

地上分光計測情報を用いた水稻の葉色診断と生育および品質特性に関する基礎的検討

長岡技術科学大学大学院 環境リモートセンシング研究室 10106083 野崎由紀子

1. 背景

水稻の栽培では窒素栄養診断を行って、水稻の窒素栄養状態を知り、それをもとに穂肥の必要性、時期や量を決定する。現在、水稻の窒素栄養状態を知る指標として、葉の緑色の測定する葉色診断が主流となっている¹。現在行われている診断方法として、葉色カラスケールと葉緑素計を使用する方法がある。葉色カラスケールは、作物の葉色の基準となる複数の色標である。カラスケールと水稻の葉とを目視によって比較し、相当するカラスケール番号を読み取り、水稻の栄養状態の判定を行う。また、葉緑素計は葉を挟んで複数波長の吸光度から葉の単位葉面積当たりの葉緑素量を測定することができる携帯用の機器である²。特に葉色カラスケールは一般農家が栽培途中において簡便に葉色の判定ができるため広く普及している。しかし、目視にて判定をするため、測定時の天候や照度によってカラスケールの色が異なって見える場合や観測者による誤差が生じる場合もある。葉緑素計による診断は再現性が高いが、計測者が圃場に入り、葉身一枚一枚について測定する必要があるため作業効率が良くない。どちらの診断方法にも共通する問題として圃場内の数株の診断結果しか得ることが出来ない。また、生育ムラがある圃場の場合、数株の診断結果では圃場の全体的な生育情報を知ることが出来ない。こうした背景を受けて、人為的な誤差を引き起こさず、空間的かつ広範囲の情報が取得できるリモートセンシング技術を利用した生育情報の把握が注目されている。

2. 研究目的

水稻生育診断は施肥の必要性、時期や量の判断の他に水稻の生育量の算出、収穫量や品質にも大きく関係する。また、肥料の量の他に気温、水温や風等が要因となり発生する成長不良やおよび過剰な成長や倒伏は収穫量や品質等に影響する。定期的な水稻生育診断を行うため、水稻の草丈や茎数の測定、葉色診断を始めとする、生育調査を実施し、栽培中の水稻の生育状態を的確に把握することが求められる。

本研究では、水稻分光観測情報と葉色などの生育状態を示す生育パラメータとの関係を解明し、観測された分光情報から生育診断情報を抽出するための基礎研究を目的とした。具体的には、施肥量を3段階に区分けした圃場の水稻を対象に、ハイパースペクトルカメラを用いて、水稻の面的な分光情報捉える。

また、目視葉色測定含む慣行生育調査と収量調査を並行して行い、各観測結果を比較検討することによって、分光情報による生育診断方法を検討することを目的とした。

3. 研究構成

本研究では、水稻分光計測情報と葉色などの生育状態を示す生育パラメータとの関係を解明し、分光情報による葉色判定手法の検討を行うことを最終目的として研究を進めた。図1に研究のフローチャートを示す。始めに施肥量を3段に区分した圃場にて、分光計測と生育調査を実施し、並びに3区分した圃場の収量および品質、食味調査を行う。本研究で着目する水稻の葉色は、収量およびそれを構成する生育パラメータ、食味等と関係性が高いといわれている。そこで、生育調査と収量および食味調査結果を比較し、葉色を始めとする、各生育パラメータの関係性を確認する。次に、ハイパースペクトルカメラで取得した分光情報から水稻の分光反射率を算出する。算出した、分光反射率を用いて、葉色判定手法について検討する。

