

## 廃プラスチックのリサイクル技術について\*

福 田 俊 男\*\*

Technology for Waste Plastics Recycling

Toshio FUKUDA

The overall amount of waste plastics in Japan reaches 9.5 million tons per annum, half of which comes from municipal solid waste and the other half is from industrial waste. It is said that 42% of total waste plastics are now recycled, but the majority of them are just burnt for thermal recycling, and very small amount is actually reused as raw materials for a chemical process. This means that the waste plastics recycling in Japan is still at a low level.

UBE Industries, Ltd. and Ebara Corporation have jointly developed a new process for the efficient recycling of waste plastics. It is called EUP (Ebara-UBE-Process), a unique process of two-stage gasification under pressure. It makes an effective conversion of all kinds of waste plastics, even contaminated, into synthesis gas, which is a raw material for chemical and industrial use. The Ministry of Trade and Industry, Japan and its sub-organization are financially supporting this process as one of the most prominent technologies under the Law for Container and Package Recycling.

This document reports the outline and the development status of the process.

## はじめに

平成9年度における我が国のプラスチック生産量は1,521万トン/年にのぼり、この内不要物として廃棄された廃プラスチック（以下廃プラ）の総量は949万トンである。この内訳は、一般廃棄物として排出された分が478万トン/年、産業廃棄物として排出された分が471万トン/年である。この内有効利用された総量は399万トン/年、未利用分は550万トン/年であり、有効利用された用途は下記の通りである。

再生利用：113万トン/年（12%）

固形燃料他： 6万トン/年（1%）

発電付焼却：147万トン/年（15%）

熱利用焼却：133万トン/年（14%）

合計 399万トン/年（42%）

一方、国の廃棄物に対する基本方針は環境保全及び資源循環型社会の構築を目的に、リサイクルに向けた諸施策を推進している。廃棄物の中でも特に焼却時にダイオキ

シン類発生の一因と目され、また高カロリーに伴う焼却炉寿命短縮の要因になっている廃プラは、早急なリサイクルシステムの構築が世界的規模で推進されている。我が国においては上記の通りサーマルリサイクルを含めた廃プラ有効利用率が約42%，フィードストック（ケミカル）リサイクルを含むマテリアルリサイクル率は13%で、主要先進国の一角を占める我が国の工業水準からして世界に誇りうるレベルに達しているとは言い難い。斯様な状況から政府は廃プラのマテリアルリサイクルの推進を目的に、容器包装リサイクル法、家電リサイクル法等を制定し、廃プラの再商品化事業を経営面で担保する法制化を行った。この政府方針に呼応する形でマテリアルリサイクルによる廃プラ再商品化の技術開発が各方面で精力的に行われているが、その中で容器包装リサイクル法における廃プラのフィードストックリサイクル技術として認定されている廃プラの加圧二段ガス化プロセスを中心に、広域輸送を伴う廃プラの圧縮・梱包システムまでを含めたその概要を報告する。

## I. 廃プラの加圧二段ガス化プロセス

## 1. プロセスの概要

本プロセスは容器包装廃プラの再商品化技術として油化、高炉還元プロセスと共に認定され、その実証プラン

\* 平成11年11月11日本会第103回例会において発表

\*\* 宇部興産㈱

平成11年9月1日受理

トが NEDO プロジェクトとして1999年10月山口県宇部市に完成する運びになっている。本プロセスの開発コンセプト及び概要は次の通りである。

#### (1) 開発コンセプト

廃プラの化学原料化という命題を踏まえ、本プロセス開発の基本方針を下記のように設定した。

- ① 塩素含有廃プラを包含した一括ガス化原料化
- ② 不燃物の分別は、加圧ドライフィードシステムの供給限界を越える大型夾雜物の除去のみを対象にした簡易分別を基本とする。
- ③ 原料廃プラは成分変動があるという前提の下に、その変動を吸収するいわゆるタフなプロセスに設計する。
- ④ 原料中の塩素に起因するダイオキシン類については発生してから除去するより、発生そのものを極限まで抑制する方式とする。
- ⑤ 合成ガスを使用する化学プラント類は一般的に高圧下で運転されているので加圧ガス化システムを採用する。

#### (2) プロセスの紹介

本技術は内部循環流動床の低温ガス化炉及び旋回流の高温ガス化炉をシリーズで直結した加圧操作条件下のガス化システムである。この二段ガス化システムにより固形物を中心としたあらゆる有機廃棄物が水素、一酸化炭素等単体分子レベルにまで分解され、基礎化学品合成用原料としての利用の道を開くことができる。ここでは実証プラントの主原料として用いる容器包装廃プラのガス化化学原料化について説明する。

