ジグ選別における技術革新の歩みと 先端的選別機への挑戦*

恒 川 昌 美¹ 伊 藤 真 由 美² 広 吉 直 樹³

Technological Developments in Jig Separation and Approaches to Advance in Separation

by Masami TSUNEKAWA^{a*}, Mayumi ITO^a and Naoki HIROYOSHI^a

a. Graduate School of Engineering, Hokkaido University, Kita-13, Nishi-8, Kita-ku, Sapporo
060-8628, Japan (*Corresponding author, E-mail: tuneakawa@eng.hokudai.ac.jp)

Jig separation is an ancient technology in mineral processing and it is still in widespread use. In recent years many kinds of varieties on jig separation have been developed and applied to process fine particles and solid waste.

The authors reviewed the technological development in jig separation and discussed how innovations occurred, relating to hand jigs used from the 16th century, and jig separators developed in the 20th century, moving screen, fixed screen, and rotating screen types. Recently developed jig separators for processing fine particles, larger particles and plastics are reviewed including the Rom jig, centrifugal jigs by Altair and Kelsey, and the packed column jig.

Newly developed jig separators by the authors, RETAC, Hybrid and Reverse jigs, are introduced discussing the principles and applications behind the developments.

KEY WORDS: Jig Separation, Innovation, Moving Screen Type Jig, Fixed Screen Type Jig, Rotating Screen Type Jig, RETAC Jig, Hybrid Jig, Reverse Jig

1. は じ め に

人類は、この地球に住み始めた時から色、形、大きさの違いを利用して着目したものを手で選び分け（手選）、利用してきた。ふるい分けという操作も、農耕が始まる頃から行われていたと考えられる¹⁾。やがて、人々は比重の異なる粒子が水の流れの中で示す挙動に違いがあることに気付き、種々の比重選別法を工夫する。16世紀に出版された採鉱冶金技術書“De Re Metallica”²⁾には、ハンドジグなどの比重選別や手ふるいに関する記述がある。18世紀以降に磁選、静電選別、多油法などが発明されるが³⁾、19世紀の終わりまでその発展の歩みは遅かった。様々な機種が開発され普及し始めるのは、19世紀後半に実用化された内燃機関や電動機などの動力技術が目覚ましい向上を遂げる20世紀まで待たなければならなかった³⁾。

20世紀後半からICT技術の発展とあいまって、種々のセンシング技術を用いた多様なソーティング技術が開発され、資源処理以外の分野で活用されるようになってきた^{4,5)}。資源処理の分野でも、稼行対象の鉱石が低品位化、複雑化するに伴い、微粒子処理に適用可能な物理選別法の確立が急務となり、多くの新技術が開発された。そこでは色々なイノベーションがなされており、その多くは周辺技術の発展やニーズの高まりと密接なかかわりを有しており、今後の飛躍的な展開が期待されている。

本総説では、代表的な比重選別の一つであるジグ選別を取り上げ、その技術革新の歩みと最新の研究開発の動向について述べる。なお、本文の一部に著者らの既報の湿式比重選別に関する総説⁶⁾と重複する部分があるが、それぞれの総説としての独立性と説明の便宜のうえから容赦を請う次第である。

2. ジグ選別の原理とジグ選別機開発の歩み

ジグ選別は、粒子の沈降速度が比重により異なることを利用して、水中の網上にある粒子層に上下に脈動する水流を与え、粒子を比重順に網上で成層させ、分離する技術である。

Fig. 1は、ハンドジグ選別の原理⁷⁾を示したものである。今、底に網を張った箱の中に粒子群を入れ、この箱を急に水に漬けると、箱の底部から浸入する水の上昇流により粒子群がいったん流動・浮揚し、次に沈降する。この浮揚時に軽い粒子（比重の小さい粒子）は早く上昇し、重い粒子（比重の大きい粒子）はゆっくり上に移動する。また、沈降時には、重い粒子が早く沈下し、軽い粒子はゆっくり沈降する。沈降が終了した時点で、箱を上げ、再び急に箱を下げ水に漬けるという操作を数回行くと、箱の中では比重順に成層した粒子沈積層ができる。Fig. 2は、16世紀ヨーロッパの選鉱場の風景²⁾を示したものであり、粉碎した鉱石からハンドジグを用いて金のような比重の大きい粒子を回収している様子が描かれている。しかし、人力によるハンドジグでは処理できる対象物とその量には限りがあり、幅広く利用されるまでには至らなかった。