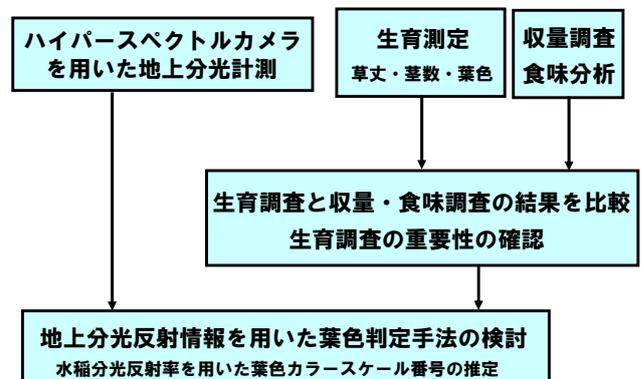


図1：研究フローチャート

4. 地上分光計測および水稻生育測定

ハイパースペクトルカメラを用い、水稻の分光計測を行った。観測対象は長岡市越路中沢の圃場とした。対象圃場は元肥および追肥の施肥量を3段階に区分した施肥量別圃場とする。圃場の営農情報を表1に示す。圃場横の倉庫内部にカメラを設置して俯瞰撮影を行った。観測の際に基準体、葉色カラスケールも圃場と共に撮影し、観測は5月の移植から9月の刈取りまで、週二回の頻度とした。対象圃場の品種はコシヒカリである。分光計測と同時に、水稻の草丈、茎数、葉色カラスケールと葉緑素計を使用した生育測定を行

った。生育測定結果を図2～図5に示す。
 ハイパースペクトルカメラはエバ・ジャパン社製 NH-3 を使用した。NH-3 の性能諸元を表2に示す。NH-3 で撮影した画像の分解能は観測距離10mでは3.0mm/pixelである。

表1：施肥量別圃場 営農情報

日付	営農記録		
	区画A (肥料全量)	区画B (肥料半分)	区画C (肥料なし)
5月11日	移植	移植	移植
	基肥	基肥	基肥
	窒素量3.5kg	窒素量1.75kg	
6月15日	中干し開始	中干し開始	中干し開始
7月16日	1回目追肥	1回目追肥	1回目追肥
	窒素量0.5kg	窒素量0.25kg	
7月25日	2回目追肥	2回目追肥	2回目追肥
	窒素量0.26kg	窒素量0.13kg	
7月27日	出穂		
7月30日		出穂	出穂
9月3日	半分以上倒伏	一部倒伏	
9月8日	刈取り	刈取り	刈取り
9月10日	刈取り	刈取り	刈取り

