色彩選別機による天草陶石の選鉱*

木村 邦夫¹ 陣内 和彦¹

[UDC 622.725:553.611]

Separation Test of Amakusa Pottery Stone by Using Color Sorter

by Kunio KIMURA¹ and Kazuhiko JINNAI¹

Separation of white colored pottery stones from wasted parts such as finer size than 5 mm by using a color sorter was investigated.

The results obtained are as follows:

- 1) Sizing of sample by sieves as pretreatment and suitable adjustment of sensitivity for each particle size range were necessary for the separation with high efficiency.
- 2) The process of removing of little contained parts such as dark colored stones was effectual, because a number of air jet ejection and consumption of compressed air can be reduced.
- 3) In the case of so large feed rate which particles formed a line compactly on the belt, the possibility of incidental removal rate of useful pottery stones by air jet ejection increased. Therefore, feed rate was desired to be about one third of calculated one under the condition of the particles forming a line compactly.
- 4) The sample coarser than 0.6 mm could be separated by color sorter.
- 5) The sample of particle size ranged from 1.2 to 2.4 mm, containing about 80 wt% of white colored pottery stones, could be separated at about 70 % in the Newtonian separation efficiency. In that case, the maximum feed rate was about 5 kg/hr.
- 6) It was thought that the separation of Amakusa pottery stones by the color sorter could be applicable to industrial process, because the concentration of high-grade pottery stones could be obtained.

[1. Dr., Government Industrial Research Institute, Kyushu MITI]

1. 緒 言

天草陶石は、熊本県の天草下島西海岸の苓北町から天草町にかけて南北約35 km, 東西約10 kmの範囲で分布している。主要な鉱脈は、北から海岸脈、村山脈へと連なり、その東方に皿山脈がある。この天草陶石は、有田・波佐見焼の主原料として、また一部は、磚子の原料として用いられている。最近、高品位陶石が枯渇化傾向にあるため、低品位陶石を有効利用する必要に迫られている。

天草陶石の採掘現場では粒径約50 mm以上のものが採掘され、それより小さい粒径のものは、効率的な手選別ができないため、利用されずに採掘現場近くに廃棄されている。また、選鉱場においては、陶石の磨き工程（陶石表面の酸化鉄の多い部分をノミとハンマーを使い、人手により削り取る作業）で生成する磨き屑石あるいは酸処理用試料粉碎工程で発生する5 mm以下の細粒部もほとんど利用されていない。これらの未利用物中には、日用食器、タイル、衛生陶器などの陶磁器の原料として使用可能な有用陶石が多量に含まれている。そこで、上記の未利用の陶石屑石あるいは細粒部から、色彩選別機を用いて白色高品位陶石を分離回収することを試みた。本報告では、色彩選別機による分離回収の可能性、回収物の品位などについて述べる。

2. 実験試料および方法

2・1 実験試料

実験には、皿山脈の未利用細粒部（以下、US試料と略称する）、村山脈の小田床切羽の磨き屑石（以下、UO試料と略称する）、海岸脈の未利用細粒部（以下、K3試料と略称する）の3試料を用いた。表1に上記3試料の化学組成と熱膨張曲線の測定による耐火度の推定値¹⁾を示す。耐火度がSK26番以上で、鉄分(Fe₂O₃)の含有量が1 wt%以下のものが天草陶石として取り引きされている。銘柄は、鉄分の含有量により、特等石：0.4 wt%以下、1等石：0.4～0.5 wt%、2等石：0.5～0.7 wt%、3等石：0.7～0.9 wt%、4等石：0.9～1.0 wt%のように分類されている。さらに、耐火度がSK26番以下のものでも低火度陶石として、鉄分の含有量により、上記と同じ格付けで取り引きされている。表1によると、3試料共、4等低火度陶石以下の劣質のものであると言える。UO試料は上記した磨き屑石である。そのため、粒径は10 cm～10 mm、形状は偏平、また石の表裏で色が極端に異なるもので、白色部は特～1等石である。そのままでは選別効果が期待できないため、まず、ジョークラッシャにて10 mm以下に粗砕した。粗砕したUO試料および他の2試料を0.6, 1.2, 2.4, 4.8 mmの粒度でふるい分けした後、水洗し供試料とした。肉眼観察によると、USおよびUO試料は、白く見えるものが多数含まれているのに比べ、K3試料は、それが少

