

近接リモートセンシングによる「山田錦」の窒素蓄積量の推定値が 生育ステージによって異なる要因の解明

有吉 真知子・村田 資治・金子 和彦

Identification of the factors causing variation in the nitrogen accumulation estimated by proximal remote sensing in “Yamadanishiki” with the growth stage

ARIYOSHI Machiko, MURATA Motoharu and KANEKO Kazuhiko

Abstract: The relationship between the S1 value, which is obtained from the reflectance of near-infrared and red light by proximal remote sensing, and the above-ground nitrogen accumulation in the sake-brewing rice cultivar "Yamadanishiki" was examined to determine the factors that cause variation in the relationship with plant growth stage. We focused on the effect of the presence or absence of rice ears at full heading on the aforementioned relationship. In plants where ears were removed at full heading, above-ground nitrogen accumulation tended to be lower than in plants where ears were not removed, although the S1 value did not change significantly. This suggests that the presence of ears is one of the factors that cause the variation in the relationship between the S1 value and aboveground nitrogen accumulation with plant growth stage.

Keywords: S1 value, sake-brewing rice, laser-based growth sensor

キーワード: S1 値、酒造好適米、レーザー式生育センサー

緒 言

山口県では日本酒の生産量が増加傾向にあり、実需者からは酒造好適米の高品質化と安定供給が求められている。水稻の生産現場においても、収益性の高い酒造好適米の生産が活発化しており、新規に酒造好適米栽培を始める生産者も増加している。しかしながら、酒造好適米として需要の高い「山田錦」は長稈で倒伏しやすく(金子・羽嶋, 2007)、肥培管理が難しいため、生育量に応じた迅速で精密な穂肥診断技術の確立が求められている。

これまで、近接リモートセンシングは、食用米などの高品質米生産に有効であることが示され、実用化されつつある(安積・志賀, 2003)(鳥山, 2009)(境谷・井上,

2012)(境谷, 2016)。有吉ら(2021)は、「山田錦」の生育において、地上部窒素蓄積量と、S1 値(近赤外光と赤色光の反射率から得られる出力値)との間に密接な正の相関関係があること、この性質を利用することで、幼穂形成期のリモートセンシングにより適正穂肥量の算出が可能となることを明らかにした。

同時に、センシングの時期によって回帰直線が異なること、すなわち、生育ステージが進むにつれて、同じ S1 値であっても地上部窒素蓄積量は多くなることを報告している(有吉ら, 2021)。リモートセンシングによって得られる S1 値と水稻の地上部窒素蓄積量の関係が生育ステージによって異なることは、先行研究でも報告されて

いる。例えば、正規化植生指数(NDVI)は植被率と関係があり、葉面積指数(LAI)が大きくなると飽和するため、生育後期には地上部窒素蓄積量とNDVIの関係が異なること(平井ら, 2014)や、最高分げつ期に比べて、幼穂形成期以降はNDVIあたりの地上部窒素蓄積量が高い傾向にあることが知られている(浪川ら, 2016)。有吉ら(2021)は、出穂後にS1値と地上部窒素蓄積量の関係が変化する要因として、葉と穂では分光反射特性が異なり、出穂によって水稻群落の植生指数が変化する可能性を指摘している。先行研究では、「コシヒカリ」および「はえぬき」において葉と穂の反射スペクトルが異なることが報告されている(井上ら, 2008)が、「山田錦」に関して同様の報告はない。

そこで本研究では、S1値と地上部窒素蓄積量の関係に影響する要因として穂に着目し、「山田錦」において、穂の有無によってS1値と地上部窒素蓄積量の変化するかどうかを検証した。その結果、リモートセンシングによる窒素蓄積量推定の精度向上に寄与する知見を得たので報告する。

材料および方法

1 耕種概要

試験は、2019年に山口県農林総合技術センター(山口県山口市)において実施した。耕起前に試験ほ場の5カ所から地表下0~15cmの作土を採取し、「土壌環境分析法」(土壌環境分析法編集委員会, 1997)に記載された手法に従って分析した(第1表)。作土深は、ほ場の5カ所に直径約1cmの棒を人力で貫入しなくなるま

でさしこみ、貫入した深さの平均値とした。

品種は「山田錦」を用いた。2019年5月17日に播種した後、プール育苗を行った。栽植密度は条間30cm、株間19.5cm、17.1株/m²とし、6月7日に稚苗を移植した。

