

◇◇◇◇ 原著論文 ◇◇◇◇

粉碎方法および粒子径が米粉の Carr の流動性指数 および噴流性指数に与える影響

五月女格[†], 津田升子, 岡部繭子, 大島紗也香, ムハマド シャリフ ホッセン,
板倉真由美, 竹中真紀子, 岡留博司, 五十部誠一郎

独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 食品総合研究所食品工学研究領域

Effect of Milling Methods and Particle Size on Carr's Flowability and Floodability Indices of Rice Flour

Itaru SOTOME[†], Masuko TSUDA, Mayuko OKABE, Sayaka OSHIMA,
Md. Sharif HOSSEN, Mayumi ITAKURA, Makiko TAKENAKA,
Hiroshi OKADOME and Seiichiro ISOBE

National Food Research Institute, 2-1-12, Kannondai, Tsukuba 305-8642, Japan

Fine grinding technology is expected to permit various application of rice flour, however, it will decrease flowability of rice flour, resulting in formation of bridge and cohesion of powder inside the food processing machine. To determine necessary equipments and technologies for the processing of fine rice flour, this study investigated Carr's flowability and floodability indices, moisture content, and roughness coefficient of the flours made from nonglutinous rice (white/brown) and glutinous rice (white), having the mean diameters of 3~30 μm and 30~100 μm milled by a jet mill and a hammer mill respectively. Although the moisture content and the roughness coefficient decreased as the mean diameter of the rice flour decreased, its flowability decreased as the mean diameter decreased down to 15 μm . In the flours at 3 μm mean diameter, the flowability of white rice flour was almost same with that of 15 μm flour, while it increased in the brown rice flour. The rice flours with the mean diameter less than 30 μm were less flowable than traditional rice flour *joshinko*, however as flowable as ordinary wheat flour.

Keywords: Angle of repose, Bulk density, Grain shape, Scanning electron microscope, Profile function

1. 緒 言

米は世界の広範な地域で主要な食糧とされている。米は古くから粒食のみならず米粉としても利用されており、その利用方法は菓子類、飲料、パン、その他加工食品など多岐に渡っている [1, 2]。製粉技術の進歩によってより粒度の小さい米粉が製粉されるようになるにしたいが、米粉の応用範囲も広がりつつある。近年は平均粒径がおおよそ 50 μm と、小麦粉と同等の粒度の米粉が製造されるようになり、米粉を用いた製パンに関する研究も盛んになってきている [1]。今後さら

に米粉を微粒化することにより新たな米粉の利用方法が開拓されると期待される。

食品素材の粉体の物理的特性は非常に複雑であり、粒子径と流動性の関係は食品の成分によって変化するとされるが [3]、一般的に粉体は微粒化するにしたいが流動性が悪くなるとされ、食品素材などにおいてもこの傾向がみられることが報告されている [4-7]。したがって、より微粒化された米粉は従来から利用されてきた米粉と比較して流動性が低くなると考えられ、発塵性など他の物理的特性にも変化が現れることが予測される。そのため、従来の米粉を原料として使用してきた食品加工機械もしくは加工ラインにおいて微粒化された米粉を使用した場合、ホッパー、フィーダ、輸送パイプあるいは攪拌機などにおいて粉体の架橋および凝集などの問題が起こる可能性がある。これらの問

(受付 2009 年 2 月 18 日, 受理 2009 年 5 月 22 日)

〒305-8642 茨城県つくば市観音台 2-1-12

[†] Fax: 029-838-8122, E-mail: itarus@affrc.go.jp

題を防ぐため加工機械類に対してどの程度の対策を施すべきかを判断するためには、微粒化された米粉の流動性を評価することが有効であるといえる。

粉体の流動性を評価する方法はいくつか提案されているが、そのうちの1つに Carr の流動性指数および噴流性指数がある [8]。Carr の手法は粉体の圧縮度、安息角などの数項目の試験結果から総合的に流動性および噴流性を点数化し、粉体機器の設計および選定の基準とすることに主眼を置いているが、この手法を用いた粉体の流動性に関する研究も報告されている [9-11]。したがって、Carr の手法を用いて微粒化された米粉の流動性および噴流性を評価することにより、微粒化された米粉を利用する際に加工機械類に対して必要となる対策の指標が得られ、かつ微粒化による米粉の力学的な性状変化に関する科学的な知見が得られると期待される。

本研究では微粒化が米粉の流動性に及ぼす影響を解明するため、気流式粉砕機であるジェットミルを用いて平均粒径がおおよそ 3~30 μm の米粉を、衝撃式粉砕機であるハンマーミルを用いて平均粒径がおおよそ 30~100 μm の米粉を調製し、Carr の手法により流動性および噴流性の評価を行った。また微粉砕された米粉を食品加工機械で用いる際に起こり得る問題を予測するため、従来から利用されてきた米粉の一種である上新粉、および食品の製造加工において利用頻度の高い小麦粉についても参考として流動性および噴流性の評価を行った。また米粉の粒度および粉砕方法と流動性の関連性について考察するため、試料の粒子形状についても測定を行った。

2. 実験材料および方法

2.1 実験材料

実験には茨城県にて2007年に生産されたウルチ米(コシヒカリ) および2006年に生産されたモチ米(マンゲツモチ)を用いた。ウルチ米は玄米にて購入し、精米歩合90%の白米および玄米として実験に用いた。モチ米は白米にて購入した。試料は購入後5℃にて密封容器内で保管し、実験時には試料温度が室温と平衡になるまで実験室内に静置した後供試した。上新粉および小麦粉(中力粉)は茨城県内の小売店で購入した物を用いた。

2.2 粉砕機

2.2.1 ジェットミル

実験に用いた気流式粉砕機であるジェットミル(IDS-2, 日本ニューマチック工業株式会社)の粉砕室の概略図を Fig. 1 に示す。この装置ではコンプレッサから供給された圧縮空気をノズルから噴射することにより高速の気流を生成する。原料粒子は高速気流中に

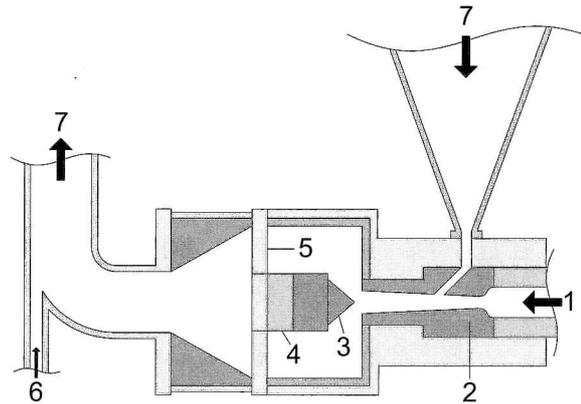


Fig. 1 Schematic drawing of the jet mill. 1. Compressor, 2. Nozzle, 3. Impact plate, 4. Adjust ring for the impact plate, 5. Impact plate upholder, 6. Feeder, 7. Classifier.