電動機や内燃機関が19世紀後半から20世紀初頭にかけて実用化され、普及し始めるに伴い、機械駆動装置で網を可動させるジグ選別機が開発された。Fig. 3に示すHancockジグ⁸⁾はその代表的なもののひとつであり、ハンドジグのように網を上下に動かす

*2013年3月12日受付 2013年4月9日受理

1. 正会員 北海道大学 名誉教授

2. 正会員 北海道大学 准教授 大学院工学研究院環境循環システム部門

3. 正会員 北海道大学 教授 大学院工学研究院環境循環システム部門

[著者連絡先] TEL & FAX: 011-706-6314 (恒川)

E-mail: tuneakawa@eng.hokudai.ac.jp

キーワード: ジグ選別, 技術革新, 可動網型ジグ, 固定網型ジグ, 回転網型ジグ, RETACジグ, ハイブリッド・ジグ, リバース・ジグ

Fig.1 Principle of hand jig.

Fig.3 Outline of Hancock jig.

(a) Denver/Harz jig

(b) Baum jig

Fig.4 Outline of Denver/Harz jig (a) and Baum jig (b).

可動網型ジグで、網製の底面からなる選別箱 A を水槽 B の中に置き、選別箱を斜め上下に可動させる。選別箱中にフィードされた粒子群は横方向の水流と上下する脈動水流により一方向（排出側）に移動しながら比重順に成層し、比重の小さい粒子群は選別箱からオーバーフロー産物として回収される。比重の大きい粒子群は下流側の網の一端に作られた門から排出されるか、網下に落ちて水槽で回収される。このような可動網型ジグは、粒子群を載せた網を上下に駆動することができる機械装置の能力に上限があるため、フィード量の増加に対応して網面積も広げることが難しい。

このような問題を解決するため、網を固定して、上下方向の脈動水流だけを機械的に与えるように、あるいは圧縮空気などを利用して脈動水流を生じるように工夫したジグ選別機⁹⁾を示す。同図 (a) のジグは、Harz ジグあるいは Denver ジグと呼ばれるもので、水を満たしたタンクは、上部が二つに仕切られ、下部が連結しており、U 字管に似た形状をしている。左の部屋ではプランジャーあるいはダイアフラムで水面を上下に移動させ、これに連動して上下に脈動する水流を右の部屋（網室）に作り出す。網室には固定網（床網）が置かれ、網上の粒子層（ベッド）をこの脈動水

Fig.2 Application of hand jig in the 16th century (from "De Re Metallica").

Fig.5 Outline of TACUB jig.

流の作用で比重順に成層させる。Harz ジグではプランジャーを、Denver ジグではダイアフラムを使う。機械的に脈動水流を与えるタイプでは、波高や波形などの脈動条件を変更・調節するのが容易でない。

Baum ジグ (Fig. 4 (b)) は、プランジャーやダイアフラムの代わりに圧縮空気を用い、空気室内へ圧縮空気を入・排気することで脈動水流を発生させるので、脈動条件の調節が容易であり、選炭分野で広く使われている。しかし、ハッチ（床網の下部屋）が U 字型をしており、装置が大きくなると網室に均一な脈動を生じさせるのが難しくなり、Baum ジグの大型化には限界がある。高桑健北大名誉教授ら¹⁰⁾は、Fig. 5 のように、空気室を床網の下に置く TACUB (Takakuwa Air Chamber Under Bed から命名) ジグを開発した。本ジグでは、処理量に応じて床網面積を大きくし、この床網の下に適切な容量と数の空気室を設置できるので、処理能力の増大や装置の大型化に対応できる。TACUB ジグはその後ドイツで Batac ジグの名称で製造、販売されるようになり、選炭分野で世界的な標準機として普及するに至っている⁹⁾。Fig. 6 は選炭工場で Batac ジグを 2 槽直列に並べて操作している様子を示したものである。左端からフィードされた粒子群は、右方向に流れる水の中を上下方向の脈動水流の作用を受けながら移動し比重順に成層していく。各槽の右端には下層産物の排出口があり、第

Fig.6 Outline of Batac jig used in coal preparation plant.

Fig.7 Outline of Feldspar jig.

Fig.8 Outline of Altair centrifugal jig.

Fig.9 Outline of Kelsey centrifugal jig.