2 処理区の設定

基肥は、化成肥料(N: 14%, P₂O₅: 16%, K₂O: 14%)を用いて、移植前の代かき(植代)時の6月3日に全層施用した。追肥は化成肥料(N: 14%, P₂O₅: 6%, K₂O: 14%)を用いて、最高分げつ期(7月17日、中間追肥)、幼穂形成期(7月30日、穂肥Ⅰ)、減数分裂期(8月13日、穂肥Ⅱ)の3回に分けて表層施用した。基肥—中間追肥—穂肥Ⅰ—穂肥Ⅱの各窒素施肥量が異なる処理区を7区設け、1~3反復とした(第2表)。各処理区の面積は90m²とした。

設置した7区のうち5区において、「穂あり区」と「穂除去区」を設けた(第2表)。「穂除去区」では、穂前期調査(8月29日)の前日に、リモートセンシングの照射部分にあたる6条×約2mの穂を抜き、「穂あり区」は穂の除去は行わなかった。各処理区の面積は3.6m²とした。

3 調査方法

測定に使用したセンサーと測定方法は、有吉ら(2021)と同様とした。すなわち、リモートセンシングにはレーザー式生育センサー(CropSpec、株式会社トプコン)を用いて、ソリ状の台座にセンサーを搭載し、田面を条方向に滑走させながら測定した(第1図)。センサーは、田面

第1表 供試ほ場における作土の理化学性

圃場	pH (H ₂ O)	CEC (meq)	全窒素 (%)	腐植含量 (%)	可給態窒素 (mg/kg)	可給態リン酸 (mg/kg)	交換性カリ (mg/kg)	作土深 (cm)
53号田	6.1	12.0	0.14	2.8	88	269	143	14.7

全窒素および全炭素は乾式燃焼法で、可給態窒素は風乾土30℃を4週間培養して求めた

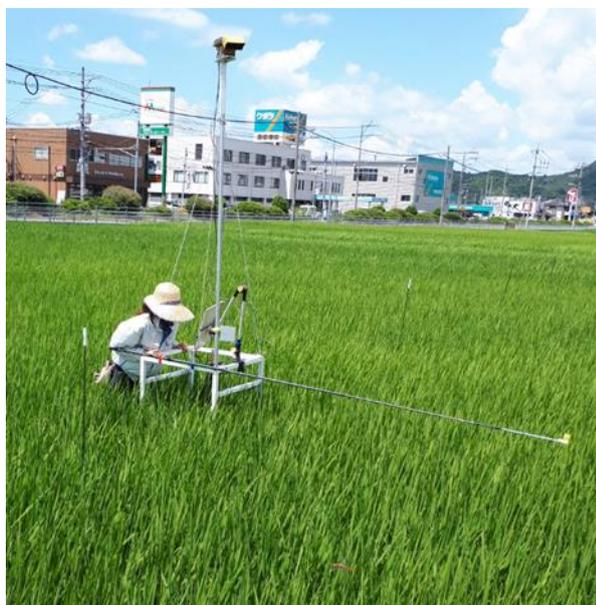
可給態リン酸はトルオーグ法、交換性カリは酢酸アンモニウム抽出法で測定した

腐植含量は全炭素に1.724を乗じた値を示す

近接リモートセンシングによる「山田錦」の窒素蓄積量の推定値が生育ステージによって異なる要因の解明

第2表 「山田錦」の栽培試験で設定した施肥体系と試験区の構成

肥料の種類	窒素施肥量 (g m ⁻²)				基肥量 (g m ⁻²)		反復数	地上部窒素蓄積量の調査区数				
	基肥	中間追肥N	穂肥 I	穂肥 II	リン酸	カリ		最高分げつ期	幼穂形成期	減数分裂期	穂揃期	
											穂あり	穂除去
無窒素	0	0	0	0	4.0	6.0	2	1	1	1	1	1
	0	2	0.3	0.9	4.5	7.2	1	1	1	0	0	0
配合肥料	0	2	0.6	1.3	4.8	7.9	1	0	0	1	1	1
	0	2	0	1.2	4.5	7.2	1	0	1	0	0	0
基肥;化成464 穂肥;追肥6号	2	2	0	2	4.0	6.0	3	0	2	1	1	1
	2	0	2.7	0	5.2	8.7	1	0	0	1	1	1
	2	0	2	2	4.0	6.0	3	2	2	1	1	1
合計								4	7	5	5	5