投入され加速される。加速された原料粒子は粒子同士および衝突板と衝突することにより粉砕される。粉砕された粒子は供給された原料と共に分級機に送られ、微粉砕された粒子は試料容器へ、粗粉は再び粉砕室へとそれぞれ送られる。ジェットミルでは微粉砕が可能であり、粒子速度、衝突板形状などと粉砕特性の関係が詳しく研究されている [12-13]。またジェットミルでは高速気流を気体の断熱膨張により発生させているため、粉砕室内の温度が極めて低温になる。

2.2.2 ハンマーミル

実験に用いた衝撃式粉砕機であるハンマーミル(1018-S-3, 株式会社吉田製作所)の概略図を Fig. 2 に示す。この装置ではスクリー式のフィーダによって原料が粉砕室に輸送される。粉砕室内部では12個の可動式ハンマーが取り付けられた円盤が8000 rpm(ハンマー先端速度は約80 m/s)で回転する。供給された原

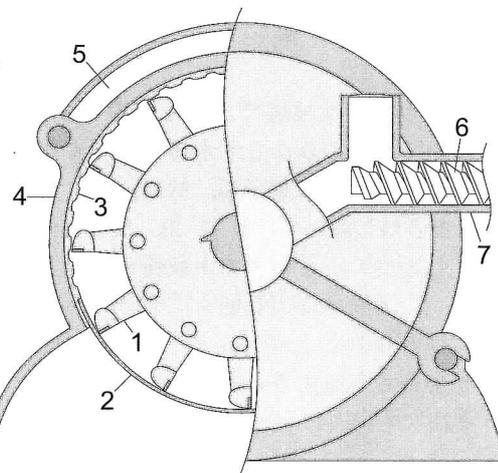


Fig. 2 Schematic drawing of the hammer mill. 1. Hammer, 2. Screen, 3. Lining, 4. Lining case, 5. Coolant, 6. Feeder screw, 7. Screw case.

料はハンマーおよび粉碎室壁面に設置されたライニングとの衝突により粉碎される。粉碎された粒子は粉碎室下部に設置されたスクリーンを通して粉碎室外に排出され試料容器に捕集される。粉碎時にはハンマー、ライニングなどと粉体の摩擦により大量の熱が発生するため、粉碎室はジャケット構造を有しており、冷却液を循環させ粉体の温度上昇を防ぐ対策が施されている。ハンマーミルは様々な食品素材の粉碎に広く用いられている [14]。

2.3 粉碎条件

ジェットミルにおいてはノズル内圧がある一定圧力までは高くなるにしたがい気流速度が増加し、粉碎される粒子の径が小さくなるとされる。またノズル上部の原料投入口から衝突板までの距離、原料の時間当たり供給量によっても粉碎される粒子径が変化する。ジェットミルによる粉碎の条件を Table 1 に示す。ジェットミル粉碎においては米粉の目標平均粒径を 3, 15 および 30 μm とした。平均粒径の目標値が 30 μm の条件においては衝突板を取り付けずに粉碎を行った。この条件においては、粉碎は粒子同士の衝突および粒子と衝突板の支柱との衝突により行われたと考えられる。ノズルの原料投入口から下流へ約 10 mm の位置に熱電対を設置し、粉碎時の気流温度を測定した。

ハンマーミルにおいてはスクリーン穴径を変更することにより、また時間当たりの原料投入量を制御することにより、粉碎される粒子の平均粒径を調整することが可能である。ハンマーミルによる粉碎条件を Table 2 に示す。ハンマーミル粉碎においては目標平均粒径を 30, 60 および 100 μm とした。ハンマーミル粉碎においてはウルチ米とモチ米で粉碎特性が異なることが確認されたため、それぞれに異なる粉碎条件を設定した。

Table 1 Milling conditions in the jet mill.

Target mean diameter [μm]	Nozzle internal pressure [MPa]	Distance to the impact plate [mm]	Feed rate [kg/h]
3	0.65	62	6
15	0.42	92	12
30	0.30	—	12

Table 2 Milling conditions in the hammer mill.

Target mean diameter [μm]	Screen opening size [mm]	Feed rate [kg/h]
30	0.5	6
60	0.7/2.0*	12/18*
100	2.0/3.0*	18

* milling conditions for glutinous rice.

粉碎時には 10°C の冷却水を粉碎室ジャケットに循環させた。スクリーンの粉碎室外側の面に熱電対を設置し、スクリーンを通して粉碎室外へ排出される米粉の温度を測定した。

2.4 試料の粒度分布測定

試料の粒度分布はレーザー回折式粒度分布測定装置 (SALD-2100, 株式会社島津製作所) にて測定した。分散溶媒にはエタノールを用い、室温にて測定を行った。平均粒径は対数変換を用いた平均体積径とした。

2.5 試料の水分測定

粉碎方法および粉碎条件によって試料の水分に違いが生じ、試料の流動性および噴流性に影響する可能性があると考えられたことから試料の水分について確認を行った。試料の水分は炉乾法 (135°C, 1 時間) にて測定した。また粉碎前の米についても水分測定を行った。

2.6 Carr の流動性指数測定

Carr の流動性指数は、粉体の圧縮度、安息角、スパチュラ角、凝集度もしくは均一度を測定し、それぞれの項目の測定結果に対して 0 点から 25 点 (凝集度については 0 点から 15 点) の点数を付与し全ての点数を合計したものであり、点数が大きくなるほど流動性がよくなるとされている。それぞれの測定結果の点数化は Carr の表に基づいて行うが、この表は文献、書籍などに掲載されている [8, 9, 15]。それぞれの項目の測定には多機能型粉体物性測定器 (MT-1001, 株式会社セイシン企業) を用いた。以下に各測定項目の測定方法について記す。

2.6.1 圧縮度

容積 100 ml の容器に目開き 250~355 μm の篩を通して試料を充填した。試料の充填後、容器上部の試料をすり切り、ゆるみかさ密度 ρ_a を測定した。次に容器にキャップを装着し試料を追加し、落下高さ 18 mm で 180 回タッピングを行った。容器上部の試料をすり切り、固めかさ密度 ρ_p を測定した。圧縮度 C_p は次に示す式により計算した。

$$C_p = 100(\rho_p - \rho_a) / \rho_p \quad (1)$$

一般的に流動性の悪い粉体の圧縮度は高いとされる。

2.6.2 安息角

安息角の測定法、定義は幾通りか提案されているが [9]、本研究では注入法にて測定した。目開き 250~355 μm の篩および漏斗を通して直径 80 mm の円形テーブルの中央に試料を注入した。試料を注入し続けテーブルの縁から試料が滑り落ち、試料が堆積して形成された円錐の形状が安定した後、分度器を用いて円錐の

斜面と水平面がなす角を測定した。

2.6.3 スパチュラ角

平板上に置いた 22×105 mm のスパチュラ上に十分な量の試料を堆積させた後、スパチュラを鉛直上方に静かに上昇させ、分度器を用いてスパチュラ上に残った試料の傾斜角を測定した。スパチュラに一定の衝撃を与えた後、再度試料の傾斜角を測定し、衝撃を与える前の試料傾斜角との平均値をスパチュラ角とした。

2.6.4 凝集度または均一度

Carr の流動性指数測定においては、試料の凝集性が強く凝集度が測定できる場合は凝集度を用いて流動性指数の算出を行い、試料が粒状または粒状の粉末で均一度が測定できる場合には均一度を用いて流動性指数の算出を行うとされている [8]。

凝集度の測定は、3 種類の目開きの篩を目開きが小さい順に下から重ね、 w [g] (通常は 2 g) の試料を最上段の篩に乗せ振動を与える。篩の振幅は 1 mm になるよう調整する。篩を振動させる時間 T [s] は試料の動的かさ密度 ρ_w を用いて次式から算出する。

$$T=20+(1.6-\rho_w)/0.016 \quad (2)$$

また試料の平均的な比重である動的かさ密度は次式を用いて計算する。

$$\rho_w=(\rho_p-\rho_a)C_p/100+\rho_a \quad (3)$$

振動停止後、上中下段の篩に残った試料質量 w_1 , w_2 , w_3 をそれぞれ測定し、次式から凝集度 C_h を測定する。

$$C_h=\left(\frac{w_1}{w}+\frac{w_2}{w}\times\frac{3}{5}+\frac{w_3}{w}\times\frac{1}{5}\right)\times 100 \quad (4)$$

