九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

段階式小麦製粉における中間産物の粒度分布関数

関，竜司
九州大学農学部農産機械工学講座

村田，敏
九州大学農学部農産機械工学講座

https://doi.org/10.15017/23571

出版情報：九州大學農學部學藝雜誌. 50 (3/4), pp.179-186, 1996-03. 九州大學農學部
バージョン：
権利関係：

九大農学芸誌（Sci. Bull. Fac. Agr., Kyushu Univ.）
第50巻　第3・4号　179-186（1996）

段階式小麦製粉における中間産物の粒度分布関数

関　竜司・村田　敏
九州大学農学部農産機械工学講座
（1995年12月18日受理）

Particle Size Distribution Functions of Intermediate Products in Gradual Reduction Flour Milling

Ryuji SEKI and Satoshi MURATA
Agricultural Process Engineering, Faculty of Agriculture,
Kyushu University, Fukuoka 812-81

緒　言

粒径の関数で表される粒度分布の数式化はYu（1990）の報告にもあるように，従来様々な方法が考案されてきた．しかし製粉工程生成物についての粒度分布の数式化の報告は見当たらない．これは，製粉工程生成物が質的に皮部と胚乳部の混合物であり，また，段階式工程により分離と混合を繰り返すため，様々なタイプの粒度分布を持つ工程生成物が混在するためである．即ち，篩分後も混合後も理論的に同じ形式の粒度分布関数で表現することが極めて困難なためである．例えば，ある篩分前の工程産物の粒度分布を表現したRosin-Rammler式には，篩分後の1つの分画の粒度分布を適合できない．このように篩による分離と混合の過程で，粒度分布関数の性質が異なることは不都合である．

小麦製粉の方法として現在一般的である段階式製粉法（図1）において，各工程への入力産物の粒度分布の変化は直ちに出力産物の粒度分布の変化として現れ，連鎖反応的に下段へ伝わって行く．入力産物の粒度分布の変動要因は様々であるが，小麦が農産物であり均質な「物質」でないだけにしばしば生じる問題である．そのため，製粉工程の設計や操作を行う上で，各工程生成物の粒度分布の変動特性を把握しておくことが極めて重要である．ここで入力産物の諸要素の変動に起因する出力生成物の粒度分布の変動特性を定量化するには，入力要素をパラメータとした出力産物の粒度分布を表わす式を定義する必要がある．

これまでに多くの製粉技術者がこの数式化に取り組んできたが，粒度分布の取り扱いの困難さのため実現されていない．元来，均質の粒状物質の粒度分布に関してさえ，多くの因子が含まれているためこれを完全に表現することは困難であると言われている（三輪，1972）．よって，さらに多くの因子が複雑に含まれている製粉工程生成物の粒度分布を完全に表現することは極めて難しい．そのため製粉工程の設計や操作のほとんどは，結局現場の経験のみにより行われているのが現状である．

製粉以外の分野では，微粉炭・セメント・肥料等の化学工業分野において粒度分布を取り扱った工程産物性状の数式化の報告が散見される．例えばRuban *et al.*（1987）は統計的手法を用いて，キルン焼成工程各帯の産物の粒度分布に及ぼす工程操作の影響を研究し，焼成工程の最適調節の規則を誘導した．また，Meguri *et al.*（1989）は特定の粉砕速度・粒度分布・分級性能をパラメータとした粉砕モデルを用い，工業規模ボールミルの挙動を予測する手法を開発した．

関ら（1995）はこれまでに，工程生成物の3つの性状変動の代表的な要因であると考えられる5つの代表的な入力要素を選定し，各工程生成物毎にこれらの入力要素をパラメータとした各性状値を表わす式を導出した．3つの性状とは①篩分による各フラクションの分配比，②組成，③粒度である．また，5つの要因とは，①原料調質状態の変動，②粉砕機のロール間隙の人為的な操作，③プロセスへの流入産物量の変動，④プロセスへの流入産物の組成の変動，⑤プロセスへの