1層目では比重の大きい粒子（ズリ）が、第2槽目では中間の比重の粒子（2号炭）が取り出される。また、第2槽からは上層産物として比重の小さい粒子（精炭）が回収される。排出口での排出機構には色々な工夫がされており、一例としてベッド中にフロートを浮かべて下層産物層の高さを検出し、排出量を自動制御する方法がある。Sanderら^{6, 11)}は、石炭を600t/hで処理するためにBaumジグとBatacジグを用いる場合を比較し、Batacジグの方が少ない台数、空気量で選炭でき、運転操作性もよいことを報告している。

フィード粒子が細くなると、上述の方法では成層した粒子を精度よく回収できなくなるので、比重の大きい粒子は床網の網目を通過させてハッチに回収することも行われる。この場合、比重の小さい粒子がハッチに紛れ込むのを防ぐため、Fig. 7に示すようにRagging粒子を床網上に敷き、Ragging層をフィルターにして比重の大きい粒子のみをハッチに排出する。選炭の分野でRagging粒子に長石（Feldspar）を使ったことから、この型のジグはFeldsparジグと呼ばれている⁹⁾。

3. 微粒子処理のためのジグ選別機の開発

一般にジグで処理するのに適したフィードの粒度範囲は0.5-200mmと考えられているが、ジグ運転時の波高を低くして脈動数を多くし、比重の大きい産物の排出機構を改良すると、Batacジグでは粒度0.1-3mmのものを処理できるようになる¹¹⁾。さらに微粒のものを迅速に高い分離精度で処理するために、遠心場を利用したジグやPacked Columnを用いたジグも開発されている。前者の代表的なものにAltair (Campbell) 遠心ジグやKelsey 遠心ジグがある^{12, 13)}。

Altair 遠心ジグは、Fig. 8に示すように、比重の小さい産物（軽粒子産物）、比重の大きい産物（重粒子産物）を排出するためのLaunderを有する静止円筒部とその円筒部の中で回転するBowl

部からなる。この回転Bowl内部には円筒スクリーンがあり、そのスクリーン上にはザクロ石粒子のようなものからなるRagging層が遠心力を利用して形成されている。フィードのスラリーは回転Bowlの中心部に上部から供給され、散布板によりRagging層の表に分散される。また、この層の裏に加圧水が周期的に注入され、Raggingやフィードの層はほぐれと絞まりの現象を繰り返す。比重の大きい粒子はこの間に沈降し、Ragging層とスクリーンを通過して、重粒子産物用Launderに回収される。一方、通過できなかった比重の小さい粒子はスクリーンの下部末端より軽粒子産物用Launderへ回収される。選別は、40-60 g程度の遠心場で行なわれる。

Kelsey 遠心ジグの概要を、Fig. 9に示す。回転ローターの円周部に多数のハッチがあり、そのハッチの上部はローター内にある円筒スクリーン（Mesh）と結ばれている。このスクリーンの上には、遠心力を利用してRagging層が形成される。フィードのスラリーは中心パイプより導入され、Ragging層に向かう。ハッチ内の水はダイアフラムにより周期的に脈動しており、スクリーン上の粒子層のほぐれと絞まりの現象が繰り返し起こる。比重の小さい粒子はこの間にRagging層の上を移動し、装置上部より回収される。比重の大きい粒子はRagging層とスクリーンを通過し、重粒子産物として回収される。選別は、100 g程度の遠心場で行なわれる。

Fig. 10に、Packed columnジグ^{6, 14, 15)}の概要を示す。同ジグのカラム部分には、傾斜プレートをジグザグに、あるいは螺旋形のプレートを放射状に充填してある。また、脈動発生装置により脈動水流を付与できる。上部カラムの下にフィードされた粒子は、カラム部内で上昇水流および脈動水流の中を移動し、その比重に応じて上昇あるいは沈降することを繰り返す。その結果、比重の小さい粒子はカラム上部より、比重の大きい粒子はカラム下部より高い分離精度で回収される。

Fig.10 Outline of packed column jig.