用いる篩の目開きは、試料の密度が平均的 (おおよそ 0.4 ~ 0.9 g/cm³) な場合、75, 150, 250 μ m のものを用い、密度が小さい試料の場合は目開き 150, 250, 355 μ m の篩を、密度が大きい試料の場合は 45, 75, 150 μ m の篩を用いるとされる。いずれの場合も試料粉体が最下段の篩を全通ししなければならないとされる。

試料の均一度 U_i は粒度分布測定から得られた累積分布曲線より、60%径 X_{60} および 10%径 X_{10} を求め、次式を用いて計算する。

$$U_i=X_{60}/X_{10} \quad (5)$$

試料粒子の粒径が均一である程、均一度は 1 に近づき流動性が高くなるとされ、試料粒子の粒径が不均一である程、均一度の値は大きくなり流動性が低くなるとされる。

本研究では実験に用いた米粉試料のうち、平均粒径約 3 μ m の試料と平均粒径 15 μ m の試料の一部を除いた大部分の試料に、最下段の篩を通過しない大きさの粒子が含まれていることが粒度分布測定の結果から予め判明していた。また凝集度を用いて算出した流動性

指数と均一度を用いて算出した流動性指数を直接比較できない可能性が考えられたため、本研究では全ての試料について均一度を用いて流動性指数を算出した。また一方、流動性指数の算出に凝集度を用いた場合と均一度を用いた場合の違いについて検討するため、平均粒径 3 μ m と 15 μ m の試料については凝集度測定も行った。

2.7 Carr の噴流性指数測定

Carr の噴流性指数は先に述べた流動性指数に崩壊角、差角、分散度を加えた 4 項目を測定し、それぞれの測定結果に対して 0 点から 25 点の点数を付与し全ての点数を合計したものである。点数が大きくなるにしたがいフラッシング (飛散) が起こりやすくなり、機器に対してシール対策の必要性が高くなるとされている。それぞれの項目の測定結果の点数化は流動性指数と同様に定められた表に基づいて行う [8, 15]。それぞれの項目の測定には流動性指数測定と同様に多機能型粉体物性測定器 (MT-1001, 株式会社セイシン企業) を用いた。以下に各測定項目の測定方法について記す。

2.7.1 流動性

先に述べた方法で得られた流動性指数をさらに点数化した。一般的に流動性が高い粉体ほど噴流性も高くなる傾向があるとされる。

2.7.2 崩壊角

流動性指数測定の前で述べた安息角測定が終了した状態で、安息角測定テーブルに一定の衝撃を与え試料円錐を崩壊させた。分度器を用いて衝撃により崩壊した試料円錐の傾斜角を測定し崩壊角とした。本研究で用いた安息角測定テーブルは高さ約 100 mm、直径約 10 mm の円柱形の支柱の上部に取り付けられており、テーブル、支柱、また支柱が取り付けられている台座共にステンレス製である。支柱には自由に落下させることが可能な約 153 g のステンレス製で環状の錘が取り付けられており、この錘をテーブル下部から台座まで 3 回落下させることにより、安息角測定テーブルに衝撃を与えた。崩壊角が小さい程、粉体の噴流性は大きいとされる。

2.7.3 差角

試料の安息角と崩壊角の差を計算し差角とした。差角が大きい程、粉体の噴流性は大きいとされる。

2.7.4 分散度

ウォッチグラスとよばれる直径 100 mm で中心部が窪んだ形状のガラス円盤上に、高さ 600 mm から内径 100 mm のアクリル製円筒を通して約 10 g の試料を落下させた。ウォッチグラス上に乗った試料の質量 w_w を測定し、次式から分散度 D_s を計算した。

$$D_s=100\times(w-w_w)/w \quad (6)$$

式6において w は落下させた試料の質量である。分散度が高いほど噴流性が大きくなるとされ、また発塵性が強くなるとされる。

2.8 粒子表面粗度の測定

粒子の表面粗度は Ehrlich と Winberg の方法 [16] に基づいて測定した。初めに低真空走査型電子顕微鏡 (JSM-5600LV, JEOL) を用いて加速電圧 5~10 kV にて試料粒子の画像を撮影し、撮影した画像から試料粒子の投影輪郭を抽出した。次に、輪郭の重心から輪郭線上のある点までの距離 R を、これら 2 点を結ぶ線と画像水平線がなす角 θ の関数として表す輪郭関数 $R(\theta)$ に変換した。この時点では輪郭関数は角度と距離の離散的なデータの集合であるが、高速フーリエ変換を用いることにより次に示すフーリエ級数にて表すことが可能である。

$$R(\theta) = \sum_{n=0}^N A_n \cos n\theta + \sum_{n=0}^N B_n \sin n\theta \quad (7)$$

式7において A_n および B_n はフーリエ係数である。 N は角度 θ と距離 R のデータセット数であり本研究では 360 であった。粒子の投影輪郭が真円に近く粒子表面が滑らかであるほど、フーリエ係数の $n=0$ 成分比が大きく $n \geq 1$ 成分比が小さくなり、粒子形状が複雑で表面が粗くなるほどその逆となる。粒子形状の複雑さと粒子表面の粗さを表す粒子表面粗度 P_{jk} は次に示す Ehrlich と Winberg の粗度係数の式から計算した。

$$P_{jk} = \sqrt{\frac{1}{2(A_0^2 + B_0^2)} \sum_j^k (A_n^2 + B_n^2)} \quad (8)$$

式8中の j および k は目的に応じて設定する。粒子形状の全体的な歪みを評価する場合は j の値を 1 とし、粒子表面の細かい凹凸に着目する場合は凹凸の大きさに応じて j を大きくしていく。実際のフーリエ係数の計算においては、フーリエ係数の次数が大きくなるにしたがい、画像処理による輪郭関数へのノイズの影響および計算誤差の影響が大きくなるため、 k の値については適宜設定する。本研究においては粒子全体の形状の不規則性を評価するため $j=1$ とし、 $n > 60$ におけるフーリエ係数はほぼノイズとみなせたことから $k=60$ とした。

3. 結果と考察

3.1 粉碎時の試料温度

ジェットミルによる粉碎時の気流温度は粉碎条件および原料の種類によらずほぼ 0~3.5°C の間で推移した。衝突時に個々の粒子の温度が瞬間的に上昇している可能性はあるものの、ジェットミルによる粉碎においては試料は高温に晒されていないと考えられる。一方、ハンマーミルによる粉碎では、粉碎開始後から排出さ

れる試料の温度が上昇し、15秒から2分経過後ある一定温度を中心に不規則に温度が変動した。試料温度が上昇した後の粉碎中の試料温度の平均はおおよそ 40~50°C であった。スクリーン孔径が小さくなるほど試料温度が高くなる傾向があり、また玄米を粉碎した際に試料温度が高くなる傾向がみられた。粉碎室内部の温度は測定された温度よりさらに高くなっていると考えられ、ハンマーミルによる粉碎では試料が比較的高温に晒されていると考えられる。

3.2 試料の粒度分布

試料の粒度分布を Fig. 3 に示す。ジェットミルで粉碎された試料はいずれも粒度分布に単一のピークをもち対数正規分布に近い粒度分布となった。目標平均粒径 15 μm と 30 μm の試料では平均粒径と比較して小さ

