

令和 三年度
修士論文

植物生理応答の検出を目指した画像解析
ーLED 光源を用いた非スペックル画像の可能性ー

令和 四年 三月

三重大学大学院 生物資源学研究科 共生環境学専攻

環境情報システム工学講座

応用環境情報学研究室

阿久根 里奈

目次

第1章	緒言	1
第2章	スペックル画像と非スペックル画像	3
第1節	レーザスペックル法の原理	3
第2節	非スペックル画像	3
第3章	画像処理方法の選定	5
第1節	概要	5
第2節	実験方法	5
第3節	解析方法	6
第4節	結果および考察	8
第4章	植物葉乾燥過程のレーザスペックル法による解析	12
第1節	実験概要	12
第2節	実験方法	12
2-1	実験試料	12
2-2	実験方法	13
第3節	解析方法	18
第4節	結果	18
第5節	考察	24
第5章	植物葉乾燥過程のランレングス解析	27
第1節	概要	27
第2節	解析方法	27
第3節	結果	28
第4節	考察	30
第5節	ノイズの検討	32
5-1	実験・解析方法	32
5-2	結果	32
第6章	色情報への着目	33
第1節	概要	33
第2節	FM, ランレングス解析	33
2-1	解析方法	33
2-2	結果および考察	33
第3節	L*a*b*に特化した解析	40
3-1	色差	40
3-2	色差の結果および考察	40

3-3	彩度・色相.....	42
3-4	彩度・色相の結果.....	42
3-5	彩度・色相の考察.....	43
第7章	結言.....	45
謝辞		46
参考文献		47
付録		49

第1章 緒言

近年、農業就業人口の減少や高齢化により、労働力の不足による植物の生育管理の困難と
なっていることや平均経営耕地面積の拡大していることが問題になっている¹⁾。そこで栽培
技術や経験の継承や一人当たり作業面積の限界を打破する技術革新が必要となっている。
これらの問題を解決するために農林水産省より、スマート農業が推奨されている²⁾。スマー
ト農業とは ICT などの先端技術と栽培管理などの農業技術を掛け合わせ、農作業の省力化・
軽労化や生産性の飛躍的向上を図るものである。例えば自動走行トラクタや作物の生長に
合わせ灌水施肥を自動実行する養液土耕システムなど、環境を計測・制御する技術は多く実
用化されている。しかし、植物の生育状態を計測する技術は実用化に至っているものが少な
い。

大気-植物-土壌系において、植物体内での水の移動がエネルギーの高低によって決定され
ること、および植物の生理状態が水のエネルギーに深く依存している³⁾。そのため植物状態
を把握するためには、水ポテンシャルの使用がより適切であると考えられる。植物体内の水分状
態は吸水と蒸散による損失の均衡によって決定されており、土壌の乾燥等による水分吸収
の低下や蒸散の著しく盛んな条件下において水分の欠乏状態が生じる。

このため、精密な水分管理を必要とする場合には、植物の適切な水分状態の把握が重要と
されている。水分状態の測定が可能な方法にプレッシャーチャンバー法⁴⁾、ポロメータ法⁵⁾
があるが、これらの方法は破壊計測である。非破壊・非浸食で水分状態を計測する方法には
近赤外分光法⁶⁾やハイパースペクトル法⁷⁾、クロロフィル蛍光法⁸⁾があるが、これらの計測
装置は非常に高価であり、個人での購入が難しいことが問題である。

そこで、本研究では植物の生育状態を簡便かつ非破壊で計測するシステムとして、レーザ
スペックル法による植物センシングを行ってきた。レーザスペックル法はレーザなどのコ
ヒーレント光による干渉現象により現れる斑点模様を解析することで、植物生理現象のよ
うなマイクロな動きを検出できるものである。

従前の研究で、レーザスペックル法により植物の水ストレスが検出されることが示唆さ
れた⁹⁾。レーザスペックル法で用いられる解析方法には輝度値が使用されており、多くは輝
度値変動を解析している。一方で、LED などのインコヒーレント光では、干渉が非常に少
ないため同様の現象は起きないが、Motion Magnification¹⁰⁾などの解析例があり、対照の微細
動を反映した輝度値変動が見られる可能性がある。そこで、インコヒーレント光源の輝度情
報を解析することでも、水ストレスを検出できるのではないかと考えた。LED の特徴とし
て、レーザより安価で容易に購入でき、様々な色情報を取得できるため、水ストレス以外の
植物生理情報の取得も期待できる。従前の研究でコントラスト調整をすることで塗料の乾
燥過程をインコヒーレント光で検出することができた。そして同様に植物葉で実験を行っ

たところ、緩やかな変化が見られた。

そこで本研究では、LED 光源で撮影した非スペックル画像で水ストレスが検出することを目的とした。植物葉での再実験とコントラスト調整を含む画像処理方法、そして解析方法を検討し、スペックル画像と非スペックル画像の双方で調査する。

第3章では非スペックル画像の画像処理方法の選定を行うために、従前の研究である塗料の乾燥過程の画像を用いて様々な画像処理を行い、レーザスペックル法で解析した。第4章では、植物葉の乾燥過程のスペックル画像と非スペックル画像を取得し、選定した画像処理を用いて解析を行った。そして、植物葉に適した画像処理方法を選定した。第5章では非スペックル画像に適切な解析方法を検討するため、レーザスペックル法とは異なるテクスチャ解析を試行した。第6章では、さらに非スペックル画像に特化した解析方法を検討するため、非スペックル画像で取得可能な色情報を用いた解析方法を、従来の解析方法に加えて試行した。

第2章 スペックル画像と非スペックル画像

第1節 レーザスペックル法の原理

レーザスペックル法とは光センシング技術の一つである¹¹⁾。レーザ光などのコヒーレント光で対象を照射し、その反射光や透過光を観察した際に斑点模様が観察される。この斑点模様はスペックルと呼ばれ、このような斑点模様を作る現象をスペックル現象と呼ぶ。スペックルはレーザ光が、反射光の場合は対象表面のマイクロな凹凸、透過光の場合はその中にある散乱粒子でランダムに散乱され、各点からの散乱波が観察面（カメラなら撮像素子にあたる）の各点で重なり合わさって生じる干渉現象である。図1に今回全ての実験に使用した反射法によるスペックル形成原理の模式図を示す。また、スペックルを捉えたものをスペックル画像と呼び、内部の動態や表面のマイクロな凹凸に依存した模様となるため、スペックル画像を取得し解析することで対象の微小動作を観測可能である。レーザスペックル法には様々な解析方法が使用されており、代表的なものには各フレーム間における1画素の輝度値の差から動作を検出できる Fujii Method (FM)¹²⁾が挙げられる。実際に、金属のひずみ計測¹³⁾や網膜上の血流計測¹⁴⁾など実用化がされており、このレーザスペックル法を植物に適用することで植物の生理現象に伴った植物の表面や内部の微小動作の検出が可能である。

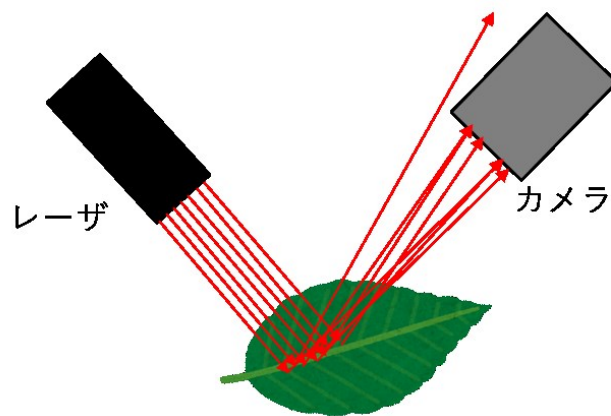


図1 スペックル形成原理（反射光）

第2節 非スペックル画像

図2, 3はダイズ葉にレーザを透過させて得たスペックル画像、および非スペックル画像である。スペックル画像はレーザなどのコヒーレント光の干渉による斑点模様を捉えたものである。しかし、非スペックル画像はLEDなどの様々な波長を含むインコヒーレント光を照射して得られる画像であり、干渉が起きている可能性があるが、起きていない確率が圧倒的であるため、スペックルは画像では確認できない。また、様々な色を含むカラー画像を

取得できるため、色情報はもちろん、スペックル画像で得られる輝度値を取得することも可能である。そのため、様々な植物生理情報を取得することが可能なのではないかと考えられる。

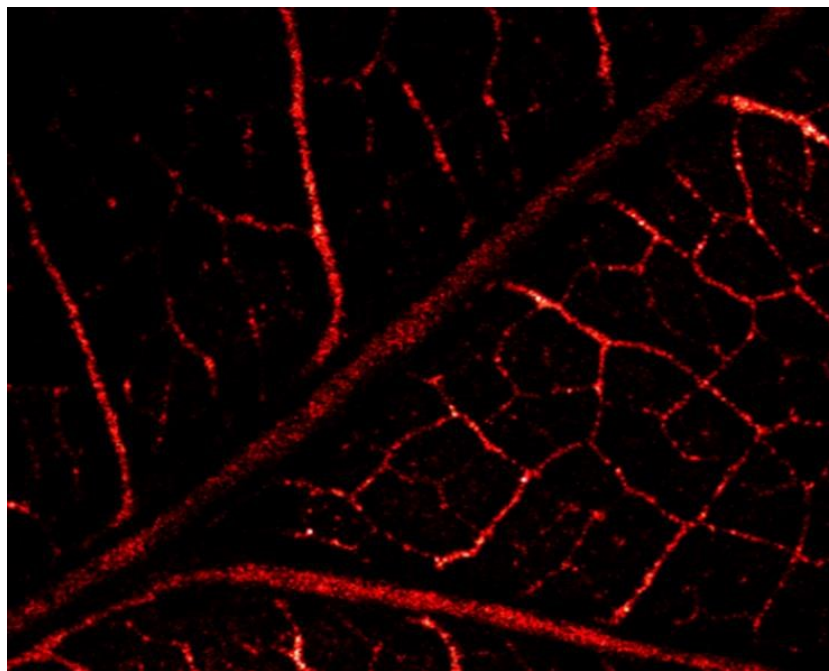


図2 ダイズ葉のスペックル画像

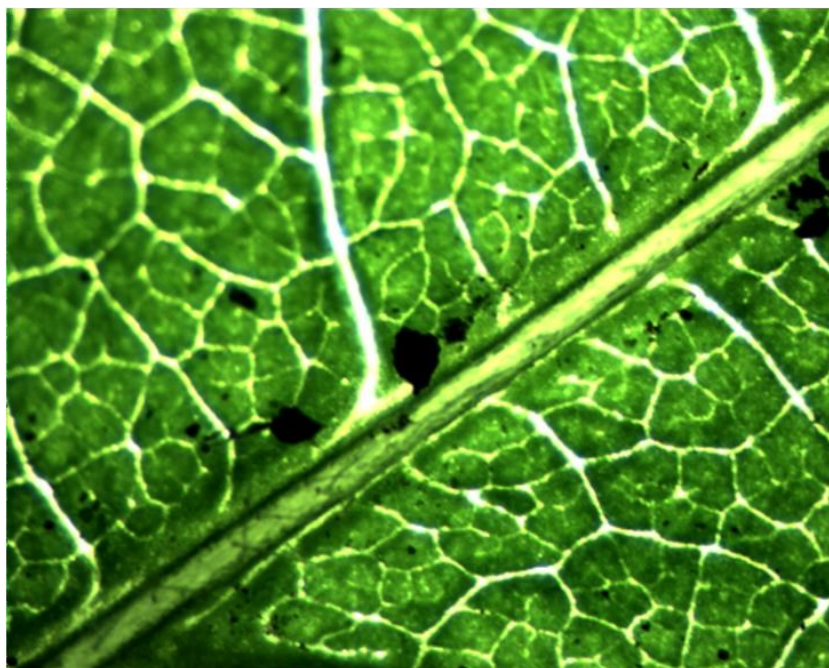


図3 ダイズ葉の非スペックル画像

第3章 画像処理方法の選定

第1節 概要

従前の研究で、塗料の乾燥過程を撮影したスペckル画像では画像処理を行わずに乾燥による動態を捉えることができた。そして、非スペckル画像では輝度値変動が微小なため、コントラスト調整を行うことで変動を広げることで大きく捉えることができたことと示唆される。そこでノイズ除去や色調整などの画像処理を行うことで、より変動を大きくとらえられるのではと考え、様々な画像処理方法を組み合わせ、解析をした。

第2節 実験方法

本実験では、スペckル変動が容易に解析できる対象として塗料を選択し、時間経過に伴う変動のない図4のABS樹脂プレート(60×40×10 mm, 塗料塗布部分 20×30×1 mm)を比較対照とし、これらを同時に観察できるシステムを構築した。プレートは3サンプル用意し、LED光がプレート部と塗料部に均等に照射されるよう、長辺を白色LEDに向けて設置した。計測開始から10分おきに、露光時間3 ms, 10 fps で10秒間撮影し、60分目まで実施した(図5)。半導体レーザー(LDU33, 4.4 mW, 635 nm, シグマ光機)と白色LED(富士倉, DN-002, 20 W)の光源で交互に撮影し、各撮影時にそれぞれ計100枚の画像を取得した。レーザー光は拡大のため、平凹レンズ(SLB-30-35NM, シグマ光機株式会社)を通して対象に照射した。CCDカメラ(DCU223C, THORLABS)にレンズ(WD 25-∞ mm, FL 4.5 mm, Edmund)を装着し、撮影した(図6)。光源は実験開始後、双方とも点灯したままにしており、光源が必要ないときは簡易的な遮蔽板で光源を遮った。実験は2019年11月20日に行った。

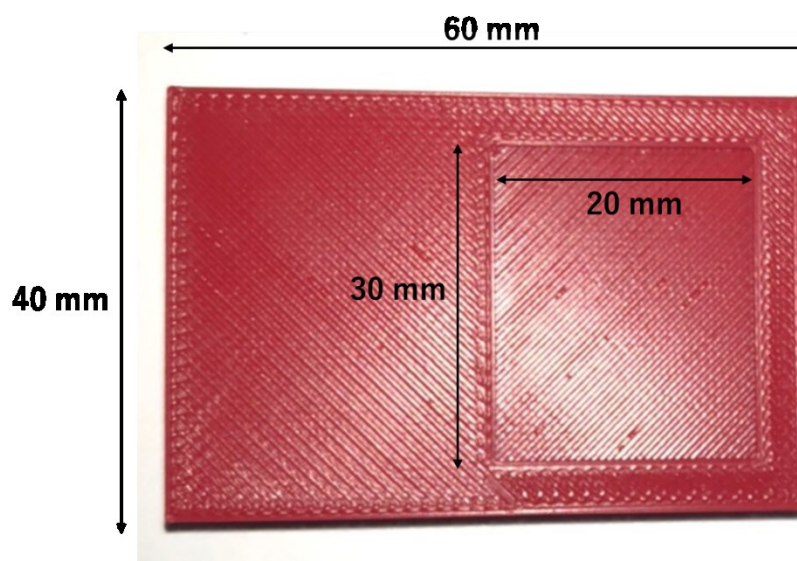


図4 ABS樹脂プレート

撮影画像	光源	撮影方法
スペckル画像	レーザー	10分
非スペckル画像	LED	10分

図5 計測方法

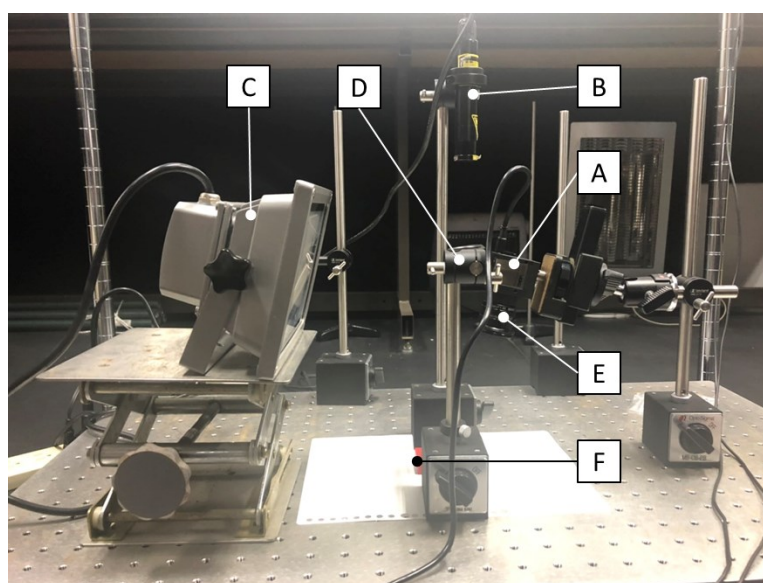


図6 実験装置

A:CCD カメラ B:半導体レーザー C:白色 LED D:平凹レンズ E:レンズ F:プレート

第3節 解析方法

画像処理・解析には塗料塗布部とプレート部が両方入るように 51×101 画素でトリミングした画像を使用した。

画像処理は、ノイズ除去、色調整を組み合わせた処理方法と RGB 情報の抜き取りを試行した。ノイズ除去にはメディアンフィルタ¹⁵⁾、ウィーナーフィルタ¹⁵⁾、色調整にはガンマ補正¹⁶⁾、コントラスト調整¹⁷⁾を使用した。ガンマ補正は式(1)のガンマ値を0.5とし、明るく補正した。コントラスト調整は、0時間目に撮影した画像のヒストグラムから任意の最小値と最大値を指定し、輝度値範囲の拡大スケール変換を行った。また、ウィーナーフィルタの特性上、画像周辺の2画素は処理範囲外となるため、あらかじめ2画素ずつトリミング範囲を広げてウィーナーフィルタの処理をしたのち、既定の画素にトリミングした。組み合わせとして、コントラスト調整のみ、色調整2種、ノイズ除去と色調整1種(計4種)、

ノイズ除去と色調整 2 種（計 2 種）の計 8 種を選定した。また、スペックル画像の撮影に 635 nm のレーザを使用したため、RGB 情報として R 値-B 値, R 値-G 値, R 値/B 値, R 値/G 値で解析を行った。また、1 つのサンプルで全ての画像処理をし、複数選定したのち他の 2 サンプルの画像処理を行った。