表2：NH-3 性能諸元

名称	NH-3
波長範囲	400nm-1000nm
映像解像度	752×480pixel (36万画素)
バンド数	121
スペクトル分解能	5nm

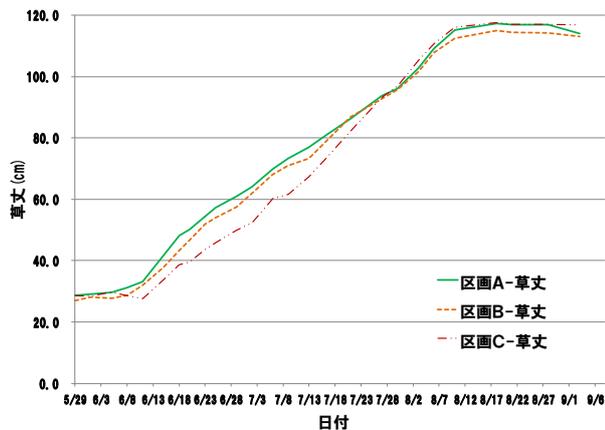


図2：生育測定結果 草丈

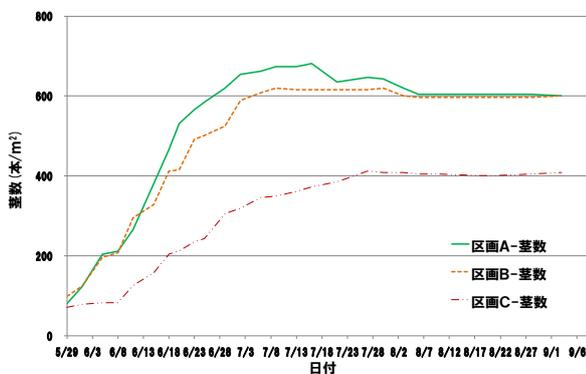


図3：生育測定結果 茎数

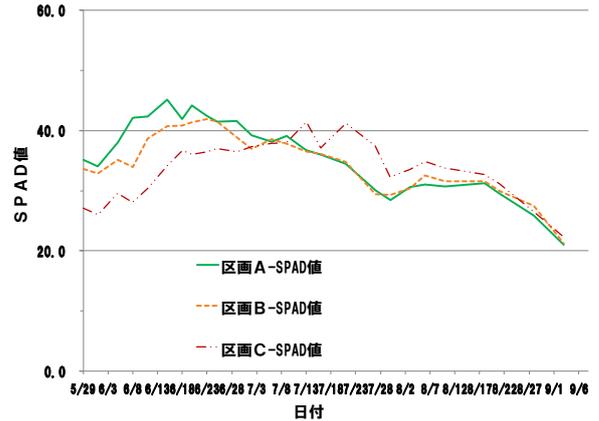


図4：生育調査結果 SPAD 値

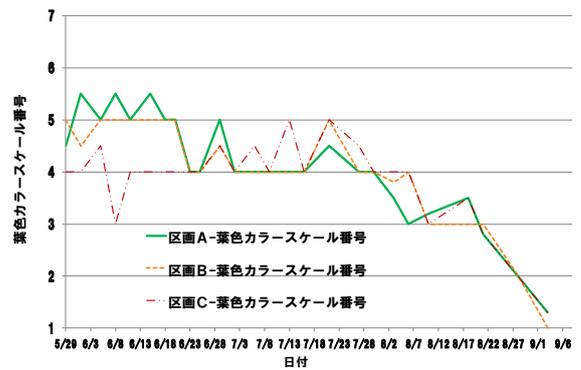


図5：生育調査結果 葉色カラスケール番号

図2から、草丈は区画A～Cの3区画とも8月上旬の出穂期までは伸び続けているが、出穂以降はほぼ草丈は変化していない。また、図3から、くき数も7月下旬から減少し始め、出穂期頃から成長変化が止まっている。これは一般的なコシヒカリの成長推移と同じであり、越後さんとう農業協同組合で行われた生育調査の草丈およびくき数も同様の成長推移であった。また、草丈は3区画ともほとんど差がないが、くき数は区画A、Bはあまり差がないが、区画Cは圧倒的にくき数が少ないという結果になった。次に図4のSPAD値は、3区画とも5月下旬の分けつ前期から値が高くなり、6月下旬の最高分けつ期頃からゆるやかに値が減少している。そして出穂期前の8月上旬で少し値が高くなり、出穂期以降は葉が段々と黄色になっていくため、SPAD値はゆるやかに減少していった。越後さんとう農業協同組合で行われた生育調査のSPAD値同様の推移であった。また、区画別に比較すると、6月上旬以降のSPAD値は区画Aが一番高く、区画Cが一番低い。しかし、7月上旬に区画CのSPAD値が区画A、Bの値を超えて8月の下旬まで3区画の中で一番SPAD値が大きかった。図5の葉色カラスケール番号の推移と比較すると、カラスケ

ール番号でも区画 C は分けつ期頃は区画 A, B よりも値が小さく, 7 月の幼穂形成期頃は値が大きい. 実際に観測の際に水稻の状態を肉眼で見た結果, 区画 C の稲は他よりも色は薄く, 全体的に小さかった. 区画 C は基肥を投与していないため, その影響が分けつ期頃の葉色に現れたと考える. 図 5 の葉色カラースケール番号は頻りに上下に推移しているが, SPAD 値ではその様な変化はない. 葉色カラースケールは肉眼によって計測を行っており, 明るさによって見え方が異なるため, その影響によるものと推測する.

5. 収量および品質・食味調査

9 月上旬に施肥量別に区分した区画ごとに, 収量調査および品質・食味調査を行った.

水稻の収量は, 穂数, 一穂粒数, 登熟歩合, 千粒重の 4 要素から成り立ち, これらを収量構成要素という. 収量は以下の式(1)のように, 収量構成要素の積で算出することができる. 登熟歩合とは, 全粒数に対する熟した粒の割合であり, 千粒重とは玄米 1000 粒当たりの重さのことである. これらを決定する要因とされるのが, 基肥および追肥の施用量, 幼穂形成期の稲体貯蔵養分量または葉色, 穂肥の施用時期, 出穂期から収穫までの水管理である³⁾.

$$\text{収量 (kg/10a)} = \text{m}^2 \text{あたりの粒数 (粒/m}^2\text{)} \times \text{登熟歩合 (\%)} \times \text{千粒重 (g)/1000} \quad \cdot \cdot \text{式(1)}$$

10a あたりに換算した収量調査の結果を表 3 に示す. また, 整粒歩合と乳心白計の値を図 6 に示す. 図 7 に食味分析結果を示す.

