に図 34 に示すコニカミノルタ製 SPAD-502Plus を用いて SPAD 値の測定を同時に行った。SPAD 計での測定では上層、中層、下層それぞれで 10 回測定を行いその平均値を測定値とした。また測定箇所は決まった個所ではなくランダムに測定を行った。そして得られた太陽光のスペクトルと透過スペクトルを用いて PPFD 値と SPAD 値の換算を行い市販の測定装置との比較を行った。



図 34. コニカミノルタ製 SPAD-502Plus による測定

2.4 KUT ハウスへの設置

高知県農業技術センターで測定を行った後、高知工科大学の研究用ハウスである KUT ハウスへ装置の設置を行った。KUT ハウス内ではピーマンの栽培を行っている。

図 35 に KUT ハウスでのコサインコレクタの設置状況を示す。KUT ハウスでは高知県農業技術センターと同様に太陽光スペクトルを測定するためのコサインコレクタを骨組みに設置している。

また透過光測定用のコサインコレクタは高さを変えて3つ設置を行った。この時コサインコレクタの設置間隔は35 cmとし下層のコサインコレクタは地上から75 cmの高さに設置した。また図36のように下層のコサインコレクタの横に市販のLAI計である日本環境計測株式会社製のMIJ-15 LAI/Pを設置しLAIの測定を行った。このLAI計は測定間隔を自由に設定することができ、測定も自動で行えるため測定間隔を30分に設定し自動で測定を行うようにした。分光器も同様に30分間隔で測定を行うように設定した。



図 35. コサインコレクタの設置状況

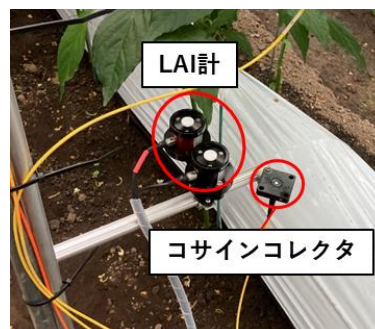


図 36. 下層に設置したコサインコレクタと LAI 計

この LAI 計はセンサ部分には防水機能があるが測定したデータを記録しているデータロガーには防水機能がない。ハウス内は多湿な環境であることに加え消毒液による消毒作業が行われているためデータロガーは防水である必要がある。そこで図 37 に示すデータロガー用の防水ボックスを作成しその中にデータロガーを格納した。防水機能を持ったボックスに配線を通すために穴あけを行い防水キャップで開けた穴から水が浸入しないように対策をすることで作成した。



図 37. 防水ボックスに格納したデータロガー

分光器とコサインコレクタは高知県農業技術センターと同様に乾燥ボックスに格納した分光器を光ファイバーでコサインコレクタと接続した。このとき光ファイバーを複数本繋いだため接続部での損失を考え LED 光源による強度の補正を行った。

測定装置の設置完了後に LAI 計と分光器の測定を開始し得られたスペクトルからの換算値と LAI 計で得られた LAI の比較を行った。

第3章 測定結果

3.1 PPFD 計による測定値と MSS による測定値の比較

図 38 に高知県農業技術センターのビニールハウス内で測定した太陽光スペクトルを示す。設置したコサインコレクタで太陽光スペクトルが測定できていることが確認できる。

図 39 に PPFD 計での測定値と MSS での測定値の比較を示す。グラフのプロット点は 64 点である。相関係数を計算したところ 0.899 であった。

12 時の測定値が 9 時と 16 時に比べ高いのは時刻により太陽高度が変化しているためと考えられる。それに加え極端に値が小さい点は雨や曇りの天候による変化を反映できていると考えられる。9 時の測定点で高いものと低いものがあるのは測定を行った時期により太陽高度が異なっていることを反映しているためと考えられる。相関直線から大きく外れた点はエラーデータであり PPFD 計のセンサがビニールハウスの骨組みなどの影になったことが原因であると考えられる。

