

## The Effect of the Amylose Contents on the Rheological Properties of Rice Flour Pastes

Isamu KANEDA<sup>†</sup>, Hiroki TANAKA, and Tomohito IWASAKI

*Department of Food Science and Wellness, College of Agriculture, Food, and Environment Science,  
Rakuno Gakuen University, Ebetsu-shi, Hokkaido Japan*

The high amylose rice KITAMIZUHO developed in Hokkaido is expected to be applied to various foods because its rice flour paste shows high viscoelasticity. In order to systematically investigate the relationship between this characteristic rheological property and amylose content, the rheological properties of various rice flour pastes. For the rheological properties, the frequency dependence of the complex modulus of each rice flour paste was analyzed by a weak-gel model (WGM). We can obtain the coordination number ( $z$ ) which shows the spatial density of the swollen starchy endosperm and starch granules in the rice flour paste using the model. KITAMIZUHO rice flour paste showed the higher  $z$  values than the middle and low amylose contents rice flours. It was expected that the higher the amylose content of rice starch, the larger the size of swollen starchy endosperm and starch granules. On the other hand, the observation using scanning electron microscopy revealed that the size of swollen starch granules of KITAMIZUHO was larger than the other rice flour paste. These results suggest that the characteristic rheological properties of the KITAMIZUHO rice flour paste, is due to the relatively large size of its swollen starchy endosperm and starch granules.

**Key Words:** Rice flour / Starch granules / Amylose / Weak-gel / SEM

## 米粉ペーストのレオロジー特性に対するアミロース含量の影響

金田 勇<sup>†</sup>, 田中 宏樹, 岩崎 智仁

(原稿受理: 2020年3月5日)

### 1. 緒言

我が国では年々米の消費量が減少しておりそれに伴い、水田や米の生産量が減少している。そのため米の消費量を増やすため新たな米の用途開発・拡大が進められている。しかしながらコメの消費量は漸減傾向にあり、その要因の一つとしてコメを粒食する需要が減り、一方でパン食が増加していることが挙げられる。そこでコメの消費量を増加させる一つの方策として米粉への加工に適した高アミロース米の開発が国の施策の一つとして推進されてきた。

高アミロース米とはアミロース含有量が25%以上のものを指さす。高アミロース米は、一般的な米よりも粘り気が少なく硬い性質を持っているため通常の炊飯米としては不向きであり、フォー（米粉めん）や生春巻き（ライスペーパー）、リゾットやグリーンカレーなどに使われており、最近では製パンにも応用されている品種もある。キタミズホは2003年に北海道農業研究センターにおいて耐冷性が優れている酒米品種「初雫」と耐倒伏性が強いインド型多収品種「夢十色」とのF<sub>1</sub>に初雫を花粉親として戻し交配し育成された寒地向

けの多収・高アミロース米であり、米粉麺やクッキーへの加工適正があるほか、その米粉ペーストは特異的な粘弾性特性を示すことがわかっている<sup>1)</sup>が、その分子論的な原因は不明である。

本研究で取り上げる米粉は米の胚乳の粉碎物であり、デンプン粒に加えて細胞壁の断片やたんぱく質等も含む粉体である。この米粉に加水して加熱したペーストは主に糊化して膨潤したデンプン粒と上述の夾雑物が共存したコロイド分散体として捉えることができる。デンプン水分散液を加熱処理して得られるいわゆるデンプンペーストのレオロジー特性はデンプンの食品への応用において重要なパラメータの一つである。デンプンペーストのレオロジー特性は一般的にラピッド・ビスコ・アナライザー（RVA）による研究が蓄積されてきた<sup>2)</sup>。RVAは水に懸濁させたデンプンを加熱しながらパドルで攪拌し、そのトルクをモニターすることでサンプルの粘度を算出する装置であり、糊化温度等の情報を得ることができる。しかしながら糊化過程の過渡的な見かけ粘度を測定しているにすぎないために得られる情報は少ない。

一方でデンプンの化学構造については生デンプンの状態の構造に関しては莫大な情報が蓄積されており、結晶性の高いアミロペクチンが形成するラメラ構造がアミロースを多く含むとされているアモルファス領域に挟まれた多相構造が提唱されており<sup>3,4)</sup>、その多相構造が基本構造単位としていわゆ

<sup>†</sup> 酪農学園大学 農食環境学群 食と健康学類  
〒069-8501 北海道江別市文京台緑町582  
E-mail: kaneda-i@rakuno.ac.jp, Tel: +81-11-388-4701

るデンプン粒を形成しているとされている。しかしながら、これらの情報は生デンプンを解析した結果であり、糊化したデンプンペーストに関する線形粘弾性特性や構造に関する研究は極めて少ないのが現状である。

