

携帯型可視・近赤外分光光度計を用いた裸麦‘ハルヒメボシ’ の硝子率の非破壊測定

伊藤史朗 永井佐采 黒瀬咲弥 大森誉紀

Non-destructive measurement of steely grain rate on the naked barley ‘Haruhimeboshi’ harvest grain using portable visible / near-infrared spectrophotometer

ITOU Fumiaki, NAGAI Saaya, KUROSE Sakuya and OOMORI Takanori

要 旨

裸麦粒の硝子率を携帯型装置で非破壊測定することを目指し、可視・近赤外分光光度計を用いて有効波長および測定精度について検討した。品種は‘ハルヒメボシ’を用い、各検体に対して拡散反射方式による非破壊測定を行った。500～1010nmにおける吸光度から多変量解析によって硝子率(%)を目的変数とする検量線を作成した。834nmと892nmを説明変数とする検量線の相関係数(r)は0.976、予測標準誤差(SEP)は4.080、残差平均(Bias)は0.960となり、良好な測定精度が得られた。

キーワード：近赤外分光，最適波長

1. 緒言

愛媛県における裸麦の2022年産収穫量は4,340tであり、36年連続全国1位となっている(農林水産省, 2022)。国内の裸麦の生産にあたっては経営所得安定対策に基づく生産者への交付金があり、その交付金額は品質毎に設定された基準値の達成如何によって変動する。ここでの品質を具体的に述べると容積重、細麦率、白度および硝子率の4項目があり、中でも硝子率の基準値は50%とされている。硝子率の高まりは搗精時間や精麦白度に負の影響を与えることからその低減が求められている(水上・小林, 1993; 関ら, 2015)。井上・奥村(2017)は硝子質粒の発生に関する検討を加えており、登熟前半の遮光が影響すると報告し、天候による変動を示唆している。そのため、毎年、生産圃場の硝子率を確認しておくことは重要と思われる。

硝子率の測定法は複数存在する。麦粒外観を目視で確認する方法は最も簡便かつ安価な方法であるが、同一試料であっても測定者の違いによってその測定結果に差異が発生する可能性があり、再現性の点で疑問が残る。よって、測定者はある一定期間の訓練実施のほか、心理

状態および体調管理の点で再現性の確保が必要とされている(倉内・杉本, 2004)。この目視法における課題を考慮し開発されたのが硝子率判定器(ケット製RN-840)の利用となる。この方法は麦粒の切断面を画像解析によって粉状質粒、半硝子質粒および硝子質粒の3群に大別しながら硝子率を算出する(株式会社ケット科学研究所, 2006)。目視法に比べて再現性は高いが、関連部品の製造終了等を理由に現在のところ販売終了となり入手できないため、代替機器による測定が必要とされ、携帯性も考慮したい。硝子率判定器の代替機器が望まれている状況において、関ら(2015)は近赤外分光分析器を用いる非破壊測定法の精度を検討し、実測値と非破壊測定値の相関は高かったことからその有用性を示唆した。ただし、本調査は255品種・系統の混合サンプルの測定結果であるため、生産圃場毎の硝子率を把握するためには品種別の測定精度を求めたい。また、関ら(2015)が検討した波長領域は850～1048nmであり、近赤外領域に相当する。これまでに硝子率と白度において相関がみられること(久保田ら, 1991; 山口ら, 2015)、デジタルカメラを用いた可視画像から硝子率を推定している報告(畠山ら, 2023)があり、可視領域の波長を加えた上で硝

子率を推定する必要性はあるものの、その検討事例はみられない。

以上のことを踏まえ、生産地でデータ蓄積を図るため、裸麦の硝子率の非破壊測定を目指し試験を行った。具体的には、県内で生産される品種‘ハルヒメボシ’を供試し、携帯型可視・近赤外分光光度計を用いて非破壊測定を行い、可視・近赤外領域の中から硝子率に有効な波長を特定するとともにその測定精度について明らかにしたので報告する。

2. 材料および方法

2.1 可視・近赤外分光光度計を用いた裸麦硝子率の非破壊測定

検体は愛媛県農林水産研究所で2018年5月に収穫された品種‘ハルヒメボシ’（高橋ら，2014）とし、試験に供試するまで5℃で保管した。検体を供試する際は麦粒が機器測定部と直接接触することで汚れるのを防止するため、ポリスチレン製の細胞培養ディッシュ（CORNING製353802，直径60mm，高さ15mm）を用いながら検体を取り扱った。供試量は1検体あたり20.0gとし、その供試数は検量線の作成用と評価用にそれぞれ50個体用意した。