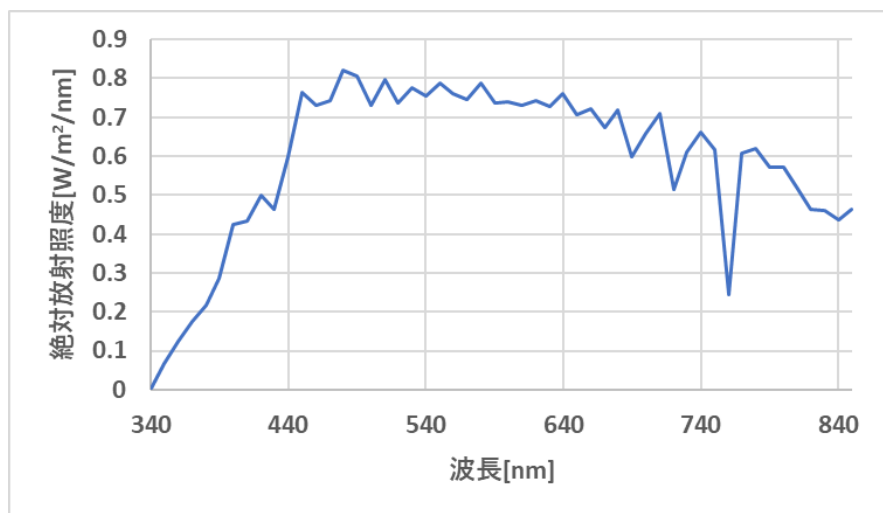


図 38.ビニールハウス内で測定した太陽光スペクトル

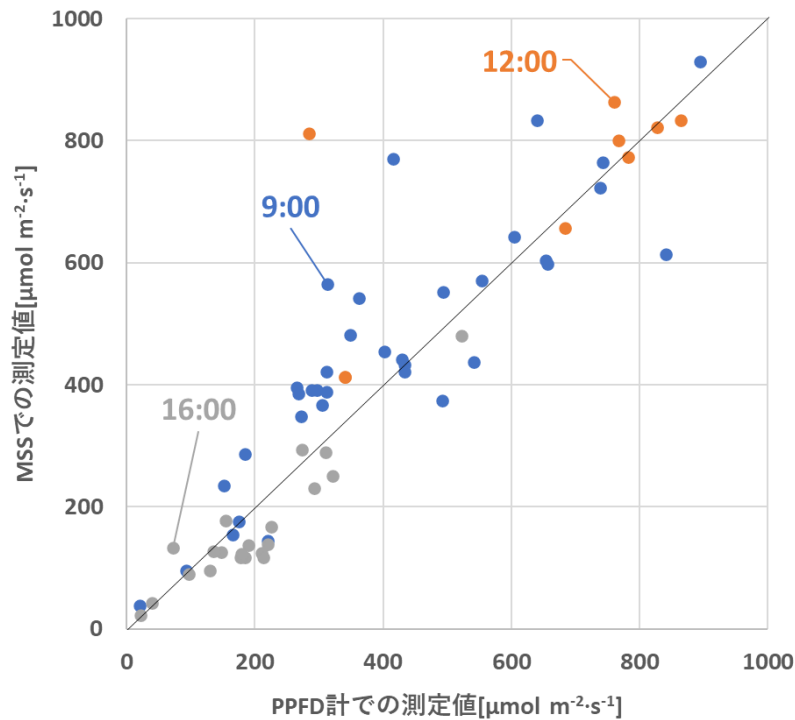


図 39. PPFD 計での測定値とスペクトルからの換算値の比較

PPFD 計の測定値に対し MSS での測定値が高い場合が多いのは PPFD 値の計算方法と天候によるスペクトルの違いが原因であると考えられる。市販の PPFD 計では晴天時の太陽光スペクトルを仮定して係数を用いることで PPFD 値への換算を行っている。一方 MSS での測定では対象となる波長域の波長を 1 つずつ換算し最終的に足し合わせることで PPFD 値を算出している。図 40 に晴天時と雨天時の太陽光スペクトルの違いを示す。雨天時は晴天時に比べ 500 nm 以降でスペクトル形状に違いがあり強度が落ちていることが分かる。この時 PPFD 計では晴天時のスペクトルを参考にしているため本来想定しているスペクトルと形状が異なることで誤差ができていないかと考えられる。一方, MSS での測定ではスペクトル形状に関係なく測定を行うことができ、より正確な測定が行えると考えられる。

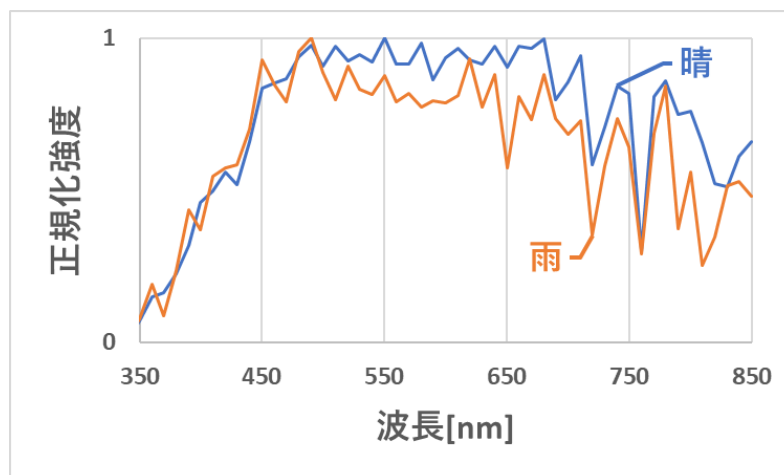


図 40. 晴天時と雨天時のスペクトルの違い

以上の結果より設置した多段式分光測定システム(MSS)で PPFD 値の測定が可能であると考え
る。

3.2 SPAD 計による測定値と MSS による測定値の比較

3.2.1 測定位置による変化

図 41 と図 42 にビニールハウス内で取得した太陽光と透過光のスペクトルの 1 例と強度比を示
す。太陽光スペクトルと比較すると透過光スペクトルは強度が下がっており特に青色光と赤色光
の吸収が大きいことが分かる。これはクロロフィルによる吸収を反映したものであると考えられ
る。また赤外光の透過率が高いのはクロロフィルが赤外光を吸収せずに透過する特性を持ってい
るためと考えられる。

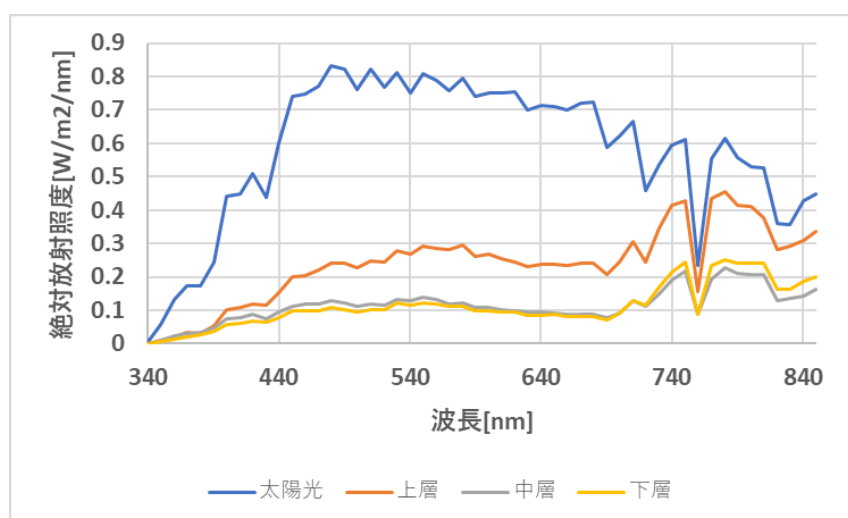


図 41. 高知県農業技術センターのビニールハウス内で測定した太陽光と透過スペクトル

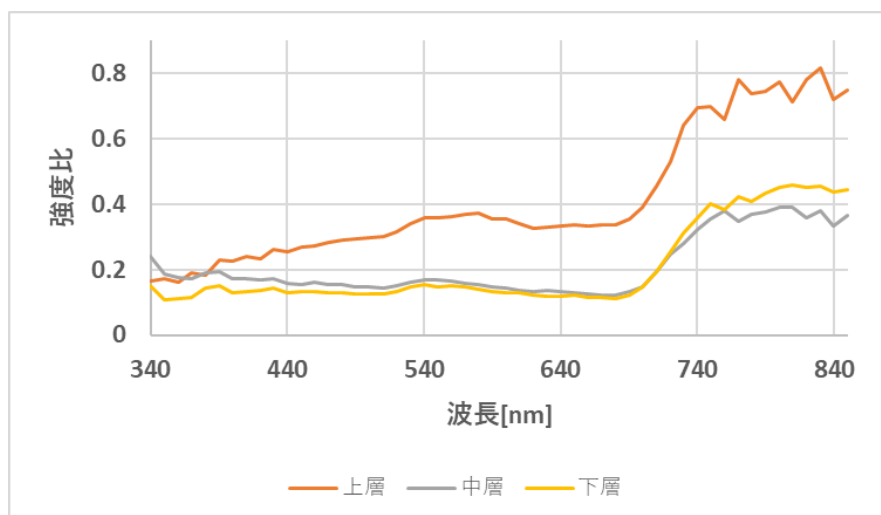


図 42. 太陽光と透過光の強度比

図 43 と図 44 に測定位置による SPAD 値の違いを示す。SPAD 計による測定値では上層から下
層にかけて SPAD 値が低下する傾向がみられた。これは最初に太陽光が当たるのが上層の葉であ

るためだと考えられる。中層，下層に入射する光はすでに上層の葉で吸収された後の光であり光合成に利用する青色光や赤色光が少なくなっている。そのため青色光と赤色光が十分に入射する上層の葉でのクロロフィル濃度を上げることで活発に光合成を行おうとしていると考えられる。一方 MSS による測定値では SPAD 計での測定値のような測定位置での変化はあまりみられなかった。これは測定範囲の違いが原因であり SPAD 計では 1 枚の葉のごく限られた 1 か所を測定しているのに対し今回のスペクトル測定ではコサインコレクタを使い一度に広い範囲を測定している。また中層，下層では上層の葉を含めて測定しているため各層だけの变化までは反映できなかったと考えられる。

