

画像解析技術と数理モデリングを活用した酒造用原料米の
原料処理工程および製麹工程の評価

2 0 2 6

高堂 泰輔

目次

	頁
序論	... 1
第1章	
畳み込みニューラルネットワークを用いた酒造好適米外観品位の自動判定システム	... 5
第2章	
酒造用原料米の水浸裂傷発生パターンの定量的評価と特性解析	... 21
第3章	
酒造好適米の白米構造と浸漬条件が水浸裂傷発生に及ぼす影響の定量的評価	... 34
第4章	
酒造好適米の水分拡散モデルの開発と検証	... 50
第5章	
画像解析による一般米麴の破精評価とグルコアミラーゼ活性の相関解析	... 67
第6章	
小規模製麴試験を用いた製麴条件の最適化研究	... 80
結論	... 95
謝辞	...106
公表済み文献	...107

序論

清酒醸造は日本の伝統的な酒類製造技術として 1000 年以上の歴史を持ち、その製造プロセスは原料処理、製麹、酒母、もろみ、上槽、ろ過、火入、貯蔵という複数の工程から構成される複雑なシステムである。この中でも原料処理工程と製麹工程は、醸造の基盤を形成し、後続する工程の成否を左右する極めて重要な位置を占めている。原料処理工程では、玄米から精米、洗米、浸漬、蒸きょうといった過程を経て蒸米を調製し、製麹工程ではこの蒸米に麹菌を培養することで、デンプンの糖化やタンパク質の分解に関わる多様な酵素を生産する。これらの工程が適切に制御されることで、清酒特有の香味や風味が形成され、最終製品の品質が決定される。

原料処理工程と製麹工程が最終製品の品質に及ぼす影響は多岐にわたる。原料処理における浸漬条件は吸水率を通じて蒸米の物性に影響し、それが麹菌の生育や酵素生産効率を決定する¹⁾。また、麹は後のもろみ工程におけるデンプンの糖化速度や発酵パターンを支配し、アルコール生成や香气成分の形成に直接関与する^{2,3)}。特に、グルコアミラーゼや α -アミラーゼのバランス、酸性カルボキシペプチダーゼの活性は、最終製品の香味の複雑さを決定づける重要な要素となる。

これらの工程は伝統的に杜氏や蔵人と呼ばれる熟練技術者の経験と勘に大きく依存してきた。浸漬状態の評価は「視覚」、製麹の進行状況は「視覚」、「触覚」、「味覚」、「嗅覚」といった感覚的な指標に基づいて判断されることが多く、これらの判断は長年の経験を通じて培われる暗黙知としての性質を持つ。このような経験則に基づく技術は、個人の技能に大きく依存するため、技術の伝承や標準化が困難であり、製品品質の一貫性や安定性を確保する上で課題となっている。

さらに、近年の日本社会における少子高齢化の進行は、酒造業界における技術者人口の減少を加速させ、伝統的な技術の継承を一層困難にしている。特に、地方の中小規模の酒蔵では、熟練技術者の高齢化と後継者不足が深刻な問題となっており、経験と勘に依存した製造技術の維持が次第に難しくなっている⁴⁾。このような状況下では、従来の暗黙知を形式知へと変換し、科学的な理解に基づいた客観的な評価、管理手法の確立が急務となっている。

一方で、近年のデジタル技術の急速な進展は、これらの課題を解決する新たな可能性を開きつつある。人工知能、特に深層学習技術の発展は、従来は人間の経験則に頼っていた画像認識や品質評価を自動化する道を切り開いている。また、計算機性能の向上と数理モデリング手法の発展により、浸漬過程における水分拡散⁵⁾や発酵工程におけるアルコール生成⁶⁾といった複雑な現象を理論的に記述し、予測することが可能になりつつある。センシング技術や IoT (Internet of Things) の進歩は、醸造工程の連続的なモニタリングと精密な制御を実現する基盤を提供している。

酒造用原料米は、酒造好適米と一般米に大別される。酒造好適米は、清酒醸造に特化して育種された米であり、一般米と比較して大粒で心白と呼ばれる白色不透明部を持つ、タンパク質含量が低い⁷⁾、吸水性が良好⁸⁾といった特徴を有している。これらの特性により、麴菌の生育と酵素生産が促進され⁹⁾、もろみ工程における溶解性も良好となる。一方、一般米は主に主食用として開発された品種であり、心白が存在せず胚乳組織が緻密、タンパク質含量が比較的高いといった特徴を持つ。しかし、一般米は酒造好適米と比較して安価であることから、原料コスト削減の観点から注目されているものの、製麴過程における麴菌の生育や酵素生産効率に課題があり、高品質な清酒製造には品種特性に応じた原料処理条件の最適化が求められる。

酒造好適米の最も特徴的な構造である心白は、胚乳中央部に形成される白色の不透明部分であり、デンプン粒子間に多くの空隙が存在する疎な構造を持つ。心白の形成機構については、酒造好適米が持つ遺伝的特性が主要因であり、特定の遺伝子型を持つ品種において心白形成能力が発現し¹⁰⁾、胚乳発達の過程で、遺伝的要因によりデンプン蓄積パターンが制御され、中心部のデンプン充填が不完全になることで、デンプン粒子間に空隙が生じる^{11, 12)}。この心白構造は、浸漬時の水分吸収を促進する¹³⁾とともに、蒸きょう後の麴菌の菌糸伸長（破精）を容易にし、酵素の生産と分泌を促進する重要な役割を果たす¹⁴⁾。しかし、心白の存在は白米の物理的強度を低下させ、浸漬工程における水浸裂傷の発生を促進することも知られており、これらの複雑な現象の科学的理解と定量的評価は、品質制御の観点から重要な課題となっている。

現在の酒造現場では、原料米の品質評価は主に熟練した検査員による目視判定に依存しており、整粒、未熟粒、被害粒、碎粒の分類や胴割れの検出などが行われているが、判定の客観性や再現性の確保に課題がある。また、浸漬工程では、杜氏の経験に基づいて浸漬時間や水温が決定されることが多く、品種特性や年次変動に応じた科学的な制御法は確立されていない。製麴工程においても、破精の進行状況は「視覚」、「触覚」、「味覚」、「嗅覚」といった感覚的な指標で評価されており、特に一般米を用いた場合の最適製麴条件については体系的な知見が不足している。

品質評価技術においては、デジタル技術の導入が進んでいる。画像解析技術の応用は、原料米の評価から製麴状態の観察に至るまで、多岐にわたる領域で展開されており、原料米の外観品位評価においては、カメラと画像情報処理アルゴリズムを組み合わせた自動判別技術が報告されている^{15, 16)}。また、製麴工程においては、デジタルマイクロスコープを用いた麴の破精状態の定量評価^{17, 18)}などの技術が開発されている。人工知能（AI）の活用も急速に拡大しており、特にニューラルネットワーク（NN）などのディープラーニング手法は、画像認識タスクにおいて人間の専門家に匹敵する、あるいはそれを凌駕する性能を示している¹⁹⁻²¹⁾。これらの技術を酒造分野に適用することで、従来の官能評価の客観化と、熟練技術者の判断基準の数値化が期待される。

さらに、数理モデリング手法の発展により、浸漬過程における水分拡散や水浸裂傷発生といった複雑な物理現象を定量的に記述し、予測することが可能になりつつある。これらのモデルを用いることで、品種特性や環境条件の違いが工程に与える影響を理論的に解明し、最適な処理条件を科学的に導出できると期待される。

このような背景から、本研究では画像解析技術と数理モデリングを統合的に活用し、酒造好適米の外観品位評価の自動化、水浸裂傷発生メカニズムの解明と予測モデルの構築、心白構造を考慮した水分拡散モデルの開発、および一般米を用いた製麴工程の最適化に取り組むことで、酒造用原料米の原料処理工程と製麴工程における科学的評価、制御システムを確立し、伝統的な酒造技術の高度化を目指すものである。

参考文献

- 1) 岡崎直人, 竹内啓修, 菅間誠之助：醸協, 74, (10), 683-686 (1979)
- 2) 池見元宏, 斎藤久一, 小泉武夫, 野白喜久雄：醸協, 80, (5), 355-357 (1985)
- 3) 布川弥太郎, 椎木敏, 岩野君夫, 斎藤和夫：醸協, 76, (5), 350-353 (1981)
- 4) 山田浩司, 金田憲一：筑波総研 調査時報, 48, 52-70 (2019)
- 5) 佐藤はるか, 田中史彦, 内野敏剛, ペレズジョナサン, 源川拓磨：農機誌, 73, (5), 313-320 (2011)
- 6) 菊地亮太：醸協, 114, (11), 707-713 (2019)
- 7) 木崎康造, 井上康裕, 岡崎直人, 小林信也：醸協, 86, (4), 293-298 (1991)
- 8) 水間智哉：醸協, 104, (5), 322-330 (2009)
- 9) 柳内敏靖, 福田潔, 長野知子, 中村智美, 宮崎紀子, 水間智哉, 清川良文, 若井芳則：醸協, 88, (12), 977-983 (1993)
- 10) Hashimoto Z., Mori N., Kawamura M., Ishii T., Yoshida S., Ikegami M., Takumi S., and Nakamura C. : *Theor. Appl. Genet.*, 109, (8), 1586-1596 (2004)
- 11) 長戸一雄, 江幡守衛：日作紀, 27, (1), 49-51 (1958)
- 12) 江幡守衛, 長戸一雄：日作紀, 29, (1), 93-96 (1960)
- 13) 長戸一雄, 江幡守衛：日作紀, 28, (1), 46-50 (1959)
- 14) 家村芳次, 藤田栄信：醸協, 77, (4), 260-264 (1982)
- 15) 細川明, 松久次雄：農機誌, 40, (2), 217-224 (1978)
- 16) 松久次雄, 細川明：農機誌, 42, (4), 515-520 (1981)
- 17) Ito K., Gomi K., Kariyama M., and Miyake T. : *J. Biosci. Bioeng.*, 124, (1), 62-70 (2017)
- 18) 松永恒司, 古川恵司, 原昌道：醸協, 97, (10), 721-726 (2002)
- 19) 斎藤健太, 樋口誠一, 和田健太郎, 横堀正敏：埼玉県産業技術総合センター研究報告, 20, 50-54 (2022)
- 20) 佐竹隆顕, 古谷立美, 下原融：農機誌, 54, (4), 67-75 (1992)

21) 入江彰一, 山本竜徳, 川崎勉, 森章, 狩山昌弘 : 醸協, 115, (11), 688 (2020)

第1章

畳み込みニューラルネットワークを用いた酒造好適米外観品位の 自動判定システム

緒言

酒造好適米の品質は、生育過程における土壌栄養、気象、病虫害、栽培管理等の影響を受け、最終生産物の特性を大きく左右する。玄米の品質評価においては、充実した玄米である整粒を基準とし、品質劣化の影響を受けた要因と外観形質に従って被害粒、死米、着色粒、未熟粒等に分類される。これらの混入割合及び水分や色度などの条件によって、醸造用玄米では特上から三等までの等級分類がなされる¹⁾。低品質粒の混入は、主食用米では食味の低下をもたらす²⁾のみならず、酒造用米では酒造工程において重大な影響をもたらす。具体的には、精米過程での胴割粒や碎米の発生増加³⁾、タンパク質、脂質、ビタミンなどの栄養成分変化による麹菌や酵母の生育への影響、さらには製成酒の着色や雑味成分の増大⁴⁾といった問題が報告されている。特に契約農家から直接玄米を入荷し、自社精米を実施する酒造メーカーにとって、高品質な原料米の安定的な確保は重要課題である。現状の外観品位判定は熟練した検査員による目視が基本であり、各企業や研究機関において検査技術の訓練や人員の確保が困難な状況にある。また、判定者による誤差の問題も存在する。これらの課題を解決するため、穀粒外観から得られる特徴を数値化し、定量的判断によって機械的かつ自動的に判定をおこなう手法の確立が望まれている。従来の玄米粒外観品位自動判別に関する研究では、透過光の光学特性を用いた手法が主流であった⁵⁻⁸⁾。しかし、これらの手法では玄米の持つ外観情報が光学特性という単一の情報に圧縮されてしまい、画像に現れる複合的な特徴を総合的に判断する人間の判断基準とは異なる問題があった。また、胚乳に心白等の疎密構造を持つ酒造好適米では、光学特性からの外観品位予測はより困難である。

近年、農作物の外観品位判断において人工知能（AI）の活用が進んでいる。キュウリの等級選別作業のサポート⁹⁾、ウメの熟度判定¹⁰⁾、洋梨の外観品位判断¹¹⁾への活用事例などが挙げられ、社会実装が可能な技術として研究が推進されている。これらで共通して活用される AI 技術は神経細胞の情報伝達メカニズムを模倣したニューラルネットワーク¹²⁾（Neural Network: NN）から派生した畳み込みニューラルネットワーク¹³⁾（Convolutional Neural Network: CNN）である。CNN は、事前学習によって決定されるパラメータに基づき、入力データの特徴を圧縮、抽出し、未学習データに対する分類予測や回帰分析を可能とする機械学習モデルである。その着想は、脳の視覚野に関する神経生理学的知見¹⁴⁾に基づいて考案されたネオコグニトロン¹⁵⁾に由来し、特徴抽出を担う単純型細胞に対応する畳み込み層と、位置のずれを許容する複雑型細胞に対応するプーリング層を交互に配置した階層構造を持つ。この構造により、NN と比較して少ないパラメータ数、サンプル数で高精度

な学習が可能となり、特に空間情報の利用が求められる画像認識問題において優れた成果を発揮する。

近年、水稻への CNN 活用事例として、衛星画像を用いた圃場分布の予測¹⁶⁾、植物体画像による病虫害診断¹⁷⁻¹⁸⁾、バイオマス推定¹⁹⁾、籾外観からの品種推定²⁰⁾が報告されている。しかし、酒造好適米の外観品位に CNN を適用した事例はない。そこで本章では、CNN の中でも深い層構造を持つ深層畳み込みニューラルネットワーク (Deep CNN) を用いて、酒造好適米の外観品位を評価するモデルの開発を試み、Deep CNN による画像認識モデルの構築と、その判断基準の可視化による妥当性検証について論じる。

材料と方法

原料米 2019 年に収穫された山田錦玄米を原料として使用し、画像特徴の入力データを多様化するため、異なる産地や等級の玄米を混ぜ合わせて試験に用いた。

画像撮影および目視による外観品位判断 穀粒判別機 RGQI20A (サタケ社製) を使用して、直射照明による表面反射画像および偏射照明による内部透過画像のデータを収集した。この穀粒判別機は画像データの取得だけに利用し、判別アルゴリズムは用いていない。収集した画像は経験豊富な分析者の目視によって、表面反射画像は 4 種類 (整粒、未熟粒、被害粒、砕粒)、内部透過画像は 2 種類 (非胴割粒、胴割粒) に分類された (Table 1)。内部透過画像における胴割判別については、4 クラス判別で砕粒と判定された粒を除外した試料について行った。

Table 1 The example images and features of the rice grain quality classification

Type of Images	Classes	Example Images		Features
Surface (color)	Whole grain (W)			Grains except for immature, damage, and broken grains
	Immature grain (I)			Immature blue-colored grain or chalky grain
	Damaged grain (D)			Damaged grain caused by disease, insects, or some reasons and colored grains
	Broken grain (B)			Broken grain
Inside (gray)	Non-Cracked grain (N)			Grain not containing the structure of the crack inside the grain
	Cracked grain (C)			Grain containing the structure of the crack inside the grain

データセットの作成 目視分類を行った画像から、各クラスにつき 800 枚の画像をランダムに抽出し、データセット作成に活用した。機械学習の入力データとして使用するため、画像はアスペクト比を維持したまま長辺が 64 画素になるようリサイズし、余白部分には黒色背景を適用することで、 64×64 画素の画像データを作成した。4 クラス分類向けの表面反射画像 (64×64 画素 $\times$ 3 色空間、8 bit RGB カラースケール) を 800 枚 $\times$ 4 クラスの 3,200 枚、2 クラス分類向けの内部透過画像 (64×64 画素 $\times$ 1 色空間、8 bit グレースケール) を 800 枚 $\times$ 2 クラスの 1,600 枚準備した。データセットの 75 % は学習用および検証用として使用し、残りの 25 % はモデルの学習には用いず、評価用データとしてモデルの汎化性能の検証に利用した。データセット分割時にはクラスごとのデータ比率を維持しながら無作為に抽出を行った。

NN の構造と計算過程 NN は神経細胞における電気信号の伝達を模した数理モデルである (Fig. 1A)。 x_1 から x_m の外部情報入力に対して w_1 から w_m の重みパラメータを割り当て、入力と重みの積の線形和を取ることで処理部への入力が定まる。処理部では受け取った線形和に対して閾値 θ を設け、さらに活性化関数 φ を適用することで伝達情報を決定する。この一連の過程は式 1 で表される。

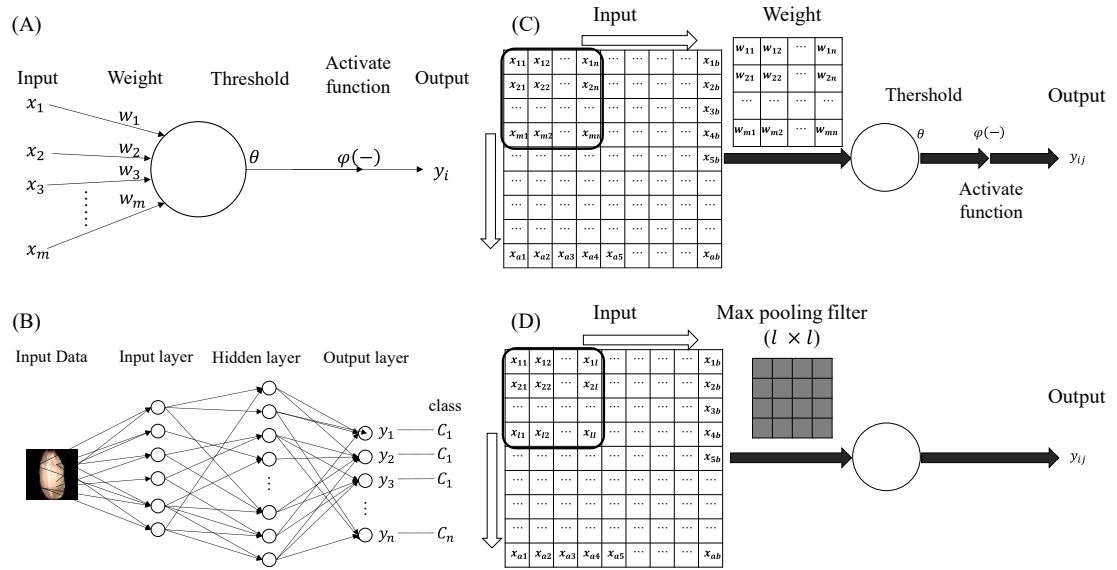


Fig. 1 The architecture and calculation method of (A) Perceptron-like model, (B) Neural Network, (C) Convolutional layer in CNN, (D) Max pooling layer in CNN

$$y_i = \varphi \left(\sum_{i=1}^m w_i x_i + \theta \right) \quad (1)$$

ニューロンが情報を伝達するための活動電位が発生するには、一定の刺激強度の閾値が存在することが知られており、閾値 θ はこれを再現するものである。活性化関数は非線形学習を実現するもので、モデルの柔軟性を高めることに貢献する。特に、正規化線形関数 (Rectified Linear Unit: ReLU) は式 2 で示され、ニューロン i への入力値 x_i が 0 以下の場合には出力値 y_i が常に 0 となり、入力値が 0 より大きい場合は入力値そのままを出力する。

$$\text{ReLU:} \quad y_i = \begin{cases} 0, & x_i \leq 0 \\ x_i, & x_i > 0 \end{cases} \quad (2)$$

ReLU は計算式がシンプルで処理が迅速に行われることや、入力値が 0 以下の時にニューロン群の活性がスパースになり、モデルの性能向上に寄与するという利点がある。また、ソフトマックス関数 (Softmax) (式 3) は入力値 x_i に対して出力値 y_i の総和が 1 となる値を返し、予測を確率分布として表現できるため、分類問題の出力層で採用されている。

$$\text{Softmax:} \quad y_i = \frac{e^{x_i}}{\sum_{i=1}^n e^{x_i}} \quad (3)$$

これら一連の処理を行う構造はパーセプトロン²¹⁾という名称で広く認知されており、この構造を複数層に重ねて深層学習の手法を取り入れたモデルが NN である (Fig.1B)。隠れ層を導入することにより情報処理の自由度が大幅に向上し、より高度な予測が可能となる。

CNN の構造と計算過程 CNN は NN の発展形であり、隣接データの関係性を保持する目的で、畳み込み層およびプーリング層を含むことが最大の特徴となっている。畳み込み層では入力の 2 次元データに対して、重み 2 次元テンソルとの内積を行う (Fig. 1C)。一般的に、 (a, b) 型データ X 内の位置 (i, j) に対し、 (m, n) 型重み W での畳み込みを行った Y の要素 y_{ij} は 式 4 によって計算される。

$$y_{ij} = \varphi \left(\sum_{t=1}^n \sum_{s=1}^m w_{st} x_{(i+s-1)(j+t-1)} + \theta \right) \quad (4)$$

畳み込みの結果、 Y は $(a - m + 1, b - n + 1)$ 型となり、入力データとは異なるサイズに変化するが、この変化が後続の層構造の理解を複雑にする問題がある。このような意図しないデータサイズの縮小を防ぐため、入力データの外周に零行列を追加するゼロパディング拡張処理を実施し、 Y が (a, b) 型になるよう調整する手法が広く用いられている。

プーリング層では特定の特徴を持った値を返すフィルターで処理することにより、限られた情報のみを伝達させる処理過程であり、フィルターの種類としては最大値を返す最大プーリングフィルターが広く利用されている (Fig. 1D)。 (a, b) 型データ X 内の位置 (i, j) に対し、 (l, l) 型最大プーリングフィルターでの処理結果 Y の要素 y_{ij} は式 5 によって算出される。この処理の結果、2 次元出力データ Y が $1/l$ サイズに縮小することで、重要度の高い特徴が選択的に次の層へと伝えられる。

Deep CNNの構造設計および学習 本研究で使用した Deep CNN は、8 層の畳み込み層、4 層の最大プーリング層、2 層の全結合層を基本構造として構築された (Table 2)。

Table 2 Hyper-parameter setting of the basic Deep CNN model

Layer No. (LNo.)	Layer type	Filter size	Stride	Output size	Activate function	Dropout rate
1	Input	-	-	64 × 64 × 3 (color) 64 × 64 × 1 (gray)	-	-
2	1 st Convolution	3 × 3	1	64 × 64 × 16	ReLU	-
3	2 nd Convolution	3 × 3	1	64 × 64 × 16	ReLU	-
4	Max pooling	2 × 2	2	32 × 32 × 16	-	-
5	Dropout	-	-	-	-	0.25
6	3 rd Convolution	3 × 3	1	32 × 32 × 16	ReLU	-
7	4 th Convolution	3 × 3	1	32 × 32 × 16	ReLU	-
8	Max pooling	2 × 2	2	16 × 16 × 16	-	-
9	Dropout	-	-	-	-	0.25
10	5 th Convolution	3 × 3	1	16 × 16 × 32	ReLU	-
11	6 th Convolution	3 × 3	1	16 × 16 × 32	ReLU	-
12	Max pooling	2 × 2	2	8 × 8 × 32	-	-
13	Dropout	-	-	-	-	0.25
14	7 th Convolution	3 × 3	1	8 × 8 × 64	ReLU	-
15	8 th Convolution	3 × 3	1	8 × 8 × 64	ReLU	-
16	Max pooling	2 × 2	2	4 × 4 × 64	-	-
17	Dropout	-	-	-	-	0.25
18	1 st Fully Connection	-	-	256	-	-
19	2 nd Fully Connection	-	-	64	-	-
20	Output	-	-	4 (color), 2 (gray)	Softmax	-

学習は誤差逆伝播法²²⁾を通じて交差エントロピー誤差が最小になるようパラメータを決定した。アルゴリズムには局所解やノイズの影響に強い適応モーメント推定²³⁾ (Adaptive moment estimation: Adam) を採用した。

学習過程では訓練データを繰り返しモデルに入力することでパラメータを段階的に調整していくが、学習回数が過度になると、モデルが訓練データに過剰に適合する「過学習」という現象が生じることがある。過学習したモデルは訓練データに対しては非常に高い精度の予測結果を示すものの、汎化性能が低下し、未学習データへの予測精度が悪化する。この問題を防ぐため、学習ごとに一部の伝達経路を強制的に遮断する「ドロップアウト²⁴⁾」という手法を取り入れ、モデル内の合計 4 層において実施した。

データ選択については事前に作成したデータセットに対して無作為抽出による層化 3 分

割交差検証法を適用した。モデルの構築および学習はプログラミング言語 Python で記述し、ライブラリ Keras を用いて実行した。

ハイパーパラメータチューニングとモデル性能の検証 モデルの性能はモデルの構造や学習効率を決定するハイパーパラメータに大きく影響されるため、これらの最適化（ハイパーパラメータチューニング）を検討した。具体的には、畳み込み+プーリング層数、ドロップアウト層数、ドロップアウト率を変更した場合の 60 回反復学習過程における学習曲線の形状変化を観察し、最適値に関する考察を行った。最適化されたモデルについては評価用データを用いた多クラス混同行列²⁵⁾ (Table 3) を作成し、混同行列から算出される正解率、適合率、再現率、F 値を用いて各クラスの正誤判定に関する特性評価を実施した。

Table 3 Confusion matrix and Quality metrics for multi-class classification algorithms

	Predicted Class						Measure	Formula	Evaluation focus
	1	...	k	...	K				
Actual Class	1	C_{11}	...	C_{1k}	...	C_{1K}	tp_k	c_{kk}	True positive
	...	...	...	...	...	...	tn_k	$\sum_{n=1}^K \sum_{k=1}^K c_{nk} - tp_k - fp_k - fn_k$	True negative
	k	C_{k1}	...	C_{kk}	...	C_{kK}	fp_k	$\sum_{n=1}^K c_{nk} - tp_k$	False positive
	...	...	...	...	...	...	fn_k	$\sum_{n=1}^K c_{kn} - tp_k$	False negative
	K	C_{K1}	...	C_{Kk}	...	C_{KK}			
Measure		Formula					Evaluation focus		
Accuracy		$\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{tp_k + tn_{ik}}{tp_k + fn_k + fp_k + tn_k}$					The average per-class effectiveness of a classifier		
Precision		$\frac{tp_k}{tp_k + fp_k}$					Per-class agreement of the data class labels with those of a classifier		
Recall		$\frac{tp_k}{tp_k + fn_k}$					Per-class effectiveness of a classifier to identify class labels		
F-score		$\frac{2 \cdot Precision \cdot Recall}{Precision + Recall}$					Relations between data's positive labels and those given by a classifier based on a per-class average		

Grad-CAM による画像内特徴量重要個所の可視化 機械学習における深層畳み込みニューラルネットワークでは、入力データから出力値を導き出すプロセスがブラックボックス化し、予測結果の根拠が不透明になるという課題が存在する。この問題の解決策として、Selvaraju らによる Gradient-weighted Class Activation Mapping (Grad-CAM) というマッピング技術を活用した²⁶⁾。Grad-CAM は、クラスごとの確率スコアへの影響が大きい画像内の箇所では、微小な変化を与えた際の出力結果が大きく変動するという考え方にに基づき、微分係数をヒートマップとして表示することでクラス予測における重要な領域を可視化する手法である。この手法を評価用データセットに適用することにより、Deep CNN の判断基

準を人間による分析と対比して検討した。

結果と考察

層数がモデル性能に与える影響 表面反射画像データセットの 4 クラス分類について、Table 2 のモデルを基本(i)として、LNo. 14 - 17 と同様の構造の層を LNo. 17 の後方に追加したモデル(ii)、LNo. 14 - 17 を除去したモデル(iii)、LNo. 6 - 9, 14 - 17 を除去したモデル(iv)の学習過程を Fig. 2 に示す。モデル(i)では学習回数が増えるにつれて訓練用データと検証用データの損失が徐々に減少した。一方、モデル(ii)においては各回のバラツキが顕著で、学習完了時点での検証用データの損失はモデル(i)と比較して高い値を示した。この現象は、パラメータ数の増加により、それらが適切に最適化されない状態に陥ったことが要因として考えられた。

層数を削減したモデル(iii)、(iv)では、学習の後半において訓練用データの損失は減少するものの、検証用データの損失は増加する傾向が見られた。また、学習済みモデルの正解率は、基本モデル(i)では訓練用データが 89.7 %、検証用データが 88.9 %であったのに対し、層数を減らしたモデル(iii)、(iv)では、それぞれ(iii) 95.4 %、87.1 %、(iv) 99.8 %、85.3 %となり、訓練用データと検証用データの正解率に大きな乖離が生じた。これらの結果から、過学習が発生し、汎化性能が低下していることが明らかとなった。

また、過学習が生じていない時点での損失も、基本モデルの最終的な損失より大きく、層数の削減が分類性能の低下につながることを示唆された。これは、層数を減らすことで特徴の畳み込みが急激に進み、正確な分類に必要なパラメータの適切な決定が困難になったためと考えられる。

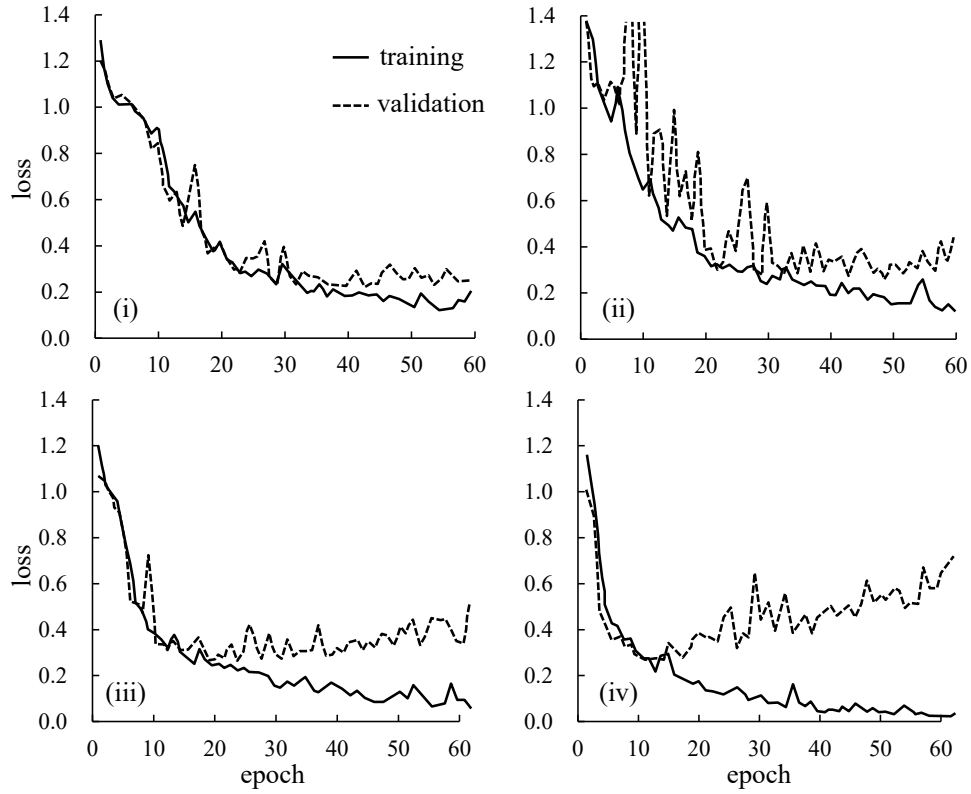


Fig. 2 Comparison of Loss functions in two learning curves which have different model lengths.

(i) upper left: basic model, (ii) upper right: same layer as LNo. 14-17 was added after LNo. 17,
 (iii) lower left: LNo. 14-17 left was dropped, (iv) lower right: LNo. 6-9 and 14-17 was dropped)

ドロップアウト層数、ドロップアウト率がモデル性能に与える影響 表面反射画像データセットの4クラス分類に関して、Table 2 のモデルを基本(i)とし、LNo. 5, 13 のドロップアウト層を削除したモデル(ii)、LNo. 5, 9, 13, 17 のドロップアウト層を削除したモデル(iii)、ドロップアウト率を 50 %に引き上げたモデル(iv)、10 %に引き下げたモデル(v)の学習結果を Fig. 3 に示す。基本モデルと比較すると、ドロップアウト層を減らしたモデル(ii)、(iii)およびドロップアウト率を下げたモデル(v)では、学習の中盤以降に過学習が確認された。一方、ドロップアウト率を上昇させたモデル(iv)では、検証用データの損失低下に大きな乱れが見られた。

これらの結果から、情報伝達回路を強制的に遮断するドロップアウトは過学習の防止に非常に有効である一方で、パラメータ決定を阻害するというデメリットも存在し、学習の安定性の低下や損失の増加を引き起こす可能性があることが示された。

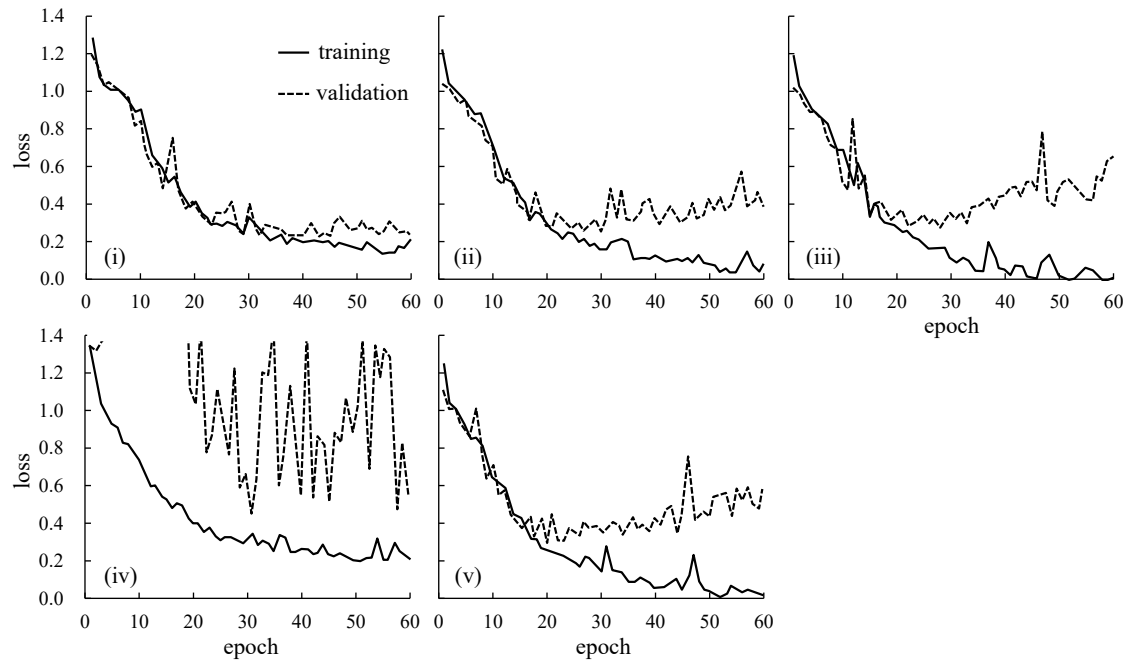


Fig. 3 Comparison of Loss functions in five learning curves which have different Dropout layers.