本研究は同一工程で製粉されたアミロース含量の異なる米粉を用い、最小限のせん断負荷により糊化された米粉ペーストのレオロジー特性と走査型電子顕微鏡観察によって高アミロース米の米粉であるキタミズホの特異的な力学特性発現のメカニズムを考察することを目的とした。

## 2. 材料および方法

### 2-1 材料

米粉は農研機構北海道農業研究センターにおいて2017年に収穫されたオボロツキ、ナナツボシおよびキタミズホの90%搗精した精白米を乾式小型製粉機 (SATAKE SRG05A, 0.5 mm スクリーン) で製粉された米粉試料の提供を受け、それらをそのまま使用した。これらの試料の見かけのアミロース含量はヨウ素呈色比色法の変法で測定され<sup>1)</sup>、オボロツキは15.3%、ナナツボシは19.7%およびキタミズホは30.4%であった。

### 2-2 電子レンジによる米粉ペーストの調製法

それぞれの米粉を6~12%含む米粉ペースト (糊液) を廣瀬らの方法<sup>5)</sup>を参考にして以下に述べる方法で調製した。

50 ml ビーカーに米粉と水の総量が30 gになるように量りとりペンシルミキサーで20秒間攪拌し米粉を分散させた。これを電子レンジで700 W, 10秒間加熱し、ただちにペンシルミキサーで20秒間攪拌する。この工程を5回繰り返した。工程の最終時点での試料温度は85~90℃に到達していることを確認した。得られた米粉ペーストサンプルは25℃, 1時間静置したのちに測定に供した。

試料コードはオボロツキ、ナナツボシ、およびキタミズホの米粉ペーストをそれぞれO-x, N-x, およびK-xとした。ここでxはそれぞれの米粉の質量パーセント濃度 (wt%) を示す。

### 2-3 レオロジー特性

ひずみ制御型回転式レオメータ ARES (TA Instrument 社) を用いて定常流粘度のずり速度依存性および動的弾性率の周波数依存性を温度25℃で測定した。測定治具は25 mm パラレルプレート (gap 1.5 mm) を用いた。測定条件は定常流粘度測定においてはずり速度0.1~100 1/s, 動的弾性率測定においては周波数範囲は0.5~50 rad/s, ひずみは0.01とした。

### 2-4 走査型電子顕微鏡 (SEM) による観察

米粉はデシケータで十分に乾燥した後、SEM用試料台に貼り付けたカーボン両面テープ上に散布し、白金蒸着して観察試料を作成した。米粉ペースト試料は12 wt%の米粉ペーストを50%エタノールで溶媒置換した後に、液化イソペンタンで急速凍結した後に凍結乾燥した。凍結乾燥された試料を小型ハンマーで切断し、その表面を白金蒸着して観察試料を作成した。これらの観察試料を走査型電子顕微鏡 S-2460N 形 (日立ハイテクノロジー) で付加電圧10 kV, の条件で観察した。

## 3. 結果及び考察

### 3-1 米粉ペーストの流動挙動

Fig. 1 に K-10, N-10, および O-10 の粘度-ずり速度曲線を示す。いずれの試料も指数則に従う流動軟化挙動を示した。また N-10 と O-10 は測定したずり速度の範囲でほぼ同等の粘度を示しているが、K-10 のみが高かった。低ずり速度領域においても流動曲線に平坦部が観察されないことから、これらの米粉ペーストは見かけの降伏応力を持つ擬塑性流動を示すと考えられた。Fig. 1 に示したデータをずり応力-ずり速度曲線としてプロットしたのが Fig. 2 である。図中の曲線は非ニュートン流動を記述する経験式である Herschel-Bulkley 式 (Eq. 1) で解析した結果を示す。

$$\sigma = k\dot{\gamma}^n + \sigma_y \quad (1)$$

ここで  $\sigma$  はずり応力,  $k$  は粘性係数,  $\dot{\gamma}$  はずり速度,  $n$  は Herschel-Bulkley 係数,  $\sigma_y$  は見かけの降伏応力である。Table I に解析結果をまとめて示す。

Fig. 1 にも示されているように粘性係数は K-10 が他の2試料に比べて極めて高かった。この粘性係数の値は  $n$  の値に依存するが、 $n$  はいずれの試料においても0.4近傍の値であり、流動軟化挙動は質的にはほぼ同等と考えることができる。注目すべきは見かけの降伏応力の値でありこれはいずれの試料においても有限な値を示し、かつ粘性係数の大きさと連動している。有限な見かけの降伏応力を観察したということはこれらの米粉ペースト内にある臨界値未満の歪に対して内部応力を発生させる構造が形成されていることが予想される。そこでこれらの米粉ペーストの動的弾性率の周波数依存性を解析することを試みた。

Table I The Herschel Bulkely parameters for 3 types rice flour paste.