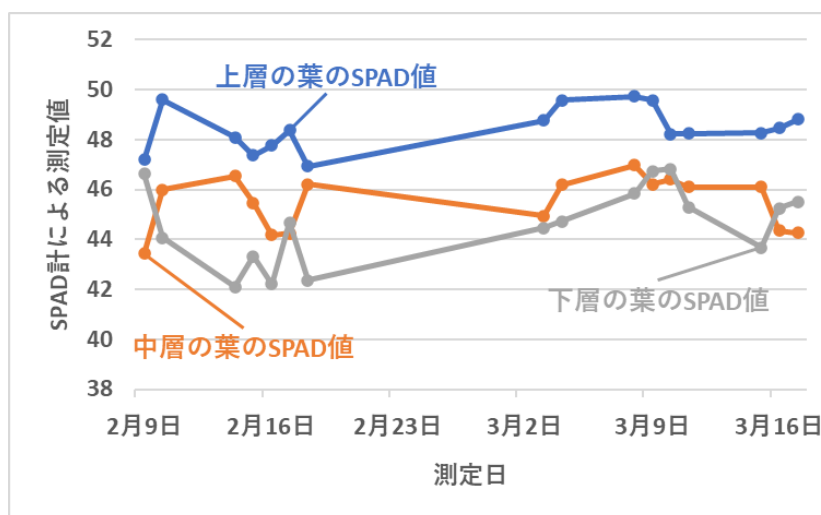


図 43. 測定位置による SPAD 計での測定値の違い

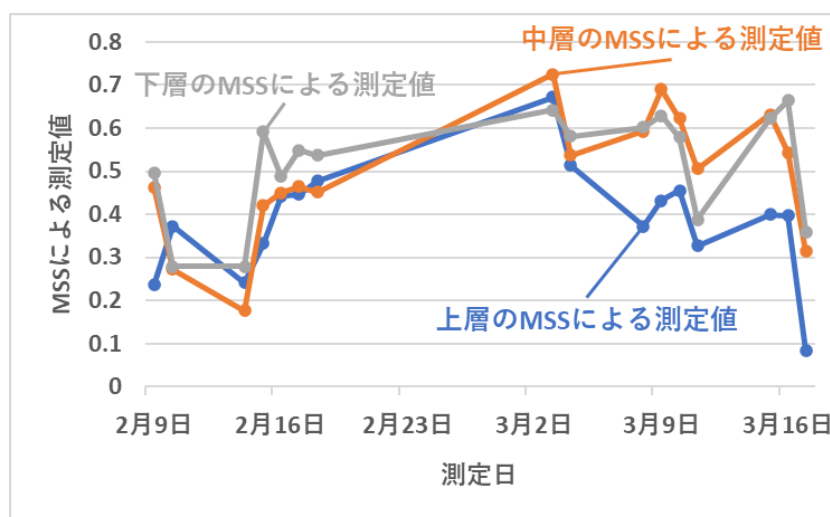


図 44. 測定位置による MSS による測定値の違い

3.2.2 各層での SPAD 計による測定値と MSS による測定値の比較

図 45 から図 47 に各層での SPAD 計による測定値と MSS による測定値の比較を示す。いずれの層でも SPAD 計による測定値の変化を MSS による測定値で追従することができていなかった。原因としてビニールハウス内のナスの葉の剪定作業等があげられる。SPAD 計の測定では 1 枚の葉

を対象に測定を行うため剪定作業により葉の枚数が減っても測定に影響はない。しかしスペクトル測定の場合はコサインコレクタで全体を見ているため葉の枚数が減ることでコサインコレクタ周辺の光環境が変化し測定に影響を及ぼすと考えられる。またこの特性上 MSS による測定値は LAI のような葉の枚数の変化も含んでいると考えられる。この違いが SPAD 計での測定値の変化をスペクトルからの換算値で追従しきれなかった原因であると考えられる。

