

## 上昇気流による粳と玄米の選別

上出 順一・土屋 功位\*  
(山形大学農学部農業機械学研究室・\*山形大学名誉教授)  
(平成元年9月1日受理)

### Separation of Paddy and Brown Rice in a Vertical Stream

Junichi KAMIDE and Masanori TSUCHIYA\*  
Laboratory of Agricultural Machinery, Faculty of Agriculture,  
Yamagata University, Tsuruoka 997, Japan  
\*Professor emeritus, Yamagata University  
(Received September 1, 1989)

#### Summary

The authors have explored on the possibility of the separation of paddy and brown rice in a vertical air stream. Some experiments were carried out by a batch and a continuous feed system.

The pneumatic separation of grains are caused by the difference of these terminal velocity. The separating performance was affected by the ratio of grain to air, and by the behavior of grain in a vertical air column, therefore the separating efficiency increased, as the column height increased and the feed rate decreased. The separating efficiency had a maximum at the air velocity of about 6~6.5 m/s, which was the middle value of the both terminal velocity of paddy and brown rice.

The collecting percentage of brown rice decreased as air velocity increased, especially over the air velocity for maximum efficiency.

The choice of air velocity was critical in attempting to reconcile the conflicting requirements for the both maximum brown rice collection and minimum paddy content in the product.

The free air stream velocity distribution cross the column at the height of feeder was determined on 21 points, and the deviation was in the range of 7~8% on each system.

In a large sacle experiment system, the best performance was 25 kg/h in brown rice collection with the prechamber type, and the power requirement was about 200 W in various system.

#### I 緒 論

我国の米穀検査規格によると、玄米中に許容される粳の混入率は0.3%であり、このため、収穫調製において粳と玄米の選別は最も重要な作業の一つとなっている。

粳と玄米の選別に利用される因子には、①大きさ、②形状、③比重、④表面の性質などがあり<sup>1)</sup>、これらの性質を利用した数々の選別機が考案、実用化されている。なかでも万石は古くから利用され、全自動粳摺り機の一部として発達してきた。万石は一種の傾斜ふるいである

が、これは単に粒の大きさによる選別ではなく、粒体の流動態による摩擦係数および比重差による粳と玄米の分離作用を利用したものである<sup>2)</sup>。万石は広く用いられているが、摺り米の性状に応じて流量や網の傾斜度などの微妙な調節が必要であり、使用に当たってかなりの経験や熟練を要することが一つの欠点である。なお、最近、万石網に揺動機構を取り付け小型で調節が容易な揺動万石が利用されるようになった<sup>3)</sup>。

万石に代わって大型粳摺機に利用されているものに揺動選別機がある。これは粳と玄米の表面粗滑と比重差

を利用して分離するもので、粒子群に揺動運動を与えると流動的に動き、比重の軽いものは浮上してくる偏析現象を利用している<sup>4)</sup>。

以上のように、粳、玄米の選別だけでも様々な方式がとられているが、本研究では上昇気流を利用して粳と玄米の選別を試みたものである。気流を利用した選別機は各粒子の形状、表面性質等による空気抵抗の違いから、気流中に投入された粒子の飛行距離の差や、終末速度の差を利用するものである。なかでも飛行距離の差を利用した選別機として古くから唐箕があり、種々の穀粒を対象に稈皮や塵埃の除去、完全粒と不完全粒の選別などに用いられ、単体としてばかりでなく動力脱穀機や動力粳摺機に組み込まれて使用されている。しかし、唐箕は本来粳と玄米の選別を目的としたものではない。また、縦型風路による穀粒選別の研究も若干あるが<sup>5-8)</sup>、これらも粳と玄米の分離を目的としたものでない。

筆者等はこれまで、穀粒の終末速度、管内における穀粒群の分散状態など気流選別に関わる諸因子について基礎的研究を行なうとともに、水平風による粳と玄米の選別について報告した<sup>9,10)</sup>。本研究もこれらの研究の一環としてなされたもので、上昇気流による粳と玄米の選別における諸要因について実験を行ない、選別の可能性について検討したものである。

なお、本研究は農業機械学会第41, 43, 44回年次大会において発表したものである。

## II 上昇気流による穀粒選別の原理

上昇気流中に粒子を投入すると、気流の上昇速度より

も大きい終末（浮遊）速度をもつ粒子は気流に逆らって落下し、一方終末速度の小さい粒子は気流に乗って上昇し、両者は分離する。一般に粳の終末速度は玄米より小さいから、両者の終末速度の差を利用し、上昇気流によって粳と玄米の選別が可能である。

気流選別においては後述のように乱流域にあるので、気流中の物体は Newton 則に従う抵抗を受けるから、物体の終末速度  $V_t$  は次式で表わされる。

$$V_t = \sqrt{\frac{2gM}{CA\rho_a} \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_p}\right)} \quad (1)$$

ここで M: 物体の質量

C: 抵抗係数

A: 物体の投影面積

$\rho_a$ : 空気密度

$\rho_p$ : 物体の密度

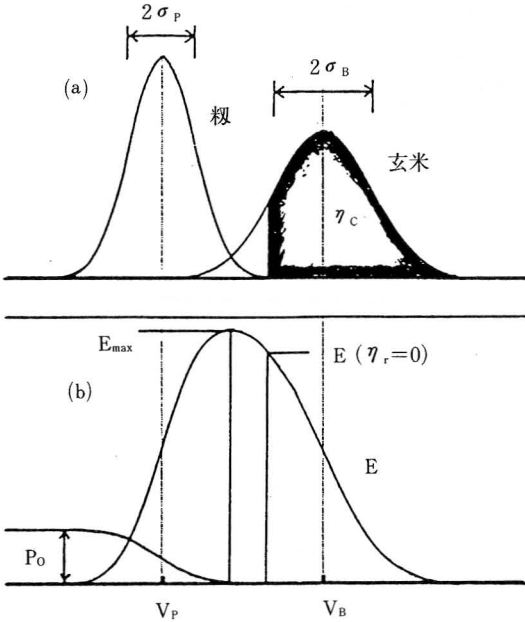
g: 重力加速度

上式から明らかなように、終末速度には物体の形状、大きさ、密度、表面状態など物理的性質が影響する。とくに粳や玄米は不整形な楕円体であるので、浮遊（飛行）中の姿勢によって C や A 値は変化し、終末速度も変わってくる<sup>10)</sup>。また、終末速度は気流中の粒子の割合、濃度によっても変わり、穀粒濃度が高いと終末速度は小さくなる<sup>9)</sup>。

粳及び玄米の終末速度の測定例を表一に示す。両者ともよく充実したものほど終末速度は大きい。表中の区分番号の同じものは稈実は同程度とみなされるものであるが、粳と玄米では 0.6~1 m/s 程度の差がある。また、米粒の粒厚、粒重は品種や生産年の気象的要因などに