(i) upper left: basic model, upper middle: (ii) upper middle: LNo.5, 13 was dropped, (iii) upper right: LNo. 5, 9, 13, 17 was dropped (iv) lower left: Dropout rate 50 %, (v) lower middle: Dropout rate 10 %)

最適化モデルの判定精度評価 これまでの検証結果から、表面反射画像を用いた 4 クラス分類においては、Table 2 に示した基本モデルの構造が本試験への適用に最も適していることが明らかとなった。さらに、同一の条件を内部透過画像を用いた 2 クラス分類に適用したところ、非常に高い分類精度を示し、過学習などの問題も確認されなかった。この結果を踏まえ、2 クラス分類においても 4 クラス分類と同様のハイパーパラメータを採用した。

Fig. 4 に最適化モデルの学習過程を示す。学習済みモデルの正解率は、4 クラス分類で訓練用データが 89.7 %、検証用データが 88.9 %、2 クラス分類で訓練用データが 87.1 %、検証用データが 86.3 %となり、いずれも高い分類精度を示した。以降の検証では、この最適化モデルを用いた解析を実施した。

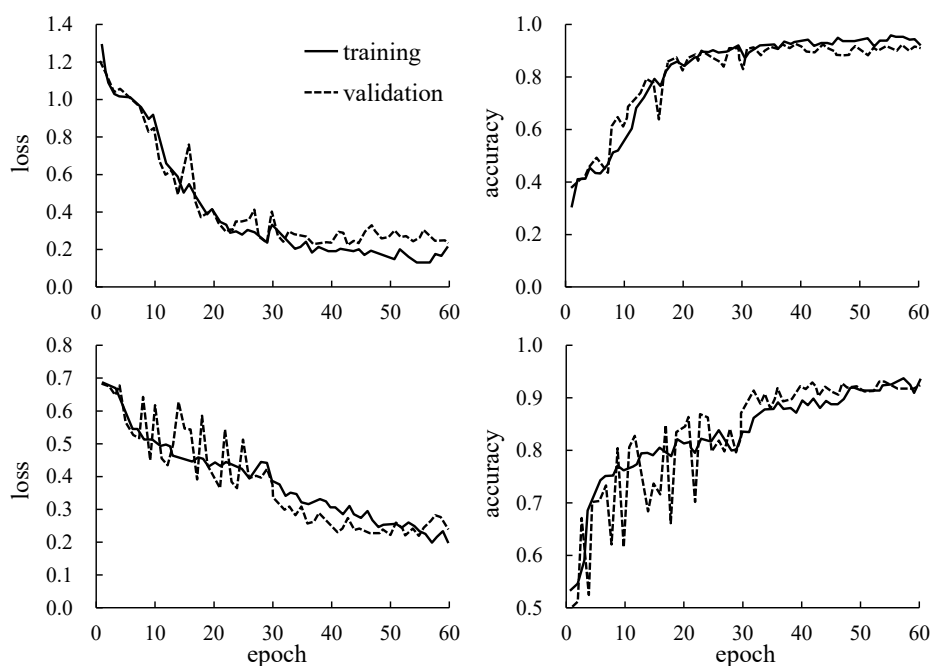


Fig. 4 Learning curves of the model with optimized hyper parameters.
(upper: basic model for surface image, lower: basic model for inside image)

評価用データを用いたモデル汎化性能の評価 層化3分割交差検証法の各試行 (1st - 3rd fold) で作成されたモデルについて、評価用データのクラス予測を確認した (Table 4)。正解率の結果から、4クラス予測および2クラス予測のいずれにおいても、各試行で作成されたモデルの正解率に大きな差がないことが明らかとなり、汎化性の高いモデルが構築できたことが示された。

Table 4 Accuracy and confusion matrix in the classification of evaluation data

Accuracy (%)

	1st fold	2nd fold	3rd fold	Ave	SD
2 classes	88.3	91.9	89.6	89.9	1.5
4 classes	86.3	86.0	86.0	86.1	0.1

Confusion matrix

		Predicted class															
4 classes		1st fold				2nd fold				3rd fold				Average			
		W	I	D	B	W	I	D	B	W	I	D	B	W	I	D	B
Actual class	W	165	25	10	0	173	12	15	0	173	13	14	0	170	17	13	0
	I	4	195	1	0	2	191	6	1	5	190	5	0	4	192	4	0
	D	17	32	151	0	11	14	171	4	19	19	162	0	16	22	161	1
	B	0	4	1	195	0	0	0	200	1	7	0	192	0	4	0	196

		Predicted class							
2 classes		1st fold		2nd fold		3rd fold		Average	
		N	C	N	C	N	C	N	C
Actual class	N	179	21	177	23	174	26	177	23
	C	34	166	33	167	30	170	32	168

4クラス予測の混同行列からは、砕粒に関する誤判定がわずか5粒（砕粒を未熟粒と誤判定したケースが4粒、被害粒を砕粒と誤判定したケースが1粒）であり、特に高い精度を示していることが確認された。一方、その他のクラスでは判定の誤りや偏りが一部見られ、他クラスから未熟粒へと判定される頻度が高い傾向が認められた。2クラス予測の混同行列では、非胴割粒と胴割粒が同等の精度で判定されており、判定の偏りは確認されなかった。

混同行列から算出した適合率、再現率、F値をTable 5に示す。4クラス分類では、未熟粒において適合率が高く再現率が低い結果となり、未熟粒が被害粒や整粒に誤分類されるケースが多いことが示唆された。この要因として、未熟粒には青未熟粒や白未熟粒、充実不足による小粒など、多様な選抜要素が含まれていることが挙げられる。さらに、白未熟粒は心白の特徴と競合しやすいことや、手分析者がわずかに青色部位を含む粒を「活青粒」として整粒に分類する場合があることなど、判定基準の曖昧さが影響していると考えられる。

Table 5 Performance of classification by the model for each class

4 classes	W	I	D	B	Ave	SD
Precision (%)	85.2	96.0	80.7	97.8	89.9	8.3
Recall (%)	89.6	82.1	90.3	99.2	90.3	7.0
F score (%)	87.4	88.5	85.2	98.5	89.9	5.9
2 classes	N	C	Ave	SD		
Precision (%)	88.3	83.8	86.1	3.2		
Recall (%)	84.5	87.8	86.2	2.3		
F score (%)	86.4	85.8	86.1	0.4		

また、被害粒は再現率が高く適合率が低い結果となり、整粒や未熟粒が被害粒と誤判定されるケースが多いことが明らかとなった。これは、未熟粒の特徴が部位的に広がる傾向があるのに対し、被害粒には斑点や芽腐れなど局所的な特徴が多いため、色彩的に特異な部位が少しでも検出されると被害粒として分類される傾向があると推察される。

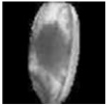
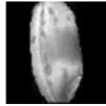
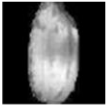
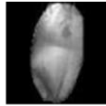
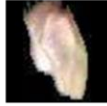
2 クラス分類に関しては、胴割粒の適合度が高い結果となり、胴割粒の判定基準が比較的緩いモデルであることが示された。これは、整粒において心白と胚乳充実部の境界が胴割に類似した特徴を示すことがあり、そのような特徴を持つ整粒が胴割粒として分類される場合があるためと考えられる。

Table 6 に評価用データに対する分類結果例を示す。正しく判定された粒については、目視によっても各クラスの特徴をよく表現していると解釈でき、Deep CNN が分析者の目視判断と同等の判定能力を有することが確認された。一方、誤判定された画像、例えば正解クラスが整粒でありながら未熟粒と予測された粒については、青未熟に関連する部位特徴が微弱に表れていることから、判定基準の不明瞭さが誤判定の要因となったと考えられる。また、胴割粒の判定においても、心白と胚乳充実部の境界領域が直線的に存在する場合は目視判定が困難であり、教師データに含まれるノイズが誤判定の一因となっていることが示唆された。

以上の結果から、Deep CNN モデルは手分析と同様の判定基準を習得しており、高精度な推定が可能であることが確認された。また、誤判定に関しては、入力データの一貫性を高めることで減少させることができると考えられる。

Grad-CAM による Deep CNN 着目部位の可視化 表面反射画像の4クラス分類における Grad-CAM による重要度スコアを Fig. 5 に示す。米粒の外観において、黄色から赤色でマーキングされた部分が Deep CNN によって強く認識された領域である。整粒に関しては、畳み込み層 1 および 2 層目において、米粒全体の構造に注目しながらも中心部の重要度が高い結果となった。つまり、整粒は全体的に色彩や形状の異常が確認されない品位の粒として選抜されていると解釈できた。

Table 6 Example results in the classification of evaluation data
(left: surface images, right: inside images)

4 classes		Predicted class				2 classes		Predicted class	
		W	I	D	B			N	C
Actual class	W				-	Actual class	N		
	I						C		
	D								
	B								

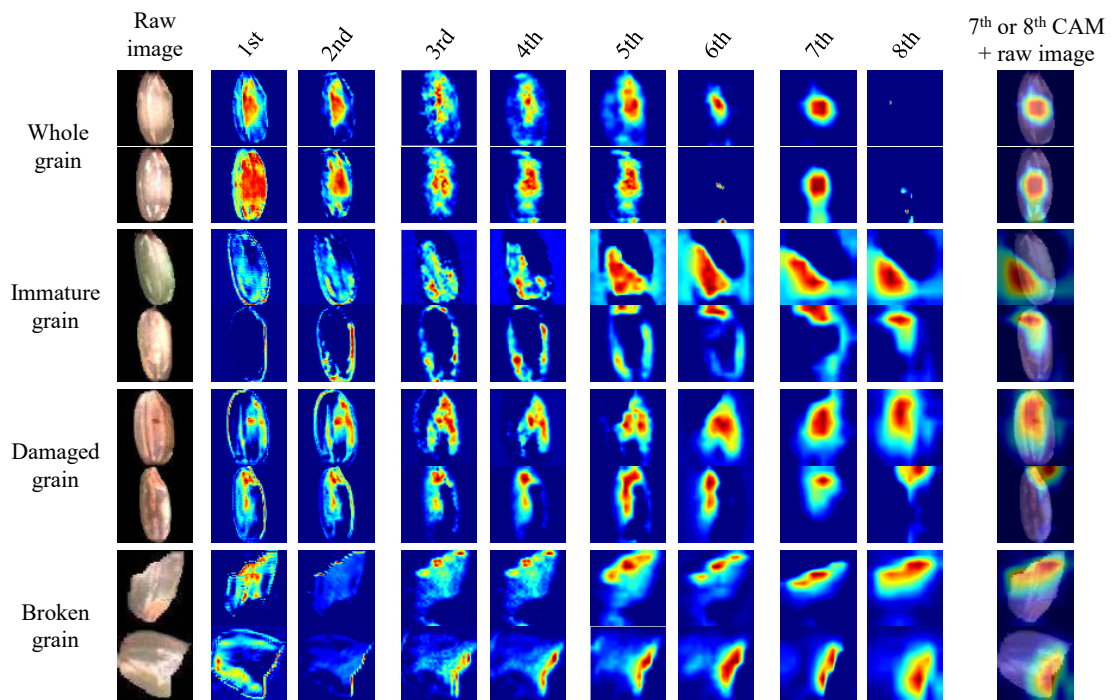


Fig. 5 Heatmap of class (surface image)-discriminative regions localized by Grad-CAM for the convolutional layer.

(Ordinal numbers above heatmaps mean the order of convolutional layers within Deep CNN. 7th CAM was used only for whole grain to make a merged image. Red and blue regions correspond to high and low scores for respective class)

未熟粒の上段にある青未熟粒では、畳み込み層 1 および 2 層目で青緑色の部分のスコアが高く、その情報が後続の層へと伝達されていた。下段の充実不足の未熟粒においては、外周部の形状特徴や腹部の白未熟部位への注目度が高く、これらが判断基準として活用されていることが確認された。また、青未熟粒と白未熟粒は大きく異なる特徴を持っているが、これらが同一クラス内で表現されており、今後これらを小分類に分けることも可能であることが示唆された。

被害粒においては、茶色に劣化した被害部分の重要度スコアが高くなっており、被害箇所の差異に関わらず、それがクラス判別の情報として活用されていることが明らかとなった。砕粒に関しては、整粒と同様に 1 および 2 層目で米粒全体の構造が注目されているが、以降の層では切断面へのスコアが高まる結果となった。これは砕粒が他のクラスとは異なる形状を持つため、特に輪郭情報の重要性が高く、その中でも切断面の凹凸が有用な情報として使用されたと考えられる。

Fig. 6 には内部透過画像による 2 クラス分類の結果を示す。胴割粒においては、胴割部分の重要度スコアが高く、これが判断の根拠となっていることが確認された。一方、非胴割粒については、上層で外周部構造に着目する以外に特定の部分で重要度が高くなることはなく、2 クラス分類では胴割部分の有無のみが判断材料となっていることが示された。

以上の結果から、Grad-CAM による可視化手法は手分析との整合性確認に有用であり、Deep CNN モデルが手分析と同様の判断基準を習得していることが明らかとなった。

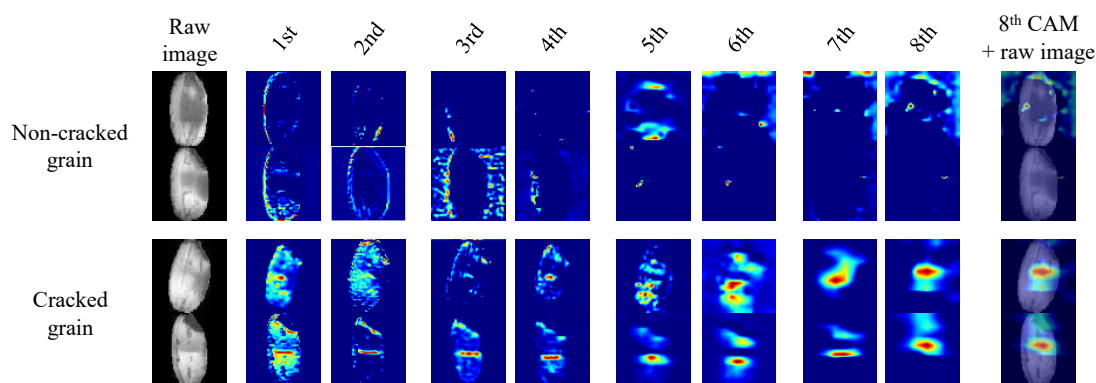


Fig. 6 Heatmap of class (inside image)-discriminative regions localized by Grad-CAM for the convolutional layer.

総合考察 本研究では深層畳み込みニューラルネットワーク（Deep CNN）を用いた酒造好適米の外観品位の自動判別を検討し、以下の 2 点を実現した：

- ① ハイパーパラメータの最適化による汎化性能の高い Deep CNN モデルの構築
- ② Grad-CAM を用いた Deep CNN 着目部位の可視化による判定基準の整合性確認

現状の課題として、手分析における判定誤差を含んだサンプルを教師データとして使用することによる判定基準の曖昧化が挙げられる。この誤差は外観品位基準が言語的表現に留まり、定量的尺度が存在しないことに起因すると考えられる。

本研究から、曖昧さをノイズとして含んだ教師データで学習を行った場合においても十分な汎化性能を持つ AI モデルを作成可能であることが確認できたことから、① 曖昧さを含む判定データを用いてモデルを学習する。② Grad-CAM により、モデルの判定基準が手分析者の判断基準に近い事を確認する。③ 誤判定されたデータの目視確認をおこなうことで教師データラベリングに誤りがないかを確認し正しいラベル付けをおこなう。といった①－③のプロセスを繰り返し実行することで、手分析者の判断基準に含まれる曖昧さの認識向上や教師データ内に含まれるノイズの除去が実現可能であると考えられる。こういった手法は人間と AI の反復的フィードバックループによる学習改善プロセスであると考えられ、**Human-in-the-loop** 学習の一種と言える。さらに、既存手法との融合による安定性向上も重要である。本研究では熟練分析者による教師ラベリングにより高性能モデルを構築できたが、分析者の判断基準が不安定な状況では誤った判定基準が学習されるリスクがある。一方、光学特性を用いた既存手法⁵⁻⁸⁾では判別基準が一意に設定されており安定性が高い。

したがって、光学特性を用いたアルゴリズムと Deep CNN による画像分析を組み合わせたモデルを開発できれば、安定性と柔軟性を兼ね備えた判定が可能になると予想される。このようなアンサンブル学習手法は、眼病における病変部位検出²⁷⁾や脳腫瘍（神経膠腫）検出²⁸⁾といった医療分野で既に成果を上げている。医療分野では人の目による判定が困難なデータに対する AI 活用という点で、本研究と類似した課題に取り組んでいる。AI 技術の急速な発展が期待される中、これらの技術を積極的に取り入れることで、醸造分野における課題解決に貢献していくことが望ましいと考える。

摘要

本章では、深層畳み込みニューラルネットワーク（Deep CNN）を用いて、酒造好適米の外観品位を自動判定するモデルを開発した。玄米粒の表面反射画像と内部透過画像を撮影し、熟練した分析者により、表面反射画像は整粒、未熟粒、被害粒、碎粒の 4 クラス、内部透過画像は非胴割粒、胴割粒の 2 クラスにそれぞれ分類した。Deep CNN の構造は、畳み込み層 8 層、最大プーリング層 4 層、全結合層 2 層で構成される基本モデルを採用し、ハイパーパラメータのチューニングにより、最適な層数とドロップアウト率を検証した。最適化されたモデルを評価用データに適用した結果、表面反射画像を用いた 4 クラス分類で 89.9 %、内部透過画像を用いた 2 クラス分類で 86.1 %の正解率を達成した。また、Deep CNN が判定に用いる画像内の特徴を Grad-CAM を用いて可視化したところ、Deep CNN が視覚的な判断基準と同様の基準で判定を行っていることが確認された。これらの結果から、

Deep CNN による酒造好適米の外観品位評価は、人間の目視判断と高い整合性を示し、実用性の高い手法であることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 農林水産省 HP 玄米の検査規格-検査用語の解説
https://www.maff.go.jp/j/seisan/syoryu/kensa/kome/k_kikaku/k_kaisetsu/
- 2) 黒田晃, 松本範裕 : 北陸作物報, 31, 11-12 (1996)
- 3) 水間智哉, 藤原久志, 清川良文, 若井芳則 : 醸協, 100, (1), 65-75 (2005)
- 4) 日本醸造協会 : 清酒製造技術, 103, (1979)
- 5) 細川明, 松久次雄 : 農機誌, 40, (2), 217-224 (1978)
- 6) 小嶋和雄, 杉村輝男 : 高知大学学術研究報告. 農学, 23, 59-63 (1975)
- 7) 佐竹隆顕, 古谷立美, 下原融 : 農機誌, 54, (4), 67-75 (1992)
- 8) 松久次雄, 細川明 : 農機誌, 42, (4), 515-520 (1981)
- 9) 元組み込みエンジニアの農家が挑む「きゅうり選別 AI」試作機 3 台、2 年間の軌跡
<https://www.itmedia.co.jp/enterprise/articles/1803/12/news035.html>
- 10) 建本聡, 原田陽子, 今井健司 : 農業情報研究, 28 (3), 108-115 (2019)
- 11) 小林康祐, 山崎達也 : 2019 年度人工知能学会全国大会 (第 33 回) 要旨, 4H3-J-13-04
- 12) 内田祐介, 山下隆義 : 信学技報, 117, (362), 25-38 (2017)
- 13) A. Krizhevsky, I. Sutskever, G. E. Hinton : *NIPS*, (2012)
- 14) D. H. Hubel, T. N. Wiesel : *J. Physiol.*, 148, (3), 574-591 (1959)
- 15) K. Fukushima, S. Miyake : *Pattern Recognit.*, 15, (6), 455-469 (1982)
- 16) M. Zhang, H. Lin, G. Wang, H. Sun, J. Fu : *Remote Sens.*, 10, (11), 1840 (2018)
- 17) Y. Lu, S. Yi, N. Zeng, Y. Liu, Y. Zhang : *Neurocomputing*, 267, 378-384 (2017)
- 18) R. R. Atole, D. Park : *IJACSA*, 9, (1), 67-70 (2018)
- 19) 岩橋優, 田中佑, 白岩立彦 : 第 246 回日本作物学会講演会要旨, 77, (2018)
- 20) Q. Zhengjun, C. Jian, Z. Yiyang, Z. Susu, H. Leon, Z. Chu : *Appl.Sci.*, 8, (2), 212 (2018)
- 21) R. Frank : *Psychol. Rev.* 65, (6), 386-408 (1958)
- 22) D. E. Rumelhart, G. E. Hinton, R. J. Williams : *Nature*, 323, 533-536 (1986)
- 23) D. P. Kingma, J. Ba : *ICLR*, (2014)
- 24) P. Baldi : *NIPS*, (2013)
- 25) M. Sokolova, G. Lapalme : *Inf. Process. Manag.*, 45, (4), 427-437 (2009)
- 26) R. R. Selvaraju, M. Cogswell, A. Das, R. Vedantam, D. Parikh, D. Batra : *ICCV*, 618-626 (2017)
- 27) J. I. Orlando, E. Prokofyeva, M. Fresno, M. B. Blaschko : *CMPB*, 153, 115-127 (2018)
- 28) M. G. Ertosun, D. L. Rubin : *AMIA Annu Symp Proc.*, 1899-1908 (2015)

第2章

酒造用原料米の水浸裂傷発生パターンの定量的評価と特性解析

緒言

近年、普通酒の需要は低下傾向にある一方で、高度に精米した白米を使用した吟醸酒への需要が高まっている¹⁾。この消費嗜好の変化に伴い、高度精白米の取り扱いに関する技術的課題が重要性を増している。高度精白米は浸漬処理に特有の難しさがあり、心白が表面付近に露出することや、水を通しにくい糠層が除去されることにより、吸水がより速く進むことが報告されている²⁾。また、白米水分の低下が吸水率の増大を引き起こすこと³⁾や、浸漬温度の違いによって吸水速度が変化することも明らかになっている⁴⁾。

浸漬による吸水制御は蒸米水分に直接影響を及ぼし、もろみ中での被糖化性にも大きく関わることから^{5,6)}、浸漬過程を正確に把握することが高品質な清酒製造において極めて重要である。酒造用原料米の吸水特性を評価する方法としては、酒造用原料米全国統一分析法⁷⁾の吸水性試験が広く用いられている。この手法では、一定時間浸漬した米を遠心分離機によって強制的に脱水し、重量測定によって吸水率を算出する。しかし、高度精白米では初期段階で急速に吸水が進行する⁹⁾ため、より短時間での詳細な吸水特性評価が求められている。伝統的には、浸漬によって白濁部位が増加する様子を杜氏の経験と勘に基づいて目視確認し、吸水特性を把握してきた歴史がある。しかし、高品質清酒を安定的に生産するためには、浸漬状態を可視化データとして取得し、科学的な観点から評価を行う必要がある。吸水過程の可視化に関しては、水溶性色素を用いて米粒内への水の侵入程度を染色した研究⁸⁾、MRIを用いて米粒中の水分動態を把握した研究¹⁰⁾、そして浸漬中に発生する裂傷について画像解析による評価を行った研究などが報告されている¹¹⁾。

水浸裂傷は吸水部位の強度低下や腹部側に生じる引張応力によって発生する現象である¹²⁾。例えば、京都の酒造好適米である祝は、もろみ中での溶解性に優れ、丸みのある穏やかな味わいが特徴的であるが、原料処理工程で多くの割れが発生するため取り扱いが難しい品種として知られている。祝は心白のサイズが大きいいため白米剛度が弱く、これが水浸裂傷の高発生につながっていると考えられる。さて、精米工程における砕粒の発生は吸水速度の上昇、蒸米の粘度上昇を引き起こし、もろみ制御を困難にすることが知られているが¹³⁾、水浸裂傷についても同様の影響があると予想される。そのため、酒造用原料米の水浸裂傷発生について評価することは、吸水特性把握において重要な意義を持つ。インディカ米については水浸裂傷の発生が白米表面積の拡張につながり、浸漬水との接触面が増大することで吸水速度にプラスの影響を与えることが報告されている¹⁴⁾。しかし、酒造用原料米について水浸裂傷の発生量や増加速度を定量的に比較した研究は限られている。そこで本章では、酒造用原料米における水浸裂傷の定量評価および、水浸裂傷の増加パターンの違いと吸水速度、蒸米物性の関係性について論じる。

材料と方法

原料米 2016 年産、2017 年産の酒造好適米 7 試料（祝（京都府産）、山田錦（兵庫県産）、五百万石（京都府産）、五百万石（福井県産）、雄町（岡山県産）、吟吹雪（滋賀県産）、おくほまれ（福井県産））、一般米 3 試料（京の輝き（京都府産）、日本晴（滋賀県産）、コシヒカリ（福井県産））を試験に供した（Table 1）。

Table 1 Rice cultivars used in this study.

No.	Characteristics	Cultivars	Region of origin
1	Rice suitable for sake brewing	<i>Iwai</i>	Kyoto
2		<i>Yamadanishiki</i>	Hyogo
3		<i>Gohyakumangoku</i>	Kyoto
4		<i>Gohyakumangoku</i>	Fukui
5		<i>Omachi</i>	Okayama
6		<i>Ginfubuki</i>	Shiga
7		<i>Okuhomare</i>	Fukui
8	Edible rice	<i>Kyonokagayaki</i>	Kyoto
9		<i>Nipponbare</i>	Shiga
10		<i>Koshihikari</i>	Fukui

原料米の分析 玄米試料について、HS-4 試験精米機（チヨダエンジニアリング（株）社製）を用いて、精米歩合 60 %まで精米を行った。砥石には金剛ロール C-60 を用い、ロール回転数は玄米から精米歩合 70 %までを 1500 rpm、精米歩合 70 %から 60 %までを 1300 rpm とした。精米後の白米水分が 12 %となるように調湿を行い、各種試験まで 15 °C 恒温槽内にて保管した。各種試験は収穫年から翌年 1 月までに精米をおこない、その後 3 ヶ月以内にすべて実施した。原料米の消化性分析、吸水性試験は酒造用原料米全国統一分析法に従い実施したが、精米歩合は 60%、白米水分は 12%に方法を改変した。

白米浸漬の観察 各試料から約 20 粒を選択し、自作の透明プラスチック製容器に封入した（Fig. 1）。プラスチック製容器には浸漬水が流入するよう穴をあけ、浸漬中に容器が浮かばないようにおもりを付けた。ガラスシャーレには 15 °C の蒸留水を張り、シャーレ内の水温は適時氷冷によって 15 ± 1 °C の範囲内に収まるように調整した。撮影はデジタルマイクロスコープ VHX-700F（KEYENCE 製）を用いて行った。白米を封入したプラスチック容器をガラスシャーレ内の浸漬水に完全に浸した時点を浸漬開始のタイミングとした。画像内には約 10 粒の白米が収まるように調整し、15 秒おきに 1 枚の画像撮影を行い、各試料 40 分間、計 160 枚の画像撮影を行った。上記の浸漬試験を二回実施し、解析に供した。

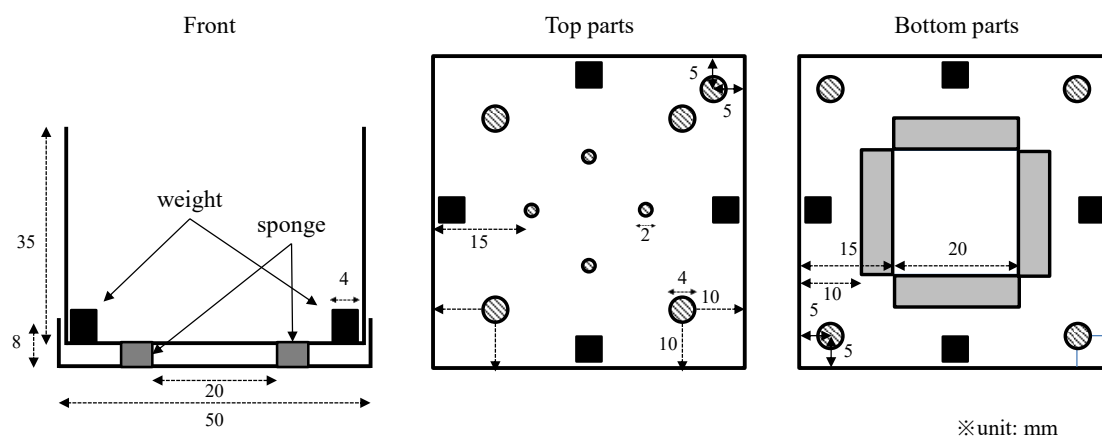


Fig. 1 Plastic container used for water absorption test. (Shaded circles are holes.)

水浸裂傷の解析 得られた画像について画像解析ソフトウェア ImageJ を用いて解析を行った (Fig. 2)。画像では米粒内において白色から黒色部位に変化した部位を吸水部位、白色として残存した部位を非吸水部位として評価を行った。裂傷発生箇所には直ちに水の流入が始まり、Fig. 2 の上図の黒色の線のように見える部分に裂傷が確認されたことから、この線の長さを Fig. 2 の下図黒線でトレースしたように裂傷長として測定し、画像内の裂傷長の総和を総裂傷長として評価した。

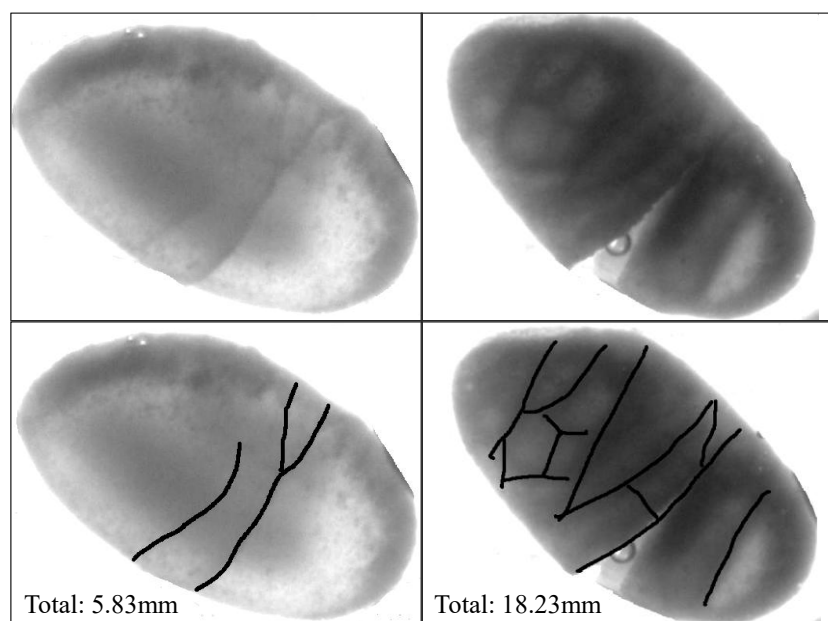


Fig. 2 Changes in rice appearance during soaking.

(left: 5min, right: 10min after water absorption, upper: raw data, lower: detection and count of crack length by ImageJ)

ロジスティック方程式への回帰 総裂傷長の増加については、ロジスティック方程式への回帰を行った（式1）。

$$L(t) = \frac{K}{1 + \left(\frac{K}{L_0} - 1\right) e^{-r(t-\Delta t)}} \quad (1)$$

変数として、総裂傷長（ L ）、浸漬時間（ t ）、定数として、最大総裂傷長（ K ）、総裂傷長増加速度（ r ）、初期裂傷長（ L_0 ）、時間誤差（ Δt ）を設定した。最大総裂傷長（ K ）は総裂傷長が最大に達したときの値、総裂傷長増加速度（ r ）は総裂傷長の増加速度を示す。ロジスティック方程式は閉鎖環境内でのショウジョウバエの個体群増加モデルとして考案されたもので、 K は環境収容力、 r は内的自然増加率と呼ばれる定数である。ある閉鎖環境内にショウジョウバエを雌雄一対入れ、十分な栄養を用意すると、繁殖によって数を増やす。個体数の増加に伴い増殖速度は指数関数的に伸びていくが、閉鎖環境の空間サイズに影響を受け、徐々に増加速度が低下し、やがて個体数は一定となる。この考え方を米粒内という閉鎖環境内での裂傷の増加に当てはめ、 K および r を定義した。ただし水浸裂傷の増加はショウジョウバエのケースと異なる事象であることから、 X 軸方向の誤差を許容するために Δt を導入した。回帰方法としては実測値と予測値の誤差が最小となるように定数決定を行う最小二乗法を選択した。

示差走査熱量測定（Differential Scanning Calorimeter: DSC） 白米試料をPULVERISETTE 14（FRITSCH社製）を用いて粉碎後、示差走査熱量計 DSC-6100（セイコーインスツル（株）社製）を用いて糊化温度の測定を行った。銀製密閉容器に粉碎白米試料約 15 mg と、秤量した粉末重の 3 倍量の水を封入した。基準物質として銀製密閉容器に 45 mg の蒸留水を封入したものをを用いた。30 分間の安定時間をとったのち、昇温条件 1 °C/min で 25 °C から 125 °C まで昇温し、得られた DSC 曲線から糊化開始温度（ T_o ）、糊化ピーク温度（ T_p ）、糊化終了温度（ T_c ）を求めた。

動的粘弾性測定（Dynamic Mechanical Analysis: DMA） 調湿を行った白米試料 2 g を白米が十分浸る量の浸漬水とともに 100 mL 容量のガラス容器に入れ、15 °C 恒温槽内にて一晚浸漬後、市販のお茶パックを用いて水切りを行い、15 °C 空気槽内に吊るした。その後、適時重量を計測しながら浸漬米吸水率が $35 \pm 2 \%$ となるように調整し、浸漬米を 10 cm 四方に切ったクッキングペーパー上に移し、甑を用いて 50 分間蒸した。動的粘弾性測定には NDS-1000（シスコム製）を用いた。測定条件として、振幅 10 μm 、周波数 3 Hz、センサー面積 0.785 mm²、予備圧縮 20 % に設定し、各試料 6 粒について、1 粒ずつ貯蔵弾性率（ E' ）、損失弾性率（ E'' ）、損失正接（ $\tan\delta$ ）の測定を行った。同様の試験を 3 回繰り返し実施し、平均値を算出した。

結果と考察

浸漬状態の画像観察 VHX-700F で撮影した浸漬中の白米の状態について No. 1 祝、No. 2 山田錦、No. 8 京の輝き、No. 10 コシヒカリの画像を Fig. 3 に示した。浸漬時間が長くなるに従って、浸漬水が白米内部に浸透し、浸漬部位が黒色に変化する様子が観察された。酒造好適米の心白部分は浸漬開始時点（0分）から黒く見えている特徴が確認された。浸漬 10 分後以降の画像から、酒造好適米である No. 1 祝と No. 2 山田錦は No. 8 京の輝き、No. 10 コシヒカリと比較して黒色部位の増加速度が顕著に大きいことが確認された。

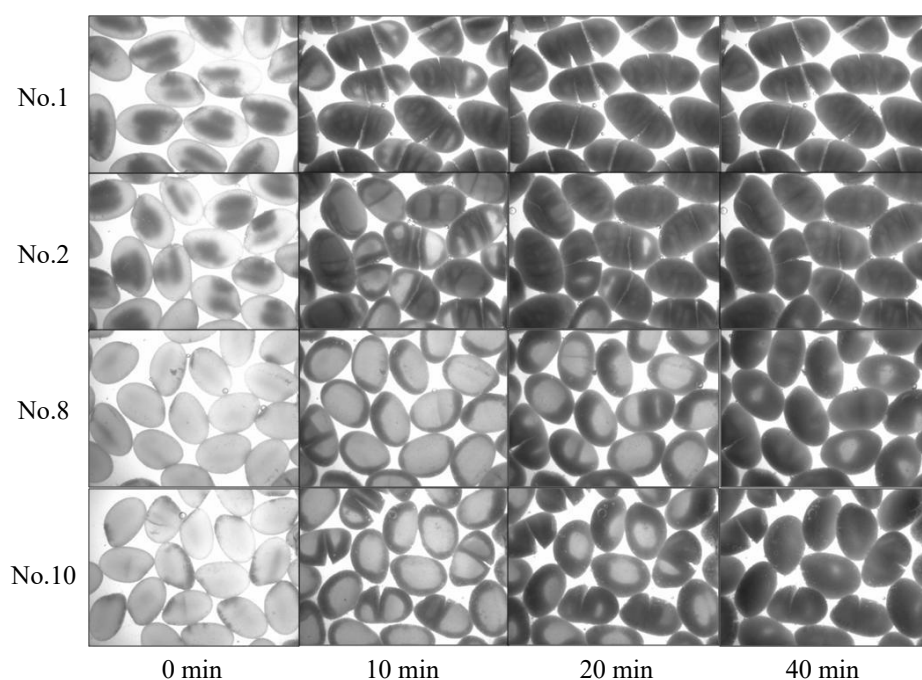


Fig. 3 Image of the rice soaking process taken by VHX-700F (2016).

浸漬 10 分後の画像を詳細に観察すると、酒造好適米は一般米と比較して水浸裂傷が多く発生しており、水浸裂傷の発生部位周辺から吸水が急速に進行する様子が明確に確認された。これらの観察結果から、酒造好適米において吸水が速やかに進行する現象は、裂傷発生による白米表面積の増大が大きく影響しており、裂傷発生量の多少が試料毎の吸水特性に影響を与えていると考えられる。

水浸裂傷長の解析 2016 年産米と 2017 年産米を使用し、浸漬時間に対する白米面積当たりの総裂傷長を Fig. 4 (A)に示した。実際の測定は 40 分間実施したが、いずれの試料においても浸漬後 20 分以内に総裂傷長が最大に達したことから、グラフ内には浸漬後 20 分までのデータを示している。一般米は酒造好適米と比較して、水浸裂傷長が顕著に短い結果となった。これは一般米が米粒内に心白を含んでいないことから、米粒剛度が高く、含水率増加による米粒内の力学的不均衡に耐えうるためと考えられる。

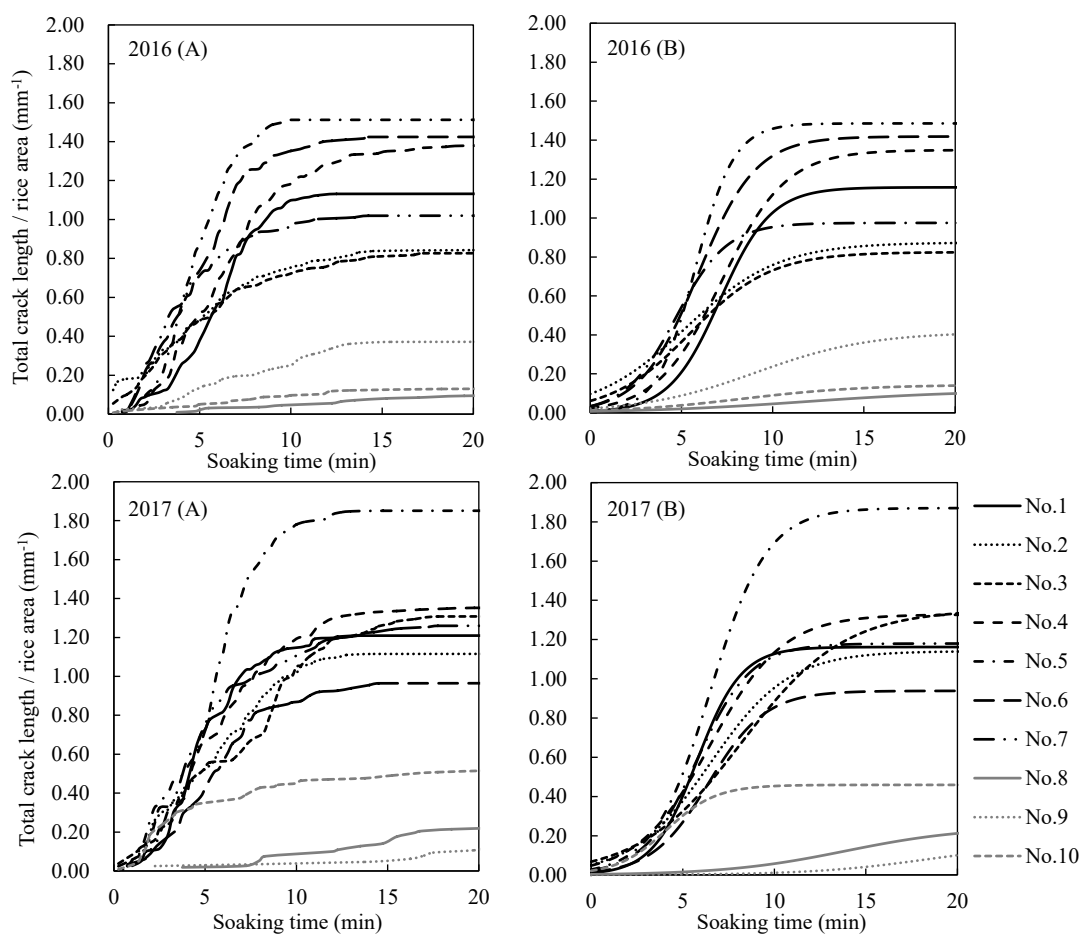


Fig. 4 Comparison of (A) measured value and (B) model of crack increase.

また、品種間差と同程度に年次間差も大きく観察され、栽培された気象条件によって水浸裂傷の発生パターンが変化することが示唆された。酒造好適米の中では品種間差が顕著に表れる結果となった。No. 5 雄町については二ヶ年ともに最大総裂傷長が最も長く、特徴的な結果を示した。一般的に割れが多いことが知られる No. 1 祝については、最大総裂傷長は全品種の平均的な値を示し、No. 2 山田錦や No. 3, 4 五百万石についても多くの水浸裂傷が発生することが明らかになった。

水浸裂傷の増加曲線の形状は S 字型を示す特徴が観察された。特に No. 1 祝については S 字型の形状が明瞭であり、No. 2 山田錦はその傾向が比較的弱いことが確認された。既報⁹⁾

によると、酒造好適米を浸漬させた場合、浸漬米重量の増加曲線は S 字型の形状を描くことが報告されている。前述の通り、水浸裂傷が白米表面積を増加させ、吸水速度に影響を与えるという仮説に基づけば、水浸裂傷の増加曲線の形状が浸漬米重量の増加曲線の形状に影響を与えていることが推察される。

ロジスティック方程式への回帰分析 2016 年産と 2017 年産の 10 種の材料による総裂傷長増加の実測値を式 1 で示したロジスティック方程式で回帰した結果を Fig. 4B、Table 2 に示した。いずれの試料においても決定係数 (R^2) の値が高く、ロジスティック方程式を使用することで二ヶ年ともに非常に高い精度で近似可能であることが確認された。酒造好適米の決定係数はいずれも 0.98 を超える高い値を示したが、一般米には決定係数が 0.95 を下回るものがあつた。これは、一般米の裂傷発生頻度が低いことから、実測値と予測値の誤差が相対的に大きくなったためと考えられる。また、 Δt についてはいずれも -0.60 sec と計算されたことから、定数として扱うことが可能であると判断された。

Table 2 Constant parameters of crack increase models.

No.	2016					2017				
	K	r	L_0	Δt	R^2	K	r	L_0	Δt	R^2
1	1.158	0.717	0.011	-0.60	0.997	1.162	0.823	0.016	-0.60	0.997
2	0.874	0.396	0.119	-0.60	0.992	1.140	0.467	0.067	-0.60	0.992
3	0.825	0.458	0.078	-0.60	0.989	1.353	0.357	0.083	-0.60	0.989
4	1.349	0.566	0.031	-0.60	0.995	1.328	0.505	0.063	-0.60	0.995
5	1.486	0.938	0.011	-0.60	0.996	1.871	0.643	0.041	-0.60	0.996
6	0.975	0.714	0.049	-0.60	0.984	0.939	0.644	0.021	-0.60	0.984
7	1.419	0.631	0.048	-0.60	0.995	1.180	0.678	0.037	-0.60	0.995
8	0.115	0.223	0.009	-0.60	0.948	0.245	0.302	0.004	-0.60	0.948
9	0.415	0.320	0.026	-0.60	0.975	0.162	0.316	0.001	-0.60	0.975
10	0.144	0.300	0.013	-0.60	0.978	0.459	0.736	0.032	-0.60	0.978

Fig. 5 に最大総裂傷長 (K) と総裂傷長増加速度 (r) の二次元プロットを示した。二ヶ年ともに一般米は K 、 r が共に小さく、散布図の左下にマッピングされた。ただし、2017 年産 No. 10 コシヒカリについては浸漬初期の総裂傷長が比較的長いことから、 r が過大評価された可能性がある。No. 5 雄町については、二年連続で散布図の右端にマッピングされ、総裂傷長の最大値が最も大きい品種であることが明確となった。年次間でプロット位置にやや差異が見られるが、雄町は米粒毎に心白の位置やサイズが大きく異なる品種特性を持ち、年次間差が強く表れたものと考えられる。

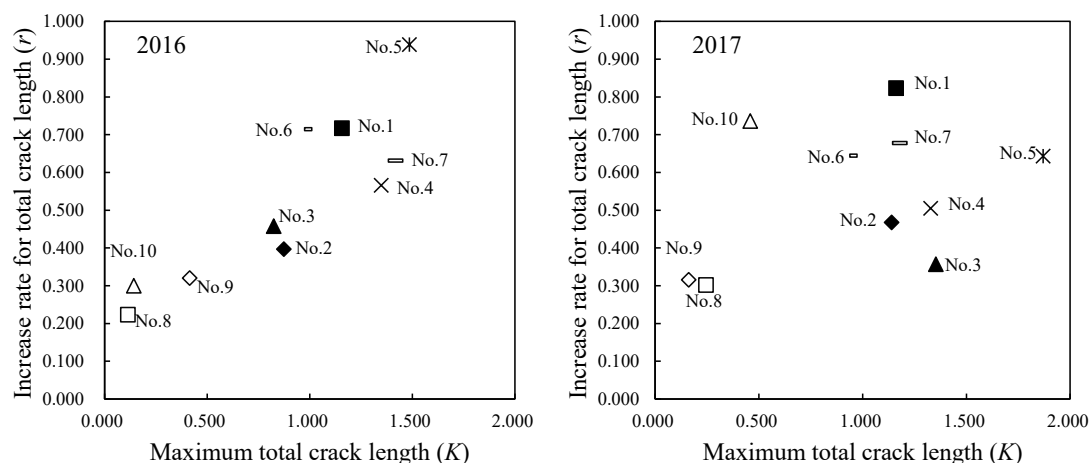


Fig. 5 The relationship between Maximum total crack lengths (K) and increase rates for total crack length (r).