検量線の説明変数となる非破壊測定値を取得するにあたっては、可視・近赤外分光光度計（クボタ製K-BA100）を用いた。なお、本機種はハロゲン光源（20W）を装備し、検体に対して直径38mmの円状に可視・近赤外光が照射され、検体の拡散反射光が測定部中央にある直径5mmのセンサーで受光される。測定できる波長領域は500～1010nm、波長間隔は2nm、1回の測定で256波長に対応した吸光度を取得できるため適用した。

非破壊測定後の検体は硝子率判定器（ケット製RN-840）により硝子率（%）を測定した。測定回数は1検体につき2回とし、その平均値を算出し検量線の目的変数とした。加えて、検体である裸麦の麦粒には水分が含まれることを考慮し、蒸留水の非破壊測定値も取得した。その方法は0，5，10，15，20および25ml容量の蒸留水を細胞培養ディッシュに添加し、裸麦の検体と同方法で非破壊測定を行った。その後、裸麦検体に含まれる水分率を把握するため、検

量線作成用および評価用の検体群の水分率（%）を米麦水分計（ケット製PB-1D2）によりそれぞれ測定した。

検量線は説明変数となる256波長の非破壊測定値の中から最適な波長を選択後、重回帰式により作成した。波長選択にあたっては変数増減法を用いた（滝沢ら，2012；伊藤，2022）。また、検量線の測定精度を確認するため、相関係数（ r ）、予測標準誤差（SEP）と残差平均（Bias）を求めた。なお、取得したデータの多変量解析にあたっては本機に付属されたサポートソフト（K-Support）、検量線の作成と評価にあたっては表計算ソフトMicrosoft Excelをそれぞれ使用した。

3. 結果および考察

3.1 可視・近赤外分光光度計を用いる裸麦硝子率の非破壊測定

検量線作成用の裸麦および蒸留水の各検体から取得した吸光度スペクトルを図1，2に示す。まず、裸麦検体の吸光度スペクトルにおいて830～960nm、蒸留水検体では520～950nmの領域にそれぞれ負の吸光度が観測された。これは分光器の感度が高いことから減光しながらリファレンスを測定したことによる影響（伊藤ら，2012）と推察された。次に、裸麦検体の吸光度スペクトルをみると、530nm，920nmおよび980nmにピークが確認された。530nmにみられた一番大きなピークは可視領域であることから色調由来と推察される。また、980nmのピークは蒸留水検体の吸光度スペクトルにおいても同様に確認でき、そのピーク高は蒸留水の添加量の増加に伴って上昇する傾向がみられたことから水分由来と推察される。裸麦検体における920nmのピークは先ほどの水分由来ピークの立ち上がりに相当し、980nmと同様に水分由来の情報を含む可能性がある（伊藤ら，2020）。加えて、裸麦検体においては530nm近傍の吸光度が高いと800～1000nmの吸光度は低く、反対に530nmの吸光度が低いと800～1000nmの吸光度は高くなる検体が複数確認された。そこで、可視・近赤外領域のうちどの波長域が硝子率測定に最も有効かを確認する必要があるため、最適波長選択時にはその測定精度を算出しながら検討を進めることとした。

裸麦検体の水分率を測定した結果を表1に示すと、平均値は12.3～12.6%、最小値は11.2～11.9%、最大値は13.4～13.8%、標準偏差は0.3～0.9%、変動係数は0.0～0.1となり、総じて検体間における水分率の差異は小さかった。

表1 供試検体の水分率 (%)

項目	検量線 作成用 検体	検量線 評価用 検体
平均	12.6	12.3
最大値	13.4	13.8
最小値	11.9	11.2
標準偏差	0.3	0.9
変動係数	0.0	0.1

米麦水分計(ケット製PB-1D2)による
検体数は作成用、評価用ともに50点
変動係数は無名数

しかし、裸麦検体の吸光度スペクトル(図1)のうち水分由来の980nmのピークをみると、水分率の差異以上に大きな違いが観測された。また、この現象は蒸留水の検体(図2)においても同様に確認され、特に可視領域のベースラインにおいて一致していないことが確認された。