表一 粳・玄米のディメンション及び終末速度

| 区分 | 粒重<br>(mg) | 粒厚<br>(mm) | 比重<br>(-) | 含水率<br>(%WB) | 終末速度<br>(m/s) cv |            | 備考 |
|----|------------|------------|-----------|--------------|------------------|------------|----|
| 玄米 | ①          | 24.8       | 2.0~2.2   | 1.42         | 15.6             | 6.67 0.017 | 良1 |
|    | ②          | 20.0       | 1.8~2.2   | 1.41         | 15.8             | 6.32 0.011 | 良2 |
|    | ③          | 15.2       | 1.8~2.0   | 1.34         | 16.0             | 5.82 0.022 | 青活 |
|    | ④          | 12.4       | 1.6~1.8   | 1.29         | 15.7             | 5.24 0.028 | 青死 |
| 粳  | ①          | 30.3       | 2.2~      | 1.21         | 14.4             | 5.80 0.018 |    |
|    | ②          | 25.0       | 2.2~      | 1.19         | 14.4             | 5.74 0.024 |    |
|    | ③          | 20.3       | 2.0~2.2   | 1.08         | 14.5             | 5.17 0.036 |    |
|    | ④          | 15.7       | 1.8~2.2   | 0.89         | 14.2             | 4.40 0.025 |    |



図—1 選別原理の概念図

よっても異なるが、その頻度分布はほぼ正規分布するから、終末速度も正規分布するとみなすことができる。

いま、粳混合比 ( $P_0/B_0 = \alpha_0$ ) の混合米を風速  $V$  の上昇気流で粳と玄米を分離する場合を考える。粳及び玄米の平均終末速度を  $V_p$  及び  $V_B$ 、標準偏差を  $\sigma_p$  及び  $\sigma_B$  とする終末速度は図—1 (a) の如くそれぞれ正規分布するから、変域  $V$  における  $-\infty \sim V$  での累加相対密度は次式で表わされる。そして、 $V$  より大きい終末速度をもつ穀粒は玄米口に、小さい穀粒は粳口へ排出される。

$$\text{粳: } F_p(v) = \int_{-\infty}^v \frac{1}{\sigma_p \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(v-v_p)^2}{2\sigma_p^2}} \quad (2)$$

$$\text{玄米: } F_B(v) = \int_{-\infty}^v \frac{1}{\sigma_B \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(v-v_B)^2}{2\sigma_B^2}} \quad (3)$$

玄米を単位量にとると、上式から玄米回収率、粳残存率および選別効率はそれぞれ次式で表わされる。

$$\eta_c = 1 - F_B \quad (4)$$

$$\eta_r = 1 - F_p \quad (5)$$

$$E = F_p - F_B \quad (6)$$

上述の関係から明らかなように、選別効率は図—1 (b) の曲線で示され、粳および玄米の両終末速度曲線の交点の風速で選別効率は最大になる。また、図から粳残

存率  $\eta_r = 0$  の風速は最大選別効率の風速よりも大きくなるのがわかる。

### 2. 選別性能の評価法

粳と玄米の混合物を選別する場合、理想的には玄米回収口には玄米だけが、粳回収口には粳だけが排出されることがのぞましい。選別操作によって得られた結果に対してどの程度の選別が行なわれたかを数値的に表現する方法として種々の指標が提案されているが<sup>(11)</sup>、ここでは Newton の選別効率 ( $E$ )、玄米回収率 ( $\eta_c$ )、粳残存率 ( $\eta_r$ )、粳混入率 ( $\eta_p$ )、粳除去率 ( $\eta_f$ ) 等の指標によって選別の良否を評価した。

供試混合米中の粳及び玄米を  $P_0$  及び  $B_0$ 、玄米口に排出された粳及び玄米をそれぞれ  $P$ 、 $B$  とすると次式で定義される。

$$\eta_c = \frac{B}{B_0} \quad (7)$$

$$\eta_r = \frac{P}{P_0} \quad (8)$$

$$\eta_p = \frac{P}{B+P} \quad (9)$$

$$\eta_f = 1 - \frac{P}{P_0} \quad (10)$$

$$E = \eta_c - \eta_r \quad (11)$$

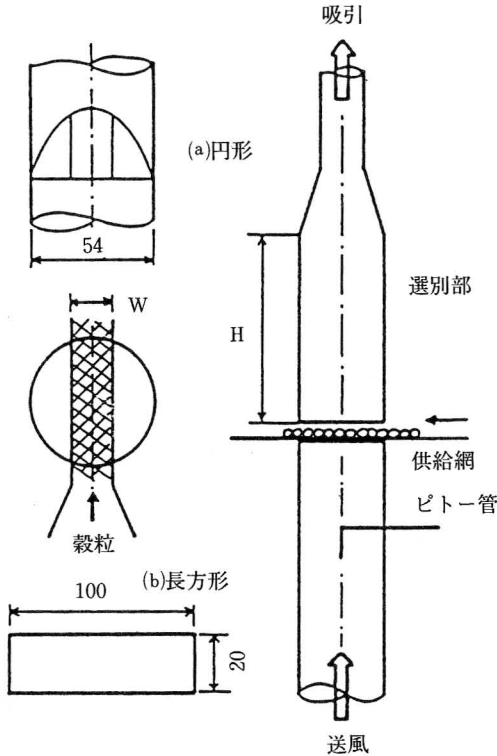
理想的な選別では  $\eta_c = 1$ 、 $\eta_r = 0$ 、 $E = 1$  となる。

## III 回分式装置による基礎実験

### 1. 実験装置及び実験方法

#### (1) 実験装置

実験装置の主要部は上昇気流を通す縦型風路で、選別部には断面が円形 (54 mm  $\phi$ ) 及び長方形 (100 mm  $\times$  20 mm) の透明アクリル管を使用した。概要を図—2 に示す。選別部は上部管と下部管からなり、試料は両管の間隙から後述する試料供給用の網にのせて上昇気流中に投入される。送風は電気掃除機 (松下電気 K K 製, MC-400 WD) を使用しておこなった。選別部の通風状態を一様にするため、上部管は送風機の吸い込み口に、下部管は吐出口にフレキシブルパイプによって接続して気流を循環させた。このため、試料供給口 (間隙) からの空気の出入りは認められなかった。風路内を気流に乗って上昇した粳が確実に気流に捕捉され、粳口に回収するため、上部管の上部を断面積が  $1/2$  になるように徐々に絞り込んだ。したがって、試料供給網上から管断面が漸減するまでの風路が選別部 (室) となる。実験は選別部長  $H$  を 6~90 cm の間で種々変えておこなった。



図一 2 実験装置要部(回分式)

(2) 風速測定

風速は内径 2mm のピトー管とエチルアルコール内封の傾斜差動マノメータによって測定した。ピトー管は選別部の下部に接続される円形通風管の中心位置に取り付けた。したがって、測定される風速は管内の最大風速である。風速の調節はスライダックによって送風機出力を変化させて行なった。マノメータの読みから一定条件での風速を設定し、実験終了後に実験中に継続測定した気温、湿度、気圧、送風温度及び選別部の断面積によって風速を補正した。なお、図表等では風速は選別部の平均風速で表わした。送風温度は通風管のピトー管近傍でサーミスタ温度計によって測定した。実験は風速 5~8 m/s の範囲で行なわれ、レイノルズ数は  $Re = 2 \sim 3 \times 10^4$  で、気流は乱流域にあるから管内の風速は1/7乗則に従う分布をする<sup>12)</sup>。したがって、中心から r の点の風速は次式で表わされる。

$$V = V_{max} \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/7} \quad (12)$$