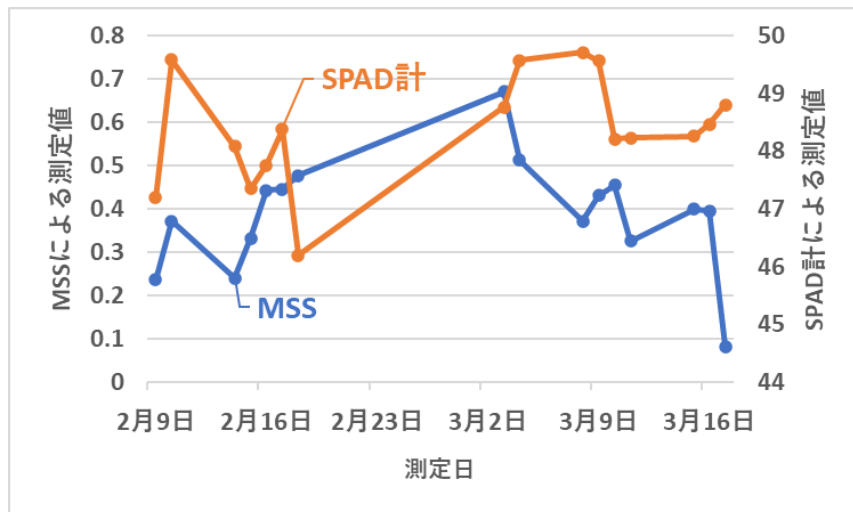


図 45. 上層での SPAD 計と MSS による測定値の比較

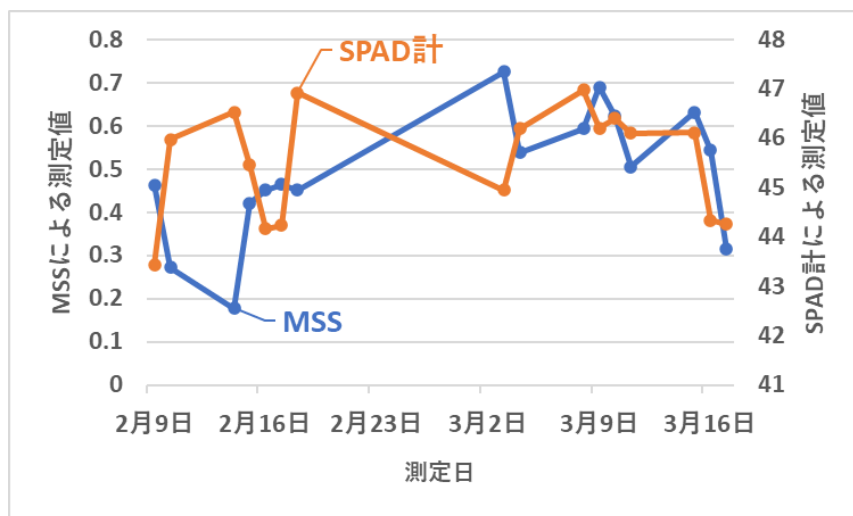


図 46. 中層での SPAD 計と MSS による測定値の比較

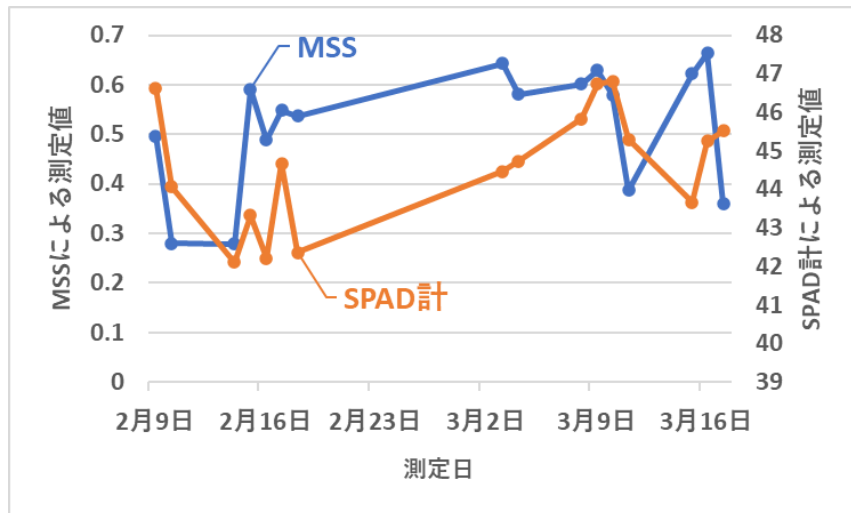


図 47. 下層での SPAD 計と MSS による測定値の比較

3.3 フィトクロムによる避陰反応の測定

3.3.1 各層での光強度比の比較

図 48 に 11 時における 660 nm での光強度比の変動を示す。図 49 に示す 8 時での測定結果と比較すると 11 時の測定結果では光強度比が 1 を大きく超える測定点が非常に多い。これは太陽光スペクトルを測定するコサインコレクタにビニールハウスの骨組みの影がかかってしまい透過スペクトルの強度よりも太陽光スペクトルの強度が小さくなってしまったためであると考えられる。光強度比が 1 を超えるデータはエラーデータであるため光強度比が 1 を超えるデータはすべての時間の測定データで除去を行った。

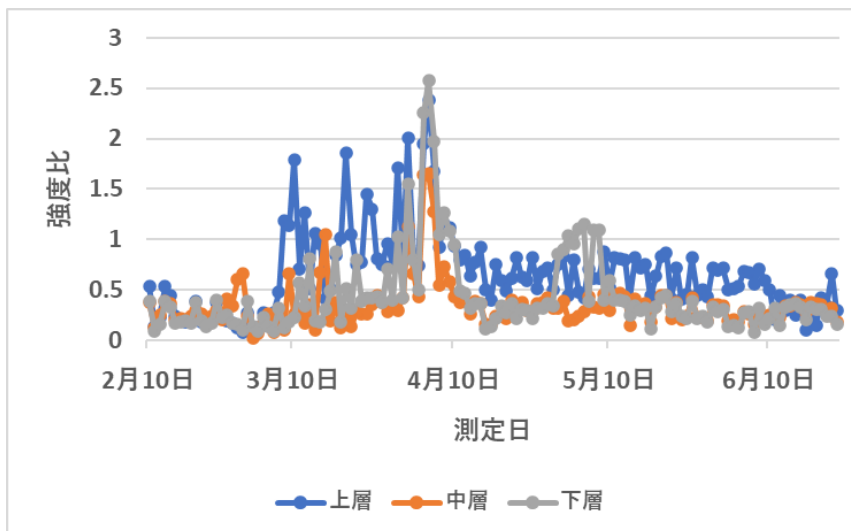


図 48. 11 時における 660 nm での光強度比の変動

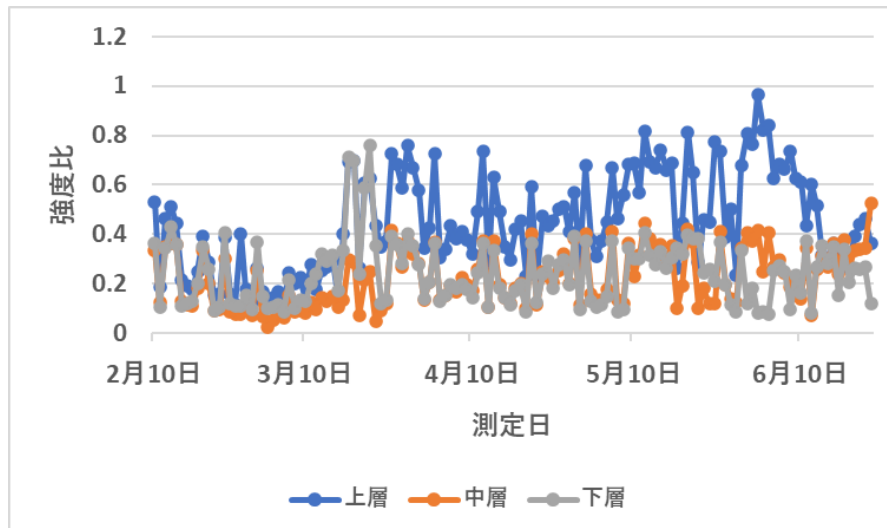


図 49. 8 時における 660 nm での光強度比の変動

図 48 と図 49 では光強度比の変動が非常に短い間隔で起きておりデータが見つらい状況となっている．そこで当日と前後 2 日で移動平均を行うことでデータの見やすさを改善するとともに細かな変動の中に隠れている変動を見つけようと考えた．図 50 に移動平均適応後の 8 時における 660 nm での光強度比を示す．これは図 49 に移動平均を適応したものであり比較するとグラフが見やすくなったことが分かる．また図 49 では分かりにくかった光強度比の大きな変動が見えるようになった．図 50 を見ると周期的に光強度比が変動してことが分かる．また図 50 では上層の強度比に比べ中層と下層の光強度比が低い．これは上層に比べ中層と下層の方のコサインコレクタがみている葉の枚数が多く吸収が多いためと考えられる．

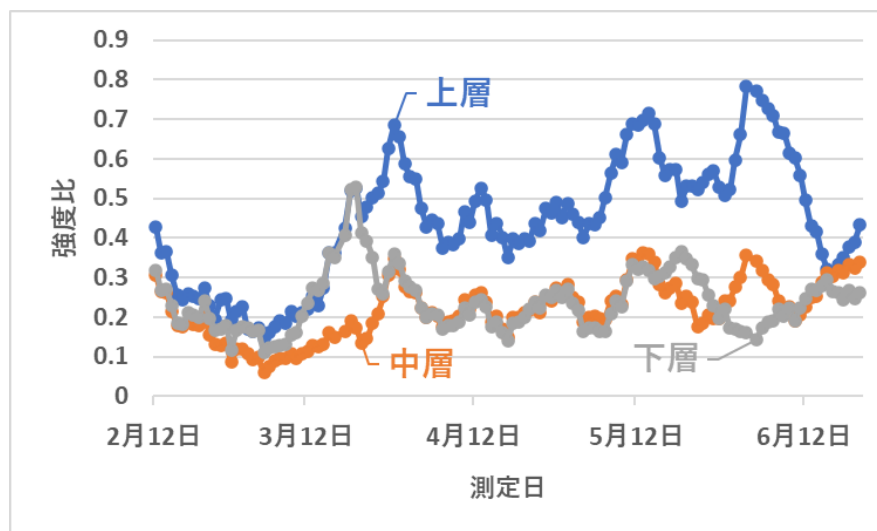


図 50. 移動平均適応後の 8 時における 660 nm の光強度比

図 51 から図 53 に各層での 660 nm と 730 nm での光強度比の比較を示す．上層，中層，下層のいずれでも 660 nm の光強度比よりも 730 nm の光強度比の方が高いことが分かる．これは葉に含