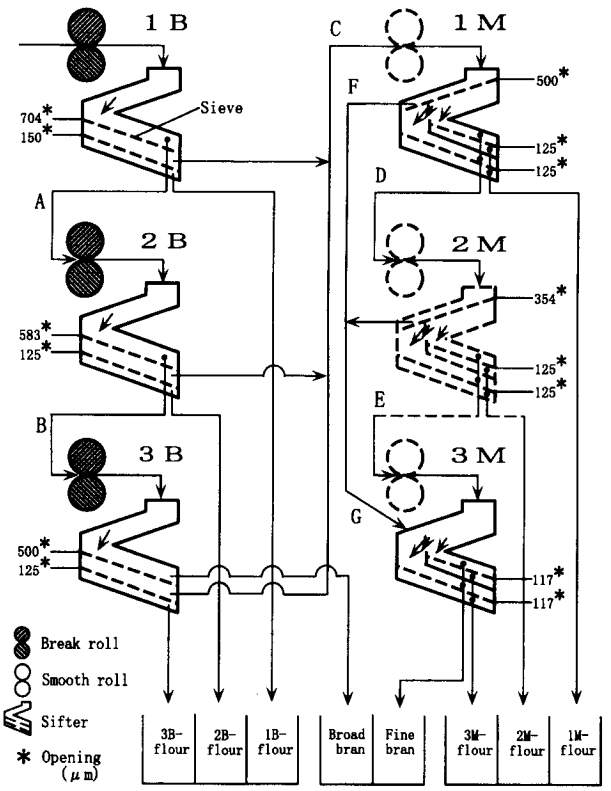

図1　Bühler社製テスト製粉用製粉機の仕組み

流入産物の粒度の変動である．

また関ら（1996）はこの算出式を用い，テスト製粉用製粉機での挽砕・篩分を対象とした流量変動シミュレーション手法を考案した．

本研究ではこの流量変動シミュレーション手法をさらに発展させ，工業的実ラインを対象とした汎用的なものとするために，以下の事項に関して新たに検討した．即ち，(1) 工程生成物の灰分値をパラメータとして用いる．(2) 篩目開きをパラメータの1つに加え，分配比を行先毎でなく一元的に表現する式とする（図2）．

これらの検討の結果，粒度分布を考慮した粒度分布関数モデルを新規に考案した．そしてテスト製粉用製粉機を用いて調質状態の異なる小麦についてそれぞれ挽砕実験を行い，その測定データをこのモデルに最小二乗法を適用して当てはめ，各工程生成物毎の粒度分布関数を導出した．

本研究の実験を行うにあたり，日清製粉（株）生産技術研究所の小久保健三氏に協力を得た．また，日清

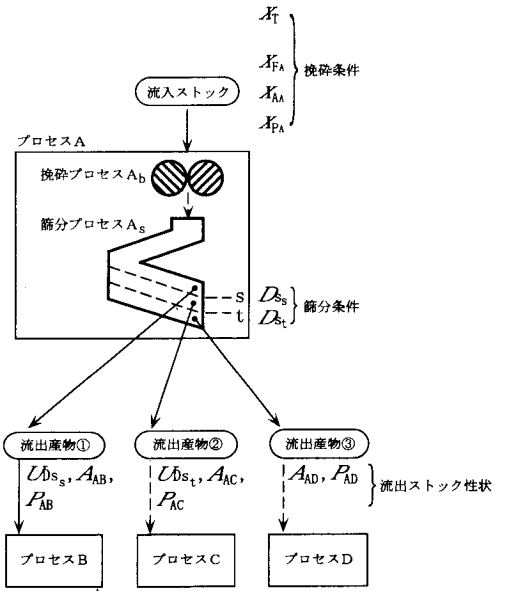

図2　本報で用いた製粉工程の挽砕・篩分条件

表1 原料小麦の物性値

銘柄	水分 (%)	灰分 (%)	粗蛋白量 (%)	容積重 (g/l)	千粒重 (g)	硝子率 (%)
2CW注)	12.34	1,563	13.43	779	33.2	82

注) カナダ穀物法 (Canada Grain Act) の輸出標準規格によるマニトバ小麦の名称CW (Canada Western Red Spring Wheat) の第2等級 (No. 2) 銘柄