第1図 レーザー式生育センサーを用いたリモートセンシングの様子

から高さ3mとなるように設置し、進行方向に対して右側45度に設置した。センサーの照射範囲は草冠上2.5mの場合、約0.94m²であった。

水稻の地上部窒素蓄積量は、最高分げつ期(7月17日)、幼穂形成期(7月30日)、減数分裂期(8月13日)、および穂揃期(8月29日)において、追肥を行う直前に調査した(第2表)。各時期において、窒素施肥量が異なる3~5処理を対象として、各処理1~2反復で調査した。穂揃期は「穂あり区」と「穂除去区」のそれぞれを対象とした。まず、試験区内の1カ所にレーザーを照射してセンシングし、次いで照射範囲の中心付近にある稲株を9株抜き取った。これらの株は、根を取り除い

て80℃で72時間以上通風乾燥させ、乾物重を測定した。窒素含有率は、同試料を用いてNCアナライザー(SUMIGRAPH NC-22F、住化分析センター)による乾式燃焼法で測定した。地上部窒素蓄積量は、窒素含有率を地上部乾物重に乗じて求めた。

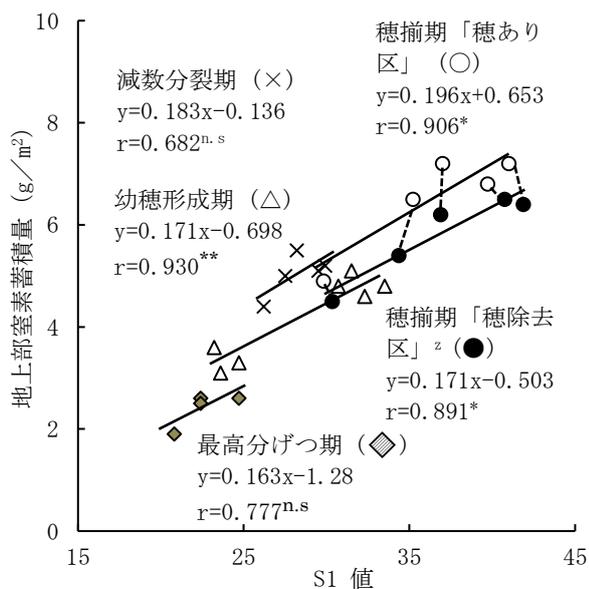
4 統計処理

データの統計処理は、統計ソフトRを用いた。回帰直線の切片および傾きの差は共分散分析で検定した。2変量の関係の指標として、ピアソンの積率相関係数を求めた。

結果

最高分げつ期、幼穂形成期、減数分裂期、穂揃期の各々のステージにおけるS1値とセンシング時の地上部窒素蓄積量の関係を第2図に示した。各生育ステージにおいて、S1値と窒素蓄積量の間には正の相関関係がみられ、生育ステージが進むにつれて回帰直線の切片は増加する傾向にあった。そこで、第2図のデータから穂揃期の穂除去区を除いて、共分散分析を行ったところ、生育ステージの効果が有意であった(第3表)。

次に、穂揃期において、センシングの前日に穂を除いた穂除去区は、穂あり区と比較して回帰直線の切片が低下する傾向にあった(第2図)。そこで、穂の有無の効を明らかにするため、穂揃期の穂除去区と穂あり区のデータを用いて共分散分析を行ったところ、穂の有無の効果



第2図 「山田錦」における生育ステージ別の S1 値と照射範囲にある稲体の地上部窒素蓄積量の関係

z 「穂除去区」は穂揃期に照射範囲の穂を除去した区
 点線でつないだ区は同一施肥条件で穂の有無が異なる式は
 各生育ステージの単回帰分析の結果
 相関係数の*は5%水準、**は1%水準で有意であり、n.sは
 有意でないことを示す

が有意であった(第4表)。つまり、穂を除去することで S1 と窒素蓄積量の回帰直線の切片は有意に低下した。穂揃期の穂除去区回帰直線の傾きと切片に近いのは、幼穂形成期の回帰直線であった。そこで、穂揃期の穂除去区と幼穂形成期のデータを用いて共分散分析を行ったところ、生育ステージの効果は有意ではなかった(第5表)。

穂の除去が S1 値に及ぼす影響を明らかにするため、穂揃期の穂あり区と穂除去区の S1 値を比較したところ、穂あり区と穂除去区では S1 値は変わらなかった。次に、穂揃期の穂あり区と穂除去区の窒素蓄積量を比較したところ、穂除去区では窒素蓄積量が低下する傾向にあった(第3図)。つまり、穂を除去することによって、S1 値は変化しなかったが、窒素蓄積量が低下する傾向にあった。

第3表 各生育ステージ(穂揃期の「穂除去区」を除く)における共分散分析の結果

モデル式	決定係数	説明変数	P 値
窒素蓄積量～S1値+生育ステージ+交互作用	0.947	S1値	<0.001
		生育ステージ	<0.001
		交互作用	0.969