ここで  $V_{max}$  : 最大風速  
 $R$  : 管の半径

また管内の平均風速は  $V_m = V_{max}/1.235$  となる。

(3) 供試材料及び供給方法

供試材料は山形大学農学部附属農場産の水稲キヨニシキである。実験では Ro-Tap フルイにより玄米は粒厚 1.8mm 以上、粳は 2.0mm 以上のものを精選して供試した。供試材料の性状を表一 2 に示す。表中の終末速度

表一 2 供試材料の性状

| 区分   | 粒厚 (mm) | 粒重 (mg) | 含水率 (% WB) | 終末速度 (m/s) |
|------|---------|---------|------------|------------|
| 玄米 ① | 1.8~2.0 | 19.9    | 14~15      | 5.6        |
| 玄米 ② | 2.0~    | 23.3    | 14~15      | 6.3        |
| 粳 ①  | 2.0~2.2 | 22.6    | 13~14      | 5.4        |
| 粳 ②  | 2.2~    | 28.6    | 13~14      | 5.8        |

は平均粒重から計算した値である。試料供給用の網は、円形選別管用のものは長さ 550 mm、幅 140 mm、厚さ 5 mm のベニヤ板の中央を長さ 480 mm、幅 54 mm (管内径に等しい) に切り抜き、そこに目開き 1.5 mm のナイロン製網を張ったものである。これに試料のをせ静かに供給口から挿入する。管内周辺部の風速は中央部より小さいので、試料を管中央部の気流に乗せるため直径 2 mm の 2 本の針金を用いて供給幅 W を 25, 20, 15 mm の 3 段階に調節できるようにした。また、長方形選別管用のものはベニヤ板の切り抜き幅を 20 mm とした。円形管の場合に、管内平均風速  $V_m$  を粒子の平均終末速度  $V_t$  に一致させると次式が成立する。

$$V_t = 1.235 V_t \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/7} \quad (13)$$

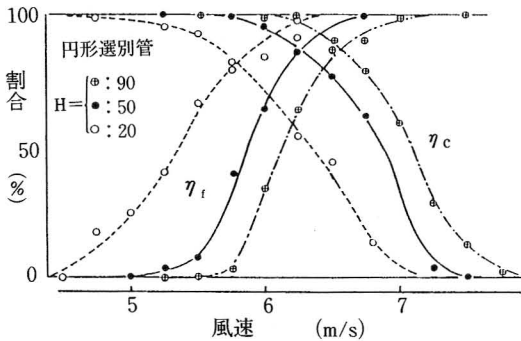
これから、半径  $r = 0.772 R$  での風速は終末速度に等しい。

穀粒が供給網面上に一様に分布している場合、半径 r の外側にある粒子は浮遊しないことになり、その割合はおよそ 40% になる。また、供給網を水平移動する場合、内径 54 φ の円形管では中心線より 20.8 mm 外側の粒子は浮遊しないことになり、その面積は約 23% になる。

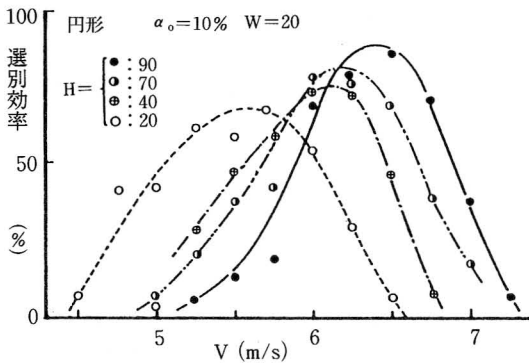
2. 実験結果及び考察

(1) 選別性能に及ぼす風速の影響

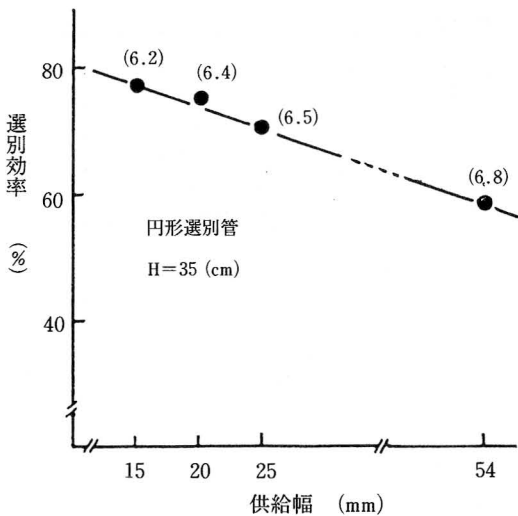
図一 3 は円形選別管において供給幅 20 mm の場合の、風速と玄米回収率及び粳除去率の関係の一例を示し



図—3 風速と玄米回収率及び粳除去率の関係



図—4 風速と選別効率の関係



図—5 供給幅と選別率の関係

速度の小さい粳は玄米よりも小さい風速で浮遊上昇し粳口へ排出されるが、風速を上げると玄米も次第に粳口へ排出されるようになり、供給網に残るものは減少する。粳除去率曲線を上下に反転させたものが粳残存率曲線であるが、粳残存率曲線と玄米回収率曲線は粳と玄米の平均終末速度の隔たりをもって風速に伴って変化している。この隔たりの大きさが選別性能に大きく影響することになる。

選別部長をパラメータとし風速と選別効率の関係を図—4に示す。選別効率は正規曲線ではほぼ近似され、粳と玄米の終末速度の平均風速付近で最大となる。これは図—3に示す玄米回収率と粳除去率の両曲線の交点の風速とはほぼ一致している。両図から明らかなように最大選別効率の風速で必ずしも粳残存率が0とならないことがわかる。選別部の長さによって選別効率、玄米回収率は変化しているが、これについては後述する。

### 2. 試料供給幅が選別効率に及ぼす影響

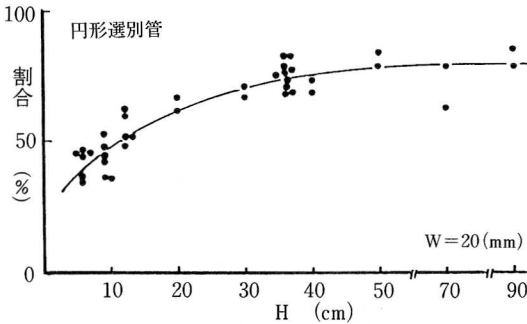
図—5はH=35cmの円形選別管において、供給幅と選別効率の関係を示したものである。供給幅を狭くすることによって選別効率は高くなり、そのピーク点の風速は低くなる。図中の数値は最大選別効率点の風速(m/s)を表わしている。図示したものは粳混合率10%の場合であるが、この傾向は粳混合率を変えた場合も同じであった。前述のように供給幅が小さくなるにつれ粒子は管中央部の気流に乗って上昇し、周囲の低風速の影響を受けないので、供給幅内の穀粒の受ける平均風速は高くなる。一方図中の風速は管全体の平均風速で表わされているから供給幅の違いによって有効風速域の外側に残留する穀粒の量が変化し選別効率に影響を及ぼすことになる。

