

岐阜県飛騨地域における衛星画像を利用した 「コシヒカリ」の玄米タンパク質含有率の推定

可児友哉*

岐阜県中山間農業研究所 509-4244 飛騨市古川町

Prediction of protein content of brown rice of “Koshihikari” using satellite data in Hida area of Gifu Prefecture

Tomoya Kani

*Gifu prefectural Research Institute for Agricultural Technology in Hilly and Mountainous Areas,
Furukawa, Hida, Gifu 509-4244*

摘 要

近年、米の食味はブランド化に向けて重要な要素の1つとなっている。米の食味は玄米タンパク質含有率（以下、タンパク含有率）に影響を受ける。タンパク含有率は施肥方法によって改善が可能であるため、良食味米栽培に向けては、タンパク含有率を把握し、施肥改善を行うことが重要である。岐阜県飛騨地域（以下、当地域）では「コシヒカリ」のタンパク含有率を7%以下とすることを目標としており、産地全体で取り組みを行っている。そこで、当地域で広範囲に水田ごとのタンパク含有率を把握し、施肥改善につなげるため、人工衛星画像から「コシヒカリ」のタンパク含有率を推定する方法を検討した。その結果、人工衛星画像から取得した「コシヒカリ」の成熟期付近のGNDVIが0.40～0.65の範囲であれば、タンパク含有率が7%以下となる可能性が高いことを明らかにした。この結果を水稲圃場農業情報提供サービス「AgriLook（株式会社ビジョンテック、登録商標番号5547891号）」（以下、「AgriLook」）に搭載し、本システムを使用することで水田ごと施肥改善が可能となり、産地全体での良食味米栽培につながることが期待される。

キーワード：良食味米、施肥改善、成熟期、植生指数、AgriLook

緒 言

米のブランド化に向けては、食味が重要な要素の1つである。当地域で栽培される「コシヒカリ」は食味が良いことから評価が高く、今後も地域全体で食味の維持・向上の取り組みが必要である。

米の食味はタンパク含有率に大きな影響を受け、タンパク含有率が低いと食味が良いとされている（上野ら、2011）。タンパク含有率は栽培時の施肥窒素に大きな影響を受けるため（若松ら、2007）、施肥方法は良食味米生産においては欠かせない技術の一つである。そのため、各水田のタンパク含有率を把握し、それに応じて適切に施肥管理をする必要がある。当地域で

は「コシヒカリ」のタンパク含有率7%以下を目標としており、産地全体でこの目標に取り組むには、水田ごとのタンパク含有率を把握し、基準を超える場合は施肥改善を行う必要がある。

近年では、人工衛星画像（以下、衛星画像）を活用したリモートセンシングにより、植生指数のNDVI（Normalized Difference Vegetation Index）等を取得し、米の食味を推定する手法が検討されている。この手法は、稲の生育状態の評価が可能な植生指数を衛星画像から取得し、その植生指数とタンパク含有率の相関関係から間接的にタンパク含有率を推定している（境谷ら、2012）。そのため、タンパク含有率を推定する上で、植生指数との相関関係が非常に重要である。そのNDVI等の植生指数は、水田の稲

*Corresponding author. E-mail:kani-tomoya@pref.gifu.lg.jp

体の生育状態影響を受け、品種や地域が異なるとNDVI値と生育状態を示す窒素吸収量の相関関係が変化する可能性があり（今野ら、2021）、その地域に適した推定方法を作成することが望ましい。

そこで、当地域に適した人工衛星画像を利用した「コシヒカリ」のタンパク含有率推定方法について検討を行った。

材料および方法

調査方法

2020～2022 年にかけて岐阜県高山市、飛騨市内の「コシヒカリ」栽培ほ場を対象に調査を行った。生産者ほ場、岐阜県中山間農業研究所内ほ場（飛騨市古川町）において衛星画像から植生指数を取得するとともに、植生指数を取得したほ場のタンパク含有率を調査した。生産者ほ場の栽培方法は生産者慣行法とし、施肥は全量基肥肥料の場合は、窒素施用量 6kg/10a 程度、分施肥体系の場合は基肥窒素施用量 2～4kg/10a、穂肥 2～3.5kg/10a 程度である。所内調査ほ場においても概ね同等の施肥方法となっている。ただし、タンパク含有率が低い地点のデータを取得するため、穂肥を省略しているほ場も設定した。調査年、調査地点数、田植日等は表 1 に示したとおりである。調査地点は 1 ほ場内に 1～3 地点設定し、刈取りは 1 地点につき 10～60 株程度行った。タンパク含有率は、刈取ったサンプルの 1.8mm 篩上の玄米を使用し、静岡製機株式会社の BR-5000 で測定を行った。本研究で使用した衛星画像の分解能は 6～10m であり、植生指数はその単位メッシュで取得可能である。植生指数とタンパク含有率の比較のため、植生指数の取得地点はタンパク含有率調査の刈取り地点が含まれるメッシュの値を取得した。また、植生指数は、衛星の分解能によっては畦畔やほ場外の影響を受ける。これらの