構成要素収量が 500 kg/10a を満たしているといえる. 今回の結果から, 区画 A, B が一般的な収量の数値であった. 区画 C の穂数や粒数が一番少なく, この影響から収量も少ないが, 登熟歩合は 3 区画中で一番高かった. 区画 B は A よりも粒数が多いが, 千粒重が小さいため, 区画 A よりも粒が小さく, 厚みも薄いものが多い. 区画 A は一番登熟歩合が低めではあるが, 千粒重が大きかった. また, 図 2 から, 区画 A, C は整粒歩合が高く, 乳心白計の値が低いいため, 粒厚や大きさが十分にあり, 品質的には良いといえる. 区画 B は整粒歩合が最も低く, 乳心白計が最も高いため, 未熟米などが多く, 品質的には一番低いといえる.

タンパク質含有率, アミロース含量ともに低い方が, 食味が良いとされているため, 図 7 から区画 C が最も食味評価が高いといえる. 収量と粒の品質が高いとされた区画 A の食味評価は 3 区画の中で最も低いという結果になった. コシヒカリでは, 玄米タンパク質含有率の目標値を 6.0% に設定され, 含有率が

6.5% を超える場合, 食味評価が低くなるとされている. 近隣の越路地区周辺圃場の水稻のタンパク質含有率は 5.0~5.5% であり, 区画 A のタンパク質含有率は 4.8% であるため, 長岡地区内の標準と同様の食味評価といえる. 3 区画のタンパク質含有率が全体的に低い原因として, 幼穂形成期に成長過剰にあり, 出穂期後の葉色が低下および体内の窒素含有率が低くなり, 8 月中の高温による影響も重なったことで, 未熟米の発生増加を引き起こしたのではないかと考える. 水稻は, 気温 30°C 以上では光合成量が減少し, 夜間も呼吸を行うために体内養分を使用するため, 体内窒素含有率が低下したと考える.

収穫後に施肥量別圃場の土壌調査を行った. 水稻栽培中に土壌から発現する窒素量といわれる可給態窒素量の数値は, 表 3 の土壌分析結果に示す. 新潟県内の目標値では細粒質で 20, 中粗粒質で 15 である. 県内でも長岡地域は少なめの傾向があるため, 標準値よりも低い数値であった. しかし, 毎年必ず同じ窒素量が発現するわけではなく, 気温や水管理などの影響によって発現時期や量に変化するため, 今年は標準地域に比べて発現する窒素量がやや少なめという結果となった.

表 3: 収量調査結果

	m ² あたり穂数 (本/m ²)	1穂粒数 (粒/本)	千粒重 (g)	登熟歩合 (%)	m ² あたり粒数 (粒/m ²)	構成要素収量 (kg/10a)	土壌分析結果 (mg N/100g)
区画A	348.5	74.9	23.9	84.6%	26,094	527	8
区画B	342.1	78.4	23.0	85.6%	26,829	528	11.27
区画C	295.2	69.3	23.0	87.5%	20,452	411	10.27