No. 2 山田錦、No.3, 4 五百万石については、酒造好適米の中で総裂傷長増加速度、最大総裂傷長ともに比較的小さい傾向が示された。これらは多くの酒造メーカーで使用されている改良品種であり、吸水制御が比較的容易である特徴を持つことが知られているが、原料処理適性の高さを重視して育種選抜が行われた結果、水浸裂傷の発生が比較的抑制される品種として確立されたと推察される。

No. 3, 4 五百万石については、産地が異なる 2 試料であったが、二ヶ年ともに、No. 4 の福井県産が No. 3 の京都府産と比較して右上にマッピングされ、栽培環境によって水浸裂傷発生特性に差異が生じることが示された。また二点のプロット間距離は品種間差と同程度の距離であることから、水浸裂傷発生は品種特性と気象条件の両方に大きく影響を受けることが示唆された。品種特性と気象影響の定量評価のためには、同一気象条件下で育成された多品種間の裂傷発生の違いや、異なる気象条件下で育成された同一品種の裂傷発生の違いを詳細に検証する必要があると考えられる。

水浸裂傷が浸漬吸水率に与える影響 2017 年産の酒造好適米 7 点について、吸水性試験の結果を Table 3 に、浸漬吸水率と K 、 r の相関表を Table 4 に示した。Table 4 の結果から、 K と吸水率の間には有意な相関関係は認められなかったが、 r と吸水率の間には正の相関関係が確認された。また、相関係数の値から、特に吸水初期において、 r と吸水率に強い正の相関があることが明らかとなった。

これらの結果から、白米浸漬において、吸水速度は吸水初期の裂傷発生に強く依存しており、最大吸水量は裂傷発生との相関が比較的弱いことが推察された。つまり、初期の吸水速度は個々の米粒が持つ水分浸透力よりも、裂傷によって生じる白米と浸漬水が接触する面積の増加が律速となり、最大吸水量は水分を保持することができる空隙容量によって

決定されることが考えられる。

吸水率と r の相関関係が時間経過とともに弱くなる現象については、初期の裂傷発生時は裂傷によって露出した白米表面が非吸水部位である可能性が高いのに対し、浸漬中期以降は既に吸水した部位の周辺でも裂傷が発生するため、裂傷発生による露出面の増加が吸水速度に与える影響が相対的に低下するためと考えられる。

Table 3 The result of water absorption rates (2017).

No.	water absorption rate (%)			
	10 min	20 min	60 min	120 min
1	31.9	34.4	35.3	35.5
2	26.2	31.1	32.3	32.3
3	22.8	30.5	32.7	32.0
4	24.8	29.9	31.4	31.2
5	28.3	32.8	34.6	34.4
6	26.5	32.3	33.7	33.0
7	28.0	32.0	32.1	32.2

Table 4 The correlation table of water absorption rates with crack parameters (K , r) (2017).

	water absorption rate (%)			
	10 min	20 min	60 min	120 min
K	-0.008	0.001	0.208	0.208
r	0.943**	0.889**	0.661	0.757*

* $p < .05$, ** $p < .01$

水浸裂傷と糊化温度、蒸米粘弾性特性、蒸米消化性との関係 2017 年産の酒造好適米 7 点について、DMA、DSC、酵素消化性試験の結果を Table 5、 K 、 r との相関表を Table 6 に示した。DMA との相関関係では、 K との相関係数が r と比較して高い傾向が認められた。本試験では一晩浸漬の後に蒸きょうを行っていることから、浸漬米の水浸総裂傷長は最大に達しており、蒸米には K の品種間差が強く反映されたと推察される。

Table 5 Results of DMA, DSC, and digestion test of steamed rice (2017).

No.	DMA				DSC		
	E' (kPa)	E'' (kPa)	$\tan\delta$	η (kPa·s)	T_p (°C)	T_o (°C)	T_c (°C)
1	9376	661	0.07	34.36	61.95	54.89	69.95
2	8556	940	0.12	48.88	57.96	50.39	66.25
3	11067	942	0.10	49.02	64.35	58.17	72.44
4	11134	867	0.10	45.06	63.98	57.24	72.45
5	8323	1109	0.14	57.69	58.34	53.00	65.13
6	11615	844	0.11	43.91	59.57	53.15	67.55
7	10547	967	0.10	50.26	64.66	59.26	72.21

No.	Digestion test of steamed rice						
	ABS (%)	Be	Glc (%)	Brix (%)	F-N (ml)	UV260	UV280
1	36.65	6.15	5.29	11.40	0.55	2.81	3.39
2	35.50	5.60	5.01	10.65	0.56	2.84	3.28
3	35.30	5.20	4.84	9.60	0.60	3.01	3.67
4	31.90	5.15	4.70	9.30	0.59	2.92	3.51
5	36.50	6.05	5.23	11.10	0.51	2.96	3.40
6	35.55	5.80	5.13	10.85	0.54	2.77	3.29
7	33.65	5.20	4.75	9.45	0.62	3.05	3.53

E' , storage modulus; E'' , loss modulus; $\tan\delta$, loss tangent; η' , viscosity; T_p , peak temperature; T_o , onset temperature; T_c , conclusion temperature; ABS, water absorption rate of steamed rice; Be, Baume degree; Glu, glucose; Brix, sugar concentration; F-N, formol nitrogen; UV260, ultraviolet absorption (260 nm); UV280, ultraviolet absorption (280 nm)

Table 6 The correlation table of DMA, DSC and digestion test of steamed rice with crack parameters (K, r) (2017).

	DMA				DSC		
	E' (kPa)	E'' (kPa)	$\tan\delta$	η (kPa·s)	T_p (°C)	T_o (°C)	T_c (°C)
K	-0.509	0.663	0.594	0.663	-0.148	0.003	-0.260
r	-0.216	-0.420	-0.330	-0.421	-0.123	-0.075	-0.184

	Digestion test of steamed rice						
	ABS (%)	Be	Glc (%)	Brix (%)	F-N (ml)	UV260	UV280
K	0.149	0.164	0.131	0.060	-0.359	0.504	0.263
r	0.324	0.661	0.575	0.572	-0.279	-0.308	-0.411

K は貯蔵弾性率 (E') と負の相関、損失弾性率 (E'') と正の相関、損失正接 ($\tan\delta$) と正の相関を示した。これらの結果から、浸漬米の裂傷発生によって、蒸米の弾性が低下し、粘性的性質が増加すると考えられる。水浸裂傷が増加すると、米粒内部のデンプンが外側に溶出しやすくなり、さばけが悪く、べたつきのある蒸米になりやすい特性が生じる。裂傷の一部は蒸きょう時に再接着することが観察されているが、本試験の結果から、再接着が起こった場合でも蒸米の弾性特性は低下することが示唆された。

K 、 r と DSC 糊化ピーク温度 (T_p)、糊化開始温度 (T_o)、糊化終了温度 (T_c) との相関係数は 0 に近い結果となった。糊化温度は白米が持つ糊化特性を評価する指標であり、糊化温度が高いと高温で糊化する特性、糊化温度が低いと低温で糊化する特性があると判断できる¹⁵⁾。水浸裂傷についてはアミロペクチン長鎖/短鎖比によって変化する溶解性¹⁶⁾とは相関が低く、むしろデンプン粒の疎密の偏りや米粒形状の差が浸漬水流入時の力学的均衡の崩れ方に影響を与えることで発生するものであると考えられる。

蒸米消化性試験の結果では、 r が蒸米の溶解性を示すボーメ度 (Be)、グルコース (Glc.)、ブリックス度 (Brix) と正の相関を示した。このことから、水浸裂傷の発生速度が速い品種では、蒸米の溶解性が高くなる傾向があることが明らかとなった。DSC との相関関係では最大総裂傷長とデンプン糊化温度が無相関であったが、蒸米消化性試験において総裂傷長増加速度と蒸米の溶解性との間に正の相関が認められた理由については、水浸裂傷の多い試料は消化液中でほぐれやすく、消化液と蒸米の接触面積が増加することで酵素分解が促進されるためと考えられる。

r との相関関係が顕著に表れた理由については、動的粘弾性試験とは異なり、吸水率を一定にするための限定吸水を行ったことで総裂傷長が最大値に達していないことが一因と推察される。本試験での画像解析は最大吸水に至るまでの過程の撮影であったが、最大吸水に到達する以前に水切りを行った場合、その後の水浸裂傷の発生パターンがどのように変化するかについては、今後の追試験によって検証する必要があると考えられる。

総合考察 以上の結果から、水浸裂傷についての試料間差を K 、 r の二つのパラメータによって定量評価することに成功し、以下の 3 点が明らかとなった。

- ① 酒造用原料米についての水浸裂傷特性は二ヶ年において一定の一貫性を示した。
- ② 水浸総裂傷長の増加速度は吸水速度と正の相関関係を示した。
- ③ 水浸裂傷発生は糊化温度との相関関係は弱かったが、蒸米の軟化や消化性成分の増大に寄与することが示された。

水浸裂傷パラメータ K 、 r は二年間で概ね一貫した傾向を示したものの、一定の年度間差が存在した。また、No. 3, 4 の五百万石については同一年度内においても K 、 r に差異が認められたことから、栽培時の気象条件や栽培管理手法による影響を受けることが示唆された。水浸裂傷に影響を及ぼす主要因は米粒の剛度であると考えられることから、登熟過程での籾の充実度が水浸裂傷発生と関連すると予想される。

この点については、出穂後の遮光による未熟粒の増加や早期落水による登熟停止が水浸裂傷の発生を促進するとの報告がある¹⁷⁾。同化産物の転流が不足し充実度が低下した場合に米粒の剛度が低下し、水浸裂傷が発生しやすくなると推察される。登熟期の平均気温はデンプン側鎖の長鎖短鎖比に影響を与えることで DSC の糊化ピーク温度と強い相関関係を示すことが報告されているが¹⁶⁾、本試験では K 、 r と糊化ピーク温度との相関性は低い結果

となった。登熟期の温度条件と水浸裂傷発生の関連性を解明するためには、同一品種で登熟環境が異なる試料について詳細な解析が必要であると考えられる。

水浸裂傷の増加は白米の浸漬水接触面を拡大させることで吸水速度の増加に寄与していると考えられるが、白米粒が本来持つ水の吸着力の違いも大きな影響因子となっており、水浸裂傷の効果は限定的である可能性がある。吸水速度の増加については、モデル式への回帰によって定量的に評価する方法が水間らによって報告されている⁹⁾。本研究で導出された水浸裂傷発生に関するパラメータを説明変数として、水間らの手法で算出可能な吸水特性パラメータを関数表現することで、関数内に現れる係数や誤差項から、裂傷増加の影響を除外した白米粒本来の浸漬水吸着力を評価できる可能性があると考えられる。

また、本試験では 15℃ 浸漬条件下でのみの結果であったが、過去の研究では浸漬温度の変化が水浸裂傷の発生量に影響を与えることが報告されている¹⁸⁾。つまり、本研究で示した K 、 r は独立したパラメータではなく、浸漬温度によって変動する値であると考えられる。今後は K 、 r の浸漬温度依存性を解析しモデル式を拡張することで、より精密な裂傷発生、吸水速度予測モデルの構築が可能になると期待される。

さらに、本試験では整粒のみに着目して水浸裂傷発生の特性把握を試みたが、実際の白米には砕粒や胴割粒が混在している。既往研究では、整粒、胴割粒、砕粒によって水浸裂傷の発生パターンが異なることが報告されている¹⁸⁾。今後は砕粒、胴割粒を用いた場合の K 、 r を算出し、白米全体に占める整粒、砕粒、胴割粒の比率から、総合的な水浸裂傷発生予測モデルの構築を検討する必要があると考えられる。

摘要

本章では、浸漬過程で発生する水浸裂傷の定量評価を実施した。観察にはデジタルマイクロスコープを使用し、得られた浸漬画像を ImageJ により解析した。水浸裂傷長の経時変化はロジスティック方程式により高精度で近似可能であることが明らかとなった。さらに、当該方程式のパラメータから最大総裂傷長および総裂傷長増加速度を定義した。総裂傷長の増加速度は初期吸水速度と正の相関を示し、裂傷発生による浸漬水との接触面積拡大が吸水速度に影響を与えることが示唆された。最大総裂傷長は蒸米の弾性と負の相関を示し、裂傷発生が蒸米軟化に寄与すると考えられた。これらの水浸裂傷関連パラメータは糊化温度との相関は低いものの、蒸米消化性試験におけるデンプン溶解成分と正の相関を示した。このことから、水浸裂傷の発生は、蒸米の崩壊性上昇を経て間接的に、もろみ中での溶解性向上に寄与する可能性が示唆された。

参考文献

- 1) 国税庁ホームページ 平成 28 酒造年度における清酒の製造状況等について
<https://www.nta.go.jp/taxes/sake/shiori-gaikyo/seizojokyo/2016/01.htm>

- 2) 長戸一雄, 江幡守衛 : 日作紀, 28, (1), 46-50 (1959)
- 3) 熊谷知栄子, 黒柳嘉弘, 野白喜久雄 : 醸協, 71, (9), 718-722 (1976)
- 4) 花本秀生, 中井進, 中沢英五郎, 清水正, 竹村成三 : 醸協, 71, (11), 890-892 (1976)
- 5) 吉澤淑, 石川雄章, 今村一臣, 武田荘一, 藤江勇 : 醸協, 69, (5), 315-318 (1974)
- 6) 熊谷知栄子, 黒柳嘉弘, 秋山裕一, 野白喜久雄 : 醸協, 71, (10), 788-791 (1976)
- 7) 酒米研究会 : 酒造用原料米全国統一分析法, (1996)
- 8) 古浦二郎, 玉置雅彦, 荒巻功, 猪谷富雄 : 醸協, 105, (8), 539-545 (2010)
- 9) 水間智哉 : 醸協, 104, (5), 322-330 (2009)
- 10) 吉田充, 堀金 明美 : 醸協, 103, (1), 10-16 (2008)
- 11) 佐藤稔英, 中山繁喜, 米倉裕一, 平野高広, 山口佑子, 遠山良 : 醸協, 106, (2), 103-111 (2011)
- 12) 村田敏, 小出章二, 河野俊夫 : 農機誌, 54, (1), 67-72 (1992)
- 13) 水間智哉, 古川幸子, 小林弘美, 清川良文, 若井芳則 : 醸協, 95, (2), 133-139 (2000)
- 14) 豊川哲也 : 醸協, 110, (10), 678-686 (2015)
- 15) J.W. Donovan : Biopolymers, 18, 263-275 (1979)
- 16) 奥田将生, 橋爪克己, 上用みどり, 沼田美子代, 後藤奈美, 三上 重明 : 醸協, 105, (2), 97-105 (2010)
- 17) 家中容子, 星一好 : 栃木県農業試験場 研究成果集第 35 号, (2017)
- 18) 小出章二, 田子雅則, 西山喜雄 : 日本食品工学会誌, 48, (1), 69-72 (2001)

第3章

酒造好適米の白米構造と浸漬条件が水浸裂傷発生に及ぼす影響の定量的評価

緒言

酒造好適米はその中心部に心白と呼ばれる疎な構造を持つことから、一般米とは異なる様々な特性を有することが知られている。例えば、一般米と比較して吸水速度が速く含水率の増加パターンが異なる¹⁾ことや、麴の破精込みが良好である²⁾ことが報告されている。一方で、心白の存在は白米強度の低下を引き起こし、原料処理工程における割れが発生しやすくなるという欠点も存在する。過剰な割れが発生した場合、白米内部のデンプン粒が外側に露出することとなり、蒸きょう時の糊化によって粘着性の高い蒸米となる³⁾。これは外硬内軟という醸造における理想的な蒸米の状態と大きく異なるものであり、麴の破精込み不足による力価低下や溶解性の上昇によるもろみの発酵急進を引き起こす可能性があることから、割れは可能な限り低減させることが望ましいと考えられる。

特に浸漬時に発生する割れ（水浸裂傷）は、白米内部の部分的な水分膨張率の差が曲げ応力を生み出し、この応力が白米の持つ強度を上回ることによって発生すると報告されている^{4,5)}。酒造好適米は心白を持つことから密度が低く⁶⁾、一般米と比較して強度が弱い⁷⁾ため、水浸裂傷が発生しやすいと予想される。また、米粒は精米によってサイズが縮小していくが、この過程で白米の長さ、幅、厚さのいずれの方向が優先的に減少するかによって、精米後の形状特性が変化する。建築分野における梁の構造力学では、部材の長さ、幅、厚さのバランスによって応力が変化する⁸⁾ことが知られており⁷⁾、白米の裂傷発生においても形状と水浸裂傷の発生傾向に関連があると推察される。白米の膨張要因としては熱⁸⁾と水分⁹⁾が挙げられるが、特に水分の影響が大きいとされている⁴⁾。吸水過程では含水率変化が急激に生じるため、水分膨張による応力が著しく増大すると考えられる。

前章において、水浸裂傷の評価にロジスティック方程式を応用したモデルを提案し、水浸裂傷の発生量や発生速度の定量化を試みた。このモデルは年度、品種、産地間差を表現できるものであったが、現象論的理解に留まり理論構築が不十分であったため、パラメータの解釈が難しく、また理論誤差を補正するための追加パラメータが必要であるという課題が残されていた。そこで本章では、前章のモデルを改良した新型水浸裂傷増加モデルを構築し、理論的裏付けや旧型モデルとの性能比較を行うとともに、白米構造および浸漬条件が水浸裂傷に与える影響について定量的な評価を行った。

材料と方法

原料米 2018年産および2020年産の酒造好適米7試料、2019年産の酒造好適米2試料を本実験に供した（Table 1）。

Table1 Rice samples used in this study.

No.	Cultivars	Region of origin	year		
			2018	2019	2020
1	<i>Iwai</i>	Kyoto	○		○
2	<i>Yamadanishiki</i>	Hyogo	○	○	○
3	<i>Gohyakumangoku</i>	Kyoto	○		○
4	<i>Gohyakumangoku</i>	Fukui	○	○	○
5	<i>Omachi</i>	Okayama	○		○
6	<i>Ginfubuki</i>	Shiga	○		○
7	<i>Okuhomare</i>	Fukui	○		○

原料処理、外観品位分析 玄米試料について、HS-4 試験精米機（チョダエンジニアリング（株）社製）を用いて精米歩合 60 %まで精米を行った。精米には金剛ロール C-60 を使用し、ロール回転数は玄米から精米歩合 70 %までを 1500 rpm、精米歩合 70 %から 60 %までを 1300 rpm に設定した。玄米および白米の長さ、幅、厚さの測定には穀粒判別機 RGQI20A（サタケ社製）を使用した。2018 年産および 2020 年産白米試料は水分 12%に調湿し、2019 年産白米試料については 8 %, 10 %, 12%, 14%の 4 条件に調湿した。白米試料は各試験実施まで 15℃ 恒温槽内で保管し、全ての試験は収穫から 4 ヶ月以内に完了した。

白米浸漬画像の観察、解析 15℃ 恒温槽内で保管した各白米試料から整粒 6 粒を選定し、自作の透明プラスチック製容器に速やかに封入した（Fig. 1）。プラスチック容器には浸漬水流入用の穴を設け、浸漬中の浮上防止のためおもりを取り付けた。ガラスシャーレに蒸留水を注入し、白米封入容器を水中に完全に沈めた時点を浸漬開始時点と定義した。

浸漬水温は、2018 年産および 2019 年産試料では 15℃ に固定し、2020 年産試料では 5℃, 10℃, 15℃, 25℃ の 4 条件で実験を行った。画像撮影にはデジタルマイクロスコープ VHX-700F（KEYENCE 社製）を使用し、15 秒間隔で 40 分間、合計 160 枚の連続画像を取得した。各試料について 5 回の独立した実験を実施し、合計 30 粒分の画像データを収集した。

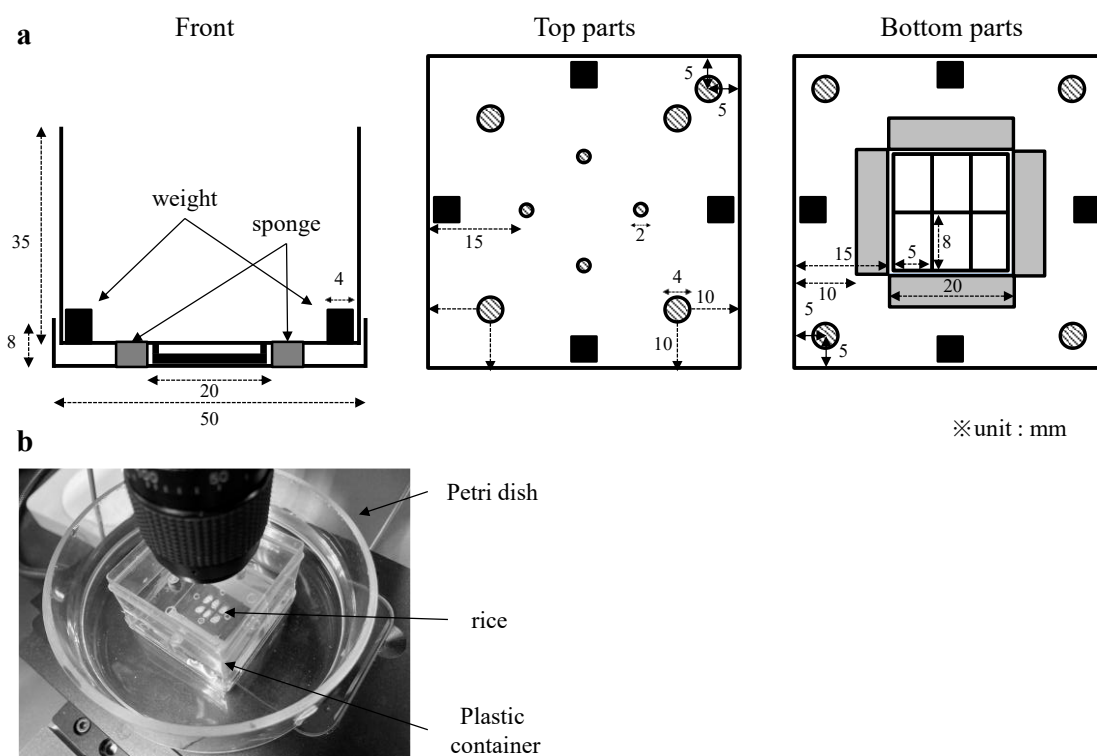


Fig. 1 Plastic container used for water absorption test. (a: Schematic diagram and b: Actual object)

前章と同様に、画像上で線状に観察される割れ（横割れ）を解析した（Fig. 2a）。具体的には、吸水進行に伴い画像上に出現する黒色線を水浸裂傷として、画像解析ソフト ImageJ を用いて直線トレースし、その総長を総裂傷長（mm）として定量化した。また、面として観察される割れを縦割れと定義し、白米投影面積に対する面積比率（縦割れ面積率）として評価した（Fig. 2b）。

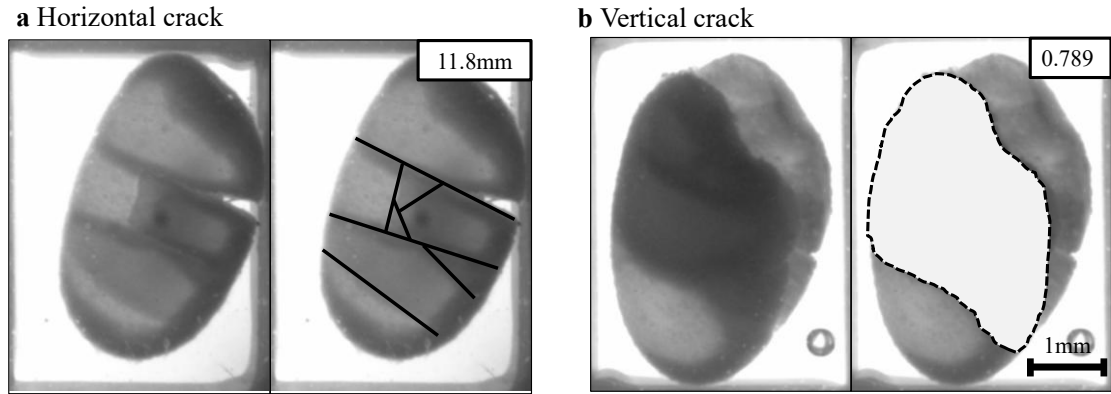


Fig. 2 Quantitative evaluation of horizontal and vertical cracks.

(Black lines (in a) and white area surrounded by black dotted line (in b) show traces of cracks.

Values in the horizontal and vertical crack image correspond to the length of cracks and the ratio of the cracked area to the total area, respectively.)

さらに、浸漬開始時の画像から心白サイズを分析した。心白部は画像上で黒色領域として識別できるため、その面積を白米投影面積に対する比率（心白面積率）として算出した。米粒サイズの個体差による影響を排除するため、全ての計測値について米粒の長さを 4、幅を 2 とした基準化補正を行い、Fig. 2 を除く全ての図表には補正済みの値または補正值に基づく解析結果を示した。

水浸裂傷増加モデルの構築および回帰精度の評価 前章で提案したロジスティック方程式ベースのモデル（式 1）を改良し、新たな水浸裂傷増加モデルを構築した。

$$L(t) = \frac{L_{max}}{1 + \left(\frac{L_{max}}{L_0} - 1 \right) e^{-b(t-\Delta t)}} \quad (1)$$

<variable>
 L : Total crack length
 t (sec) : Soaking time
 <constant>
 L_{max} : Maximum total crack length
 b (sec⁻¹) : Crack increase rate
 L₀ : Initial crack length
 Δt (sec) : Time error

本研究で開発した新型モデルと旧型モデルの性能を比較するため、各試料 30 粒分の時間-総裂傷長実測値に対して最小二乗法によるフィッティングを実施し、モデルパラメータおよび二乗平均平方根誤差（RMSE）を算出した。

心白面積率とモデルパラメータの関連性を解析する場合には特別な手法を採用し、30 粒からランダムに選択した 28 粒を心白面積の大きさに基づいて 4 グループ（各 7 粒）に分類し、各グループの時間-総裂傷長データに対してモデルを適用した。全ての統計解析処理にはプログラミング言語 Python3 のオープンソースライブラリ scikit-learn を使用した。

結果と考察

浸漬状態の画像観察 デジタルマイクロスコープ VHX-700F で撮影した浸漬中の白米状態について、2020 年産 No. 2 山田錦と No. 4 五百万石の代表的な画像を Fig. 3 に示した。浸漬の進行に伴い、水が白米内部へと浸透し、浸漬部位が白色から黒色へと変化する様子が明瞭に観察された。浸漬開始 10 分後の画像からは多数の水浸裂傷が発生しており、横割れと縦割れが同時に生じていることが確認された。

これらの水浸裂傷発生部位を起点として白米の色調が白から黒へと急速に変化する現象が観察され、水浸裂傷発生箇所が浸漬水との新たな接触面となることで吸水速度の上昇を促進していることが示唆された。また、No. 2 山田錦と No. 4 五百万石の間では水浸裂傷の発生量や発生タイミングに顕著な差異が認められ、2020 年産試料においても前章と同様に、水浸裂傷発生パターンに品種間差が存在することが明らかとなった。

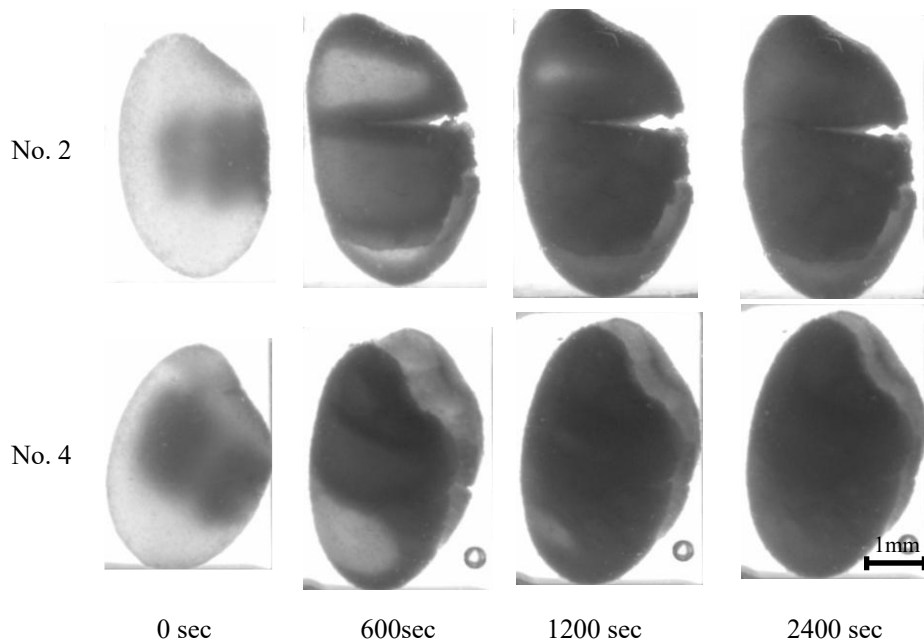


Fig. 3 Image of the rice soaking process taken by VHX-700F in 2020.

新型モデルの定義 本研究では、水浸裂傷増加を記述する新型モデルを式 2 のように定義した。式 2 は 3 因数の積で構成され、それぞれが水浸裂傷増加のメカニズムを反映している。第一因数の裂傷増加率 b は、各試料が持つ総裂傷長増加速度 dL/dt のポテンシャルを表す。水浸裂傷は吸水時に生じる白米の腹側と背側の膨張率差に起因する応力によって発生することが報告されている⁴⁾。このため、水浸裂傷が発生すると一時的に応力が緩和され、次の裂傷発生までには一定の時間間隔が生じると考えられる。結果として、米粒内の水分拡散速度や膨張率の試料間差異が水浸裂傷の連続発生速度に影響を与えるため、このポテンシャルを b として定量化した。

$$\frac{dL}{dt} = b \left\{ r + (1-r) \frac{L}{L_{max}} \right\} (L_{max} - L) \quad (2)$$

<variable>
L : Total crack length
t (sec) : Soaking time
 <constant>
L_{max} : Maximum total crack length
b (sec⁻¹) : Crack increase rate
r : Curve shape constant

第二因数および第三因数は総裂傷長増加速度を抑制する要因を表現している。第二因数には曲線形状定数 r を導入し、 r は 0 から 1 の範囲の値をとる。この結果、第二因数は r ($L = 0$) から 1 ($L = L_{max}$) の範囲で変動する。 r が小さい場合、総裂傷長の増加に伴って増加速度が上昇し、 r が大きい場合、総裂傷長によらず増加速度は比較的一定となる。

総裂傷長の増加は米粒と浸漬水の接触面積を拡大させ、吸水速度を促進する。また、米粒の含水率上昇は圧砕剛度を低下させるとの報告があり¹⁰⁾、総裂傷長増加速度と圧砕剛度には因果関係があると推察される。この仮説によれば、圧砕剛度の時間変化が大きい試料では r は 0 に近く、変化が小さい試料では 1 に近い値を示すと考えられる。 r が総裂傷長の時間変化に与える影響として、 r が 0 に近い場合は特定の時間帯で増加速度が上昇後に減少する S 字型曲線、 r が 1 に近い場合は時間経過とともに単調に増加速度が低下する $\sqrt{\quad}$ 型曲線になると予測される。

第三因数は総裂傷長が最大値に近づくにつれて増加速度が低下する制限要因を表している。水浸裂傷の発生が含水率増加に寄与するとの考えに基づき、吸水時間に対して含水率の上限が存在し、含水率がその上限に近づくにつれて白米内部の膨張率差が減少することから、このような制約条件を設定した。

式 2 の一般解は式 3 となる。新型モデルは旧型モデルを発展させたものであり、特に第二因数に新たな理論的考察を導入した点が特徴である。旧型モデルの微分方程式は新型モデルの曲線形状定数 r を 0 とした特殊ケースに相当する。そのため旧型モデルでは全ての時間-総裂傷長曲線を強制的に S 字型に適合させることとなり、試料によっては水浸裂傷増加の特性を適切に表現できない可能性があった。新型モデルでは r の導入により曲線形状の柔軟な適合が可能となり、旧型モデルでは把握できなかった試料特性を r を通じて定量化できるようになった。

$$L(t) = L_{max} \frac{1 - e^{-bt}}{1 + c \cdot e^{-bt}} \quad \left(c \equiv \frac{1-r}{r} \right) \quad (3)$$

新旧モデルの性能評価 2018 年産と 2020 年産の白米について、15 °C 浸漬条件下での浸漬時間に対する総裂傷長変化を Fig. 4a に示した。これらの実測値に対して旧型、新型モデルでフィッティングを行った結果および RMSE を Fig. 4b, c に示した。

両モデルとも実測値に高い精度で適合したが、新型モデルを使用した場合の RMSE は旧型モデルと比較して全般的に低値を示し、新型モデルがより優れた適合性能を持つことが

確認された。特筆すべき点として、新型モデルでは旧型モデルに存在した L_0 や Δt といった理論誤差補正パラメータが不要となった。

新型モデルと旧型モデルの主な相違点は曲線形状定数 r の導入であり、このパラメータにより√型から S 字型までの多様な曲線形状を柔軟に表現できるようになり、モデルの適合精度が向上したと考えられる。これらの結果に基づき、以降のモデルフィッティングでは新型モデルを採用することとした。

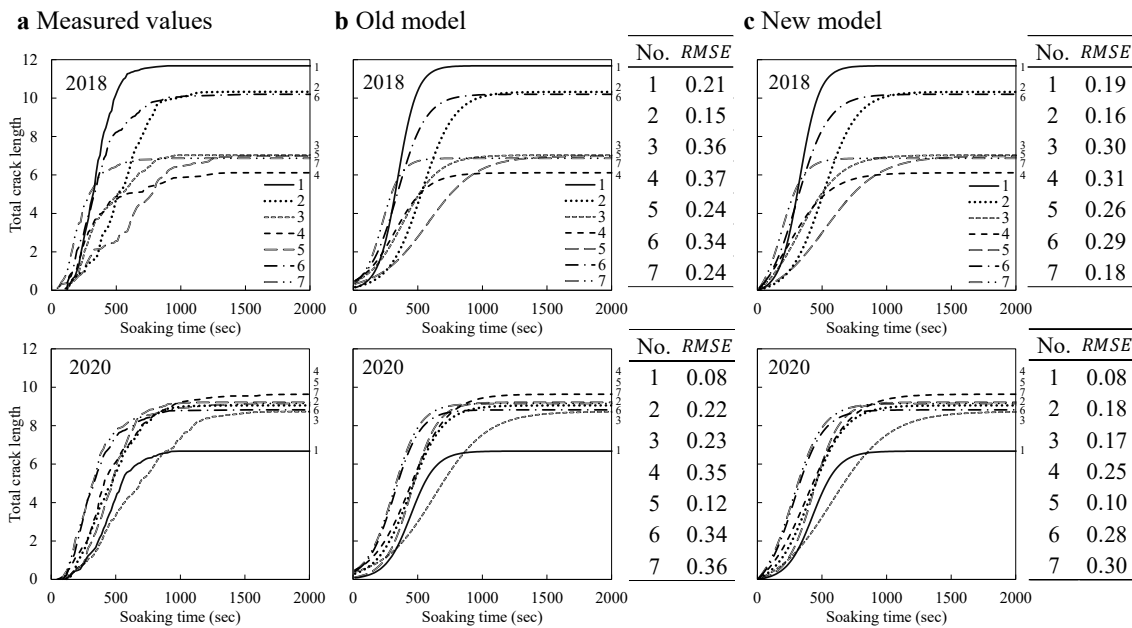


Fig.4 Fitting of old (b) and new (c) crack increase models to measured values (a).

水浸裂傷発生特性の年次変動解析 2018 年産および 2020 年産試料の実測値から得られたパラメータを Fig. 5 に示した。この解析から、 L_{max} （最大総裂傷長）には年次間で顕著な差異が見られるものの、 b （裂傷増加率）と r （曲線形状定数）は No. 5 雄町を除いて年次間で類似した傾向を示すことが明らかとなった。この結果は、水浸裂傷の発生速度に関連するパラメータが各品種に固有の特性であることを示唆している。

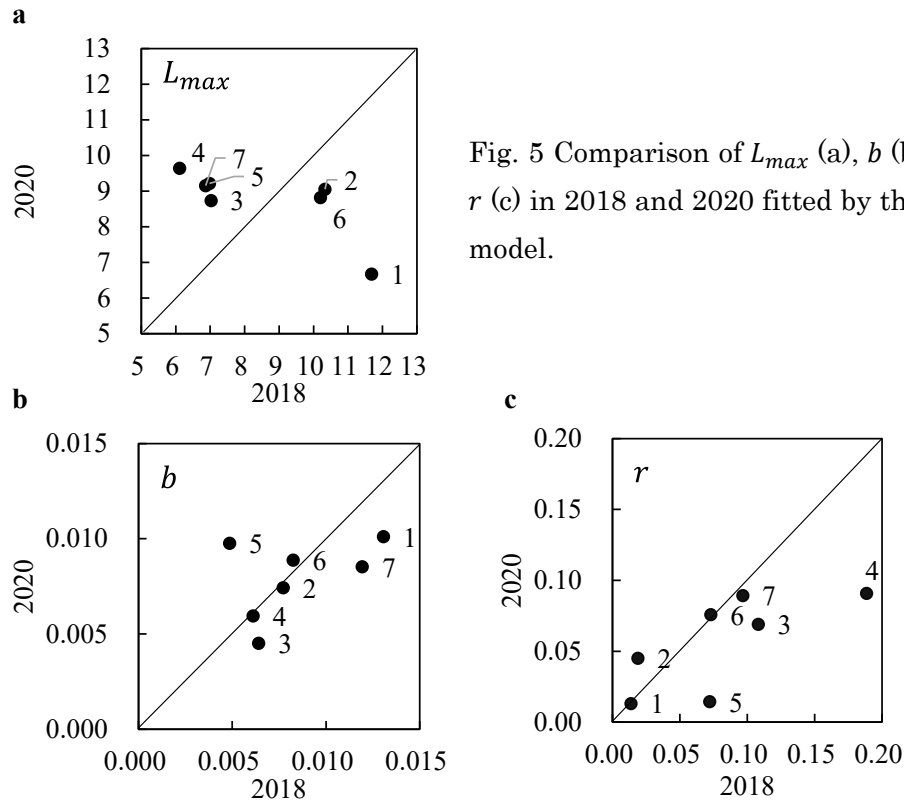


Fig. 5 Comparison of L_{max} (a), b (b) and r (c) in 2018 and 2020 fitted by the new model.