影響をなくするため、調査地点はほ場中心付近、もしくは畦畔から離れた地点とした。

試験 1. タンパク含有率推定に適した植生指数

植生指数は、赤色波長（R）と近赤外波長（NIR）の反射率を利用した NDVI が広く利用されているが、タンパク含有率の推定には緑色波長（G）と近赤外波長（NIR）の反射率を利用した植生指数である GNDVIの方がより適していると報告がある（境谷ら、2012）。そこで、本研究では NDVI とともに、GNDVI を取得し、これらの比較からタンパク含有率推定に適した植生指数の検討を行った。それぞれの植生指数は次のように算出した。

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$$

$$GNDVI = (NIR - G) / (NIR + G)$$

また、衛星画像の撮影日については、成熟期の 8～10 日前の植生指数とタンパク含有率の相関関係が高かったとされている（安積ら、2003）ことから、当地域の「コシヒカリ」の成熟期は概ね 9 月中～下旬頃であることを踏まえ、成熟期の 10 日以内の 9 月初～中旬に撮影日を設定した。実際の撮影日は表 1 のとおり、9 月 15、16 日となり、今回設定した調査ほ場の中央値で成熟期の概ね 5 日前の撮影となった。調査地点数、田植日、成熟期等は表 1 に示した普通期のほ場で試験を行った。植生指数の取得は「AgriLook」で利用できる SPOT 衛星（Spot Image 社）により撮影された画像（分解能 6m）を利用し、緑（G）：527～587nm、赤（R）：624～694nm、近赤外（NIR）：756～880nm の波長帯の反射率から NDVI、GNDVI を算出した。

表1 衛星画像取得日、調査地点数、成熟期等

年度	地域	衛星画像 撮影日	普通期				晩植			
			調査地点		田植日	成熟期	調査地点		田植日	成熟期
			(月. 日)	調査地点	調査ほ場数	(月. 日)	(月. 日)	調査地点	調査ほ場数	(月. 日)
2020	高山市	9. 15	18地点	6ほ場	5. 22-5. 28	9. 18	-	-	-	-
	飛騨市		12地点	5ほ場	5. 17-6. 07	9. 16-9. 19	4地点	2ほ場	6. 10	9. 27
2021	高山市	9. 16	38地点	16ほ場	5. 20-6. 01	9. 20-9. 26	6地点	2ほ場	-	-
	飛騨市		9地点	3ほ場	5. 17-5. 22	9. 16-9. 23	8地点	3ほ場	6. 07-6. 11	9. 27-9. 28
2022	飛騨市	9. 16	7地点	5ほ場	5. 16-5. 18	9. 11-9. 14	-	-	-	-

試験2. タンパク含有率推定に適した植生指数の取得時期

NDVI等の植生指数は、出穂後～成熟期にかけて葉色等の稲体の状態が変化することでその値も変化していく。そのため、撮影日が異なると稲の生育状態が変化し、植生指数の値が変わるため、タンパク含有率との相関関係が変化する。例えば、撮影日から成熟期までの日数が長くなるにつれてNDVIとタンパク含有率の相関が低くなることが報告されており（安積ら、2003）、植生指数の取得時期はタンパク含有率推定において重要である。そこで、試験2の撮影日は試験1と同日として、成熟期の10日以上前の植生指数を取得できるよう移植時期が遅い場合（6月10日頃移植）を設定した。実際の撮影は成熟期11～12日前となった。調査地点は表1の晩植のほ場である。植生指数の取得は、試験1と同様にSPOT衛星により撮影された画像を用い、NDVI、GNDVIを算出した。