表1 試料の化学分析値(wt%)と耐火度(SK)

試料	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Ig. loss	Total	耐火度
UO	78.60	tr	13.85	1.02	0.04	0.17	0.23	2.78	3.10	99.79	26-
US	77.80	tr	14.20	0.92	0.12	0.09	0.13	3.13	3.26	99.65	20+
K3	75.42	tr	14.74	0.90	0.16	0.22	2.10	3.85	2.54	99.93	15-

* 1988年5月27日受付 9月29日受理 昭和60年度日本鉱業会九州支部秋季例会および昭和62年度日本鉱業会九州支部春季例会にて一部講演

1. 正会員 工博 九州工業技術試験所資源開発部

図1 試料のクリストファ・ダイアグラム

なく中間色に見えるものが多数含まれていた。粒度分布および次項の白色陶石含有割合の推定値を基にして求めた3試料のクリストファ・ダイアグラムを図1に示す。

2.2 白色陶石含有割合の推定

原鉱および分離産物中の白色陶石の含有割合をその色差から求めることを試みた。まず、市販の特上陶土(上級天草陶石の粉碎・水び産物, Fe_2O_3 含有割合: 0.4wt%以下)の白色度を回収目的物の白色度とした。特上陶土の白色陶石含有割合を100wt%とし、陶石採掘現場で天然のスラッジと呼ばれ、全く利用できない有色陶石を白色陶石含有割合0wt%とした。次に、両者を混合し(有色陶石は、次項に示す粉碎法により粉碎し使用した)、混合物のLabの値から、下記(1)式²⁾により白色度(W)を算出した。なお、Lは明度(0~100)、aは+で赤の度合、-で緑の度合、bは+で黄の度合、-で青の度合を示す²⁾。混合割合(白色陶石含有割合)と混合物の白色度との関係を図2に示す。両者の関係式を最小二乗法により算出し、下記(2)式の二次相関式を得た。

$$W = 100 - \{(100 - L)^2 + a^2 + b^2\}^{1/2} \quad (1)$$

$$C = -1268 + 30.92W - 0.1749W^2 \quad (2)$$

ただし、Cは白色陶石含有割合(wt%)を示す。

上記(2)式を用いて分離試料の白色陶石含有割合を算出し、その値を回収目的物の含有割合とした。さらに、その値を基にニュートン分離効率を算出し、分離精度の検討を行なった。

2.3 装置および実験方法

色彩選別機は、安西総業社製BTM-02型色彩選別機を用いた。装置概略図を図3に示す。原料は、ホッパー①からフィーダ②によりシュート③に送られ、整列されてコンベヤベルト④上を一列になって移動し、観測部⑤に投下される。観測部では1粒毎に前後

図2 白色度と白色陶石含有割合との関係

図3 装置概略図

3方向から観測され、バックグラウンド⑥で規定した基準色のもとで明度が測定され、明度センサの感度で規定されたレベル以下、あるいはそのレベル以上の粒子が通過すると、メインアンプ⑦から空気噴射銃⑧に排除命令が送られ、その粒子は列外へ排除される。分離条件の要因としては、試料供給量、明度センサの感度が主なものである。この他の要因として、バックグラウンドの色および明度、空気噴射銃の噴射時間およびそのタイミング等があるが、今回はこれらを一定とした。また、試料が整列されて落下するようにコンベヤベルトの速度を調整した。この速度は、1m/secが最適であった。さらに、観測部中央に試料が落下するように、各粒度ごとにコンベヤベルトを前後移動させ、調整した。分離した試料は秤量ののち、東洋科学社製TI-100型高速振動試料粉碎機を用い、試料2gを10mlアルミナ容器中で30秒間粉碎した。なお、試料粒度が1.2mm以上のものは、粉碎前に1.2mm以下に粗砕した。粉碎試料の色差を東京電色社製TC-55D型電子色差計を用いてLab法で測定し、前項に記した方法により分離結果の検討を行なった。