前章においても No. 5 雄町はパラメータの年次間差が大きいことが報告されており、定型的な水浸裂傷発生パターンを持たない特異な品種であることが推察される。また、2020 年産米は 2018 年産米と比較して b 、 r ともに低値傾向を示した。この結果から、各年の気象条件が全試料の水浸裂傷発生パターンに共通の影響を与えていることが示唆された。

水浸裂傷発生特性の浸漬水温依存性解析 2020 年産の No.2 山田錦と No.4 五百万石について、浸漬水温を変化させた場合の総裂傷長増加パターンを Fig. 6 に示した。両試料とも浸漬水温の上昇に伴って総裂傷長の増加速度が顕著に上昇する傾向が確認された。浸漬水温を変化させた場合の 2020 年産試料の総裂傷長変化に対してモデルを適用して得られたパラメータを Fig. 7 に示した。

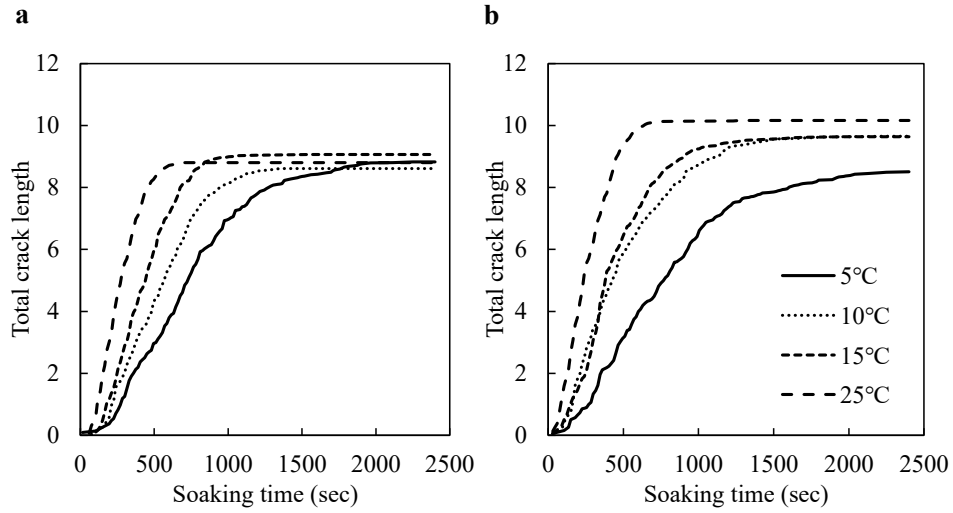


Fig. 6 The Effect of soaking temperatures on the total crack length.
(a: No. 2 Yamadanishiki and b: No. 4 Gohyakumangoku in 2020)

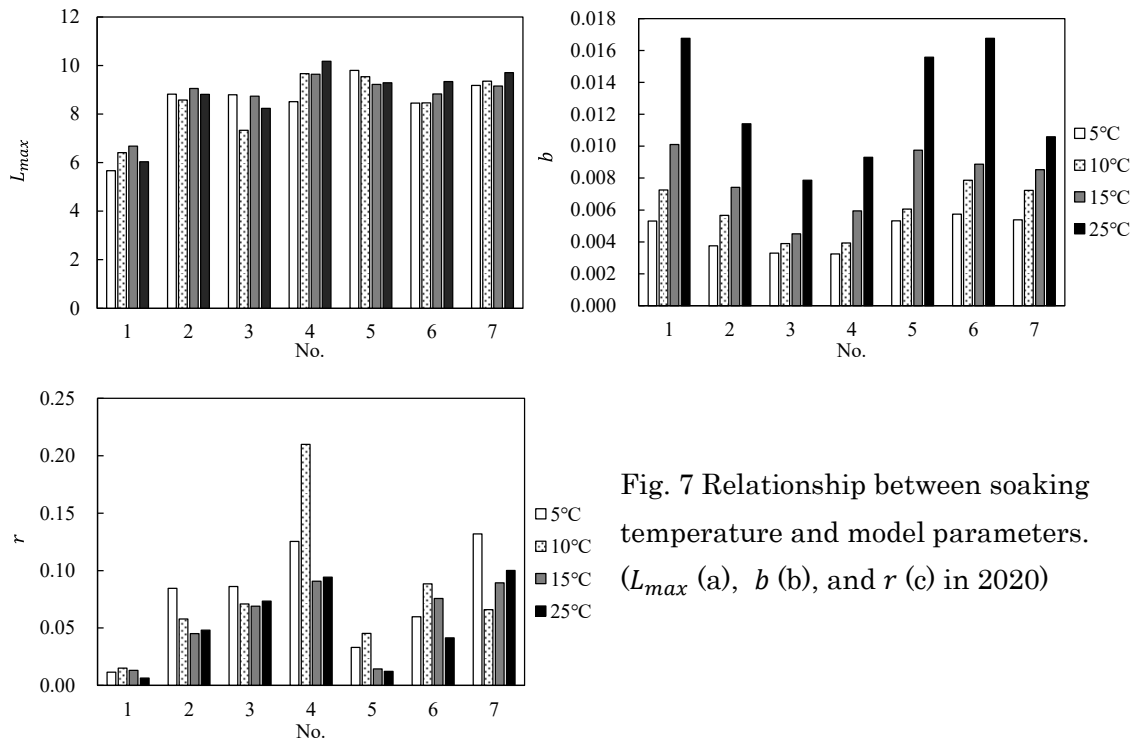


Fig. 7 Relationship between soaking temperature and model parameters.
(L_{max} (a), b (b), and r (c) in 2020)

この解析から、いずれの試料においても L_{max} は浸漬水温に依存せずほぼ一定値を保ち、 b と浸漬水温の間には明確な正の相関関係が認められた。一方、 r については試料間で異なる傾向を示した。水浸裂傷発生が腹側と背側の膨張率差に起因するという前提に立てば、水分拡散速度と水浸裂傷増加速度の間には密接な関連があると推察される。

一般的に拡散現象では、拡散物質の移動速度は分子運動論の観点からアレニウス型の温度依存性を示すことが知られており、この関係性は白米の吸水においても成立することが報告されている¹¹⁾。このことから、水浸裂傷の増加速度も水分拡散、膨張を介して間接的にアレニウス型の温度依存性を示す可能性が考えられる。

そこで、 b の温度依存性を一般的なアレニウス型の式 4 で仮定し、アレニウスプロット (Fig. 8) を作成したところ、全試料において明確な直線関係が確認された。この結果は、裂傷増加率が水分拡散速度と密接に関連していることを強く示唆している。試料間差は傾き (A) と切片 ($\ln b_0$) に類似した特徴として表れ、裂傷増加率の理論最大値 ($T \rightarrow \infty$) が高い試料は温度感受性も高いことを意味している。No. 1 祝と No. 5 雄町は特に高い温度反応性を示すことが明らかとなった。

$$b = b_0 \exp\left(-\frac{A}{T}\right) \quad (4)$$

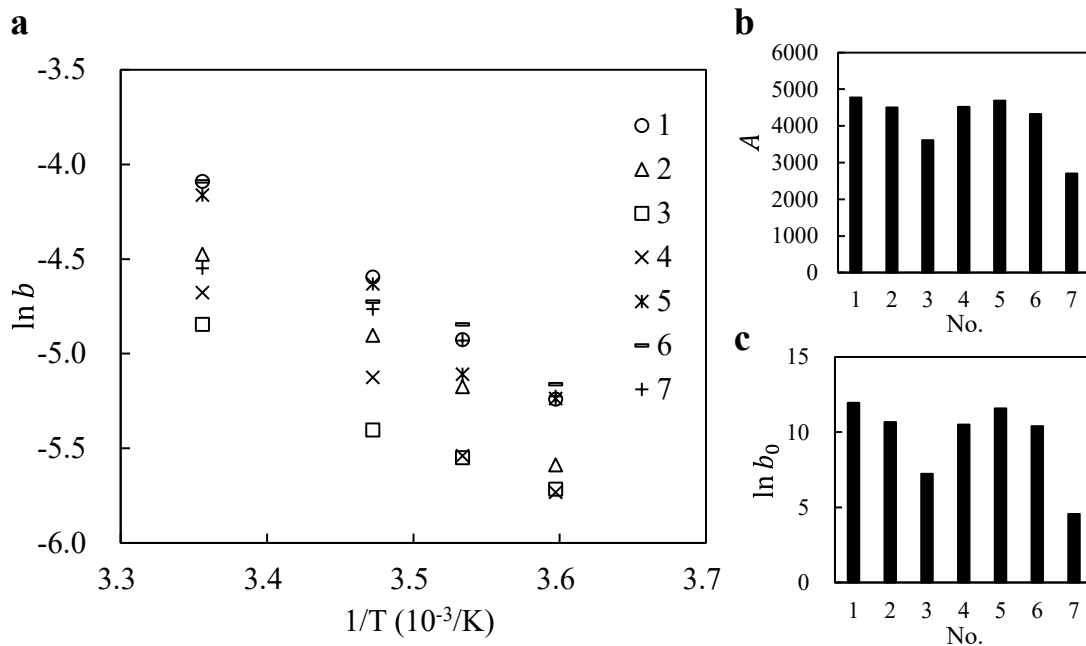


Fig. 8 Arrhenius plot of total crack length (a) and parameter A (b) and $\ln b_0$ (c) in 2020.

水浸裂傷発生特性と白米水分の関係性 2019 年産試料について、白米水分とモデルパラメータの関係性を Fig. 9a に示した。白米水分と L_{max} の間には強い正の相関関係が認められ、 b および r についても同様に正の相関関係が確認された。白米の剛度は含水率の低下に伴って増加するという報告があり¹¹⁾、初期含水率が低い場合は白米の剛性が高まることで水浸裂傷の発生が抑制されると考えられる。

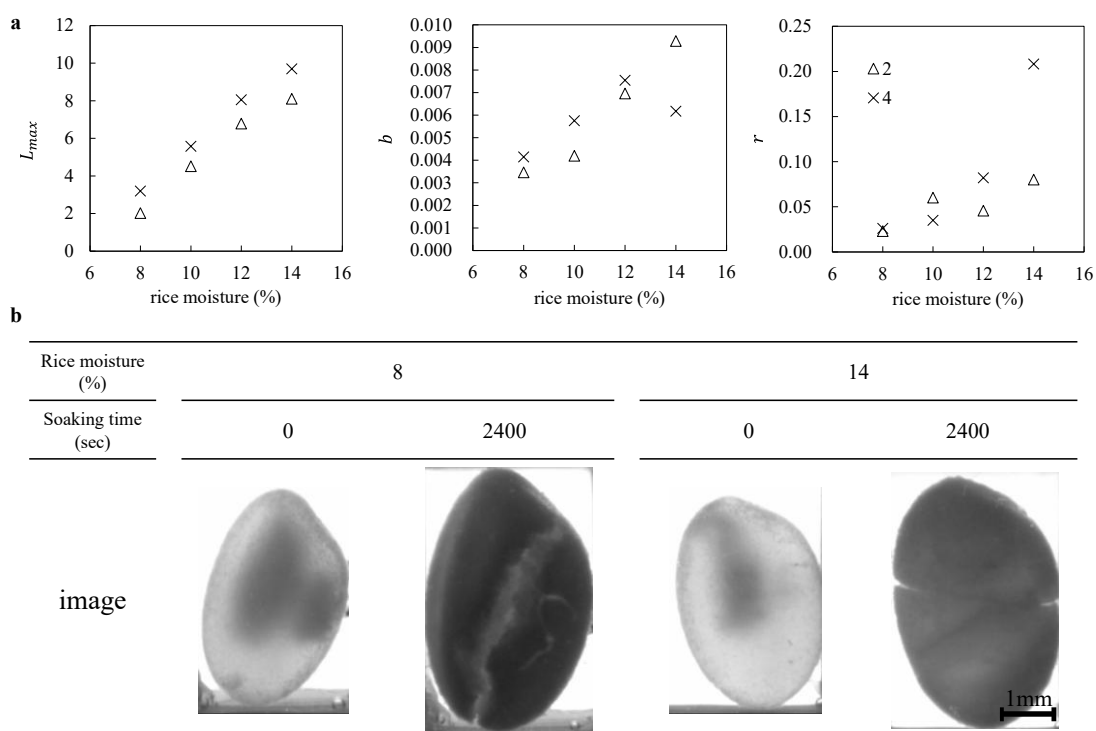


Fig. 9 Effects of rice moisture on the characteristics of crack increases.

(a: Relationship between white rice moisture and model parameters.

b: Difference in the appearance of rice after water absorption.)

一方で、初期含水率が低い場合、浸漬後の腹側と背側の含水率差が拡大し、膨張率差が増大することで水浸裂傷の発生が促進される可能性も考えられる。既往研究では、白米水分が低い場合¹²⁾、あるいは特定の白米水分条件において水浸裂傷粒の発生が最大化されることが報告されている⁵⁾が、本研究では白米水分が高いほど L_{max} が増大する結果となった。

この相違は、本研究が水浸裂傷粒の発生率ではなく裂傷長の総和を計測した点、およびマイクロ스코プによる高解像度拡大画像によって微細な裂傷まで検出した点に起因すると考えられる。また、初期含水率が低い場合は水浸裂傷発生箇所が大きく開裂するのに対し、初期含水率が高い場合には裂傷発生後も各部位が接触状態を維持する傾向が観察された (Fig. 9b)。

これらの差異は浸漬後の原料処理において白米の物理的状态に大きな影響を与えると予想されるため、 L_{max} 以外の指標も含めた総合的な水浸裂傷評価が望ましいと考えられる。白米水分と L_{max} は正の相関を示すものの、No. 2 山田錦、No. 4 五百万石のいずれにおいても白米水分 10 %から 12 %の間での L_{max} 増分に比べ、12 %から 14 %の間での増分が小さくなる傾向が認められた。このことから、白米水分に対する L_{max} の増加は一定レベルで頭

打ちする可能性が高いと推察される。

理論的には、白米水分が飽和状態に近づくと腹側と背側の膨張率差が消失するため、 L_{max} は減少に転じると予想される。初期含水率が高い場合は吸水速度が低下し、部位間の含水率差も減少することから、裂傷増加率 b が低下すると予想されたが、実際には白米水分と b の間に正の相関が認められた。この予想外の結果は、白米剛度の影響が吸水速度や部位間膨張率差の影響を上回ること示唆している。

また、 r についても白米水分との間に正の相関が認められ、白米水分が低い場合は S 字型曲線、高い場合は $\sqrt{\quad}$ 型曲線を形成しやすい傾向が確認された。新型モデル導入時の仮説では、 r は圧砕剛度の時間変化の影響を反映するパラメータとして定義したが、本結果はこの仮説の妥当性を部分的に証明するものと考えられる。

心白面積率が水浸裂傷に与える影響 2018 年産および 2020 年産試料について、心白面積率と新型モデルパラメータの関係性を Fig. 10 に示した。両年次の試料において、心白面積率と L_{max} の間に正の相関関係が認められた。この結果は、心白部の存在が米粒密度を低下させ、強度低下を引き起こすことに起因すると考えられる。

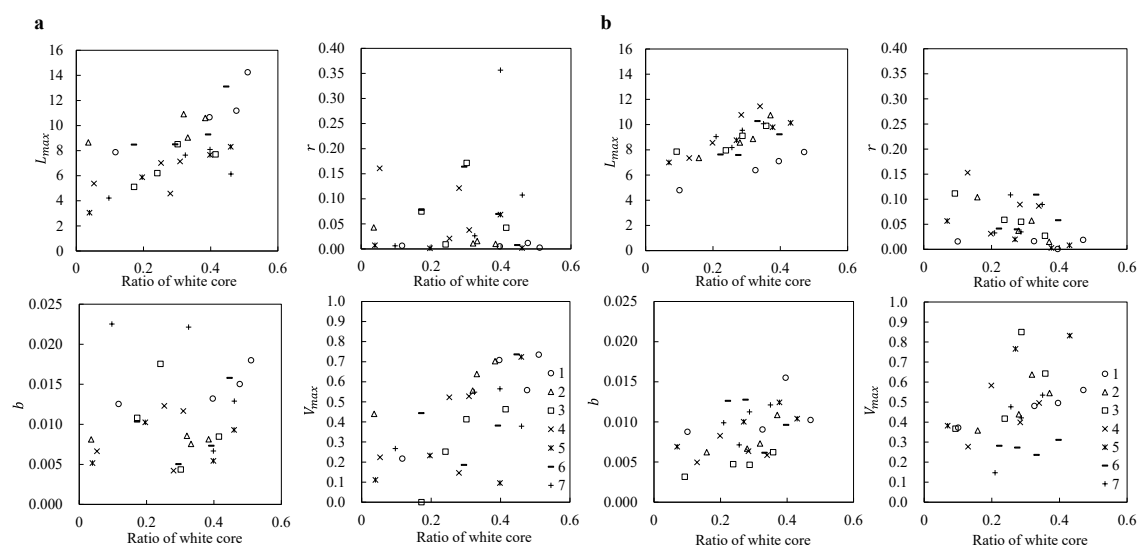


Fig. 10 Relationship between ratio of the white core and model parameters in 2018 (a) and 2020 (b)

また、心白面積率は最大縦割れ面積率 V_{max} とも正の相関を示した。浸漬時には腹側と背側の膨張率差により腹から背の方向に曲げモーメントが生じるが、膨張は三次元的に発生するため、曲げモーメントも多方向に作用すると考えられる。これによる破壊（割れ）は、曲げモーメントがかかる部位の強度を応力が上回った際に発生する。

応力は曲げモーメントを断面係数で除した値として表され、断面係数は応力が作用する断面積と正の相関があり、断面形状を正方形と仮定した場合、一辺の長さの三乗に比例することが知られている⁷⁾。このメカニズムから、心白面積が大きい場合、曲げモーメントに抵抗する有効断面積が減少し、投影方向に垂直な面で発生する縦割れが生じやすくなると推察される。

水浸裂傷発生特性の白米形状依存性解析 2018 年産および 2020 年産試料について、白米の厚さと L_{max} 、白米の幅と V_{max} の関係性を Fig. 11 に示した。なお、白米の厚さと幅については米粒サイズの影響を排除するため、白米の長さ、幅、厚さの比率を維持しながら体積を 1 に正規化する補正を行っている。この解析から、白米の厚さが小さい場合、または幅が大きい場合に、横割れおよび縦割れの発生が顕著に増加することが明らかとなった。

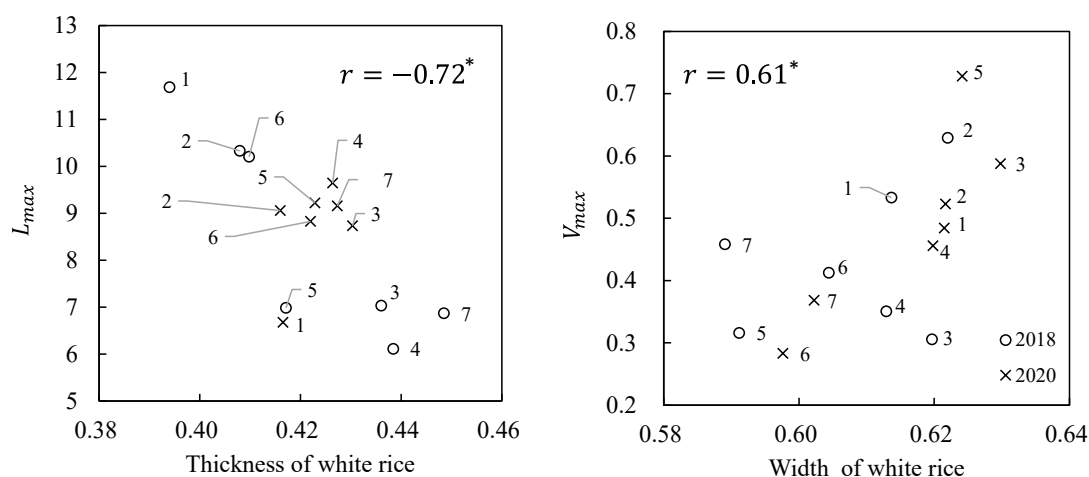


Fig. 11 Relationship between the shape of rice and model parameters

(r : correlation coefficient, * $p < 0.05$)

横割れを引き起こす応力は割れ発生部位の断面形状に大きく依存し、腹から背への曲げモーメントに対して白米の幅と厚さが大きいほど発生応力が小さくなる関係にある。また、初期段階の横割れは主に腹から背の方向に発生する傾向があるが、その後は分断された白米片内の局所的な膨張率差により横割れが継続的に発生するため、白米幅の影響は徐々に低減し、厚さの影響が残存すると考えられる。実際、白米の幅と L_{max} の間には明確な相関関係は観察されなかった。これらの理由から、白米の厚さと L_{max} の間に負の相関関係が生じたと推察される。

また、縦割れは横割れとの相互作用が強く、初期に横割れが発生した場合、その後の縦割れ発生が抑制される傾向が浸漬過程の画像観察から確認された。これは腹側と背側の膨張率差による曲げモーメントが三次元的に発生しており、横割れによる応力緩和が生じた場合、後続の縦割れを引き起こすほどの曲げモーメントが生じにくくなるためと考えられ

る。

前述のように、白米の幅は L_{max} を増加させる直接的要因とはならないが、初期の横割れ発生には幅の影響が大きいと予想され、幅が大きい場合は最初の横割れが発生しにくくなる。この状況下では三次元的に発生した応力が縦割れによって緩和されることになり、結果として白米幅と縦割れ発生の上に正の相関関係が形成されたと考えられる。

総合考察 本研究では、酒造用原料米の水浸裂傷増加パターンを高精度で表現できる新型モデルを開発し、水浸裂傷に影響を与える要因として心白サイズや米粒形状などの構造的側面、および白米水分や浸漬温度といった処理条件の側面から総合的な解析を行った。主な知見は以下の5点にまとめられる。

- ① 旧型モデルに含まれていた誤差項を除去し、S字型と√型の曲線形状を柔軟に表現できる新型モデルを導入することで、旧型モデルを上回る精度で水浸裂傷増加パターンを記述することが可能となった。
- ② 浸漬水温と裂傷増加率 b の間にはアレニウス型の明確な関係性が認められた。一方、最大総裂傷長 L_{max} は浸漬水温に依存せずほぼ一定値を維持した。
- ③ 白米水分は L_{max} および b と正の相関関係を示し、特に L_{max} との相関が顕著であった。
- ④ 心白サイズは L_{max} および V_{max} と正の相関を示した。
- ⑤ 白米の厚さと L_{max} は負の相関、白米の幅と V_{max} は正の相関を示した。

本研究では、白米構造と浸漬条件が水浸裂傷に与える影響について、白米強度、水分拡散速度、腹側と背側の膨張率差に起因する曲げモーメントと応力の観点から考察を行った。その結果、水浸裂傷の増加速度が白米強度と水分拡散速度によって、最大発生量が白米強度と応力によって主に決定されることが示唆された。

各品種の特性は形状と物性の二面から理解することができる。本研究では形状特性と浸漬条件から推定される物性に基いて考察を展開したが、水浸裂傷発生パターンの差異に関わる本質的要素として、白米の密度やデンプン粒の構造、充填度の影響が大きいと推察される。これらは白米の剛性や破壊靱性に直接的な影響を与えると考えられる。

特に近年の気候変動下では、物性は水稻生育期の気象条件によって大きく左右される¹³⁾。特に登熟期の高温¹⁴⁾や日照不足¹⁵⁾が白米のデンプン特性を変化させ、白未熟粒の発生につながる事が報告されていることから、水浸裂傷発生特性の包括的理解にはこれらの要因を総合的に考慮する必要がある。

精米技術の観点では、使用するロールの種類や回転数を変えることで精米後の白米形状を調整できることが知られている¹⁶⁾。原形、球形、扁平といった精米形状の違いは、同一精米歩合でも粗タンパク質含量等に差をもたらす、特に扁平精米では高精米歩合でも粗タンパク質含量が低減され、原料利用効率の向上に寄与すると考えられている¹⁷⁾。

しかし本研究の知見によれば、白米の厚さを減少させる精米方法は水浸裂傷の増加につながる可能性が示唆された。本研究では個々の粒についての厚さデータを取得していないため品種横断的な関係性を示したが、今後は個別米粒の形状と水浸裂傷の相関を詳細に検証する必要があると考える。

また、水浸裂傷は浸漬水との接触面積を増大させることで吸水速度を促進すると考えられるが、水浸裂傷の増加速度が浸漬水温とアレニウス型の関係を示すことから推察されるように、各白米粒固有の水分拡散速度が水浸裂傷の増加速度を基本的に規定していると考えられる。これは吸水率変化と水浸裂傷発生が相互に促進し合う現象であることを示唆している。

水間らは酒造好適米の吸水曲線が S 字型を示すことを報告している¹⁷⁾が、一般米に適用される水分拡散モデルでは吸水曲線は√型となることが報告されている^{17, 18)}。酒造好適米が一般米と比較して水浸裂傷発生が顕著であることも考慮すると、酒造好適米特有の S 字型吸水曲線は水浸裂傷によって米粒表面積が増加することと密接に関連していると推察される。この点は未検証事項であり、水浸裂傷増加モデルと水分拡散モデルの相互関係の解明が今後の重要課題である。

本研究の知見を今後の研究に活用することで、酒造好適米の吸水特性のさらなる解明と、それに基づく原料米処理技術の高度化に貢献できると考える。

摘要

本章では、酒造好適米の水浸裂傷発生メカニズムをより正確に把握するために、曲線形状定数 r を導入した新たな水浸裂傷増加モデルを構築した。このモデルは従来のロジスティック方程式ベースのモデルよりも高い適合精度を示し、理論的根拠に基づいて S 字型から√型までの多様な増加パターンを柔軟に表現することを可能にした。

本モデルを用いて、浸漬条件と白米構造が水浸裂傷発生に与える影響を詳細に分析した結果、浸漬水温の上昇は裂傷増加率 b をアレニウス型の温度依存性に従って増加させるが、最大総裂傷長 L_{max} には有意な影響を及ぼさないことが明らかとなった。また、白米水分の増加は裂傷増加率と最大総裂傷長の両方を増加させる効果を持ち、特に最大総裂傷長との相関が顕著であった。

心白構造の観点からは、心白面積率の増加が横割れと縦割れの両方の発生を促進することが確認された。白米形状の影響については、厚さの減少が横割れを促進し、幅の増加が縦割れを促進するという明確な相関関係が認められた。

これらの知見から、水浸裂傷の発生速度は主に水分拡散速度に依存し、発生総量は白米の強度特性と形状パラメータによって決定されることが示唆された。本研究は、酒造好適米の水浸裂傷発生の科学的理解を深め、原料米処理技術の高度化と高品質清酒製造への応用に貢献するものである。

参考文献

- 1) 水間智哉：醸協, 104, (5), 322-330 (2009)
- 2) 家村芳次, 藤田栄信：醸協, 77, (4), 260-264 (1982)
- 3) 水間智哉, 古川幸子, 小林拡美, 清川良文, 若井芳則：醸協, 95, (2), 133-139 (2000)
- 4) 村田敏, 小出章二, 河野俊夫：農機誌, 54, (1), 67-72 (1992)
- 5) 佐藤稔英, 中山繁喜, 米倉裕一, 平野高広, 山口佑子, 遠山良：醸協, 106, (2), 103-111 (2011)
- 6) 柳内敏靖, 山本拡美, 宮崎紀子, 長野知子, 若井芳則：生物工学, 74, (2), 97-103 (1996)
- 7) 建築構造ポケットブック編集委員会：机上版 建築構造ポケットブック第6版 p34, (2020)
- 8) V. K. Arora, S. M. Henderson, T. H. Burkhardt：Trans. ASAE, 16, (2), 320-323 (1973)
- 9) 山口信吉, 若林嘉一郎, 細野八郎：農機誌, 39, (2), 179-184 (1977)
- 10) 川村登, 梶尾尚尾, 佐々木泰弘：農機誌, 30, (2), 88-92 (1968)
- 11) 村田敏, 田中史彦, 徳永淳一, 小出章二, アマラトゥンガ K.S.P：農機誌, 58 (2), 19-24 (1996)
- 12) 小出章二, 田子雅則, 西山喜雄：日本食品工学会誌, 48, (1), 69-72 (2001)
- 13) 吉永悟志：醸協, 107, (3), 170-176 (2012)
- 14) 奥田将生, 上用みどり, 高橋圭, 後藤奈美, 高垣幸男, 池上勝, 鍋倉義仁：醸協, 108, (5), 368-376 (2013)
- 15) 家中容子, 星一好：栃木県農業試験場 研究成果集第35号, (2017)
- 16) 坂口栄一郎, 水谷量, 本多康太郎, 川上昭太郎：農機誌, 68, (3), 52-58 (2006)
- 17) 齋藤富男, 手塚信也, 近藤修, 岡田光司, 坂本恭輝, 久保克朗, 杉山隆一, 栗林直章, 加藤美好, 吉井忠：醸協, 89 (6), 489-491 (1994)
- 18) 佐藤はるか, 田中史彦, 内野敏剛, ペレズジョナサン, 源川拓磨：農機誌, 73 (5), 313-320 (2011)

第4章 酒造好適米の水分拡散モデルの開発と検証

緒言

清酒製造において、原料米の浸漬工程は最終製品の品質を左右する重要な工程である。白米の吸水率は蒸米吸水率と相関関係にあり、蒸米吸水率は酵素消化性^{1,4)}や麴の糖化力⁵⁾に密接に関連している。このため、良質な清酒を製造するためには白米の吸水状態を最適化する必要がある、浸漬工程での吸水率変化の解明に関する研究が積極的に行われてきた^{6,7)}。

浸漬時の吸水状態は品種や栽培環境といった玄米由来の要因^{8,9)}、浸漬前の白米水分や浸漬水温といった原料処理由来の要因^{3,10)}によって異なることが報告されている。特に、白米内部に心白と呼ばれる疎な構造を持つことが特徴の酒造好適米は吸水速度が速い特徴がある¹¹⁾。その要因として、浸漬水が白米表面から浸透し心白に達した時点で心白内部に急速に拡散すること¹²⁾や、浸漬中に割れが多発することにより浸漬水との接触面が増大すること¹³⁾が報告されており、心白を持たない食用米よりも複雑な吸水メカニズムを有している。

こうした理由から、酒造好適米の吸水速度に関する研究では現象的な解析に留まり、理論的な解析が難しい状況であった。現象的な解析によって品種特性を比較した場合、各品種の吸水速度を把握することは可能であるが、その要因が胚乳細胞への水の浸透性、心白、浸漬割れのいずれに由来するものなのかを判断することはできない。対して、食用米では心白がなく浸漬割れの発生が少ないことから、米粒を平板や球体といった単純な形状に置き換えたモデル¹⁴⁻¹⁷⁾や米粒の形状を模倣した応用モデル¹⁸⁾についての解析報告があり、白米の吸水を浸漬水の白米内部への拡散として扱うことでモデル化する手法がとられている。

フィックの法則は元来、溶質が濃度の高い方から低い方へと向かって拡散する現象を数式化したものであり、微視的には溶質分子のブラウン運動が起源となっている。一方、穀物、特に白米の吸水は胚乳組織の主な構成成分であるデンプン粒への水の吸着による膨潤や胚乳細胞間に発生した亀裂への浸潤によって起こることが報告されており^{19,20)}、水分子のブラウン運動以外の要因が存在することは明らかである。すなわち、穀物の吸水へのフィックの法則の適用は過去の研究の中で経験的におこなわれており、穀物の吸水を規定する物理現象とは完全には一致しない。しかし一方で、吸水は白米中の高含水率の部位から低含水率の部位へと水が移動する現象であることも事実であり、隣接部位間の水の移動を数式化することには一定の意義がある。

このようなモデル化が酒造好適米で実現できれば、米粒内の水分の移動を拡散係数と呼ばれるパラメータで定量評価でき、浸漬水温や白米水分との相関関係を拡散現象の観点から考察可能となる。以上の状況を踏まえると、酒造好適米における吸水速度の理論的な解

析をおこなうためには、浸漬割れ、心白、水分拡散の三要素を分離して評価可能な手法が必要である。

本章では、酒造好適米に適合する吸水モデルの開発を目的として、以下の検討を行った。第一に、拡散法則に支配される空間に心白と水浸裂傷を組み込んだモデルの妥当性を数値的解法により検討し、実現象と比較した。第二に、フィックの法則を時間、空間において離散化した数式を改変したモデルを作成し、実測値との一致度や浸漬水温の影響について検証した。これらの検討により、酒造好適米の吸水特性をより正確に表現するモデルの構築と評価を行ったので、以下に報告する。

材料と方法

原料米、精米 2020 年産の酒造好適米 7 試料（祝、山田錦、五百万石 2 点、雄町、吟吹雪、おくほまれ）を使用した（Table 1）。玄米試料は HS-4 試験精米機（チヨダエンジニアリング社製）を用いて精米歩合 60 %まで精米した。砥石には金剛ロール C-60 を使用し、ロール回転数は玄米から精米歩合 70 %までを 1500 rpm、精米歩合 70 %から 60 %までを 1300 rpm とした。

Table 1 Rice samples used in this study.

No.	Cultivars	Region of origin
1	<i>Iwai</i>	Kyoto
2	<i>Yamadanishiki</i>	Hyogo
3	<i>Gohyakumangoku</i>	Kyoto
4	<i>Gohyakumangoku</i>	Fukui
5	<i>Omachi</i>	Okayama
6	<i>Ginfubuki</i>	Shiga
7	<i>Okuhomare</i>	Fukui

試料の調整と保管 白米試料は水分を 12 %（含水率 13.6 % d.b.）に調湿し、各試験の実施まで 15 °C 恒温槽内にて保管した。玄米および白米の長さ（L）、幅（W）、厚さ（T）は穀粒判別機 RGQI20A（サタケ社製）を用いて測定した。

120 分含水率の測定 酒造用原料米全国統一分析法に基づいて吸水性試験を実施し、120 分含水率を算出した。この値は後述の吸水膨張率の含水率換算および数値シミュレーションの最大含水率として使用した。

心白の定量評価 米内部に存在する心白の位置や大きさを計測するためには白米を切断し内部を観察する必要があるが、破壊によって後述の水浸裂傷の計測が不可能となる。この問題を解消するため、心白撮影画像の輝度から心白部位の厚みを推定する方法を検討した (Fig. 1)。

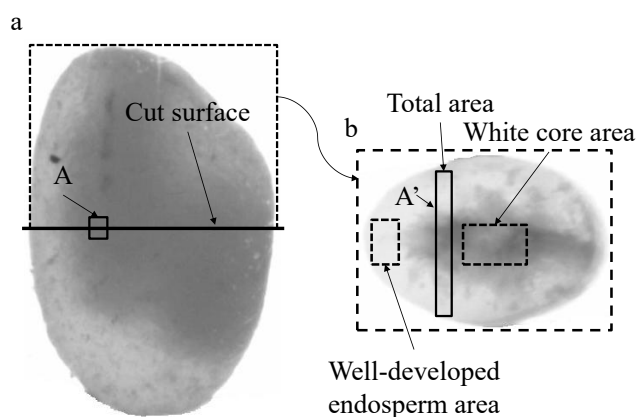


Fig. 1 A method for estimating the thickness of the white core layer based on the translucency of polished rice.

まず、デジタルマイクロスコープ VHX-700F (KEYENCE 社製) を用い、No.1 祝、No.2 山田錦、No.4 五百万石の白米各 10 粒、計 30 粒に対して、水平に置いた白米の画像 (Fig. 1a) を撮影した後に中心部を切断し断面画像 (Fig. 1b) を撮影した。得られた画像はアスペクト比を維持した状態で切断面の長さが 20 画素となるようにリサイズ処理した。処理後の画像に対して、切断面上の各画素 (A) の透過率とこの位置に対応する断面画像の厚みと、厚み方向の全ての画素 (A') の輝度反転値の平均値と合計値 (厚み方向反転輝度平均値、厚み方向反転輝度合計値) を算出した。続いて、断面画像全体から目視で心白部位、充実部位と認識できる領域を選択し、それぞれの輝度反転値の平均値 (心白部位反転輝度平均値、充実部位反転輝度平均値) を計算した。また、全体の輝度合計値が充実部位と心白部位の輝度の和となる自明の関係式 (式 1) に対して、心白部位の厚みが全体の厚みから充実部位の厚みを引いた値となる関係式 (式 2) を代入し、心白部位の厚みを算出する式 (式 3) を導出したのちに、式 3 に計測値を代入して心白部位の厚みを算出した。この工程を白米 30 粒の切断面上の 20 画素全てに実行し、計 600 画素について透過率から全体輝度合計値、全体輝度合計値から心白部位の厚みを推測することで、透過率から心白部位の厚みを決定する回帰式を導出した。

$$T_{total} \times B_t = T_{wd} \times B_{wd} + T_{wc} \times B_{wc} \quad (1)$$

$$T_{wd} = T_{total} - T_{wc} \quad (2)$$

$$T_{wc} = T_{total} \frac{B_{wt} - B_{wd}}{B_{wc} - B_{wd}} \quad (3)$$

T_{total} : Thickness of total area

T_{wd} : Thickness of the well-developed area

T_{wc} : Thickness of the white core area

B_t : Average inverse brightness in total area

B_{wd} : Average inverse brightness in well-developed endosperm area

B_{wc} : Average inverse brightness in the thickness direction

水浸裂傷の計測 水浸裂傷の計測は前章の通りにおこなった。15℃恒温槽内にて保管されている各白米試料から整粒 6 粒を選択し、自作の透明プラスチック製容器に直ちに封入した。プラスチック製容器には浸漬水が流入するように穴をあけ、浸漬中に容器が浮かばないようにおもりを付けた。ガラスシャーレには蒸留水を満たし、白米を封入したプラスチック製容器をガラスシャーレ内の水に完全に浸した時点浸漬開始時点とした。

浸漬水温は 5℃、10℃、15℃、25℃の 4 条件で実施した。デジタルマイクロスコープ VHX-700F (KEYENCE 社製) を用いて 15 秒に 1 枚の間隔で 40 分間の撮影を行い、合計 160 枚の画像データを取得した。同様の試験を 1 試料につき 5 回繰り返した。得られた画像上で線として観察される割れ (横割れ) を解析した。すなわち、吸水の進行とともに画像内に現れる黒色線を水浸裂傷とし、画像解析ソフト ImageJ によって直線状にトレースした長さの合計を総裂傷長 (mm) として定義した。また、画像上で面として観察される割れを縦割れとして定義し、白米投影面積に対する面積比率 (縦割れ面積率) として評価した。

吸水膨張率による含水率の時間連続計測 吸水膨張率の測定は既報²¹⁾の通りにおこなった。自作の円筒形容器に 20 g の白米を充填し、その上に既知の厚みの円形アクリル板を置き、100 mL の浸漬水を注入した。注入時点を浸漬開始時間とし、アクリル板に対してレーザー光を照射し反射光をレーザー距離計によって検知することで、距離計とアクリル板の距離を求め、白米厚み (積層高さ) を算出した。白米の吸水膨張による距離の変化を経時的に測定したのちに、初期含水率および最大含水率の実測値によって距離の時間連続変化を含水率に換算した。得られたデータのうち、15 秒間隔 40 分間 (計 160 点) の含水率変化のデータを解析に使用した。

モデルの基本仮説と空間離散化 以下の仮説に基づき、ベースとなる酒造好適米の吸水シミュレーションモデルを構築した：

- ① 吸水はフィックの拡散第二法則にしたがう。
- ② 米粒形状は楕円体である。
- ③ 心白部位では充実部位と比較して水分拡散速度が大きい。
- ④ 水浸裂傷の発生部位には直ちに浸漬水が流入する。

シミュレーション環境について、まずは解析をおこなう時間、空間を構築した (Fig. 2, Table 2)。拡散とは溶液中の濃度勾配に従って溶質が濃度の高い方から低い方へと移動して均一な濃度になろうとするはたらきである。フィックの拡散法則はその拡散の速度を示したもので、特に第二法則は拡散する濃度が時間に応じて変化する場合に適用される。本研究ではこの溶質の濃度を単位空間における水の濃度、すなわち水分（含水率）に置き換えてモデル作成をおこなった。

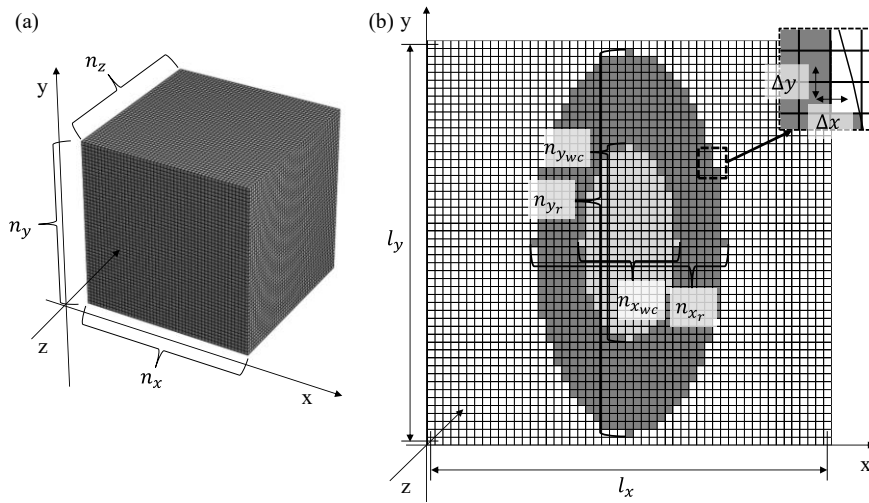


Fig. 2 The coordinate space of the numerical simulation. (a) 3D visualization of the space. (b) 2D visualization of the extracted layer ($z = 26$). White blocks represent the water area, dark gray blocks represent the well-developed endosperm area, and light gray blocks represent the white core area, respectively. The parameters used in this figure are described in Table 2.

Table 2 The parameters in a three-dimensional coordinate space. Case 1 was used for simulation under virtual conditions, and Case 2 was used for simulation under real conditions.