解析方法はレーザスペックル法の解析として広く知られている Fujii Method (FM) を使用した。FM は、解析値を画像処理によって任意の値 p で除することにより正規化し、 $FM(x, y)$ を得た (式(2))。 n は画像の枚数、 $I_k(x, y)$ は k 枚目のある画素 (x, y) の輝度値である。そして、画素ごとの値 $FM(x, y)$ を平均し、結果とした (式(3))。対象粗面の変動が大きければ、 FM_{avg} 値も同様に大きくなるという特徴を持つ。

$$I_k(x, y) = 255 \times (I_k(x, y) \div 255)^p \quad (1)$$

$$FM(x, y) = \frac{1}{(n-1) \cdot p} \sum_k^n \left| \frac{I_k(x, y) - I_{k-1}(x, y)}{I_k(x, y) + I_{k-1}(x, y)} \right| \quad (2)$$

$$FM_{avg} = \frac{\sum_{x,y} FM(x, y)}{N_{pixel}} \quad (3)$$

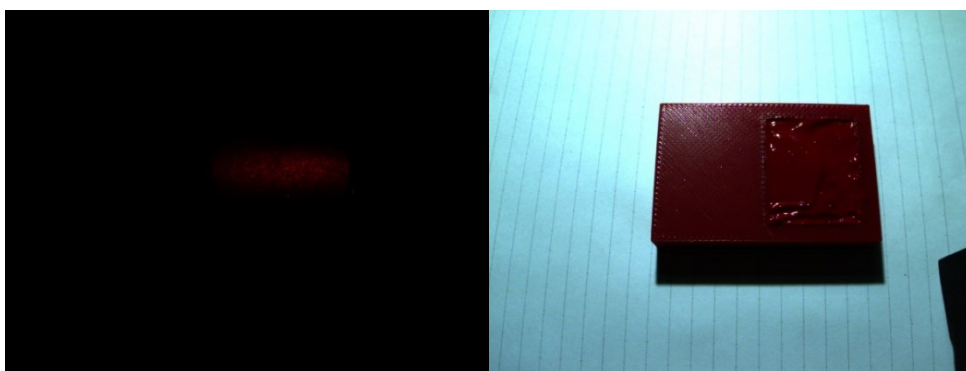
(x, y) : 各画素の位置

$I_k(x, y)$: k 番目の画像における各画素の輝度値

n : 画像枚数

p : 正規化のための定数

N_{pixel} : 全画素数



(a) スペックル画像

(b) 非スペックル画像

図 7 撮影画像

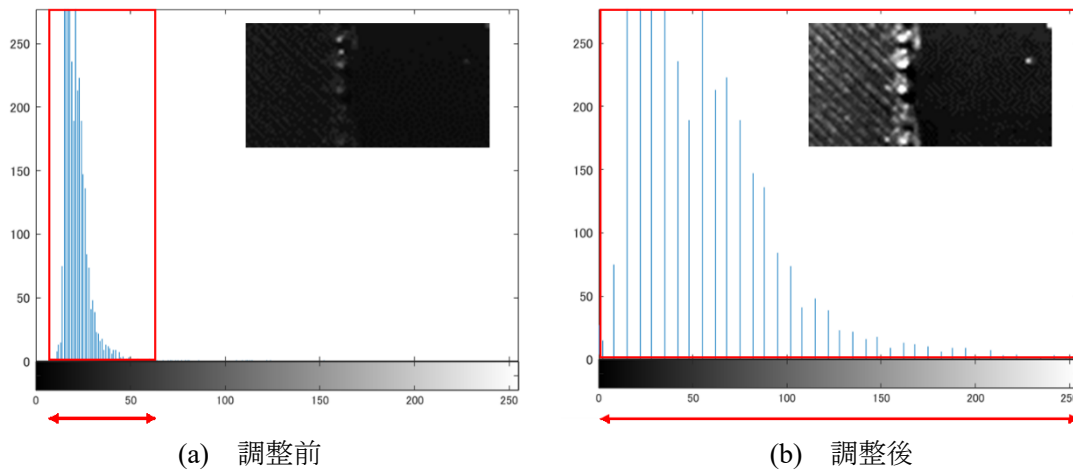


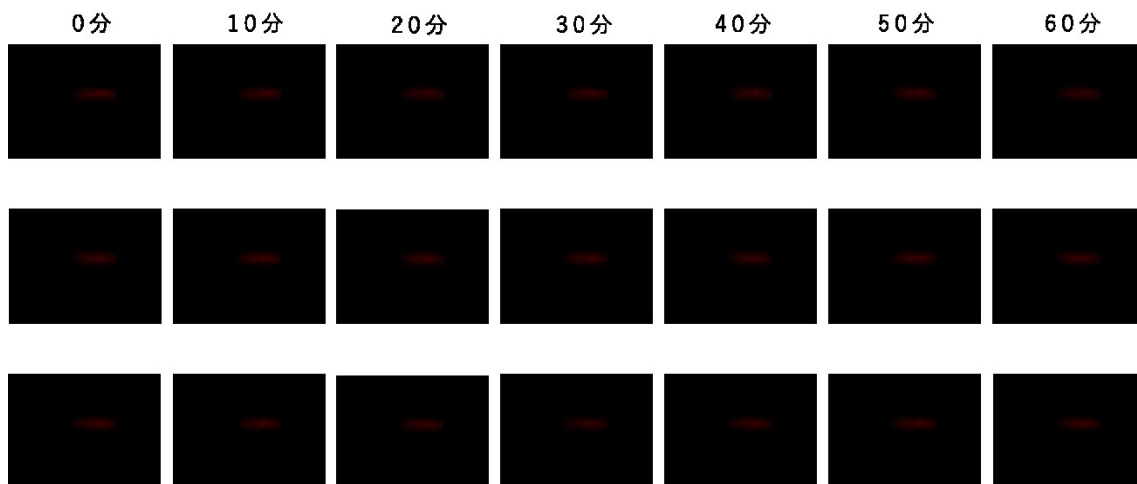
図8 コントラスト調整

第4節 結果および考察

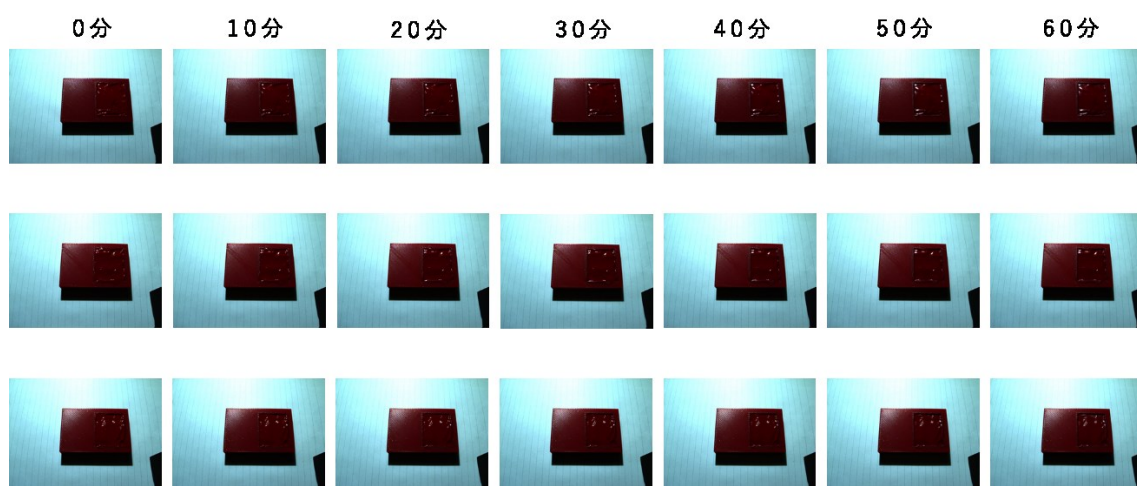
図9に1サンプルの時間ごとの撮影画像，図10(a)にはスペックル画像，図10(b)には非スペックル画像のそれぞれの解析値を示す．縦軸は各時間における解析値を実験開始時間の値で除することにより正規化 FM_{avg} とした．無処理時と比較して，スペックル画像は全ての画像処理による変化はほとんど見られなかった．スペックルはノイズとして認識されることなく処理され，色調整を行うことによって輝度値変動も拡大されたが，輝度値自体も高くなってしまい，結果として正規化 FM_{avg} に影響がなかったと考えられる．また，RGB情報はほとんどがR情報のみで構成されていたため，効果がなかったと考えられる．

非スペックル画像について，無処理ではほとんど解析値の増減が見られなかったが，コントラスト調整を組み合わせた「C」，「G+C」は無処理の解析値変動を広げることができたと考えられる．ノイズ処理を施した結果はサンプルごとに安定した結果が得られなかった．輝度値変動が微小な非スペックル画像に色調整が効果的であったことと，ノイズ処理が適していなかったことが示唆された．また色情報について，スペックル画像とは違いGやBの情報を取得することができたが，サンプルごとの差が激しく，安定した結果を得ることができなかった．また，本実験では赤色の塗料を使用したためR情報を中心とした解析を行ったが，今後は植物葉で実験するためG情報が中心になると想定される．そのため，今回試行した色情報を用いた解析方法は選定し難いと考えた．

これらの結果から，コントラスト調整のみ行う「C」，色調整2種を行う「G+C」を選定した．また植物葉で実験・解析を進めていく際にノイズ処理を候補に入れることを考慮し，比較的輝度値変動を広げることのできた，ウィナーフィルタと色調整2種を組み合わせた「W+G+C」を選定した．4種の解析を試行した他の2サンプルの結果を図11に示す．これらもsample Iと同様の結果が得られた．よって，今後の解析は無処理を含めた4種を試行し，再び植物葉の解析に適した画像処理方法を選定する．

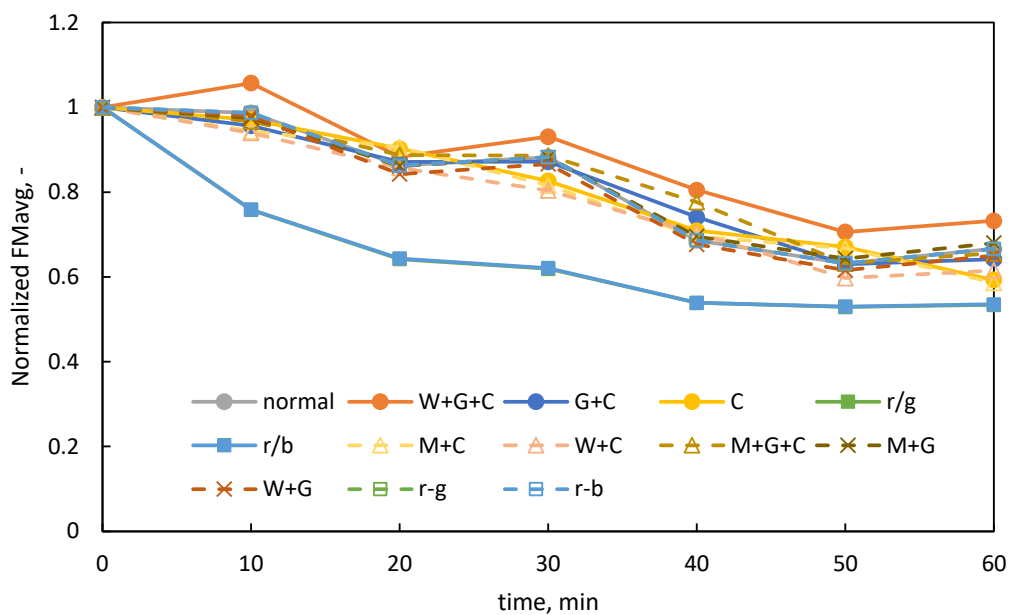


(a) スペックル画像

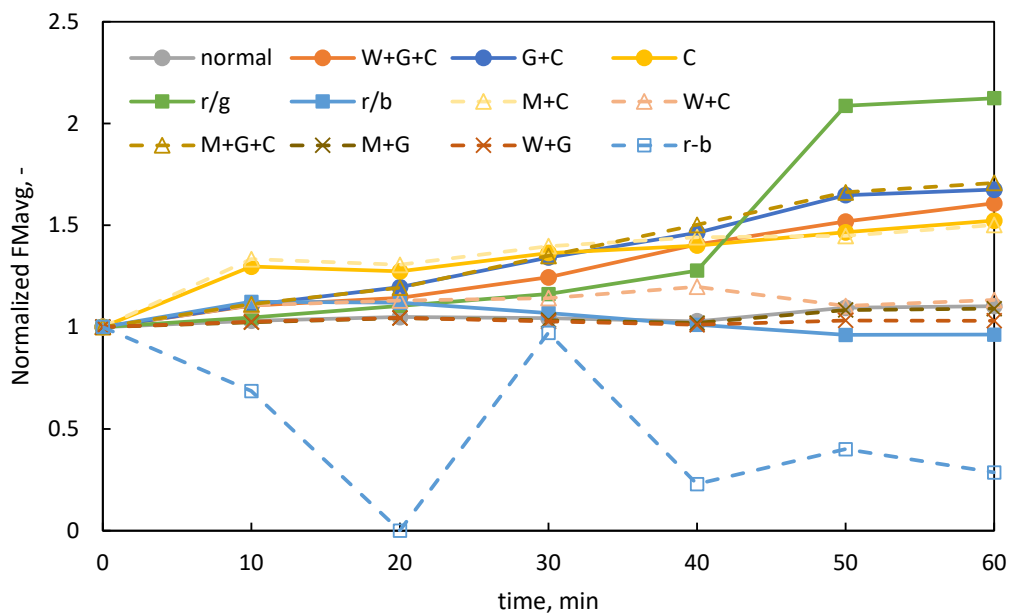


(b) 非スペックル画像

図9 時間ごとの撮影画像（上から sample I～III）



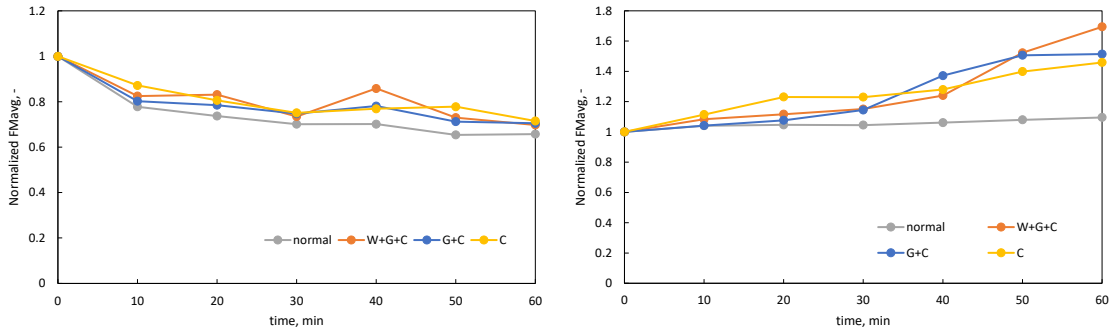
(a) スペックル画像



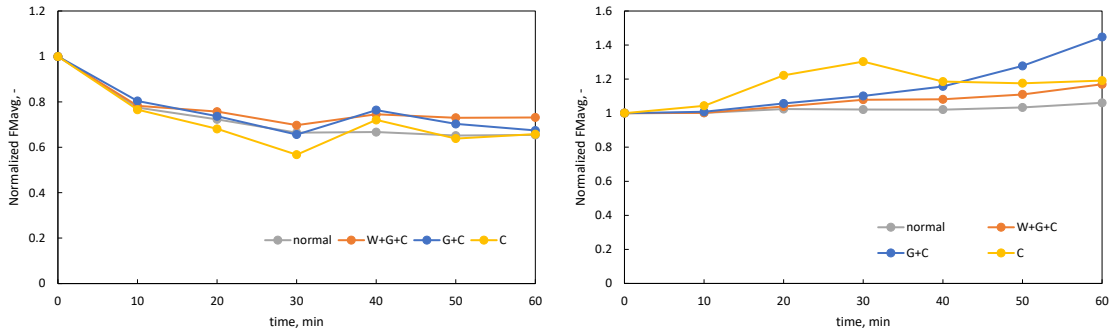
(b) 非スペックル画像

normal : 画像処理なし, W : ウィーナーフィルタ, M : メディアンフィルタ, G : ガンマ補正, C : コントラスト調整, r, g, b : RGB 情報

図 10 sample I の FM の結果



(a) sample II (左スペックル画像, 右非スペックル画像)



(b) sample III (左スペックル画像, 右非スペックル画像)

図 11 他 2 サンプルの FM の結果

第4章 植物葉乾燥過程のレーザスペックル法による解析

第1節 実験概要

本章では、植物葉を用いた乾燥過程をレーザ、LED光の照射画像を取得する。また、照射条件を反射光と透過光とした。そして、前章において選定した3種の画像処理方法と無処理の計4種を用いて、レーザスペックル法によって解析し、検証する。

第2節 実験方法

2-1 実験試料

反射光照射時の実験では、人工気象室（CFH-415、トミー工業株式会社）内にて生育したダイズを使用した（図12（a））。栽培環境は、明期13時間、温度25度であり、暗期11時間、温度20度に設定した。また、透過光照射時の実験では自作の植物工場にて生育したダイズを使用した（図12（b））。栽培環境は、明期11時間、温度25度であり、暗期13時間、温度20度に設定した。そして、図13の位置で葉柄の切除をし、水ストレスを与えたものを反射光、透過光共に3サンプル使用した。



(a) 人工気象室



(b) 植物工場

図12 人工気象室と植物工場

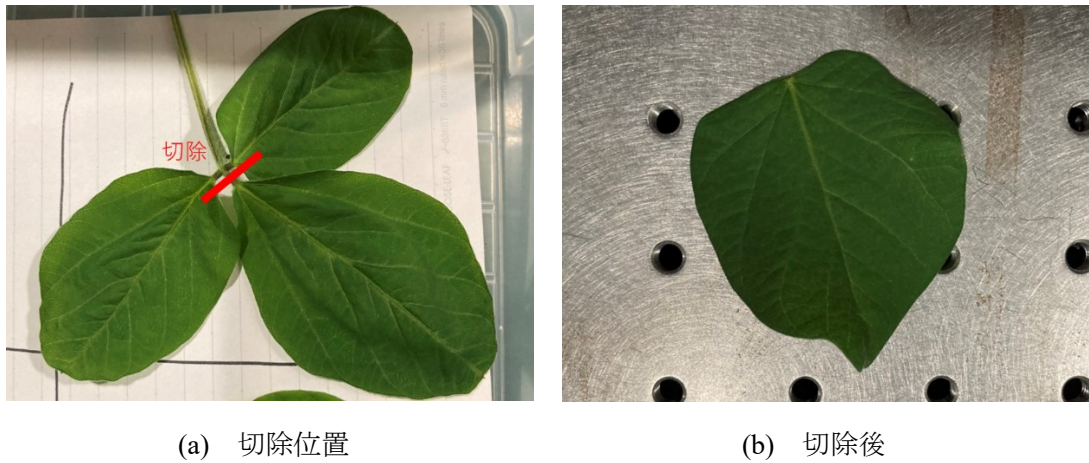


図 13 植物葉の葉柄切除の位置

2-2 実験方法

水ストレスとして葉柄の切除により水分欠乏を起こした試料を、ABS 樹脂で作成した治具で固定した。撮影には CCD カメラ (DCU223C, THORLABS Inc.) にレンズ (WD 25-∞ mm, FL 4.5 mm, Edmund Optics) を装着したものを使用した。撮影条件として解像度 1024 × 768 pixel, 露光時間 3 ms, フレームレート 10 fps に設定した。画像は 1 回の撮影につき 10 秒間, 計 100 枚取得し, 葉柄切断直後から 1 時間おきに, 計 7 回実施した (図 14)。半導体レーザー (LDU33, 4.4 mW, 635 nm, シグマ光機株式会社) と白色 LED (LPF-SD, 株式会社しおかぜ技研) を光源として, レーザ光は拡大のため, 球面平凹レンズ (SLB-30-35NM, シグマ光機株式会社) を通して照射した。それらを約 45° で対象に向けて反射・透過させる 2 種類の方法で照射し, 葉の表側を撮影した (図 15 (a), (b))。照射方法ごとに 3 サンプルずつ計測し, 反射光は 2020 年 8 月 31 日 (sampleR1), 9 月 15 日 (sampleR2), 10 月 1 日 (sampleR3) に実験し, 透過光は 2020 年 10 月 5 日 (sampleT1), 10 月 13 日 (sampleT2), 2021 年 5 月 24 日 (sampleT3) に実験した。実験は室温 25 度前後で行い, 試料が十分に水ストレスを受けると考えられる環境にした。また, 同時に同株から同条件で葉柄を切除したものを電子天秤にのせ, 重量を測定し, 乾燥を確認しながら実験を行った。また, 対照実験として, 水ストレス無負荷の実験を行った。水ストレス負荷とほぼ同じ環境にて, 株のまま計測 1 時間前に水を与え, 6 時間計測した。反射光は 2021 年 10 月 15 日, 透過光は 10 月 26 日に行った。また, 時間経過による光源の揺らぎを, 撮影直後に都度測定した。レーザーはレーザーチェッカー (LCP-33, シグマ光機株式会社) を使用して, レーザ強度を測定した。そして, LED はライトメータ (LI-250A, LI-COR Biosciences) に光量子センサー (LI-190R, LI-COR Biosciences) を取り付けて, 光合成有効光量子束密度 (PPFD) を測定した。さらに植物の水ストレスを把握するために, 撮影を行った環境と同条件で, 水ストレス負荷の植物葉の水ポテンシャルを, プレッシャーチャンバー装置 (Model1505D, PMS instrument company)