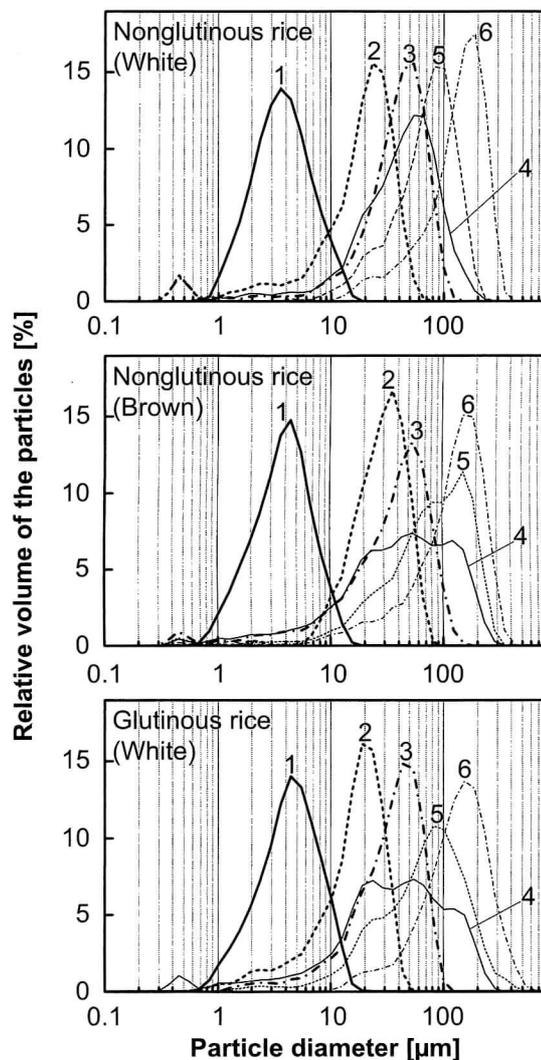


Fig. 3 Particle size distributions of the rice flour. The mills used for the sample preparation and the target mean diameters of the samples: 1, jet mill, 3 μm ; 2, jet mill, 15 μm ; 3, jet mill, 30 μm ; 4, hammer mill, 30 μm ; 5, hammer mill, 60 μm ; 6, hammer mill, 100 μm .

な粒径の粒子が若干みられたのに対して、目標平均粒径 $3\ \mu\text{m}$ の試料では粒度が揃っていた。粒径 $15\ \mu\text{m}$ と $30\ \mu\text{m}$ の試料では粉碎された粒子がさらに衝突した際に角から小片が取れることにより微粉が発生したが、粒径 $3\ \mu\text{m}$ の試料の粉碎時には本研究で用いたジェットミルの気流速度では粉碎された粒子がさらに衝突した場合においても角が取れなかった、もしくは粒子の角は取れているが小片の粒度が小さすぎたため試料容器に捕集されなかったなどの理由が考えられる。ハンマーミルで粉碎された試料は目標平均粒径が小さくなるにしたがい粒度分布が広がった。ハンマーミルではスクリーン孔径を小さくすると粒子の粉碎室内における平均滞留時間が長くなり、粉碎された粒子の一部がさらに粉碎を受け微粒化することにより平均粒径が小さくなると考えられる。また本実験で用いたハンマーミルは分級機能を有していないため、平均粒径が小さくなるにしたがい粒度分布が広がったと考えられる。粉碎により得られた試料の平均粒径は全て目標値 $\pm 15\%$ 以内であった。

上新粉の平均粒径は $135\ \mu\text{m}$ であり、試料体積の 90% が $75\sim 228\ \mu\text{m}$ の間に分布しており、比較的粒子径の均一性は高かった。小麦粉の平均粒径は $49\ \mu\text{m}$ であり、粒度分布には約 $30\ \mu\text{m}$ と $100\ \mu\text{m}$ に2つのピークがみられた。小麦粉試料体積の 90% の分布範囲は $10\sim 141\ \mu\text{m}$ であった。

3.3 試料の水分

米粉試料の原料となった米の水分はウルチ米（精米）、

ウルチ米（玄米）およびモチ米でそれぞれ、 16.1% 、 15.4% 、 15.2% であった。粉碎された米粉の水分を Fig. 4 に示す。ジェットミルおよびハンマーミルともに米粉の平均粒径が小さくなるにしたがい、水分が低下することが明らかになった。ハンマーミルによる粉碎においては米粉の温度が上昇したことによって米粉の水分が蒸発したと考えられる。米粉の平均粒径が小さくなるにしたがい、粉碎機内部における米粉の滞留時間が長くなり、より水分が蒸発したと考えられる。ジェットミル粉碎においては、粉碎気流生成に用いた空気がコンプレッサで圧縮される際にある程度除湿されていたため (10°C における相対湿度 100% 以下)、粉碎中に米粉が乾燥したと考えられる。ジェットミル粉碎においても、米粉の平均粒径が小さくなるにしたがい米粉が粉碎機内部に滞留する時間は長くなり水分が低下したと考えられる。また、平均粒径約 $30\ \mu\text{m}$ の米粉の水分に着目すると、ハンマーミルで粉碎された米粉の水分がジェットミルで粉碎されたものと比較して低くなった。

3.4 Carr の流動性指数測定結果

3.4.1 試料の圧縮度

試料の圧縮度を Fig. 5 に示す。平均粒径が小さくなるにしたがい米粉の圧縮度は高くなる傾向がみられた。圧縮度の算出に用いたためかさ密度は、平均粒径 $100\ \mu\text{m}$ の精米粉では約 $0.55\ \text{g}/\text{cm}^3$ 、玄米粉では $0.45\ \text{g}/\text{cm}^3$ であったものが、平均平均粒径 $3\ \mu\text{m}$ の米粉では $0.20\sim 0.23\ \text{g}/\text{cm}^3$ となった。試料平均粒径の対数とゆ

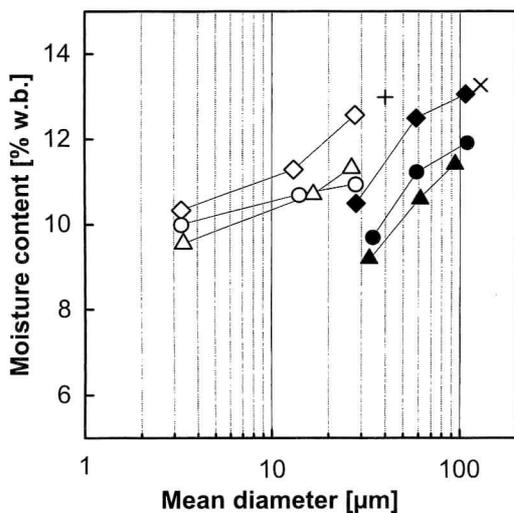


Fig. 4 Moisture content and the mean diameter of the rice flours, *joshinko* (×), and wheat flour (+). The ingredients and the milling methods of the rice flour: ○, nonglutinous rice (white), jet mill; ●, nonglutinous rice (white), hammer mill; △, nonglutinous rice (brown), jet mill; ▲, nonglutinous rice (brown), hammer mill; ◇, glutinous rice (white), jet mill; ◆, glutinous rice (white), hammer mill.