### 3. 選別部長と選別効率の関係

気流選別の性能を高めるためには、選別部(室)で穀粒がよく分散し穀粒相互の衝突や干渉のないこと、すなわち、穀粒の複雑な運動に対応できる十分な選別空間が必要であると考えられる。図—4によると、選別部が短いと選別効率は低くなり、かつ、そのピークは風速の低い方へ移動する。選別部が短いほど単位容積あたりの穀粒量、すなわち穀粒濃度は高くなり終末速度が小さくなる<sup>10)</sup>ことによるものである。この傾向は長方形管についても同じである。

図—6は円形選別管で供給幅20mmの場合の選別部の長さで最大選別効率の関係を示している。選別部が長くなるにつれて選別効率は増大するが、それは穀粒の分

たものである。図から明らかなように風速が増大するにつれて玄米回収率は減少し、粳除去率は増加する。終末



図一六 選別部長と選別効率の関係

散がよくなり、粒子相互の干渉が少なく安定した選別作用を受けることができるからである。しかし、選別部を一定限度以上に長くしても選別効率の増大効果は小さい。その限界選別長はおよそ 60 cm であった。限界選別長は選別部の断面積や穀粒流量によって異なることが予想されるが、最大選別効率の風速は粳と玄米の単粒の終末速度に近い値を示していることから、管内の穀粒の分散は相互干渉が無視できる程度の単粒状態になっていると考えられる。また、最大選別効率を与える風速は選別部が長くなるにつれて大きくなった。

IV 連続式装置による基礎実験

前項では回分式装置によって気流選別に及ぼす種々の要因について明らかにした。ここでは前項と同規模であるが、試料を連続的に供給できる装置によって実験を行った。

1. 実験装置

実験装置の概要を図一七に示す。Aは選別部の断面が円形(54φ)、Bは長方形(100×20)である。いずれも選別部の下方から送風を行なうとともに上方から吸引し気流は循環する。送風装置は回分式実験と同じものを用いた。試料は選別部のほぼ中央部から供給されるが、Aでは穀粒は選別作用を受けた後管内を落下し直下の玄米回収口で回収される。送風管の取り付け角度は45度で、送風口に穀粒が侵入しないようにナイロン製網をつけた。Bでは選別作用を受けて選別部を落下した穀粒は管内に長辺方向に35度の傾斜で張られた網で受け止められ、側方の回収口に排出される。A、Bとも穀粒の挙動が観察できるように選別部は透明アクリル管を用いた。また、両装置とも選別部の上部は断面を1/2程度に漸減した。

選別部の長さはAは85, 65及び50 cm, Bは65 cm である。風速の測定はA, Bとも選別部に接続される円形の送風管で行なった。測定方法及び補正方法は前項と同じである。

2. 供試材料

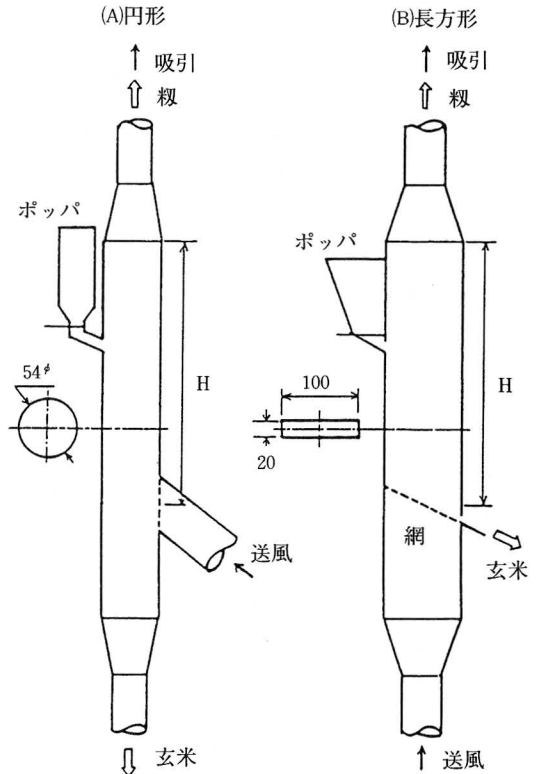
水稻ササニシキで、粳、玄米とも唐箕で精選し、粳混合率10%のものを使用した。

3. 実験方法

実験は 0.5 m/s 毎に風速を変化させ、3 反復した。一定時間の選別後に玄米口及び粳口から回収された玄米及び粳の重量から選別効果率等を計算した。

4. 穀粒濃度

供試材料の供給速度(穀粒流量)をシャッター開度により数段階に変化させて実験を行なった。単位時間内に選別部に供給される穀粒量と空気量の比、すなわち穀粒濃度 $\mu$ を次式で計算した。



図一七 選別装置要部(連続式)

$$\mu = \frac{q}{v \cdot a \cdot \gamma} \quad (14)$$

ここで  $q$  : 穀粒流量 (kg/s)  
 $v$  : 平均風速 (m/s)  
 $a$  : 選別部断面積 (m<sup>2</sup>)  
 $\gamma$  : 空気比重量 (kg/m<sup>3</sup>)

5. 実験結果及び考察

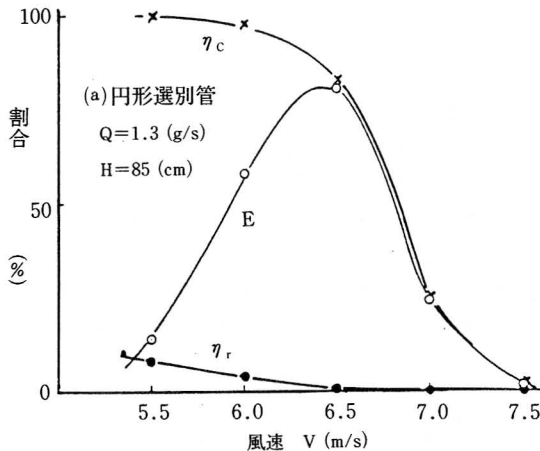
1) 選別効率及び玄米回収率

実験結果の一例を図—8に示す。選別効率は、回分式の場合と同様に風速 6~6.5 m/s 付近で最大になる。風速が最大選別効率の点よりも大きくなると、玄米回収率は急速に低下する。また、回分式の場合と同じく選別部が長くなると選別効果は高くなる傾向があるが、玄米回