試験3. 植生指数を取得する衛星の違いの影響

NDVI等の植生指数は、様々な衛星画像より取得可能である。試験1、2ではSPOT衛星より撮影された画像を利用してきたが、衛星に搭載されているセンサーによって利用できる波長帯が異なり、取得する植生指数の値がやや異なる可能性がある。そこで、水稻圃場農業情報提供サービス「AgriLook」で利用可能なSPOT衛星とSentinel-2衛星（欧州宇宙機関）の2つの衛星画像より取得したGNDVIの値の比較を行った。比較は撮影時期が近かった2022年9月16日にSPOT衛星より取得したGNDVI、2022年9月12日にSentinel-2衛星より取得できた同一地点（5地点）のGNDVI値を利用した。Sentinel-2衛星

の分解能は10m、取得可能な中心波長帯は、緑（G）：560nm、近赤外（NIR）：842nmである。

結果および考察

試験1. タンパク含有率推定に適した植生指数

NDVI、GNDVIとタンパク含有率の相関関係は、同様な傾向がみられたが、緑色波長を利用したGNDVIのほうがタンパク含有率との相関関係がやや強かった。また、安積ら（2003）の報告と同様に、植生指数が高くなるにつれタンパク含有率も高くなる傾向であった一方で、NDVI、GNDVIが0.50～0.55より低くなると、逆にタンパク含有率は高くなる負の相関関係が見られた（図1、2）。NDVIは草丈、茎数、葉色等の稲体の状態に影響を受け、生育旺盛で、窒素吸収量が多い程、その値は高くなる（岡田ら、2022）。本研究でもNDVI、GNDVIが0.50～0.55以上の場合は、草丈、茎数、葉色値が大きく、稲体の窒素吸収量が多くなるにつれ、タンパク含有率も高くなり、安積ら（2003）の報告と同様に正の相関関係になったと考えられた。しかし、NDVI、GNDVIが0.50～0.55より低い場合は、草丈、茎数が少なく、籾数も少なかったため、小さいシンク（籾数）に対して追肥や生育後半の地力窒素が影響したことで、タンパク含有率が増加したものと考えられた。以上のことを踏まえ、NDVI、GNDVIとタンパク含有率の相関は同じような傾向を示したが、タンパク含有率推定にはより相関が強かったGNDVIを利用することが適していると考えられた。

次にGNDVIとタンパク含有率の相関関係に影響を与え、タンパク含有率推定の誤差になりえる要因について検討を行った。穂いもち、ごま葉

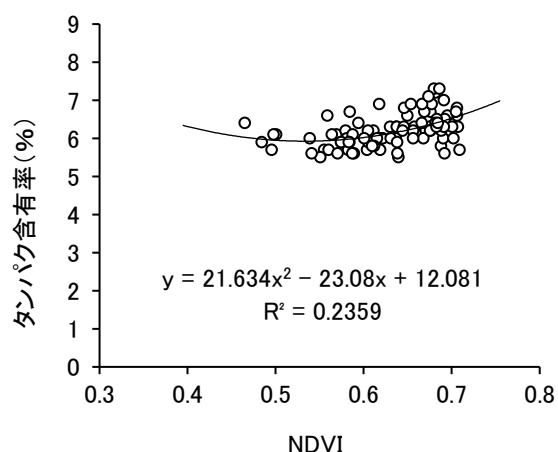


図1 タンパク含有率とNDVIの関係
(2020～2022年)

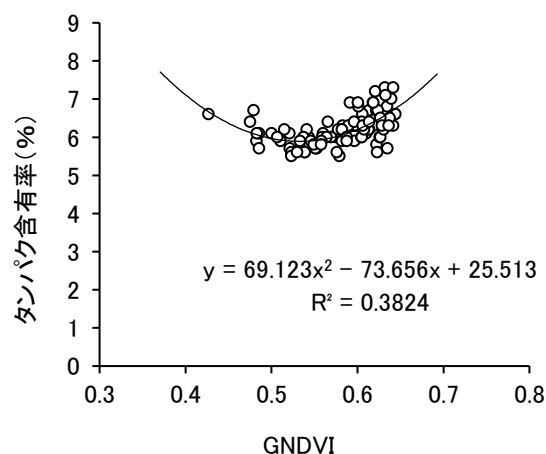


図2 タンパク含有率とGNDVIの関係
(2020～2022年)