しかし、裸麦検体の吸光度スペクトル(図1)のうち水分由来の980nmのピークをみると、水分率の差異以上に大きな違いが観測された。ま

た、この現象は蒸留水の検体(図2)においても同様に確認され、特に可視領域のベースラインにおいて一致していないことが確認された。このため、裸麦から取得した吸光度スペクトルは水分の多少を観測できているが、そのピーク高はベースラインの変動によって影響を受けている可能性があり補正を行う必要がある。

ベースラインの変動による影響を低減させるため、吸光度スペクトルに対して Savitzky - Golay 法による 25pt での移動平均と 2 次までの微分処理(岩元, 1980; 北村ら, 1985)を実施し新たに微分スペクトルを得た(図3)。その結果、吸光度スペクトルに比べると微分スペクトルは 500～524nm や 986～1010nm の領域を除いて重なる領域が多くみられたことから、微分処理によりベースラインの変動による影響を小さくできた。

さらに、微分スペクトルを詳細に検討すると 700nm よりも短波長領域ではスペクトルに微動が複数存在することを確認できた(図4-1)。しかし、700nm よりも長波長領域ではスペクトルの微動は観察されず、その形状は滑らかであった(図4-2)。加えて、この裸麦検体において確認された微動は蒸留水の検体においては観察されなかった(図2)。このため、スペクトルの微動は水分や組織培養ディッシュに起因するものではなく裸麦由来と判断した。