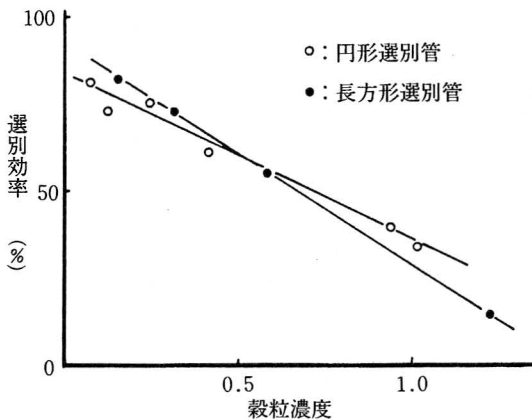
表—3 実験結果

| No | V (m/s) | Q (g/s) | $\mu$ (-) | E <sub>max</sub> (%) | $\eta_c$ (%) | $\eta_r$ (%) | H (cm) |
|----|---------|---------|-----------|----------------------|--------------|--------------|--------|
| 1  | 6.0     | 1.3     | 0.07      | 81                   | 83           | 0.3          | 85     |
| 2  | 6.0     | 2.2     | 0.12      | 73                   | 77           | 0.5          | 〃      |
| 3  | 6.0     | 4.4     | 0.24      | 74                   | 88           | 1.6          | 〃      |
| 4  | 6.5     | 8.0     | 0.4       | 61                   | 78           | 2.4          | 〃      |
| 5  | 6.5     | 18.0    | 0.93      | 39                   | 74           | 5.0          | 〃      |
| 6  | 7.0     | 23.0    | 1.09      | 34                   | 76           | 6.2          | 〃      |
| 7  | 6.0     | 4.4     | 0.24      | 69                   | 73           | 0.6          | 65     |
| 8  | 6.0     | 4.4     | 0.24      | 70                   | 91           | 2.6          | 50     |
| 9  | 6.0     | 2.2     | 0.16      | 82                   | 91           | 1.1          | 65     |
| 10 | 6.0     | 4.4     | 0.31      | 73                   | 85           | 1.5          | 〃      |
| 11 | 6.0     | 8.0     | 0.57      | 55                   | 96           | 4.5          | 〃      |
| 12 | 6.3     | 18.0    | 1.22      | 15                   | 62           | 6.4          | 〃      |

No 1—8 : 円形管, No 9—12 : 長方形管



図—8 風速と選別性能の関係



図—9 穀粒濃度と選別効率の関係

収率と籾混合率を併せて判断すると、実験条件 (H=50~85 cm) の範囲では大きな差は見られなかった。また、選別部の断面形状による影響も明瞭でなかった。A装置で最大効率を与える風速が大きいのは選別部の下端が開放していることによると考えられる。

2. 穀粒流量が選別に及ぼす影響

穀粒流量が多くなると選別効率は低くなり、また、籾混入率が小さくなる点の風速も大きい方へ移る。この傾向はA、Bとも同じである。穀粒流量の増加に伴って選別部での粒子の干渉は大きくなり十分な選別作用を受けられないことによる。選別部内での粒子の挙動を観察すると、流量が大きい場合には供給された穀粒は浮遊状態に入る前に十分な分散が行なわれず、供給口の反対側の管壁に衝突し塊になって落下と上昇を繰り返すなど、管内では粒群をなして不規則な動きをする様子がみられた。

穀粒濃度と最大選別効率の関係を図—9に示す。A、B装置とも穀粒濃度が高くなるにつれて選別効率はほぼ直線的に低くなる。これらの結果をまとめたのが表—3である。なお、選別効率は最大値を、玄米回収率及び籾混入率は最大選別効率の風速における値を示す。穀粒濃度が増大するにつれて、最大選別効率の風速は大きくなり籾混入率も小さくなる。穀粒濃度が大きくなると終末速度は小さくなるので風速は低くてもよいことになるが、効果的な選別作用を受けるためには穀粒が十分な分

散状態になければならず、穀粒流量に見合った空気量が必要となる。したがって、穀粒流量の増加に伴って最大選別効率を与える風速は高くなると考えられる。仕上げ玄米中の粳混入率を0.3%まで許容されるとすると、穀粒濃度は0.1以下でなければならなかった。完全粒（粳）と不完全粒の気流選別で穀粒/空気量比は0.2以下が望ましいとの報告があるが<sup>5)</sup>、本実験のように粳と玄米の分離ではより厳しい条件が必要であるといえよう。

円形選別管で0.3%の粳の混入を許容するとき、穀粒流量は1.3g/s、また、玄米回収率は約80%であった。なお、選別効率及び玄米回収率の低下を許容すれば、穀粒流量を若干増加させても粳混入率0.3%の基準に達せられることになる。

## V 実用規模装置による連続選別実験

ここでは前項のものより選別部の断面積が約4倍大きい実用規模装置により実験を行ない、選別性能、送風方式の違いが選別に及ぼす影響及び所要動力を明らかにした。

### 1. 実験装置

実験装置の概要を図-10に示す。実験では図中の点線部分を取り替えて送風方式を変化させた。送風機は遠心小型送風機（昭和電機 K K 製、SB-100）を使用した。選別部に内径 102 mm、長さの 100 cm の透明アクリル管

を用いた。選別部の上端は内径 70 mm に絞り込み、そこでは選別部の約 2 倍の風速が得られるようにした。ホoppaから供給された穀粒は選別部に対して45度の角度で取り付けられた供給口から選別部に投入される。選別された後に玄米は選別部下の玄米口（1番口）で、粳は粳口（2番口）のサイクロンで回収される。なお、選別処理中はサイクロンの粳排出口は閉じられている。サイクロンを出た空気は内径 110 mm の塩化ビニール管によって送風機へ戻る。風速は戻り管に設けたシャッターにより調節した。

穀粒流量は穀粒ホoppa下部のシャッターによって調節した。送風方式によっては供給口からの空気の流出入が考えられるので、ホoppaにフタをした。また、穀粒流量の安定化を図るためシャッター部には電動攪拌機を取り付けた。

送風方式は、①合流型、②プレチャンバー型、③吸引型の3種類である。

①合流型は前項の円形管選別装置と同じ構造であり、送風管が45度の角度で選別部下部に取り付けられている。合流部には整流板を取り付け、また、ナイロン製網を付け穀粒が送風管に入り込まないようにした。

②プレチャンバー型は送風機からの気流をプレチャンバーを経て選別部に送出させるものである。なお、プレチャンバー内での気流の旋回を防ぐため、内部に放射状

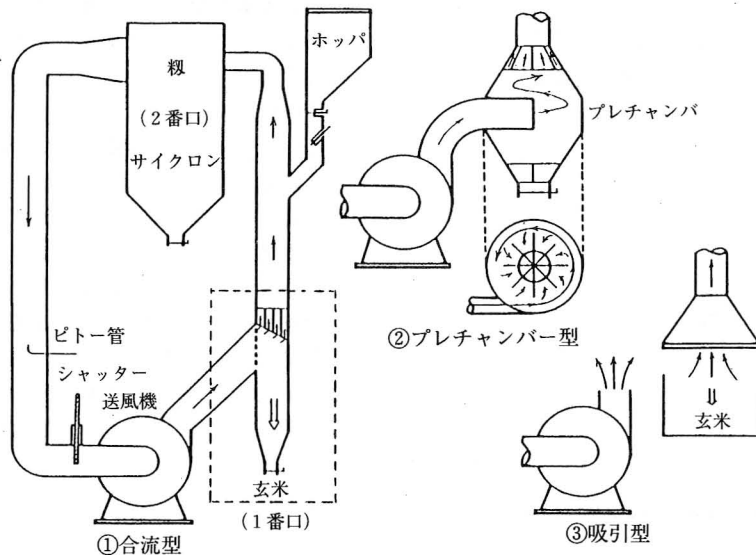


図-10 選別装置の概要



の整流板を取り付けた。

③吸引型は選別部の下方から大気を直接に吸引して均一な気流を得ようとするもので開放系である。選別部下方に内径 110 mm の流入管を設け、その先にスカートを取り付けてある。

2. 供試材料

山形大学附属農場産の水稻ササニシキで、玄米はスリット幅 2 mm の回転米選機によって小粒を取り除去し、粳は布袋に入れて十分にもんで小枝こうを取り、唐箕で精選したものを使用した。平均粒重は玄米 22.0 mg, 粳 24.7 mg, 水分はいずれも 14.5% であった。実験では粳混合率 5% のものを供試した。