3. 結果と考察

3.1 明度センサの感度および試料粒径の影響

明度センサの感度は、黒色排除側あるいは白色排除側で単独に増減することが可能で、また同時に増減することもできる。黒色排除側の感度を徐々に大きくすると、明度の小さい(黒色に近い)通過試料はもちろん、明度の大きい(白色に近い)通過試料に対してまでも排除命令が送られるようになる。逆に、白色排除側の感

図4 感度と精鉱収率との関係

図5 感度と(2)式から得られる精鉱中の白色陶石含有割合との関係

度を徐々に大きくすると、明度の大きい通過試料はもちろん、明度の小さい通過試料に対してまでも排除命令が送られるようになる。また、黒色排除側および白色排除側の感度を同時に大きくすると、全ての試料に対して排除命令が送られるようになる。なお、感度は最低を0、最大を100と表示した。通過試料に対する排除命令は、バックグラウンドの一定明度に固定した基準色のもとで、ある感度に規定した明度センサにより測定される通過試料の明度により発生する。この場合、通過試料には斜め方向から光が当てられている。上記のような関係があるため、最初に3種類、3粒径区分の9試料を用いて黒色排除側の感度の影響を調べた。図4に感度と精鉱（以下、回収目的物の白色陶石が濃縮されたものを精鉱と称する）収率との関係を示す。なお、試料供給量は次項に示す最大限界量以下とし、粒径区分により変化させた。図によると、精鉱の収率は、感度を大きくするに従い、明度の大きい（白色に近い）通過試料に対してまでも排除命令が送られるため、減少している。また、同じ感度の場合、精鉱の収率は、粒径の大きい試料ほど小さい。これはバックグラウンドの色および明度を一定にしたためと考えられる。つまり、バックグラウンドの明度および試料に当てる光の明るさが一定で、試料の粒径が異なる場合は、試料の粒径（投影面積）が小さいほど、明度センサに入るバックグラウンドの光が多くなるためと考えられる。図1に示したように粒径区分による白色陶石含有割合は大差ないにもかかわらず、このように感度が同じであっても、粒径により精鉱の収率が異なる結果が得られることは、分離前に一定粒径範囲に揃える必要があることを示唆している。次に、感度と(2)式から得られる精鉱中の白色陶石含有割合との関係を図5に示す。図4とは逆に、感度が大きくなるほど精鉱中の白色陶石含有割合は小さくなっている。これは、感度が大きくなるほど白色に近い試料まで排除されることに起因していると考えられる。また、図5中の80%以上の白色陶石含有割合は、市販の選下陶土（最も低品位の陶土）の白色陶石含有割合の計算値（68.7%）より高いことから、充分使用可能な値と考えられる。図6に、感度とニュートン分離効率との関係を示す。図によると、分離効率の最大値が認められる。しかし、USおよびUO試料の分離効率の最大値が60~70%を示すのに対して、K3試料の最大値は30~40%となっている。これは、実験試料の項で述べたUSおよびUO試料中には肉眼で白く見えるものが多数含まれていること、K3試料中にはそれが少なく中間色のものが多数含まれていることに起因していると思われる。また、分離効率の最大値を示す感度は、粒径範囲が0.6~1.2mmで80~90、1.2~2.4mmで40~60、2.4~4.8mmで

図6 感度とニュートン分離効率との関係

30~40のように、粒径範囲によって異なっている。これは、分離前のふるい分け、並びにその粒径範囲にあった感度の調整が不可欠であることを示している。

次に、US試料を用い、白色排除側の感度の影響を調べたところ、黒色排除側の感度の影響の場合とは逆に、精鉱の収率は、感度を大きくするに従い、明度の小さい（黒色に近い）通過試料に対してまでも排除命令が送られるため、増加する傾向にあった。さらにこの場合、感度と(2)式から得られる精鉱中の白色陶石含有割合との関係は、図5とは逆に、感度が大きくなるほど精鉱中の白色陶石含有割合は小さくなった。これは、黒色排除側の感度の影響の場合とは逆に、感度が大きくなるほど黒色に近い試料まで排除され、精鉱中に混入することに起因していると考えられる。この場合の感度とニュートン分離効率との関係を図7に示す。図によると、分離効率の最大値が認められ、その最大値は、図6に示した黒色排除側のUS試料の最大値と大差ない結果となっている。しかし、含有量が少ないほうを排除するほうが空気噴射銃の噴射回数、並びに圧縮空気使用量が少なくなり、効果的であると考えられる。