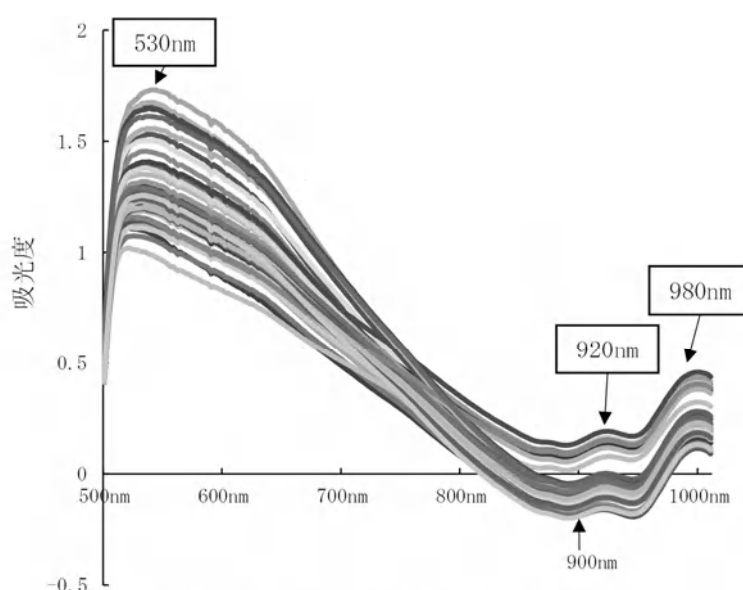


図1 裸麦‘ハルヒメボシ(原麦)’の吸光度スペクトル
n=50 測定環境: 20°C

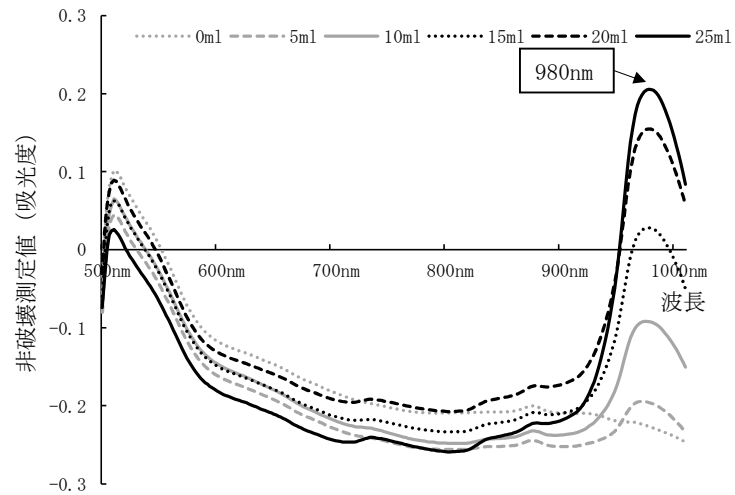


図2 添加量が異なる蒸留水の吸光度スペクトル
測定環境：20.2℃

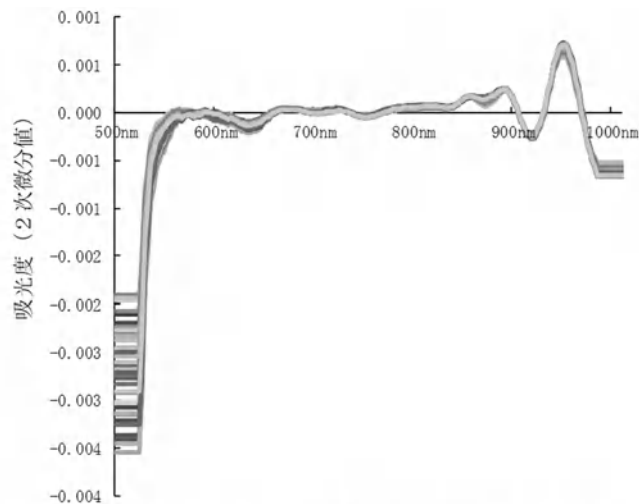


図3 裸麦‘ハルヒメボシ（原麦）’の2次微分スペクトル
n=50 測定環境：20℃

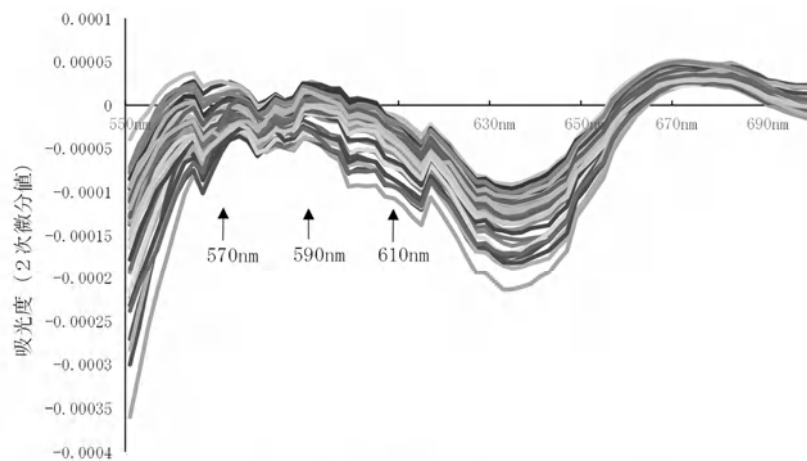


図4-1 裸麦‘ハルヒメボシ（原麦）’の2次微分スペクトル
n=50 測定環境：20℃

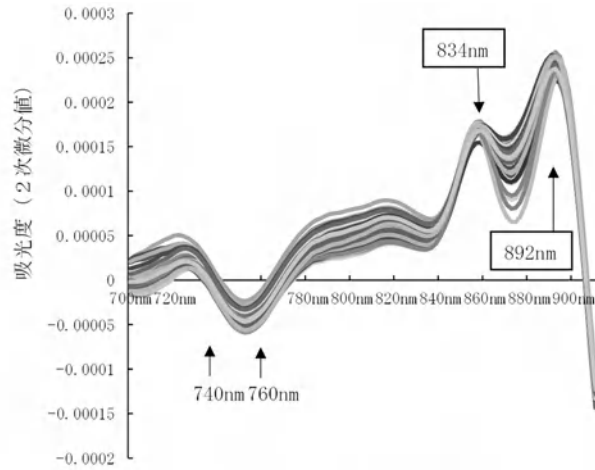


図4-2 裸麦‘ハルヒメボシ（原麦）’の2次微分スペクトル
n=50 測定環境：20℃

表2 変数増減法による最適波長の検討結果

最適波長	検体数	相関係数	係数	p値
834nm	50	0.906	1876063.616	1.937E-24
892nm	50	0.03	-742084.382	1.249E-06
切片			144.424	6.071E-05
834及び892nm	50	0.949	-	8.466E-26