※10aあたり

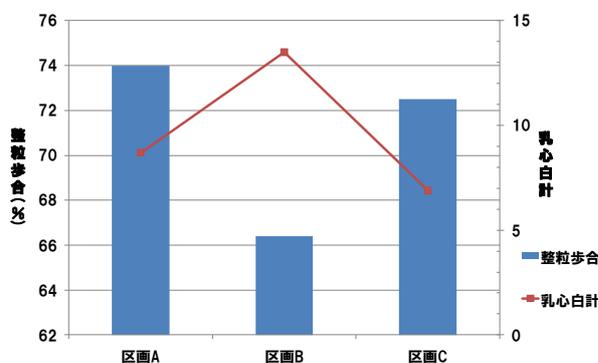


図 6: 整粒歩合と乳心白計

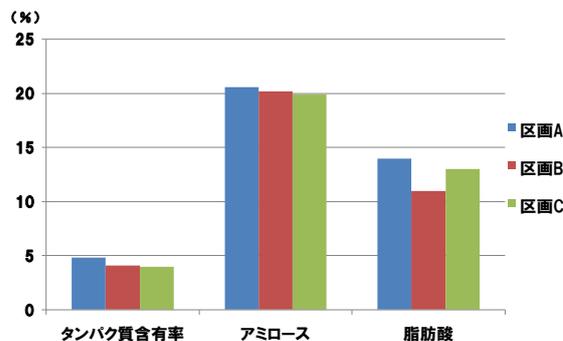


図 7: 施肥量別圃場における食味分析結果

6. 水稻の分光反射情報の抽出

ハイパースペクトルカメラで取得した画像データを分光反射率へと変換する。取得した画像データは、天候や照度による影響で、観測日によって画像の明るさが異なる。そのため、メラミンスポンジ素材の白色半球体を反射基準体として、共に撮影する。物体によって光が当たる面が異なるため、反射する光の強さも異なる。そのため、反射基準体に白色半球体を用いた。式(2)のように、画像全体の画素値を白色半球体の画素値で割ることで、画像全体の反射率変換を行う。今回、反射率を算出する際、メラミンスポンジの反射強度の最大値を使用した。

$$\text{反射率} = \frac{\text{画像内の画素値}}{\text{白色半球体の画素値}} \quad \dots \text{式(2)}$$

反射率の変換後、画像データ中の水稻の部分のみを抽出する。抽出方法として、近赤外 Band と赤 Band の差分である DVI の値を計算した。使用した波長域は近赤外 Band(750 nm, 770nm, 790nm), 赤 Band(625nm, 640nm, 660nm)である。画像データに応じて閾値を目視で決定し、閾値よりも大きいところを水稻領域として抽出した。

区画 A の水稻領域の反射スペクトルグラフを図 8 に示す。また、葉色カラスケールの反射スペクトルグラフを図 9 に示す。また、算出した分光反射率から植生指標 DVI の値を算出し、経時的な変化を捉えるため、以下の図 10 のグラフを作成した。図 10 から、施肥量別圃場の 3 区画と比較すると、6 月の分けつ期が終わるまでは、区画 A の値が最も高く、区画 C の値が最も低かった。しかし、7 月の幼穂形成期以降は、区画 C の DVI の値が区画 B よりも高くなった。

7. 分光情報を用いた葉色判定手法

葉色診断方法には、葉色カラスケールと葉緑素計を用いる 2 つの方法がある。本研究では葉色カラスケールによる方法に着目し、分光情報を用いた葉色判定手法について検討する。葉色カラスケールによる方法は、目視によってカラスケールと葉色を比較し、色の濃淡から該当するカラスケール番号を決定する。図 8 の水稻の反射スペクトルグラフを見ると、水稻の成長とともに、可視域の緑 Band と近赤外域の反射率が高くなっている。そこで、可視域の B(青), G(緑), R(赤)の波長域の反射率を用いた葉色判定手法について検討する。