Parameter	Case 1	Case 2	Description
(l_x, l_y, l_z)	(50, 50, 50)	$\left(W \frac{n_x - 1}{n_{x_r} - 1}, L \frac{n_y - 1}{n_{y_r} - 1}, T \frac{n_z - 1}{n_{z_r} - 1}\right)$	Size of the coordinate space in a x, y, and z-direction.
(n_x, n_y, n_z)	(51, 51, 51)	(51, 51, 51)	Numbers of grid points in x, y, and z-directions.
$(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$	(1, 1, 1)	$\left(\frac{W}{n_{x_r} - 1}, \frac{L}{n_{y_r} - 1}, \frac{T}{n_{z_r} - 1}\right)$	Distances between grid points in x, y, and z-directions.
$(n_{x_r}, n_{y_r}, n_{z_r})$	(25, 49, 17)	(25, 49, 17)	Numbers of rice blocks in x, y, and z-directions
$(n_{x_{wc}}, n_{y_{wc}}, n_{z_{wc}})$	(13, 25, 9)	Experimental data	Number of white core blocks in x, y, and z-directions

水分拡散は三次元空間で定義した（式 4）。この偏微分方程式を解析的に解くことができればある時刻における含水率を算出可能であるが、上記の仮定②と③の影響があることから解析的解法を採ることが難しい。そこで、式 4 の空間微分に対して 2 次精度の中心差分を施し、数値的解法によるモデルの構築をおこない、以下の解析に用いた（式 5）。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

variable
 u (% d.b.) : Moisture content
 t (sec) : Soaking time
 x, y, z : Coordinates along the x, y, and z axes
constant
 D : Diffusion coefficient

$$\frac{u_{i,j,k}^{n+1} - u_{i,j,k}^n}{\Delta t} = D \left(\frac{u_{i+1,j,k}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i-1,j,k}^n}{\Delta x^2} + \frac{u_{i,j+1,k}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} + \frac{u_{i,j,k+1}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2} \right) \quad (5)$$

variable
 u (% d.b.) : Moisture content
 n : Time step
 i, j, k : Grid point coordinates in three dimensions along x, y, and z axes
constant
 D : Diffusion coefficient
 Δt : Interval of time step
 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$: Distances between grid points in x, y, and z-directions.

この解法では、離散化した時間の間隔を Δt 、離散化した三次元空間（ブロック）の間隔を $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ と定義した。このような離散化により、初期状態が決定すれば各ブロックの持つ物理量（ここでは含水率）の変化を漸次的に計算することが可能となる。ある時刻 n から Δt 経過後の次の時刻 $n + 1$ に時間が進行するとき、ブロック (i, j, k) は隣接する 6 つのブロックと相互作用し、互いに水分を受け渡すことで含水率が変化する。

数値解法とモデル方程式 式 5 を変形すると式 6 になるが、この式からフィックの法則をベースとする数値モデルでは自ブロックと隣接ブロック間の含水率の差を距離の二乗で割った値が変化量に相当すると定義されていることがわかる。この式をベースとし、自ブロックと隣接ブロックの関係性に変更を加えた式を式 7 で定義した。

$$\frac{u_{i,j,k}^{n+1} - u_{i,j,k}^n}{\Delta t} = D \left\{ \frac{(u_{i+1,j,k}^n - u_{i,j,k}^n) + (u_{i-1,j,k}^n - u_{i,j,k}^n)}{\Delta x^2} + \frac{(u_{i,j+1,k}^n - u_{i,j,k}^n) + (u_{i,j-1,k}^n - u_{i,j,k}^n)}{\Delta y^2} + \frac{(u_{i,j,k+1}^n - u_{i,j,k}^n) + (u_{i,j,k-1}^n - u_{i,j,k}^n)}{\Delta z^2} \right\} \quad (6)$$

$$\frac{u_{i,j,k}^{n+1} - u_{i,j,k}^n}{\Delta t} = \beta \left(\frac{u_{i+1,j,k}^n - 2\alpha u_{i,j,k}^n + u_{i-1,j,k}^n}{\Delta x^2} + \frac{u_{i,j+1,k}^n - 2\alpha u_{i,j,k}^n + u_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} + \frac{u_{i,j,k+1}^n - 2\alpha u_{i,j,k}^n + u_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2} \right) \quad \left(\begin{array}{l} 0 \leq \alpha \leq 1 \\ u = 1 \text{ if } u > 1 \end{array} \right) \quad (7)$$

variable

u (% d.b.) : Moisture content

n : Time step

i, j, k : Grid point coordinates in three dimensions along x , y , and z axes

constant

D : Diffusion coefficient

α, β : Parameters

Δt : Interval of time step

$\Delta x, \Delta y, \Delta z$: Distances between grid points in x , y , and z -directions.

係数 α は自ブロックと隣接ブロックの影響力のバランスを意味しており、 $\alpha = 1$ の場合はフィックの法則と同様にブロック間の含水率差がそのまま含水率の時間変化に影響を与え、 $\alpha = 0$ の場合は自ブロックの含水率に関わらず、隣接ブロックの含水率が直接的に含水率の時間変化に影響を与える。ブロック間の関係性は三次元方向のいずれにおいても等価であると考え、式 7 括弧内の三項には同等の係数 α を付与した。なお、 α を 1 未満とした場合、正規化した含水率の最大値が 1 を超えることがあるため、ブロックの含水率が 1 を超えた場合には 1 に固定することとした。

係数 β は従来のモデルの拡散係数と同様に働くことから、拡散係数様パラメータと呼称することとし、心白ブロックの β は白米ブロックの 2 倍に設定した。モデルの実測値への適合度については、最小二乗法により実測値とモデル推定値の差異が最小となる β を決定し、二乗平均平方根誤差 (Root Mean Squared Error, RMSE) によって評価した。

シミュレーション条件 シミュレーションは以下の二つのケースで実施した (Table 2)。シミュレーションの特性評価をおこなう場合、Table 2 (Case 1) の条件を用いた。各ブロックは浸漬水領域、白米心白領域、白米充実領域のいずれかで定義した。浸漬水領域は白米領域の外側に位置し、いかなる時刻においても含水率が最大値をとると定義した。白米心白領域と白米充実領域はそれぞれ異なる拡散係数を持つ領域と定義した。ブロック数 x, y, z 方向いずれも 51 とした。座標 $(x, y, z) = (26, 26, 26)$ のブロックを中心とし、 x 軸直径を 25, y 軸直径を 49, z 軸直径を 17 とした楕円体内部のブロックを白米領域と定義した。Case 1 では x 軸直径を 13, y 軸直径を 25, z 軸直径を 9 とした楕円体内部のブロックを心白

領域と定義し、水浸裂傷は Fig. 2 における $y = 26$ の平面と白米領域の交差点で発生すると仮定した。

実測値との比較評価をおこなう場合については、Table 2 (Case 2) の条件を用い、計測した心白、水浸裂傷の情報をシミュレーションに組み込んだ。具体的には、計測した L, W, T 値から格子間隔を算出し、計測した心白部位を心白領域と定義した。水浸裂傷は取得したデータを用いた。Case 1 では含水率は 0 から 1 に正規化された値を用い、Case 2 では初期含水率として白米水分、最大含水率として酒米統一分析法における 120 分吸水率を含水率 (% d.b) に換算した値を用いた。

結果と考察

心白および水浸裂傷非存在条件下での数値モデルの比較

水分分布の経時変化 心白および水浸裂傷非存在条件下のシミュレーションにおける白米内部の水分分布の経時変化を Fig. 3 に示す。Fig. 3 より、吸水時間の進行とともに、白米と浸漬水の接触面から白米内部に水が浸透する現象がシミュレートされ、係数 α が小さい場合、白米中央部と周辺部の含水率差が大きくなる様子が確認された。 $\alpha = 0$ の条件では、水分の浸透フロントがより明確に表れ、フロント付近の勾配が急峻になる傾向が示された。これは $\alpha = 0$ の条件では隣接ブロックの含水率が直接的に含水率の時間変化に影響を与えるためであり、水分の浸透挙動が実際の酒造好適米における吸水現象により近い可能性が示唆された。

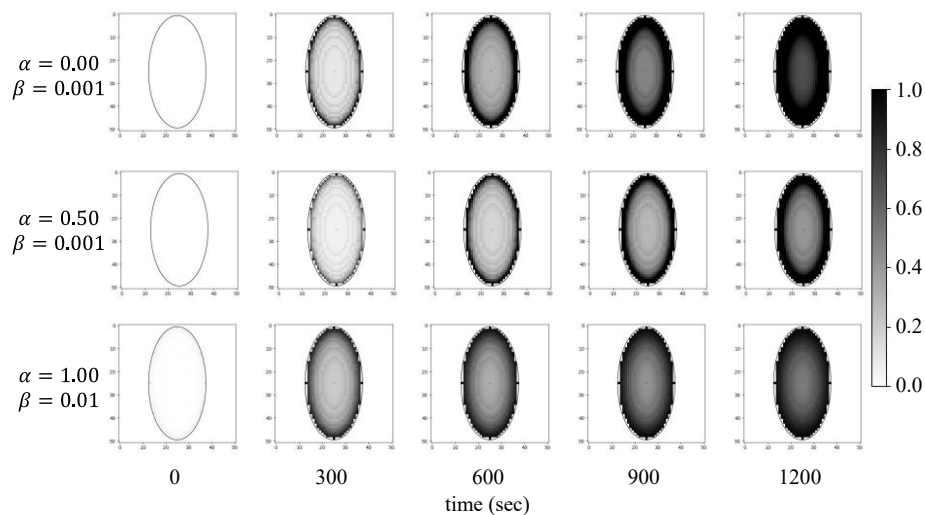


Fig. 3 The temporal changes in moisture distribution using a water distribution model without white cores and cracks. Elliptical line represents rice surface. Color bar means normalized moisture content inside the rice region.

含水率の経時変化 含水率の経時変化を Fig. 4 に示す。Fig. 4a-e より、浸漬開始とともに含水率が上昇し、徐々に上昇速度が小さくなる変化が算出された。係数 α によって曲線形状が異なり、フィックの法則に従う場合 ($\alpha = 1$)、吸水初期の吸水速度が大きくその後すぐに低下する傾向にあるが、 $\alpha < 1$ の条件ではいずれも吸水初期の増加速度が小さく、その後大きくなり、最大含水率に近づくまで維持される傾向にあった。

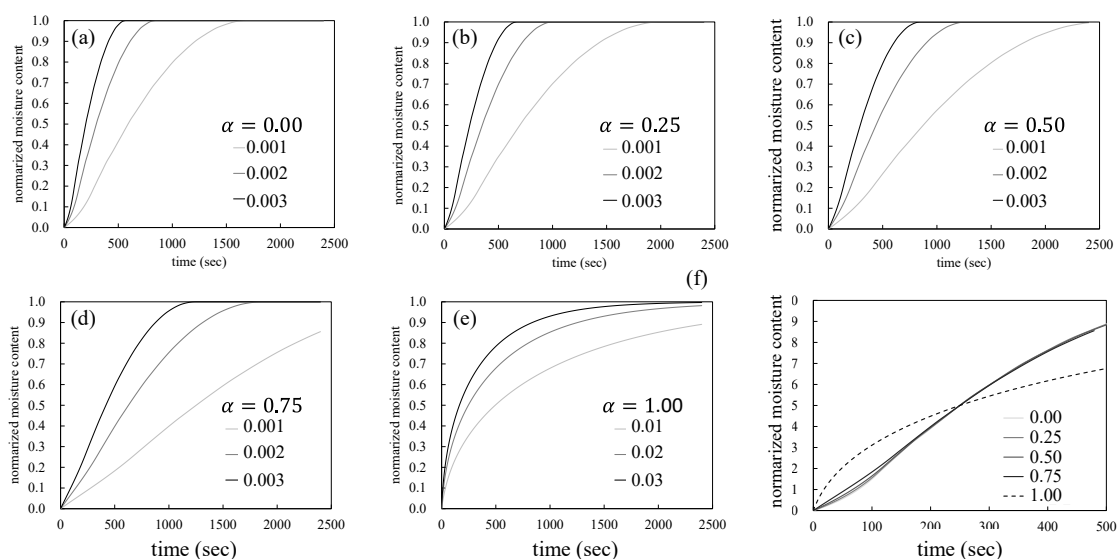


Fig. 4 (a-e) Temporal changes in moisture content using a water distribution model without white cores and cracks. The values in the legend represent the parameter β . (f) Comparison of moisture increase curve shapes of each model. The values in the legend represent the parameter α .

Fig. 4f には、250 秒時点で正規化含水率が 0.5 となるように β を任意に調整した場合の含水率曲線の比較結果を示す。曲線形状は $\alpha = 1$ と $\alpha < 1$ の場合に大別され、 $\alpha < 1$ の 4 パターンの曲線の差異はわずかであった。この結果から、 α 値の選択においては、 $\alpha = 0$ と $\alpha = 1$ の 2 条件の比較検証が効率的であると判断された。

実試料の水浸裂傷、心白情報を組み込んだ吸水シミュレーション

水分分布の視覚的評価 実試料の心白、水浸裂傷の情報をシミュレーション上で再現し、白米内部の水分分布の経時変化について実試料とシミュレーションを比較した結果を Fig. 5 に示す。 $\alpha = 0$ では $\alpha = 1$ と比較して吸水部位と非吸水部位がはっきりと分かれ、心白部位と非心白部位の含水率の差異も大きくなった。

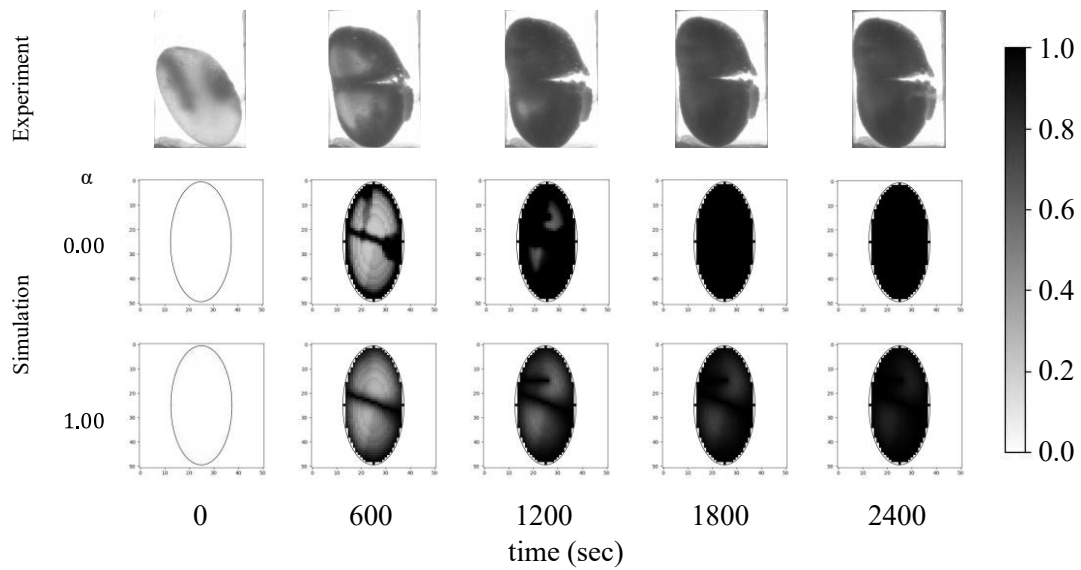


Fig. 5 Temporal changes in moisture distribution using a water distribution model incorporating actual white cores and cracks information. Color bar means normalized moisture content inside the rice region. No.1 Iwai was used as experimental data.

過去の報告¹²⁾では、心白部位が浸漬水と接触すると直ちに心白全体へと水が拡散することが報告されており、 $\alpha = 0$ においてより実現に近いシミュレーション結果が得られた。さらに、水浸裂傷からの水の侵入経路が明確に可視化され、実際の吸水画像で観察される水分の不均一な分布パターンをより正確に再現することができた。

含水率変化の定量評価 含水率変化の実測値とシミュレーションの比較結果を Fig. 6、実測値とシミュレーションを正規化した値から計算される RMSE を Table 3 に示す。Fig. 6 の結果から、概ね $\alpha = 0$ の条件において RMSE が小さく、実測値とシミュレーションの一致度が高いことが見て取れた。また、Table 3 より、No. 4 五百万石、No. 7 おくほまれを除く全ての試料について、 $\alpha = 0$ の条件で誤差が小さいことがわかった。

誤差は浸漬水温による違いがあり、浸漬水温が高い場合に誤差が小さい傾向が見られた。これは浸漬水温が高い場合、最大吸水に到達する時間が早くなり、誤差を計算する時間範囲に最大吸水到達後の誤差の小さい区間が多く含まれるためであると考えられた。これを加味した場合、吸水温度による適合度の違いはわずかであると考えられた。

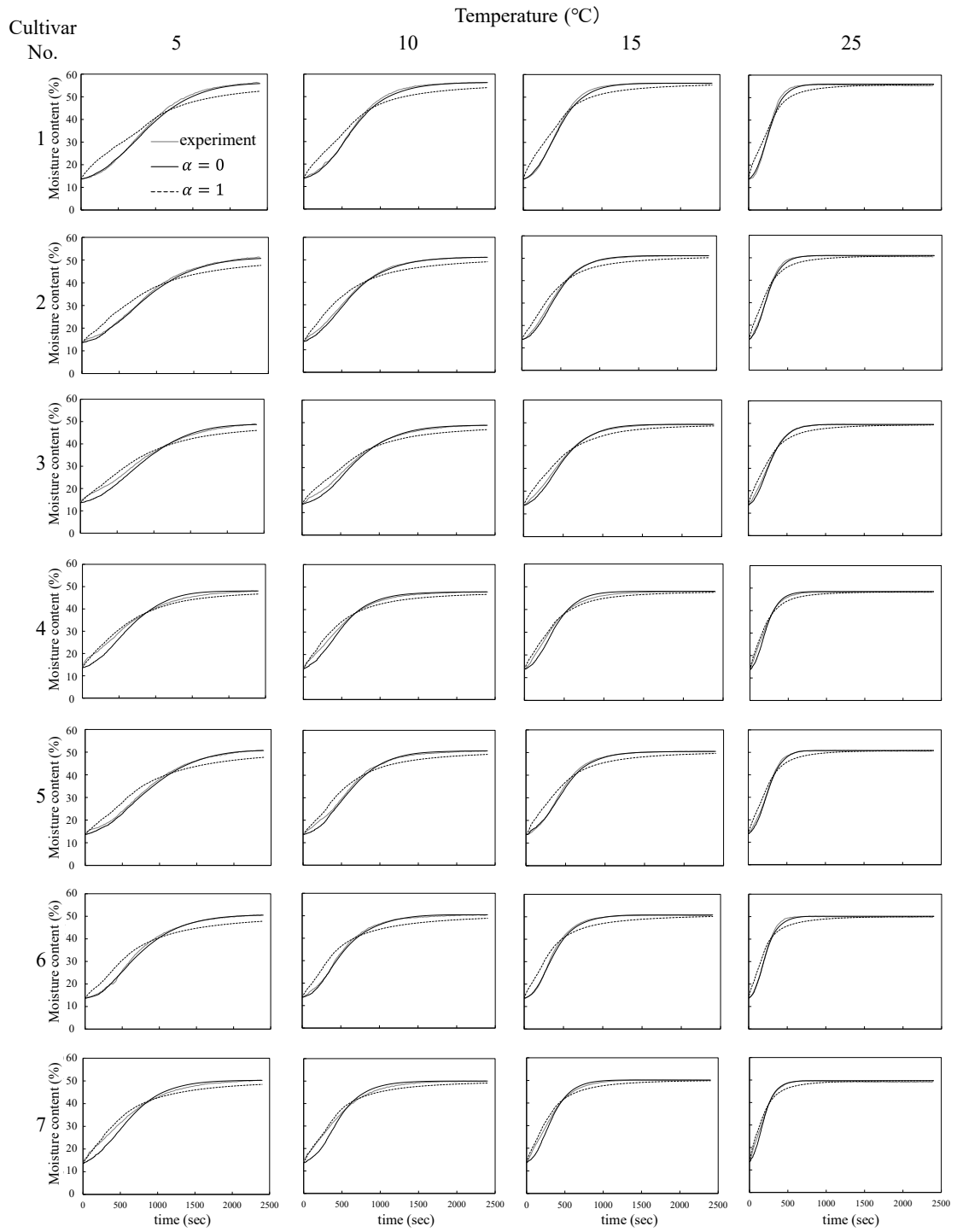


Fig. 6 Comparison of measured and predicted moisture content in white rice using a diffusion model incorporating actual white core and crack information.

Table 3 Root mean squared error (RMSE) between normalized measured values and normalized predicted values in water absorption simulation. Gray scales of the cells indicate the magnitude of values. (black: high, white: small)

Temp (°C)	α	Cultivar No.							ave
		1	2	3	4	5	6	7	
5	0	0.0105	0.0090	0.0370	0.0524	0.0141	0.0119	0.0472	0.0260
	1	0.0919	0.0819	0.0558	0.0324	0.0745	0.0822	0.0425	0.0659
10	0	0.0084	0.0126	0.0241	0.0328	0.0213	0.0110	0.0470	0.0225
	1	0.0797	0.0714	0.0591	0.0437	0.0580	0.0735	0.0331	0.0598
15	0	0.0142	0.0162	0.0196	0.0348	0.0133	0.0122	0.0317	0.0203
	1	0.0714	0.0555	0.0514	0.0302	0.0675	0.0676	0.0326	0.0537
25	0	0.0159	0.0101	0.0118	0.0225	0.0084	0.0111	0.0204	0.0143
	1	0.0586	0.0478	0.0446	0.0257	0.0417	0.0522	0.0299	0.0429
ave	0	0.0122	0.0120	0.0231	0.0356	0.0142	0.0116	0.0366	0.0208
	1	0.0754	0.0642	0.0527	0.0330	0.0604	0.0689	0.0345	0.0556

品種間差異とモデル適合性 No. 4 五百万石と No. 7 おくほまれの適合度が低かった理由として、No. 3 五百万石においても適合度が比較的低いことも踏まえると、品種特性に起因すると推察された。心白は品種毎に形状の特徴があり、白米中心に点状に存在するもの、眼状に厚く広がるもの、線状に薄く広がるもの、二つの箇所に分かれるもの、腹白と連結する形をとるものなど多様である。中でも五百万石とおくほまれはいずれも心白が眼状に広がる傾向を有する品種である。他の 5 点の試料が S 字型の吸水増加を示すのに対して、これらの品種の吸水曲線は吸水初期から直線状に立ちあがる√型のパターンを示す。この初期吸水の挙動の違いが、モデルとの一致度低下に繋がっていると考えられた。

過去の研究¹²⁾によると、酒造好適米の吸水では胚芽除去部位から白米中心部への水の侵入経路が存在することが示唆されている。また、一般米においても胚芽除去部位から白米中心部への水の侵入をシミュレーションに組み込むことで、適合度が向上するといった結果が報告されている¹⁸⁾。五百万石やおくほまれといった心白が広がりを持っている品種では、胚芽除去部位と心白部位が直結することで、吸水初期に白米中心部へ一気に水が浸入し、直線状の含水率変化を示す可能性が高いと考えられた。

拡散係数様パラメータの試料間差と温度依存性

拡散係数様パラメータの値と品種特性 各浸漬温度において算出された拡散係数様パラメータ β の値を Fig. 7 に示す。浸漬水温の上昇とともに β は上昇した。同一浸漬温度の β には試料間差があったが、その順序は浸漬水温が変化した場合にも概ね一定であった。

$\alpha = 0$ において、全温度条件で平均して最大の β を示した試料は No.4 五百万石であり、次いで No.7 おくほまれであった。

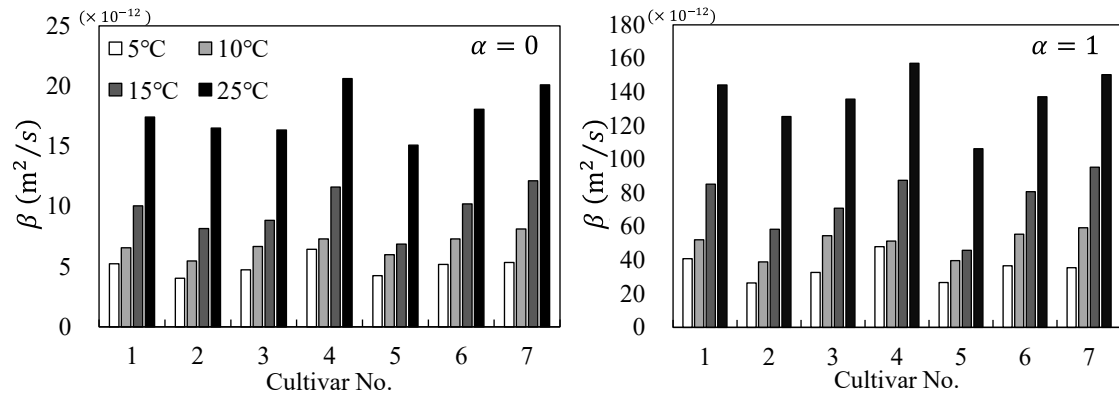


Fig. 7 Relationship between immersion water temperature and the diffusion coefficient-like parameter (β).

この現象には二つの要因が考えられる。第一に、これらの試料の胚乳組織が水を吸着、膨潤しやすい組織構造を有している可能性がある。第二に、前述の通り、胚芽除去部位から心白方向への水の侵入経路によって吸水速度が上昇している可能性がある。前者の場合は β の持つ拡散係数としてのふるまいに合致しているが、後者の場合はモデルに組み込んでいない要素が β に影響を与えていることから、将来的なモデルの改善が必要であると考えられた。

温度依存性とアレニウス関係 拡散係数の温度依存性はアレニウスの関係に従うことが一般的に知られている。そこで、拡散係数様パラメータ β の温度依存性について調べ、アレニウスプロットを Fig. 8 に、一次回帰直線の傾き、切片、決定係数を Table 4 に示した。

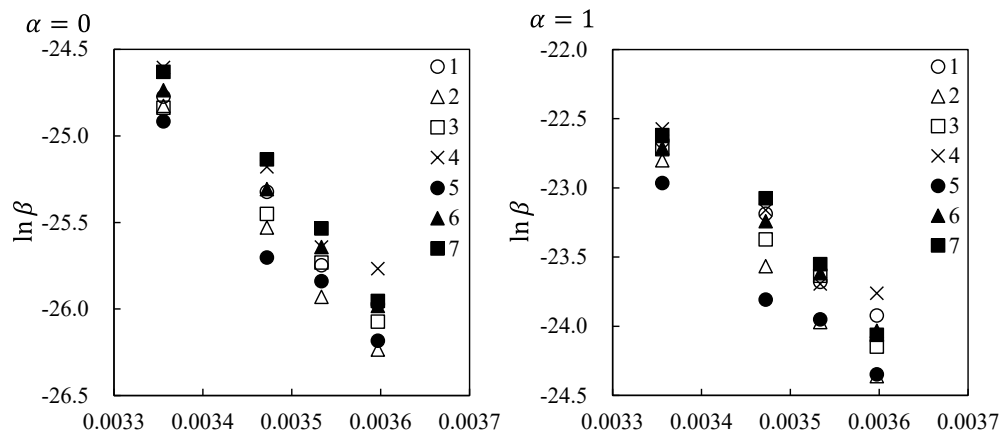


Fig. 8 Arrhenius plot of the diffusion coefficient-like parameter (β)

Table 4 Slope, intercept, and coefficient of the determination of the linear regression line in the Arrhenius plot.

Cultivar No.	α					
	0			1		
	Slope	Intercept	R ²	Slope	Intercept	R ²
1	-5111	-0.0014	0.99	-5396	-0.0008	0.99
2	-5908	-0.0008	1.00	-6482	-0.0002	1.00
3	-5091	-0.0015	1.00	-5742	-0.0006	0.99
4	-5061	-0.0014	0.97	-5250	-0.0008	0.96
5	-5141	-0.0014	0.97	-5587	-0.0007	0.97
6	-5162	-0.0014	1.00	-5444	-0.0008	0.99
7	-5457	-0.0011	0.99	-5928	-0.0003	0.96

結果から、 $\alpha = 0, 1$ のいずれの場合においても β はアレニウスの関係に従うことが明らかとなり、 β の温度依存性は拡散係数と同様であることがわかった。傾きは α の違いにより差があるものの、試料間の順序は一定であり、切片はいずれもほとんど 0 に近かったことから、試料間差は傾きによって表現できることがわかった。

改変モデルを用いた場合、浸漬水温の違いによる β の変化、すなわち一次回帰直線の傾きの絶対値が最大の試料は No. 2 山田錦であり、最小の試料は No. 4 五百万石であった。次点で小さい試料は No. 3 五百万石であった。ここから、 β の温度変化についても品種特性があることが示唆された。しかし、No. 7 おくほまれの傾きは五百万石と山田錦の中間的な値であり、これまでの考察にて取り上げた心白形状以外の要因であることが推察された。

水温変化は白米品温や浸漬水の分子レベルでの作用に影響を与えることが予想される。古浦ら²²⁾は浸漬吸水率の変化を伴う吸水は胚乳細胞間隙への水の拡散であると考察しており、中村ら²³⁾はデンプン鎖長が吸水率と相関関係にあることを示している。以上のことを踏まえると、胚乳細胞間の結合力やデンプンと水の親和力の品種間差異が水温変化に対する拡散速度の変化率に関係していると推察された。

総合考察

改変モデルの有効性 本研究では拡散法則をベースとした数式を改変することで、酒造好適米の吸水曲線への適合度が高いモデルを検討し、実測値との誤差や浸漬水温とパラメータの関係性について検証した。その結果、実測値との誤差が小さいモデルが得られ、改変モデルの拡散係数様パラメータと浸漬水温にはアレニウスの関係があり、フィックの法則における拡散係数と同様の扱いが可能であることがわかった。

フィックの拡散法則 ($\alpha = 1$) と比較して、改変モデル ($\alpha = 0$) の方が酒造好適米の吸水現象をより正確に記述できたことは、酒造好適米の吸水メカニズムが単純な濃度勾配に

よる拡散以外の要素を含んでいることを示唆している。改変モデルでは、自ブロックの含水率に関わらず隣接ブロックの含水率が直接的に含水率の時間変化に影響を与える機構を導入したことで、胚乳組織の吸水による膨潤や空隙への水の急速な浸入といった現象をより良く表現できたと考えられる。

品種特性と吸水挙動 改変モデルと実測値の誤差は No. 4 五百万石、No. 7 おくほまれで大きい傾向があり、これらの品種の特性が現在のモデルでは十分に表現できていないことが示された。また、拡散係数様パラメータの温度変化は No. 2 山田錦で最大、No. 4 五百万石で最小であり、品種によって温度に対する吸水速度の応答性が異なることが明らかとなった。これらの品種間差異は、心白形状や胚乳組織の構造的特徴、デンプン特性などの複合的な要因によるものと考えられる。特に、心白の形状や位置は品種固有の特徴があり、胚芽除去部位との位置関係によって水の浸入経路や浸入速度に影響を与えることが示唆された。

さらに、精米歩合 60 % の米粒では、各品種の胚乳中心部にある内層のデンプン構造が吸水特性に大きく影響していると考えられる。デンプン粒の大きさや分布、アミロースとアミロペクチンの構成比、デンプン鎖長などの違いが、水分子との親和性や膨潤特性に影響を及ぼし、結果として品種ごとの吸水速度や温度依存性の違いとして現れている可能性がある。

モデルの限界と今後の展望 穀物の吸水のモデル化には拡散法則が用いられることが多いが、本研究の結果から、酒造好適米に対しては拡散法則の一部の項を改変したモデルを使用した場合に適合度が向上することが明らかとなった。これは、拡散法則は穀物の吸水に対して普遍的に適用できる物理法則ではなく、酒造好適米の吸水現象の複雑性を完全には表現できないことを示している。

本報告で提案したモデルおよびパラメータについても、本試験の条件の中では高い適合度と浸漬水温との一定の法則性を示せたが、精米歩合、年次、白米水分等の条件を変化させた場合の影響については検討できていない。また、胚芽除去部位から心白への優先的な水の侵入経路や、心白内部の不均一な構造などをより詳細にモデルに組み込むことで、さらなる精度向上が期待できる。

今後の研究課題としては、以下の点が挙げられる：

- ① 胚芽除去部位からの水の侵入経路をモデルに明示的に組み込むこと
- ② 心白の三次元的形状や内部構造をより詳細に計測し、モデルに反映すること
- ③ 異なる精米歩合や白米水分による影響を検証すること
- ④ デンプン特性（アミロース含量、鎖長分布など）と拡散係数様パラメータの関係を調査すること

⑤複数年次の試料を用いて年次変動とモデルパラメータの関係を解析すること

これらの研究を進めることで、酒造好適米の吸水挙動をより正確に予測するモデルの構築が可能となり、品種選定や浸漬条件の最適化、さらには育種改良における吸水特性の評価など、酒造製造技術の向上に寄与することが期待される。

摘要

本章では、酒造好適米の吸水特性を高精度で予測するための数値シミュレーションモデルの開発および検証を行った。従来の食用米の吸水モデルとして広く用いられてきたフィックの拡散法則をベースに、酒造好適米特有の構造的特徴である心白と吸水過程で発生する水浸裂傷を組み込んだモデルを構築した。

まず、非破壊的手法により心白の厚みを定量評価する方法を確立し、さらに吸水過程における水浸裂傷の発生を経時的に計測する技術を用いて、7種類の酒造好適米（祝、山田錦、五百万石 2 点、雄町、吟吹雪、おくほまれ）の吸水特性を詳細に解析した。次に、拡散法則に基づく基本モデルを改変し、隣接する空間要素間の相互作用を調整するパラメータ α （自ブロックと隣接ブロックの影響力バランス）と拡散係数様パラメータ β を導入した新たなモデルを提案した。

数値シミュレーションの結果、従来のフィックの拡散法則（ $\alpha = 1$ ）に比べて、改変モデル（ $\alpha = 0$ ）が実測値との高い一致度を示した。また、拡散係数様パラメータ β は浸漬水温との間にアレニウス関係が確認され、拡散係数と同様の扱いが可能であることが明らかとなった。品種間では No. 4 五百万石と No. 7 おくほまれの吸水挙動がモデルとの適合度が低く、その原因として眼状に広がる心白形状と胚芽除去部位から心白への直接的な水の侵入経路の存在が推察された。また、浸漬水温の変化に対する β の応答性は品種により異なり、No. 2 山田錦で最大、No. 4 五百万石で最小となる傾向が認められた。

本研究で提案した改変モデルは、単純な濃度勾配による拡散だけでなく、酒造好適米の複雑な吸水メカニズムをより適切に表現することができ、清酒製造における浸漬工程の最適化や品種特性の評価に有用なツールとなることが期待される。今後は胚芽除去部位からの優先的な水の侵入経路や心白の三次元構造をより詳細にモデルに反映させること、さらに精米歩合や白米水分など様々な条件下での検証を進めることで、モデルの汎用性と精度の向上が課題である。

参考文献

- 1) 吉沢淑, 石川雄章, 今村一巨, 武田荘一, 藤江勇: 醸協, 69, (5), 315-318 (1974)
- 2) 熊谷知栄子, 黒柳嘉弘, 秋山裕一, 野白喜久雄: 醸協, 71, (10), 788-791 (1976)
- 3) 花本秀生, 中井進, 中沢英五郎, 清水正, 竹村成三: 醸協, 71, (11), 890-892 (1976)
- 4) 永田興四郎, 中沢英五郎: 醸協, 71, (2), 121-124 (1976)

- 5) 須藤茂俊, 小関卓也, 木崎康造 : 醸協, 97, (5), 369-376 (2002)
- 6) 水間智哉 : 醸協, 104, (5), 322-330 (2009)
- 7) 熊谷知栄子, 萩原康成, 福光松太郎, 秋山裕一 : 醸協, 75, (1), 55-60 (1980)
- 8) 高橋圭, 奥田将生, 上用みどり, 沼田美子代, 包紅彬, 河野弘美 : 醸協, 116, (6), 428-441 (2021)
- 9) 高橋圭, 奥田将生, 上用みどり, 沼田美子代, 包紅彬, 河野弘美 : 醸協, 116, (6), 442-454 (2021)
- 10) 熊谷知栄子, 黒柳嘉弘, 野白喜久雄 : 醸協, 71, (9), 718-722 (1976)
- 11) 家村芳次, 影山由香里, 松永恒司, 原昌道 : 醸協, 91, (7), 515-520 (1996)
- 12) 吉田充, 堀金明美 : 醸協, 103, (1), 10-16 (2008)
- 13) 佐藤稔英, 中山繁喜, 米倉裕一, 平野高広, 山口佑子, 遠山良 : 醸協, 106, (2), 103-111 (2011)
- 14) 村田敏, 田中史彦, 徳永淳一, 小出章二, アマラトゥンガ K.S.P : 農機誌, 58, (2), 19-24 (1996)
- 15) Y. Muramatsu, A. Tagawa, E. Sakaguchi, T. Kasai : Cereal Chem., 83, (6), 624-631 (2006)
- 16) M. Bello, M.P. Tolaba, R.J. Aguerre, C. Suarez : J. Food Eng., 97, (1), 96-100 (2010)
- 17) C. Engels, M. Hendrickx, S. De Samblanx, I. De Gryze, P. Tobback : J. Food Eng., 5, (1), 55-73 (1986)
- 18) 佐藤はるか, 田中史彦, 内野敏剛, ペレズジョナサン, 源川拓磨 : 農機誌, 73, (5), 313-320 (2011)
- 19) 目崎孝昌, 佐竹利子, 福森武, 池田善郎 : 農機誌, 67, (5), 61-71 (2005)
- 20) 目崎孝昌, 佐竹利子, 福森武, 池田善郎 : 農機誌, 68, (3), 35-44 (2006)
- 21) 富田晴雄 : 炊飯対象米の含水状態判定方法, 含水状態判定装置, 浸漬時間決定装置および炊飯設備, 特許 6804195, 2020-12-23
- 22) 古浦二郎, 玉置雅彦, 荒巻功, 猪谷富雄 : 醸協, 105, (8), 539-545 (2010)
- 23) 中村充, 水上優子, 青木法明, 梅本貴之, 日渡美世, 池田達哉, 荒木悦子, 船生岳人, 加藤満, 城田雅毅 : 日作紀, 83, (2), 126-135 (2014)

第5章

画像解析による一般米麴の破精評価とグルコアミラーゼ活性の相関解析

緒言

清酒製造において、麴が蒸米のデンプンを加水分解し、アルコール発酵の原料となるグルコースをもちに供給する重要な役割を担っている。そのため、十分な加水分解力を持つ麴を安定的に製造することが非常に重要となる。麴米として酒造好適米が広く使用されているのは、心白を有している酒造好適米では麴菌の生育が良好であり、高い酵素力価を持った麴を効率的に生産できるためである^{1,2)}。一方、心白を持たない一般米では高い酵素活性を持つ麴の製造は容易ではないものの、コスト面での優位性が大きく、比較的安価な清酒醸造を実現できることから、高い酵素活性を有する一般米麴の製造条件の検討は重要な課題となっている。

製麴現場では、麴菌の生育ステージは、麴菌の胞子が発芽、繁殖し、菌糸の広がりが白く観察される状態（破精）によって判断される。破精は、蒸米表面付近での麴菌の繁殖と内部への菌糸伸長に大別され、そのバランスによって生産される酵素が異なることが明らかになっている³⁻⁵⁾。破精の観察手法としては、可視光による観察^{6,7)}を始点として、走査型電子顕微鏡^{8,9)}、共焦点レーザー顕微鏡¹⁰⁾、蛍光イメージング¹¹⁾、質量分析イメージング¹²⁾など多様な技術が報告されているが、可視光観察法はその簡便性において大きな利点を持つ。Ito らの研究によれば、一つの製麴バッチ内には様々な破精状態の麴が混在しており、母集団の平均値を正確に推定するためには約 50 粒のサンプリングが必要とされている¹¹⁾。したがって、各製造バッチから代表的な麴を数粒選んで破精を評価する手法ではバッチ全体の破精を適切に代表しているとは言い難く、逆に 50 粒以上の破精を平均化すると、バッチ内に存在する多様な破精情報が希釈されてしまうといえる。つまり、破精と酵素活性の関係を正確に把握するためには、個々の麴粒の破精状態と酵素活性を同時に分析し、得られた個別の相関関係を基に各製麴バッチの特性を総合的に理解する必要があると考えられる。

このような背景から、本章では同一麴粒について可視光による破精の画像解析とグルコアミラーゼ（GA）活性の測定を並行して実施する方法を構築し、一般米における破精と GA 活性の相関関係について詳細に考察した結果を報告する。

材料と方法

供試試料 黄桜（株）における実地醸造において製造した一般米麴を用いた。使用した麴菌株は FK 菌 5-1 号（今野商店製）であり、各試料の GA 活性値を測定した上で、品種、精米歩合が同一のグループ内で GA 活性値に差異が顕著な試料を選抜した。最終的に計 11 サンプルを実験に供した（Table 1）。GA 活性値の測定には糖化力測定キット¹³⁾（キッコーマ

ン社製) を使用し、吸光度測定には紫外可視分光光度計 UV-1800 (島津製作所製) を用いた。

Table 1 *Koji* samples used in this study.