まれるクロロフィルが赤色光である 660 nm の光を吸収し近赤外光である 730 nm の光を透過しているためであると考えられる。

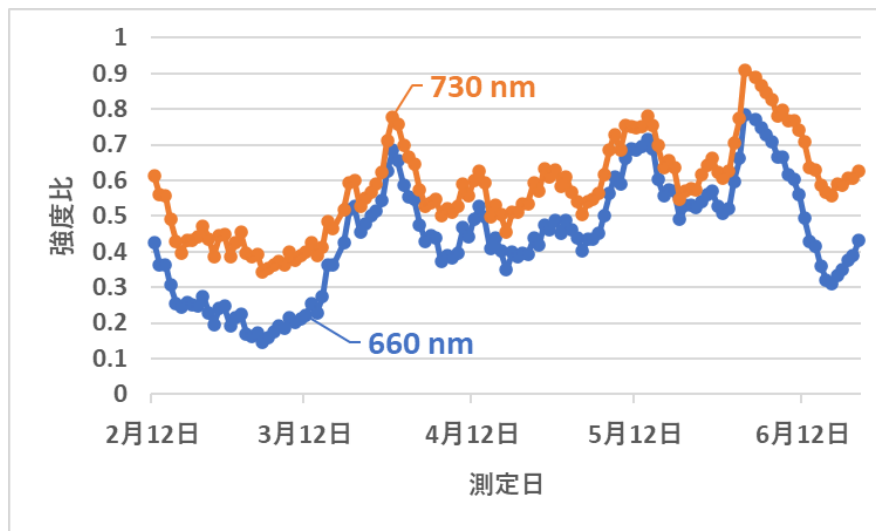


図 51. 上層での 660 nm と 730 nm の光強度比の比較(8 時)

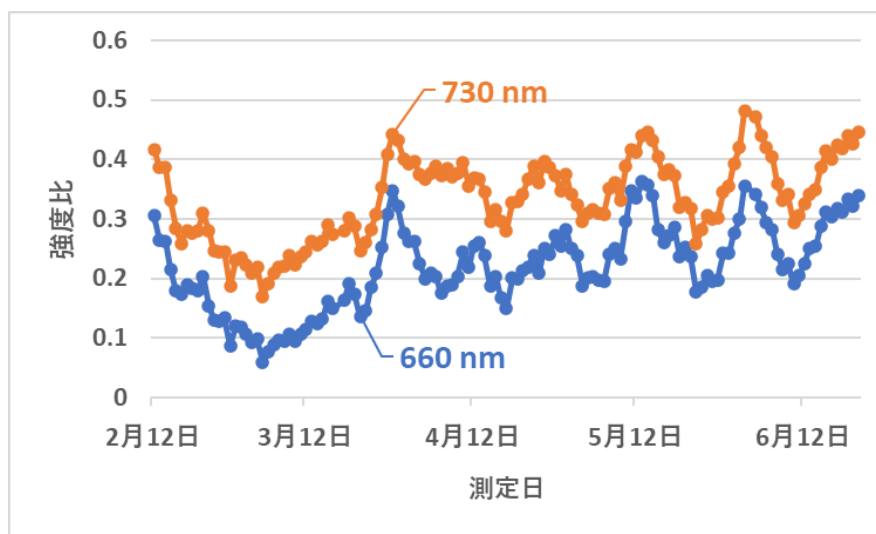


図 52. 中層での 660 nm と 730 nm の光強度比の比較(8 時)

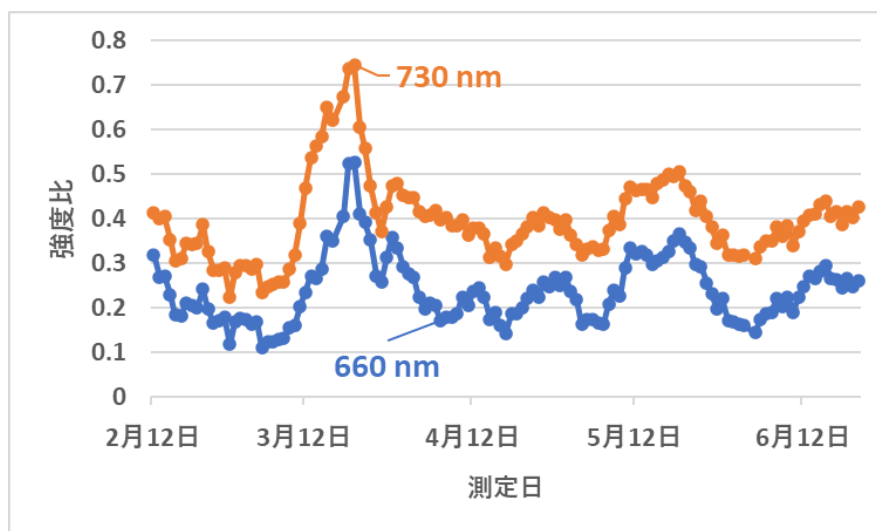


図 53. 下層での 660 nm と 730 nm の光強度比の比較(8 時)

3.3.2 各層での光強度比の割合の比較

図 54 に 8 時における各層での光強度比の割合を示す. 各層で光強度比の割合の変化が確認できこれは葉の茂り具合を表していると考えられる. 光強度比の割合が低下しているところでは葉が茂り赤色光が少なくなっており逆に光強度比の割合が上昇しているところでは葉が少なくなり赤色光が多く入射していると考えられる. 上層と中層, 下層を比較したとき中層と下層の変化に比べ上層では変化が少なかった. これは図 50 と同様に上層のコサインコレクタがみている葉が中層と下層に比べて少ないためであると考えられる.

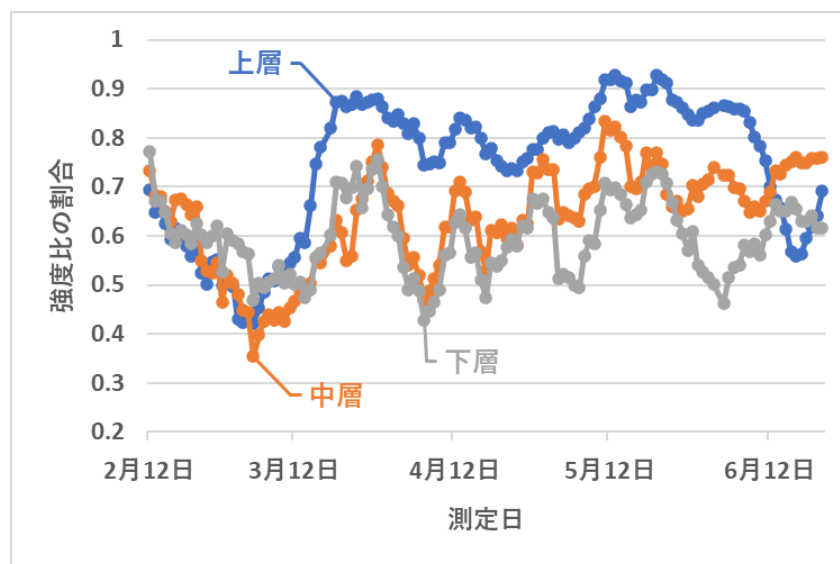


図 54. 8 時における各層における光強度比の割合

このように光強度比の割合の変動が測定できていることから赤色光と近赤外光の光強度比の割合を葉の剪定時期や切る葉の量の指標として用いることができるのではないかと考えられる.