表2 テンパリング時間と加水後含水率

	テンパリング時間(h)		
	一次	二次	加水後含水率(%)
実験①	23	0.5	16.0
実験②	23	0.5	16.1
実験③	23	0.5	16.4
実験④	11	0.5	16.1
実験⑤	11	0.5	15.7
実験⑥	11	0.5	16.3
実験⑦	5	0.5	15.9
実験⑧	5	0.5	16.2
実験⑨	5	0.5	16.4

表3 ロール間隙の実測値 (μm)

ロール間隙 (μm)					
1B	2B	3B	1M	2M	3M
470	100	65	50	50	40

製粉 (株) 鶴見工場の石井裕憲氏より実験試料の提供を受けた．記して謝意を表する．

実験方法及び結果

粒度分布関数の導出に用いる実測データを得るために，テスト製粉用ロール式製粉機を用い，原料小麦の調質条件を3段階に変えてそれぞれ3回，計9回の挽砕・篩分試験を行った．それぞれの試験において，各粉砕工程毎の産物の産出流量，粒度分布，平均粒子径，灰分を測定した．

1．供試材料

供試した小麦は1994年に収穫されたカナダ産ウェスタンレッドスプリング (2CW) で，性状等は表1に示した．

本実験では，調質状態の変動を1次テンパリング時間の違いで代替することとした．即ち，試料には目標含水率を16.0%に定めて1次加水を施し，3種類の1次テンパリング時間を経た後2次加水を施して，さらに2次テンパリングを経てから実験に供試した．1次テンパリング時間はそれぞれ23，11，5時間，2次テンパリング時間は0.5時間とした．表2に各試料の加水後実測含水率を示した．

2．製粉機

実験に用いたテスト製粉用ロール式製粉機 (Bühler社製 Laboratory Flour Mill) の概略図を図1に示した．本製粉機は，3対の目立てロールと3対の滑面ロールに篩が組み合わされたものであり，小麦粒を挽砕し6種の小麦粉及び2種のふすまに分離する．挽砕時間は1kg当たり15～30分が標準である．

3．挽砕条件

製粉機の各ロール間隙は標準的な設定で行なった．表3にロール間隙の実測値を示した．挽砕時間は1kg当たり15分とし，1回の実験に使用する試料は約10kgとした．各々の調質条件につき3回，合計9回の挽砕を行なうこととした．

4．分析法

(1) 流量

製粉機の運転開始後，各最終産物の産出量が安定してから，まずそれらの単位時間あたりの産出量を測定した．次に図1のA～Gの経路においてG，F，E，D，C，B，Aの順に単位時間あたりの産物流量を測定した．即ち下流の経路から測定することにより，産物採取時に生ずる下流の流量変動が測定値に反映することを避けた．

(2) 粒度分布

流量測定時に採取した各産物の粒度分布をロータップシェーカーを用いた篩い分けによって求めた．篩はJISの標準篩を用い，MPIF・ASTMの方法にて測定した．

(3) 平均粒子径

粒度分布の測定結果を用い，各産物の平均粒子径を算出した．平均粒子径は50%粒子径 (重量積算分布の50%に対する粒子径) で表した．

表4　1Bプロセスにおける測定結果

	U								X_T	X_F
Ds	2000	1680	1410	1180	1000	840	704	150		
実験①	29.34	38.65	47.10	52.09	55.84	60.81	68.35	94.65	23	47.95
実験②	29.93	38.90	46.94	51.77	55.70	60.58	67.75	94.34	23	48.59
実験③	28.79	37.97	46.23	51.07	55.40	60.28	67.27	95.20	23	47.25
実験④	31.25	40.54	47.58	51.92	55.09	59.49	65.54	95.23	11	51.39
実験⑤	30.41	39.64	48.27	53.34	57.39	62.40	69.08	94.93	11	48.58
実験⑥	32.94	42.79	51.42	56.54	60.88	66.20	72.98	94.75	11	47.30
実験⑦	30.41	39.64	47.83	52.57	56.46	61.22	68.07	94.88	5	48.18
実験⑧	31.95	40.73	48.74	53.41	57.35	62.23	68.92	95.04	5	47.04
実験⑨	29.90	38.94	46.88	51.76	55.82	60.66	67.35	94.39	5	47.18