	O-10	N-10	K-10
$k$ [Pa·s <sup>n</sup> ]	47.4 ± 2.05	65.2 ± 8.92	182 ± 10.2
$\sigma_y$ [Pa]	8.40 ± 2.63	8.42 ± 3.65	18.1 ± 14.7
$n$ [-]	0.47 ± 0.01	0.41 ± 0.02	0.35 ± 0.03

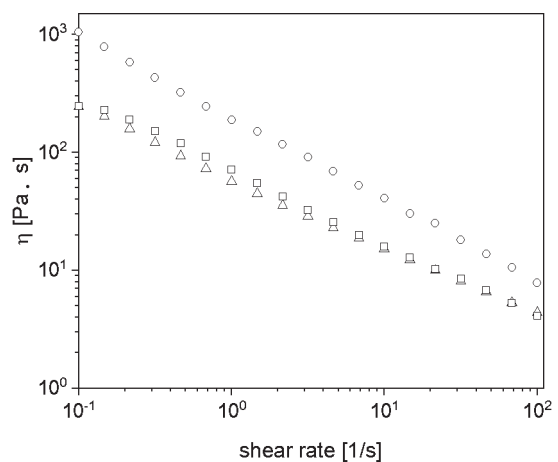


Fig. 1 The shear rate dependence on the apparent viscosity for the 3 types of rice flour paste. The open circles, squares, and triangles denote the results of K-10, N-10, and O-10, respectively.

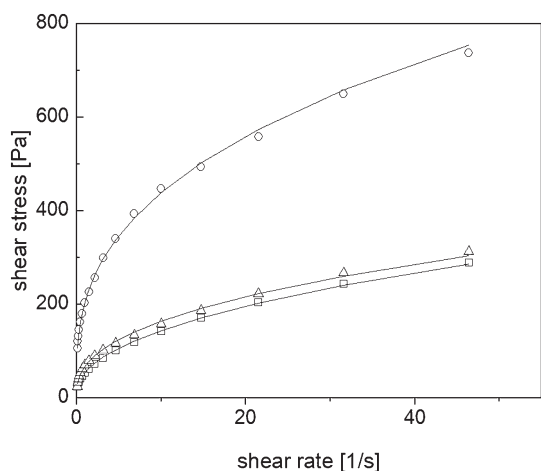


Fig. 2 The shear rate dependence on the shear stress for the 3 types of rice flour paste. The open circles, squares, and triangles denote the results of K-10, N-10, and O-10, respectively. The lines denote the best fit results of the analysis using Eq. 1 for each sample.

### 3-2 Weak-gel model による米粉ペーストの力学スペクトルの解析

すでに各種米粉ペーストの粘度-ずり速度曲線が指数則に従うパターンを示すことを述べた。粘度-ずり速度曲線のみならず応力緩和曲線や動的弾性率の周波数依存性が指数則に従うようなケースはいわゆる複雑流体において多く観察されている。Bohlin<sup>6)</sup>は液晶の応力緩和曲線が指数則に従うことを観察し、この指数と系内の構造を関連付ける理論を提唱した。この理論は系内に仮想的な流動単位を考える。濃厚な流動単位の分散体に外力が加わった際に、この流動単位は周辺の流動単位との空間的な配置によっては協同的な変形・流動が生じると考えられる。その協同的再配列に要するエネルギーを計算することで流動単位の空間的な配置状況を定量化する理論である。Gabriele<sup>7)</sup>らはこのBohlinの理論にWinter<sup>8)</sup>らの臨界ゲルのアイデアを取り入れ、複雑流体の構造に関する情報をレオロジー測定データより推定する weak-gel model (WGM) を提唱した。

WGMでは複素弾性率と周波数を下式のように記述できるとしている。

$$G^* = A_f \omega^{1/z} \quad (2)$$

ここで  $G^*$  は複素弾性率、 $A_f$  はゲル強度、 $\omega$  は周波数、 $z$  は配位数を表す。この配位数  $z$  が上述の仮想的な流動単位の空間的な充填度を示すパラメータである。すなわち  $z$  の値が大きいほど実在の系においてはコロイド粒子が密に充填していることを示す。一方で  $A_f$  はいわば系のコンシステンシーを定量的に示すものである。WGMは食品のレオロジー特性の解析に幅広く活用されており<sup>9-13)</sup>、我々は乳化系食品であるマヨネーズの内油相比の異なるモデルマヨネーズの内油相比と配位数が良い相関を示すことを明らかにしている<sup>14,15)</sup>。