3.4 LAI 計による測定値と MSS による測定値の比較

3.4.1 葉の枚数変化に対する変動

LAI 計を用いた測定では実際に葉を切り落とし葉の枚数が減少したことによる影響が LAI 計での測定値とスペクトルからの換算値にどのように現れるかの実験を行った。葉は合計で 4 回切り落としたが今回は特に影響の大きかった 1 回目と 4 回目の 2 回分について示す。

図 55 から図 58 に切り落とした葉の面積と切り落とした前後での様子を示す。葉の面積は imageJ を用いて算出した。1 回目ではコサインコレクタに近くかつ大きな葉といった測定に影響を及ぼす可能性の高い葉を切り落としその際切り落とした葉の面積は $53,280.46 \text{ mm}^2$ であった。4 回目では中層のコサインコレクタから上にある葉を中心に多数の葉を切り落とした。この際切り落とした葉の面積は $377,218.1 \text{ mm}^2$ であり 1 回目と比較すると 7 倍近くの面積の葉を切り落とした。



図 55. 1 回目(12 月 15 日 13 時 48 分)に切り落とした葉



図 56. 葉を切り落とす前(左)と切り落とした後(右)の様子 (1 回目)

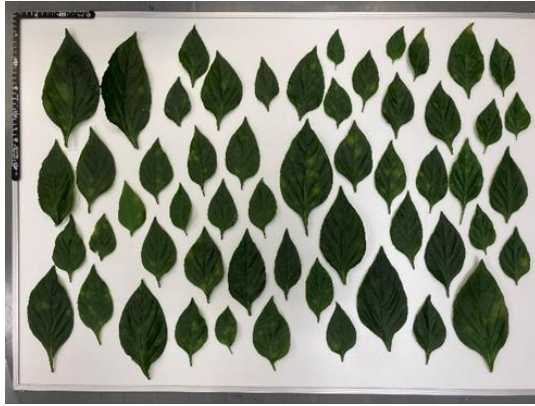


図 57. 4 回目(1 月 19 日 13 時 50 分)に切り落とした葉



図 58. 葉を切り落とす前(左)と切り落とした後(右)の様子 (4 回目)

図 59 と図 60 に 9 時から 15 時における LAI 計での測定値と MSS での測定値の比較を示す．横軸は測定日であり縦軸は LAI 計での測定値と MSS での測定値となっている．また図 59 中の黒線は 1 回目に葉を切り落としたことを表しており図 60 中の黒線は 4 回目に葉を切り落としたことを示している．図 59, 図 60 ともに黒線の前後で LAI 計での測定値と MSS での測定値の両方が変化していることが分かる．しかし上層での MSS の測定値ではあまり変化がなかった．MSS での測定値に注目すると上層の測定結果が中層、下層に比べ低くなっていることが分かる．これは上層にある葉の量と中層と下層にある葉の量の違いを反映できているためと考えられる．グラフを見ると LAI 計の測定値が大きく低下したり上昇したりしている点があることが確認できる．これは LAI 計で用いている PAR と NIR を測定するセンサのどちらかが茎の影などになり隠れてしまったためと考えられる．それを確認するために実際にセンサの上に葉などを置き LAI 計の測定結果がどのように変動するのかの実験を行った．

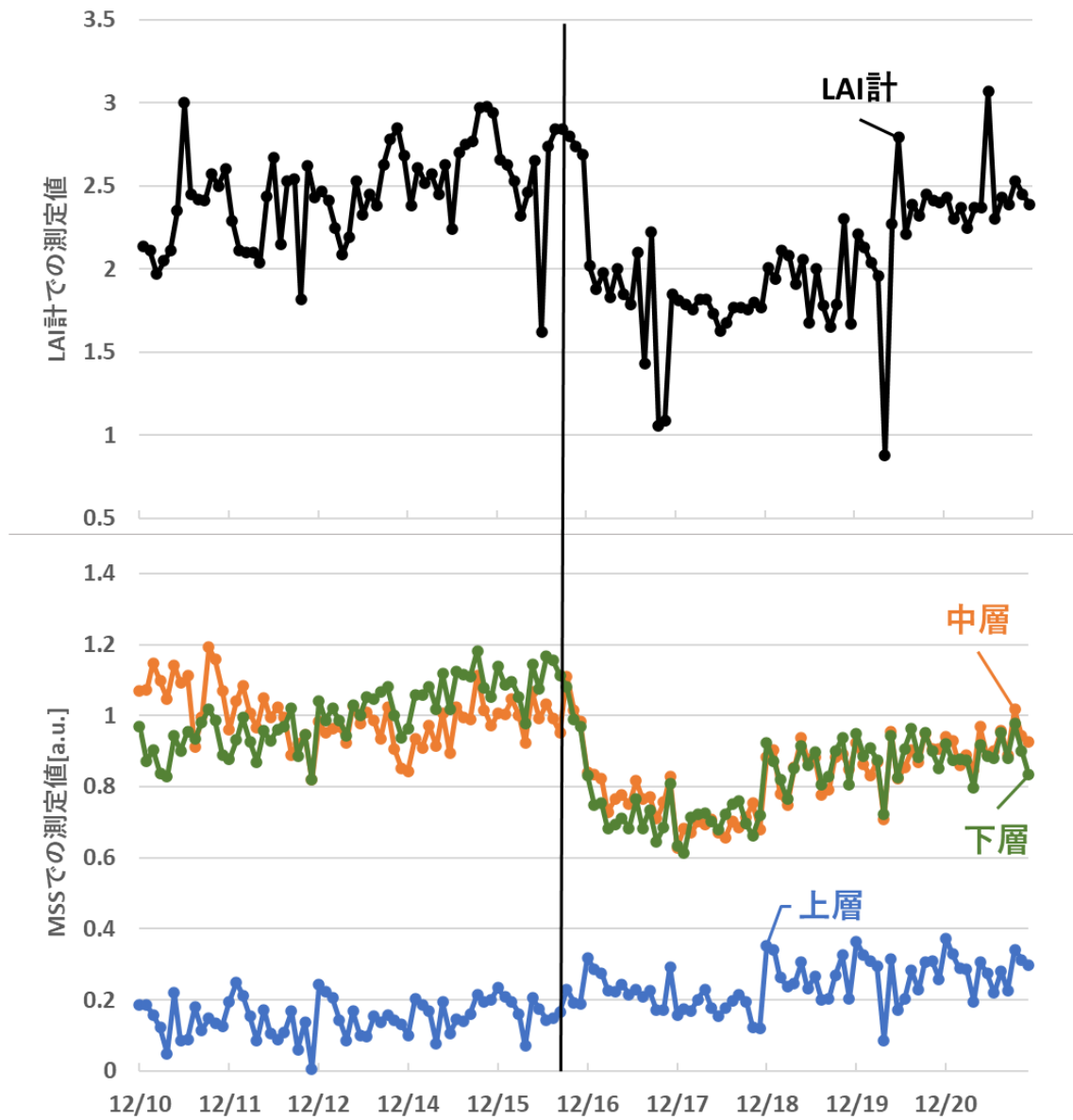


図 59. 9時から15時におけるMSSによる測定値とLAI計による測定値の比較
(12月10日～12月20日)