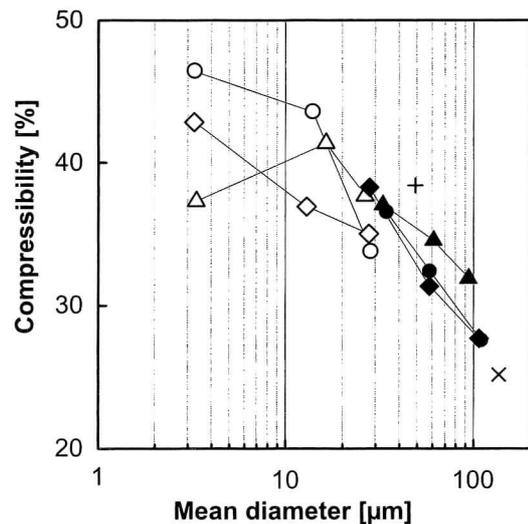


Fig. 5 Compressibility and the mean diameter of the rice flours, *joshinko*, and wheat flour. Symbols are same as those in Fig. 4.

るめカサ密度の関係はほぼ線形であった。固めカサ密度についても同様に、試料の平均粒径が小さくなるにしたがい小さくなる傾向がみられた。平均粒径 $3\ \mu\text{m}$ のウルチ米玄米粉については比較的圧縮度が小さかった。平均粒径 $30\ \mu\text{m}$ の試料においては、粉碎方法の違いによる圧縮度の差は、最も大きかったモチ米の精米で 3.2% (Carr の流動性指数換算で 2.5 点) であり、粉碎方法の違いによる米粉の圧縮度に大きな違いはみられなかった。

3.4.2 試料の安息角

試料の安息角を Fig. 6 に示す。試料の平均粒径が小さくなるにしたがい安息角が大きくなり、試料の流動性が低くなる傾向にあることが示されたが、平均粒径が $3\ \mu\text{m}$ の試料については平均粒径 $15\ \mu\text{m}$ の試料と比較して安息角の増加が小さく、とくにウルチ玄米粉においては安息角が減少した。平均粒径 $30\ \mu\text{m}$ の試料に着目すると、ハンマーミルで粉碎された試料がジェットミルで粉碎された試料より安息角が大きく、粉碎方法が米粉の流動性に影響を与えていることが示唆された。

3.4.3 試料のスパチュラ角

試料のスパチュラ角を Fig. 7 に示す。スパチュラ角は一般的に安息角より大きくなるとされているが [8]、本研究においてもこの傾向が確認された。スパチュラ角の試料平均粒径、粉碎方法による変化は安息角とほぼ同様の傾向を示した。ウルチ玄米粉のスパチュラ角が精米粉と比較して大きく、また平均粒径が $3\ \mu\text{m}$ の試料のスパチュラ角が平均粒径 $15\ \mu\text{m}$ の試料と比較して小さくなった点も安息角と同様であった。

3.4.4 試料の均一度および凝集度

試料の均一度を Fig. 8 に示す。ハンマーミルにより

粉碎された試料は平均粒径が小さくなるにしたがい均一度が大きくなる傾向がみられ、ジェットミルにより粉碎された試料は平均粒径が小さくなるにしたがい均一度が小さくなる傾向がみられた。この理由としては前述の節「3.2 試料の粒度分布」にて述べたとおり、粉碎機の粒度調整原理の違いおよび分級機構の有無によるものと考えられる。本研究で用いた試料の均一度は小さい物で 2.6、大きい物で 8.0 であったが、Carr の流動性指数に換算すると 20~23 点となり、試料間に大きな違いはみられなかった。平均粒径 $3\ \mu\text{m}$ および $15\ \mu\text{m}$ の試料の凝集度は 85~99% であり、Carr の流動性指数に換算すると全て 0 点であった。この結果から、均一

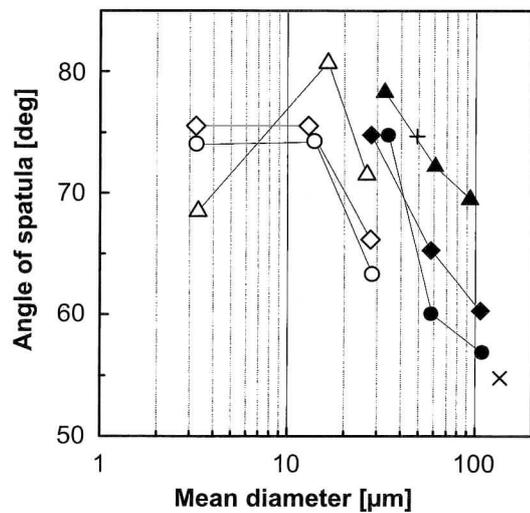


Fig. 7 Angle of spatula and the mean diameter of the rice flours, *joshinko*, and wheat flour. Symbols are same as those in Fig. 4.

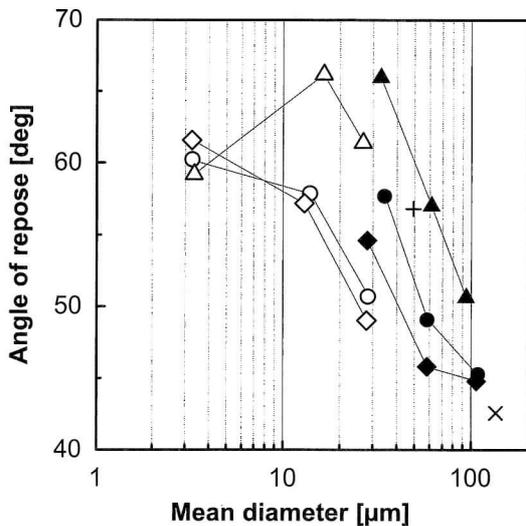


Fig. 6 Angle of repose and the mean diameter of the rice flours, *joshinko*, and wheat flour. Symbols are same as those in Fig. 4.

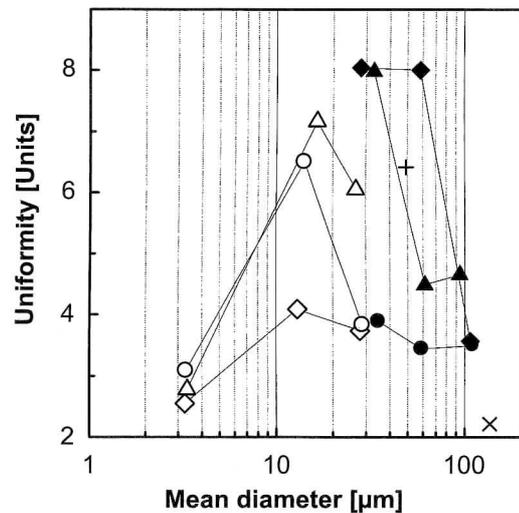


Fig. 8 Uniformity and the mean diameter of the rice flours, *joshinko*, and wheat flour. Symbols are same as those in Fig. 4.

度を用いた場合と凝集度を用いた場合では, Carr の流動性指数の計算結果に大きな違いが生じることが確認された. すなわち, 均一度を用いて計算された流動性指数と凝集度を用いて計算された流動性指数を直接比較することはできず, 文献などに記載された流動性指数を参照する際には, その値が均一度あるいは凝集度のいずれを用いて計算されたものであるのか確認する必要があるといえる.