4. 可動網型ジグの復活

フィード粒度が200mm以上になると、固定網型のジグでは、床網上の粒子群を流動させるために必要な脈動水流をプランジャーやダイヤフラム、あるいは圧縮空気を利用して与えることが難しくなる。しかし、最近の油圧駆動装置の発展に伴い、可動網型ジグの開発が可能になった。Fig. 11にRomジグ^{11, 16)}を示す。本ジグでは、床網のフィード側が固定されておらず、フィード端が油圧で持ち上げられ、重力で落下する構造になっており、粒度40-350 mmの石炭を処理できる。

Fig. 12に、Inline Pressure ジグの概要を示す¹⁷⁾。このジグは密閉されており、その内部は水とスラリーで満たされ、最大で0.2MPa程度の加圧状態にある。網は円形をしており、油圧駆動のシャフトで上下動する。網上にはRagging層がある。中央上部からフィードされた粒子は、網上でRagging層と共に上下動し、比重の大きい粒子はRagging層を抜けて下に落ち、比重の小さい粒子はRagging層の上を移動して周辺部のTailboardに排出される。Inline Pressure ジグは数mm～30mm程度の粒度のフィードに対応でき、また水を循環させて使うので給水や水処理のコストを減らせるといった利点がある。

5. ジグ選別の限界への挑戦

TACUB ジグは、床網の下に空気室があるため、脈動条件の正確な調節・制御ができ、選別槽を大きくしても空気室の数を増やすことで対応できるので、大型化が容易である。著者らは、このTACUB ジグの特徴に着目し、資源リサイクリング分野で活用するため種々の改良を加え、これをRETAC ジグと呼ぶことにした。本ジグにより廃コピー機に使用されているプラスチックを材質別に回収することを検討し、優れた選別成績が得られることを基礎研究およびパイロット試験の結果に基づき実証した¹⁸⁾。このパイロットプラントで用いた2槽直列式ジグ選別機の概要をFig. 13に示す。本プラントで処理しているプラスチックの主なものはPS、ABS、PETであり、それぞれの比重は1.06、1.18、1.71であるので、これら3種プラスチック混合物をジグ選別すると、

Fig.11 Outline of Rom jig.

Fig.12 Outline of Inline pressure jig.

1槽目からは下層産物としてPETが、2槽目からは上層産物（オーバーフロー産物）としてPSが、また下層産物としてABSが回収される。Table 1に、同プラントで得られた選別結果の一例を示す。高純度の産物が極めて高い分離効率（ニュートン効率）で選別・回収されている。

ジグ選別機では、Fig. 6およびFig. 13に示すように下層産物をロータリー排出機などで機械的に排出するため、軽い下層産物の場合にはいったん成層したものが排出時に乱され、ジグ内で成層しているものより低い品位の産物が回収される¹⁹⁾。この問題を解決するため、Fig. 14に示すように、ロータリー排出機をなくし、代わりに選別室の排出端に仕切り板を設置し、選別室内の下層産物が脈動水流とフィード水流の動きに伴い仕切り板下部の空隙を通り、下層産物回収室に移動するように工夫した。回収室内の下層産物は室内に充滿し、脈動水流の上昇時にオーバーフローしていくため、品位の低下は生じない。本回収装置付きジグを用いてPC（比重1.20）-PVC（比重1.49）混合試料を選別すると、上層産物（PC）および下層産物（PVC）ともに品位99%のものが得られる¹⁹⁾。

ジグ選別における選別成績は、脈動水流の波高、サイクル数、波形などの影響を大きく受けるため、最適脈動条件を見出すこと

Table 1 Grade of the products and Newton's efficiencies (η) in continuous test at recycling plant shown in Fig. 13

Jig	Product	Grade (wt.%)			η
		PET	ABS	PS	
1	Under	99.7	0.3	0	0.998
2	Under	0	99.3	0.7	0.904
	Over	0	8.3	91.7

Fig.13 Jig process and its control system.

は重要である。そのため種々の条件下で多くの実験を繰り返し、最適条件を決めているが、より簡便な決定法が求められている。著者らは、ジグ選別槽内の粒子層の流動化状態と選別性の関係を調べ、最小流動化速度に近い上昇水流を与えることができる脈動条件で最も良好な選別成績が得られることを明らかにした²⁰⁾。また、Fig. 15 に示すように、圧力およびレベルセンサーをジグ選別槽内の粒子層下部と水面上部にそれぞれ設置し、段階的に波高を高めながらジグ選別機を運転して、粒子層における圧力損失と波高との関係を求めると、粒子層の流動化状態をモニタリングでき、流動化開始点も求められることを見出した²¹⁾。Fig. 16 は、石炭（比重 1.36）- 石英（比重 2.67）混合試料について、サイクル数を 20/min として 15s 毎に段階的に波高を増大させながら圧力損失を計測し、圧力損失 - 波高線図を描いたものである。同図において直線の勾配が変化する点が流動化開始点であり、この流動化開始点を少し超えた波高 6mm でジグ選別すると、良好な選別成績が得られる。