を用いて計測した（図 15 (e)）。撮影時のように葉柄を切断すると長さが足りず計測ができないため，側軸を切断し，図 13 (a) のような 3 枚の状態で，2 時間おきに計 3 回の計測を行った。実験は 2021 年 12 月 3 日に行った。

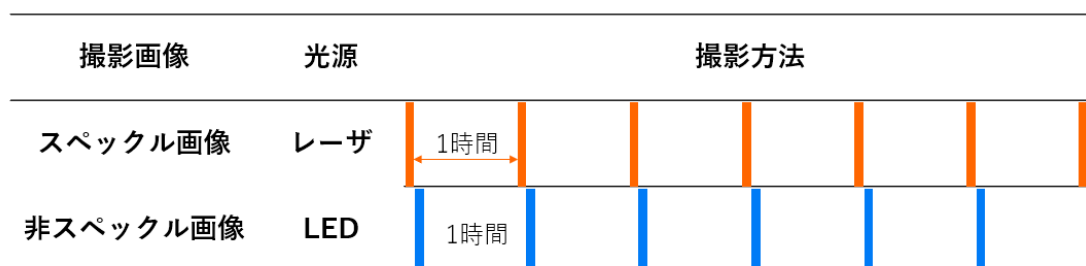
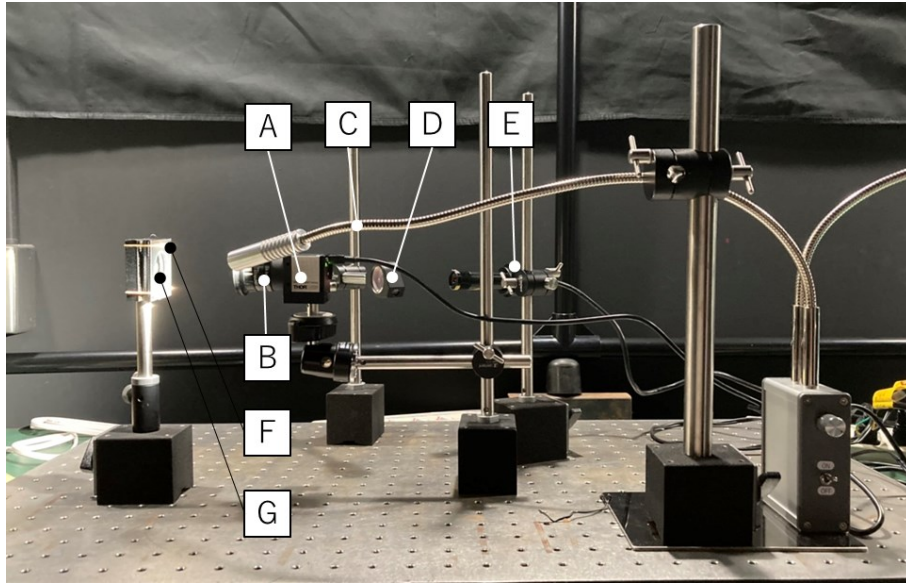
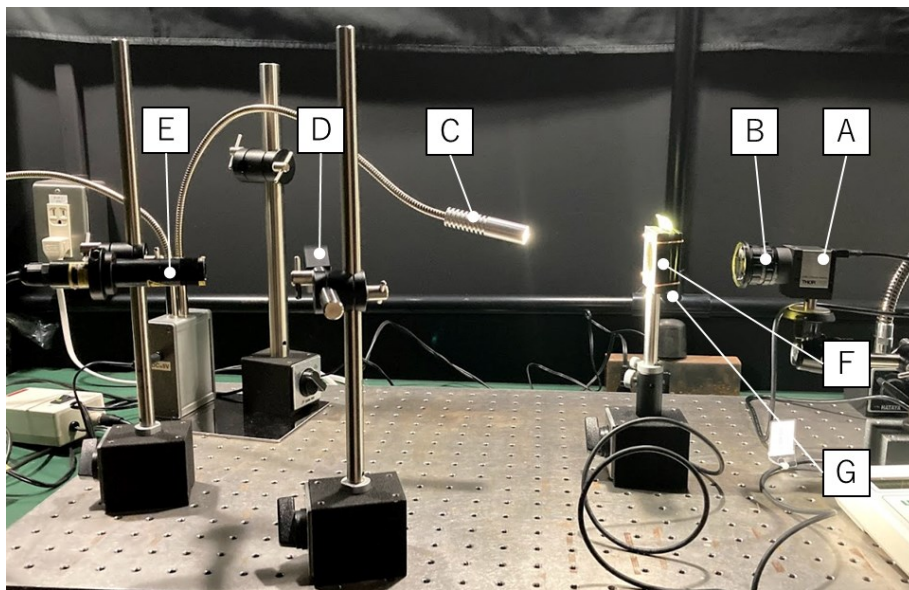


図 14 計測方法

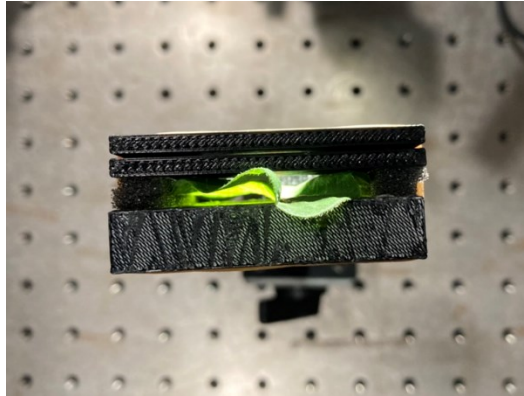


(a) 反射光での実験

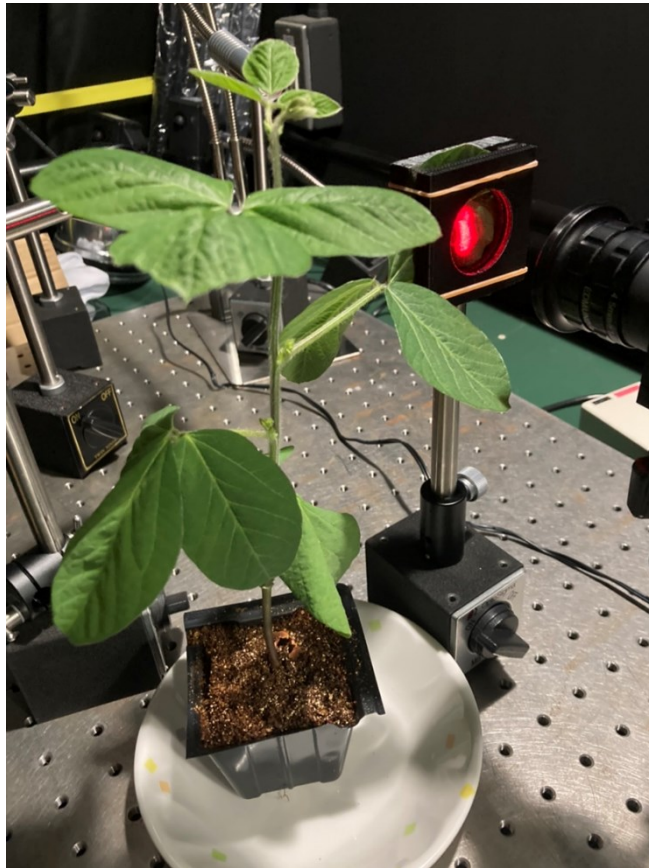


(b) 透過光での実験

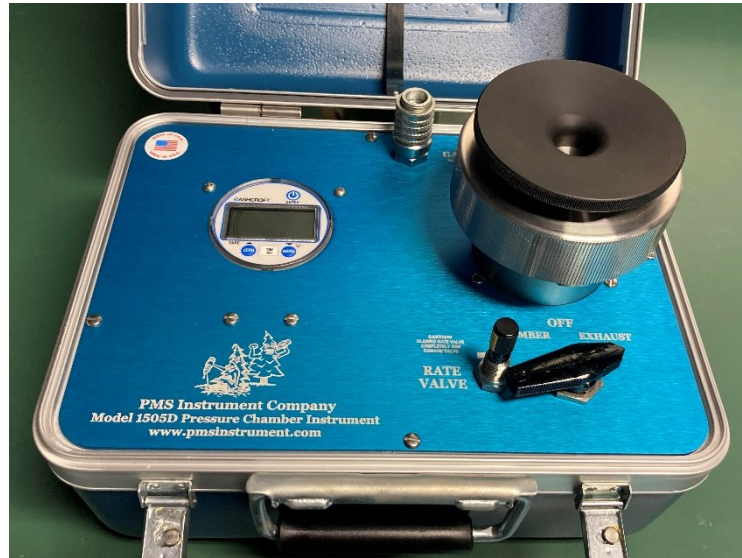
A:CCD カメラ B:半導体レーザ C:白色 LED D:マイクロズームレンズ E:治具



(c) 治具で挟んだ様子



(d) 無処理の画像



(e) プレッシャーチャンバー装置

図 15 実験方法

第3節 解析方法

画像処理・解析には50×50画素でトリミングした画像を使用した。画像処理は前章の通り、コントラスト調整(C)、ガンマ補正(G)、ノイズ除去のためのウィナーフィルタ(W)の組み合わせによる「C」、「G+C」、「W+G+C」の3種を試行した。コントラスト調整に関して、本実験より実験ごとの撮影画像すべての輝度値の最大値と最小値を指定し、輝度値範囲の拡大スケール変換を行った。解析は前章同様FM(Fujii Method)を使用し、解析値を任意の値pで除することにより正規化し、 $FM(x,y)$ を得た。nは画像の枚数、 $I_k(x,y)$ はk枚目の画像内位置(x,y)の輝度値である。そして、画素ごとの値 $FM(x,y)$ を平均し、結果とした。

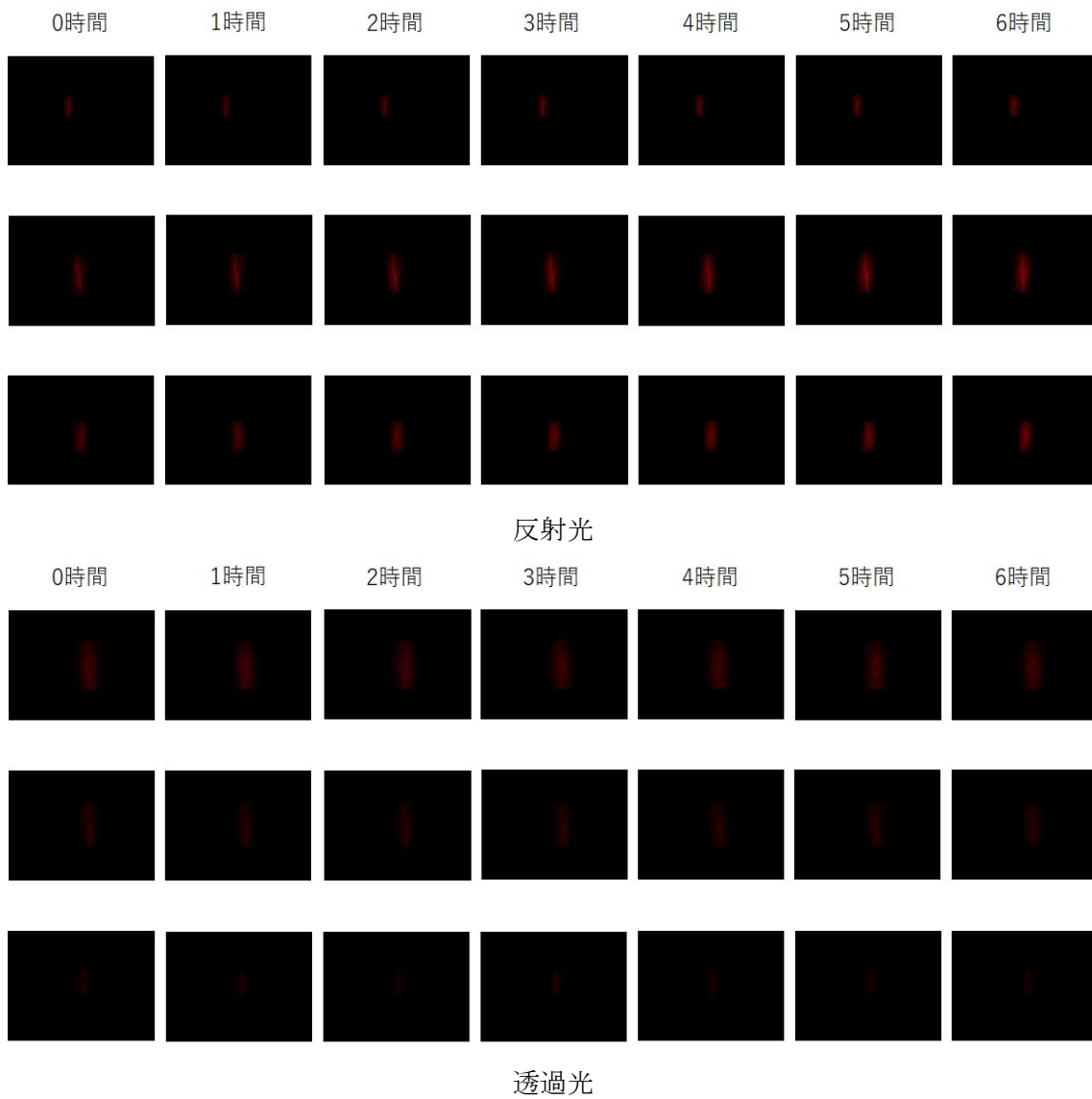
第4節 結果

図16(a)に1サンプルの時間ごとの撮影画像、図17にはスペckル画像のそれぞれの解析値を示す。縦軸は各時間における解析値を実験開始時間の値で除することにより正規化 FM_{avg} とした。反射・透過光ともに処理に関わらず、減少傾向にあった。これは塗料の乾燥過程と同様に、スペckルがノイズと判断されなかったことや、色調整を行うことによって輝度値変動も拡大されたが、輝度値自体も高くなってしまい、結果として正規化 FM_{avg} に影響がなかったと考えられる。また、色情報についても同様、ほとんどR情報で構成されているため、R情報に依存した結果となった。

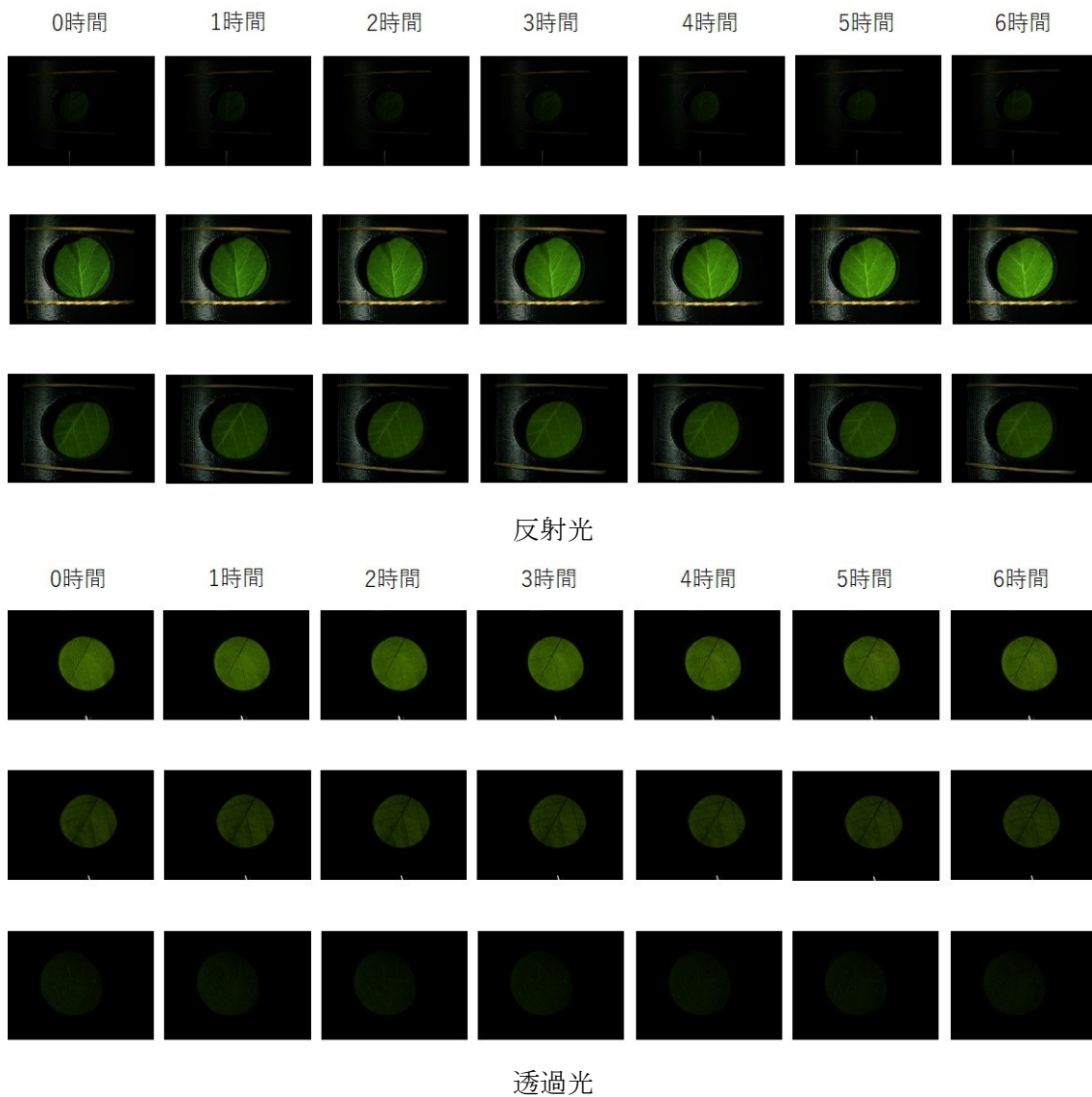
図16(b)に1サンプルの時間ごとの撮影画像、図18には非スペckル画像のそれぞれの解析値を示す。反射光では無処理では微小な減少傾向を示したが、画像処理を施した3種では大幅な減少傾向が見られた。その中でも3種の画像処理を行った「W+G+C」が最も変動が大きく捉えることができ、最も適切な画像処理であったと考えられる。非スペckル画像に関しては、光源の照射方法によって異なる結果が示された。よって、今後の解析では「W+G+C」を選択し、使用する。また、光量に大きな変動はなく、解析値に影響はなかったと考える。

対照実験として行った水ストレス無処理の結果を図19に示す。葉柄の切断を行わなかったことからや水分を直前に与えていたことからストレスは最小限に済んだが、生育環境と違う環境下であったことや、呼吸や蒸散などの生命活動による水分量の低下、葉内部の動態があったと考えられる。

図20には乾燥重量の変化を示す。葉柄の切除により水分欠乏が生じ、重量が減少していることが示唆される。また、図21に水ポテンシャル計測結果を示す。乾燥により水ポテンシャルが増加することが知られており¹⁸⁾、本実験でも0時間目から2時間目へは減少した。4時間目で増加しているが、乾燥により側軸が細くなり、圧力を与えるための窒素ガスが隙間から抜けてしまう現象が起きたため、正しく圧力を与えることができず、値を計測することができなかつたと考えられる。