- ① 自治体によって分別収集された塩ビ系プラスチックを含む全ての容器包装廃プラは、加圧ドライフィードシステムによる低温ガス化炉への定量・円滑な供給を目的に簡易減容成形を施す。

② 減容廃プラ（大型ペレット状）を加圧内部循環流動床低温ガス化炉（5~20 kg/cm<sup>2</sup>G, 600~850°C）にフィードする。一方流動床下部よりガス化・流動化剤として、酸素及びスチームを供給し部分酸化反応を行う。低温ガス化炉で生成されるガス成分は CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, HCl, タール, チャー等である。

③ 低温ガス化炉生成ガスは直結している高温ガス化炉（5~20 kg/cm<sup>2</sup>G, 1300~1400°C）にフィードされ、同時に供給される酸素及びスチームによりタール、チャーのガス化を行い、目的とする CO, H<sub>2</sub> 主体のガスを生成する。

④ 高温ガス化炉生成ガス中には溶融スラグの他、廃プラ中の塩化ビニール等塩素含有廃プラに起因する HCl, NaCl 等が含有されているので、高温ガス化炉下部に設置されたガスの直接水冷却（クエンチ）システムにより、同時に生成するスラグ分を固化分離すると共に生成ガス中の塩素化合物除去を行う。クエンチにより直ちにガス温度が 200°C 前後まで冷却されるので、社会問題化しているダイオキシン類の再合成の懸念も合わせて解決できる。

⑤ クエンチされた生成ガスは更にガス洗浄塔にて水洗、脱塩素化を行う。その結果得られる生成ガスは現段階では計算値に基づくが、表1に示す通り CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> を中心とする組成のガスになる。このガスは従来の重質油、残渣油あるいは石炭等化石原料からガス化により得られる合成用ガスに比べて何ら遜色のない化学原料用合成ガスである。

上記加圧二段ガス化システムの主要部については図1に示す。

表1 原料廃プラ及び製品ガスの組成（計算値）

- 廃プラの組成(ドライベース)		- 製品ガス組成(計算値)	
• C	: 67.48wt%	• H <sub>2</sub>	: 49.9vol%
• H	: 9.45	• CO	: 33.6
• O	: 9.36	• CO <sub>2</sub>	: 15.2
• N	: 0.31	• N <sub>2</sub> +Ar	: 2.3
• S	: 0.01	- CO+H <sub>2</sub>	: 2,062Nm <sup>3</sup>
• Cl	: 3.39	(廃プラトン当たり)	
• Ash	: 10.00	- 冷ガス効率	
- 発熱量(HHV) : 8,340kcal/kg		: 67~72%	

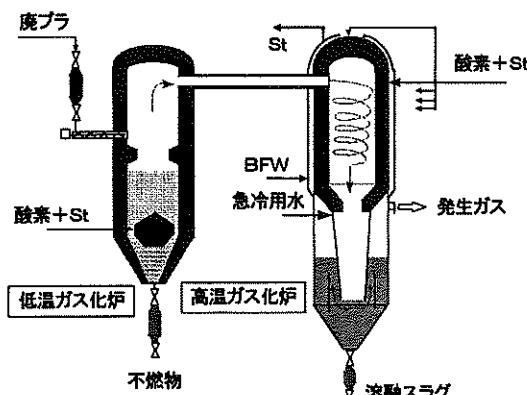


図 1 システムの主要部

## (3) プロセスの特徴

①本プロセスは全酸化燃焼とは根本的に異なる還元雰囲気下でのガス化プロセスである。従い、下記理由によりダイオキシン類が原理的に生成しない構造になっている。

—発生抑制：還元雰囲気下にある為、低温ガス化炉内においてもダイオキシン類は生成しないと想定されるが、仮に生成したとしても低温ガス化炉に直結している 1300°C 以上の還元雰囲気高温ガス化炉にて完全に分解される。

—再合成抑制：一般にダイオキシンは 300-400°C 前後、酸化雰囲気下における再合成が最も懸念されるが、本プロセスは 1300°C 以上のガスが水と直接接触するいわゆるクエンチ冷却をプロセス内

に組み込んでいるので瞬時に 200°C 前後まで冷却され、然もプロセス全体が終始還元雰囲気下にある為、ダイオキシン類再合成の懸念は極めて少ない。

②事前の選別・前処理を行わないで、塩素含有廃プラをガス化原料に使用できる。

③廃プラ中に含まれる金属類は還元雰囲気下の低温ガス化炉（加圧流動床）下部より酸化される事なくクリーンな状態で排出されるので、理想的な形でリサイクルに利用できる。

④廃プラ中の灰分及び同伴土砂等無機物は、最終的に 1300-1400°C の高温ガス化炉中で溶融、ガラス状の水碎スラグとして排出されるので、有害物の溶出が抑えられると共に建設資材他としてリサイクルの可能性がある。