Fig. 3にO-10、N-10およびK-10の複素弾性率の周波数依存性の典型的な結果を示す。O-10およびN-10は測定周波数範囲でそれぞれの貯蔵弾性率が損失弾性率を上回り、かつ指数則に従っている。K-10についても貯蔵弾性率が損失弾性率を大きく上回り、貯蔵弾性率のスケール指数（両対数プロットの傾き）は他の二つの試料に比べて小さく見える。

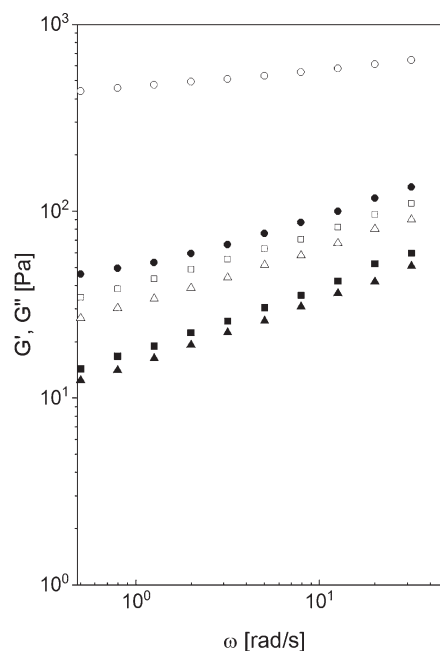


Fig. 3 The frequency dependence on the dynamic moduli for the 3 types of rice flour paste. The open and closed symbols denote storage modulus and loss modulus, respectively. The circles, squares, and triangles denote the results of K-10, N-10, and O-10, respectively.

米粉ペーストのこのような力学スペクトルはすでに報告があり<sup>16)</sup>糊化したデンプンペーストに関しては一般的な特性であると考えられる。アミロース含量の異なるこれらの米粉ペーストはいずれもその動的弾性率は周波数に対してスケールリングしており、WGMでの解析が有効であると考えられた。

### 3-3 アミロース含量の異なる米粉ペーストのレオロジー特性の米粉濃度依存性

米粉ペーストの力学スペクトルをWGMで解析し、そのパラメータの米粉濃度依存性について考察した。アミロース含量の最も低いオボロツキ(O-6~O-12)ではいずれの濃度のサンプルも複素弾性率は周波数に対してスケールリングしており、また米粉濃度に応じて複素弾性率の値が上昇していることが見て取れた(Fig. 4)。ナナツボシのスケールリング挙動はオボロツキと同様であるが、オボロツキと異なるのはN-10とN-12の間で大きく複素弾性率の値が上昇している点である(Fig. 5)。最後にFig. 6に最もアミロース含量が高いキタミズホの結果を示すが、いずれの濃度においても他の二つの米粉に比べて複素弾性率の値が高く、スケールリング指数も小さいように見える。

これらの米粉間の複素弾性率の周波数依存性を定量的に比較するためにFig. 4~6のデータを(Eq. 2)を用いて解析し、WGMパラメータ、すなわち配位数  $z$  とゲル強度  $A_f$  とを求めた。

6~8%の試料においてはキタミズホが6程度オボロツキおよびナナツボシは4程度というようにアミロース含量により  $z$  の値が異なるものの濃度依存性は見られないが、キタミズホについては8%からナナツボシについては10%を境に大きく上昇した(Fig. 7)。上述のとおり配位数  $z$  は仮想的な流動単位の空間的な充填度を示すパラメータであるが、米粉ペーストにおいては膨潤した胚乳およびデンプン粒といったコロイド粒子の空間分布に対応していると考えられる。キタ

ミズホやナナツボシで観察されたある濃度を境にしての急激な上昇は colloid jamming のような現象が起きていることを示唆していると考えられる。ゲル強度  $A_f$  の濃度依存性も  $z$  の濃度依存性と同様な傾向を示している、すなわち、キタミズホでは 8%, ナナツボシでは 10% を境にして上昇している (Fig. 8)。米粉ペーストに含まれているコロイド粒子の体積分率がある臨界点を越えることで jamming 転移のようなことが起これば、内部応力を発生させる構造が成長してコンシステンシーが上昇するという現象は容易に理解することができる。一方でアミロース含量の最も少ないオボロツキについては検討した濃度範囲ではコンシステンシーの急激な上昇、すなわち米粉ペースト中のコロイド粒子の充填状態の転移は見られなかった。