(4) 灰分

直接灰化法（食料庁，1989）で測定した．

(5) 水分

挽砕直前の供試材料の水分値を，MOISTURE-AIR-OVEN METHODS（AACC，1975）で測定した．

5．測定結果

3段階の1次テンパリング時間にて調質した原料を用いて行なった9回の挽砕・篩分において，各工程生成物の流量・粒度分布・灰分を測定した．表4に，一例として1Bプロセスにおける測定結果を示した．

粒度分布関数の導出及び考察

1．粒度分布関数モデル

図3は，図2のプロセスAからの出力産物の粒度分布構成の変動の模式図である．産物は目開き D_{Ss}，D_{St} の篩により3つに分別されてB，C，Dの各プロセスに向かう．各プロセス行きの産物流量の分配比は，各篩目開き D_{Ss}，D_{St} において区切られた各領域の面積比で表わされる．変動前のプロセスAからプロセスB，C，Dへの分配比は，

10：50：40

であり，変動後の分配比は，

5：45：50

である．これらを積算篩上重量（%）U で表わすと，変動前は

$U_{Ds_s} = 40$

$U_{Ds_t} = 90$

変動後は

$U_{Ds_s} = 50$

$U_{Ds_t} = 95$

となる．

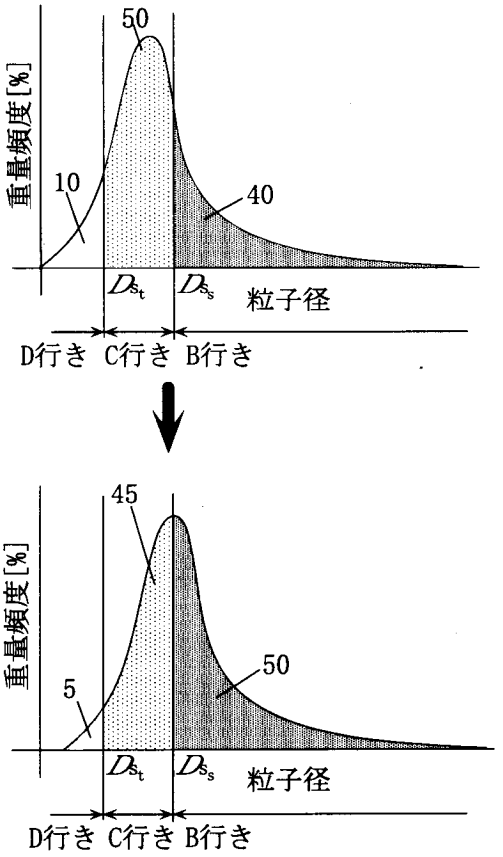

図3　粒度分布変動の模式図

ここで，各工程産物の粒度分布構成を積算篩上重量（%）U で表わす関数モデルを考える．

今回求める粒度分布関数における種々のパラメータは線形でなければならない．それは今回の解析のよう

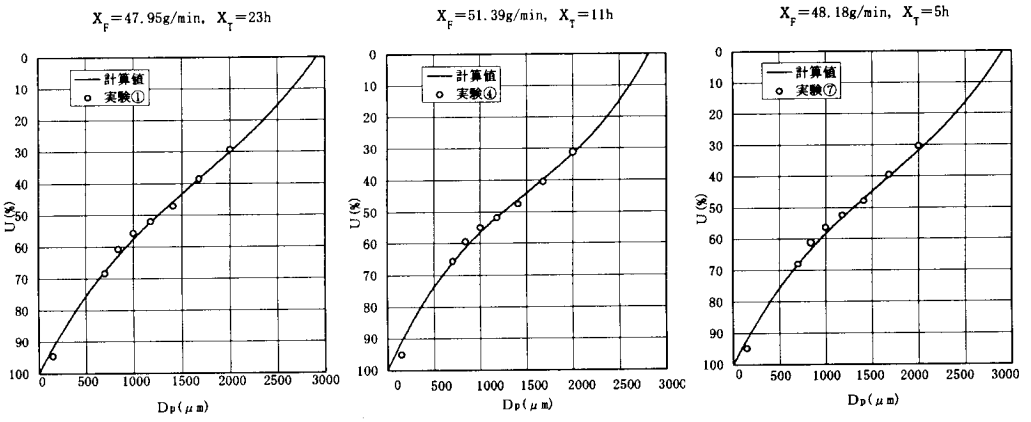

図4　1B プロセス産物の粒度分布曲線

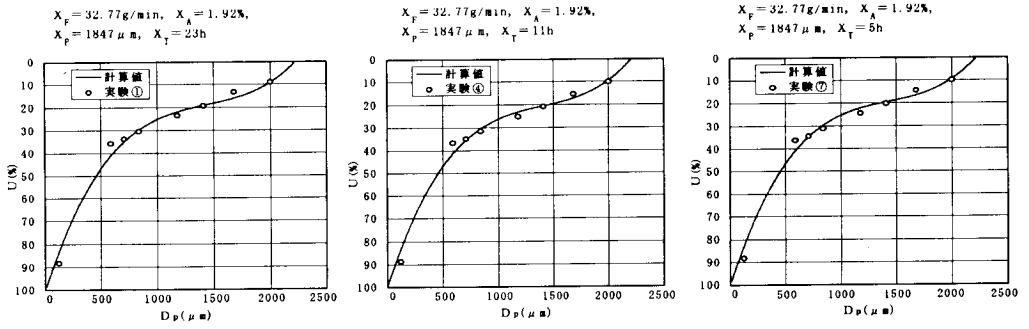

図5　2B プロセス産物の粒度分布曲線

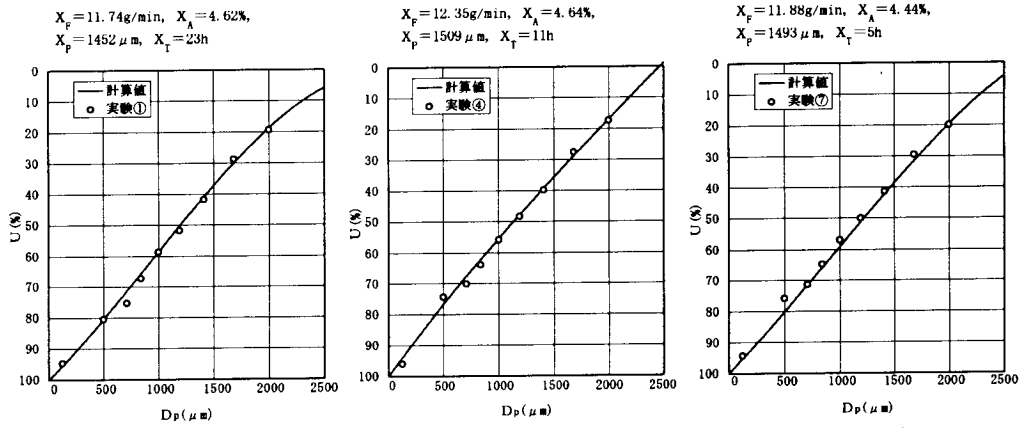

図6　3B プロセス産物の粒度分布曲線

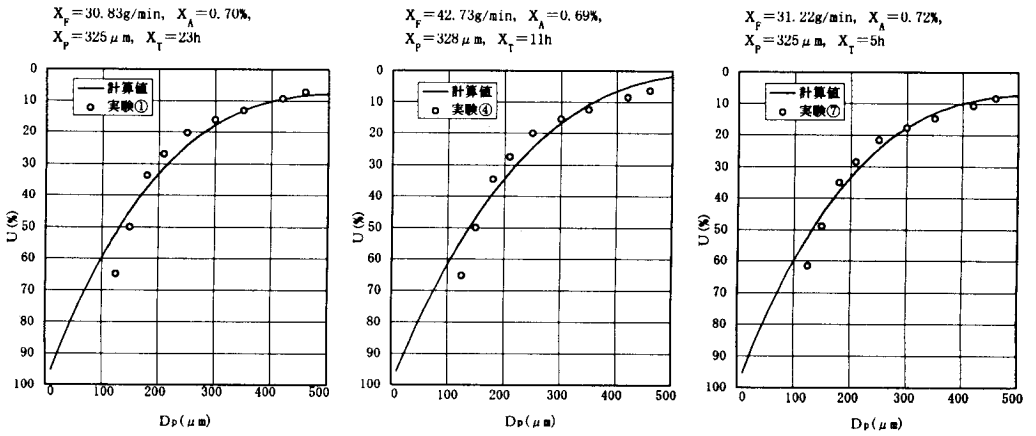

図7　1Mプロセス産物の粒度分布曲線

に多くのパラメータを必要とする場合には，非線形では最小二乗法による解析が不可能になってしまうからである．

ところで，関数型で和と差が同じ関数型になるのは多項式のみである．即ち，今回求める粒度分布関数は粒度に関する多項式でなければならないし，その係数はパラメータに関して線形である必要がある．