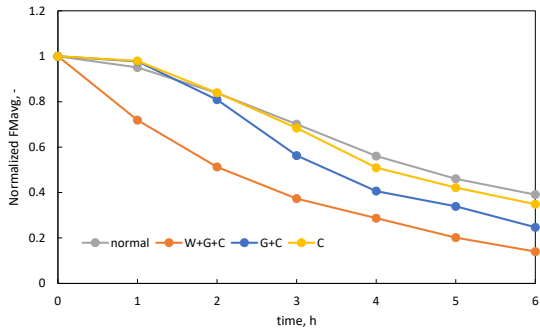


(a) スペックル画像

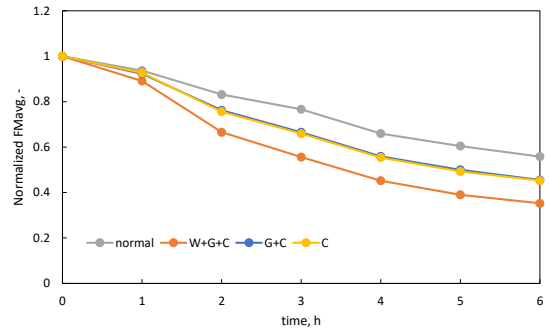


(b) 非スペックル画像

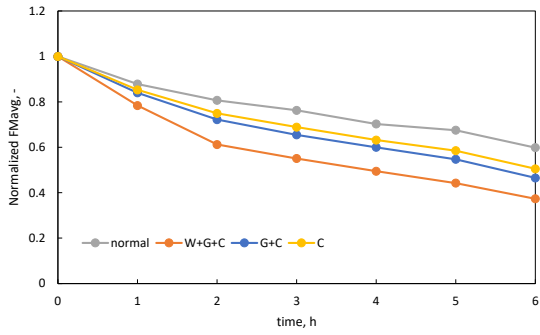
図 16 撮影画像（反射光上から sampleR1, R2, R3, 透過光上から sampleT1, T2, T3）



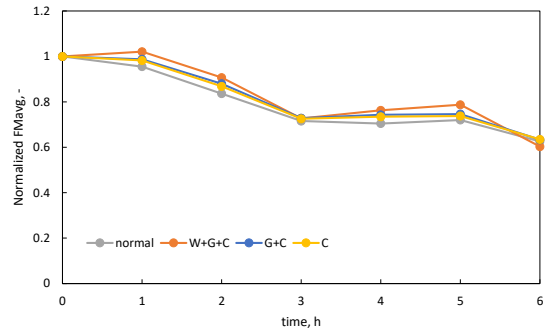
sampleR1



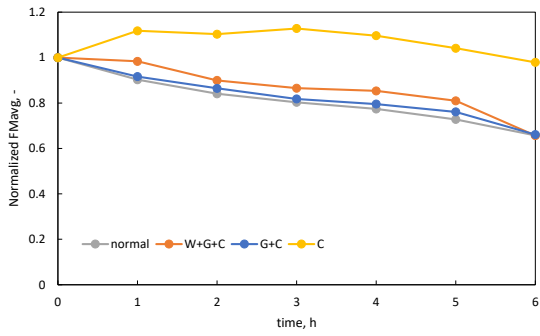
sampleR2



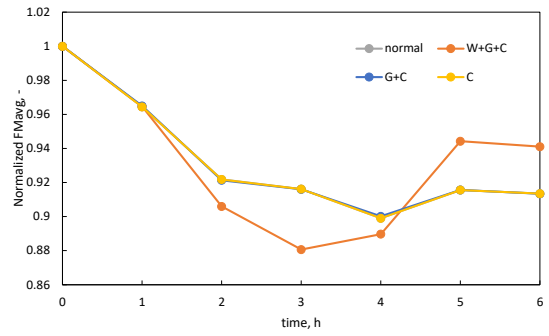
sampleR3



sampleT1

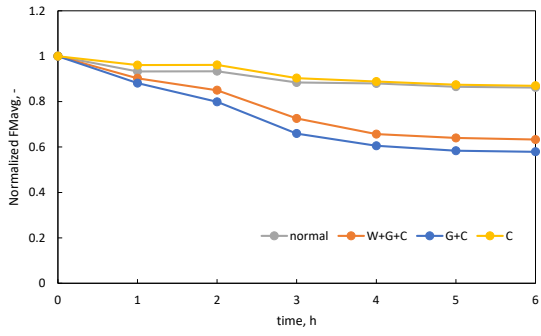


sampleT2

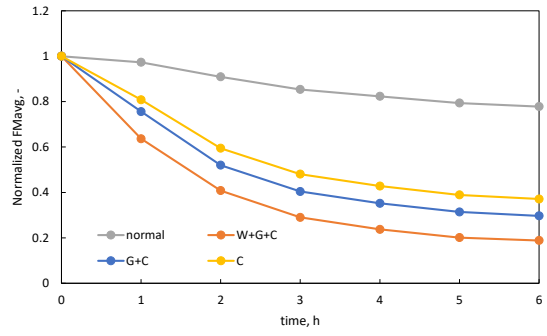


sampleT3

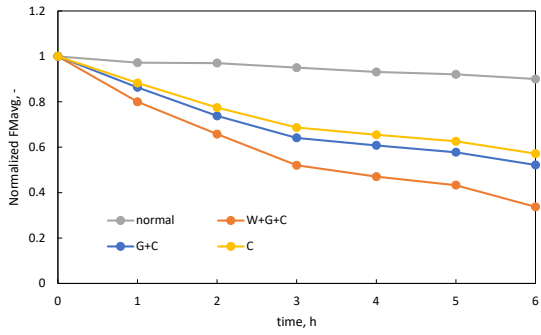
図 17 スペックル反射, 透過



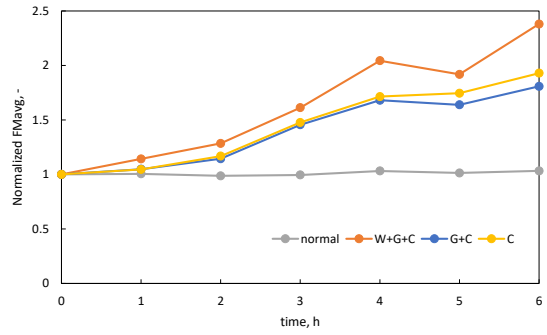
sampleR1



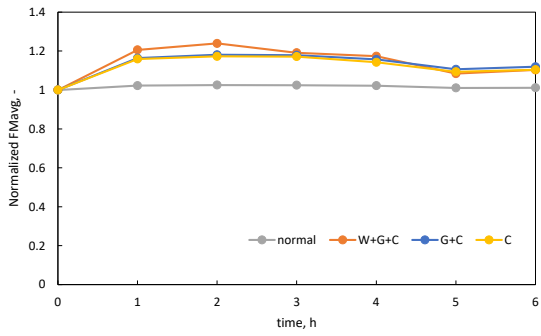
sampleR2



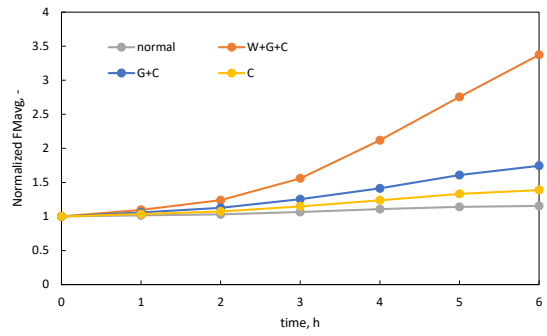
sampleR3



sampleT1

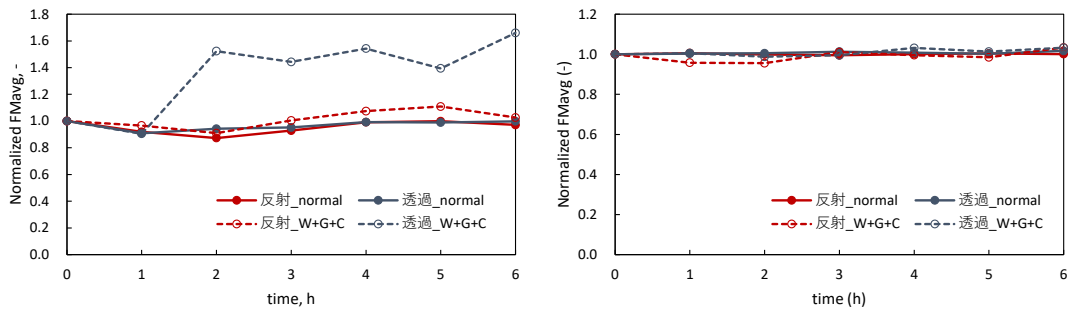


sampleT2



sampleT3

図 18 非スペックル画像反射, 透過



スペックル画像 非スペックル画像

図 19 水ストレス無負荷の FM 解析結果

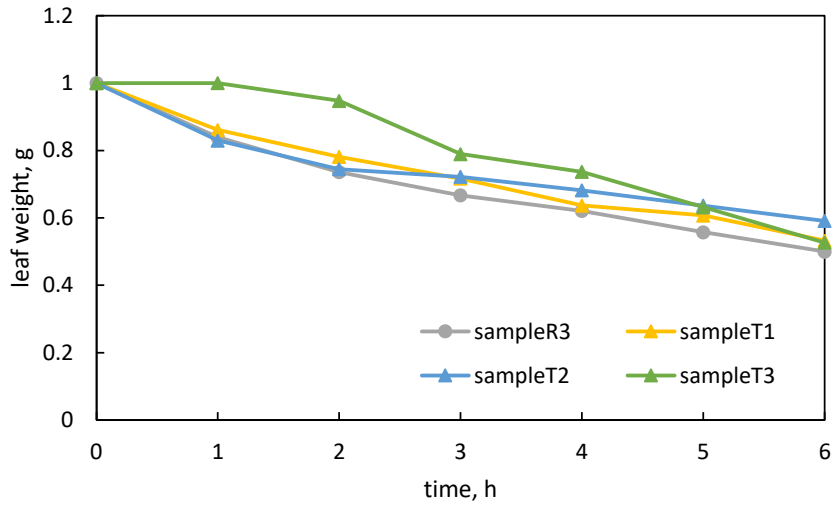


図 20 重量変化

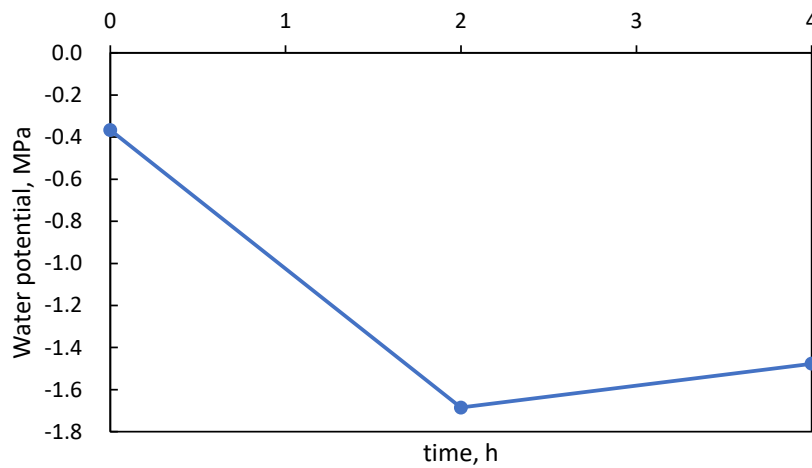
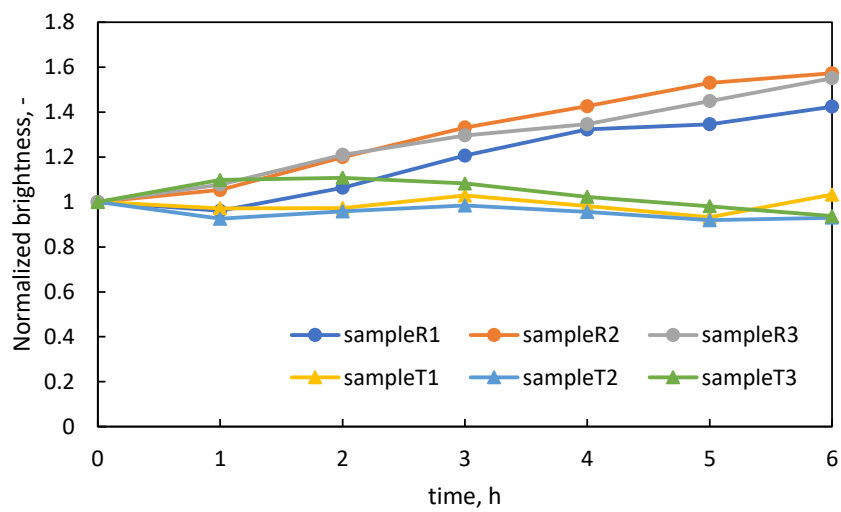


図 21 水ポテンシャル計測結果

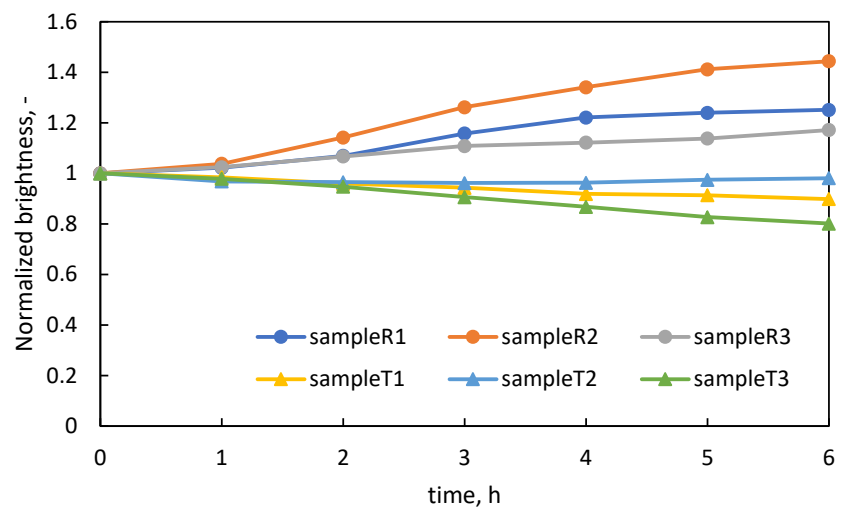
第5節 考察

解析結果について、 $FM(x, y)$ と平均輝度に着目して考察する。まずスペckル画像について、平均輝度が反射光では増加傾向にあるが、透過光では不安定である（図 22 (a)）。画像全体の輝度が増加すると平均輝度も増加すると考え、輝度値変動が無い場合、平均輝度が増加すると $FM(x, y)$ の分母も増加し、不安定だと $FM(x, y)$ の分母も不安定になり、解析値の正規化 FM_{avg} にも大きく影響すると考えられる。しかし、正規化 FM_{avg} はどちらの照射方法でも減少傾向にあることから、輝度値変動が大きく捉えることができていると示唆される。平均輝度の増減の要因について、speckルの量や面積の増減によるものか、speckル自体の輝度の増減によるものなのか把握できていない。さらに、透過光で不安定であったことから、speckル画像は、平均輝度のみでは植物状態を判断できない可能性も考えられる。また、画像処理による解析値の違いが見られなかったことについては、塗料の乾燥過程と同様、色調整を行うことによって輝度値変動も拡大されたが、輝度値自体も高くなってしまい、結果として正規化 FM_{avg} に影響がなかったと考えられる。

非speckル画像について、反射光では平均輝度が増加傾向にあるが、透過光では減少傾向であり（図 22 (b)）、すべての結果において、正規化 FM_{avg} が平均輝度と逆の傾向にあることが示された。反射光では $FM(x, y)$ の分母が増加したため、正規化 FM_{avg} が減少し、透過光では $FM(x, y)$ の分母が減少したため、正規化 FM_{avg} が増加したと考えられる。乾燥によって平均輝度が増加することについて、乾燥による細胞の収縮により細胞内の密度が高くなるため¹⁹⁾、反射率は上がり、透過率は下がると考えられる。これは、図 23 の紫外可視分光光度計（V-750、日本分光株式会社）による 635 nm での乾燥過程の観察結果からも示唆される。また、色調整によって解析値の変動が拡大されたことについて、輝度値変動の拡大より、平均輝度の増加割合が拡大されたことが要因と考えられる。よって、非speckル画像ではFMを使用することが困難であり、今後は画像全体の輝度の増減に左右されない解析方法を検討する必要がある。しかし、非speckル画像について、平均輝度には傾向が見られたため、平均輝度のみでも水ストレスを検出できる可能性があることも考えられる。



(a) スペックル画像



(b) 非スペックル画像

図 22 平均輝度

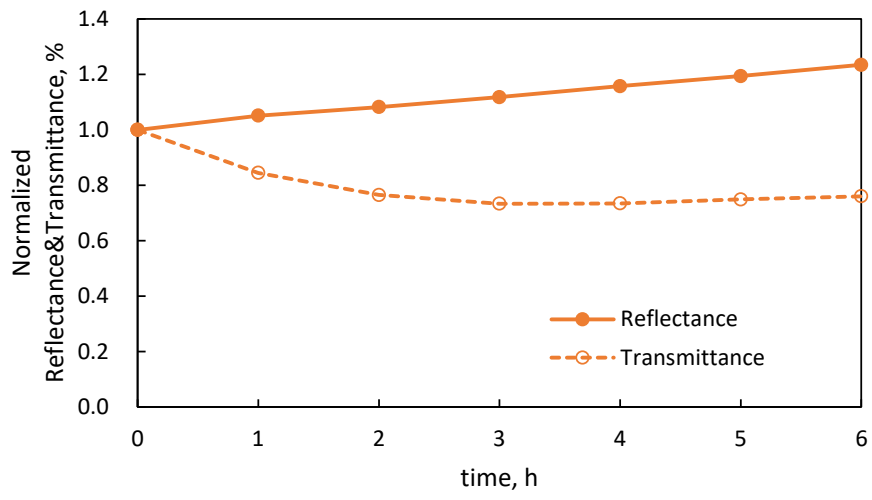


図 23 紫外可視分光光度計による 635 nm における変動

第5章 植物葉乾燥過程のランレングス解析

第1節 概要

前章では、対象に光を反射もしくは透過させた画像を輝度値変動解析したが、双方で平均輝度の影響を受けたため、輝度値変動を捉えることはできなかった。非スペックル画像に特化した解析方法を模索するため、本稿では平均輝度に左右されにくく、輝度値の連続性を評価するランレングス解析を用いた結果を示す。本章でも対照実験として行った水ストレス無負荷の結果を示す。

第2節 解析方法

解析方法はテクスチャ解析として知られるランレングス解析²⁰⁾を用いた。模式図を図24に示す。画像中の一定方向に同じ輝度値 f の画素が連続する場合、その画素列ランの長さをランレングス l と呼ぶ。また、ランレングス行列 $M(f, l)$ は、輝度値 f を行、ランレングス l を列とした行列であり、ランの頻度をカウントしたものとなっている。これらの要素から、定量的に評価するための特徴量LRE, RLN²¹⁾を算出した(式(4), (5))。LREは長いランが多いほど大きい値を取るため、輝度値変動が小さくなり、植物内外の動態が小さくなっていると考えられる。また、RLNはランレングスが不均一であるほど大きい値を取るため、輝度値変動が大きくなり、植物内外の動態が大きくなっていると考えられる。この解析方法の特徴として、輝度値変動のみを使用したものであり、画像全体の輝度の増減に影響を受けない。なお本解析手法では一般的に輝度階調の調整が必要であり、本実験では64階調に設定した。解析には、水ストレスを与えた植物葉は画像処理をしていない無処理の画像と、前章で採用した「W+G+C」の画像処理をした画像の2種を使用した。また、水ストレスを与えていない植物葉は無処理の画像のみを使用した。