No.	Cultivars	Polishing rate (%)	Harvest year	Region of origin	GAase (U/g <i>koji</i>)
1	<i>Koshihikari</i>	60	2022	Toyama	172
2			2022	Ibaraki	217
3		70	2022	Ishikawa	149
4			2022	Ishikawa	184
5			2021	Toyama	232
6	<i>Kyonokagayaki</i>	60	2022	Kyoto	170
7			2022	Kyoto	185
8			2022	Kyoto	215
9		70	2022	Kyoto	176
10			2022	Kyoto	194
11			2022	Kyoto	211

破精の画像撮影と解析 麴粒切片の作成には、2 枚のカミソリ刃の間にカバーガラスを挟み込んで接着させた自作切片作成器材を使用した (Fig. 1a)。この器材を用いて、40 粒の各麴粒について中央部を腹側から背側にわたる方向に切断し、厚さ約 0.5 mm の切片を作製した (Fig. 1b, c)。得られた切片はデジタルマイクロスコープ VHX7000 (KEYENCE 社製) を用いて倍率 50 倍で撮影した。撮影画像はプログラミング言語 Python (ver. 3.10.11) と画像解析ライブラリ OpenCV (ver. 4.8.0) および科学計算ライブラリ scikit-learn (ver. 1.2.0) を用いて解析した。

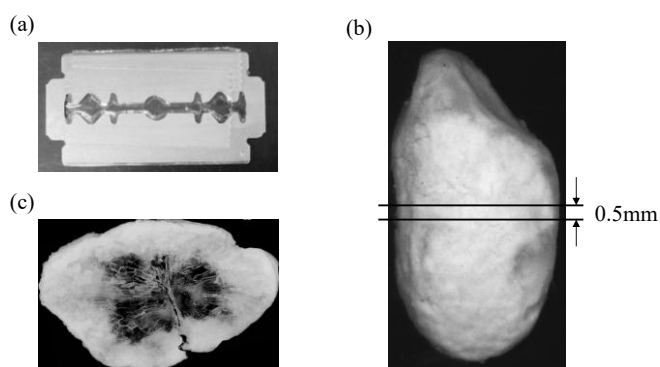


Fig. 1 The method for creating *koji* slices. (a) Self-made tool for creating cut slices by affixing two double-edged razor blades together. (b) Whole *koji* image and sectioning location. (c) An image of a *koji* slice.

予備的な画像観察により、輝度 180 以上の領域が破精と概ね一致することを確認した上で、麴切片画像 10 枚を 64×64 ピクセルにリサイズし、輝度閾値 180 を用いて二値化（180 以上：255、180 未満：0）処理を行った後、平均化して再描画した（Fig. 2a）。次に背側（ $x = 0$ ）から腹側（ $x = 63$ ）にかけて、各 x 座標における麴内領域の輝度平均値を算出した（Fig. 2b）。また、麴内領域全体の輝度平均値を 255 で除した値を破精歩合（%）として評価指標に用いた。

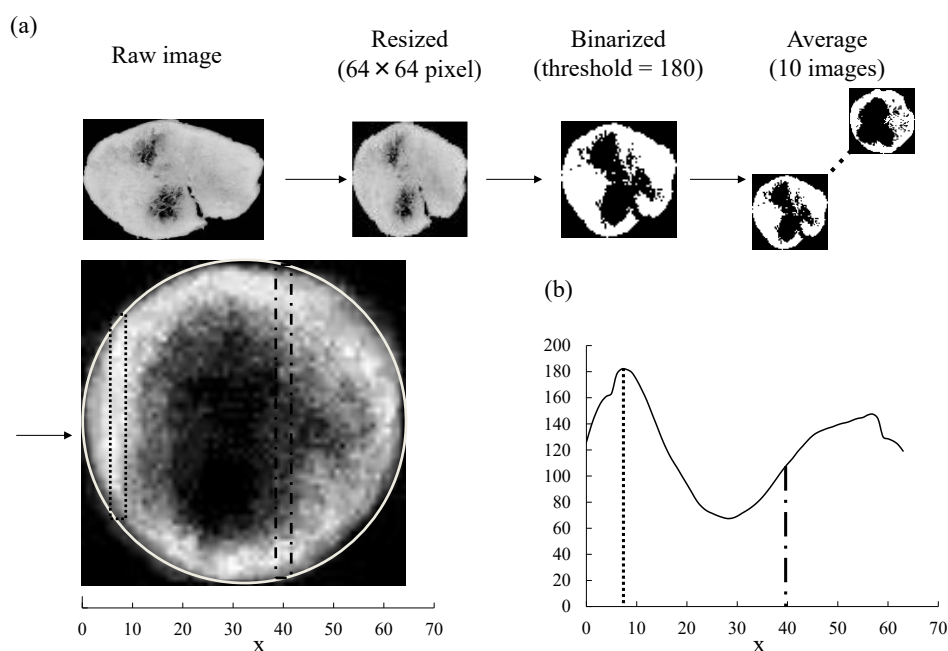


Fig. 2 (a) Generation of averaged image from 10 sliced images of koji and (b) calculation of brightness average values.

麴一粒の GA 活性値の分析 麴一粒の GA 活性値分析は、糖化力測定キットの方法を改変して実施した。まず、前項で撮影した切片を含む麴一粒全体の重量を測定し、96 ウェルマイクロプレートに 1 ウェルに移した。次に 10 mM 酢酸緩衝液（pH 5.0）を 200 μ L 添加した。この操作を 40 粒のサンプルに対して実施した後、プレートを約 5 $^{\circ}$ C の冷蔵庫内に一晚静置し、酵素を抽出した。翌日、新しいプレートの各ウェルにキット付属の基質溶液および酵素溶液を各 50 μ L 添加し、プレートを 37 $^{\circ}$ C の温水に浮かべて 5 分間の予備加熱を行った。予備加熱終了後、一晚静置により酵素が抽出された緩衝液（以下、抽出液）を 10 μ L 添加し、10 分間反応させた。反応停止後、反応停止液を 200 μ L 添加し、マイクロプレートリーダー SUNRISE（TECAN 社製）を用いて波長 405 nm の吸光度を測定した。以下、糖化力測定キットを用いた通常の GA 活性分析法を「通常法」、本研究で新たに開発した一粒分析法を「一粒法」と呼称する。マイクロプレートリーダーと紫外可視分光光度計の測定値

の差異については、検量線を作成し（マイクロプレートリーダーの測定値は紫外可視分光光度計の 85.4 %、 $R^2 = 0.999$ ）、一粒法の分析値を紫外可視分光光度計での値に換算して表示した。

データ解析 得られた GA 活性値および破精データの統計解析には、Python 統計解析ライブラリを用いた。品種間差異の評価には分散分析を、破精と GA 活性値の相関評価にはピアソンの相関係数を用いた。また、製麴条件と GA 活性値の関係性評価には、製麴管理記録から得られた品温および水分データを用いた回帰分析を実施した。

結果と考察

通常法と一粒法の GA 活性値の比較 通常法と一粒法の GA 活性値の相関性を検証するため、通常法で分析した GA 活性値と一粒法で分析した 40 粒の麴の GA 活性値の平均値を比較した (Fig. 3)。先述したように、マイクロプレートリーダーの計測値は紫外可視分光光度計の約 85.4% ($R^2 = 0.999$) であったため、一粒法の分析値は紫外可視分光光度計での分析値に換算して表示した。

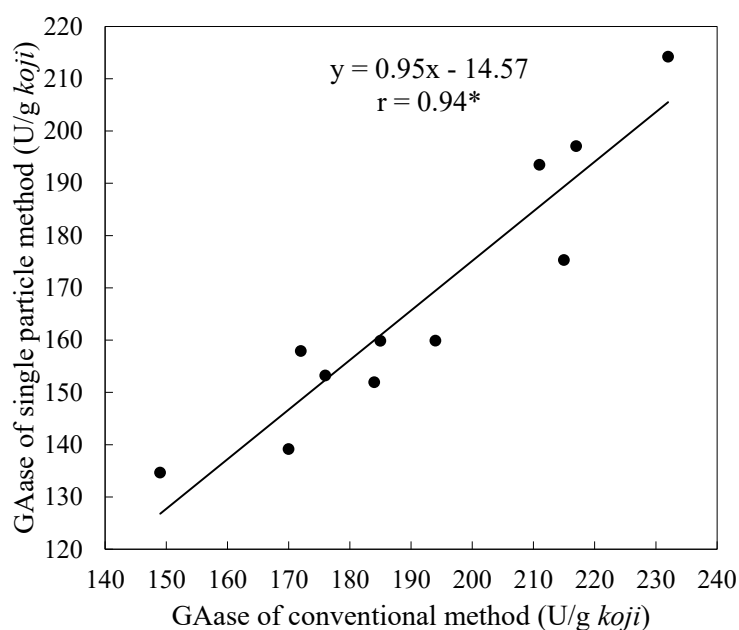


Fig. 3 Comparison of GA activity between the conventional method and single particle method.

(* $p < 0.05$)

両分析法による測定値の間には強い正の相関 ($r = 0.94$) が認められ、一粒法においても GA 活性値の大小関係を正確に評価できることが確認された。なお、一粒法の GA 活性値は

通常法と比較して相対的に低い値を示したが、これは一粒法の試験において切片の画像撮影を目的として整粒のみをサンプリングした影響であると考えられる。これらの結果から、本研究で開発した一粒法は通常法と同等の精度で GA 活性値を分析可能であることが確認された。

麴一粒の GA 活性値の分布 通常法を用いて分析される GA 活性値は麴 10 g の平均値であり、この中に含まれる各麴粒の GA 活性値にはバラツキがあることが予想される。そこで、各サンプルから採取した麴 40 粒の GA 活性値の分布をバイオリンプロット (Fig. 4) で解析した。

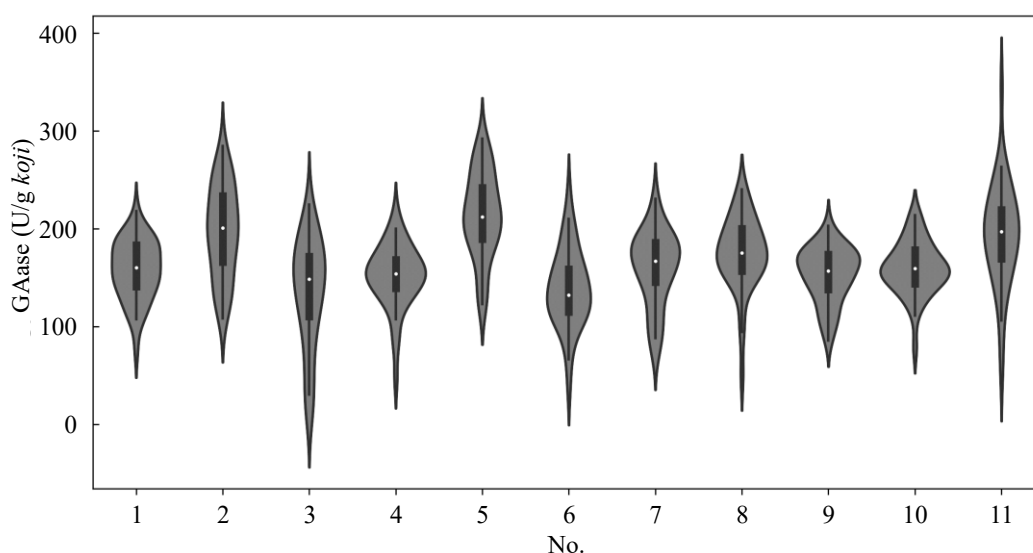


Fig. 4 A violin plot showing trends for the occurrence of GA activity in 40 koji samples.

その結果、Ito らの報告¹¹⁾と同様に、麴一粒の GA 活性値は広範囲に分布しており、バッチ内の変動が大きいことが確認された。例えば、Fig. 4 に示すように、No. 3 の麴は全サンプル中で最も低い GA 活性平均値を示したが、これは活性値の低い粒の混在比率が高いことが原因であり、全ての麴粒が一様に低い GA 活性値を示すわけではないことが明らかとなった。

基本統計量 (Table 2) の分析から、GA 活性の最大値は平均値の約 1.5 倍に達することが分かった。この結果は、一般米麴においても GA 活性値の高い粒が存在することを意味しており、製麴方法の改善によって GA 活性値の高い粒の混合比率を増加させることで、バッチ全体の GA 活性平均値を向上させられる可能性が示唆された。なお、GA 活性平均値と分布の尖度、歪度には明確な相関が認められず、GA 活性平均値と一粒 GA 活性値の分布特性に直接的な関係はないと推察された。

Table 2 Basic statistical measures of the GA activity analyzed using the single particle method.

No.	Cultivar	Polishing rate (%)	Average	Standard deviation	Minimum	Maximum	Kurtosis	Skewness
1	<i>Koshihikari</i>	60	157.9	30.1	77.1	218.3	-0.21	-0.41
2			197.1	46.2	108.5	284.4	-0.97	-0.11
3		70	134.7	55.2	9.8	225.0	-0.37	-0.68
4			151.9	32.0	47.6	216.2	1.63	-0.88
5			214.2	43.0	123.3	292.0	-0.49	-0.27
6	<i>Kyonokagayaki</i>	60	139.2	39.7	37.9	237.7	0.30	0.09
7			159.9	37.7	72.0	230.5	-0.28	-0.60
8			175.3	36.9	50.1	240.1	1.98	-0.95
9		70	153.2	27.6	85.9	203.0	-0.30	-0.64
10			159.9	26.7	78.4	213.8	0.94	-0.30
11			193.5	51.8	53.6	345.4	1.31	-0.09

破精の画像特徴と GA 活性値 同一サンプルの麴切片画像を GA 活性値の降順に並び替え、GA 活性値が 1 位、2 位、39 位、40 位の麴の破精状態を観察した (Fig. 5、6)。画像中の白色領域は麴菌による酵素分解を受けた箇所を示すが、「コシヒカリ」と「京の輝き」の両品種において、GA 活性値が高い麴粒ほど白色領域の面積が広い傾向が認められた。この結果は、破精込みが良好な試料で GA 活性値が高くなるという従来知見が個々の麴粒レベルにおいても成立することを示している。

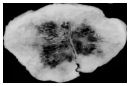
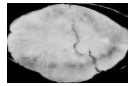
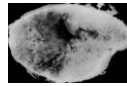
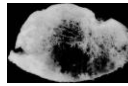
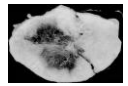
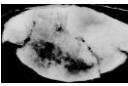
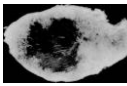
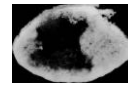
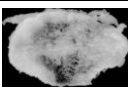
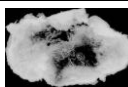
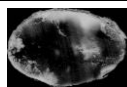
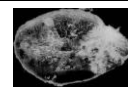
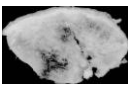
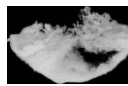
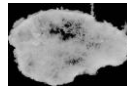
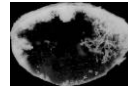
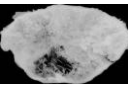
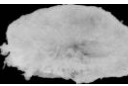
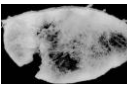
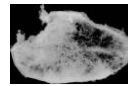
No.	Polishing rate (%)	Ranking of GAase (descending order)			
		1st	2nd	39th	40th
1	60				
2					
3	70				
4					
5					

Fig. 5 Comparison of the GA activity and haze states in *Koshihikari koji*.

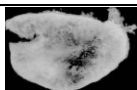
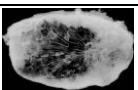
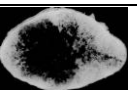
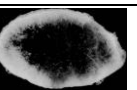
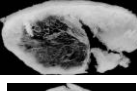
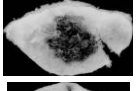
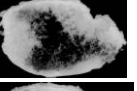
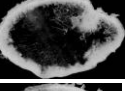
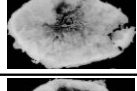
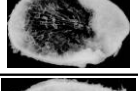
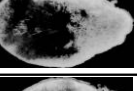
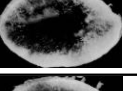
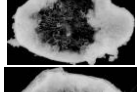
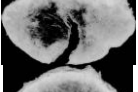
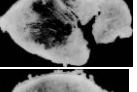
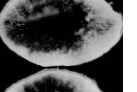
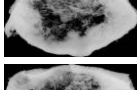
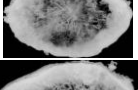
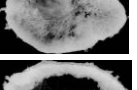
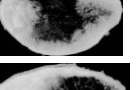
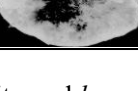
No.	Polishing rate (%)	Ranking of GAase (descending order)			
		1st	2nd	39th	40th
6	60				
7					
8					
9	70				
10					
11					

Fig. 6 Comparison of the GA activity and haze states in *Kyonokagayaki koji*.

GA 活性値の高い粒（1 位または 2 位）の破精について品種間比較を行うと、「コシヒカリ」では麴中心部まで破精が進行している粒が多いのに対し、「京の輝き」では中心部への破精が少ない特徴が観察された。また、「京の輝き」では腹側と背側で破精程度に差異が見られ、腹側への破精込みが優勢である傾向が認められた。

「京の輝き」が「コシヒカリ」よりも破精込みにくいという観察結果から、「京の輝き」は麴菌が菌糸を伸長させにくい胚乳組織構造を有していることが推察される。先行研究では、背側と腹側におけるデンプン粒のサイズやタンパク質分布の品種間差異が吸水パターンの違いに繋がることが報告されている¹⁴⁾。これらの知見を踏まえると、「京の輝き」では相対的に分解が容易な腹側からの菌糸成長が優勢になったと考えられる。

また興味深いことに、Fig. 5 の No. 4 と Fig. 6 の No. 10 は概ね同一の GA 活性平均値を示すにもかかわらず、破精の様相に明らかな差異が認められた。この結果は、最適な破精パターンが品種によって異なる可能性を示唆している。

破精の分布と GA 活性値の関係性 破精と GA 活性値の関係性をより詳細に把握するため、破精の定量評価を行った。切片画像の観察結果から、同程度の GA 活性値を有する粒でも破精の画像特徴に大きな差異が確認されたため、計 40 粒の麴を GA 活性値の降順に並べ替えた後、10 粒ごとにグループ化し、Fig. 2 に示した方法で 10 粒の平均化画像を作成し、 x 軸方向の輝度分布を解析した (Fig. 7)。

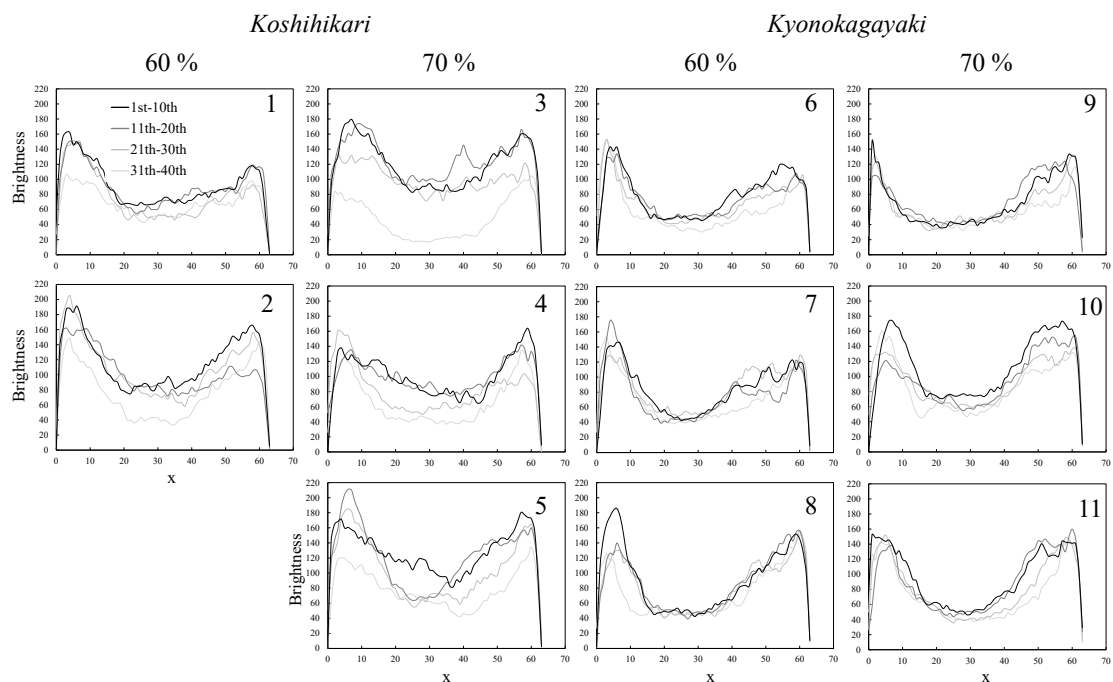


Fig. 7 Quantitative evaluation of brightness distribution crossing from the back ($x = 0$) to the belly ($x = 63$) of *koji*.

GA 活性平均値が高いグループ（黒色線）は低いグループ（灰色線）と比較して、概ね全ての位置で輝度が高くなる傾向を示し、破精が強いサンプルで GA 活性値が高いという関係性が定量的に示された。また「京の輝き」（サンプル 6～11）は「コシヒカリ」（サンプル 1～5）と比較して麹中心部（ $x = 32$ 付近）の輝度が小さく、中心部まで破精込みにくい特性を有することが定量的に確認された。

黄桜（株）製麹現場の経験則として、「京の輝き」は「コシヒカリ」と比較して蒸米のさばけが悪くなりやすい特徴がある。この特性から、「京の輝き」では水分が蒸米の外周部に偏在しやすく、中心部への菌糸伸長が抑制されると推察される。しかし、このような破精の品種間差異が存在するにもかかわらず、GA 活性の最大値は両品種とも 200 単位前後と大差なく、中心部への破精込みが弱くても GA 活性値が高くなるケースがあることが明らかとなった。

破精歩合と GA 活性の関係性 平均化画像から算出される破精歩合と、平均化対象の麹粒の GA 活性平均値の関係性を Fig. 8 に示す。例えば、各図における 4 点の○プロットは、GA 活性値が高い順に 1 - 10 位、11 - 20 位、21 - 30 位、31 - 40 位の麹の GA 平均値と平均化画像の破精歩合に対応している。

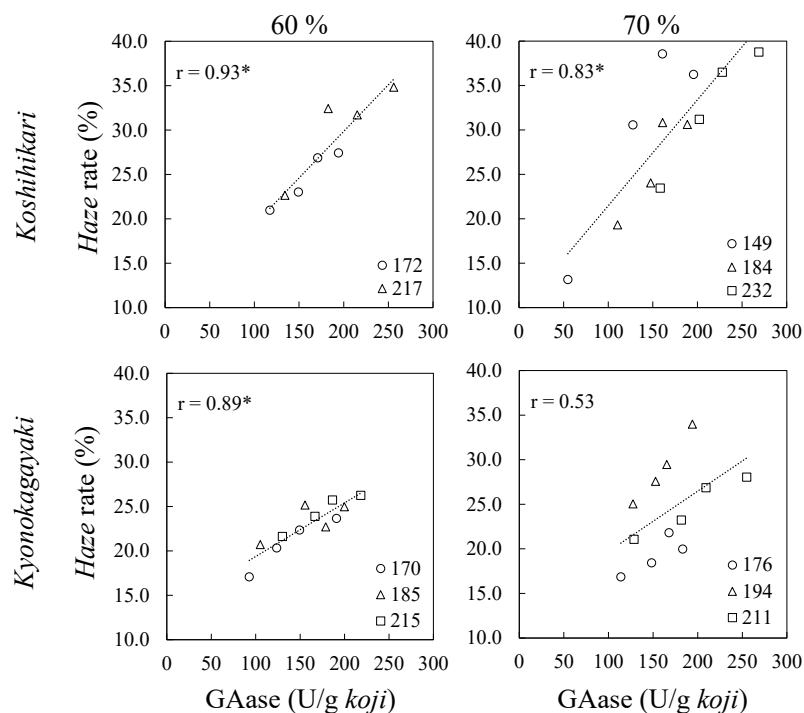


Fig. 8 The relationship between the GA activity and the density of haze. The number in the legends means the average GA activity of each group. (* $p < 0.05$)

「京の輝き」70%精米の麴を除き、GA活性値と破精歩合には有意な正の相関が認められ、この結果は先行研究の報告¹⁵⁾と一致している。本解析では各製造バッチの麴をGA活性値の高低でグループ化し、破精との関係性を検証したが、全データ点が同一直線の近傍にプロットされる結果となった。バッチ間では品温や水分条件が異なることは明らかであるが、バッチ内の各麴粒の周辺環境条件の詳細は不明である。GA活性値と破精が単一の相関関係として現れたという事実は、GA活性に影響を与える麴の生育環境条件は概ね破精という形質に集約されることを示唆しており、破精はGA活性値を予測するための有効な指標であると考えられる。

相関関係の分析から、品種間で相関係数に差異が認められた一方、精米歩合による明らかな違いは検出されなかった。先行研究では、酒造好適米の「山田錦」を用いた試験において、90%精米と比較して50%精米でより内部への破精込みが進行することが報告されており¹⁶⁾、これは蒸米表面のタンパク質や脂質含量の違いによると考察されている。本研究で使用した試料は70%および60%精米であり、いずれも白米表面のタンパク質や脂質が相当程度除去されていることや、精米歩合の差が10%と比較的小さいことから、精米歩合による明確な差異が検出されなかったと考えられる。

「京の輝き」70%精米の麴で有意な相関が認められなかった原因としては、No. 10のサ

ンプル（GA 活性値 194）において胚乳細胞間隙と破精を正確に区別できなかったことが考えられる。破精領域のみを効率的に抽出する手法の開発により、予測精度の更なる向上が期待できる。また、「京の輝き」では腹側への破精が優勢となる傾向が確認されたことや、「コシヒカリ」と比較して破精と GA 活性値の相関係数が低いことを考慮すると、「京の輝き」では麴全体ではなく腹側の破精に着目した定量評価を行うことで、GA 活性値との相関関係をより明確化できる可能性がある。

製麴条件と GA 活性値の関係性 製麴条件と GA 活性値の相関を分析したところ、「コシヒカリ」では盛前の麴品温と有意な正の相関（ $r = 0.93$ 、 $p < 0.05$ ）が、「京の輝き」では出麴時の麴水分と有意な負の相関（ $r = -0.94$ 、 $p < 0.05$ ）が確認された（Fig. 9）。興味深いことに、各品種で有意な相関を示した条件は、他方の品種では有意な相関を示さなかった。

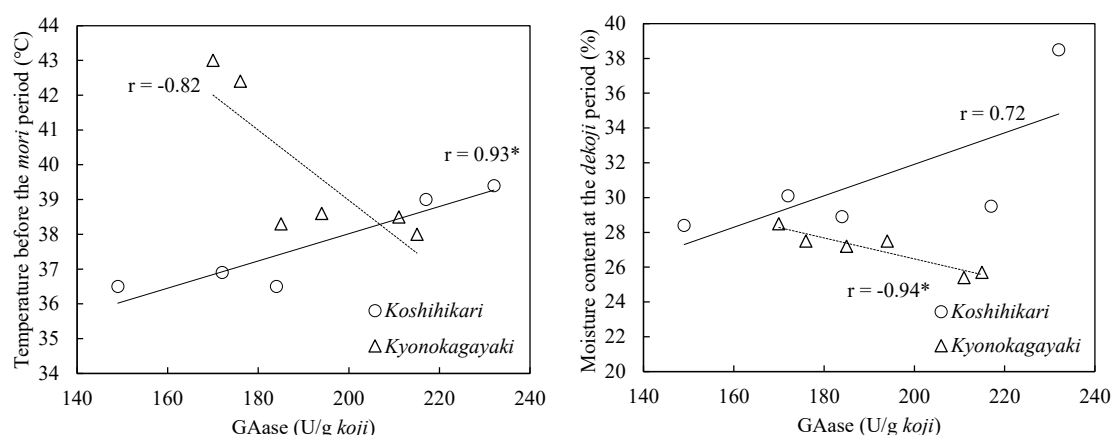


Fig. 9 The relationship between temperature before the *mori* period and moisture content during the *dekoji* period in the *koji* making process with GA activity. The solid and the dashed lines represent the primary regression lines of *Koshihikari* and *Kyonokagayaki*, respectively. (* $p < 0.05$)

盛前は蒸米表層部で菌糸が増殖する段階であり、品温が高いことは菌の生育が旺盛であることを意味する。本研究の結果から、「コシヒカリ」は内部への破精込みによって GA 活性を高めることが示されており、盛前時点の蒸米表面での旺盛な菌糸生育が、その後の内部への破精込みの準備段階として GA 活性値の決定要因になっていると考えられる。

一方、「京の輝き」は蒸米のさばけが悪化しやすいという経験的知見からも、水分制御が GA 活性の向上に重要な役割を果たしていると推察される。先行研究によれば、蒸米の水分含量が高い場合、菌体量に対して破精形成が不良となることや、胚乳組織が十分に膨潤することで菌糸成長のための酵素分泌が抑制され、特にグルコアミラーゼの生産量が低下

することが報告されている⁴⁾。一方で、蒸米水分が過度に低い場合、酵素活性の向上が期待できるものの、菌の増殖が遅延するという研究結果も存在する¹⁷⁾。本研究の結果から、麴の良好な生育に適した蒸米水分条件は品種によって異なることが示唆され、「京の輝き」については菌糸の生育を阻害しない範囲で麴水分を低く維持することで、GA 活性を向上させる可能性が考えられる。

総合考察 一般米の破精と GA 活性値の関係性を解析することで GA の高い麴の破精の状態把握を目指したが、理想的な破精は品種によって異なり、内部への破精込みは弱いGA 活性値が高くなるケースがあることが明らかとなった。京の輝きはコシヒカリに対して酵素活性値の高い麴を作りにくいと経験的に考えられているが、GA 活性値が高い粒の状態を破精と酵素活性の両面から詳細に解析することで、品質向上への道筋を見出すことが可能であると考えられる。

破精の評価方法について、本報では可視光による破精領域の抽出と破精歩合での定量評価を実施したが、白色として観察される破精の中には様々な状態の菌糸が存在している。Yamane らはセルロースキューブに寒天培地をしみこませたモデル蒸米上で麴菌を固体培養し、水分含量が低い場合に菌糸が太く GA の生産量が増加したことを報告している¹⁸⁾。本報で用いた二値化による破精領域の抽出では、菌糸の太さや分解の強度といった微細な情報を十分に捉えられていない可能性がある。また、胚乳細胞間隙と破精の領域を完全に分離できていない技術的課題も存在する。これらの問題点については「①ミクロトーム等を用いて、切片作出の精度を向上させる」、「②撮影の解像度を高める」、「③麴一粒から複数の切片を作出し、3 次元構築によって粒全体の破精を可視化する」「④セグメンテーションによる破精領域の抽出やオートエンコーダーによる胚乳細胞間隙の除去といったディープラーニング技術を活用して、破精領域の抽出精度を向上させる」といった方法によって解決が可能であると考えられる。しかしながら、①から③の方法はサンプル処理の煩雑さやコストが大幅に増加するため、④を中心とした画像処理手法の改良によって破精の定量評価技術の高度化を図ることが現実的であると考えられる。

酵素活性について、本報では GA のみを対象として分析を行ったが、特に α -アミラーゼ、酸性プロテアーゼ、酸性カルボキシペプチダーゼについては破精との関係性を調査した研究が数多く存在する。 α -アミラーゼは破精との相関が強く、破精込みが良好な場合に高値を示すこと¹⁵⁾、破精込みが不良な場合は酸性プロテアーゼ、酸性カルボキシペプチダーゼが増加すること¹⁹⁾が報告されている。コシヒカリと比較して京の輝きの破精込みは弱い傾向にあったが、京の輝きは粗タンパク質含量が低い品種²⁰⁾であり、破精込みが弱い粒でも GA 活性が高い事例が確認された結果を踏まえると、酸性プロテアーゼ、酸性カルボキシペプチダーゼの生産量はコシヒカリと同程度かそれ以下ではないかと推察される。また、京の輝きの蒸米のさばけが悪い現象から、コシヒカリ以上に白米内部と表面の水分含量差

が生じていると考えられる。麴菌の生育に対しては蒸米全体の水分含量の高さよりも、麴菌の主たる生育環境近傍の水分活性が重要な因子となり、破精評価においては品種ごとの個別評価が適切であると考えられる。

本方法は酒造好適米への応用も検討したが、酒造好適米は麴内部がもろく、切片の作成が困難であった。これは厚み 0.5 mm の切片作成を目指したためであり、厚みを増すことで本手法の適用可能性が広がると考えられる。しかしながら、酒造好適米は心白付近の割れ箇所から内部に直接菌糸を伸長させることが報告^{1,4)}されており、一般米のような外側から内側への一方方向の菌糸伸長とは異なる生育パターンを示すと推測される。そのため、破精と GA 活性の相関関係についても本検討で得られたような線形相関とは異なる可能性が高く、菌糸の初期生育部位と菌糸伸長部位を区別して評価するなどの手法改良が必要になると予想される。

また、破精歩合と GA 活性値の相関関係を活用することで、製造現場における簡易的な GA 活性値予測システムの構築も可能であると期待される。本研究では麴切片の画像撮影にデジタルマイクロスコープを使用した。解像度の観点では市販のデジタルカメラやスマートフォン付属カメラでの撮影でも十分対応できると考えられる。さらに、画像解析に使用した Python 3 は運用コストがかからず、高性能なコンピュータが不要である点も実用上の大きな利点である。基礎研究における破精評価方法の改良と現場での技術応用を並行して推進することで、麴の品質評価技術を高度化させることが、今後の清酒醸造の発展において重要な鍵になると考える。

摘要

本章では、一般米を用いた麴について、一粒単位で破精の画像解析とグルコアミラーゼ (GA) 活性の分析の両者を実施する方法を開発し、破精と GA 活性値の相関関係の把握を試みた。その結果、各製麴バッチに含まれる麴は一粒単位では多様な GA 活性を有していることが明らかとなり、その混合比率から GA 活性平均値が決定されていることが示された。破精形態には品種間差があり、コシヒカリでは内部への破精込みが強く、京の輝きでは相対的に弱い傾向が認められた。また、破精と GA 活性の関係性は品種間で異なり、コシヒカリでは麴全体の破精の強度、京の輝きでは腹側の破精の強度が GA 活性値と密接に関連していることが示された。麴切片の面積に占める破精領域の比率（破精歩合）は品種ごとに GA 活性値と有意な正の相関を示した一方、精米歩合による差異はほとんど認められなかった。このような品種間差は製麴条件と関連しており、コシヒカリでは盛前の品温が高い条件で、京の輝きでは出麴時の水分が低い条件で GA 活性値が高くなることが判明した。本研究で得られた知見は、一般米麴の品質向上や製麴現場における簡易的な GA 活性予測手法の開発に活用できると考えられる。

参考文献

- 1) 家村芳次, 藤田栄信 : 醸協, 77, (4), 260-264 (1982)
- 2) 柳内敏靖, 福田潔, 長野知子, 中村智美, 宮崎紀子, 水間智哉, 清川良文, 若井芳則 : 醸協, 88, (12), 977-983 (1993)
- 3) 原田祥司, 瀬頭一平, 吉田肇, 若林邦宏, 伊藤清, 蓮尾徹夫, 宮野信之 : 醸協, 88, (7), 485-490 (1988)
- 4) 須藤茂俊, 小関卓也, 木崎康造 : 醸協, 97, (5), 339-376 (2002)
- 5) 柳内敏靖, 福田潔, 長野知子, 中村智美, 宮脇美津子, 清川良文, 若井芳則 : 醸協, 88, (7), 559-564 (1993)
- 6) 岡崎直人, 福田典雄, 菅間誠之助 : 醸協, 74, (10), 687-691 (1979)
- 7) 本多裕之, 大楠栄治, 花井泰三, 西田淑男, 深谷伊和男, 小林猛 : 生物工学, 73, (5), 409-412 (1995)
- 8) 松永恒司, 古川恵司, 家村芳次, 渡辺和彦, 和田正夫 : 醸協, 94, (4), 331-337 (1999)
- 9) 吉井美華, 荒巻功 : 醸協, 96, (12), 806-813 (2001)
- 10) 小島弘栄, 長谷川浩, 曲渕哲朗 : 生物工学, 77, (8), 339-344 (1999)
- 11) K. Ito, K. Gomi, M. Kariyama, T. Miyake : J. Biosci. Bioeng., 124, (1), 62-70 (2017)
- 12) A. P. Wisman, Y. Tamada, S. Hirohata, K. Gomi, E. Fukusaki, S. Shimma : 129, (3), 296-301 (2020)
- 13) 今井泰彦, 徳武昌一, 山次信幸, 鈴木勝 : 醸協, 91, (1), 51-57 (1996)
- 14) 目崎孝昌, 佐竹利子, 福森武, 池田善郎 : 農機誌, 68, (3), 35-45 (2006)
- 15) 松永恒司, 古川恵司, 原昌道 : 醸協, 97, (10), 721-726 (2002)
- 16) M. Yasui, K. Oda, S. Masuo, S. Hosoda, T. Katayama, J. Maruyama, N. Takaya, N. Takeshita : Fungal Biology and Biotechnology, 7, 8 (2020)
- 17) 岡崎直人, 竹内啓修, 菅間誠之助 : 醸協, 74, (10), 683-686 (1979)
- 18) Y. Yamane, M. Yoshii, S. Mikami, H. Fukuda, Y. Kizaki : J. Biosci. Bioeng. 89, (1), 33-39 (2000)
- 19) 伊藤清 : 醸協, 87, (1), 17-21 (1992)
- 20) 藤原久志, 尾崎耕二, 大橋善之, 今井久遠, 増村威宏, 三浦清之, 笹原英樹, 長岡一朗, 重宗明子, 後藤明俊, 若井芳則 : 醸協, 110, (4), 276-284 (2015)

第6章 小規模製麴試験を用いた製麴条件の最適化研究

緒言

清酒醸造工程において、麴は各種酵素（グルコアミラーゼ、 α -アミラーゼ、酸性カルボキシペプチダーゼなど）を生産し、もろみ中でのアルコール発酵や呈味成分の生成を促進するとともに、製成酒の香味に大きな影響を与えている。麴米として広く用いられる酒造好適米は心白構造を有しており、この特徴的な構造が麴菌の効率的な生育を可能にし、高い酵素活性を持つ麴の製造を実現している^{1,2)}。一方、心白構造を持たない一般米は、原料米としてのコスト面での優位性があるものの、酵素生産力の高い麴を安定的に製造することが技術的課題となっている。

一般米には多様な品種が存在し、それぞれが固有の理化学的特性を備えている。「コシヒカリ」は日本を代表する良食味品種であり、タンパク質含量が比較的低く、強い粘りを特徴とする。「京の輝き」は京都府で育成された品種で、「コシヒカリ」と比較してやや粒が大きく、吸水が緩やかであるという特性を持つ。また、「はえぬき」は山形県で育成された品種で、「コシヒカリ」よりもやや硬質で粘りが少ない特徴がある。これらの異なる理化学的特性は、麴菌の生育パターンや酵素生産能に影響を及ぼす可能性が考えられる。

前章において、一般米品種の「コシヒカリ」と「京の輝き」を用いて、麴の破精形成と酵素活性の関連性について調査を実施した。その結果、両品種において破精の形成様式とグルコアミラーゼ（GA）活性との間に特徴的な相関関係が観察され、これらの特性が製麴条件によって変動することを明らかにした。しかしながら、この研究では製造現場で調製された麴を分析対象としていたため、温度や湿度などの製麴環境が一定の範囲内に制限されており、これらの環境因子が破精形成や酵素生産に与える影響を定量的に評価することができなかった。さらに、清酒醸造において重要な役割を担う多様な酵素類の生産挙動や、麴菌の生育度合いについても十分な検討がなされていなかった。

そこで本章では、恒温恒湿槽を活用した無通風箱培養法（NAB 法）³⁾により製麴環境を精密に制御し、製麴特性の異なる 3 品種（「京の輝き」「コシヒカリ」「はえぬき」）を用いた製麴試験を実施した。これにより、製麴条件が破精の形成パターン、各種酵素の生産能、および麴菌の生育状況に及ぼす影響を体系的に解析し、一般米を原料とした高品質な麴の安定的製造を実現するための製麴条件の最適化指針を確立することを目的とした。

材料と方法

原料米、精米、調湿 本研究では、2023 年産の一般米 3 品種（京の輝き（京都府産）、コシヒカリ（茨城県産）、はえぬき（山形県産））を供試試料として用いた。精米は HS-4 試験精米機（チヨダエンジニアリング社製）と金剛ロール C-60 を使用し、精米歩合 60 %まで

実施した。精米工程は2段階に分けて行い、玄米から精米歩合 70 %までを 1500 rpm、70 %から 60 %までを 1300 rpm のローラー回転数で処理した。精米後の白米は、水分を 10 %、12 %、14 %の3条件に調湿し、各試験の実施まで 15 °C の恒温槽内で保管した。

浸漬、蒸きょう 浸漬条件は最大吸水と限定吸水の2条件を設定した。最大吸水条件では、所定の水分（10 %、12 %、14 %）に調整した白米 75 g を 15 °C の水で 1 分間洗浄後、新しい 15 °C の水に浸漬し、15 °C の恒温槽内で 16 時間（一晚）静置した。限定吸水条件では、12 %に調整した白米 75 g を 10 °C の水で 1 分間洗浄後、品種ごとに異なる浸漬時間（京の輝き：15 分間、コシヒカリ・はえぬき：8 分間）で処理した。浸漬後は十分に水を切り、ポリエチレン袋内で 15 °C、16 時間の水分調整を行った。蒸きょうは木製甑を用いて 50 分間実施し、その後 30 °C まで自然放冷した。

製麹 製麹は恒温恒湿槽 LHU-114（ESPEC 社製）を用い、無通風箱培養法³⁾に基づいて実施した（Fig. 1）。30 °C まで放冷した蒸米に種麹（FK 菌 5-1 号、秋田今野商店製）12.5 mg を均等に播種し、底面がメッシュ構造の円筒型容器の半区画に移した。この容器はステンレス製の枠組み内に設置し、枠組みの4辺に取り付けられた支持棒で固定した。枠組みの上下開放部は、防水透湿性を持つポリテトラフルオロエチレン膜で覆い、恒温恒湿槽内に設置した。

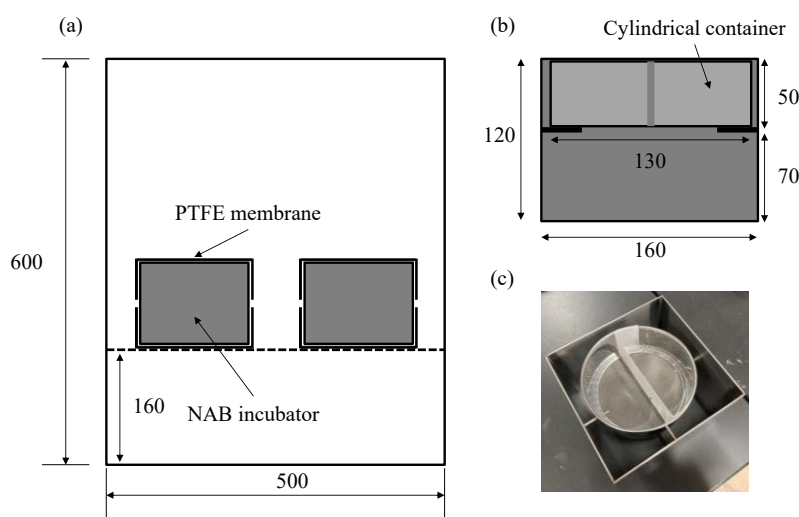


Fig. 1 Small-scale koji production using non-airblow box (NAB) cultivation method.
 (a) Internal structure of temperature-humidity controlled chamber and NAB incubator.
 (b) Internal diagram of NAB incubator. (c) Actual photograph of NAB incubator.