このような理由で今回の解析では D_p に関する3次多項式を用い，その係数を入力産物性状を表すパラメータの線形式として U を表すこととした．このような表現は，粒度分布関数の簡略な表現を基本思想としたGaudin-Schuhmann式の拡張とも考えられる．勿論，多項式は次数が高いほど適合性は高いと考えられるが，今回の場合は3次式で充分であると判断した（図4～7）．

入力産物性状は入力産物の量（F），入力産物の灰分（A），入力産物の平均粒子径（P），原料の1次テンパリング時間（T）とした．U はパーセンテージであり，最大値が100であるので，

$Y=100-U$ として

$$Y=d_p\{(\alpha_1X_F+\alpha_2X_A+\alpha_3X_P+\alpha_4X_T+\alpha_5)d_p^2+(\alpha_6X_F+\alpha_7X_A+\alpha_8X_P+\alpha_9X_T+\alpha_{10})d_p+(\alpha_{11}X_F+\alpha_{12}X_A+\alpha_{13}X_P+\alpha_{14}X_T+\alpha_{15})\} \quad (1)$$

と表される．

2．粒度分布関数の導出方法

式（1）を構造式として計測データを最小二乗法によってあてはめ，15個のパラメータの係数 α_1～α_{15} を決定した．

最小二乗式

$$G=\Sigma[D_{p_i}\{(\alpha_1X_{F_i}+\alpha_2X_{A_i}+\alpha_3X_{P_i}+\alpha_4X_{T_i}+\alpha_5)D_{p_i}^2+(\alpha_6X_{F_i}+\alpha_7X_{A_i}+\alpha_8X_{P_i}+\alpha_9X_{T_i}+\alpha_{10})D_{p_i}+(\alpha_{11}X_{F_i}+\alpha_{12}X_{A_i}+\alpha_{13}X_{P_i}+\alpha_{14}X_{T_i}+\alpha_{15})\}-Y_i]^2 \quad (2)$$

を α_1 で偏微分し，$\dfrac{\partial G}{\partial \alpha_1}=0$ と置けば

$$(\Sigma D_{p_i}^6X_{F_i}^2)\alpha_1+(\Sigma D_{p_i}^6X_{F_i}X_{A_i})\alpha_2+(\Sigma D_{p_i}^6X_{F_i}X_{P_i})\alpha_3+(\Sigma D_{p_i}^6X_{F_i}X_{T_i})\alpha_4+(\Sigma D_{p_i}^6X_{F_i})\alpha_5+(\Sigma D_{p_i}^5X_{F_i}^2)\alpha_6+(\Sigma D_{p_i}^5X_{F_i}X_{A_i})\alpha_7+(\Sigma D_{p_i}^5X_{F_i}X_{P_i})\alpha_8+(\Sigma D_{p_i}^5X_{F_i}X_{T_i})\alpha_9+(\Sigma D_{p_i}^5X_{F_i})\alpha_{10}+(\Sigma D_{p_i}^4X_{F_i}^2)\alpha_{11}+(\Sigma D_{p_i}^4X_{F_i}X_{A_i})\alpha_{12}+(\Sigma D_{p_i}^4X_{F_i}X_{P_i})\alpha_{13}+(\Sigma D_{p_i}^4X_{F_i}X_{T_i})\alpha_{14}+(\Sigma D_{p_i}^4X_{F_i})\alpha_{15}=(\Sigma D_{p_i}^3X_{F_i}Y_i) \quad (3)$$