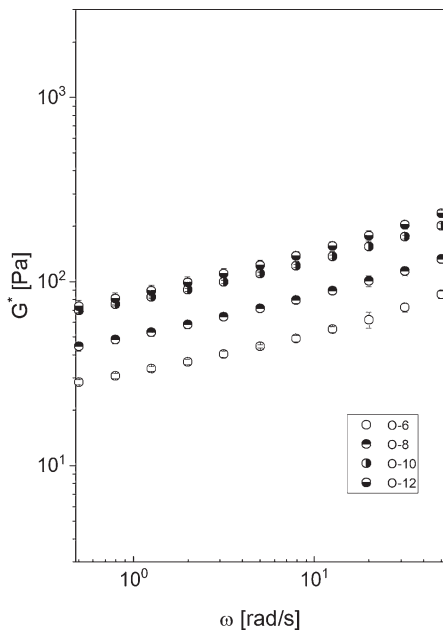


Fig. 4 The frequency dependence on the complex modulus for the various concentration OBOROTSUKI rice flour paste.

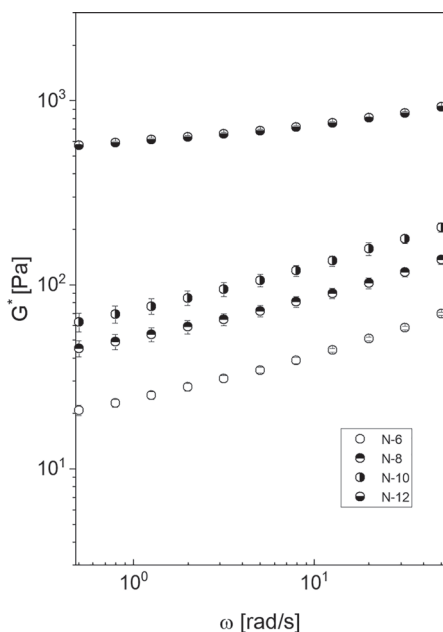


Fig. 5 The frequency dependence on the complex modulus for the various concentration NANATSUBOSHI rice flour paste.

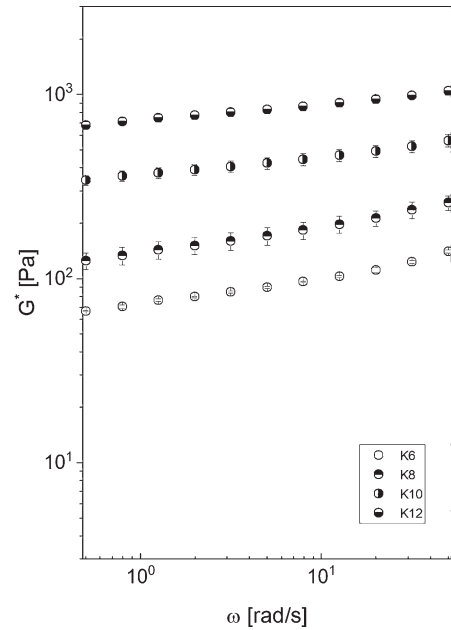


Fig. 6 The frequency dependence on the complex modulus for the various concentration KITAMIZUHO rice flour paste.

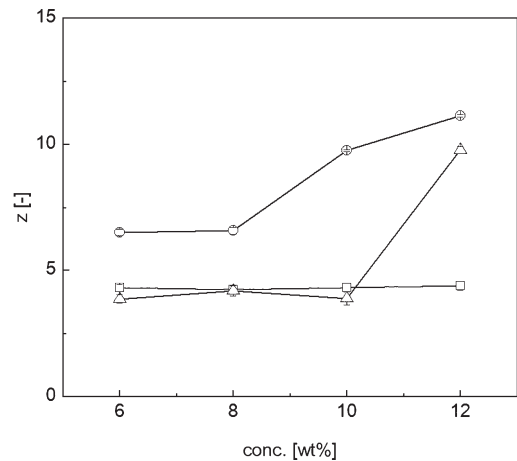


Fig. 7 The rice flour concentration dependence of the coordination number ( $z$ ) which were analyzed using Eq.2. The open circles, squares, and triangles denote the results of KITAMIZUHO, NANATSUBOSHI, and OBOROTSUKI, respectively.