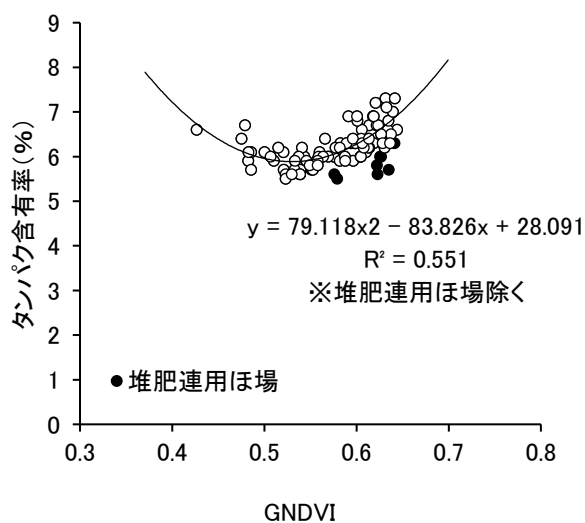


図3 タンパク含有率とGNDVIの関係
(2020～2022年)

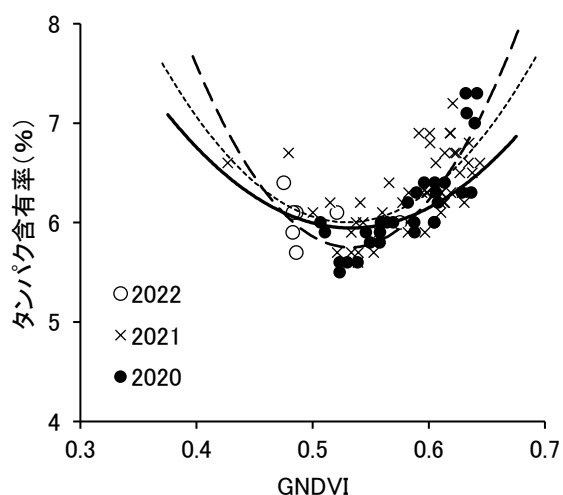


図4 タンパク含有率とGNDVIの関係(年別)

——— 2022年 $y = 45.651x^2 - 48.691x + 18.929$
 $R^2 = 0.044$
 - - - - - 2021年 $y = 63.038x^2 - 66.79x + 23.695$
 $R^2 = 0.408$
 - . - . - 2020年 $y = 104.4x^2 - 111.17x + 35.345$
 $R^2 = 0.753$

枯病の発生で葉色等が変化し、特定波長域の反射率に影響し、植生指数に影響が出ること（小林ら. 2005、松本ら. 2019）、穂いもちの発生で生理的プロセス（米粒の発育阻害）に影響が生じ、精米中の窒素含量が増加すること（小泉ら. 1993）、また、倒伏も植生指数の測定に影響を与えることが考えられ、これらはタンパク含有率

推定に誤差を生じさせると考えられる。その他の要因では、ほ場間の地力差による影響で植生指数とタンパク含有率の相関関係が変化する可能性が報告されている（金ら. 2008）。本研究においては病害、倒伏が発生したほ場での調査は行っておらず、病害、倒伏の影響がないほ場での結果となっている。また、地力が与える影響については、図3に堆肥を連用しているほ場とその他のほ場の調査結果を分けた相関関係を示した。H30～R4年に行われた飛騨地域水田の地力窒素の調査では、この堆肥連用ほ場では実際に地力がかなり高かった（可児ら. 2024）。そのため、前述の報告と同様に他のほ場とタンパク含有率の相関関係が異なっていたと考えられた。出穂後15日以降の追肥は玄米中窒素増加量へ与える影響が小さいことが報告されており（澤田ら. 2014）、この時期以降は追肥や地力がタンパク含有率へ与える影響は小さいと考えられる。そのため、今回の堆肥連用ほ場では、タンパク含有率決定後にも地力の効果で葉色が高く推移したと考えられ、タンパク含有率が同程度の場合でも堆肥連用ほ場ではGNDVIが高くなったと考えられる。これらのことから、堆肥施用等で地力が特に高いほ場についてはタンパク含有率の推定誤差につながる可能性があると考えられた。