ジグ選別では粒子間の比重差が大きいほど選別が容易になるので^{6, 7, 9)}、比重差がわずかな粒子相互の選別は難しい。しかし、空気中で飽和した水中では、疎水性の粒子表面に微細気泡が析出・付着し、その粒子の見かけ比重が小さくなり、比重差が増大する。このことに着目し、比重と表面疎水性の両者の差を利用する Hybrid ジグ²²⁾を開発した。本ジグでは、Fig. 17 に示すように、RETAC ジグの水室に空気を導入し微細気泡を発生させながらジグ選別をする。本ジグを用いると、例えば同じ比重 (1.54) の PVC と PE の場合、PVC の方がより疎水性であるため、上層産物として PVC を、下層産物として PE を得ることができ、品位 99.9% の両産物が回収できる。また、プラスチックの濡れ性に差がない場合でも、湿潤剤を添加して対象プラスチックの濡れ性を適切に調整すれば、わずかな比重差のプラスチック相互のジグ選別が可能になる²³⁻²⁵⁾。ジグ選別は近年注目を集めている深海底鉱物資源の選鉱法としても有望であり、著者らはコバルトリッチ

Fig.14 Outline of RETAC jig with new discharge device.

Fig.15 Setting of sensors in separation chamber of RETAC jig shown in Fig.5.

Fig.16 Plot of loss of pressure to displacement (Frequency:20/min).

クラスト (Cobalt-rich Ferromanganese Crust and Nodules, 以後 CFCN と略記) からの基盤岩の除去がジグ選別により効率的に行えることを報告した²⁶⁾。しかし、フィード粒度が 0.5mm 以下の微粒子になると、除去効率は低下した。そこで、ドデシルアンモニウムアセテート (DAA) が選択的に CFCN 表面を疎水化することに着目し、DAA を添加後、Hybrid ジグで選別すると、品位 99% の CFCN 精鉱を上層産物として得ることができた²⁷⁾。

通常のジグ選別は水中で行われるため、水より軽い物質相互の選別は不可能であるが、Fig. 18 に示すように、RETAC ジグの選別室の水中の上部にもう一つの網 (天網) を設けると、床網と天網の間にフィードされた粒子は、上下動する脈動水流により浮揚、沈降を繰り返しながら天網の下に比重順に成層する。この天網付きの RETAC ジグを Reverse ジグ²⁸⁾と名付け、Fig. 19 のような連続式 reverse ジグを開発した。PP (比重 0.91) -HDPE (比重 0.96) 混合物について選別したところ、回分試験で品位 100% の上部および下部産物を、連続試験で品位 99% の下部産物が得られた。

この他の新しい試みとして、Lin ら²⁹⁾は、弱い磁場の中でジ

Fig.17 Outline of Hybrid jig.

Fig.18 Outline of the batch type reverse jig.

(a) Overview

(b) Cross section of discharge side

Fig.19 Outline of the continuous type reverse jig.

グ選別をする Magnetic ジグを提案し、微粒の難処理混合物の選別に適していることを理論的に検討して報告している。この選別法はジグ選別と磁選の複合技術であり、筆者らの Hybrid ジグをジグ選別と浮選の複合技術と考え、ジグ選別の新しい技術開発の方向の一つにハイブリッド化を挙げることができる。

6. む す び

ジグ選別は、古い時代より選鉱、選炭で使われてきた技術であるが、多くの人間の英知と経験に基づき弛まめ技術革新が図られ、用途も広まってきている。今後も、ICT 技術をはじめとする周辺技術の進歩とあいまって、発展を続けていくであろう。様々なイノベーションを経て選別性の限界が限りなく縮小し、ジグ選別が“分けるのはワケない技術”へと持続的に進化していくことを期待してやまない。