検討波長領域：700～1010nm

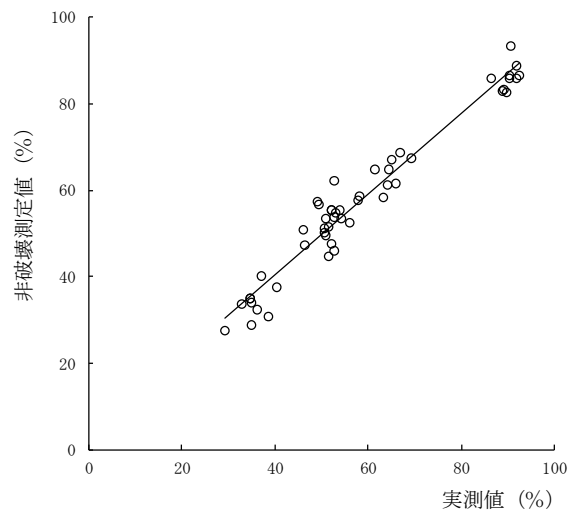


図5 裸麦²硝子率の実測値と非破壊測定値の関係

² 品種は‘ハルヒメボシ（原麦）’ 検体数(n)=50
相関係数(r)=0.976*** 予測標準誤差(SEP)=4.080
残差平均(Bias)=0.960

一方、一般的にノイズを含むスペクトルデータから検量線を作成した場合、その推定精度は低くなる可能性があるため(岩元, 1980)、ノイズの消去あるいはノイズが顕著にみられる波長域は検量線に使用しないことが望ましいため、500~698nmの領域は検討の対象外とした。

700nmよりも長波長領域にある156波長の中から硝子率の推定に有効な波長について変数増減法により検討した結果、選択された波長は834nmおよび892nmの2波長であった。波長選択の基準に用いたp値をみると834nmの方が明らかに小さく、また、硝子率との相関係数をみると0.906と大きかったことから、この波長が裸麦硝子率推定に大きな役割を果たす主波長とみられた。一方、892nmのp値をみると有意ではあるが、硝子率との相関係数(r)をみると0.030でありその相関は低く、この波長単体では硝子率の推定に効果が低かった。しかしながら、この波長を834nmとともに利用すると相関係数(r)が0.906から0.949まで上昇することが確認され、892nmは834nmを補正する効果がある波長であった(表2, 図5)。選択した2波長を説明変数として加えながら重回帰式による検量線(以下)を作成したところ、

$$\text{裸麦の硝子率 (\%)} = 144.424 + 1876063.616 \times d^2A_{834\text{nm}} - 742084.382 \times d^2A_{892\text{nm}}$$

$d^2A_{\text{〇nm}}$: 各波長における2次微分値を示す

となり、検量線の測定精度を検討した結果、検量線評価用の50検体に対する相関係数(r)、予測標準誤差(SEP)および残差平均(Bias)はそれぞれ0.976, 4.080および0.960であった(図5)。834nmと892nmが最適波長として選択され、前者が主波長、後者が補正波長と推察されたため、この2波長を用いて検量線を作成し、その測定精度を確認したところ総じて良好であり当初の目的を達成することができた。

今回調査対象とした品種‘ハルヒメボシ’の硝子率は‘イチバンボシ’や‘マンネンボシ’と比べると低いとされている(高橋ら, 2014)。ただし、近年の裸麦生産者は大規模化の傾向にあり、高性能化かつ高速化の農業用機械を所有していない場合、天候や作業上の段取りから適期収穫が行えないこともあり得る(大森ら,

2020)。実際に県内産地の‘ハルヒメボシ’の硝子率を圃場毎に調査すると基準値を超える場合が確認され(伊藤ら, 2023未発表)看過できない状況にある。

また、供試機器については重量が約5kgであり持ち運びが可能であり、裸麦産地に持参することで毎年収穫された裸麦の硝子率を簡便に確認できる手法の確立に適用可能と判断する。