3. 風速測定

風速は選別部の吐出側、すなわち送風機の吸引側(戻り管)でピトー管によって測定した。また、選別部の風速分布は穀粒供給口より約 10 cm 下方で管横断面の中心を通る直交線上に 1 cm 間隔に 21 の測定点を設け、ピトー管によって各点 7 回ずつの測定を行なった。

4. 実験結果及び考察

1) 選別性能

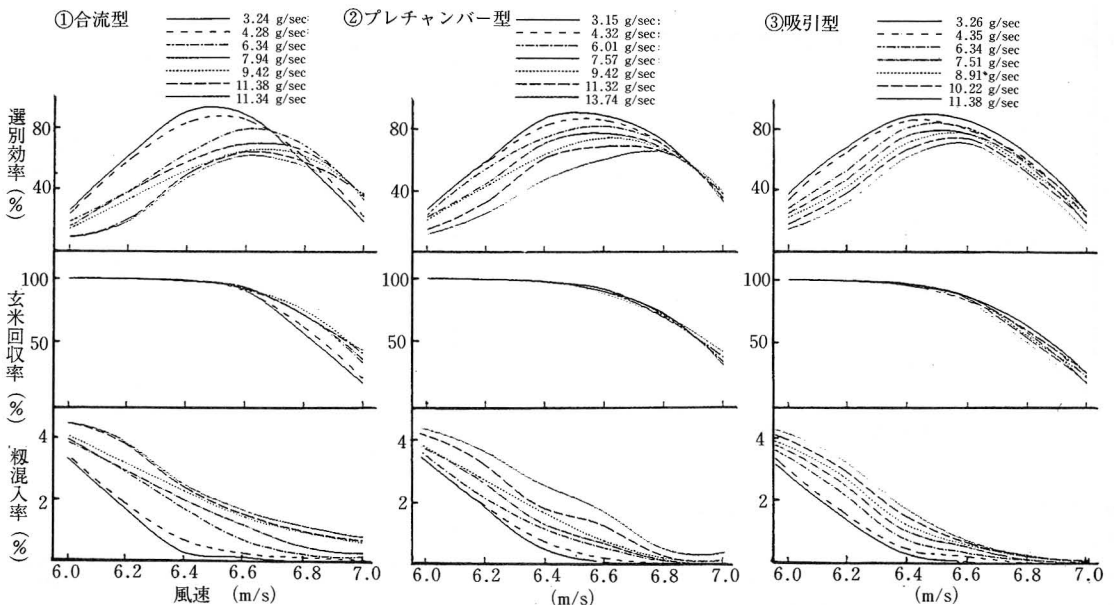
図—11は送風方式の異なる装置について、穀粒流量をパラメータとして風速と選別効率、玄米回収率及び粳混

入率の関係を示す。いずれの送風方式においても穀粒流量が増加すると最大選別効率及びそれ以下の低風速域での選別効率は低下した。選別効率は風速 6~6.6 m/s 前後で最大となるが、穀粒流量の増加に伴って最大選別効率の風速は高くなる。これらの傾向は基礎実験の結果と同じであり、その理由についてはすでに述べた。

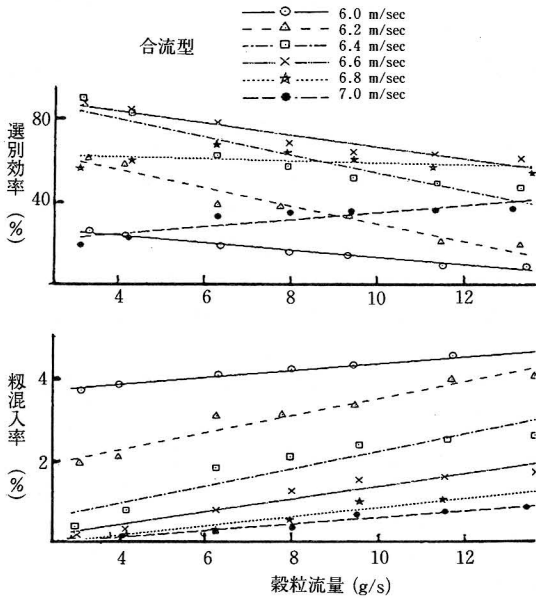
穀粒流量が同程度の場合の各送風方式の選別効率を比較すると、穀粒流量にもよるが選別効率は総じて吸引型がよく、次いでプレチャンバー型、合流型の順であった。玄米回収率は同程度であるから選別効率の違いは粳混入率の差が影響しているといえよう。

玄米回収率は最大選別効率付近から風速の増大に伴って急激に低下する。各送風方式とも玄米回収率は最大選別効率より低風速域では穀粒流量の影響をほとんど受けないが、高風速域では穀粒流量が増加すると若干高くなった。粳混入率は風速 6.6 m/s 付近までは急激に低下し、その後は緩やかになる。

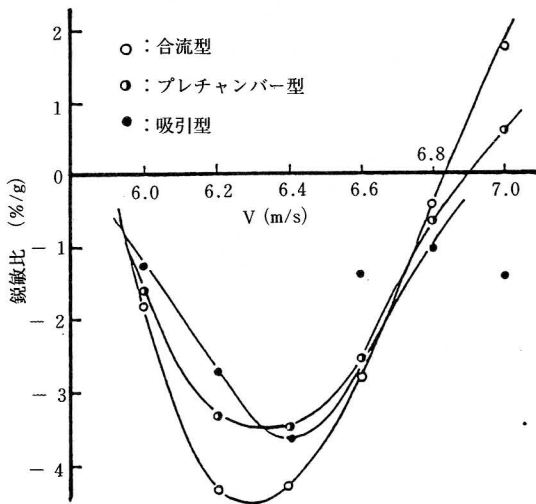
図—12は風速をパラメータとして、穀粒流量と選別効率及び粳混入率の関係を合流型について示したものである。他の送風方式においてもこれらの関係には同様の傾向がみられ、いずれも穀粒流量に対して直線的に変化する。直線式の勾配は穀粒流量の変化に対するそれぞれの