となる．この方程式は

$$B_{1,1}\alpha_1+B_{1,2}\alpha_2+B_{1,3}\alpha_3+B_{1,4}\alpha_4+B_{1,5}\alpha_5+B_{1,6}\alpha_6+B_{1,7}\alpha_7+B_{1,8}\alpha_8+B_{1,9}\alpha_9+B_{1,10}\alpha_{10}+B_{1,11}\alpha_{11}+B_{1,12}\alpha_{12}+B_{1,13}\alpha_{13}+B_{1,14}\alpha_{14}+B_{1,15}\alpha_{15}=C_1 \quad (4)$$

と表わせる．同様にして15個の連立方程式が出来る．これらの方程式をガウス法で解いた．

コンピュータによる数値計算において，$B_{j,k}$ が対称であり，また，重複していることに着目し

$d_{p_i}=X(6,I)$, $F_i=X(1,I)$,
$A_i=X(2,I)$, $P_i=X(3,I)$,
$T_i=X(4,I)$, $X(5,I)=1$,

表5　粒度分布関数のパラメータ

パラメータ	係数	工程 1B	2B	3B	1M	2M	3M
X_F	α_1	6.3058×10^{-10}	5.3641×10^{-11}	2.6705×10^{-9}	-2.2909×10^{-8}	-4.7826×10^{-4}	1.6839×10^{-7}
	α_6	-2.4340×10^{-6}	-1.0876×10^{-6}	-8.5451×10^{-6}	1.3823×10^{-5}	2.9823×10^{-2}	-2.0075×10^{-4}
	α_{11}	2.2858×10^{-3}	2.1914×10^{-3}	5.9050×10^{-3}	-1.1976×10^{-3}	-4.8262×10^{-1}	7.3775×10^{-2}
X_A	α_2	——	5.5221×10^{-9}	3.3934×10^{-9}	-5.5696×10^{-6}	-4.4154×10^{-3}	-4.8578×10^{-6}
	α_7	——	-1.4092×10^{-5}	-1.7214×10^{-5}	3.7419×10^{-3}	2.2720×10^{-1}	4.6248×10^{-3}
	α_{12}	——	7.0849×10^{-3}	2.5334×10^{-2}	-4.8500×10^{-1}	-2.2402	-1.2683
X_P	α_3	——	-1.7103×10^{-12}	4.4648×10^{-11}	-5.3923×10^{-8}	4.9637×10^{-5}	3.2893×10^{-9}
	α_8	——	1.5909×10^{-8}	-1.7126×10^{-7}	4.5561×10^{-5}	-2.9501×10^{-3}	-2.4249×10^{-6}
	α_{13}	——	-2.8495×10^{-5}	1.9142×10^{-4}	-9.6053×10^{-3}	3.8939×10^{-2}	-6.0057×10^{-5}
X_T	α_4	-1.9050×10^{-11}	-3.0460×10^{-11}	6.8000×10^{-12}	-9.9019×10^{-9}	-2.3669×10^{-5}	-2.1422×10^{-9}
	α_9	4.4691×10^{-8}	1.3377×10^{-7}	-4.5632×10^{-8}	-7.1423×10^{-6}	-1.4882×10^{-3}	3.129×10^{-6}
	α_{14}	3.2913×10^{-5}	-1.4246×10^{-4}	1.0401×10^{-4}	1.0624×10^{-3}	2.3000×10^{-2}	-1.3836×10^{-3}
切片	α_5	-2.6227×10^{-8}	1.3861×10^{-8}	-1.1552×10^{-7}	2.1885×10^{-5}	6.2413×10^{-3}	9.7258×10^{-6}
	α_{10}	9.7419×10^{-5}	-6.6334×10^{-5}	4.3930×10^{-4}	-1.8204×10^{-2}	-4.595×10^{-1}	-9.2948×10^{-3}
	α_{15}	-5.3152×10^{-2}	1.1958×10^{-1}	-4.3149×10^{-1}	3.9072	12.085	2.7124

$$U_i=100-Y(I)$$

と置いた．これにより，$B_{j,k}$，C_j はそれぞれ

$$B(J,K)=\Sigma(X(6,I)^{L1+L6}\cdot X(L_2,I)\cdot X(L_3,I)) \quad (5)$$

$$C(J)=\Sigma(X(6,I)^{L6}\cdot Y(I)\cdot X(L_2,I)) \quad (6)$$

と表わせるので，これを利用した繰り返し計算プログラムで α_i を決定することとする．ただし

$1\leqq J\leqq 5$　なら　$L_6=3$　$L_2=J$
$6\leqq J\leqq 10$　なら　$L_6=2$　$L_2=J-5$
$11\leqq J\leqq 15$　なら　$L_6=1$　$L_2=J-10$
$1\leqq K\leqq 5$　なら　$L_1=3$　$L_3=K$
$6\leqq K\leqq 10$　なら　$L_1=2$　$L_3=K-5$
$11\leqq K\leqq 15$　なら　$L_1=1$　$L_3=K-10$