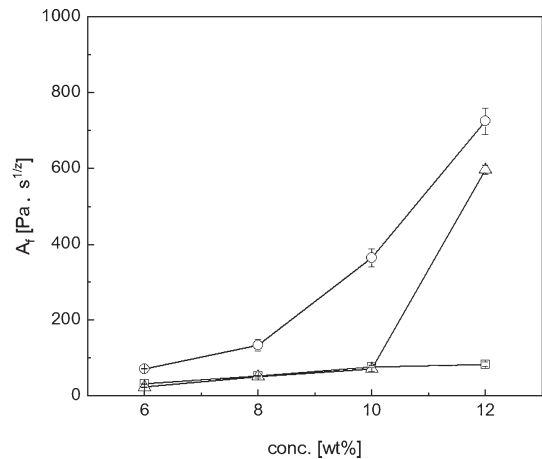


Fig. 8 The rice flour concentration dependence of the gel strength ( $A_f$ ) which were analyzed using Eq.2. The open circles, squares, and triangles denote the results of KITAMIZUHO, NANATSUBOSHI, and OBOROTSUKI, respectively.



WGM パラメータから定量的に評価された三種類の米粉ペースト中の膨潤したデンプン粒の空間的分布の違いの原因はそれぞれの米粉中のデンプン粒の形態やサイズが異なっているという可能性が考えられる。そこで米粉ペーストの微細構造を走査型電子顕微鏡で観察した。

### 3-4 走査型電子顕微鏡 (SEM) による米粉および米粉ペースト微細構造の観察

Fig. 9 に 3 種の米粉の SEM 画像を示した。いずれの試料も数  $\mu\text{m}$  ~ 数  $10 \mu\text{m}$  の粒子が観察された。米粉は胚乳を機械的に磨砕して製粉したものであり、そこにはデンプン粒に加えて細胞壁やたんぱく質が含まれていると考えられる。Fig. 9 を注意深く観察するといずれの試料においても数  $10 \mu\text{m}$  の比較的大きな粒子の表面には米デンプンに特徴的な多角形のデンプン粒が集合している様子が観察される。米のデンプン粒は品種あるいは育成条件によってそのサイズ・形態が異なるということはすでに報告されており、生デンプンの状態の SEM 観察ではそのサイズは  $2\sim 7 \mu\text{m}$  の範囲に及ぶとされている<sup>18,19)</sup>。したがって米粉の状態ではデンプン粒がばらばらに分散しているわけではなく、胚乳中に充填した状態で存在していることがわかった。一方で、米粉の粒度分布や損傷デンプン量は製粉工程に大きく依存するとの報告があるが<sup>17)</sup>、本研究で用いた米粉はすべて同一の機器を用いて製粉し、 $0.5 \text{ mm}$  メッシュの篩で分級されているために Fig. 9 に示されたように品種による (アミロース含量による) 粒度分布の大きな違いは SEM 画像からは認められなかった。ま

た本研究で使用した試料の損傷デンプン量は測定していないため、SEM 画像からは損傷デンプンについて言及することはできない。

一方で水を多く含んだ米粉ペーストのような試料を凍結乾燥して電顕観察試料を調製する場合には、試料内に極力氷結晶を成長させないような工夫が必要である。エタノールは氷結晶成長を抑制する効果があるので米粉ペーストを 50% エタノール水溶液で溶媒置換したのちに急速凍結して観察標本を作製した。Fig. 10a は O-12, b は N-12 および c は K-12 の SEM 観察画像である。アミロース含量が最も低く、 $6\sim 12\%$  の濃度範囲で配位数  $z$  の値に大きな変化が見られなかった O-12 (a) は数  $\mu\text{m}$  の多角形デンプン粒の特徴を示す粒子状の構造が観察された。Fig. 9a の米粉の観察像と比べるとデンプン粒が充填した胚乳から糊化処理によってデンプン粒がばらばらに分散したと考えられる。一方で N-12 (b) は多角形の粒子は見えてとれるものの、粒子の境目が不明瞭になっており、K-12 (c) においては大きな粒子がお互いに変形しながら密に充填している様子が観察される。これらの試料は米粉濃度 12% であり、Fig. 7 に示した配位数  $z$  の値と合わせて考えてみると O-12 は  $z=4$  程度である一方で N-12 および K-12 は  $z=10$  程度で WGM によるレオロジーデータから得られた構造的な情報である配位数からもこの SEM 観察の結果を支持する結果となっている。