図—11 穀粒流量を変えた場合の風速と選別性能の関係



図—12 穀粒流量と選別効率及び糶混入率の関係

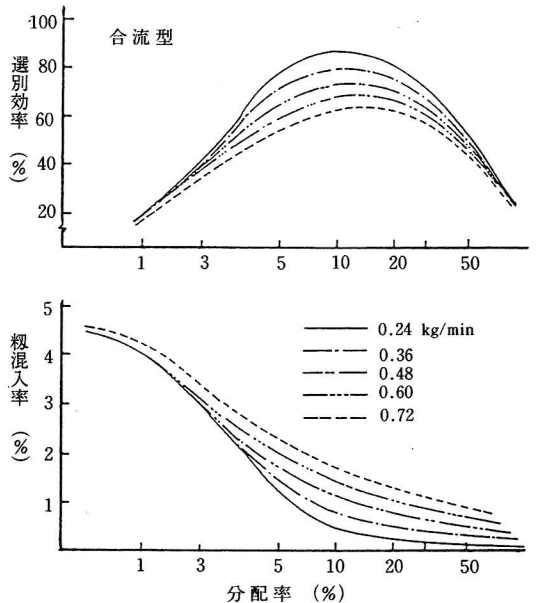


図—13 風速と選別効率鋭敏比の関係

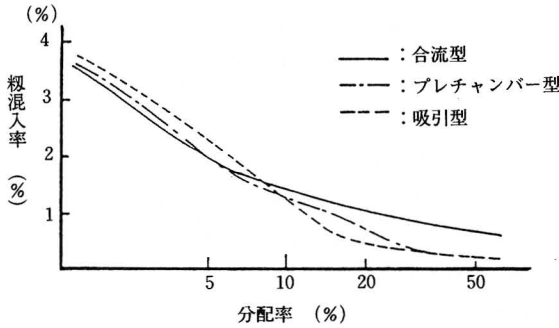
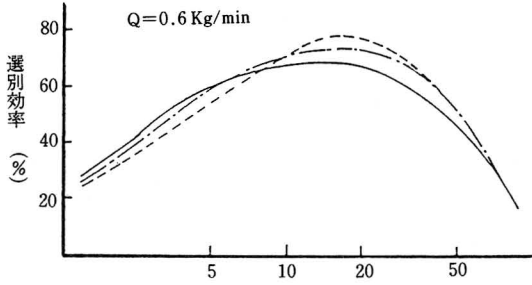
変化量，すなわち鋭敏比を表わしており，鋭敏比の小さいものほど穀粒流量の変動に対して安定した選別ができることになる。図—13は選別効率の穀粒量に対する鋭敏比を風速との関係で示したものである。いずれの送風方式でも最大選別効率を与える点よりも低風速域で鋭敏比

はマイナスであり，穀粒流量の増加は選別効率を低下させる方向に作用していることがわかる。

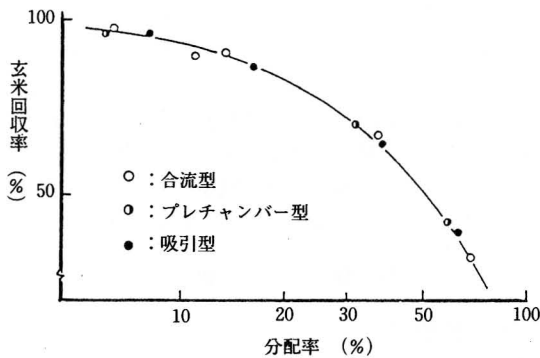
各送風方式において穀粒流量と風速を種々変化させたとき，同一の運転条件において1番口と2番口への穀粒の排出割合，すなわち分配率に違いがあった。とくに吸引型の2番口分配率（以下分配率という）は低く，分配率を他と同じにするためには風速を0.2m/s程度高くなければならなかった。吸引型は開放系であるから，戻り管での風速は必ずしも選別部の状態を正しく反映していないためであろう。したがって，送風方式の違いによる選別性能の比較を行なう場合，風速を変数にすることは必ずしも適当でない。そこで，風速に代わって分配率を変数として比較した。分配率は全穀粒の気流に対する空気力学的特性を反映しているから，分配率は送風方式，選別装置の規模，また風速の測定方法が異なる場合においても，選別性能を比較する場合の基準になると考えられる。風速が高くなれば分配率は大きくなり，その関係は正規分布曲線で近似でき，分配率の対数（対数分配率）をとると風速との間に直線関係があった。また，各風速において対数分配率は穀粒流量の1次式で表わされた。図—14は穀粒流量をパラメータとし，分配率に対する選別効率及び糶混入率の関係を示したものであるが，穀粒流量が変化してもほぼ一定の分配率において選



図—14 分配率と選別効率及び糶混入率の関係



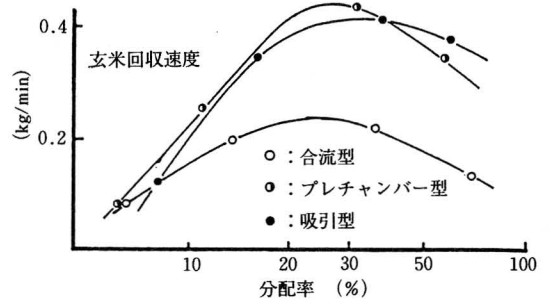
図—15 各種送風方式の選別性能



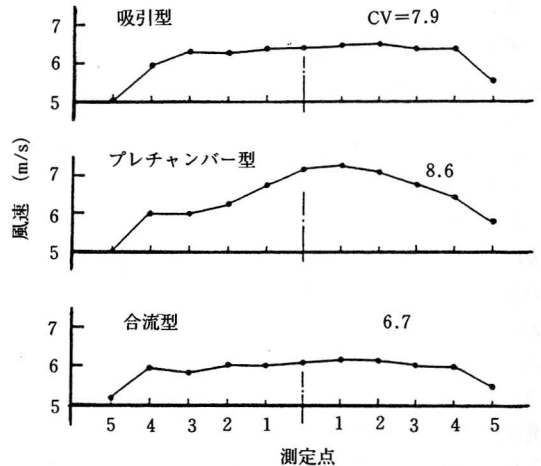
図—16 籾混入率0.3%における玄米回収率

別効率に最大になった。このことから、分配率が一定になるように監視することによって選別制御が可能であり、しかも風速による制御よりも操作が容易である。分配率と玄米回収率の関係は穀粒流量によってほとんど影響を受けない。

次に送風方式の違いによる分配率と選別効率の関係を比較する。図—15に示すように同一穀粒流量では送風方式による選別効率の変動は小さく、いずれも分配率15%前後で選別効率は最大となる。また、分配率と玄米回収



図—17 籾混入率0.3%とした場合の分配率と玄米回収率速度の関係



図—18 管内の風速分布

表—4 風速分布の測定結果

|           | 合流型  | プレチャンパー型 | 吸引型  |
|-----------|------|----------|------|
| 方向1 (m/s) | 5.85 | 6.36     | 6.11 |
| 方向2 (m/s) | 6.25 | 6.63     | 5.97 |
| 全平均(m/s)  | 6.05 | 6.49     | 6.04 |
| 変動率(%)    | 6.68 | 8.55     | 7.97 |

率及び籾混入率の関係も送風方式の違いによる差は小さくなかった。このことから送風方式のいかに問わず分配率を制御量として効率的に選別が行なえることがわかる。

2) 処理量

籾混入率を下げるだけであれば風速を上げれば可能で

表—5 所要動力の測定結果

|          | 穀粒流量<br>(kg/min) | 分配率<br>(%) | 風速<br>(m/s) | 所要動力(w) |     |
|----------|------------------|------------|-------------|---------|-----|
|          |                  |            |             | 無負荷時    | 負荷時 |
| 合流型      | 0.58             | 28.2       | 6.6         | 195     | 189 |
| プレチャンパー型 | 0.60             | 28.5       | 6.8         | 195     | 190 |
| 吸引型      | 0.60             | 27.4       | 6.9         | 194     | 192 |