である．

3．粒度分布関数の導出結果

導出された各工程産物の粒度分布関数のパラメータを表5に示した．また，1B～1M 挽砕工程の出力産物の粒度分布関数による曲線と，実験①④⑦におけるデータのプロットを図4～7に示した．

要　　約

テスト製粉用製粉機を用いて行なった挽砕・篩分試験により，段階式製粉工程における各工程産物毎の粒度分布関数を導出した．以下，その結果を列挙する．

1）段階式製粉工程における中間産物の粒度分布関数に適応する関数モデルを検討した結果，係数がパラメータに関して線形である，粒度に関する3次多項式が最適であることを明確にした．

2）工程入力産物の各性状要素をパラメータとした，工程出力産物の粒度分布を表わす式構造を定義した．

3）テスト製粉用製粉機を用いた挽砕・篩分試験により，工程入力産物の各性状要素及び工程出力産物の粒度分布を測定した．

4）ガウス法を用いた最小二乗近似により，計測データを粒度分布モデルにあてはめ，各工程産物毎の粒度分布関数を決定した．その適合性は良好であった．

以上，段階式小麦製粉工程の流量変動シミュレーション手法を考える上で有用となる，各工程産物毎の粒度分布関数の導出手法について述べた．

記　　号

D_p　：粒子径（μm）
D_{s_s}　：篩 s の目開き（μm）
D_{s_t}　：篩 t の目開き（μm）
$U_{D_{s_s}}$：篩目開き D_{s_s} における積算篩上重量（%）
$U_{D_{s_t}}$：篩目開き D_{s_t} における積算篩上重量（%）
U_{ij}　：工程 i からの出力全量に対する工程 j 行き産物

の積算篩上重量（%）

A_{ij} ：工程 i から工程 j 行き産物の灰分（%）

P_{ij} ：工程 i から工程 j 行き産物の平均粒子径（μm）

X_{F_i} ：工程 i への入力産物の量（g/min）

X_{A_i} ：工程 i への入力産物の灰分（%）

X_{P_i} ：工程 i への入力産物の平均粒子径（μm）

X_T ：調質試料の 1 次テンパリング時間（h）

文　献

AACC 1975 *AACC Method* AACC (U.S.A)

Meguri, N. and T. Hasegawa 1989 The development of a ring mill simulation model. *KONA*, **7**: 50-58

三輪茂雄 1972 粉粒体工学. 朝倉書店, 東京

Ruban, A. B. and W. I. Schbin 1987 Mathematical basis for the control of clinker burning with optimized kiln feed particle size. *Verfahr. tech Zem*, 566-569

関 竜司・村田 敏・広瀬孝志 1995 小麦製粉工程における流量変動の伝播に関する研究（第 1 報）. 農機誌, **57**(6): 115-124

関 竜司・村田 敏・広瀬孝志 1996 小麦製粉工程における流量変動の伝播に関する研究（第 2 報）. 農機誌, **58**(1): 81-86

食料庁 1989 標準計測方法. 食料庁, 東京

Yu, A. B. 1990 N. Standish A study of particle size distributions. *Powder Tecnol.*, **62**: 101-118

Summary

This paper presents a method by which the particle size distribution functions of the product in each stage of a gradual reduction milling process can be introduced. The particle size distribution functions were introduced by which the particle size distribution data of the product in each stage on several milling tests at three levels of grain conditioning were fitted to the particle size distribution function model using each milling condition as parameters by applying a least squares method. They represent the relation between the fluctuation of each milling condition in milling process and the fluctuation of organization of the particle size distribution of the product in each stage.

The purpose of the introduction of them is the establishment of the interchangeable calculating method of intermediate products amount on the actual industrial processes.