### 3-5 アミロース含量とレオロジー特性の関連

芦田ら<sup>1)</sup>が報告している通りキタミズホの米粉は低濃度で

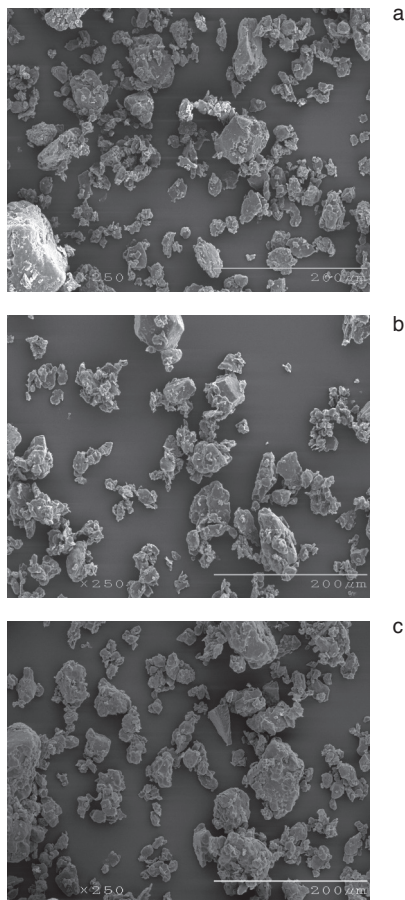


Fig. 9 The scanning electron microscope images of rice flour powders; OBOROTSUKI (a), NANATSUBOSHI (b), and KITAMIZUHO (c). The scale bar indicates  $200 \mu\text{m}$  ( $\times 250$ ).

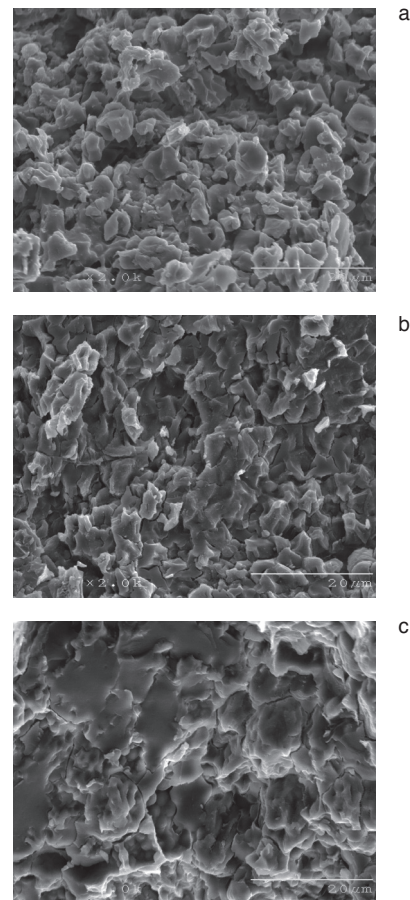


Fig. 10 The scanning electron microscope images of O-12 (a), N-12 (b), and K-12 (c). The scale bar indicates  $20 \mu\text{m}$  ( $\times 2000$ ).

コンシステンシーの大きな米粉ペーストが調製できることが確認できた。またレオロジー特性（定常流粘度や WGM パラメータ）は各米粉の見かけのアミロース含量と相関があることから米粉ペーストのレオロジー特性はアミロースの含有率により大きく変化することがわかった。これまで米粉ペーストの線形領域での粘弾性パラメータからその構造を推察する試みはほとんど報告がないが、WGM を用いることで米粉中の含まれるデンプン粒から成るコロイド濃厚分散体としての米粉ペーストのレオロジー特性の一端を定量化することができた。Fig. 9 および Fig. 10 を比較すると、オボロツキでは糊化によって米粉ペースト中にそのデンプン粒が分散している状態が観察されたが、キタミズホの米粉は糊化によっても胚乳の構造が崩れにくく米粉ペースト中に比較的サイズの大きなコロイド粒子が存在することがわかった。その結果として米粉ペースト内のコロイド粒子の充填率が相対的に上昇し、同一米粉濃度で比較すると高いコンシステンシーが観察されたと推察できる。一方で、Fig. 10a のオボロツキと c のキタミズホの画像を比較するとデンプン粒と思われる多角形（c では明確ではないが）の構造のサイズが異なるように見えることから、アミロース含量とデンプン粒のサイズの間は何らかの相関があるという可能性も示唆される。

このようなアミロース含量の違いによる形態の相違の原因についてはさまざまな要因が関係すると考えられる。一つは各品種の精白米自体の物性の違いである。精白米の力学物性（曲げ剛性）は含水量の上昇とともに低下することが報告されている<sup>20</sup>。これは精白米へ水が浸潤することでアミロプラストの構造が脆弱化するためであると考えられる。また一方で米粉の糊化特性（レオロジー特性）は製粉時の吸水状態によって変化することも報告されている<sup>21</sup>。これらの先行研究の結果より本研究で用いた米粉試料は、品種により製粉操作による力学的損傷度合いが異なることが考えられる。そして損傷度合いによる吸湿性の違いが生じ、その結果として糊化したペーストの状態が異なることが考えられる。

アミロース含量の違いによるデンプン糊液のレオロジー特性の差異についてのさらなる詳細な検討を進めるためには米粉から純粋なデンプンを抽出し、損傷デンプン量等の重要な特性値を得ながら本研究で行ったような構造-物性相関に関する研究を行う必要があると考えられる。