製麴条件の検討として、以下の 3 種類の試験を実施した。まず蒸米水分の影響評価試験では、最大吸水条件で調製した蒸米（白米水分調整：10 %、12 %、14 %）を用い、温度 36 °C、相対湿度 60 %の条件下で製麴を行った。次に室温の影響評価試験では、12 %白米水分に調整した白米を限定吸水で調製し、恒温恒湿槽の温度を 30 °C、34 °C、37 °C、40 °C の 4 条件、相対湿度を 60 %に設定して製麴を行った。さらに湿度の影響評価試験では、12 %水分に調整した白米を限定吸水で調製し、恒温恒湿槽の温度を 37 °C、相対湿度を 40 %、50 %、60 %の 3 条件に設定して製麴を行った。いずれの試験においても、製麴開始後 24 時間で手入れ（破精回り確認）を実施し、48 時間後に出麴とした。

破精の画像撮影と解析 破精の撮影と解析は前章と同様の方法で実施した。各試験区から無作為に選んだ麴 40 粒について、カミソリ刃を用いて中央部を腹側から背側方向に切断し、厚さ約 0.5 mm の切片を作製した。切片はデジタルマイクロスコープ VHX-7000（KEYENCE 社製）を用いて倍率 50 倍で撮影した。

撮影画像は Python 3 の画像解析ライブラリを用いて解析した。40 枚の麴切片画像を GA 活性値の降順に並べ替え、10 粒ごとにグループ化した。各グループの画像を 64×64 ピクセルにリサイズし、8 ビットグレースケールに変換した後、平均化画像を作成した。麴内領域の輝度平均値を 255 で除した値を破精歩合（%）として評価した。

酵素活性値、菌体量の分析 各試験区の麴について、複数の酵素活性値および菌体量を測定した。グルコアミラーゼ（GA）活性値は糖化力測定キット⁴⁾（キッコーマン社製）を用いて分析した。 α -アミラーゼ（AA）活性値は α -アミラーゼ測定キット⁵⁾（キッコーマン社製）を用いて分析した。酸性カルボキシペプチダーゼ（ACP）活性値は酸性カルボキシペプチダーゼ測定キット⁶⁾（キッコーマン社製）を用いて分析した。また、菌体量は核酸法⁷⁾により定量した。各酵素活性値の測定は、キット付属のプロトコルに従って実施し、吸光度測定には紫外可視分光光度計 UV-1800（島津製作所製）を用いた。

麴一粒の GA 活性値の分析 麴一粒の GA 活性値分析は前章と同様、糖化力測定キットの方法を改変して実施した。破精観察に用いた切片を含む麴一粒全体の重量を測定し、96 ウェルマイクロプレートの 1 ウェルに移した後、10 mM 酢酸緩衝液（pH 5.0）を 200 μ L 添加した。40 粒分の処理後、プレートを約 5 °C で一晩静置して酵素を抽出した。翌日、新しいプレートにキット基質溶液と酵素溶液を各 50 μ L 添加し、37 °C で 5 分間予備加熱した後、抽出液 10 μ L を加えて 10 分間反応させた。反応停止液 200 μ L 添加後、マイクロプレートリーダー SUNRISE（TECAN 社製）を用いて波長 405 nm の吸光度を測定した。分析値は、マイクロプレートリーダーと紫外可視分光光度計の検量線に基づいて換算し、紫外可視分光光度計での測定値に相当する値として表示した。

白米の物性および組織構造観察 供試白米の物理的特性評価として、複数の分析を実施した。白米硬度はデジタル硬度計 KHT-40N（藤原製作所製）を用いて測定した。蒸米の動的粘弾性はレオメータ NDS-1000（シスコム社製）を用いて測定した。組織構造観察では、白米を腹背方向に 1 mm 厚に切断し、サンドペーパーで研磨した後、切断面に蒸留水を滴下して胚乳の膨潤過程をデジタルマイクロスコープで観察した。得られた画像から ImageJ を用いて胚乳細胞面積を測定、解析した。

結果と考察

蒸米水分の影響 本試験で用いた製麹プログラムを Fig. 2 に示す。製麹は総じて、播種から 24 時間後に手入れを行い、48 時間後に発麹とするプログラムで実施した。蒸米水分と GA 活性値、破精の関係性を Fig. 3 に示す。図中には各試験区から採取した 40 粒の麹粒を GA 活性値の降順に並び替え、活性値が 1 位、2 位、39 位、40 位の麹の切片画像を例示した。分析の結果、蒸米水分の上昇に伴い GA 活性値が低下する明確な傾向が認められた。各試験区内の麹粒の切片画像を比較すると、GA 活性値が低い 39 位、40 位の粒でも麹菌糸が米粒内部まで生育している様子が観察された。これは高水分条件下では菌糸の生育は促進されるものの、過度な水分により酵素生産効率が低下することを示唆している。一方、GA 活性値が高い 1 位、2 位の粒は、試験区内で相対的に適度な蒸米水分を保持していたと推察され、効率的な酵素生産が実現されていることが示唆された。

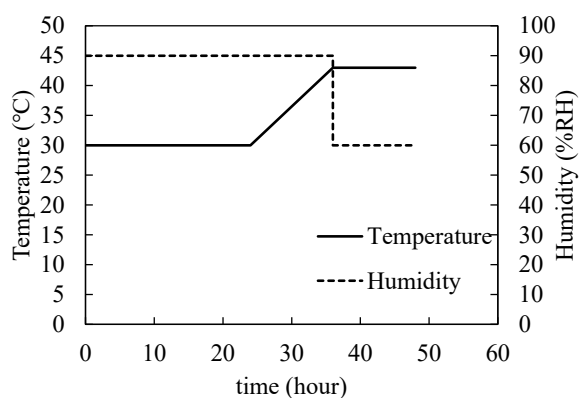


Fig. 2 Koji production program for investigating the effect of steamed rice moisture content

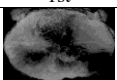
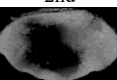
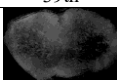
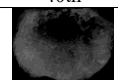
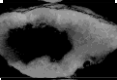
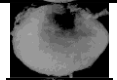
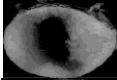
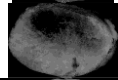
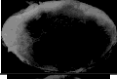
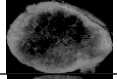
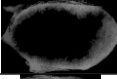
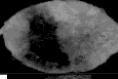
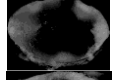
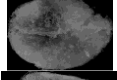
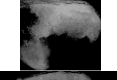
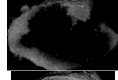
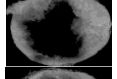
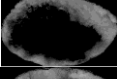
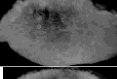
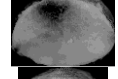
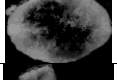
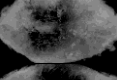
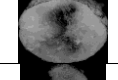
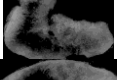
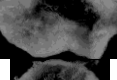
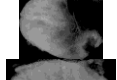
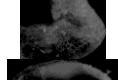
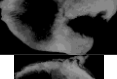
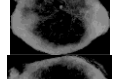
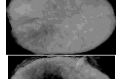
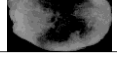
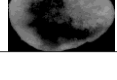
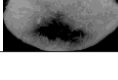
Cultivar	Rice moisture (%)	Steamed rice moisture (%)	GAase (U/g <i>koji</i>)	Ranking of GA (descending order)			
				1st	2nd	39th	40th
<i>Kyonokagayaki</i>	10	41.68	64				
	12	39.03	121				
	14	37.16	154				
<i>Koshihikari</i>	10	41.64	94				
	12	39.53	156				
	14	38.13	185				
<i>Haenuki</i>	10	41.96	171				
	12	38.43	194				
	14	36.95	213				

Fig. 3 Effect of steamed rice moisture content on GAase and *koji-haze*.

The white scale bar shown in the top left figure indicates 0.5 mm.

蒸米水分と通常法による酵素生産量および菌体量の関係性を Fig. 4 に示す。

分析の結果、GA、AA、ACP の全ての活性値において、蒸米水分との間に明確な負の相関が認められた。酵素活性値の品種間比較では、GA および AA 活性値は「はえぬき」が最高値を、「京の輝き」が最低値を示した。一方、ACP 活性値については「コシヒカリ」が最高値を、「はえぬき」が最低値を示した。G/A 比（GA 活性値と AA 活性値の比）に関して、蒸米水分 37～40 % の範囲では蒸米水分と負の相関を示し、品種間での差異は小さかった。しかし、蒸米水分が約 42 % に達すると、「はえぬき」において予測される直線関係よりも G/A 比が上昇する傾向が確認された。菌体量については、3 品種とも蒸米水分による差異は小さく、「はえぬき」で最大、「京の輝き」で最小となった。

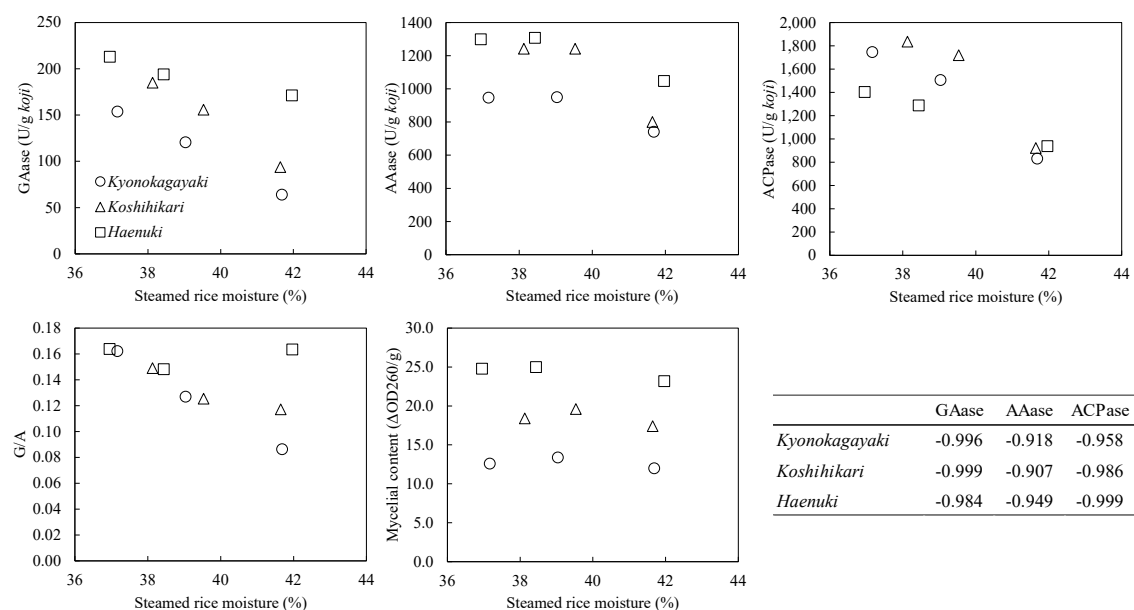


Fig. 4 Effect of steamed rice moisture content on enzyme activity and mycelial content. The table at the bottom right shows the correlation coefficients between steamed rice moisture content and various enzyme activity values.

これらの結果から、蒸米水分は麹菌の生育と酵素生産において異なる影響を及ぼすことが示唆された。高水分条件下でも麹菌の生育が促進され、菌糸は米粒内部まで良好に生育するものの、酵素生産効率は低下することが明らかとなった。文献によると、蒸米水分が高いと菌体量、破精、アミラーゼが増える⁸⁾という報告がある一方で、膨潤が十分で菌糸成長のために酵素分泌による組織の破壊を行う必要がなく、酵素生産量が減少する⁹⁾という報告もあり、本研究でも同様の現象が観察されたと考えられる。品種間差については、「はえぬき」が全体的に高い酵素活性を示し、「京の輝き」が最も低い値を示した。特に高水分域での「はえぬき」における G/A 比の上昇は、この品種特有の性質である可能性が示唆された。過去の研究で高水分条件下では GA 活性値が低下し、AA 活性値が上昇するとの報告がある¹⁰⁾。本試験では蒸米水分の最大値は約 42 %に揃えていることを鑑みると、各品種で胚乳デンプンと水分の結合状態に違いがあり、菌体の水分活性の差異が生じている可能性が考えられた。

室温の影響 本試験で用いた製麹プログラムを Fig. 5 に示す。製麹開始以降 24 時間の室温と酵素生産量の関係性を Fig. 6 に示す。GA、AA 活性値は 30 °C から 37 °C、ACP 活性値は 30 °C から 34 °C にかけて上昇傾向を示し、40 °C で顕著な低下が認められた。

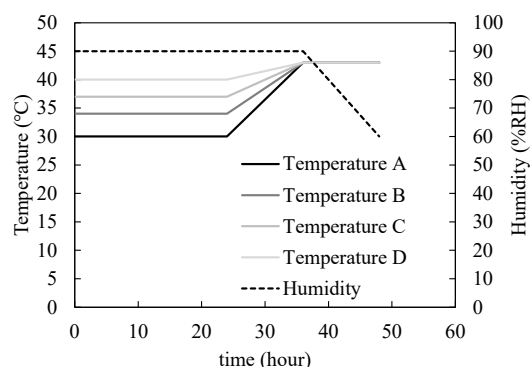


Fig. 5 *Koji* production program for investigating 24-hour ambient temperature after the start of *koji* production

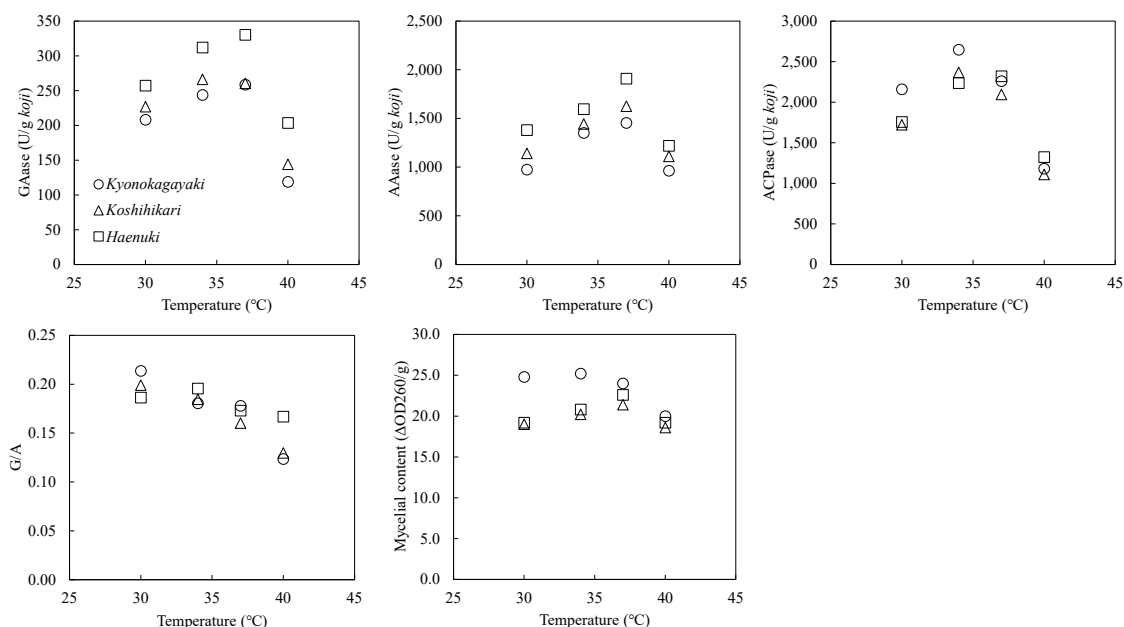


Fig. 6 Effect of 24-hour ambient temperature after the start of *koji* production on enzyme activity and mycelial content.

酵素活性値の品種間差について、GA および AA 活性値は「京の輝き」で最小、「はえぬき」で最大であった。一方、ACP 活性値は温度条件により異なる傾向を示し、30 °C および 34 °C では「京の輝き」が最大値を示したのに対し、37 °C および 40 °C では「はえぬき」が最大となった。G/A 比は室温との間に負の相関を示したが、その変化率には品種間差が認められ、「はえぬき」が最も小さい変化率を示した。菌体量については、「京の輝き」が最大であり、「コシヒカリ」と「はえぬき」は同程度であった。各品種の温度に対する応答性は異なり、「京の輝き」では 30 °C および 34 °C で最大の菌体量を示し、37 °C 以降は

徐々に低下した。一方、「コシヒカリ」と「はえぬき」は30℃から37℃にかけて上昇し、40℃で低下した。特筆すべき点として、「京の輝き」は最大の菌体量を示したにもかかわらずGA活性値が最低であり、菌体あたりのGA生産効率が低いことが示された。

GA活性値と破精歩合の関係性をFig. 7に示す。図中の各プロットは、40粒の麴をGA活性値の高い順に10粒ずつ4グループ(1-10位、11-20位、21-30位、31-40位)に分け、各グループの平均GA活性値と破精歩合を示している。

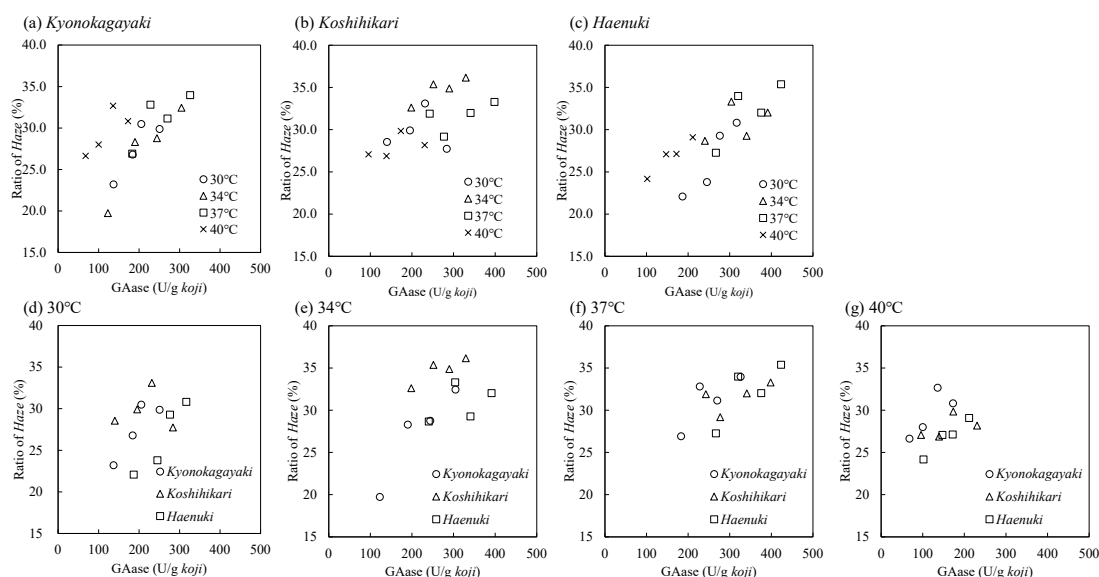


Fig. 7 Effect of 24-hour ambient temperature after the start of *koji* production on GAase and ratio of haze. (a)-(c) show the relationships within each variety, while (d)-(g) show the relationships under each temperature condition.

Fig. 7a-cの結果から、各温度条件内においてGA活性値と破精歩合には正の相関が認められた。「京の輝き」と「はえぬき」では40℃条件下で破精歩合に対するGA活性値が低下し、熱ストレスによる菌体のGA生産能の低下が示唆された。一方、「コシヒカリ」では温度条件による関係性の顕著な変化は認められなかった。Fig. 7d-gの比較から、「はえぬき」は全ての温度条件において破精歩合に対する相対的に高いGA活性値を示した。

これらの結果から、製麴温度は酵素生産と菌体生育に大きく影響を及ぼすことが示された。30℃から37℃までの温度上昇は酵素生産を促進する一方で、40℃では熱ストレスにより菌体生育と酵素生産の双方が抑制されることが明らかとなった。過去の研究で麴菌の増殖速度は37.5℃で最高、それ以上温度が上昇しても低下する¹⁰⁾こと、増殖最適温度の37.5℃でAA、GAが最も良く生産され、ACPは35℃で生産が大きいこと¹⁰⁾が報告されており、本研究でも同様の結果が示された。また麴菌の増殖における限界温度が45℃であるという研究結果もあり¹¹⁾、本研究では小規模製麴によって厳密な温度制御ができたもの

の、実際の現場では品温上昇がさらなる菌体生育に繋がり、加速度的に温度が上昇していく可能性があることから、品温の上振れには一層の注意が必要であると考えられた。

品種間の比較では、「はえぬき」が全試験で最大の GA、AA 生産力を示し、「京の輝き」で最低となり、この結果は前項の蒸米水分の試験結果と同様であった。「京の輝き」は 30、34 °C といった比較的低温の条件において菌体生育が良好であるにもかかわらず、酵素生産効率が低い特徴が認められた。特に興味深い点として、破精歩合と GA 活性値の相関は温度の影響を受け、40 °C の高温条件下では「京の輝き」と「はえぬき」で破精歩合に対する GA 活性値が低下した。このことは、麹菌の酵素生産能が熱ストレスにより低下する一方で、菌体生育は維持されることを示唆している。また、ACP 活性値の温度応答性は品種により異なり、「京の輝き」は低温域 (30 - 34 °C) で、「はえぬき」は高温域 (37 - 40 °C) で高い活性を示した。これは各品種に適した温度条件が異なることを示唆している。Fig. 6 に見られるように、「京の輝き」は 30 °C および 34 °C 条件下で最大の菌体量を示した。しかし、Fig. 7 の結果によれば、同条件下での破精歩合は低値を示している。これらの結果を総合すると、30、34 °C 条件下では菌体は確かに増殖するものの、その分布が蒸米の表面付近に局在している可能性が高いと考えられ、このような菌体分布の偏りにより、「京の輝き」は蒸米表層に存在するタンパク質成分を優先的に分解するプロテアーゼなどの酵素を選択的に生産していると推察された。過去の報告では破精込みが悪いとプロテアーゼ、酸性カルボキシペプチダーゼが増加する¹²⁾とされており、30 °C、34 °C 条件において「京の輝き」の破精歩合が低い粒が多く存在する結果 (Fig. 7a) を踏まえると、「京の輝き」における破精と ACP 活性値の関係性と一致すると考えられた。

湿度の影響 本試験で用いた製麹プログラムを Fig. 8 に示す。湿度と酵素生産量の関係性を Fig. 9 に示す。Fig. 9 から、いずれの品種においても湿度と GA、AA、ACP 活性値には正の相関関係が認められた。

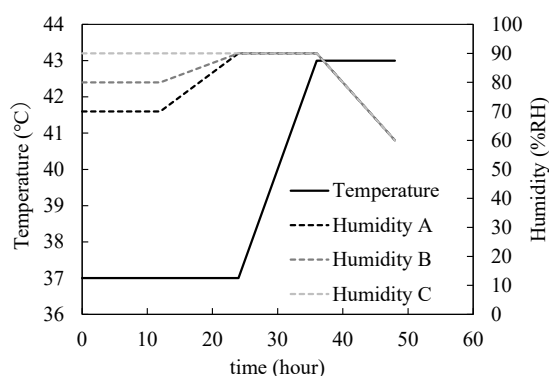


Fig. 8 Koji production program for investigating 24-hour ambient humidity after the start of koji production.

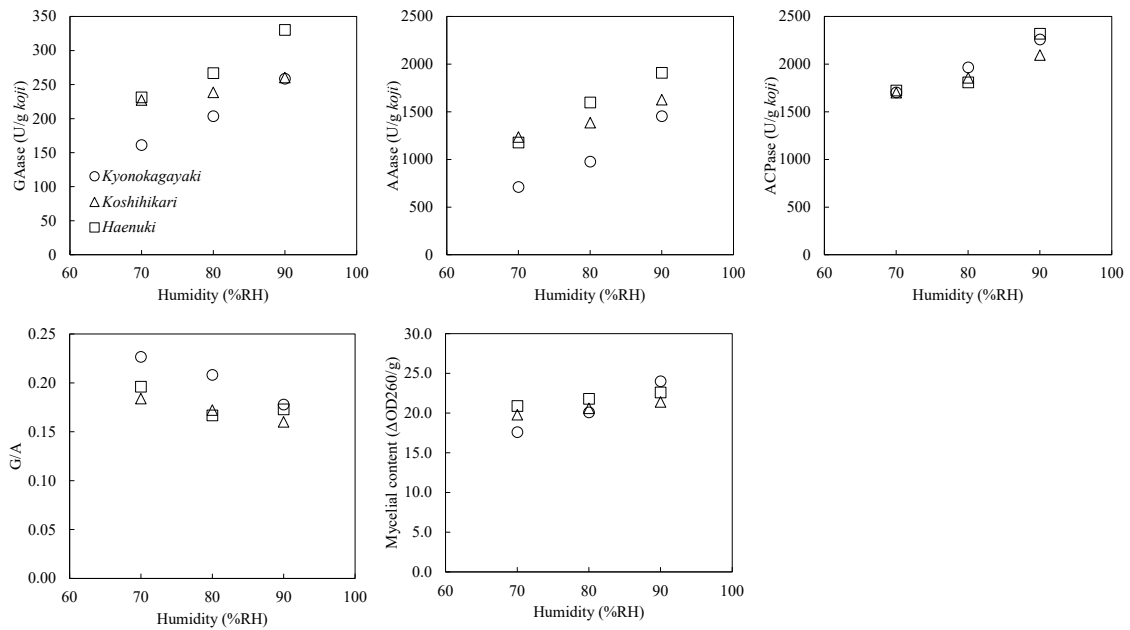


Fig. 9 Effect of 24-hour ambient humidity after the start of koji production on enzyme activity and mycelial content.

いずれの湿度条件においても「はえぬき」は他品種と比較して GA、AA 活性値が高い傾向にあり、蒸米水分、室温の検討結果と同様であった。ACP 活性値は全品種ではほぼ同程度であった。G/A 値は湿度と概ね負の相関を示し、低湿度条件では蒸発にともなう蒸米水分の低下により AA に対する GA 生産量が増加する傾向にあることが示された。菌体量は湿度と正の相関を示し、低湿度条件では製麹初期の蒸米水分の蒸発により菌体の生育が抑制され、出麹時点での菌体量が低下することが明らかとなった。また、菌体量および酵素活性値の双方が湿度と正の相関関係にあったことから、酵素活性値を菌体量で除した値と湿度の相関関係を検証したところ、これらも正の相関関係にあった (data not shown)。ここから、低湿度条件では菌体量の低下と同時に菌体あたりの酵素生産量も低下していることが示された。

GA 活性値と破精歩合の関係性を Fig. 10 に示す。同一品種内での解析結果 (Fig. 10a-c) から、GA 活性値と破精歩合には同様の正の相関があることが明らかとなった。加えて、いずれの品種においても湿度の低下に伴って GA 活性値、破精歩合の双方が低い粒の割合が増加することが示され、湿度の低下にともなって菌体の生育が停滞し、GA 生産量が低下することが確認された。製麹中に手入れをおこなった際に表層部の麹の破精まわりが弱いことを確認しており、それらの粒が GA 活性値、破精歩合の低下の原因となっていると推察された。また Fig. 10d-f の結果から、同一湿度条件において品種条件内、品種条件間いずれも同様の正の相関が認められた。ここから、湿度が GA 活性値と破精歩合の関係性に与

える影響については品種間差が小さいことが示された。

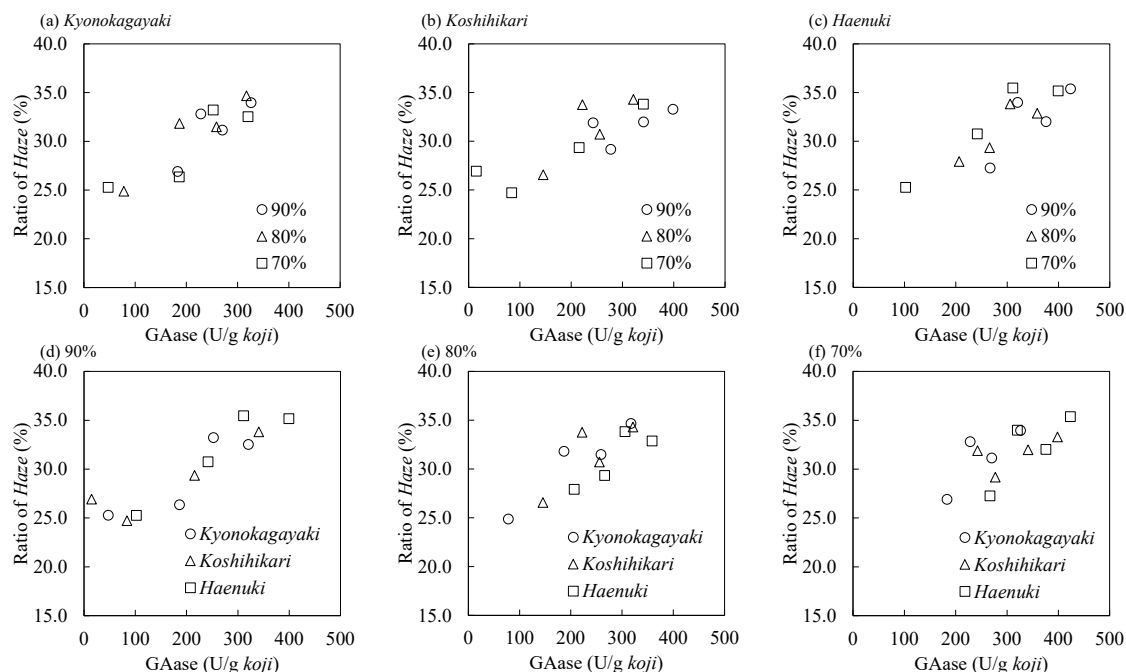


Fig. 10 Effect of 24-hour ambient humidity after the start of koji production on GAase and ratio of haze. (a)-(c) show the relationships within each variety, while (d)-(f) show the relationships under each humidity condition.

これらの結果から、製麹における湿度環境は菌体生育と酵素生産に重要な影響を及ぼすことが明らかとなった。低湿度条件下では、製麹初期の水分蒸発により菌体の生育が抑制されるとともに、個々の菌体の酵素生産能も低下することが示された。製麹初期の湿度についての研究報告としては、床麹法は蓋麹法に比べて麹層表面からの乾燥に留意する必要がある¹³⁾との報告があり、機械製麹などの手法が用いられやすい一般米の製造では湿度の調整を充分に行う必要があると考えられる。特に一般米は酒造好適米に対して構造が強固であることから菌体の初期生育が緩やかであると考えられ、菌体の発芽後、呼吸によって水分が供給される前に乾燥による水分の揮発が先行されれば、これによって発芽が抑制される悪循環に入ってしまう可能性があると考えられた。

原料米特性と製麹特性の関連性 これまでの解析により、「京の輝き」、「コシヒカリ」、「はえぬき」の各品種には固有の製麹特性が存在することが明らかとなった。これらの特性の物理的要因を解明するため、白米硬度分析および蒸米動的粘弾性測定を実施した (Fig. 11)。

白米硬度分析の結果 (Fig. 11a)、「京の輝き」は「コシヒカリ」および「はえぬき」と比較して高い硬度を示した。また、蒸米の動的粘弾性測定において、「京の輝き」は他の2品種と比較して低い貯蔵弾性率 (Fig. 11b) と高い損失弾性率 (Fig. 11c) を示した。これらの結果は、「京の輝き」が硬質な白米特性と、柔軟かつ粘着質な蒸米特性を有することを示している。この特徴は、「京の輝き」に見られる穏やかな吸水性や蒸米の低いさばけ性といった醸造特性の物理的要因であると考えられる。柳内ら²⁾は精米時間から米粒の硬さを推定し、米粒が硬いほど酵素生産が悪くなることを示しており、本研究における供試試料の硬度と酵素生産性の関係性と一致していた。

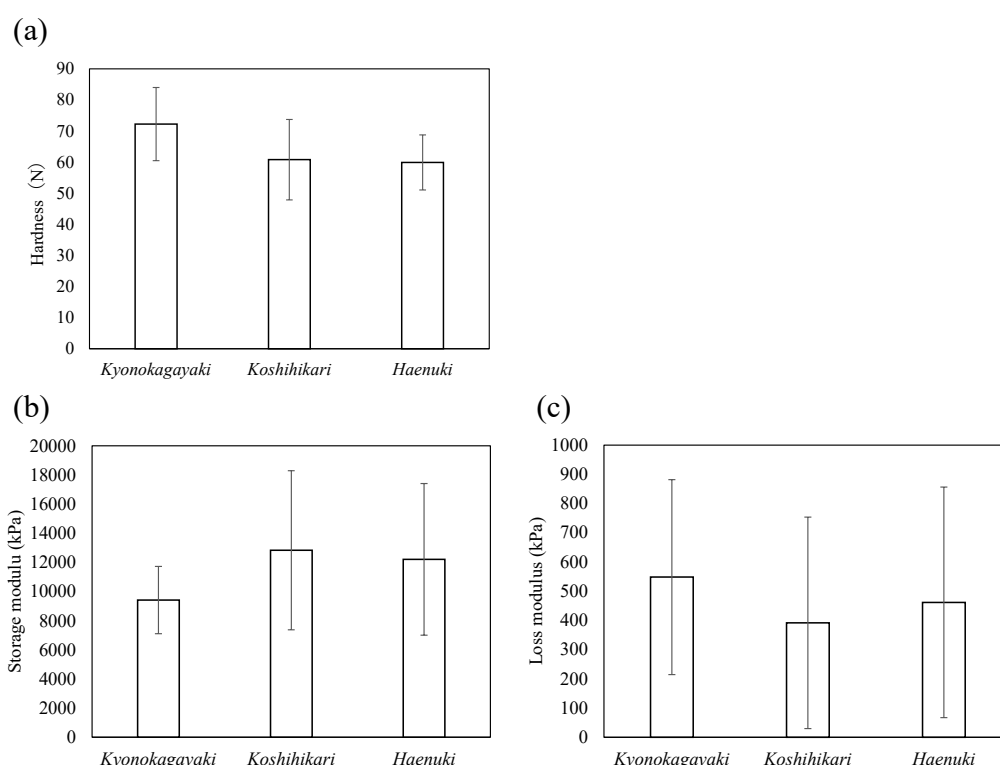


Fig. 11 Comparison of raw rice hardness and steamed rice viscoelasticity among three rice varieties showing (a) hardness, (b) storage modulus, and (c) loss modulus. Error bars represent standard deviation.

物理的特性の構造的基盤を解明するため、白米切片の顕微鏡観察を実施したところ、「京の輝き」、「コシヒカリ」、「はえぬき」の順に胚乳細胞が大きい傾向が観察された (Fig. 12)。

この知見に基づき、白米の高硬度については、大型の胚乳細胞構造により細胞間の脆弱部位が減少し、これが白米の物理的強度の向上に寄与している可能性が示唆された。また、蒸米の物性については、大型の胚乳細胞構造が浸漬水の胚乳内部への浸透を阻害する要因

となり、その結果として水分が米粒表層に局在化し、これが柔軟かつ粘着質な蒸米特性を誘導するものと考えられる。小島ら¹⁴⁾は菌糸が胚乳細胞の間を通過して内部に侵入すると述べており、胚乳細胞が大きい場合、菌糸の侵入経路が少なく、デンプンとの接触が制限されることも、酵素生産性の低下の一因となっている可能性がある。本研究では GA および AA 活性値において、概ね「はえぬき」が最大となり、「京の輝き」が最小となったが、この結果は胚乳細胞構造の差異が菌糸の侵入性、水分活性に影響した結果であると示唆された。

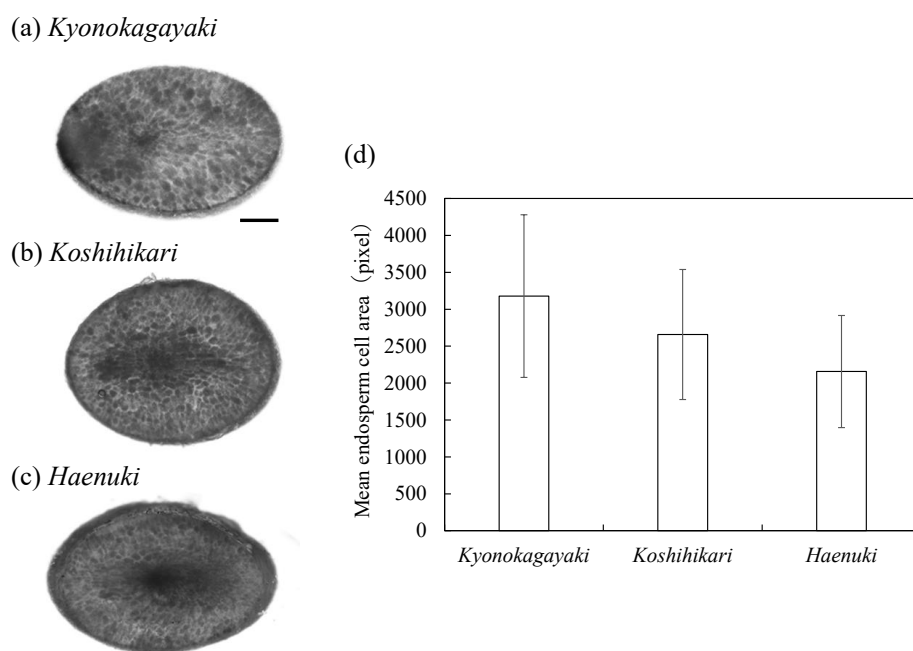


Fig. 12 Microstructural observation (a-c) and mean endosperm cell area (d) of rice endosperm tissue.