引用文献

- 畠山友翔, 原口晃輔, 松井茉奈, 荒木卓哉 (2023): 原麦透過率を利用したハダカムギにおける非破壊硝子率判定法の検討, 日作紀, 92 (3), 220 - 229.
- 井上健一, 奥村華子 (2017): 大麦の硝子質粒発生に及ぼす要因について II. 登熟前半の遮光の影響, 北陸作物学会報, 52, 52 - 54.
- 伊藤史朗, 森本進, 服部玄, 伊藤秀和 (2012): 可視・近赤外分光法を用いるブラッドオレンジ果肉における紫色の着色程度の非破壊計測の可能性, 照明学会誌, 96 (11), 747 - 751.
- 伊藤史朗, 大内優一郎, 越智洋之 (2020): 可視・近赤外分光法を用いるブラッドオレンジ‘タロッコ’粒化症果における果皮厚および果肉歩合の非破壊計測, 愛媛農水研報, 12, 15 - 421.
- 伊藤史朗 (2022): 各種フィルム個装したブラッドオレンジ‘タロッコ’における可視・近赤外分光法によるアントシアニン含量の非破壊計測, 愛媛農水研報, 14, 9 - 16.
- 伊藤史朗, 菊地琢磨, 山口耕司, 二神種紀, 大森誉紀 (2023): ハダカムギの硝子率における実態調査と変動要因, 日本育種学会四国談話会講演要旨集, (投稿中).
- 岩元陸夫 (1980): 近赤外分光法による食品成分の非破壊測定, 日食工誌, 27 (9), 464 - 472.
- 株式会社ケット科学研究所 (2006): 硝子率判定器 RN - 840 取扱説明書, 1 - 23.
- 北村桂介, 森田栄次, 穂積啓一郎 (1985): パーソナルコンピュータを用いた Savitzky - Golay 法による紫外・可視吸光スペクトルの二次微分スペクトル, 薬学雑, 105 (2), 161 - 165.
- 久保田基成, 桑原達雄, 井ノ口明義 (1991): 大

- 麦の精麦特性と千粒重，硝子率，タンパク質含量及びアミロース含量の関係，北陸作物学会誌，**26**，89 - 92.
- 倉内美奈，杉本雅俊（2004）：大麦の硝子質数量化への画像解析の適用，福井農試研報，**41**，65 - 70.
- 水上ゆかり，小林恭一（1993）：大麦の精麦加工適性と原麦の性状（硝子質割合，粒厚）との関係，北陸作物学会報，**28**，66 - 68.
- 農林水産省（2022）：作物統計（令和3年産麦類（子実用）の作付面積および収穫量
- 大森誉紀，辻田泉，秋山勉，黒瀬咲弥（2020）：アンケート調査，フィールド調査および土壌化学性分析からみた愛媛県産ハダカムギの多収阻害要因，愛媛農水研報，**12**，55 - 63.
- 関昌子，前島秀和，上原泰，桂順二，長谷川敦子，中村和弘，丸山泰弘，長嶺敬（2015）：近赤外分析によるオオムギ硝子率の予測，北陸作物学会報，**50**，46 - 48.
- 高橋飛鳥，吉岡藤治，柳沢貴司，長嶺敬，高山敏之，土井芳憲，松中仁，藤田雅也，土門英司，杉浦誠，伊藤昌光（2014）：硝子率が低く精麦品質が優れる早生・多収の裸麦新品種「ハルヒメボシ」の育成，近中四農研セ研報，**13**，107 - 126.
- 滝沢憲一，中野和弘，大橋慎太郎，知野秀次，松本辰也，山澤康秀，児島清秀（2012）：可視・近赤外分光法によるセイヨウナシ‘ル・レクチェ’の渋味果評価の可能性，新潟大農研報，**64**（2），179 - 186.
- 山口憲一，辻田泉，木村浩，水口聡，兼頭明宏，池田達哉，長嶺敬（2015）：ハダカムギ‘マンネンボシ’の硝子率に対する種子比重の寄与，日作紀，**84**（3），271 - 278.

Abstract

The purpose of this study was to non-destructively measure of steely grain rate on the naked barley harvest grain using a portable device. Applying the variety ‘Haruhimeboshi’, we elucidated the effective wavelength and measurement accuracy by non-destructive measurements were performed on each specimen using the diffuse reflection method. A calibration curve for steely grain rate was created by multivariate analysis from the absorbance value from 500 to 1010nm. The calibration curve using 834nm and 892nm as explanatory variables showed a correlation coefficient (r) of 0.976, a prediction standard error (SEP) of 4.080, and an average residual error (Bias) of 0.960, revealed that could be indicated good measurement accuracy.

Key Words : near infrared spectroscopy, most suitable wavelength