#### 4. 結 論

米粉ペーストのレオロジー特性における、米粉中に存在する米デンプンのアミロース含有量依存性について weak-gel model パラメータを用いて調べた。高アミロース米であるキタミズホは中アミロース米のナナツボシおよび低アミロース米のオボロツキと比較すると低濃度で高い弾性率を示した。米粉ペースト中に含まれる膨潤したデンプン粒の充填度を示すと考えられる配位数  $z$  の濃度依存性および米粉ペーストを凍結乾燥した試料の走査型電子顕微鏡観察より、米粉中の膨潤したコロイド粒子のサイズはアミロース含量に依存することが明らかになり、これが高アミロース米であるキタミズホの米粉ペーストの特異的なレオロジー特性発現の要因の一つであると考えられた。しかしながらアミロース含量によるこのような糊化ペーストのレオロジーおよび SEM 画像による構造の相違の分子論的な原因は現時点では不明である。

今後の課題としては糊化した状態でのデンプン粒の内部の微細構造、特にナノスケールの構造解析が必要である。我々はすでに小角 X 線散乱法を用いて米粉ペーストのナノ構造に関する研究に着手しており、高アミロース米のデンプン粒に特徴的な構造を持つことを観察している。またアミロースはデンプン糊液の老化を促進すると言われているがそのメカニズムの詳細については不明である。この問題もレオロジーおよびナノ構造解析で興味深い研究成果が得られつつあり近い将来に論文化を予定している。

#### 謝 辞

本研究は国立研究法人農業・食品産業技術総合研究機構北海道農業研究センターと酪農学園大学との協定研究として行われた。キタミズホをはじめとする各種米粉試料の提供およびキタミズホの特性に関する情報提供を頂いた同研究センター作物開発研究領域水稲育種グループの皆様にご感謝の意を表します。

#### REFERENCES

- 1) Ashida K, Koya K, Umemoto T, *Nippon Shokuhin Kagaku Kougaku Kaishi*, **66**, 290 (2019).
- 2) Wani AA, Singh P, Shah MA, Schweiggert-Weisz U, Gul K, Wani IA, *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, **11**, 417 (2012).
- 3) Waigh TA, Jenkins PJ, Donald AM, *Faraday Discuss*, **103**, 325 (2001).
- 4) Lopez-Rubio A, Gilbert EP, *Trends Food Sci Technol*, **20**, 576 (2009).
- 5) Hirose M, Ichikawa A, *Nippon Shokuhin Kagaku Kougaku Kaishi*, **60**, 723 (2013).
- 6) Bohlin LA, *J Colloid and Interface Sci*, **74**, 423 (1980).
- 7) Gabriele D, de Cindio B, D'Antona P, *Rheol Acta*, **40**, 120(2001).
- 8) Winter HH, Chambon F, *J Rheol*, **30**, 367 (1986).
- 9) Miura M, Yamauchi F, *Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi*, **31**, 783 (1984).
- 10) Meza BE, Chesterton AKS, Verdini RA, Rubiolo AC, Sadd PA, Moggridge GD, Wilson DI, *J. Food Eng*, **104**, 592 (2011).
- 11) Meza BE, Verdini RA, Rubiolo AC, *J. Food Engineering*, **109**, 475 (2012).
- 12) Roversi T, Piazza L, *Eur Food Res Technol*, **242**, 421 (2016).
- 13) Nicole N, Caimeng Z, Joseph H, Eric K, Yufei H, *J. Texture Studies*, **47**, 112 (2016).
- 14) Kaneda I, *J Biorheology* **32**, 9 (2018).
- 15) Kaneda I, Shibata S, *Nihon Reoroji Gakkaishi (Journal of the Society of Rheology, Japan)*, **48**, 1 (2020).
- 16) Takahashi T, Fujita N, *Food Hydrocolloids*, **62**, 83 (2017).
- 17) Yamamoto K, Shimizu H, Kurihara M, Kamata H, Nagasawa K, Funatsuki M, Yamauchi H, *Bulletin of Hokkaido Food Processing Research Center*; No.11, 29 (2015).
- 18) Hoover R, Sailaja Y, Sosulski FW, *Food Res Int*, **29**, 99 (1996).

- 19) Lindeboom N, Chang PR, Tyler RT, *Starch*, **56**, 89 (2004).  
20) Shimizu H, Sakai M, *Journal of the Japanese Society of  
Auricularl Machinery*, **36**, 108 (1974).  
21) Homma N, Takahashi M, Yoshii Y, *Nippon Shokuhin Kagaku  
Kougaku Kaishi*, **63**, 551 (2016).