あるが、同時に玄米回収率も低下することになる。実験の結果から糶混入率0.3%の場合の分配率と玄米回収率及び玄米回収速度（処理量）の関係を示したのが図—16及び図—17である。分配率に対する玄米回収率はいずれの送風方式でも差はないが、処理能力に直接関係する玄米回収速度は合流型で小さかった。しかし、いずれの送風方式の場合も分配率がおよそ30%の時に玄米回収速度は最大になった。選別効率からみると分配率は15%程度がよいが、処理量を考慮した場合の最適分配率は15～30%の範囲にあるといえる。このときの風速は6.6m/s前後になる。しかし、本装置においては実験結果が最もよい場合でも処理量は約7g/s(25kg/h)、穀粒流量で10g/s(36kg/h)程度であり、処理能率は高いとはいえない。

### 3) 選別部の風速分布

選別性能に影響する因子として選別部の風速分布があげられる。各装置の風速分布の測定結果を表—4及び図—18に示す。風速分布の変動率は7～8%程度であった。選別性能からみて合流型の風速分布が劣っているのではないかと予想されたが、風速分布の変動は最も小さく測定位置での気流は安定していた。これは整流板の効果によるものであるが、流入方向よりもそれに直角方向の風速分布の変動が若干大きかった。次に風速分布が均一であったのは吸引型で、測定方向による差も小さかった。しかし、管内壁付近の風速は極端に低く、乱流における風速分布の典型的な形をしている。プレチャンパー型の風速分布の変動率は最も大きかったが、チャンパー容積が小さいため十分な気流のよどみ効果がなかったためと考えられる。前述のように送風方式の違いによって選別性能に差があるものの、測定結果からみて風速の分布状態は必ずしも主要因ではないと考えられる。実際、選別部での穀粒の挙動を観察すると、合流型の接合部付近では角度をもって流入する気流によって穀粒は群をなして激しく上下運動するなど複雑な動きをするのがみられ

た。このように穀粒が投入されることによって選別部内の気流に乱れが生じ、選別性能に影響するものと考えられる。

### 4) 所要動力

各送風方式について、穀粒流量をおよそ0.6kg/minと一定にし、分配率がほぼ30%になるように風速を設定して、三相動力計（横河KK製）を用いて消費電力を測定した。測定結果を表—5に示す。

所要動力はいずれの送風方式においても190～200w程度であり大差はないが、開放系の吸引型がわずかに大きかった。また、無負荷時の所要動力は負荷時のそれより大きかった。風速の増大によるものである。

いずれにせよ、当該規模の装置でおよそ200w(1/4馬力)の動力を要し、いま、実用的な選別装置の処理能力を毎時600kgとすると本装置をおよそ23個並列運転することが必要であり、その所要動力は約4.6kwになる。気流選別装置は構造が簡単であるが、揺動選別機等の現用機に比べて処理量当たりの規模は大きく、さらに所要動力の面からみても問題があると考えられる。

## VI 摘 要

万石や揺動選別機に代わる新しい方式として、上昇気流方式について回分式及び連続供給式の縦型風路を用いて実験を行ない、選別に影響する諸因子を明らかにするとともに、上昇気流による糶と玄米の選別の可能性について検討した。主な実験結果は次の通りである。

1. 気流は乱流域にあり、穀粒はNewton則に従う抵抗を受け、管内の風速は1/7乗則に従う分布をする。
2. 円形選別管による回分式装置において、供給幅を狭くして穀粒を管中央の高速気流の中に投入するとき選別効率は高くなった。
3. 選別部が長くなると穀粒の管内での分散がよく、干渉が少なくなり、選別効率は高くなった。
4. 風速6～6.5m/sで、選別効率は最大になり、こ

れより風速を上げると玄米回収率は急激に低下する。

5. 選別部の断面形状（円形，長方形）によって選別性能に差は認められなかった。

6. 穀粒流量が増加すると選別管内の穀粒の挙動は乱れ，選別効率はほぼ直線的に低下する。玄米中の粃混入率の許容限界を0.3%とするととき，穀粒濃度は0.1以下でなければならなかった。

7. 実用規模装置での送風方式別の選別性能は吸引型が最もよく，次いでプレチャンパー型，合流型の順であった。選別効率はいずれも風速 6~6.6 m/s 前後で最大になった。

8. 風速の増大に伴って2番口への穀粒分配率は増加し，対数分配率は風速と直線的関係にあり，また各風速における対数分配率と穀粒流量の関係は1次式で表わされた。

9. 選別効率と分配率の関係は穀粒流量の多少にかかわらず，ほぼ一定の分配率で選別効率は最大になった。したがって，分配率を最適選別のための制御量とすることができる。

10. 粃混入率を0.3%とする場合に，分配率と玄米回収率の関係は送風方式によって差はないが，玄米回収速度は合流型で低かった。しかし，いずれの送風方式でも分配率30%前後で玄米回収速度は最大になった。このときの最大玄米回収速度はプレチャンパー型の 25 kg/h であった。

11. 風速の分布状態をみると，変動率は7~8%の範囲にあり，合流型が最も均一で，次いで吸引型であった。選別性能には風速分布の均一性だけでなく管内での穀粒の分散と挙動が大きく影響していると考えられる。

12. 内径 102 mm φ の円形選別管による選別所要動力は 190~200 w であった。当該規模の選別機を並列運転して毎時 600 kg の処理をする場合に換算すると総所要動力は約 4.6 kw になる。

13. 上昇気流による粃と玄米の分離選別は可能であるが，現用の選別機と比較するとき，規模当たりの処理量及び所要動力の面からみて有利性は乏しいと思われる。

本研究の結果によると，粃と玄米の上昇気流による選

別の実用化は困難であると言わざるを得ないが，本実験の成果は気流による各種穀粒のハンドリングに関する今後の研究に一定の示唆を与えるものと考ええる。

## 謝 辞

実験には卒論専攻学生，森山仁，桑原雅男，石川善勝，岩瀬利己，白岩勝，今井俊之諸氏の協力を得た。記して謝意を表する次第である。

## 文 献

- 1) 農業機械学会：新版農業機械ハンドブック，P 649，1985
- 2) 庄司英信：穀粒体の斜面流動に関する実験的研究，農機誌，11(4)，P 134~142，1950
- 3) 上出順一：揺動万石の選別過程及び粃と玄米の分離特性，山形大学紀要（農学），10(1)，P 75~86，1986
- 4) 児島初男，山下律也：穀粒選別機の特長(1)，農機誌，46(2)，P 238~242，1984
- 5) 山下律也：縦型風路における穀粒の選別（第1報），神大農研報，10，P 207~214，1972
- 6) 安部武美，池見隆男：上昇気流型選別機に関する研究，精米の除糠について，農機誌，28(4)，P 232~234，1967
- 7) I. G. Farran, R. H. Macmillan: Grain-Chaff Separation in a Vertical Air Stream, J. A. E. R, 24, p 115-129, 1979
- 8) W. K. Bilanski, R. Lal: Behavior of Threshed Materials in a Vertical Wind Tunnel, Transactions of ASAE, 8(3), p 411-416, 1965
- 9) 上出順一：穀粒群の終末速度および垂直管内における分散，山形農林学会報，40，p 9-12，1982
- 10) 土屋功位，上出順一，石渡健二：粃・玄米の風選に関する研究，農機誌，43(3)，p 433-442，1981
- 11) 三輪茂雄：粉体のフルイ分け，日刊工業新聞社，1965
- 12) 原田幸夫：流体力学，槇書店，1960