第2図の最高分けつ期、幼穂形成期、減数分裂期、穂揃期「穂あり区」のデータを用いたモデル式において、～の左側は目的変数、右側は説明変数を示す
 交互作用は S1 値と生育ステージの交互作用を示す
 決定係数は自由度調整済み決定係数を示す

第4表 穂揃期の「穂除去区」と「穂あり区」における共分散分析の結果

モデル式	決定係数	説明変数	P 値
窒素蓄積量～S1値+穂の有無+交互作用	0.825	S1値	<0.01
		穂の有無	<0.05
		交互作用	0.692

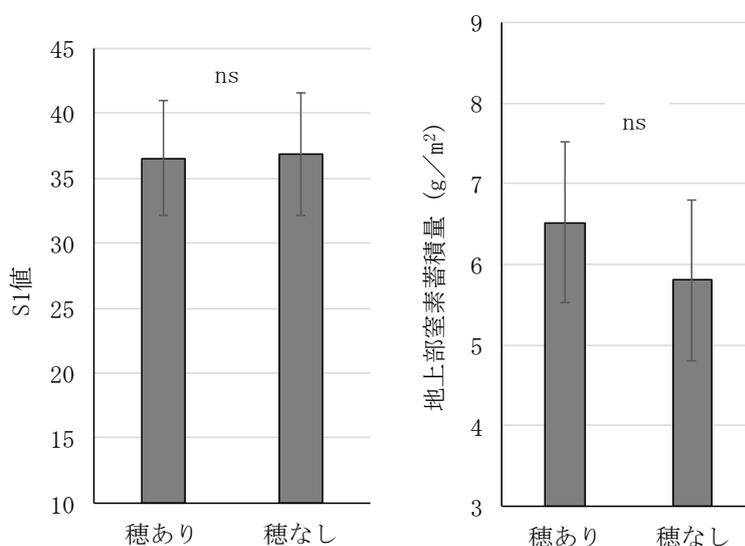
第2図の穂揃期の「穂除去区」と「穂あり区」のデータを用いたモデル式において、～の左側は目的変数、右側は説明変数を示す
 交互作用は S1 値と穂の有無の交互作用を示す
 決定係数は自由度調整済み決定係数を示す

近接リモートセンシングによる「山田錦」の窒素蓄積量の推定値が生育ステージによって異なる要因の解明

第5表 幼穂形成期と穂揃期「穂除去区」における共分散分析の結果

モデル式	決定係数	説明変数	P値
窒素蓄積量～S1値+生育ステージ+交互作用	0.825	S1値	<0.001
		生育ステージ	0.494
		交互作用	0.996

第2図の幼穂形成期と穂揃期「穂除去区」のデータを用いたモデル式において、～の左側は目的変数、右側は説明変数を示す
交互作用はS1値と生育ステージの交互作用を示す
決定係数は自由度調整済み決定係数を示す



第3図 「山田錦」における穂の有無が穂揃期のS1値と地上部窒素蓄積量に与える影響

考 察

本研究では、近接リモートセンシングにより得られるS1値と地上部窒素蓄積量の関係が、生育ステージによって異なる要因として、穂の有無に着目し、その影響を確認した。本研究においても、有吉ら(2021)と同様に、S1値と窒素蓄積量との間に正の相関関係がみられ、生育ステージが進むにつれて回帰直線の切片は増加した(第2図)。このことから、S1値と窒素蓄積量の関係は生育ステージで異なるといえる。

有吉ら(2021)が指摘した穂揃期の穂の反射率の違いを確認するため、穂揃期のセンシング前に穂を除去した穂除去区を設けた。穂除去区では、S1値に対する地上

部窒素蓄積量の回帰直線が穂あり区と有意に異なり、幼穂形成期の回帰直線に近くなることが示された(第2図)。深山(1986)によると、出穂期に籾が保有している窒素は、出穂期窒素保有量の約10%に相当する。本研究においても、穂を除去することで地上部窒素蓄積量が4～17%減少した(第3図)ことから、穂が窒素を蓄積していたと考えられる。一方、穂を除去した場合もS1値は変わらなかったことから、出穂後の穂の有無はS1値に影響を及ぼさないと考えられる。これらのことから、S1値に対する地上部窒素蓄積量の回帰直線が穂の有無で異なったのは、S1値に影響しない穂に窒素が蓄積されていることが理由として考えられる。