3.4.5 試料の流動性指数

試料の流動性指数を Fig. 9 に示す. 試料の平均粒径が $15\ \mu\text{m}$ までは小さくなるにしたがい試料の流動性が低下したが, 試料の平均粒径が $15\ \mu\text{m}$ 以下になると流動性の低下は顕著ではなく, とくにウルチ米玄米粉においては流動性が向上した. 平均粒径 $3\ \mu\text{m}$ の試料においては電子顕微鏡などによる観察の結果, 球形に凝集した粒子塊が平均粒径 $15\ \mu\text{m}$ 以上の試料と比較して多く認められたことから, 本研究で用いた試料においては微粒化により粒子の凝集性が極めて高くなり安定した凝集粒子塊を形成するようになったと考えられた. またその結果, 平均粒径 $3\ \mu\text{m}$ の試料は凝集粒子塊単位で挙動するようになり, 平均粒径 $15\ \mu\text{m}$ の試料と同等の流動性を示したと推測される. ウルチ米玄米粉については精米粉と比較して全体的に流動性が低かった. 粉体試料が油分を含むと粒子の付着性が増加し流動性が低下するとされることから [17], ウルチ米玄米粉においては糠由来の油分を含む粒子により試料の付着性が増加したため流動性が低くなったと考えられる. しかしながら平均粒径 $3\ \mu\text{m}$ になるとウルチ米玄米粉の流動性は平均粒径 $15\ \mu\text{m}$ の試料と比較して高くなった. 平均粒径 $15\ \mu\text{m}$ 以上の玄米粉試料においては試料容器

などへの強い付着性がみられたが, 平均粒径 $3\ \mu\text{m}$ の玄米粉試料においては試料容器などへの強い付着はみられなかったことから, 玄米粉試料においては微粒化により何らかの原因で試料が付着性を失ったと考えられる. 平均粒径 $3\ \mu\text{m}$ 程度の微粒化より糠に含まれる油分などが付着性を失う程度に変質することは考えにくいことから, この付着性低下の原因としては微粒化により糠由来の粒子の周囲を心白由来の粒子が包む形の凝集粒子塊が形成され付着性が隠蔽された, あるいは微粒化により糠由来の粒子が試料捕集用サイクロンに捕集されにくくなり試料中の糠由来粒子の割合が低下したことなどが仮説として考えられる. 今後, 凝集粒子塊の構造およびジェットミルの試料捕集用サイクロンからの排気中に含まれる粒子の成分などについて調査することによりこれらの仮説が検証されると期待される. 平均粒径 $30\ \mu\text{m}$ の試料に着目するとジェットミルにより粉碎された試料の流動性がハンマーミルにより粉碎された試料と比較して高かった.

本研究で調製した米粉試料は平均粒径および粉碎方法により水分が異なっていた. 粉体の流動性は水分によって変化するとされ, 生物由来の材料においては一般的に水分が増加すると流動性が低下するといわれている [18-20]. 本研究で調製した試料においては平均粒径が小さくなるにしたがい流動性が低下したが, 水分は増加せずむしろ減少した. またハンマーミルで粉碎された試料においてもジェットミルで粉碎された試料と比較して流動性が低かったが水分は低かった. したがって Fig. 9 に示した米粉試料の平均粒径による流動性の変化は, 水分の影響によるものである可能性は低いと考えられる.

参考として流動性指数を測定した上新粉に着目すると, 同程度の平均粒径をもった精米粉と流動性はほぼ等しかったが, 上新粉は精米を原料とすることからこの結果は当然といえる. 一方, 小麦粉に着目すると同程度の平均粒径をもった精米粉よりは流動性が低く, 玄米粉とほぼ同程度の流動性をもつとみなせた. これは小麦粉および精米粉の粒子の付着性および粒度分布などの違いによるものと考えられる. 平均粒径 $30\ \mu\text{m}$ 以下に粉碎された試料に着目すると, 上新粉と比較して極めて流動性が低いが, 小麦粉と比較すると流動性に大きな違いは無いことがわかる. このことから, 従来上新粉などを原料として用いていた食品加工機械に微粉碎された米粉を代替原料として用いる場合, 粉体の架橋などの問題が発生する可能性が高いといえるが, 小麦粉を原料として用いていた食品加工機械に対して微粉碎された米粉を代替原料として用いる場合には新たに対策を施す必要性は低いといえる.

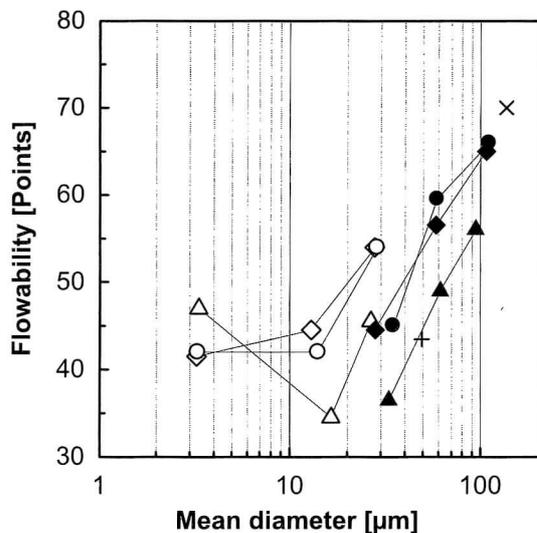


Fig. 9 Flowability and the mean diameter of the rice flours, *joshinko*, and wheat flour. Symbols are same as those in Fig. 4.

3.5 Carr の噴流性指数測定結果

3.5.1 試料の崩壊角および差角

試料の差角はおおよそ2~9度の間であり、平均粒径が小さくなるにしたがい差角が大きくなる傾向がみられた。測定された試料の差角をCarrの噴流性指数に換算すると3~8点であり、平均粒径が小さい試料ほど高い点数となった。粉碎方法による試料の差角の違いはみられなかった。試料の崩壊角は平均粒径が小さくなるにしたがい大きくなったが、安息角と比較すると平均粒径による崩壊角の違いは小さかった。測定された試料の崩壊角をCarrの噴流性指数に換算すると、精米粉試料においては6.3~14.5点、玄米粉試料においては3~12点となり平均粒径が大きい試料ほど高い点数となった。

3.5.2 試料の分散度

試料の分散度をFig. 10に示す。試料の分散度は精米粉試料については平均粒径が小さくなるにしたがい大きくなる傾向がみられ、平均粒径が15 μm の試料において最も高くなった。測定された分散度をCarrの噴流性指数に換算すると12~25点であった。玄米粉試料の分散度は精米粉と比較して小さい、平均粒径と分散度の間には明確な関係はみられなかった。平均粒径30 μm の試料に着目すると、試料の粉碎方法による分散度の大きな違いはみられなかった。微粉碎された精米粉については発塵性が強いいため、分散させないように取り扱う必要があるといえる。

3.5.3 試料の噴流性指数

試料の噴流性指数をFig. 11に示す。精米粉試料においては平均粒径による噴流性指数の変化は流動性指数と比較して小さかった。これは精米粉試料においては、平均粒径が大きくなるにしたがい流動性指数の噴流性

指数への寄与が大きくなったが、差角および分散度については試料の平均粒径が大きくなるにしたがい噴流性指数への寄与が小さくなったためである。玄米粉試料については試料平均粒径が小さくなるにしたがい噴流性指数も小さくなる傾向がみられたが、平均粒径3 μm の試料については流動性指数が高かったことから噴流性指数も他の平均粒径の玄米粉試料と比較して高い値となった。

本研究で得られた試料の噴流性指数は、精米粉試料および上新粉についてはCarr[8]によれば「噴流する傾向があり、ロータリーシールを用いることが望ましい」とされ、玄米粉試料および小麦粉については「噴流することもあり、場合によってはロータリーシールが必要になることもある」とされているが、微粉碎された米粉を用いる場合に必要なシールなどの対策は、従来上新粉あるいは小麦粉を用いてきた食品加工機械に施されたもので十分であると考えられる。