7-1. 重回帰分析によるカラスケール番号の推定

区画 A の B, G, R の各波長域間の反射率の平均値を算出する。その際、10nm のように狭い間隔の波長域や 100nm のような広い

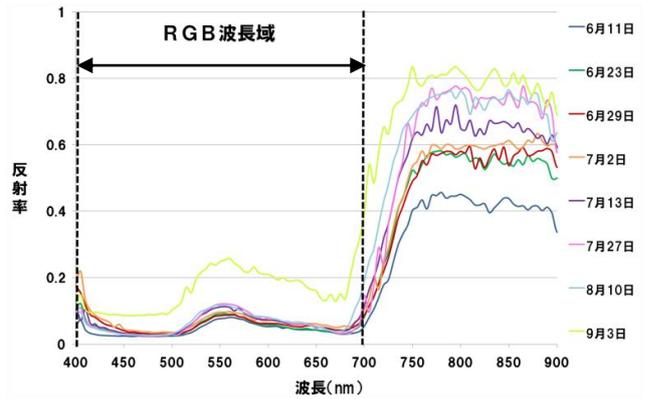


図 8：区画 A 水稻の反射スペクトルグラフ

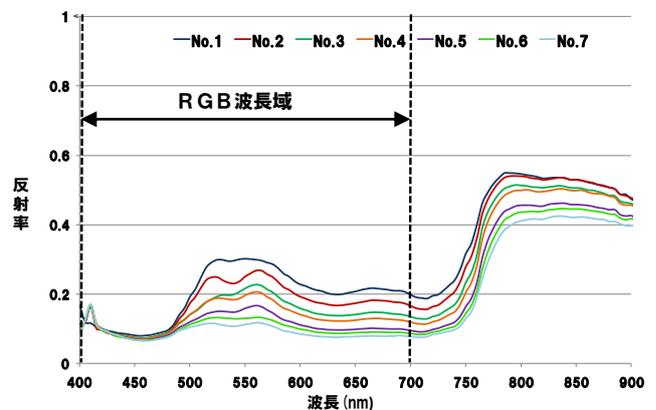


図 9：葉色カラスケール反射スペクトルグラフ



図 10：植生指標 DVI の推移

間隔の波長域など、様々なパターンの波長間隔で反射率の平均値を算出する。今回は 10nm, 30nm の波長間隔での平均値を算出した。B(Blue), G(Green), R(Red)の各 Band の反射率の相関係数を算出し、相関係数が最も小さい波長域の組み合わせを選出した。式(3)は B と G の波長域、式(4)は B と R の波長域の反射率を説明変数として、2 つの重回帰式を作成した。今回 G と R はどの波長域の組み

合わせでも相関係数が高かったため、重回帰式に使用しなかった。

$$I1 = k_1B + k_2R + k_3 \quad \cdot \cdot \text{式(3)}$$

$$I2 = k_4B + k_5R + k_6 \quad \cdot \cdot \text{式(4)}$$

In : 葉色カラースケール

K1~6 : 係数 B : 青 Band の反射率

G : 緑 Band の反射率 R : 赤 Band の反射率

説明変数として、式(3)には B, G の波長間の反射率平均値、式(4)には B, R の波長間の反射率平均値を代入するが、その組み合わせを以下に示す。

・ 10nm 間隔

① B(425nm-435nm), G(565nm-575nm)

② B(425nm-435nm), R(615nm-625nm)

・ 30nm

③ B(425nm-455nm), G(545nm-575nm)

④ B(425nm-455nm), R(610nm-640nm)

係数 Kn を算出し、①~④の反射率を説明変数、施肥量別圃場において葉色測定した葉色カラースケール番号を目的変数として重回帰分析を行った。

①~④の波長域の反射率を重回帰式に代入して計算を行った結果、①~④の重相関係数は 0.9 となった。また、式(3)と式(4)の重回帰式を用いて葉色カラースケール番号 In を推定した。推定されるカラースケール番号 In を縦軸、実際に葉色測定により判定した葉色カラースケール番号を横軸としたグラフを作成した。①のグラフを図 11 に示す。

本研究では目安として、葉色カラースケール番号の許容誤差を 0.5 以内とする。そこで、①~④の平均二乗誤差 RMSE を算出したところ、①は 0.43、②は 0.48、③は 0.42、④は 0.47 と 4 パターンとも誤差 0.5 以内となった。

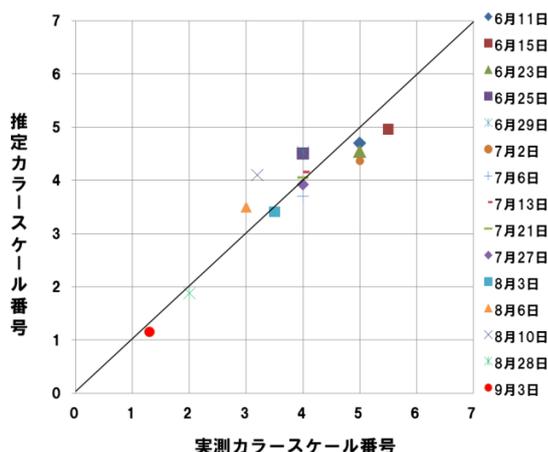


図 11 : 推定カラースケール番号の比較

7-2. 順位尺度による水稻の葉色判定

これまで、図 9 の葉色カラースケールのスペクトルグラフのように、カラースケール番号 1~7 が等間隔に変化するものだと考えていた。しかし、カラースケール番号とは変化していく値ではなく、葉色の程度を番号として判別するものである。そこで、順序尺度による葉色判定手法について検討した。順序尺度では、順位による比較が可能である。順序尺度による葉色判定は、RGB 波長域の反射率を用い、式(5)の葉色判定指標を算出した。