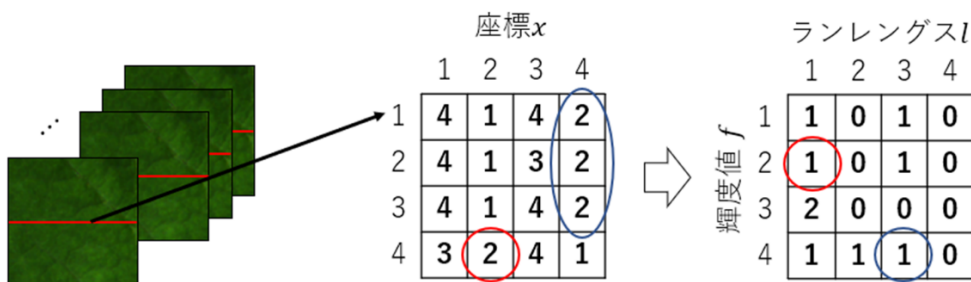


図24 ランレングス解析の模式図

$$LRE = \frac{\sum_f \sum_l \{M(f, l) \cdot l^2\}}{\sum_f \sum_l M(f, l)} \quad (4)$$

$$RLN = \frac{\sum_f \{\sum_l M(f, l)\}^2}{\sum_f \sum_l M(f, l)} \quad (5)$$

第3節 結果

図 25 にスペックル画像の結果を示す．縦軸は各時間における解析値を実験開始時間の値で除することにより正規化した値を示す．スペックル画像では画像処理無処理の場合，いずれの照射方法でも LRE は増加，RLN は減少傾向にあった．植物葉の乾燥によって水分量が減少し，スペックル変動が小さくなったため，輝度値変動も小さくなり，ランレングス解析によって乾燥過程を捉えたと考えられる．また，「W+G+C」の画像処理を行った結果，ほとんどのサンプルで解析値に変化はあったものの，変動を拡大するなどの一定の効果を得ることはできなかった．

図 26 に非スペックル画像の結果を示す．スペックル画像と比較すると変化は少ないが，時間経過に伴って特徴量に変化した．しかし，サンプルごとに特徴量の変化の傾向が一定ではなく，LRE と RLN の性質と植物状態が合致しない結果となった．また，FM では有効と考えられた「W+G+C」の画像処理は，無処理より解析値の変動が減少しているものや，無処理と傾向の異なる結果が見られた．

また，図 27 に水ストレス無負荷の結果を示す．いずれの照射方法においても特徴量の変化はほとんど見られなかった．

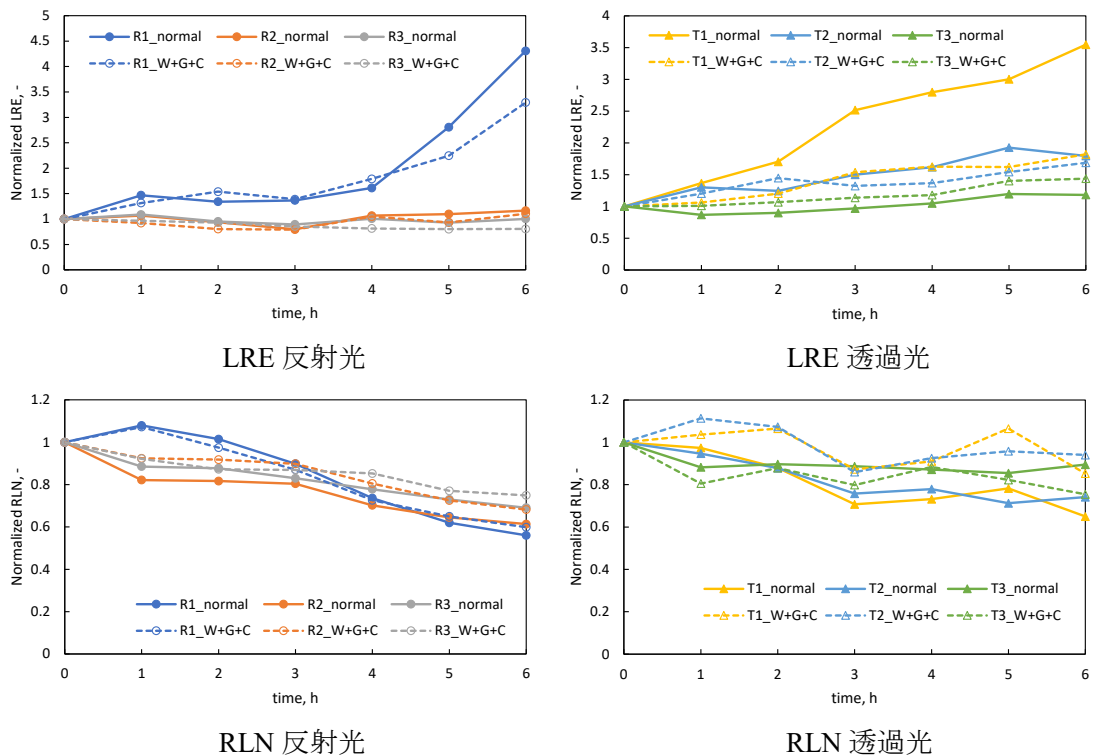
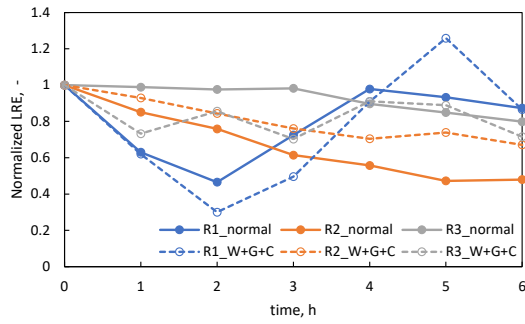
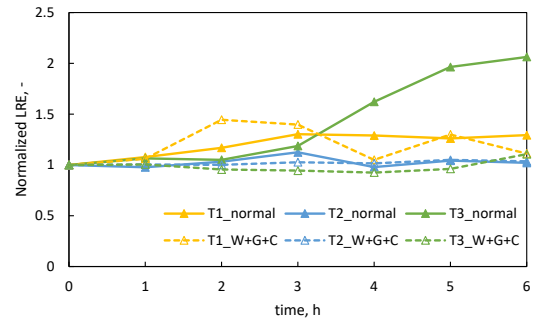


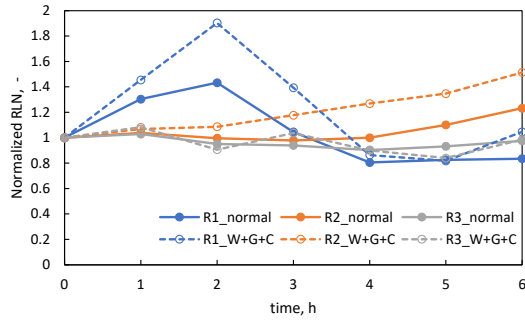
図 25 ランレングス解析結果 (スペックル画像)



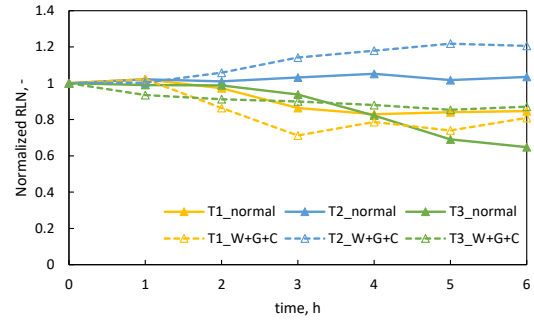
LRE 反射光



LRE 透過光

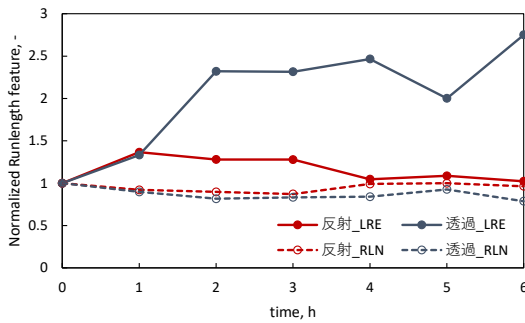


RLN 反射光

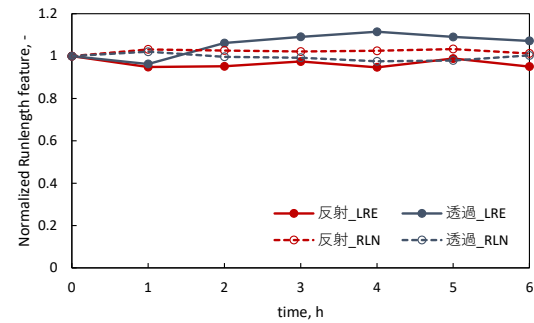


RLN 透過光

図 26 ランレングス解析結果 (非スペックル画像)



スペックル画像



非スペックル画像

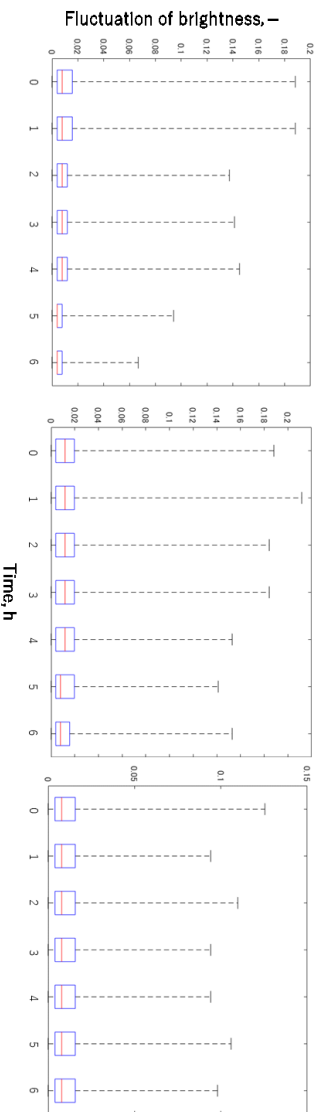
図 27 水ストレス無負荷の解析結果

第4節 考察

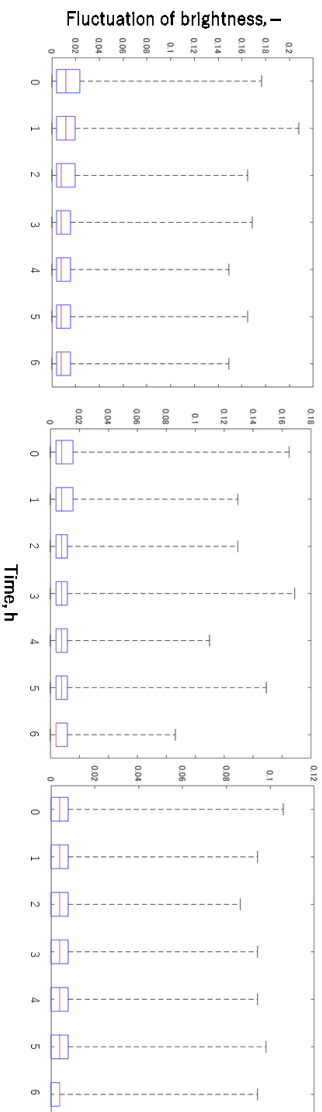
まず、スペックル画像、非スペックル画像共に、解析値が「W+G+C」の画像処理によって変化があるものの一定の効果を得ることができなかったことについて、階調の処理方法が要因として挙げられる。256階調の元画像を64階調に減少させる処理によって、非常に微小な違いのある輝度が同じ階調になり、輝度値変動としてカウントされなくなる。しかし、「W+G+C」のコントラスト調整によって微小だった輝度の変位が拡大されたことにより、階調を落としても輝度値変動としてカウントされたのではないかと示唆される。

次に、輝度値変動を箱ひげ図(図28)にて示す。ここでの輝度値変動は、 $FM(x,y)$ の分子である $I_k(x,y) - I_{k-1}(x,y)$ とした。非スペックル画像はスペックル画像と比較して輝度値変動が微小であることがわかる。そして輝度値変動の増減もほとんど無く、値にばらつきがあることも確認された。よって、サンプルによって特徴量の変化が一定でないと考えられる。よって、スペックル画像ではランレングス解析が有効であることが確認できたが、非スペックル画像では使用することが困難であり、水ストレスを検出できなかったと考えられる。

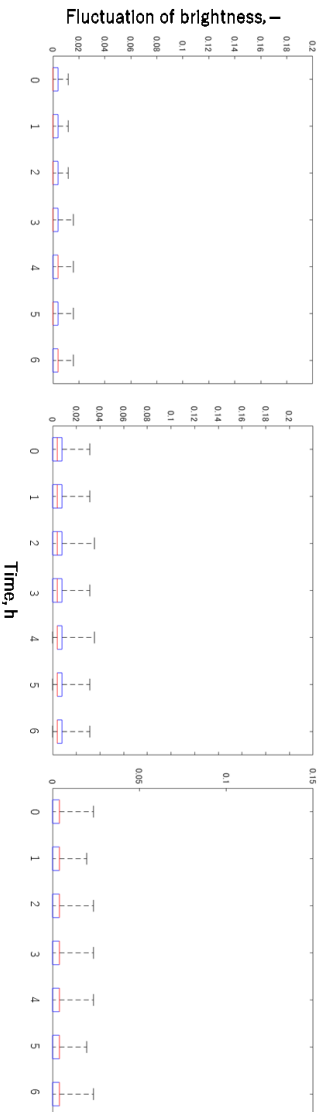
また、前章のFMについても、箱ひげ図から分子(輝度値変動)が小さいことが明らかになったため、非スペックル画像の正規化 FM_{avg} の増減は、水ストレスによる微小な動態を捉えたものではなく、平均輝度の増減を捉えたものであると示唆される。



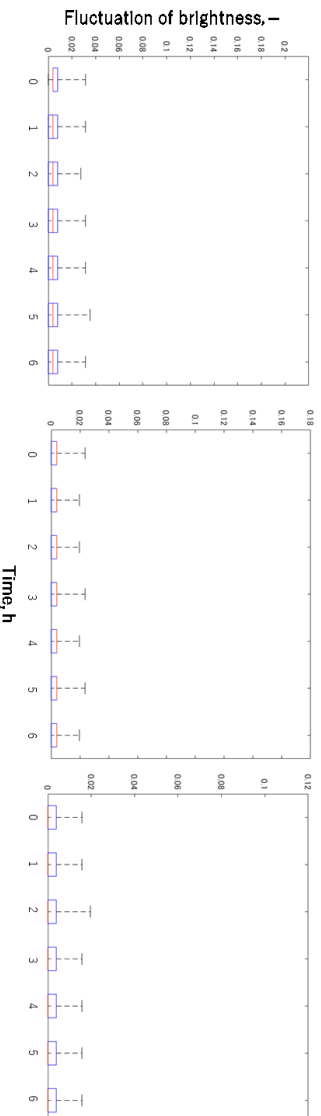
反射 (左から sampleR1, R2, R3)



透過 (左から sampleT1, T2, T3)



(a) スペックル画像



反射 (左から sampleR1, R2, R3)

透過 (左から sampleT1, T2, T3)

(b) 非スペックル画像

図 28 輝度値変動の箱ひげ図

第5節 ノイズの検討

5-1 実験・解析方法

微小な変動を解析に使用しているため、ノイズは解析結果に大きく影響を与える。そのため、光源のノイズの検討を行った。光源については、植物葉の乾燥過程の実験と同様の条件で、白色板を固定し、光源のノイズによる影響を検討した。FM, ランレングス解析に加え、ノイズの解析に使用される変動係数 (CV) ²²⁾で解析を行った。

$$CV(x, y) = \frac{I_{cSD}(x, y)}{I_{cavg}} \quad (5)$$

$$CV_{avg} = \frac{\sum_{x,y} CV(x, y)}{N_{pixel}} \quad (6)$$

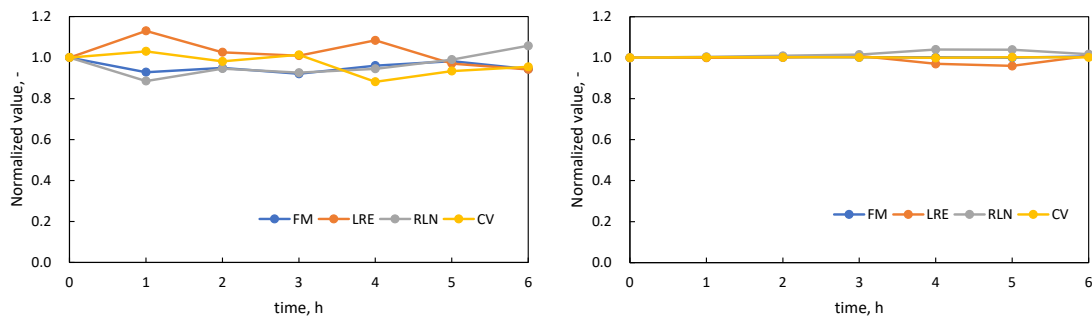
I_{cSD} : コントラスト調整後の輝度の標準偏差

I_{cavg} : コントラスト調整後の輝度平均

N_{pixel} : 全画素数

5-2 結果

光源のノイズの解析結果を図 29 に示す。スペックル画像に微小な変動が見られるものの傾向はない。また、非スペックル画像には全ての解析でほとんど変化はなかった。そのため、解析結果に光源のノイズによる影響はないと考えられる。



スペックル画像

非スペックル画像

図 29 白色板 (FM, LRE, RLN, 変動係数)

第6章 色情報への着目

第1節 概要

非スペckル画像に特化した解析方法を検討するため、非スペckル画像でしか取得することのできない色情報に着目した。第4章で行った植物葉の乾燥実験の非スペckル画像から、RGBとL*a*b*をそれぞれ抜き取ったところ、時間経過による変化があることが確認された。そこで、前章まで使用してきたRGBと、新たにL*a*b*に着目し、初めにスペckル画像に有効であった解析方法を試行した。そして、L*a*b*を使用した、色の変化を可視化する解析方法を試行した。

第2節 FM, ランレングス解析

2-1 解析方法

画像は、第4章で行った植物葉の乾燥実験の非スペckル画像を使用した。RGBそれぞれの値でスペckル画像に有効であったFM, ランレングス解析を行った。また、L*a*b*はFMのみ行い、それぞれで水ストレスを検出することができるか調査した。

2-2 結果および考察

図30, 31にRGB, L*a*b*のそれぞれの値での正規化 FM_{avg} を示す。R値とG値、そしてL*a*b*において、それぞれ反射光で減少傾向にあり、透過光で増加傾向にあった。これらは、第4章で行った非スペckル画像の解析結果と同様であった。そのため今回の解析結果もそれぞれの平均値を確認したところ、反射光で増加傾向、透過光で減少傾向にあった(図32)。これらの結果から、R値、G値、L*a*b*において、複数枚撮影間では変動が非常に微小であり、 $FM(x,y)$ の分母が増減することによって正規化 FM_{avg} の増減が起こっていることが示唆される。また、B値のみ正規化 FM_{avg} が不安定であることについて、今回の撮影画像のB値が非常に小さいことが関係していると考えられる。B値の平均値は他のR値やG値の10分の1以下であるものがほとんどであり、 $FM(x,y)$ の分母は非常に小さい値となる。そのため、同様に値に変動があった場合に、分母が小さいB値では正規化 FM_{avg} の増減が過剰になり、不安定な結果になったと考えられる。

図33, 34にRGBのランレングス解析結果を示す。LREは反射光でRGB全てが減少傾向にあり、透過光ではR値とG値で増加傾向にあったが、B値は傾向が見られなかった。また、RLNはRGB全てにおいて一定の傾向が見られなかった。LREは変動があるほど減少する特徴量であるため、反射光におけるLREの結果は、乾燥により変動がなくなっていくという仮定から逸脱した結果となった。また、変動が微小であることがFMの結果でも考えられるため、RGBのLREが何を捉えているのか、本研究では導くことができなかった。