図4に年別の相関関係を示した。GNDVIとタンパク含有率の回帰式は、衛星撮影日、撮影条件や衛星撮影日から成熟期までの日数等の条件が撮影の都度異なるため、回帰式には年次変動が見られ、タンパク含有率推定のためには、都度回帰式を作成することが好ましいとされている（安積ら. 2003）。本研究においても、年度により回帰式が異なっていた。そのため、毎年同一の回帰式で正確なタンパク含有率を推定することは難しいと考えられたが、本研究の相関関係から、当地域の目標値であるタンパク含有率7%以下のためには成熟期付近のGNDVIの目標値を0.40～0.65程度とし、GNDVIが0.40～0.65の範囲から外れているほ場について、施肥改善に取り組むことで、産地全体の良食味生産につながることを期待できると考えられた。ただし、GNDVIが0.50～0.55程度以下の場合は、タンパク含有率が高まったことから、シンクが小さく、収量が少ない可能性がある。そのため、収量を加味したGNDVIについては検討の余地がある。

試験2. タンパク含有率推定に適した植生指数の取得時期

タンパク含有率推定に適した植生指数の取得時

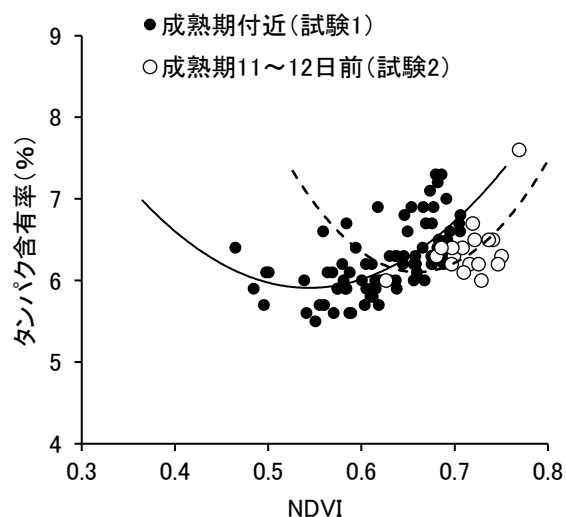


図5 タンパク含有率とNDVIの関係(時期別)

—— 成熟期付近(試験1)
 $y = 33.482x^2 - 36.425x + 15.817$
 $R^2 = 0.4133$

---- 成熟期11～12日前(試験2)
 $y = 69.43x^2 - 91.614x + 36.324$
 $R^2 = 0.3636$

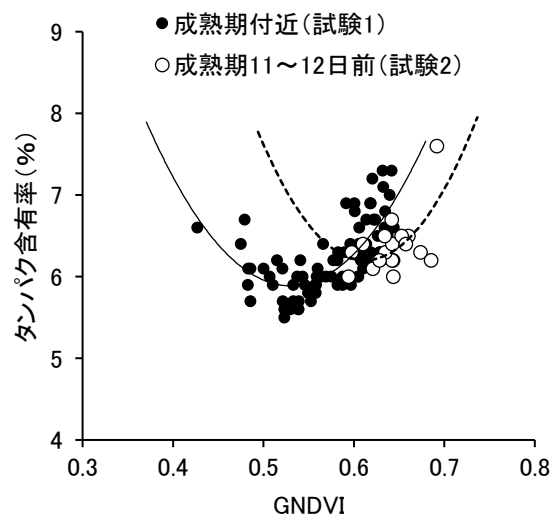


図6 タンパク含有率とGNDVIの関係(時期別)

—— 成熟期付近(試験1)
 $y = 79.118x^2 - 83.826x + 28.091$
 $R^2 = 0.551$

---- 成熟期11～12日前(試験2)
 $y = 112.9x^2 - 138.21x + 48.498$
 $R^2 = 0.3396$

期の検討のため、撮影日は試験1と同日であるが、移植時期の遅い場合を設定したことで、成熟期の11～12日前のNDVI、GNDVIを取得できた。それらと試験1（中央値で成熟期5日前撮影）の調査結果との比較を行った結果、成熟期付近の撮影の方が植生指数とタンパク含有率の相関関係は強く（図5、6）、成熟期付近の植生指数でタンパク含有率推定を行うほうが好ましいと考えられた。また、成熟期11～12日前のNDVIとGNDVIの比較では、タンパク含有率との相関関係に大差は見られなかった（図5、6）。緑色波長のほうが生育ステージの影響が緩和される（境谷ら、2012）ことが報告されており、生育ステージが早い段階ではGNDVIの利用が有用と思われたが、本研究ではNDVIとGNDVIで同程度の相関関係であった。当地域の目標のタンパク含有率7%以下のためには、試験1での成熟期付近のGNDVIは0.40～0.65程度が適当であったが、成熟期11～12日前のGNDVIを利用する場合は0.45～0.70程度におさめる必要があると考えられた。これは撮影時期が早いと葉色が落ちておらず、同一のタンパク含有率でもGNDVIが高く出る傾向にあるためと考えられた。