3.6 試料の表面粗度

電子顕微鏡にて撮影されたウルチ米精米粉の写真をFig. 12に、また撮影された写真を解析して得られた試料粒子の表面粗度をFig. 13に示す。Fig. 12およびFig. 13よりジェットミルにて粉碎された試料およびハンマーミルにて粉碎された試料のいずれにおいても平均粒径が大きい試料ほど粒子に角がみられ、平均粒径が小さい試料ほど粒子が丸みを帯びてくること明らかになった。これは試料の平均粒径が小さくなるにしたがい試料の粉碎機内部における滞留時間が長くなり、試料粒子の衝突回数が増え粒子の角が離脱したためと考えられる。

一般的に角がある粒子より球に近い形の粒子の流動

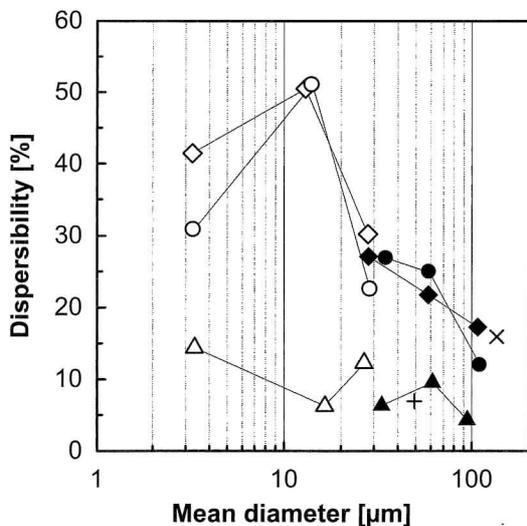


Fig. 10 Dispersibility and the mean diameter of the rice flours, *joshinko*, and wheat flour. Symbols are same as those in Fig. 4.

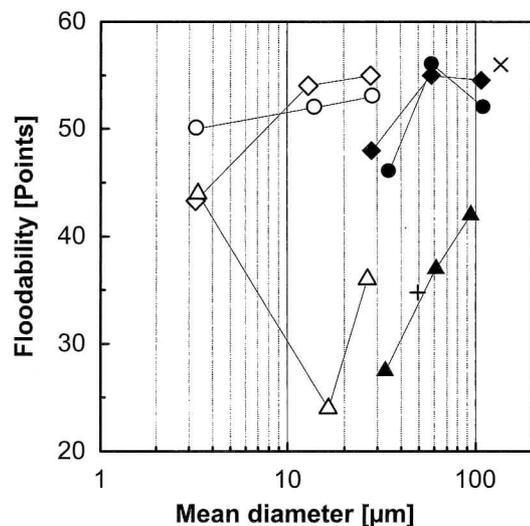


Fig. 11 Floodability and the mean diameter of the rice flours, *joshinko*, and wheat flour. Symbols are same as those in Fig. 4.

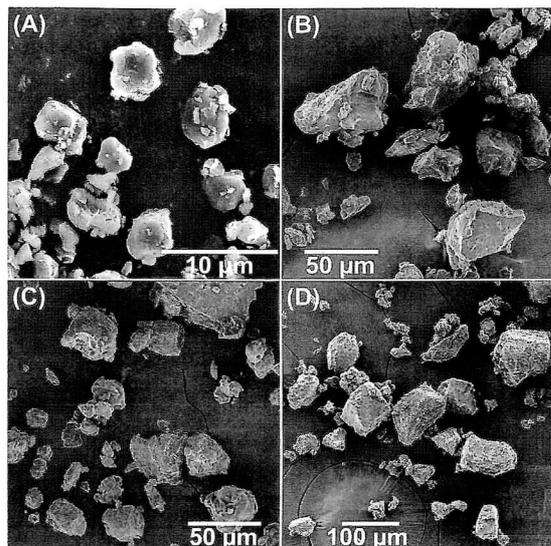


Fig. 12 Photographs of the particles of the nonglutinous rice (white) flour. The milling method and the target mean diameter of the samples: (A), jet mill, 3 μm ; (B), jet mill 30 μm ; (C), hammer mill, 30 μm ; (D), hammer mill, 100 μm .

性が高いとされているが [16], 本研究で調製した米粉試料については試料の平均粒径が小さくなるにしたがい表面粗度が小さくなったにも関わらず流動性が低くなった。すなわち本研究で調製した試料においては粒子形状および粒子表面粗度より, 平均粒径によってほぼ決定される試料の比表面積およびかさ密度などがむしろ試料の流動性に対して支配的な要素であったと考えられる。また平均粒径 30 μm の試料に着目すると, 表面粗度はハンマーミルにて粉碎された試料がジェットミルにて粉碎された試料と比較して小さかったが, 流動性はジェットミルで粉碎された試料が高かった。試料の水分についてもハンマーミルにて粉碎された試料がジェットミルにて粉碎された試料より低かったことから, ハンマーミルにて粉碎された試料の流動性が低くなった原因としては, ハンマーミルにて粉碎された試料の粒度分布が僅かではあるもののジェットミルにて粉碎された試料より広がったことなどが考えられる。また, ハンマーミルを用いた食品素材の粉碎においては粉体の温度が上昇することにより品質が変化することが指摘されていることから [21], 本研究においてハンマーミルにて調製した試料においても温度上昇などにより何らかの変性が生じ, 粒子の付着性などが増加することにより流動性が低下した可能性も考えられる。

4. 結 論

本研究では微粉碎された米粉を食品の加工・製造に用いる際に, 食品加工機械に起こりうる問題を予測す

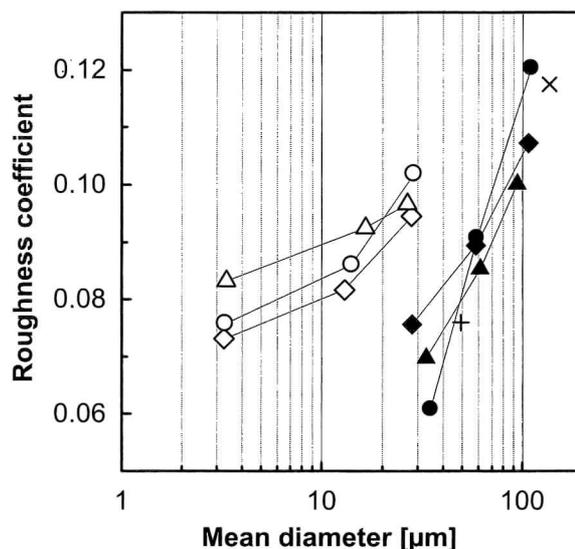


Fig. 13 Roughness coefficient and the mean diameter of the rice flours, *joshinko*, and wheat flour. Symbols are same as those in Fig. 4.