よって、前章までの結果を含めて、スペckル画像に有効であるレーザスペckル法やランレングス解析では、非スペckル画像での水ストレスの検出は難しいと示唆される。

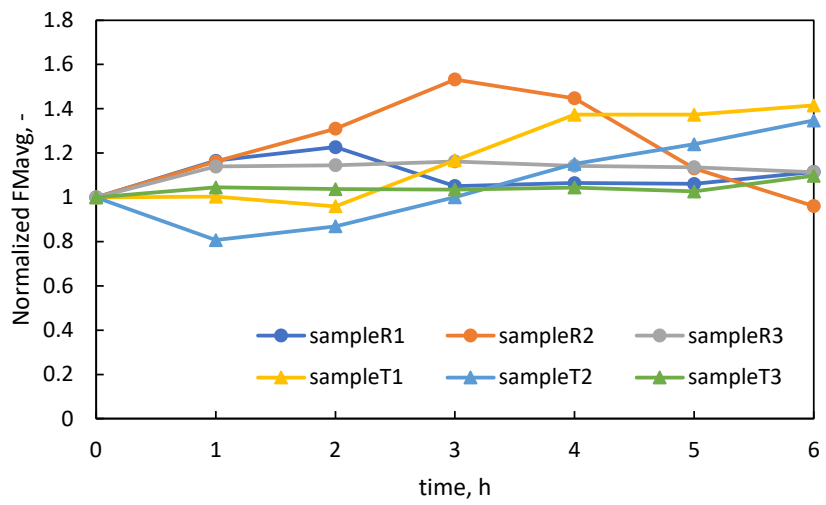
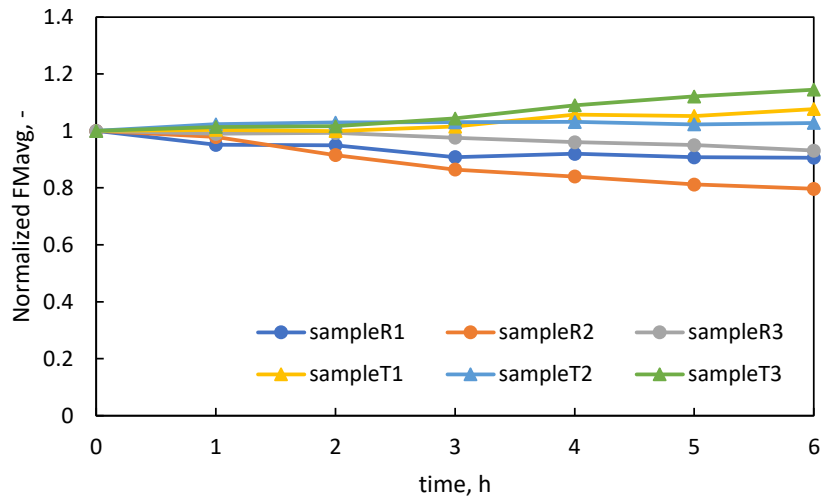
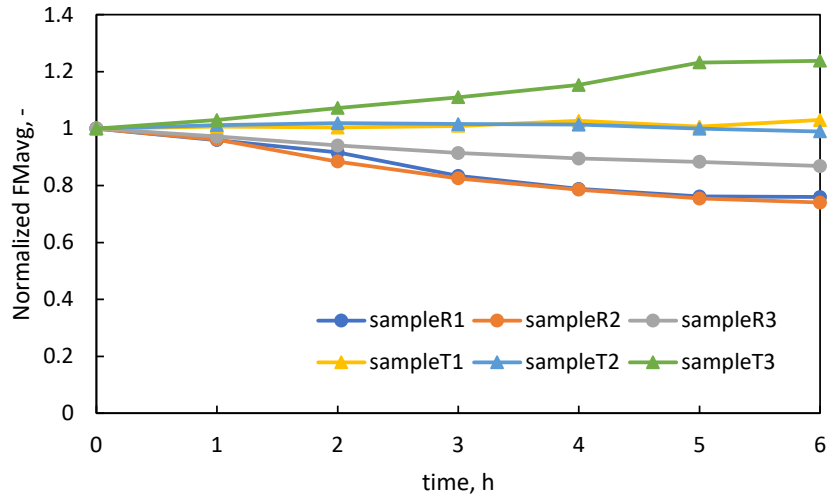


図 30 RGBそれぞれのFM (上から R, G, B 値)

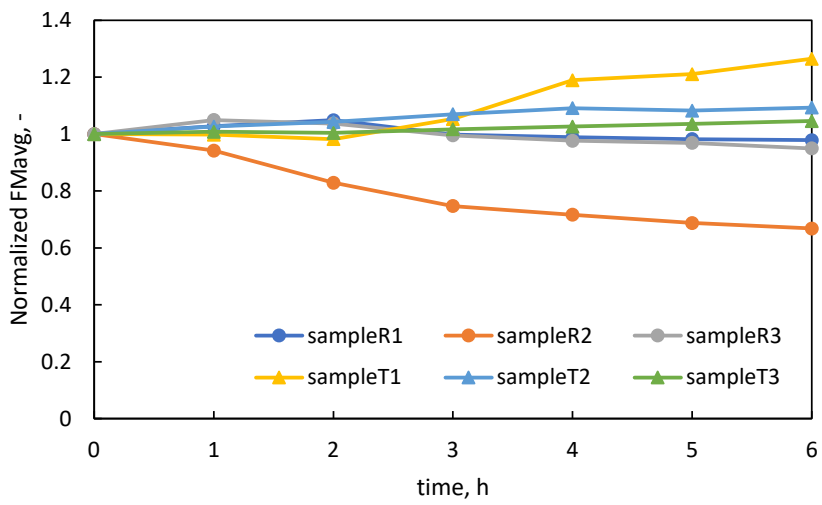
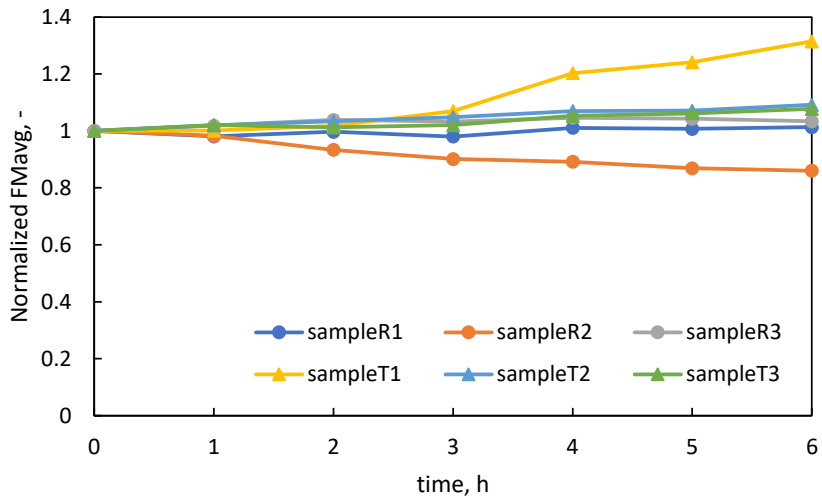
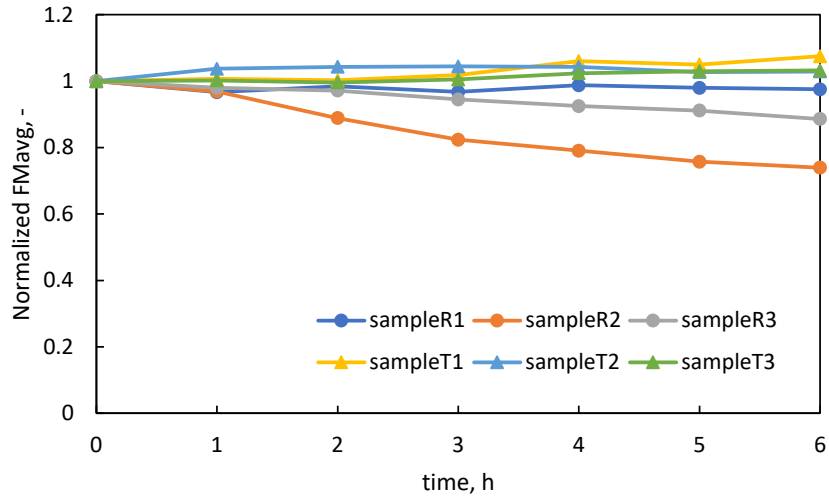
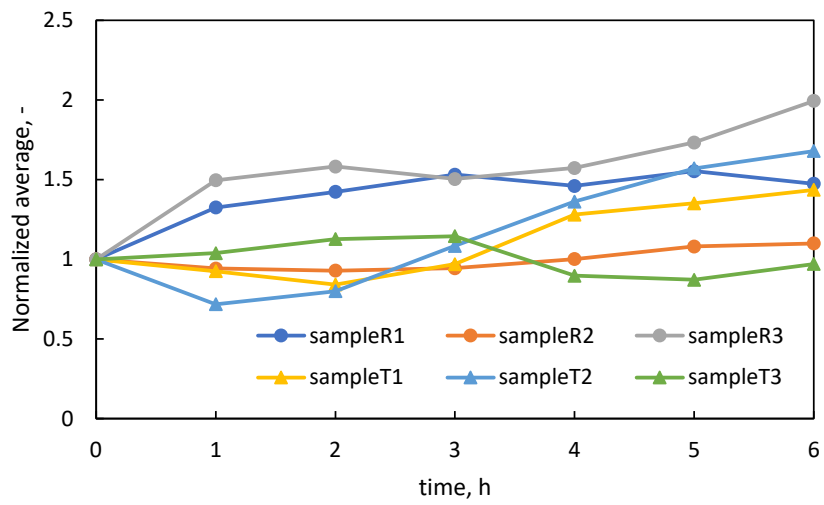
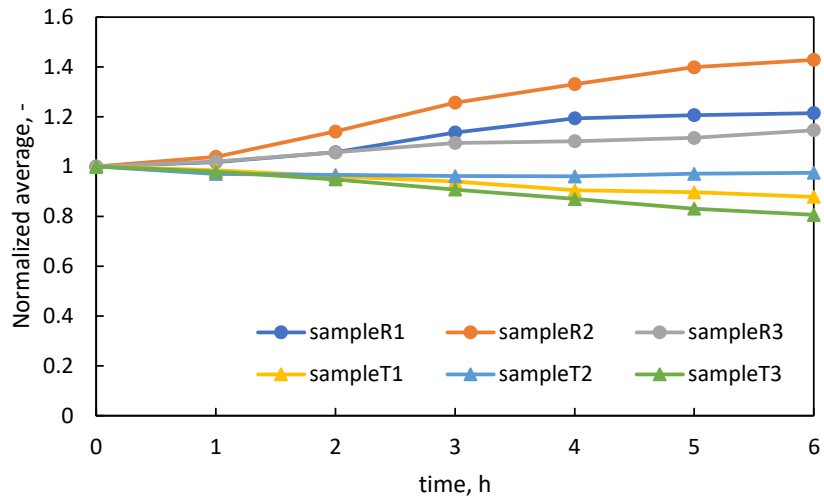
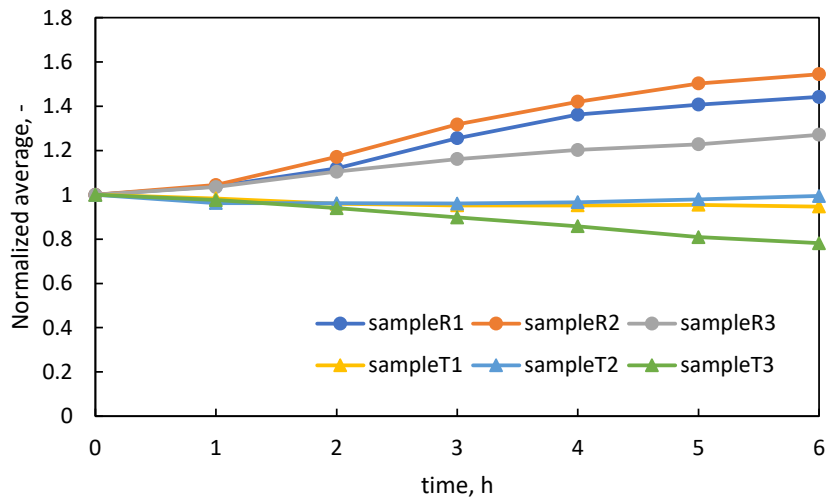
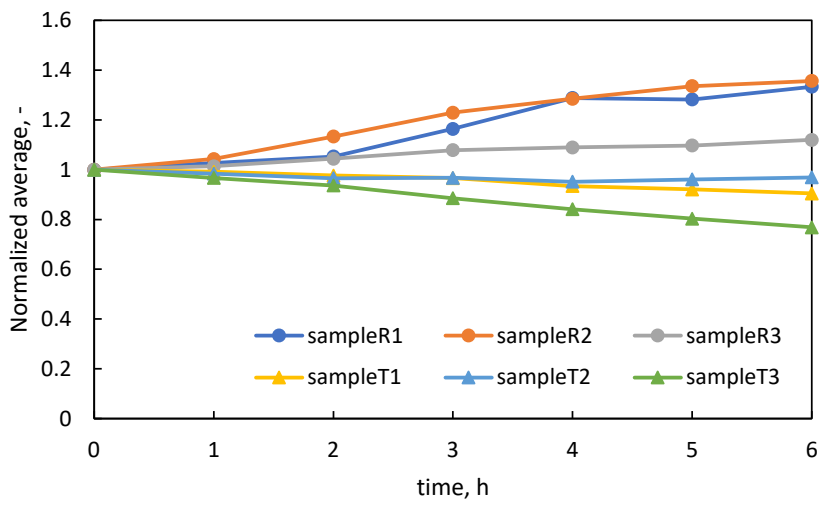
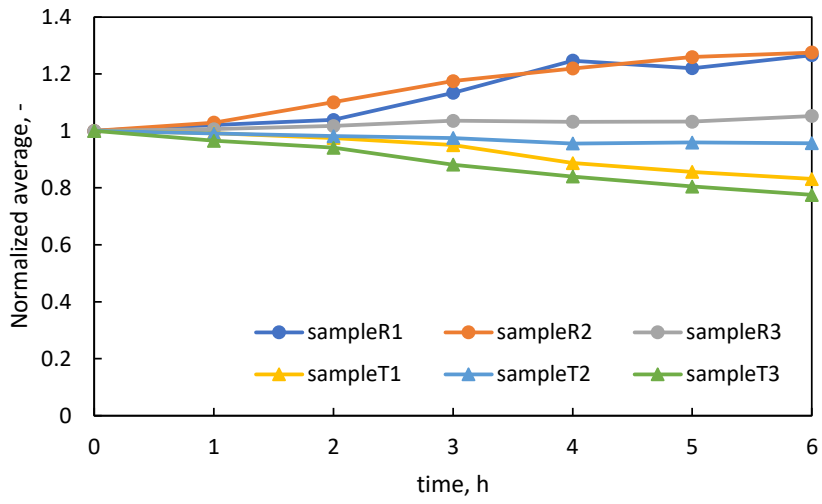
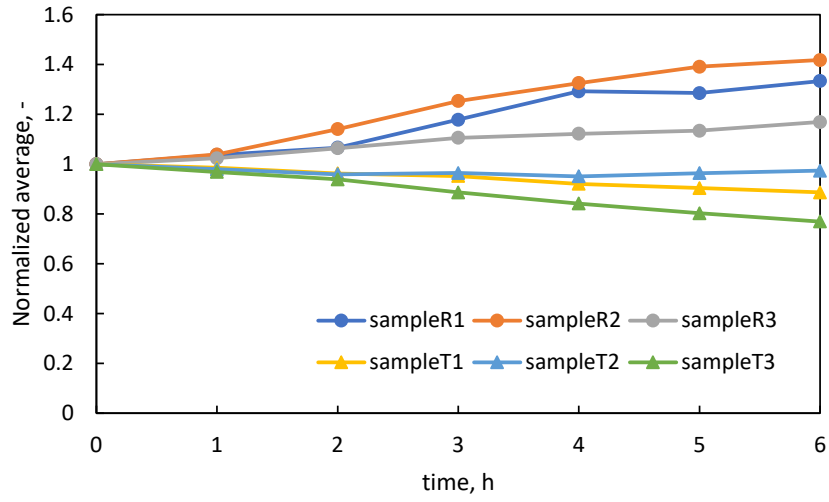


図 31 L*a*b*それぞれの FM (上から L*, a*, b*値)



(a) RGBそれぞれの平均値 (上から R, G, B 値)



(b) $L^*a^*b^*$ それぞれの平均値 (上から L^* , a^* , b^* 値)

図 32 RGB, $L^*a^*b^*$ それぞれの平均値

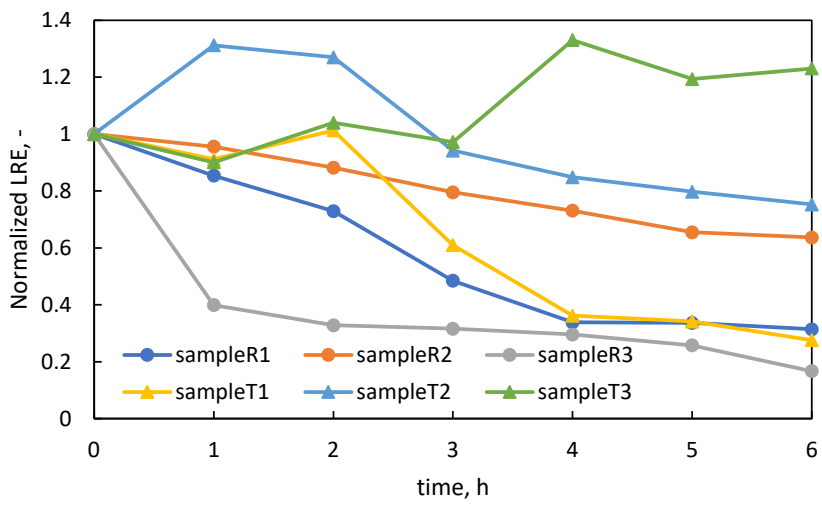
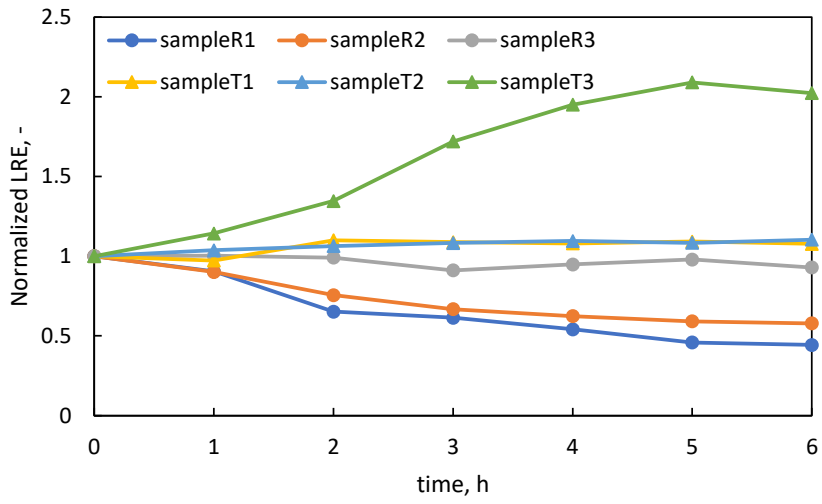
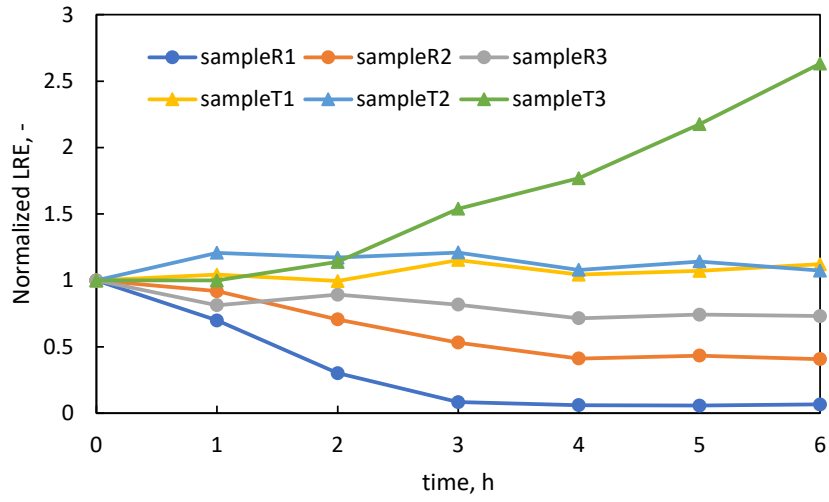