3.2 試料供給量の影響

粒径範囲1.2~2.4mmの3種類の試料を用い、図6でニュートン分離効率を最大値を示した感度で、試料供給量を変化させ分離した。図8に、試料供給量と精鉱収率およびニュートン分離効率との関係を示す。分離効率および精鉱収率共、試料供給量が5~10 kg/hrを越えると急激に減少している。この試料供給量の値は、ベ

図7 白色排除側の感度の影響

図8 試料供給量と精鉱収率およびニュートン分離効率との関係

ルト上で粒子が隙間なく並ぶ試料供給量の計算値の15.9 kg/hrより少ない。これは、試料供給量が増加すると観測部における試料粒の1粒ごとの観測が不可能になり、1回の排除命令で排除しなくてもよい数個の粒子までが同時に排除されることに起因していると思われる。なお、粒径範囲0.6~1.2 mmおよび2.4~4.8 mmのベルト上で粒子が隙間なく並ぶ試料供給量の計算値は、4.03 kg/hrおよび63.5 kg/hrである。上記のことを確認するため、シミュレーションにより試料供給量と精鉱収率との関係を算出し、検討した。まず、粒径は平均粒径、粒子形状は球状、粒径と1個の重量との関係は、粒径範囲が0.6~1.2 mm (平均粒径: 0.9 mm) の時0.992 mg, 1.2~2.4 mm (平均粒径: 1.8 mm) の時7.94 mg, 2.4~4.8 mm (平均粒径: 3.6 mm) の時63.5 mgとした。なお、粒子1個の重量は、天草陶石の平均的な粒子密度値の2.50 g/cm³の値を用い算出したが、1000個の試料を用いて測定した値とほぼ一致した。次に、粒子に当たる位置での空気噴射幅、粒子の重なりの有無、粒子間距離およびその分布状態、白色陶石含有割合およびその混合状態等を変化させ、試料供給量と精鉱収率との関係を算出した。測定結果に近い傾向を示した計算結果および実測値を図9に示す。なお、実測値の収率は、感度を変化させることにより変化させた。与えた条件は、上記の粒径、粒子形状、1個の重量の他、粒子に当たる位置での空気噴射幅が2 mmであった。また、粒子間距離は、試料供給量が少ない時でも粒子が重なる場合から、最大離れても試料供給量から算出される平均粒子間距離の2倍までとし、その間の粒子間距離の分布は一樣であるとした。白色陶石含有割合は、25~95 wt%と変化させ、ランダムに混合されているとした。シミュレーションの結果が測定結果に近い傾向を示したことから、実際の分離でも、上記の付与条件に近いことが起こっていると考えられる。つまり、試料供給量が少ないときでも偏平な粒子が含まれるため、僅かではあるが、粒子の重なりがあり、空気噴射幅が2 mm程度になっていること等である。これらの問題を解決するためには、まず粒子形状をなるべく球形にすることが考えられるが、工業的な処理は困難であると思われる。これらのことから、試料供給量は、ベルト上で粒子が隙間なく並ぶほど大きくできないと考えられる。

図8および図9の結果から、精度よく分離するためには試料供給量を少なくすると良いと言える。しかし、工業的には試料供給量は多いほうが望ましい。図によると、試料供給量の最大限界量があり、その量はベルト上で粒子が隙間なく並ぶほど多くなく、隙間なく並ぶ試料供給量の計算値の大体1/3程度(粒径範囲1.2~2.4 mmの試料の場合、約5 kg/hr)と思われる。

図9 計算結果および実測値(図中の記入数値は、計算の初期条件(白色陶石含有割合)を示す)