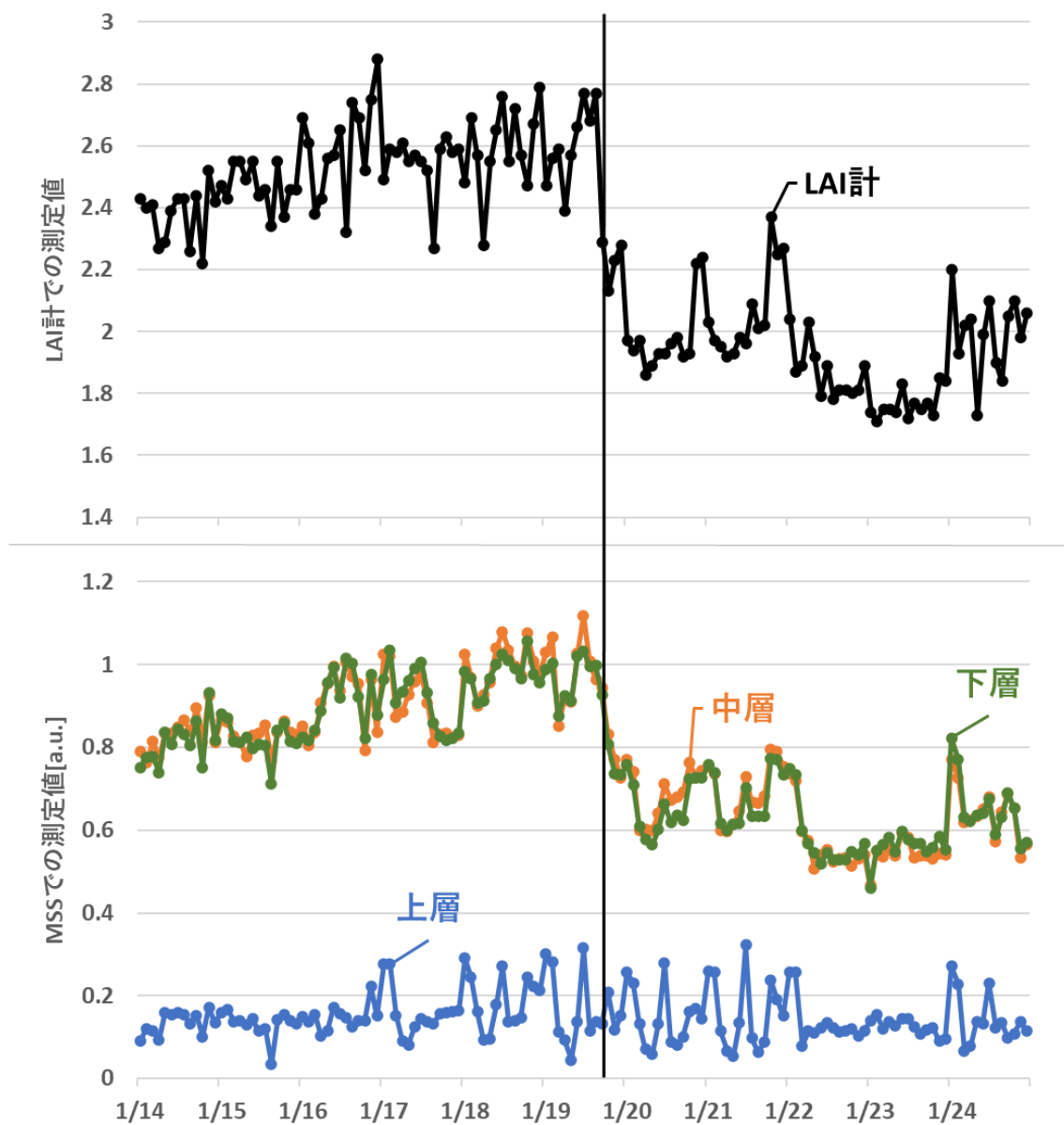


図 60. 9 時から 15 時における MSS による測定値と LAI 計による測定値の比較
(1 月 14 日～1 月 24 日)

3.4.2 LAI 計のセンサが影になった際の変動

図 61 に何も置いていない状態のセンサの状況を示す. また図 62 から図 65 に各センサの上に葉路紙を乗せた時の状態を示す. 実験では図に示す 5 つの状況で LAI 計による LAI と PAR, NIR の測定を行った.



図 61. 通常時のセンサの状態



図 62. PAR センサに葉を乗せた状態



図 63. NIR センサに葉を乗せた状態



図 64. PAR センサに紙を置いた状態



図 65. NIR センサに紙を置いた場合

図 66 から図 68 に各状況における LAI 計による測定値と PAR, NIR の変化を示す. PAR センサに葉を置いた場合には PAR の値が葉の吸収により低下するが NIR の値はほとんど変化しないため算出される LAI は大きくなる. NIR センサに葉を置いた場合には NIR が低下するものの PAR に葉を置いた時ほどは低下しなかった. これは葉が赤外線吸収せずに透過するためだと考えられる. そのため LAI 計による測定値はあまり変化しなかった. PAR センサに紙を置いた状況では紙を置いたことにより PAR センサにほとんど光が入らないため PAR の値はかなり低くなる. そのため算出される LAI はかなり大きくなり 12 まで上昇した. 次に NIR センサに紙を置いた場合には PAR センサに紙を置いた場合と同様に NIR の値はかかり低くなった. そのため PAR と NIR の比をとった場合に結果が 1 以下となり結果的に算出される LAI は負の値となった.