図 33 RGB それぞれの LRE (上から R, G, B 値)

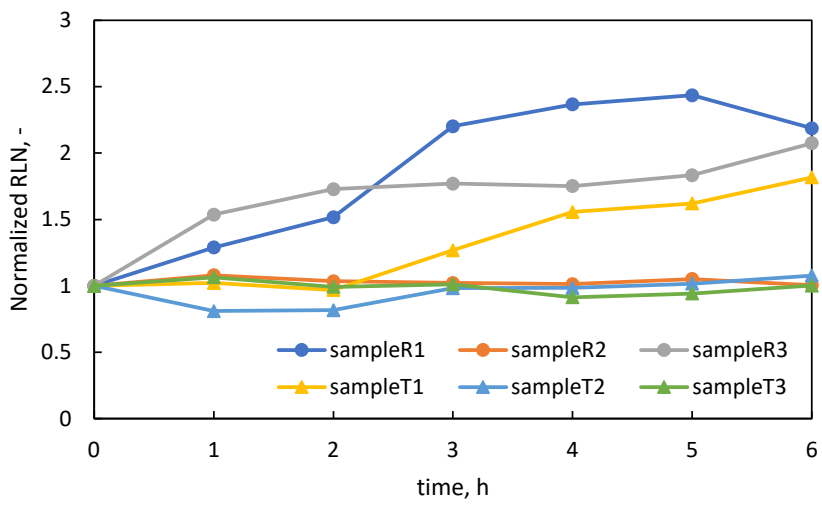
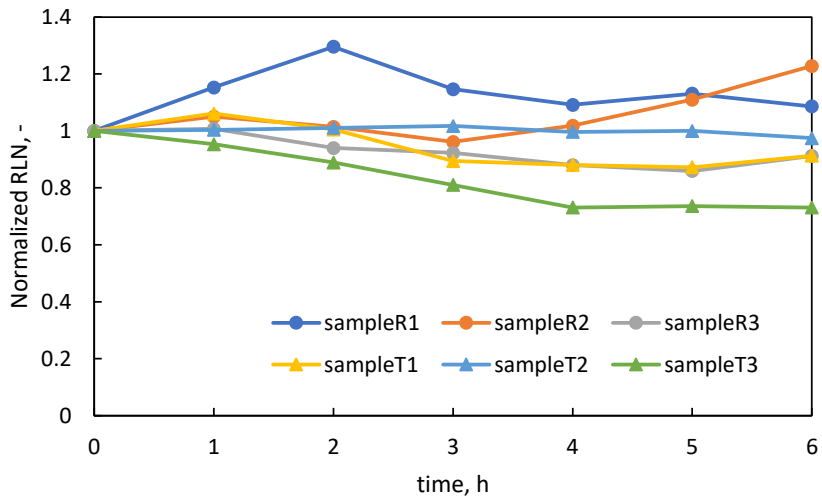
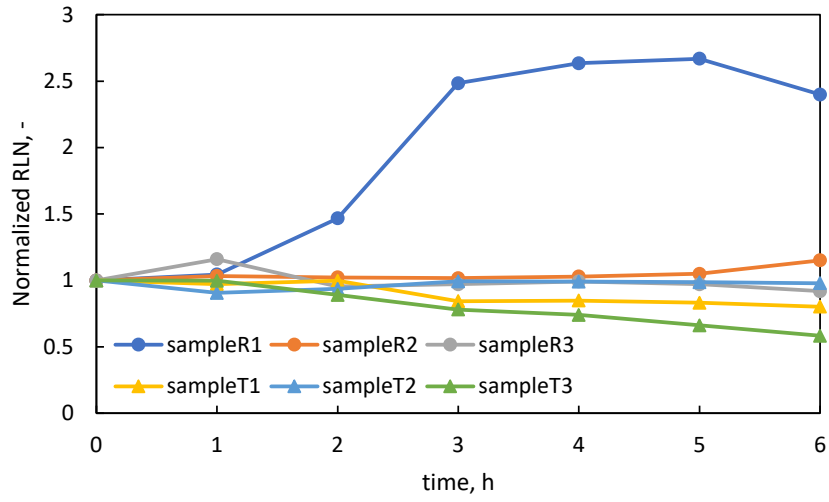


図 34 RGBそれぞれのRLN (上から R, G, B 値)

第3節 L*a*b*に特化した解析

3-1 色差

非スペckル画像のようなカラー画像の色の変化の数値化には、一般的に色差が用いられる²³⁾。変化量が数値として表れるため、色変化の割合が大きいと色差も大きくなるという特徴を持つ。各時間内での撮影した連続画像の平均画像の色差と、画像中から任意に5点選択した、各時間内での連続2画像間の色差の2種を算出した(図35)。水ストレスにより動態が減少することと、植物の色変化に関係があった場合、色変化の割合は小さくなると考えた。色差 $\Delta E(x,y)$ は式(7)で計算される。 $\Delta L^*(x,y)$ 、 $\Delta a^*(x,y)$ 、 $\Delta b^*(x,y)$ は非スペckル画像のRGB情報からMatlabにてL*a*b*表色系に換算したものである。

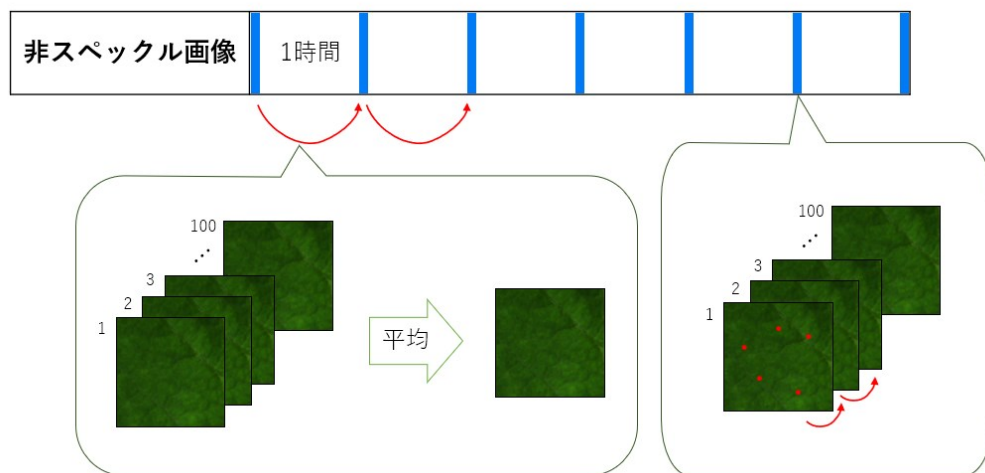
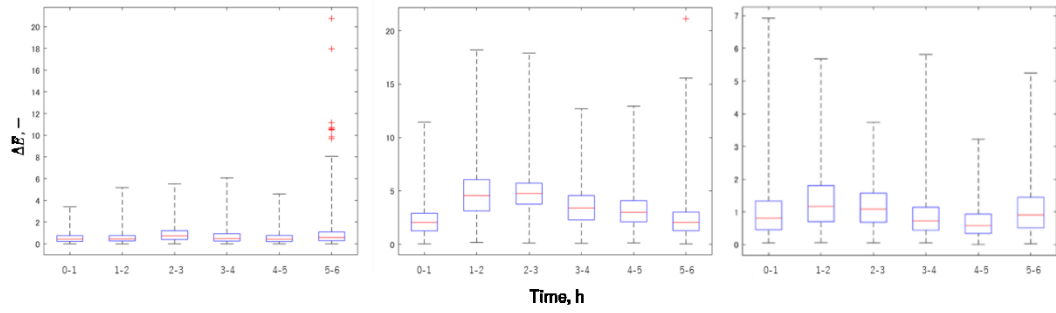


図35 色差の算出方法

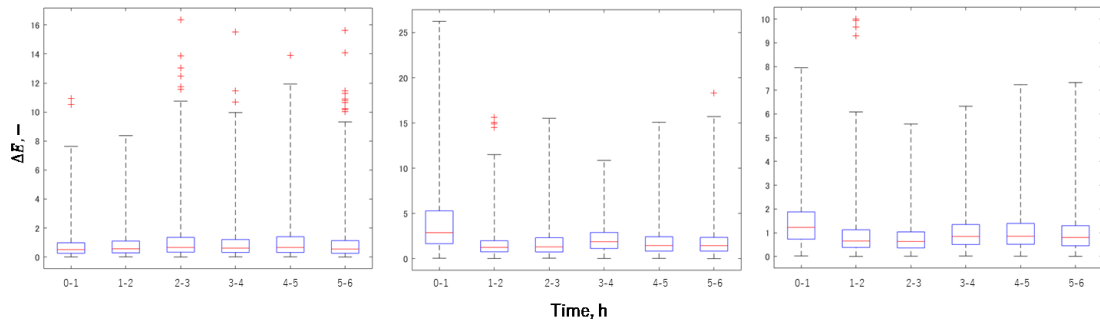
$$\Delta E(x,y) = ((\Delta L^*(x,y))^2 + (\Delta a^*(x,y))^2 + (\Delta b^*(x,y))^2)^{1/2} \quad (7)$$

3-2 色差の結果および考察

図36に平均画像の色差、図37に連続2画像間の色差を箱ひげ図で示す。平均画像の色差は撮影間隔である1時間での色差を算出しているため6時間分、連続2画像間の色差は撮影の回数分色差を算出しているため7時間分のデータが示されている。平均画像は、どちらの照射方法においても色差の値は大きい、傾向が見られなかった。同様に、連続2画像間でも傾向が見られず、水ストレスにより色差が減少するという仮説は支持されなかった。さらに、内部の動態が色変化に影響を与えている可能性がないということも示唆された。

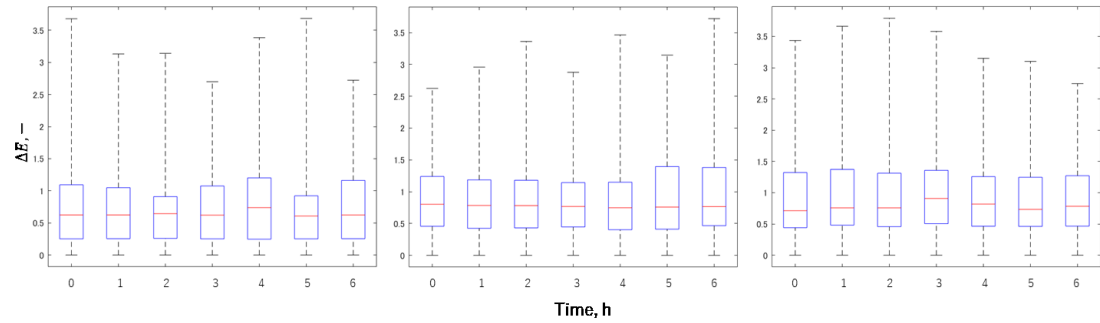


反射 (左から sampleR1, R2, R3)

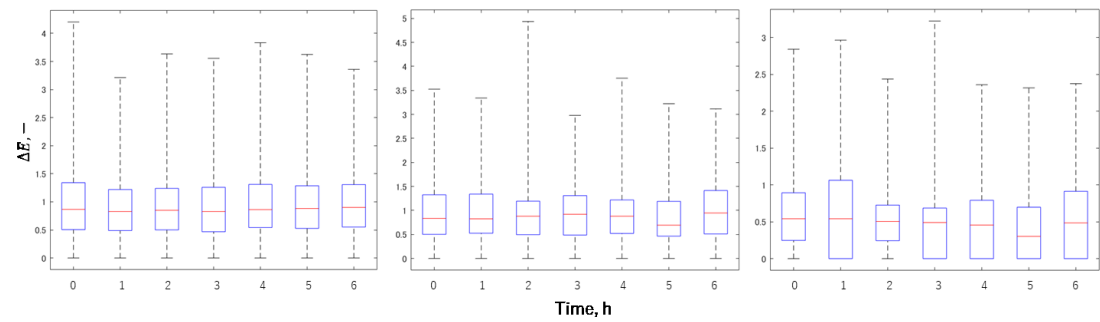


透過 (左から sampleT1, T2, T3)

図 36 平均画像の色差



反射 (左から sampleR1, R2, R3)



透過 (左から sampleT1, T2, T3)

図 37 複数枚撮影間の色差

3-3 彩度・色相

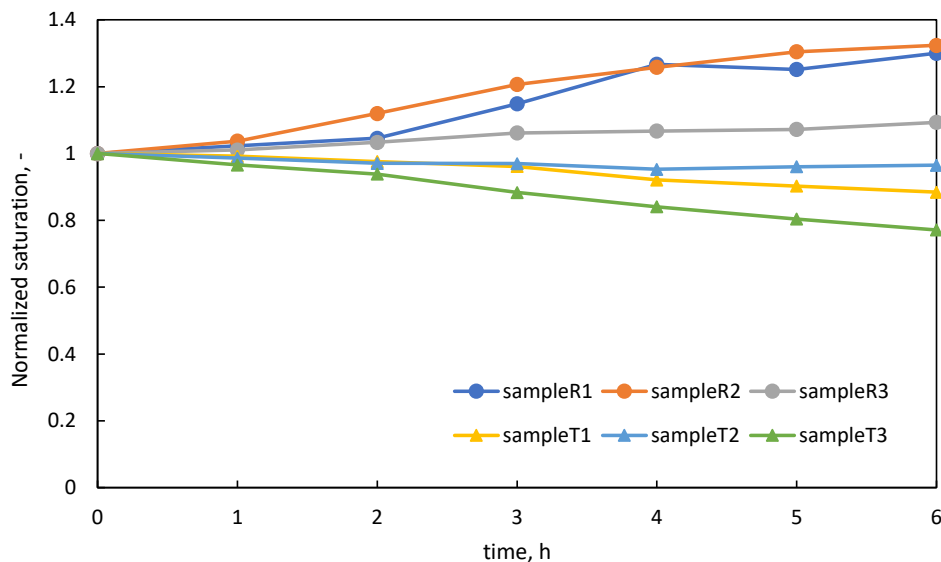
次に、 $L^*a^*b^*$ から算出される指標のうち、彩度・色相に着目した。彩度は色の鮮やかさの尺度で、色空間の中央軸からの距離である。そして、色相は色の相違であり、輝度に影響されない。乾燥により、植物葉の $L^*a^*b^*$ の平均値に変動があったため、彩度や色相にも変動があるのではないかと考えた。また、本章までで複数枚撮影間での変動はほとんど見られないことが確認されているため、 a^* 値と b^* 値それぞれの複数枚撮影画像の平均値から、彩度と色相を算出した²⁴⁾ (式 (8), (9))。

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (8)$$

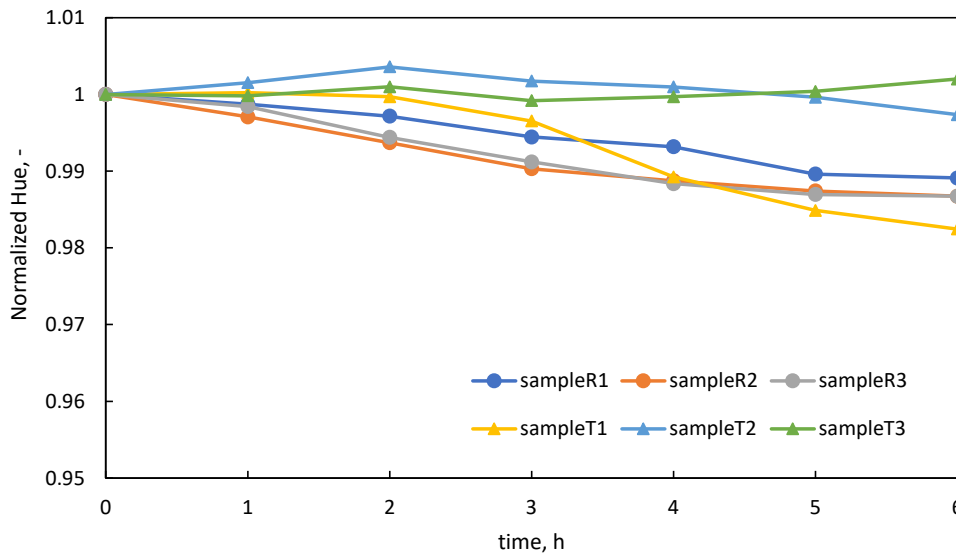
$$H = \tan^{-1} \frac{b^*}{a^*} \quad (9)$$

3-4 彩度・色相の結果

図 38 に彩度と色相の算出結果を、実験開始時間の値で除することにより正規化した結果を示す。彩度は、反射光では増加傾向が見られ、透過光では減少傾向が見られた。 a^* 値と b^* 値の平均値の増減と同様の傾向を示したため、妥当な結果が得られた。また、色相は、反射光では減少傾向が見られ、透過光ではばらつきがあるものの同様に減少傾向が見られた。しかし、彩度と比較して非常に微小な減少であることが確認された。



(a) 彩度



(b) 色相

図 38 彩度・色相の算出結果

3-5 彩度・色相の考察

彩度・色相と SPAD 値に相関があることが Madeira ら²⁴⁾によって示唆されているため、SPAD 値の時間経過による傾向を調査した。SPAD 値は、葉柄を切除した植物葉の表側の葉脈を避けた任意 5 点を、1 時間おきに葉緑素計 (SPAD-502Plus, コニカミノルタ株式会社) を用いて計測した。計測日は 2021 年 5 月 24 日と 2021 年 12 月 10 日であり、解析に使用した植物葉とは別日の結果もあるが、水ストレスを受けていることは、質量計測によって確認されている。

任意 5 点の SPAD 値の平均値を図 39 に示す。SPAD 値は両日ともに増加傾向にあった。乾燥による細胞の収縮により細胞内小器官の密度が高くなり、結果、クロロフィル濃度も高くなったためだと考えられる。SPAD 値が減少すると彩度は増加し、色相は減少すると報告されているが、それとは異なる結果が得られた。原因として、計測方法の違いが挙げられる。本研究では同一個体の植物葉の乾燥による SPAD 値の傾向を計測したが、Madeira らは複数枚の色の異なる植物葉の表裏両面を計測している。そのため、本実験とは異なると考えられる。しかし、1 時間おきでの傾向は見られたため、彩度と色相を算出することで、植物葉の水ストレス検出の可能性が示された。また、色相より彩度がより変化が見られることは、Madeira らの結果と同様であり、水ストレスの検出には彩度が有効ではないかと示唆される。