減数分裂期と幼穂形成期ではS1値に対する地上部

窒素蓄積量の回帰直線が異なった(第2図)が、ここでも穂の窒素蓄積が影響した可能性があると考えられる。本研究の減数分裂期調査は、出穂11~14日前にあたり、葉鞘内に幼穂が形成されていた。本研究では測定はしていないが、減数分裂期の幼穂には一定の窒素が蓄積されていたと推察される。しかし、葉鞘内の幼穂はレーザー光の反射に寄与しないことから、幼穂の有無はS1値に影響しないと考えられる。このことから、幼穂形成期から減数分裂期にかけて植物体地上部に窒素が蓄積したものの、S1値には影響せず、結果的に減数分裂期と幼穂形成期ではS1値に対する地上部窒素蓄積量の回帰直線が異なると考えられる。

これらのことから、S1値に対する地上部窒素蓄積量の回帰直線が生育ステージによって異なる理由として、S1値では検出できない穂に窒素が蓄積することが考えられる。実際、穂揃期において穂を除去した場合、回帰直線の切片と傾きは幼穂形成期の回帰直線のそれらと差がなくなった(第5表)。

以上のことから、「山田錦」のS1値と地上部窒素蓄積量の関係について、穂による影響が大きいことが明らかになった。ただし、本研究では植物体による相互遮蔽がS1値と地上部窒素蓄積量の関係に及ぼす影響は検証していない。穂揃期では、穂の陰になってレーザーが照射されない葉が影響する可能性がある。今後、これらの要因を明らかにすることで、「山田錦」における近接リモートセンシングによる地上部窒素蓄積量と適正穂肥量の予測精度をさらに高めることが可能になると考えられる。

摘 要

酒造好適米「山田錦」において、近接リモートセンシングにより近赤外光と赤色光の反射率から得られるS1値と地上部窒素蓄積量との関係が、生育ステージによって異なる要因について検討した。本研究では、穂揃期の穂の有無が前述の関係に及ぼす影響に着目して、調査、分析した。穂揃期に穂を除去した群落では、除去しなかった群落に比べて、S1値に大きな変動はなかったものの、地上部窒素蓄積量は減少する傾向にあった。このことから、穂の存在は、S1値と地上部窒素蓄積量との関係が生育ステージによって異なる要因の一つであると考えられる。

引用文献

- 安積大治・志賀弘行. 2003. 水稻成熟期の SPOT/HRV データによる米粒蛋白含有率の推定. 日本リモートセンシング学会誌. 23: 451-457.
- 有吉真知子・村田資治・中島勘太・金子和彦・前岡庸介・徳永哲夫・池尻明彦・中野邦夫・荒木英樹. 2021. 近接リモートセンシングによる「山田錦」の生育量と適正穂肥量の推定. 日作紀. 90: 64-71.
- 土壤環境分析法編集委員会. 1997. 第V章 土壤化学. 土壤環境分析法 編集委員会編, 土壤環境分析法. 博友社, 東京. 195-259.
- 深山政治. 1986. おいしい米と最適窒素保有量—水稻の品種特性と施肥. 生物と化学. 24: 470-474.
- 平井康丸・西本琢人・猿田恵輔・田中恒大・井上英二・岡安崇史・光岡宗司. 2014. 植物面積指数および葉緑素計値に基づく複数の水稻生育指標の推定法. システム農学. 30: 49-60.
- 井上吉雄・ギアシュディン ミア・境谷栄治・中野憲司・川村健介. 2008. ハイパースペクトル計測に基づく正規化分光放射指数 NDVI マップおよび波長選択型 PLS による植物・生態系変量の評価—米粒タンパク含有率・クロロフィル濃度・バイオマス評価を事例として—. 日本リモートセンシング学会誌. 28: 317-330.
- 金子和彦・羽嶋正恭. 2007. 酒造好適米新品種「西都の雫」の育成. 山口農試研報. 56: 1-8.
- 浪川茉莉・西田瑞彦・高橋智紀・金田吉弘. 2016. 携帯型 NDVI 測定機による NDVI 値と水稻窒素吸収量の関係. 土肥誌. 87: 450-454.
- 境谷栄二・井上吉雄. 2012. リモートセンシングによる玄米タンパク含有率の推定精度に影響する誤差要因. 日作紀. 81: 317-331.
- 境谷栄二. 2016. 青森県内における高品質米生産へのリモートセンシング技術の利用. 計測と制御. 55: 801-805.
- 鳥山和伸. 2009. 非破壊的手法による作物栄養診断の最前線 1. 水稻: リモートセンシングによる窒素栄養診断. 土肥誌. 80: 66-74.