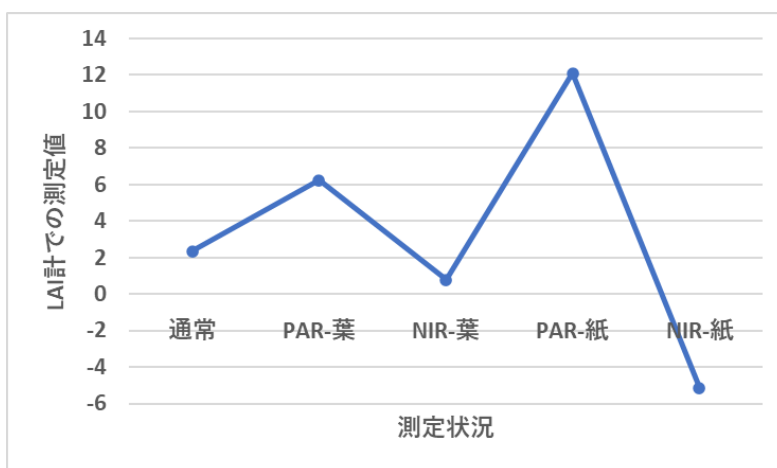


図 66. 各状況における LAI 計による測定値の変化

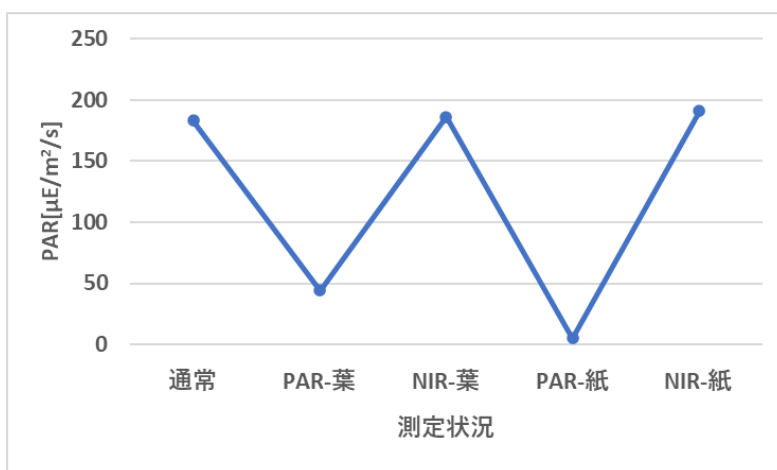


図 67. 各状況における PAR の変化

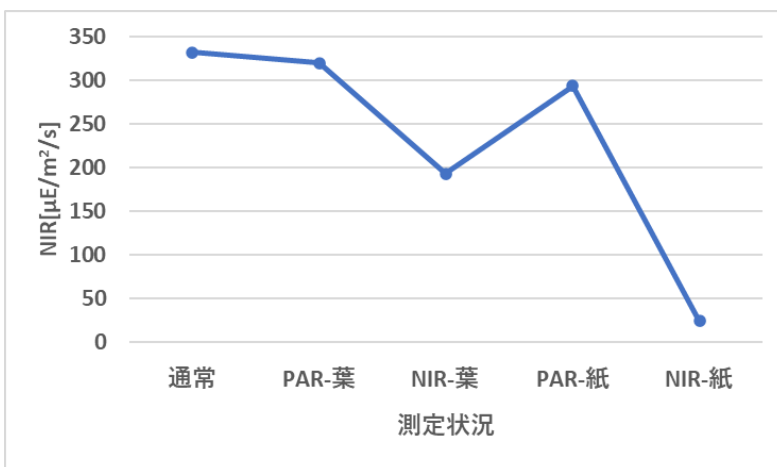


図 68. 各状況における NIR の変化

このように LAI 計では PAR センサと NIR センサのどちらかが茎などの影になった場合に LAI 計での測定結果に大きな影響を及ぼすことが確認できた。つまり図 59 で LAI 計での測定値が大きく変動している点はセンサが影になっているためと考えられる。また値が変動している点は 11

時や 12 時など太陽高度が高い時間に多かった。これは太陽高度が低い時間には直達光が圃場内に入りづらく散乱光が多くなるが太陽高度が高い時間には直達光が入りやすくなるため影ができやすくなりセンサを覆ってしまうためだと考えられる。一方今回設置した測定システムではコサインコレクタ 1 つで透過光のスペクトルを測定している。また算出の際 LAI 計とは異なり透過率の比をとっているため仮に太陽光スペクトルを測定しているコサインコレクタと透過スペクトルを測定するコサインコレクタのどちらかが影になったとしても問題なく測定が可能である。

以上のことから今回設置した測定システムではコサインコレクタが影になることの心配をする必要はなく LAI 計と同様に葉が少なくなった時の変動も捉えることができていることから葉面積の変化の測定に利用できると思われる。

第4章 まとめ

本研究では超小型分光器を用いた光環境測定システムを圃場内に構築し得られたスペクトルから PPFD 値や SPAD 値などの光環境情報を取得することを目的とし実際に圃場内に測定システムを構築し測定を行った。

実際に測定から得られた透過光スペクトルからはクロロフィルの特徴的な吸収である青色光と赤色光の吸収が確認できた。また植物の葉が赤外光を透過するという透過特性についても透過光スペクトルから確認できた。

PPFD 値の測定では市販の PPFD 計の測定結果と比較して高い相関係数を得ることができた。また市販の PPFD 計と比較した場合天候によるスペクトル形状の変化にも対応できより正確な測定が可能であるという利点を発見した。SPAD 計の測定では剪定などによる葉の枚数の減少など光環境の変化により SPAD 計の測定結果をうまく追従することができなかった。しかし SPAD 計とは異なり MSS での測定値では広い範囲を一度に見ているため一度に広範囲の SPAD 値を測定することができる可能性があると考えられる。強度比の割合の測定では短い間隔で値の上下があったため移動平均などの処理を行った。その結果データが見やすくなり強度比の割合が周期的に変化していることが分かった。LAI の測定では市販の LAI 計と同様の変化を MSS でも得ることができ葉を落とした際の変動も確認できた。また市販の LAI 計と比較するとディテクターが影になった際の優位性があることが確認できた。

これらの結果から今回圃場内に構築した多段式分光測定システム(MSS)で太陽光スペクトルと透過光スペクトルの測定を行うことができ、得られたスペクトルから光環境情報の取得が可能であることが分かった。しかし SPAD 値の測定については今後も測定方法の改善などが必要であると考えられる。

参考文献

- [1] 文部科学省, 光資源を活用し、創造する科学技術の振興－持続可能な「光の世紀」に向けて－第2章 豊かなくらしに寄与する光 2 光と植物－植物工場, 文部科学省,
https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu3/toushin/attach/1333537.htm, 2009
- [2] コニカミノルタ SPAD-502Plus 取り扱い説明書 p19
- [3] ファイトテクノロジー研究会, “葉緑素を測る,” ファイテック How to みる・きく・はかる,
pp.20-21, 株式会社養賢堂, 東京, 2002.
- [4] 長谷あきら, 植物が光を感じる仕組み, 日本植物生理学会,
<https://jspp.org/hiroba/essay/nagatani.html>, 令和5年1月30日
- [5] 浜松ホトニクス株式会社, ミニ分光器 C12880MA,
https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/c12880ma_kacc1226j.pdf, 令和4年12月
- [6] THORLABS, CCSA2, THORLABS,
https://www.thorlabs.co.jp/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=3482, 2013

謝辞

本研究を進めるにあたり適切なアドバイスなどで助力いただいた高知工科大学システム工学群准教授 田上周路先生に深く感謝申し上げます。

またお忙しい中副査を引き受けてくださった高知工科大学システム工学群教授 八田章光先生，准教授 小林弘和先生にも深く感謝申し上げます。

高知県農業技術センターの永尾航洋様，山崎浩実様にはビニールハウス内への装置設置の際や測定データへのアドバイスなどのご協力に感謝しております。

同研究室の先輩，後輩の方々には装置作成や測定等にご協力いただきとても感謝しています。

6年間学費等の援助をしてくださった両親に深く感謝しています。

長い間ありがとうございました。