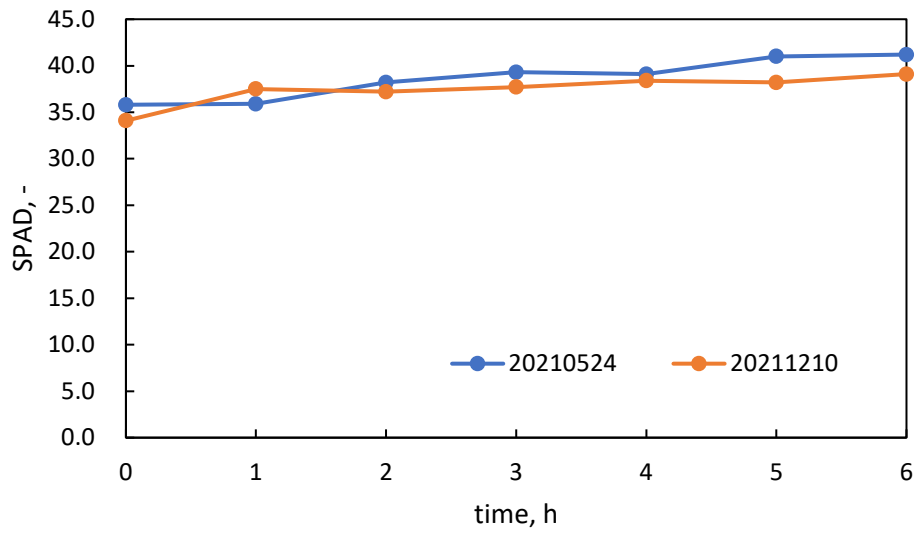


图 39 SPAD 值

第7章 結言

本研究では、植物の生育状態を簡便かつ非破壊で評価するため、レーザスペックル法による植物センシング方法の開発に取り組んできた。レーザスペックル法はレーザなどのコヒーレント光の干渉現象により現れる斑点模様の動画像を撮影し、輝度値変動を解析するものである。植物においては、生理現象に伴った表面や内部のミクロな動きを検出できると示唆されている。輝度値変動を利用していることから、LEDなどのインコヒーレント光でも同様に解析可能ではないかと考えた。そこで本研究では、LED光源を照射した非スペックル画像を解析し、植物生理情報を取得することを目的とし、水ストレスを与えたダイズ葉を対象に1時間おきに動画像を撮影した。そして、スペックル画像に有効な解析を試行したのち、非スペックル画像の色情報に基づく解析を行った。

非スペックル画像の輝度値変動が微小であることから、コントラスト調整などの画像処理による輝度値変動の拡大を目指した。しかし乾燥による画像全体の輝度の上昇が要因となり、輝度値変動のみを捉えることはできなかった。次に、テクスチャ解析で知られているランレングス解析を行った。解析値の増減は見られたが、サンプルごとに傾向が違い、使用できないことが示唆された。これらの結果から、スペックル画像の解析方法は、非スペックル画像に適応することができないと考えられた。

そして、非スペックル画像の特徴であるRGBとL*a*b*色情報を使用した解析を行った。水ストレスによる色差に傾向は見られなかったが、1時間おきに彩度と色相が変化することが確認された。よって、非スペックル画像特有の解析で水ストレスの検出が可能であることが示された。同時に、平均輝度に傾向が見られたため、平均輝度のみでも水ストレスを検出できる可能性があることも考えられる。また、複数枚撮影することなく、非スペックル画像で水ストレスの検出が可能であるとも考えられる。また現在は、水ストレスに対して、計測初期状態からの相対値で評価しているため、植物個体や計測系が変わると一貫して水ストレスを評価できない。そのため、相対的ではない指標・特徴量を検討する必要がある。

謝辞

本研究を行うにあたり、終始丁寧且つ熱心なご指導を頂いた福島崇志准教授、滝沢憲治助教に厚く御礼申し上げます。最後になりましたが、応用環境情報学研究室の先輩、同輩、後輩方、協力、支援していただいた皆様へ心から感謝の気持ちと御礼を申し上げたく、謝辞にかえさせていただきます。

参考文献

- 1) 農林水産省, 農業労働力に関する統計,
<http://www.maff.go.jp/j/tokei/sihyo/data/08.html>, 2021. (アクセス日 : 1 20 2022).
- 2) 農林水産省, スマート農業の展開について,
<https://www.maff.go.jp/j/kanbo/smart/attach/pdf/index-189.pdf>, (アクセス日 : 1 20 2022) .
- 3) 藤野素子, 遠藤良輔, 大政謙次, キュウリ葉における水ストレスの非破壊計測に関する研究, 農業情報研究, 11(2):161-170, 2002.
- 4) 野並浩, 作物の水分生理に関する土, 根, 葉, 茎における計測, 日本作物学会紀事, 70(2):151-163, 2001.
- 5) 小野貞芳, 小松良行, 木村悟, スーパーポロメーターによる蒸散量測定時の留意点について, 日本作物学会四国支部紀事, 22:1-4, 1985.
- 6) 山本晴彦, 鈴木義則, 小島孝之, 早川誠而, 井上康, 田中宗浩, 近赤外域の分光反射特性による植物の葉内水分量の推定, 日本リモートセンシング学会誌, 14(4):293-301, 1994.
- 7) 松田修, 末次憲之, 内田誠一, 和田正三, 射場厚, 近接ハイパースペクトルイメージングに基づく植物遺伝学研究の新展開, 日本生態学会誌, 64(3):205-213, 2014.
- 8) 高山弘太郎, 仁科弘重, 施設園芸における植物診断のためのクロロフィル蛍光画像計測, 植物環境工学, 20(3):143-151, 2008.
- 9) 石澤広明, 松尾司, 三木誉史, レーザスペckル法の植物水分ストレス検出への適用, 計測自動制御学会論文集, 45(2):129-130, 2009.
- 10) Ce Liu, Antonio Torralba, William T. Freeman, Fredo Durand, Edward H. Adelson, Motion Magnification. ACM Transactions on Graphics, 24(3):519-526, 2005.
- 11) R.R.Soares, H.C.Barbosa, R.A.Braga, J.V.L.Botega, G.W.Horgan, Biospeckle PIV (Particle Image Velocimetry) for analyzing fluid flow, Flow Measurement and Instrumentation, 30:90-98, 2013.
- 12) Rafael Rodrigues Cardoso, Anderson Gomide Costa, Cassia Marques Batista Nobre, Roberto Alves Braga Jr., Frequency signature of water activity by biospeckle laser, Optics Communications, 284(8):2131-2136, 2011.
- 13) 川崎亮, 渡辺龍三, 島田平八, 鈴木英夫, レーザースペckル法による金属-セラミックス接合界面におけるひずみ分布の測定, 日本金属学会誌, 50(12):1056-1060, 1986.
- 14) Fujii, H., T. Asakura, K. Nohira, Y. Shintomi and T. Ohura, Blood flow observed by time varying laser speckle, Optics Letters, 10(3):104-106, 1985.
- 15) Lim, Jae S., Two-Dimensional Signal and Image Processing, Englewood Cliffs, 469-476, 548,

- 1990.
- 16) 三浦康之, 藤井悠太, 低照度映像を対象とした動態認識のための画像補正法の検討, 第 77 回全国大会講演論文集, 29-30, 2015.
 - 17) 長島宏幸, 原川哲美, 坂本肇, 佐野芳知, 白石明久, 五十嵐均, 低濃度 DSA 画像におけるヒストグラム返還を用いたコントラスト改善の基礎的検討, *Journal of Signal Processing*, 8(2):147-156, 2004.
 - 18) 石原邦, 水環境に対する植物の反応について, *Soil Phys. Cond. Plant Growth. Jpn.* 76:23-29, 1997.
 - 19) 清水幸夫, タバコ葉の乾燥収縮に関する研究 (第 1 報), *農業機械学会誌*, 31(4):309-315, 1970.
 - 20) 樋口静一, 本橋康之, テクスチャ解析によるヘアライン仕上面の評価方法, *精密工学会誌*, 70(8):1059-1064, 2004.
 - 21) 田中敏幸, 村瀬曜子, 上家知郎, テクスチャー特徴による肉腫の照合, *MEDICAL IMAGING TECHNOLOGY*, 19(1):33-41, 2001.
 - 22) 松友紀和, 大西英雄, 長木昭男, 金田明義, SPECT 画像に対する Soft Threshold 法を用いたウェーブレット変換ノイズ抑制処理の評価, *日本放射線技術学会雑誌*, 69(1):49-57, 2013.
 - 23) 秋本眞喜雄, 池田光里, 前田憲寿, 中野慎也, ボーマンサムエル, 早津勇一, 畑三恵子, 皮膚色の評価における CIEDE2000 色差式の有用性, 自動制御連合講演会講演論文集, 57, 1115-1118, 2014.
 - 24) Ana Carla Madeira, Armando Ferreira, Amarilis de Varennes, Maria Isabel Vieira, SPAD Meter Versus Tristimulus Colorimeter to Estimate Chlorophyll Content and Leaf Color in Sweet Pepper, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, Vol34, 2003.

付録

- Matlab プログラムコード
- FM (W+G+C の場合)

```
close all;
```

```
%サンプル数
```

```
N=100;
```

```
No=6;
```

```
fileName='C:\Users\Akune\Documents\ファイル名';
```

```
%配列の設定
```

```
avgZ=zeros(7,N);
```

```
lavg=zeros(1,7);
```

```
lmax=zeros(1,7);
```

```
Zavg=zeros(1,7);
```

```
maxZ=0;
```

```
minZ=1000000;
```

```
clims=[0,1];
```

```
for fileNo=0:No%撮影回数
```

```
I=zeros(50,50);%解析結果の配列
```

```
for fileNo1=2:N%連続撮影枚数
```

```
imgF=sprintf('%s_%01d.tif',fileName,fileNo);%計算に使用する画像1枚目
```

```
A=imread(imgF,fileNo1);
```

```
A=im2double(A);
```

```
B=rgb2gray(A);%グレースケール
```

```
C=imcrop(B,[505 330 53 53]);%トリミング
```

```
C=wiener2(C,[5 5]);%ウィーナーフィルタ
```

```

C=imcrop(C,[3 3 49 49]);
D=imadjust(C,[],[],0.5); %ガンマ補正
E1=imadjust(D,[0.06 0.46]); %コントラスト調整
Z1(:,:)=E1(:,:,1);

imgF=sprintf('%s_%01d.tif',fileName,fileNo); %計算に使用する画像 2 枚目
A=imread(imgF,fileNo-1);
A=im2double(A);
B=rgb2gray(A);
C=imcrop(B,[505 330 53 53]);
C=wiener2(C,[5 5]);
C=imcrop(C,[3 3 49 49]);
D=imadjust(C,[],[],0.5);
E0=imadjust(D,[0.06 0.46]);
Z0(:,:)=E0(:,:,1);

maxZZ=max(Z0(:));
if maxZ<maxZZ
    maxZ=maxZZ;
end

minZZ=min(Z0(:));
if minZ>minZZ
    minZ=minZZ;
end

end

%画像の平均輝度
if fileNo1==2
    avgZ(fileNo+1,1)=mean(Z0(:));
    avgZ(fileNo+1,2)=mean(Z1(:));
else
    avgZ(fileNo+1,fileNo1)=mean(Z1(:));
end

AA=abs(Z0-Z1); %FM 分子

```

```
BB=abs(Z0+Z1); %FM 分母
```

```
AA(BB==0)=0;
```

```
BB(BB==0)=1;
```

```
AAA=double(AA);
```

```
BBB=double(BB);
```

```
I=I+AAA./BBB; %FM
```

```
end
```

```
Zavg(1,fileNo+1)=mean(avgZ(fileNo+1,:));
```

```
I=I/(N-1); %FMavg
```

```
I=I*10; %任意の値 p
```

```
Iavg(1,fileNo+1)=mean(I(:));
```

```
Imax(1,fileNo+1)=max(I(:));
```

```
outputFilename=sprintf('ファイル名_%01d.bmp',fileNo); %解析画像保存
```

```
imagesc(I,clims);
```

```
colorbar;
```

```
saveas(gcf,outputFilename);
```

```
end
```

```
beep
```

・ランレングス解析

close all

InputfileName='C:\Users\Akune\Documents\ファイル名';

%サンプル数

sampleN=1;

measureN=6;

%撮影枚数

N=99;

%読み込む行の max

rowMax=50;

colMax=50;

clims=[0 395];

%調整画像の階調数 (0~3 の 4 階調→ToneVal=4)

for T=5

 switch T

 case 1

 ToneVal=4;

 case 2

 ToneVal=8;

 case 3

 ToneVal=16;

 case 4

 ToneVal=32;

 case 5

 ToneVal=64;

 case 6

 ToneVal=128;

 case 7

 ToneVal=256;

 end

```

LRE=zeros(sampleN,measureN);
RLN=zeros(sampleN,measureN);
I=zeros(rowMax,N);

for numF=1
    for numM=0:measureN

        runMatrix=zeros(ToneVal,N);
        L=zeros(ToneVal,ToneVal);

        %配列用意
        img=sprintf('%s_%01d.tif',InputfileName,numM);
        imgMeanCal=0;

        for colR=1:colMax
            for fileNo=1:N
                % 画像読み込み
                Z=imread(img,fileNo);
                Z=im2double(Z);
                B=rgb2gray(Z);
                C=imcrop(B,[406 351 49 49]);
                I(:,fileNo)=C(:,colR).*255;

            end

            I=round(I*(ToneVal-1)/255);

            CountVal=1;
            for row=1:rowMax
                for col=1:N-1

                    if I(row,col)==I(row,col+1)
                        CountVal=CountVal+1;

                        if col==N-1

```



```

        a=I(row,col)+1;
        runMatrix(a,CountVal)=runMatrix(a,CountVal)+1;
        CountVal=1;
    end

elseif I(row,col)~=I(row,col+1)
    a=I(row,col)+1;
    runMatrix(a,CountVal)=runMatrix(a,CountVal)+1;
    CountVal=1;

end

end

end

%LRE
for length=1:N
    L(:,length)=runMatrix(:,length)*length^2;
end
LREcal(numM+1,colR)=sum(L:)/sum(runMatrix(:));

%RLN
RLNcal(numM+1,colR)=sum((sum(runMatrix.').^2)/sum(runMatrix(:)));

end

%LRE
A=mean(L2cal.);
L2(numF,numM+1)=A(1,numM+1);

%RLN
A=mean(L4cal.);
L4(numF,numM+1)=A(1,numM+1);

```

```
outputFilename=sprintf('ファイル名_%d.bmp',numM);  
imagesc(runMatrix,clims)  
saveas(gcf,outputFilename);
```

```
end
```

```
end
```

```
end
```

```
close all
```

・輝度値変動箱ひげ図

```
close all;
```

```
N=100;
```

```
No=6;
```

```
fileName='C:\Users\Akune\Documents\ファイル名';
```

```
ZD1=zeros(50,50,N-1);
```

```
ZD2=zeros(50,50,N-1);
```

```
Z1=zeros(50,50);
```

```
Z2=zeros(50,50);
```

```
S1=zeros(247500,7); %輝度値変動結果の配列
```

```
clims=[0,1];
```

```
for fileNo=0:No
```

```
    for fileNo1=2:N
```

```
        imgF=sprintf('%s_%01d.tif',fileName,fileNo);
```

```
        A=imread(imgF,fileNo1);
```

```
        A=im2double(A);
```

```
        B=rgb2gray(A);
```

```
        C=imcrop(B,[505 330 49 49]);
```

```
        D1(:,:)=C(:,:);
```

```
        ZD1(:,:,fileNo1-1)=D1;
```

```
        imgF=sprintf('%s_%01d.tif',fileName,fileNo);
```

```
        A=imread(imgF,fileNo1-1);
```

```
        A=im2double(A);
```

```
        B=rgb2gray(A);
```

```
        C=imcrop(B,[505 330 49 49]);
```

```
        D2(:,:)=C(:,:);
```

```
        ZD2(:,:,fileNo1-1)=D2;
```

```
end

ZZ=abs(ZD2-ZD1); %輝度値変動計算

S1(:,fileNo+1)=reshape(ZZ,[],1); %箱ひげ図にするための配列整理

end

figure
boxplot(S1,'Whisker',50); %箱ひげ図
ylim([0 0.22]);

beep
```

・ 変動係数

```
close all;
```

```
N=100;
```

```
No=6;
```

```
hight=50;
```

```
width=50;
```

```
Z1=zeros(hight,width,100);
```

```
fileName='C:\Users\Akune\Documents\ファイル名';
```

```
CVavg=zeros(1,7);
```

```
clims=[0,1];
```

```
for fileNo=0:No
```

```
CV=zeros(50,50);
```

```
for fileNo1=1:N
```

```
imgF=sprintf('%s_%01d.tif',fileName,fileNo);
```

```
A=imread(imgF,fileNo1);
```

```
A=im2double(A);
```

```
B=rgb2gray(A);
```

```
C=imcrop(A,[490 240 49 49]);
```

```
Z1(:, :, fileNo1)=C(:, :, 1);
```

```
SD=zeros(hight,width);
```

```
AVG=zeros(hight,width);
```

```
for i=1:hight
```

```
for j=1:width
```

```
SD(i,j)=std(Z1(i,j,:)); %標準偏差
```

```
AVG(i,j)=mean(Z1(i,j,:)); %平均
```

```
    end
end

CV=SD./AVG; %変動係数
CVavg(1,fileNo+1)=mean(CV(:));

    end

outputFilename=sprintf('ファイル名_%01d.bmp',fileNo);
imagesc(CV,clims);
colorbar;
saveas(gcf,outputFilename);

    end
beep
```

・色差（平均画像の場合）

```
clearvars;
```

```
close all;
```

```
N=100;
```

```
No=6;
```

```
fileName='C:\Users\Akune\Documents\ファイル名';
```

```
%連続画像中の L*a*b*配列
```

```
ZD1=zeros(50,50,N);
```

```
ZD2=zeros(50,50,N);
```

```
ZD3=zeros(50,50,N);
```

```
ZE1=zeros(50,50,N);
```

```
ZE2=zeros(50,50,N);
```

```
ZE3=zeros(50,50,N);
```

```
%平均画像中の L*a*b*配列
```

```
Z1=zeros(50,50);
```

```
Z2=zeros(50,50);
```

```
Z3=zeros(50,50);
```

```
Za=zeros(50,50);
```

```
Zb=zeros(50,50);
```

```
Zc=zeros(50,50);
```

```
de=zeros(50,50);
```

```
DE=zeros(2500,6);
```

```
clims=[0,1];
```

```
for fileNo=1:No
```

```
for fileNo1=1:N
```

```
imgF=sprintf('%s_%01d.tif',fileName,fileNo-1);
```

```
A=imread(imgF,fileNo1);
```

```

A=rgb2lab(A); %RGB を L*a*b*に変換
A=im2double(A);
C=imcrop(A,[505 330 49 49]);
D1(:,:)=C(:,:,1); %L*
D2(:,:)=C(:,:,2); %a*
D3(:,:)=C(:,:,3); %b*

ZD1(:,:,fileNo1)=D1;
ZD2(:,:,fileNo1)=D2;
ZD3(:,:,fileNo1)=D3;

imgF=sprintf('%s_%01d.tif',fileName,fileNo);
A=imread(imgF,fileNo1);
A=rgb2lab(A);
A=im2double(A);
C=imcrop(A,[505 330 49 49]);
E1(:,:)=C(:,:,1);
E2(:,:)=C(:,:,2);
E3(:,:)=C(:,:,3);

ZE1(:,:,fileNo1)=E1;
ZE2(:,:,fileNo1)=E2;
ZE3(:,:,fileNo1)=E3;

end

```

%平均画像取得

```

for y=1:50
    for x=1:50
        Z1(x,y)=mean(ZD1(x,y,:));
        Z2(x,y)=mean(ZD2(x,y,:));
        Z3(x,y)=mean(ZD3(x,y,:));
        Za(x,y)=mean(ZE1(x,y,:));
        Zb(x,y)=mean(ZE2(x,y,:));
        Zc(x,y)=mean(ZE3(x,y,:));
    end
end

```



```

    end
end

ZZ1(:,:,1)=Z1;
ZZ1(:,:,2)=Z2;
ZZ1(:,:,3)=Z3;

ZZ2(:,:,1)=Za;
ZZ2(:,:,2)=Zb;
ZZ2(:,:,3)=Zc;

de=imcolordiff(ZZ1,ZZ2,'isInputLab',true); %色差計算

outputFilename=sprintf('ファイル名_%01d.bmp',fileNo);
figure
imshow(de);
imwrite(de,outputFilename);

DE(:,fileNo)=reshape(de,[],1);
boxplot(DE,'Whisker',10);

    end
beep

```