The black scale bar shown in the figure (a) indicates 0.5 mm. Error bars represent standard deviation.

総合考察 本章では、製麴工程における環境条件（蒸米水分、室温、湿度）が麹菌の生育と酵素生産に与える影響を、異なる特性を持つ3品種（「京の輝き」「コシヒカリ」「はえぬき」）を用いて包括的に検討した。その結果、各環境因子が麹菌の生育と酵素生産に及ぼす影響、および原料米品種特性との相互作用について、以下の重要な知見が得られた。

まず、環境条件と酵素生産の関係性において、各因子が麹菌の生育と酵素生産に異なる影響を及ぼすことが明らかとなった。蒸米水分に関しては、低水分条件下で酵素生産量が最大化し、高水分条件下では菌糸の生育は維持されるものの、過度な水分により酵素生産効率が低下することが示された。室温については、30℃から37℃までの温度域では酵素生産が促進される一方、40℃では熱ストレスにより酵素生産が著しく低下した。特に注目

すべき点として、40 °C 条件下では特定の品種で破精歩合に対する GA 活性値が低下し、酵素生産能が抑制されることが示唆された。湿度環境については、低湿度条件下で製麴初期の水分蒸発により菌体の生育が抑制されるとともに、個々の菌体の酵素生産能も低下することが確認された。

実際の製麴現場では、蒸米水分が目標値よりも高くなった際に、湿度を下げることで蒸米水分を揮発させ、調整する方法が考えられるが、本研究の結果から麴層の表層と内層で水分差が生じる可能性が示唆された。これを防ぐためには積極的に麴全体を混ぜる作業をおこなうことが望ましいと考えられるが、高水分の蒸米は手入れによってその粘着性を増大させ、これが菌糸生育に悪影響を及ぼす可能性も考えられる。したがって、一般米では蒸米水分を可能な限り低くし、水分が蒸発しない環境に置くことが最適であると考えられる。

次に、原料米品種特性と製麴特性の関連性について、本研究では胚乳細胞構造の違いが製麴特性に重要な影響を及ぼすことを見出した。「京の輝き」は大型の胚乳細胞構造を有し、これが白米の高硬度と蒸米の特異的な物性（柔軟かつ粘着質）をもたらす要因となっていることが示唆された。この構造的特徴は、浸漬水の胚乳細胞内部への浸透を阻害し、水分の表層局在化を引き起こす可能性があると考えられる。一方、「はえぬき」は小型の胚乳細胞構造を持ち、これが菌糸の侵入性や水分活性に好適な条件を提供することで、高い酵素生産性につながっていると推察された。

「京の輝き」のように胚乳構造が原因で菌体の初期生育が遅くなる可能性がある品種は、酵素の高生産性を重要視し、蒸米水分を下げることで、更に初期生育を悪化させてしまう可能性がある。このような特徴を持つ品種で製麴をおこなう際には、製麴前半の期間を長くすることで菌糸の伸長を十分にし、活性値を高められる可能性が示唆された。

本章で得られた知見は、原料米品種特性に応じた最適な製麴条件の設定に有用な指針を提供するものである。今後は、これらの知見を実際の製麴現場に応用し、各品種の特性を活かした効率的な製麴管理技術の確立につなげることが期待される。

摘要

本章では、一般米を用いた高品質な麴の安定製造に向けた最適条件の確立を目的とし、一般米 3 品種（「京の輝き」「コシヒカリ」「はえぬき」）を用いて、製麴条件が麴菌の生育と酵素生産に及ぼす影響について検討した。恒温恒湿槽を使用し、蒸米水分、室温、湿度が麴特性に与える影響を検討した結果、高水分条件下では麴菌の生育は促進されるものの、酵素生産効率は低下することが明らかとなった。室温については 30 °C から 37 °C の範囲で酵素生産が促進される一方、40 °C では熱ストレスにより著しく低下することが示された。また、低湿度条件下では製麴初期の水分蒸発により、菌体の生育と酵素生産の双方が抑制されることが確認された。品種間の比較では、「はえぬき」が一貫して高い酵素活性を示

す一方、「京の輝き」は最も低い値を示した。この差異は胚乳細胞構造の違いに起因し、「京の輝き」の大型の細胞構造が水分の浸透や菌糸の侵入に影響を与えていると考えられた。これらの知見は、原料米品種特性に応じた製麴条件の最適化に向けた重要な指針を提供するものである。

参考文献

- 1) 家村芳次, 藤田栄信 : 醸協, 77, (4), 260-264 (1982)
- 2) 柳内敏靖, 福田潔, 長野知子, 中村智美, 宮崎紀子, 水間智哉, 清川良文, 若井芳則 : 醸協, 88, (12), 977-983 (1993)
- 3) 伊藤一成, 谷野有佳, 五味勝也, 狩山昌弘, 三宅剛史 : 醸協, 116, (3), 134-150 (2021)
- 4) 今井泰彦, 徳武昌一, 山次信幸, 鈴木勝 : 醸協, 91, (1), 51-57 (1996)
- 5) 白兼 孝雄, 徳武 昌一, 戸辺 光一郎, 鈴木 勝 : 醸協, 91, (12), 889-894 (1996)
- 6) 鈴木英之, 今井泰彦, 鈴木勝 : 醸協, 94, (7), 588-592 (1999)
- 7) 大内弘造, 石戸輝雄, 菅間誠之助, 野白喜久雄 : 醸協, 62, (9), 1029-1033 (1967)
- 8) 松永恒司, 古川恵司, 原昌道 : 醸協, 98, (7), 526-529 (2003)
- 9) 須藤茂俊, 小関卓也, 木崎康造 : 醸協, 97, (5), 339-376 (2002)
- 10) 岡崎直人, 竹内啓修, 菅間誠之助 : 醸協, 74, (10), 683-686 (1979)
- 11) 岡崎直人, 木谷光伸, 田中利雄 : 醸協, 79, (2), 133-136 (1984)
- 12) 伊藤清 : 醸協, 87, (1), 17-21 (1992)
- 13) 坂井正治, 鼓尚夫, 永山文雄 : 醸協, 55, (8), 22-26 (1960)
- 14) 小島弘栄, 長谷川浩, 曲渕哲朗 : 生物工学, 77, (8), 339-344 (1999)

結論

画像解析技術と数理モデリングの融合による原料米評価の革新 本研究では、従来の経験と勘に依存していた酒造用原料米の評価と処理工程について、画像解析技術と数理モデリングを融合させた新たなアプローチを導入し、客観的かつ定量的な評価手法を確立した。

第1章で開発した深層畳み込みニューラルネットワーク（Deep CNN）による外観品位自動判定システムは、表面反射画像による整粒、未熟粒、被害粒、砕粒の4クラス分類で89.9%、内部透過画像による非胴割粒、胴割粒の2クラス分類で86.1%という高い正解率を達成した。特に Grad-CAM を用いた判定根拠の可視化により、AIの判断プロセスが熟練検査員の視覚的な判断基準と高い整合性を持つことが確認され、単なるブラックボックス的な判定ではなく、人間の専門知識を適切に模倣、実装したシステムであることが示された。

第2章から第4章では、浸漬過程における水浸裂傷の発生メカニズムと水分拡散現象を数理モデルによって記述することに成功した。水浸裂傷評価モデルは、従来の現象的な観察にとどまっていた水浸裂傷の発生過程を、裂傷増加率、曲線形状定数、最大総裂傷長という三つのパラメータで精密に表現することを可能にした。さらに、水分拡散モデルでは、モデルの改良に加え、心白構造と水浸裂傷の影響を組み込むことで、酒造好適米特有の複雑な吸水挙動を説明することができた。特に拡散係数様パラメータ β の温度依存性がアレニウスの関係に従うという発見は、異なる温度条件下での吸水挙動予測の基盤となる重要な知見である。

第5章と第6章では、製麹工程における一般米の評価技術として、一粒単位での破精の画像解析とグルコアミラーゼ活性測定を組み合わせた新たな手法を開発すると同時に、製麹条件の影響を明らかにした。この手法により、破精歩合と GA 活性の相関関係を品種ごとに定量化することができ、品種特性に応じた製麹条件の最適化への道が開かれた。これらの技術を組み合わせることによる相乗効果は注目に値する。例えば、外観品位判定システムで評価された原料米の特性データと水浸裂傷予測モデルを連携させることで、浸漬条件の最適化が可能となる。同様に、原料処理工程の評価データが製麹工程の条件設定に活用されることで、一貫した品質管理システムの構築が期待できる。このように、個別に開発された技術が醸造プロセス全体を通して統合的に活用されることで、原料から製品清酒に至るまでの一貫した科学的管理が実現可能となる。

従来の目視評価や経験則と比較した場合、本研究で開発した技術の有用性は明らかである。特に、①再現性、客観性の確保、②定量的評価による比較可能性の向上、③時間的連続変化の捕捉、④微視的現象と巨視的効果の連関の解明、という四つの側面で大きな進展が見られた。従来の熟練者による評価は、その確かな技術が認められる一方で、個人差や疲労による変動が避けられなかった。本研究のアプローチはこれらの問題を解消し、安定した評価基準の提供を可能にしている。

非破壊、定量的評価技術の実用化に向けては、いくつかの課題も残されている。外観品位自動判定システムについては、多様な品種、産地、年次の米に対応できるようモデルの汎化性能を向上させる必要がある。水浸裂傷評価モデルと水分拡散モデルについては、実際の製造現場でのリアルタイムモニタリングシステムへの実装が課題となる。また、破精評価技術については、自動化、効率化によるハイスループット分析の実現が望まれる。

しかしながら、これらの課題を克服することで、本研究の成果は酒造業界における原料評価の標準化と高度化に大きく貢献すると考えられる。各酒造メーカーが自社の特性に合わせてカスタマイズ可能な評価システムの構築は、中小規模の蔵においても科学的な品質管理を実現する基盤となるだろう。また、原料米の栽培、育種段階からのフィードバックを可能にすることで、酒造に適した原料米の開発、選別にも寄与することが期待される。

原料米品種特性の製造技術への影響 本研究を通じて、原料米品種の構造的特性の違いが、原料処理工程および製麹工程における挙動に大きな影響を及ぼすことが明らかになった。これらの知見は、品種特性を活かした効率的な醸造プロセスの構築に重要な示唆を与えるものである。

心白構造の有無は、水分拡散特性と水浸裂傷発生に決定的な影響を与えることが本研究により実証された。第2、3章の分析結果から、酒造好適米である山田錦や祝は、心白を持たない一般米（京の輝きやコシヒカリ）と比較して、水浸裂傷の発生量が多く、その増加速度も大きいことが確認された。第4章で開発した水分拡散モデルによれば、心白部位の拡散係数を充実部位に対して大きく設定することで、実現に近い吸水挙動を示した。具体的には、浸漬水が白米表面から浸透して心白に達した時点で、心白内部に急速に水分が拡散するという現象が起きている。この急速な拡散は部分的な水分膨張率の差を生じさせ、水浸裂傷を誘発し、水浸裂傷が更なる吸水速度の増加を生むというフィードバックループが発生していると考えられる。興味深いことに、本研究の水浸裂傷の定量評価により、心白面積率と最大総裂傷長および最大縦割れ面積率との間に正の相関があることが明らかになった。この関係性は、心白部位の存在が米粒の物理的強度を低下させることで、水浸裂傷の発生を促進するという機構を裏付けるものである。同時に、白米の形状特性、特に厚さと幅も水浸裂傷の発生パターンに影響を与えることが示された。これらの知見は、酒造好適米の品種選択や精米条件の決定において考慮すべき重要な要素となる。

一方、一般米の胚乳細胞構造の違いは、破精形成と酵素生産に顕著な影響を及ぼすことが第5、6章の研究から明らかになった。小規模製麹試験において、「京の輝き」、「コシヒカリ」、「はえぬき」の胚乳細胞構造を比較した結果、「京の輝き」は他の2品種と比べて胚乳細胞が大きいことが観察され、この大型の胚乳細胞構造は、浸漬水の内部への浸透を阻害し、水分を表層に局在化させる要因となっており、「京の輝き」は菌糸の侵入経路が制限され、酵素生産性が低下したと考えられる。逆に、「はえぬき」は小型の胚乳細胞構造

を持ち、これが菌糸の侵入性や水分活性に好適な条件を提供することで、高い酵素生産性につながっていると推察される。また、第5章の破精評価と酵素活性の相関解析では、「コシヒカリ」は麴中心部まで破精が進行する傾向があるのに対し、「京の輝き」では中心部への破精が少なく、腹側への破精込みが優勢である特徴が確認された。このような破精パターンの違いは、品種固有の胚乳構造特性に起因していると考えられる。

これらの知見に基づき、品種特性を踏まえた原料処理、製麴条件の最適化指針を提案する。酒造好適米については、各品種の水浸裂傷の発生特性を考慮に入れた上で吸水量を適切に制御することが重要である。本研究の結果から、浸漬水温が水浸裂傷の発生速度に影響を与えるが、最終的な裂傷量には影響しないことが明らかになった。したがって、水浸裂傷量を制御しつつ吸水速度を調整するためには、浸漬水温を適切に設定することが効果的である。また、白米水分の管理も重要であり、水分含量が高いほど水浸裂傷が増加することから、年次変動や品種特性に応じた水分調整が求められる。一般米では、品種ごとの胚乳細胞構造特性に基づいた製麴条件の設定が不可欠である。「はえぬき」のような小型胚乳細胞構造を持つ品種は、原料処理や製麴条件の多少のずれに対して耐性がある。一方、「京の輝き」のように胚乳細胞が大きい品種では、原料処理や製麴条件の設定ミスが菌糸の生育や酵素活性の生産を著しく低下させる恐れがあるため、細心の注意が必要である。さらに、菌糸の十分な伸長を確保するために、製麴前半の期間を延長するなどの製麴条件の最適化が重要となる。

麴米への一般米活用による経済効果と品質維持のバランスについては、本研究の結果は重要な示唆を与えている。一般米は酒造好適米より安価であり、原料コストの削減につながるが、心白を持たないことによる製麴上の課題がある。しかし、本研究の結果から、品種選択や製造条件の最適化により、一般米でも安定して高い酵素活性を持つ麴の製造が可能であることが示された。

結論として、各原料米品種の構造的特性の違いを科学的に理解し、それぞれの特性を活かした製造技術を確立することで、経済性と品質を両立させた持続可能な酒造りが実現可能となる。本研究で開発した評価技術と数理モデルは、この実現に向けた客観的な判断基準を提供するものである。

数理モデルによる現象理解と予測の可能性 本研究では、酒造用原料米の原料処理工程で生じる現象を科学的に理解するため、水浸裂傷発生モデルと水分拡散モデルという二つの数理モデルを構築した。これらのモデルは、従来は熟練技術者の経験や勘に頼っていた現象を定量的に記述し、その発生メカニズムを理論的に説明することを可能にした点で大きな意義を持つ。

水浸裂傷発生モデルについては、初期のロジスティックモデルから改良を重ね、裂傷増加率 b 、曲線形状定数 r 、最大総裂傷長 L_{max} という三つのパラメータを用いた表現に至

った。この改良モデルは、複雑な水浸裂傷の発生過程を数学的に表現するだけでなく、各パラメータに物理的意味を持たせることで、現象の本質的な理解を促進する役割を果たしている。特に、裂傷増加率 b がアレニウス型の温度依存性を示すという発見は、水浸裂傷の発生が水分子の拡散現象と密接に関連していることを示唆する重要な知見である。同様に、水分拡散モデルは酒造好適米の複雑な吸水現象を理論的に解明するために開発された。このモデルは、フィックの拡散法則をベースとしながらも、心白構造と水浸裂傷の影響を考慮した新たなアプローチを採用している。パラメータ α と β の導入により、従来のモデルでは説明困難であった酒造好適米の S 字型吸水曲線を表現することに成功した。特に、隣接ブロック間の相互作用を制御するパラメータ α を 0 とすることで、心白部位と非心白部位の含水率の差異が明確になり、実測値との一致度が向上した点は重要である。これらの数理モデルの理論的意義は、単に現象を数式化したことにとどまらない。モデル構築のプロセスを通じて、水浸裂傷や水分拡散という複雑な現象の背後にある物理的、構造的要因が明らかになり、それによって現象の予測と制御への道が開かれたことにある。例えば、水浸裂傷発生モデルにより、温度や水分含量の変化が水浸裂傷の発生パターンに与える影響を予測できるようになった。同様に、水分拡散モデルは、異なる品種や浸漬条件下での吸水挙動を予測する手段を提供している。

モデルパラメータと原料米物性の関連性については、本研究を通じて興味深い知見が得られた。水浸裂傷発生モデルの最大総裂傷長 L_{max} は心白面積率と正の相関を示し、これは心白部位の存在が米粒の物理的強度を低下させることを示唆している。また、白米の形状特性として、厚さは最大総裂傷長と負の相関を、幅は最大縦割れ面積率と正の相関を示すことが明らかになった。これらの関係性は、浸漬時に発生する応力の分布と白米形状の関係を反映したものと考えられる。水分拡散モデルでは、拡散係数様パラメータ β の値やその温度依存性に品種特性が反映されることが明らかになった。例えば、五百万石やおくほまれでは他の品種と比較して β の値が大きく、これは胚乳組織の構造や性質の違いを反映していると考えられる。これらのパラメータと原料米物性の関連性を体系的に理解することで、原料米の選定や処理条件の最適化に関する客観的指標が得られる。

本研究の結果は、年次変動や産地間差の予測にも応用できる可能性を示している。水浸裂傷発生モデルのパラメータと心白特性や米粒形状の関係が明らかになったことで、これらの特性が年次や産地によって変動した場合の影響を予測することが可能になる。最近の研究では、気象条件とデンプン特性の関連性が明らかにされており、これらの研究と本研究を結合させることで、気象データから吸水特性の年次間差をより正確に予測できる可能性がある。例えば、登熟期の気温や日照時間などのデータから、原料米の心白特性や胚乳構造を推定し、それを本研究のモデルに適用することで、処理工程における挙動を事前に予測するアプローチが考えられる。この予測能力は、年ごとに変動する原料特性に応じた処理条件の最適化に貢献するものである。

一方で、現段階の数理モデルにはいくつかの限界点も存在する。水浸裂傷発生モデルでは、品種によって最適なパラメータ設定が異なることから、汎用的な予測モデルとしての確立にはさらなる検証が必要である。特に、「雄町」のように年次間での変動が大きい品種については、モデルの適用に際して特別な配慮が求められる。水分拡散モデルについては、「五百万石」や「おくほまれ」など、心白が眼状に広がる品種でモデルの適合度が低くなる傾向が見られた。これは、胚芽除去部位から心白部位への直接的な水の侵入経路の存在を示唆しており、モデル改良における重要な課題である。また、現状のモデルでは精米歩合の違いによる影響が十分に考慮されておらず、検証が必要である。

これらの課題を踏まえ、今後の数理モデル改良の方向性としては、以下の点が挙げられる。まず、多様な品種や精米条件に対応できるよう、モデルの汎用性を高めることが重要である。次に、胚芽除去部位からの優先的な吸水など、現行モデルで十分に考慮されていない要因を組み込むことで、より正確な予測が可能になると考えられる。さらに、実験室規模のモデルから実際の製造現場での大規模処理に適用できるスケールアップモデルへの発展も重要な課題である。最終的には、これらの数理モデルをリアルタイムモニタリングシステムと連携させ、処理中の状態変化を予測し、最適な条件調整を行うことで、原料処理工程の自動制御システムの構築が期待される。このようなシステムの実現により、熟練技術者の技能に依存しない安定した製造プロセスの確立が可能となるだろう。

醸造プロセス全体における本研究成果の位置づけ 清酒醸造は、原料処理、製麹、酒母、もろみ、上槽、ろ過、火入、貯蔵といった複数の工程が連続的につながる複雑なプロセスである。本研究で得られた成果は、この連続する工程のうち、特に原料処理工程と製麹工程に焦点を当てたものであるが、その影響は醸造プロセス全体に波及する重要な意義を持つ。

原料処理工程から製麹工程、さらに酒母、もろみ工程への影響の連続性について考察すると、まず原料処理工程における水浸裂傷の発生は、蒸米の物性に直接的な影響を与えることが本研究で明らかになった。第2章の結果から、水浸裂傷の発生量 L_{max} は蒸米の貯蔵弾性率 E' と負の相関、損失正接 $\tan\delta$ と正の相関を示すことが確認された。これは、水浸裂傷の多い蒸米が柔らかく、粘りが強い性質を持つことを意味している。

このような蒸米物性の変化は、製麹工程における麹菌の生育や酵素生産に大きな影響を及ぼす。第5章と第6章の研究結果から、蒸米の水分や物性が破精形成やグルコアミラーゼ（GA）活性などの酵素生産に密接に関連することが示された。特に、蒸米水分の上昇に伴い GA 活性値が低下する傾向や、品種によって最適な製麹条件が異なることが明らかになった。

さらに、製麹工程で生産される酵素は、後続の酒母、もろみ工程におけるデンプンの糖化や発酵の進行に決定的な役割を果たす。例えば、GA や AA の活性バランス（G/A 比）は、

もろみ中の糖化速度に影響し、発酵の進行パターンを左右する。また、酸性カルボキシペプチダーゼ（ACP）はタンパク質の分解を通じて、アミノ酸やペプチドの生成に関与し、これらは酵母の栄養源となるとともに、清酒の味や香りの形成に寄与する。

このように、原料処理工程における水浸裂傷の発生状態が蒸米物性を変化させ、それが製麹工程での酵素生産に影響を与え、ひいては酒母、もろみ工程での発酵パターンや風味形成に連続的につながっていくことが理解できる。本研究で開発した水浸裂傷評価モデルや水分拡散モデル、破精評価技術は、この連続的な影響の連鎖を定量的に把握し、制御するための重要なツールとなる。

各工程の最適化が最終製品品質に及ぼす複合的効果については、工程間の相互作用を考慮した総合的な視点が重要である。例えば、原料処理工程で適切に水浸裂傷量、吸水率を制御し、最適な蒸米物性を実現することで、製麹工程での酵素生産が向上する。その結果、酒母、もろみ工程では効率的な糖化と発酵が進行し、アルコール収率の向上や発酵の健全化といった効果が期待できる。

同時に、製麹工程での酵素バランスの最適化は、もろみ中の成分変換に影響を与え、香味成分のプロファイルを変化させる。例えば、GA、AA の制御によって糖化速度を調整することで、発酵温度やアルコール生成速度に影響を与え、それが香气成分の生成パターンを左右する。また、ACP の制御はアミノ酸組成に影響し、清酒の味わいの深さや複雑さに寄与する。

これらの効果が複合的に作用することで、最終製品である清酒の品質特性が形成される。本研究の成果を活用することで、原料米の特性に応じた処理条件と製麹条件の最適な組み合わせを科学的に決定し、目標とする清酒スタイルに合致した製造プロセスの設計が可能になると考えられる。

さらに、画像解析技術や数理モデリングの導入は、生産効率の向上やコスト削減につながるだけでなく、品質のさらなる向上や多様化にも寄与する。例えば、原料特性に応じた精密な製造条件の制御により、これまで以上に個性的で高品質な清酒の開発が可能になる。また、環境変動に対する適応力の向上や、省エネルギー、省資源な製造プロセスの実現にも貢献することが期待される。

このように、本研究は原料処理工程と製麹工程に焦点を当てながらも、その影響は醸造プロセス全体に波及し、清酒醸造の科学的理解と技術革新を促進するものである。伝統と革新を調和させながら、持続可能な酒造業の発展に貢献する基盤的研究として位置づけられる。

実用化に向けた展望と課題 本研究で開発した技術の実用的価値を最大化するためには、研究室レベルの成果を実際の醸造現場へ効果的に実装していくプロセスが不可欠である。ここでは、開発技術の現場実装に向けた具体的ステップ、スケールアップに伴う課題と解

決策、コスト効率と導入効果のバランスについて論じる。

開発技術の現場実装に向けては、段階的なアプローチが効果的である。第一段階として、外観品位自動判定システムのような比較的独立性の高い技術から導入を開始することが推奨される。具体的には、まず限定的な範囲（例えば特定の品種や等級のみ）での並行評価を行い、熟練検査員の判定結果とシステムの判定結果を比較検証することで、システムの信頼性を確認する。次に、判定結果を参考情報として提供する補助的な運用を経て、最終的には主要な判定ツールとしての実装へと移行する。水浸裂傷評価モデルと水分拡散モデルについては、現場の浸漬タンクと連携したシステムを設計し、温度や水分変化のリアルタイムデータを収集することが第一ステップとなる。これらのデータをモデルに入力し、浸漬状態の予測結果を現場担当者にフィードバックするシステムを構築することで、モデルの有効性を実証的に検証できる。検証結果に基づいてモデルを調整、改良した後、浸漬条件の自動制御システムへの実装が次の展開として考えられる。製麴工程における破精評価技術については、まず簡易的な画像撮影装置と解析ソフトウェアを組み合わせたキットの開発が考えられる。このキットを用いて製麴現場で定期的なサンプリング評価を行い、その結果を製麴条件の調整にフィードバックするプロセスを確立する。その後、連続的なモニタリングシステムへと発展させ、最終的には製麴温度や湿度の自動制御システムとの連携を目指す。

これらの技術を実際の醸造現場に実装する際には、スケールアップに伴ういくつかの技術的課題が予想される。外観品位自動判定システムについては、大量の原料米を効率的に評価するためのサンプリング方法や画像取得システムの構築が課題となる。解決策としては、コンベアベルト上を流れる原料米を自動撮影するシステムの開発や、複数のカメラを用いた同時多角度撮影技術の導入が考えられる。水浸裂傷評価と水分拡散に関しては、実験室規模から実際の製造規模へのスケールアップにおいて、モデルの適用性検証が最大の課題である。特に、大規模浸漬タンクにおける水温分布の不均一性や、米粒間の相互作用といった要素がモデル予測に与える影響を評価する必要がある。これらの課題に対しては、中間規模での検証実験を段階的に行うとともに、タンク内の水流シミュレーションと組み合わせたマルチスケールモデリングアプローチが有効であろう。製麴工程においては、小規模試験から実際の製造規模への拡張に伴い、温度分布や水分分布の不均一性が顕著になる。これは特に大型の箱麴や機械製麴装置を使用する場合に重要な課題となる。解決策としては、製麴装置内の複数箇所にセンサーを設置し、空間的な状態分布を把握するシステムの開発や、熱、物質移動を考慮した製麴シミュレーションモデルの構築が挙げられる。

コスト効率と導入効果のバランスは、技術実装の成否を左右する重要な要素である。外観品位自動判定システムについては、初期投資としてカメラ装置やコンピュータシステム、ソフトウェア開発費用が必要となる。この技術導入による効果としては、検査時間の短縮、人件費の削減、判定の客観性、再現性向上、および検査員の負担軽減が期待される。水浸

裂傷評価モデルと水分拡散モデルについては、センサー設備や制御システムの導入コストがかかる一方、浸漬管理の最適化による品質向上と安定化、作業効率の改善、および熟練技術に依存しない製造体制の構築といった効果が期待される。これらの効果を定量的に評価するためには、従来方式と新システム導入後の比較試験を行い、品質指標や作業時間、エネルギー消費量などを詳細に分析する必要がある。破精評価技術については、比較的低コストの画像取得装置と解析ソフトウェアで実装可能であり、導入障壁は低い。効果としては、製麹の進行状況の客観的評価、最適出麹時期の判断支援、および品質の安定化が挙げられる。特に、GA 活性値など酵素力価の予測可能性が高まることで、後工程の条件設定の最適化にも寄与し、醸造プロセス全体の効率化につながる可能性がある。

特筆すべきは、本研究で開発した技術が持つモジュール性と拡張性である。各技術は独立して導入、運用可能であると同時に、相互に連携させることでより高度なシステムへと発展させることができる。この特性により、各酒造メーカーは自社の規模や特性、経営戦略に応じて最適な技術導入計画を立案することが可能となる。実用化に向けては、産学連携による実証実験や技術移転プログラムの整備も重要である。また、導入事例や効果測定結果の共有を通じて、業界全体での技術普及を促進することが望ましい。このような取り組みを通じて、本研究の成果が日本酒業界の技術革新と持続的発展に広く貢献することを期待する。

気候変動時代における原料米評価技術の意義 近年、地球規模の気候変動が農作物の生育環境に大きな影響を及ぼしており、酒造用原料米もその例外ではない。登熟期の異常高温や集中豪雨、台風の大型化など、気象条件の極端化によって、原料米の品質や収量に年次変動が拡大している。こうした状況下において、本研究で開発した原料米評価技術と数理モデリング手法は、気候変動への対応という新たな文脈においても重要な意義を持つ。

気候変動が原料米品質に与える影響は多岐にわたる。特に登熟期の高温は現代の重要な課題であり、玄米の充実不足や胴割れの増加を引き起こし、白未熟粒や背白粒といった未熟粒率を上昇させる。なかでも酒造好適米の心白形成は登熟期の気象条件に強く依存することが知られており、気候変動の影響を特に受けやすい特性である。

第1章で開発したCNNベースの外観品位自動判定システムは、このような気候変動に伴う原料米品質の変化を迅速かつ客観的に評価する有効なツールとなる。特に、未熟粒や被害粒の混入割合の増加が懸念される状況下で、外観品位の定量的評価が可能なシステムの重要性は一層高まると考えられる。また、複数年のデータを蓄積することで、気象条件と外観品位の関係性を統計的に解析し、気候変動の影響を予測するモデルの構築も可能になるだろう。水浸裂傷発生と水分拡散に関する数理モデルも、気候変動時代における原料米評価において重要な役割を果たす。第2章と第3章で明らかになったように、水浸裂傷の発生や水分拡散特性は、原料米の心白構造や物理的特性と密接に関連している。気候変動

によって心白形成や胚乳構造が変化した場合、これらのモデルを用いることで、その影響を定量的に予測し、適切な原料処理条件を設定することが可能となる。特に、水浸裂傷発生モデルのパラメータと原料米特性や気象条件との関連性を解明することで、気候変動の影響を事前に予測し、対応策を講じるための科学的基盤が提供される。同様に、水分拡散モデルパラメータの変動予測により、浸漬工程の最適化が可能となる。

年次変動に対応するための予測技術の活用法としては、まず気象データと原料米品質データの統合的なデータベース構築が基盤となる。長期的な気象データ（気温、降水量、日照時間など）と、各年の原料米の外観品位、水浸裂傷特性、水分拡散特性などのデータを蓄積、解析することで、気象条件から原料米特性を予測するモデルの開発が可能となる。このような予測モデルは、短期的には次年度の原料米の品質予測と処理条件の事前計画に活用できる。例えば、登熟期の気象条件から心白形成の状況を予測し、予想される水浸裂傷発生パターンに基づいて浸漬条件を最適化することができる。また、気象条件が厳しい年には、原料米の品質変動に対応するための代替処理法や製麴条件を事前に検討することが可能となる。中長期的には、気候変動シナリオに基づいた原料米品質の将来予測に活用することで、酒造業界全体の適応戦略の立案に貢献することが期待される。例えば、特定の地域や品種が気候変動に対して脆弱であることが予測された場合、栽培地域のシフトや新品種の開発方向性に関する戦略的判断の根拠となる情報を提供することができる。原料米の安定確保と品質向上に向けた長期的戦略としては、本研究の成果を原料米の育種、栽培段階にまでフィードバックすることが重要である。具体的には、本研究で明らかになった水浸裂傷発生や水分拡散に関わる米の構造的特性を育種目標として設定し、気候変動に対して堅牢な特性を持つ新品種の開発を推進することが考えられる。さらに、栽培技術面では、気象条件のモニタリングと予測に基づいた精密農業アプローチの導入が考えられる。例えば、登熟期の水管理や栄養管理を気象予測と連動させることで、異常気象による品質低下を最小限に抑える栽培システムの開発が期待される。本研究で開発した原料米評価技術は、そのような精密農業システムの効果検証や最適化において重要なツールとなるだろう。

持続可能な酒造業に向けた科学的アプローチとしては、気候変動の影響評価と適応策の開発に加えて、環境負荷低減への貢献も重要な側面である。例えば、製麴条件の最適化研究の成果は、製麴工程におけるエネルギー効率の向上にも活用できる。特に、品種特性に応じた最適温湿度条件の設定によって、過剰な加熱や冷却を避け、エネルギー消費を最小化することが可能となる。これらの取り組みは、酒造業のカーボンフットプリント削減に貢献し、環境負荷の少ない持続可能な生産システムの構築を促進する。

さらに、本研究の科学的アプローチは、気候変動に関する知見やデータの業界内共有を促進し、集約的な適応力の向上にも寄与すると考えられる。個々の酒造メーカーが独自に気候変動対策を講じるには限界があるが、科学的データと評価技術を共有することで、業

界全体としての気候レジリエンスを高めることができる。

結論として、本研究で開発した原料米評価技術と数理モデリング手法は、気候変動時代における酒造業の持続可能な発展に不可欠なツールであると言える。これらの技術は、気候変動が原料米品質に及ぼす影響を理解し、予測し、適応するための科学的基盤を提供するとともに、環境負荷を低減しながら品質と効率を両立させる生産システムの構築にも貢献する。今後は、育種、栽培から製造、流通に至るサプライチェーン全体を視野に入れた統合的アプローチへと発展させることで、気候変動という未曾有の課題に直面する酒造業の持続可能な未来の構築に寄与することが期待される。

結語 本研究は、清酒醸造における原料処理工程と製麹工程を対象に、画像解析技術と数理モデリングという先端的アプローチを導入することで、これらの工程の科学的理解と技術革新を推進することを目的とした。研究を通じて、酒造好適米の外観品位自動判定システム、水浸裂傷発生メカニズムの解明と評価モデルの構築、水分拡散モデルの開発、一般米麹の破精評価と酵素活性の相関解析、および製麹条件の最適化という多面的な成果が得られた。

本研究の学術的意義は、従来の経験と勘に大きく依存していた酒造工程を科学的に解明し、定量的な評価、予測を可能にする理論的枠組みを提供した点にある。特に、水浸裂傷発生のように複雑かつ多要因が関与する現象を数理モデルによって記述し、その発生メカニズムを理論的に説明したことは、醸造科学分野における重要な貢献である。また、深層学習を用いた外観品位判定や、麹一粒単位での破精評価と酵素活性測定といった新たな分析手法の開発は、今後の研究展開の基盤となる方法論的革新をもたらした。実用的意義としては、本研究の成果が醸造現場における客観的、定量的な品質評価と工程管理の実現に直接貢献する点が重要である。外観品位自動判定システムは、熟練した検査員の判断基準を維持しながら高い再現性と効率性を実現し、原料米の厳格な品質管理を可能にする。水浸裂傷評価モデルと水分拡散モデルは、品種特性や年次変動に応じた浸漬条件の最適化に活用でき、蒸米の物性制御を通じて製品品質の安定化に寄与する。また、製麹条件の最適化研究は、特に一般米を用いた高品質麹の製造に関する具体的指針を提供しており、原料コスト削減と品質維持の両立に貢献する知見となっている。

一方で、本研究において残された課題も少なくない。まず、各技術の実用化に向けては、実験室規模から実際の製造規模へのスケールアップに伴う技術的課題の解決が必要である。特に、大規模処理における不均一性の問題や、実時間モニタリングシステムの開発などが今後の重要な研究課題となる。また、本研究では原料処理工程と製麹工程に焦点を当てたが、酒母、もろみ工程にまで視野を広げた醸造プロセス全体の統合的最適化も今後の展開として期待され、さらに、気候変動に伴う原料特性の変動や、消費者ニーズの多様化といった外部環境の変化に対応するための継続的な技術革新も課題である。特に、気象条件と

原料特性の関連性の解明や、多様な原料米に対応可能な柔軟な製造システムの構築は、持続可能な酒造業の実現に不可欠な要素となるだろう。

伝統と革新の調和による日本酒産業の未来像として、本研究は科学的アプローチによる伝統技術の継承と発展の一つのモデルを提示している。ここで重要なのは、先端技術の導入が伝統的な酒造りの価値を損なうものではなく、むしろその本質を理解し、継承するためのツールとなり得るという視点である。例えば、熟練した杜氏の判断基準を深層学習システムに実装することで、その技能を形式知として保存、共有することが可能になる。将来的には、伝統的な醸造技術と先端科学技術が融合した新たな酒造りのパラダイムが確立されることが期待される。そこでは、原料米の生産から消費者の手元に届くまでの全過程がデジタル技術で連携され、トレーサビリティと品質管理が徹底されるとともに、各酒造メーカーの個性や地域性を活かした多様な製品開発が科学的基盤に支えられて展開されるだろう。気候変動やグローバル競争といった課題に直面する日本酒産業にとって、本研究が提示する科学的アプローチは、単なる効率化や標準化のツールにとどまらず、伝統の本質を理解し、継承しながら新たな価値を創造するための基盤となる。千年以上の歴史を持つ日本酒が、次の千年も世界中の人々に愛され続ける文化として発展するために、本研究がその一助となることを願う。

最後に、本研究は画像解析技術と数理モデリングという特定のアプローチに焦点を当てたものであるが、酒造技術の科学的理解と革新には多様な視点からのアプローチが必要である。遺伝子工学、微生物学、有機化学、食品工学など、様々な分野の知見を統合した学際的研究の発展が、日本酒産業の持続的な発展には不可欠であることを強調しておきたい。本研究がそのような学際的研究の一翼を担い、酒造技術の科学的基盤強化に貢献することができれば幸いである。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、終始懇切なるご指導とご鞭撻を賜りました京都大学農学研究科応用生命科学専攻の井上善晴先生に心より深謝申し上げます。

また、本研究の発表を快くご許可くださいました黄桜株式会社代表取締役 松本真治社長に謹んで感謝の意を表します。

本研究全般にわたり、多大なるご指導、ご鞭撻、ならびに細やかなご配慮を賜りました黄桜株式会社取締役相談役 若井芳則博士に深く感謝いたします。

さらに、共同研究者として多くの知見とご協力をいただきました大阪ガス株式会社先端技術研究所の宮藤章博士、富田晴雄博士、中嶋理奈氏、ならびに黄桜株式会社の北岡篤士氏、藤原久志氏、西村隆雄氏に厚く御礼申し上げます。また、本研究を陰ながら支援してくださった大阪ガス株式会社の関係者の皆様、および黄桜株式会社研究所、生産部の皆様にも心より感謝申し上げます。

原料米の確保にご尽力いただきました黄桜株式会社の福田潔博士、桑畑修氏に深謝いたします。

最後に、貴重な原料米試料をご提供くださいました各産地の農業協同組合の皆様に厚く御礼申し上げます。

公表済み文献

第1章

高堂泰輔, 西村隆雄, 藤原久志, 若井芳則：深層畳み込みニューラルネットワークによる酒造好適米外観品位の自動判定, 日本醸造協会誌, 116 (6), 415-427 (2021)

第2章

高堂泰輔, 西村隆雄, 藤原久志, 北岡篤士, 若井芳則：酒造用原料米の水浸裂傷の定量評価, 日本醸造協会誌, 113 (11), 697-706 (2019)

第3章

高堂泰輔, 西村隆雄, 藤原久志, 若井芳則：酒造好適米の白米構造と浸漬条件が水浸裂傷に与える影響の定量的評価, 日本醸造協会誌, 117 (4), 306-317 (2022)

第4章

高堂泰輔, 藤原久志, 若井芳則, 富田晴雄, 中嶋理奈, 宮藤章：数値シミュレーションによる酒造好適米の吸水のモデル化（第1報）心白及び水浸裂傷を組み込んだ水分拡散モデルの検討, 日本醸造協会誌, 118, (12), 853-864 (2023)

高堂泰輔, 藤原久志, 若井芳則：数値シミュレーションによる酒造好適米の吸水のモデル化（第2報）酒造好適米の含水率変化に適した数値モデルの検討, 日本醸造協会誌, 119 (9), 509-518 (2024)

第5章

高堂泰輔, 藤原久志, 若井芳則：一般米を用いた麴の破精とグルコアミラーゼ活性の相関解析, 日本醸造協会誌, 119 (5), 267-277 (2024)

第6章

高堂泰輔, 藤原久志, 若井芳則：製麴条件が一般米麴の破精と酵素活性に与える影響の評価, 日本醸造協会誌, 120 (7), 403-414 (2025)