$$\text{葉色判定指標} = \frac{G - R}{G - B} \quad \cdot \cdot \text{式(5)}$$

B : 青 Band の反射率 G : 緑 Band の反射率
R : 赤 Band の反射率

B, G, R の反射率は B(420-495nm), G(500-595nm), R(600-695nm)の波長域の平均値とした。

式(5)を用いて、算出した水稻の葉色評価指標値と葉色カラースケール番号の葉色判定指標値を表 4 に示す。水稻の葉色判定指標値と葉色カラースケール番号の葉色判定指標値とを比較し、一番近い数値のカラースケール番号として判定した。例として、表 4 の青線範囲の 6 月 29 日の 3 区画の葉色を判定した結果、No.4 となった。判定した葉色カラースケール番号を表 5 に示す。表 5 のカラースケール番号判定値とは、表 4 の水稻葉色判定指標値と葉色カラースケールの各番号の葉色評価指標値を比較し、判定したカラースケール番号である。この判定結果の正答率を検証するため、カラースケール番号の判定値と計測値を比較し、番号が一致かつ 0.5 以内の差であれば 1 点、0.5 の差であれば 0.5 点、0.6 以上の差であれば 0 点とした。表 5 の点数の列に検証結果を示す。点数を見ると、3 区画とも赤線範囲内の 6 月~7 月に 1 点や 0.5 点が多く、8 月に 0 点が多い傾向がある。表 5 の赤線範囲の正答率を、式(6)を用いて算出したところ、区画 A は 77.8%、区画 B は 55.6%、区画 C は 88.9%となった。

$$\text{正答率} = \frac{\text{点数合計}}{\text{日数}} \times 100 \quad \cdot \cdot \text{式(6)}$$

この結果から、この指標は 6 月~7 月の分けつ期から幼穂形成期の葉色判定に有効であり、全観測日には適応しないといえる。

表 4：水稻(左)および葉色カラスケール(右)の葉色判定指標

	葉色判定指標値			指標値	
	区画A	区画B	区画C	No.1	No.2
6月15日	0.67	0.66	0.56	No.1	0.36
6月23日	0.63	0.59	0.54	No.2	0.40
6月25日	0.61	0.57	0.57	No.3	0.46
6月29日	0.56	0.56	0.54	No.4	0.55
7月2日	0.51	0.48	0.46	No.5	0.70
7月6日	0.50	0.50	0.53	No.6	0.76
7月13日	0.53	0.52	0.57	No.7	1.01
7月21日	0.59	0.64	0.59		
7月27日	0.59	0.57	0.62		
8月3日	0.58	0.62	0.48		
8月6日	0.54	0.50	0.48		
8月10日	0.41	0.44	0.40		
8月28日	0.29	0.26	0.31		
9月3日	0.19	0.09	0.02		

表 5：葉色カラスケール番号判定表

	区画A			区画B			区画C		
	カラスケール番号 判定値	計測値	点数	カラスケール番号 判定値	計測値	点数	カラスケール番号 判定値	計測値	点数
6月15日	5	5.5	0.5	5	5	1	4	4	1
6月23日	5	5	1	4	5	0	4	4	1
6月25日	4	4	1	4	4	1	4	4	1
6月29日	4	4	1	4	4	1	4	4	1
7月2日	4	5	0	3	4.5	0	3	4.5	0.5
7月6日	3.5	4	0.5	3	4	0	4	4	1
7月13日	4	4	1	4	4	1	4	4	1
7月21日	4	4	1	5	4	0	4	4	1
7月27日	4	4	1	4	4	1	4	4.5	0.5
8月3日	4	3.5	0.5	4	3.8	1	3	4	0
8月6日	4	3	0	3	4	0	3	4	0
8月10日	2	3.2	0	3	3	1	2	3	0
8月28日	1	2	0	1	2	0	1	2	0
9月3日	1	1.3	1	1	1	1	1	1.3	1