これらのことから、高い精度でタンパク含有率推定するためには成熟期の概ね5日前付近に撮影

した画像からGNDVIを取得することが好ましい。しかし、天候等でその時期にGNDVIを取得出来なかった場合は、精度は劣るが成熟期の10日前付近の画像からGNDVIを取得し、その際の目標値を0.45～0.70程度として利用する。

試験3. 植生指数を取得する衛星の違いの影響

SPOT衛星とSentinel-2衛星から取得した同一場所のGNDVI値を比較した。取得した衛星画像はSPOTで9月16日、Sentinel-2で9月12日と4日間の違いがあるもののそれぞれの値はおおむね同等であった（表2）。このことから、人工衛星によっては、取得できる波長帯が異なるため、GNDVIの値に影響が出る可能性があるが、

表2 GNDVI値の比較

調査地点	SPOT	Sentinel-2
1	0.475	0.474
2	0.486	0.440
3	0.483	0.450
4	0.524	0.546
5	0.515	0.546

「AgriLook」で利用可能な SPOT 衛星と Sentinel-2 衛星の場合は、概ね同等の値を取得でき、タンパク含有率推定にそれほど大きな影響を与えないと考えられた。

以上のことから、本結果を活用し、衛星画像を利用したタンパク含有率推定を行うことで、水田ごとの施肥改善の目安とすることが可能と考えられた。また、本結果を水稲圃場農業情報提供サービス「AgriLook」に搭載することで、水田ごとにタンパク含有率管理が可能になり、産地全体での良食味「コシヒカリ」栽培につながることを期待される。

引用文献

- 安積大治・志田弘行. 2003. 水稲成熟期の SPOT/HRV データによる米粒蛋白含有率の推定. リモートセンシング学会誌 23 巻 5 号 p451-457.
- 可児友哉・和田 巽. 2025. 飛騨地域の「コシヒカリ」における地力窒素を考慮した適正窒素施肥. 岐阜県中山間農業研究所研究報告第 20 号.
- 金 宗煥・全 炳徳・杉山和一・佐藤吉昭・安井利昭・諸富保司. 2008. 低タンパク米区分集荷のためのオンサイト・リモートセンシング. システム農学 24 巻 4 号 p253～262.
- 小林 隆・神田英司・笹原剛志・石川志保・畑谷みどり・石黒 潔・菅野洋光・鳥越洋一. 2005. 穂いもち被害度と正規化植生指数（NDVI）の関係. 日植病報 71:326-329.
- 小泉信三・藤 晋一. 1993. イネの収量と品質・食味に及ぼすいもち病の影響. 愛知県農業総合試験場研究報告 25 号 p45-50.
- 今野 周・齋藤 寛・松田 晃. 2021. 携帯型 NDVI 測定機を用いた水稲栄養生長期における窒素吸収量の推定. 東北農業研究：74 23 - 24.
- 松本憲悟・太田雄也・田中 貴・大西順平・大野鉄平・山川智大・堂本晶子・稲村達也. 2019. リモートセンシングにおいて留意すべきイネごま葉枯病発病程度と正規化植生指数（NDVI）および分光特性との関係. システム農学 35 巻 1 号 p1～10.
- 岡田佳菜子・倉内瑠也・影山新羅・志賀弘行. 2022. 携帯型センサーおよび衛星画像からの NDVI 値による直播水稲窒素吸収量の推定. 日本土壌肥料学会誌 93 巻 6 号 p375-

383.

- 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 巻 3 号 p317-331.
- 澤田富雄・小河拓也. 2014. 高温年における登熟期追肥が水稲の収量・品質に及ぼす影響. 日本作物学会講演会要旨集 237,6.
- 上野直也・石井利幸・花形敏男. 2011. 玄米タンパク質含有率が食味官能評価に与える影響. 日本作物学会関東支部会報 26:46-47.
- 若松謙一・田中明男・上 藺一郎・佐々木修・下西 恵. 2007. 暖地水稲における窒素施肥量が背白米の発生に及ぼす影響. 日本作物学会九州支部会報 73：1-4.