References

- 1) Kinki Funtai Kenkyujo: *Huruivake, Bunkyu, Hunsai*, (Kinki Kogyo, 1979) pp.1-51.
- 2) Agricola (Trans. by H.Saegusa, Edit. By T.Yamazaki): *De Re Metallica-Zenyaku to Sono Kenkyu-Kindai Gijutsu no Syutaisei*, (Iwasaki Gakujutsu Syupansya, 1968), pp.237-315.
- 3) K.Tomita: *Hikinzoku Kobutsu no Senkohou*, (Gihodo,1974), pp.1-58.
- 4) S. Ito: *Journal of MMIJ*, **113** (1997), 908-911.
- 5) M. Tsunekawa: *Handbook of Inverse Manufacturing* (Ed. by F. Kimura et al.), (Maruzen, 2004), pp.355-367.
- 6) M. Tsunekawa, K. Hori, N. Hiroyoshi and M. Ito: *Journal of MMIJ*, **121** (2005), 467-473.
- 7) B. A. Wills: *Wills' Mineral Processing Technology*, (Elsevier, 2006), pp.225-245.
- 8) T. Takakuwa: *Senko Kogaku*, (NRC Research Corp., Tokyo,1979), pp.66-93.
- 9) E. G. Kelly and D. J. Spottiswood: *Introduction to Mineral Processing*, (John Wiley & Sons, 1982), pp.250-254.
- 10) T. Takakuwa and M. Matsumura: *Proc. 2nd ICPC* (1954), Paper No. AII8.
- 11) G. L. Sander, D. Ziaja and J. Kottmann: *Coal Prep.*, **22** (2002), 181-197.
- 12) M. K. Mohanty and R. Q. Honaker: *Coal Prep.*, **20** (1999), 85-106.
- 13) M. K. Mohanty, R. Q. Honaker and A. Patwardhan: *Miner. Eng.*, **15** (2002), 157-466.
- 14) F. F. Peng, Q. Dai and D. C. Yang: *Coal Prep.*, **22** (2002), 199-217.
- 15) D.C. Yang, R. van Reenan and V. Bhimsan: *Recycling and Waste Treatment in Mineral and Metal Processing: Technical and Economical Aspects* (B. Bjorkman, et al., Ed.), (TMS, Pennsylvania, 2002), pp.305-312.
- 16) M.Wesp, H.Thelen, H.Muller and G. Wuster: *Aufber-Tech.*, **30** (1989), 746-753.
- 17) A. B. Nesbitt, W. Breytenbach, P. J. van der Plas: *Minerals Engineering*, **18** (2005), 1-7.
- 18) M. Tsunekawa, B. Naoi, S. Ogawa, K. Hori, N. Hiroyoshi, M. Ito and T. Hirajima: *Int. J. Miner. Process.*, **76** (2005), 67-74.
- 19) M. Tsunekawa, R. Kobayashi, K. Hori, H. Okada, N. Abe, N. Hiroyoshi and M. Ito: *Int. J. Miner. Process.*, **114-117** (2012), 27-29.
- 20) K. Hori, M. Tsunekawa, N. Hiroyoshi and M. Ito: *Int. J. Miner. Process.*, **92** (2009), 103-108.
- 21) M. Tsunekawa, J. Akimoto, W. Ogiko, D. Ochi, N. Hiroyoshi and M. Ito: *Journal of MMIJ*, **129** (2013), 284-289.
- 22) K. Hori, M. Tsunekawa, M. Ueda, N. Hiroyoshi, M. Ito, and H. Okada: *Material Transactions*, **50** (2009), 2844-2847.
- 23) M. Ito, M. Akatsuka, Y. Kuwayama, K. Hori, N. Hiroyoshi, and M. Tsunekawa: *Proceedings of Processing Materials for Properties* (2009), 315.
- 24) M. Ito, M. Akatsuka, Y. Kuwayama, K. Hori, E. Ishida, N. Hiroyoshi, and M. Tsunekawa: *Proceedings of EcoDesign2009* (2009), Paper OS-3A-8.
- 25) M. Ito, M. Takeuchi, E. Ishida, N. Hiroyoshi and M. Tsunekawa: *Proceedings of 26th IMPC* (2012), Paper 358.
- 26) M. Ito, M. Tsunekawa, E. Yamaguchi, K. Sekimura, K. Kashiwaya, K. Hori and N. Hiroyoshi: *Int. J. Miner. Process.*, **87** (2008), 110-105.
- 27) M. Ito, T. Takahashi, K. Sekimura, N. Hiroyoshi, and M. Tsunekawa: *Proceedings of 10th Int. Symp. East Asian Recycling Technology* (2009), 302.
- 28) M. Ito, M. Tsunekawa, E. Ishida, K. Kawai, T. Takahashi, N. Abe and N. Hiroyoshi: *Int. J. Miner. Process.*, **97** (2010), 96-99.
- 29) I. J. Lin, M. Krush-Bram and G. Rosenhouse: *Int. J. Miner. Process.*, Part1, **50** (1997), pp.143-159; Part2, **54** (1998), 29-44; Part3, **55** (1998), 61-72.