図10 感度と精鉱の鉄分との関係

3.3 分離産物の品位

図4~図6に示した黒色排除側で、上記の試料供給量の最大限

界量以下で分離した粒径範囲 1.2~2.4 mm の 3 種の精鉱の鉄分 (Fe_2O_3) を測定した。感度と精鉱の鉄分との関係を図 10 に示す。UO 試料が特に低くなっている。この試料の原岩は緒言で記した磨き屑石であり、実験試料の項で述べたように表裏で極端に色が異なり、白色部は特〜1 等石である。10mm 以下に粗砕することにより単体分離が進み、精鉱の品位が特〜1 等石並になったと考えられる。その他の試料も 2 等石並の品位が得られた。耐火度は、UO 試料が 26~26+, US 試料が 26-, K3 試料が 15+~16- と僅かに上昇した。これは、耐火度を低下させる鉄分が減少したためと考えられる。このように精鉱の品位が上昇することから、特に屑石の UO 試料から高品位陶石を回収するための色彩選別による選鉱法は、工業的に十分に利用できると思われる。

4. 結 言

未利用の陶石細粉あるいは陶石屑石から、色彩選別機を用いて高品位陶石を分離回収することを試み、下記の結果を得た。

- 1) 分離前のふるい分け、並びにその粒径範囲にあった感度の調整は、精度よく分離するために不可欠である。
- 2) 原料中の含有量が少ない方を排除するほうが空気噴射銃の

噴射回数、並びに圧縮空気使用量が少なくなり、効果的であると考えられる。

3) 試料供給量をベルト上で粒子が隙間なく並ぶほど多くすると、排除しなくてもよい粒子までが同時に排除される可能性が増加する。そのため、試料供給量は、隙間なく並ぶ試料供給量の計算値の大略 1/3 程度に抑えることが望ましい。

4) 粒径 0.6mm 以上の試料は色彩選別処理が可能である。

5) 原料の性質によってその程度は異なるが、色彩選別によって精鉱の品位が上昇することから、同法は天草陶石の選鉱工程において、工業的に利用できると思われる。

謝辞 試料提供をお願いした天草陶石鉱業共同組合、並びに化学分析をお願いした佐賀県窯業試験場の方々に心より謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 木村邦夫・立山 博・石橋 修・陣内和彦：窯業協会誌，94〔7〕，689~93，(1986)
- 2) たとえば，窯業協会編集委員会編：窯業計測，p. 232~4 (1962)，窯業協会（東京）

北海道支部主催・資料お頒けいたします

"昭和63年度秋季講演会・講演要旨集"

'88. 10. 8 開催 A 4判 ¥ 1,000 (送料込み)

1. 岩石爆破のメカニズムを静的に考える現実的意味について 北海道大学 本間久朗	9. 金の不均化反応による金微粒子の生成 北海道大学 村上孝志・木内弘道・永井忠雄
2. 爆破の仕事効果試験装置（試作）について 北海道大学 本間久朗	10. 電極法を用いた粒子濃度の校正曲線について 北海道大学 朝倉国臣・戸澤 康・中島 巖
3. 諸要因（薬径抵抗線比，岩石強度，薬量）と爆破効果について 北海道大学 本間久朗	11. 超小型ラムを用いた初期地圧測定の可能性について 室蘭工業大学 藤井義明・後藤龍彦・佐藤干城
4. 半導体レーザの坑内適応化 公害資源研究所 野田和俊・小山保順	12. 坑内通気の冷房機運転によるコスト評価に関する研究 北海道大学 富長勇作・今 尚之
5. 坑内歩行機構の脚形態についての考察 公害資源研究所 皿田 滋	13. 補助扇風機の配置評価に関する研究 北海道大学 富長勇作・梅木裕一
6. ガス脱着圧計による沿層坑道周辺の包蔵ガス量の推定について 北海道大学 大賀光太郎・樋口澄志 石炭技術研究所 村上洋一	14. エキスパートシステムでの確信度を基にした認識に関する研究 北海道大学 富長勇作・荒川昌彦
7. 三軸応力下における石炭のガス透過率について 北海道大学 松尾裕介・大賀光太郎・樋口澄志	15. 非定常状態における通気速度に関する研究 北海道大学 富長勇作・楊志鋒
8. 複数共存試料の界面動電位測定装置の開発 北海道大学 恒川昌美・幅田直樹・高森隆勝	

北海道支部：〒060 札幌市北区北13条西8丁目
北海道大学工学部資源開発工学科内