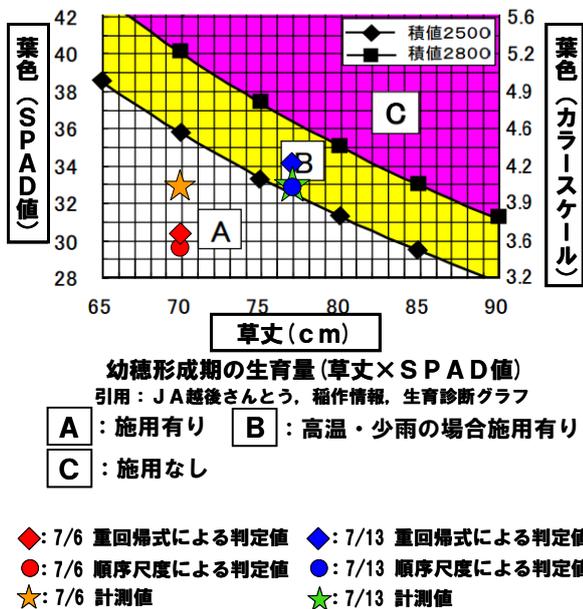


図 12：葉色診断手法の実用性の実証

7. まとめ

重回帰式と葉色判定指標を用いた葉色判定の実用性を検証するため、図 12 の実際に施肥の有無の判断に使用されている生育診断表を用いた。葉色形成期前期である 7 月 6 日と 13 日の重回帰式と葉色判定指標を用いて判定した葉色カラスケール番号判定値と生育調査で測定した葉色カラスケール番号測定値を用いて、生育量(草丈×SPAD 値)を計算し、図 12 にプロットした。生育量の算出には、区画 A の草丈測定結果および葉色判定結果を用いた。施肥の有無を判断したところ 7 月 6 日は判定値、測定値ともに範囲 A となった。また、7 月 13 日は判定値、測定値ともに範囲 B となった。

本研究ではハイパースペクトルカメラで取得した、分光情報を用いた葉色診断方法として、重回帰分析による水稻カラスケール番号の推定、順序尺度による葉色判定手法について検討した。重回帰分析による方法は、平均二乗誤差 RMSE が許容誤差 0.5 以内となった。順位尺度による葉色判定手法では、葉色判定指標を作成し、水稻の葉色カラスケール番号を判定したところ、6 月～7 月の正答率は区画 A、C で 70%以上となった。この結果から、葉色判定指標は分け時期から幼穂形成期間の葉色判定に有効であることが分かった。また、区画 B の正答率が 55.6%と低かった原因として、部分的に生育のムラがあったためと考えられ、追跡調査を検討していく。結論として、生育診断時期である 7 月上旬の葉色診断に有効であり、実際に行われている生育診断方法での施肥の有無が判断可能であったため、重回帰式および葉色判定指標を用いた葉色判定の可能性を確認することができた。

8. 謝辞

本研究を行うにあたり、多くの方々から助力を賜りました。地上観測を行うにあたり、試験場所の提供他、様々なご支援をいただきました有限会社ホープイン中沢の皆様、この場をお借りして深謝の意を表します。農業分野をはじめとする様々な助言および貴重なデータを提供して頂いた他、生育調査や収量調査でもご協力していただきました、歌代摩可子様をはじめとする長岡地域振興局農林振興部の皆様、JA 越後さんとうの皆様、この場をお借りして深謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) Talkebe, M. and Yoneyama, T. Measurement of leaf color scores and its implication to nitrogen nutrition of rice plant. JARQ. 23, 86-93 (1989)
- 2) 全国農村教育協会, 肥料農薬部, 農業指導員のための水稻の葉色診断, p3-6, 2002
- 3) 新潟県農林水産部, 新潟米おいしい米づくりのポイント, p1-7, 2013