るため, 気流式粉碎機であるジェットミルにより平均粒径 3~30 μm , 衝撃式粉碎機であるハンマーミルにより平均粒径 30~100 μm のウルチ精米および玄米, ならびにモチ米精米を原料とした米粉試料を調製し, Carr の流動性指数および噴流性指数測定を行った。平均粒径 30 μm 以下に微粉碎された米粉を用いる場合, 従来用いられてきた米粉である上新粉などを扱うために設計された機械においては粉体の架橋などの問題が発生する可能性があり, 機械内部における粉体の付着防止などの対策の必要性が高いことが示された。一方, 小麦粉を扱うために設計された機械にて, 小麦粉の代替原料として微粉碎された米粉を用いる場合においては新たに対策を追加する必要性は低いことが示された。試料の噴流性指数測定の結果からは, 上新粉あるいは小麦粉を従来扱ってきた機械に対して新たにシールを施す必要性は低いといえるが, 平均粒径 15 μm 以下の精米粉については分散度が非常に高いことから, 粉体からの発塵に対して注意を要するといえる。

本研究で調製した米粉においては平均粒径が 15 μm までは小さくなるにしたがい水分および表面粗度が低下したものの流動性が低下したが, これは水分あるいは表面粗度よりもむしろ平均粒径によってほぼ決定される粉体の比表面積およびかさ密度などの流動性に対する影響が強かったためと結論付けられた。平均粒径が 3 μm の精米粉試料においては平均粒径 15 μm の試料と比較して流動性の低下は小さく, また平均粒径 3 μm の玄米粉試料については流動性が向上した。この理由としては微粒化された試料においては安定した球形の凝集粒子隕が形成され, 平均粒径 15 μm の試料に

近い挙動を示したことが考えられた。また平均粒径 $3\ \mu\text{m}$ の玄米粉試料において流動性が向上した理由としては、微粉碎により糠由来粒子が心白由来粒子に包まれた凝集粒子塊が形成された、あるいは糠由来粒子が粉碎、分級、捕集の過程で試料から取り除かれたことなどが仮説として挙げられた。ハンマーミルにて粉碎された試料はジェットミルにて粉碎された試料と比較して流動性が低かったが、この理由としてはハンマーミルで粉碎された試料の粒度分布の幅が広がったこと、またハンマーミルによる粉碎時に試料が高温に晒され変性したことなどが挙げられた。微粒化された米粉の流動性の向上および粉碎方法による米粉の流動性の違いの詳細な理由については、調製された米粉試料に対して今後化学的な分析などを行うことにより解明されると期待される。

謝 辞

粉体物性測定においては、株式会社セイシン企業原弘毅氏より多くの貴重なご助言を頂いた。ここに記して謝意を表す。なお本研究は、農林水産省ナノスケール食品素材の加工および評価技術の開発により行われた。ここに記して関係各位に謝意を表す。

引 用 文 献

- 1) K. Yoza, M. Okabe, J. Shima; Present state and issues of rice powder utilization : rice bread (in Japanese), J. Jpn. Soc. Food Sci. Technol., **55**, 444-454 (2008).
- 2) R. S. Kadan, R. J. Bryant, J. A. Miller; Effects of milling on functional properties of rice flour. J. Food. Sci., **73**, 151-154 (2008).
- 3) J. J. Fitzpatrick, T. Iqbal, C. Delaney, T. Twomey, M. K. Keogh; Effect of powder properties and storage conditions on the flowability of milk powders with different fat content. J. Food Eng., **64**, 435-444 (2004).
- 4) E. Teunou, J. J. Fitzpatrick, E. C. Synnott; Characterisation of food powder flowability. J. Food Eng., **39**, 31-37 (1999).
- 5) J. J. Fitzpatrick, S. A. Barringer, T. Iqbal; Flow property measurement of food powders and sensitivity of Jenike's hopper design methodology to the measured values. J. Food Eng., **61**, 399-405 (2004).
- 6) O. O. Fasina; Flow and physical properties of switchgrass, peanut hull, and poultry litter. T. ASABE, **49**, 721-728 (2006).
- 7) N. Jinapong, M. Suphantharika, P. Jamnong; Production of instant soymilk powders by ultrafiltration, spray drying and fluidized bed agglomeration. J. Food Eng., **84**, 194-205 (2008).
- 8) R. L. Carr, Jr.; Evaluating flow properties of solids. Chem. Eng.-New York, **18**, 163-168 (1965).
- 9) M. Sugihara, T. Uesugi; Flowability index of powder (Funmatsu no ryudousei ni tsuite). Journal of the Nippon Hospital Pharmacists Association, **1**, 49-52 (1975).
- 10) K. Danjo, K. Kinoshita, K. Kitagawa, K. Iida, H. Sunada, A. Otsuka; Effect of particle shape on the compaction and flow properties of powders. Chem. Pharm. Bull., **37**, 3070-3073 (1989).
- 11) Y. Endo, M. Alonso; An estimate of hopper outlet size and slope for mass flow from the flowability index. Trans. IChemE Part A: Chem. Eng. Res. Des., **80**, 625-630 (2002).
- 12) S. Okuda; "Pulverization, Plant operation series No. 1, revised edition (Kaitei, Funsai, Kojo sosa shirizu No. 1)", T. Hara ed., Kagaku kogyo sha, 1972, pp.53-65.
- 13) T. Honma, M. Hasegawa, M. Kuriyama, T. Ohkubo; Studies on impact jet pulverization using a pneumatic ejector (in Japanese). Bull. Yamagata Univ. (Eng.), **18**, 79-88 (1985).
- 14) S. Yamada; "Food engineering handbook 1st ed. (Shokuhin kougaku handobukku dai)", Japan Society for Food Engineering ed., Asakura shoten, 2006, pp.75-78.
- 15) S. Hatano, H. Mori, N. Asai; "Illustrated guide to the front line of powder technology (Zusetsu funtai gijutsu saizensen)", Kogyochosakai, 2003, pp.121-127.
- 16) R. Ehrlich, B. Weinberg; An exact method for characterization of grain shape. J. Sediment. Petrol., **40**, 205-212 (1970).
- 17) C. I. Onwulata, R. P. Konstance, V. H. Holsinger; Properties of single- and double- encapsulated butteroil powders. J. Food Sci., **63**, 100-103 (1998).
- 18) M. Peleg, C. H. Mannheim, N. Passy; Flow properties of some food powders. J. Food Sci., **38**, 959-964 (1973).
- 19) Y. Zou, G. H. Brusewitz; Flowability of uncompacted marigold powder as affected by moisture content. J. Food Eng., **55**, 165-171 (2002).
- 20) J. J. Fitzpatrick; Particle properties and the design of solid food particle processing operations. Trans. IChemE Part C: Food Bioprod. Process., **85**, 308-314 (2007).
- 21) H. B. Sowbhagya, S. R. Sampathu, N. Krishnamurthy; Evaluation of size reduction on the yield and quality of celery seed oil. J. Food Eng., **80**, 1255-1260 (2007).

要 旨

微粉碎により米粉の利用方法の拡大が期待されるが、微粉碎された米粉は流動性が低下し食品加工機械を用いる際に問題を生じる事が予測される。微粉碎された米粉を用いる際に食品加工機械に対して必要となる対策を予測するため、ウルチ米精米および玄米ならびにモチ米精

米を原料として用い, 平均粒径 $3\sim 30\ \mu\text{m}$ の試料をジェットミルで, $30\sim 100\ \mu\text{m}$ の試料をハンマーミルにて調製し, 試料調製時の温度, 調製後の水分, Carrの流動性指数および噴流性指数, ならびに表面粗度の測定を行った. 試料の平均粒径が小さくなるにしたがい水分および表面粗度は低下したが, 試料の流動性は平

均粒径が $15\ \mu\text{m}$ までは小さくなるにしたがい低下し, 平均粒径が $3\ \mu\text{m}$ になると精米粉では流動性は変化せず玄米粉では流動性が向上した. 平均粒径 $30\ \mu\text{m}$ 以下の米粉試料の流動性は, 伝統的な米粉の一種である上新粉と比較すると低く, 小麦粉と比較すると同程度であった.