⑤発生ガスは水洗設備により脱塩素化され、更にガス精製設備で不純ガスを除去するので、化学原料として使用可能なレベルの高純度水素ガスをリサイクル製品として取り出す事ができる。

⑥廃プラの他一廃 RDF、シェレッダーダスト等有機廃棄物との併用も可能である。

⑦本プロセスは全体システムとして、環境悪化に繋がる有害物を外部に排出する事がないのでシステムそのものがゼロエミッションアプローチ構造になっている。

上記加圧二段ガス化プロセスの全体フローを図 2 に示す。

## 2. 研究開発状況

加圧二段ガス化プロセスを支える各要素技術の開発状

## 廃棄物加圧二段ガス化(ケミカルリサイクル)全体フロー

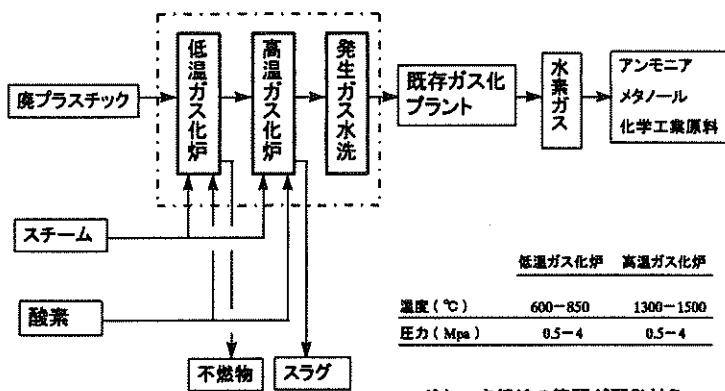


図 2 プロセスの生体フロー

況について述べる。主な要素技術開発項目としては、廃プラの固化のみを目的とした省エネ型簡易成型機、高温・加圧且つ可燃性ガス雰囲気からの固体物排出、流動床の炉床負荷、コールドモデルによる旋回流型ガス化炉におけるガス及び溶融スラグの挙動、供給酸素及びシステムとガスの混合状況及び反応を含めたシミュレーション、各種プラスチックの熱分解特性及び高温ガス化炉下部に設置されたガス急冷システムの構造等が挙げられる。上記各々の開発成果は現在実証プラント建設中という状況からまだ発表する段階には至っていないが、要素技術開発結果から得られた知見に基づき実用機における性能の予測を以下に述べる。

#### (1) 原料の性状

実証プラント用原料として想定している一般廃棄物分別廃プラの組成は、某都市の3年間に亘る分析データより表1のように設定した。

#### (2) 高温ガス化炉急冷後の生成ガス組成

高温ガス化炉下部に設置された急冷システム出口ガスのドライベースガス組成のシミュレーション結果を表1に示す。冷ガス効率の計算結果に5%の差が生じる理由は低温ガス化炉の流動化ガスとして供給するシステムの使用量に左右されることに起因しており、来る実証試験により連続運転上支障を来さない範囲で可能な限りその使用量を削減することを計画している。目標としては化石原料ベース実用プラントと同等のレベルである70%以上に置いている。

#### (3) カーボン転化率

二段におけるガス化と高温ガス化炉での滞留時間を組合せ、その相乗効果を期待して転化率95%以上を当初の目標としている。実証プラントでの確認を行うが必要に応じて未燃カーボンをリサイクルすることにより、99%以上の達成を最終目標に置いている。尚、未燃カーボンのリサイクルに必須のリサイクルカーボンと原料廃プラの混合成型については、既に試験機にて技術確立済みである。

#### (4) 廃プラの発熱量変動

表1に原料廃プラの組成を示しているが、その成分変動に基づく発熱量の変動は年間を通した季節変動を考慮しても、その多くが±5%の範囲内にあることが分かった。これに安全ファクターを考慮して廃プラの発熱量変動を±8.5%と設定した。更に成分変動の他に発熱量変動に影響を与える要因として、成型後の廃プラ嵩比重の変動を考慮する必要がある。以上の発熱量変動要因をトータルして±10%を原料廃プラの発熱量変動範囲と設定した。焼却と異なり部分酸化反応条件下における原料発熱量の±10%は、高温ガス化炉の温度変化が±150°Cに相当するというシミュレーション結果が得られてい

る。1300°C以上の条件下で運転される高温ガス化炉における±150°Cという温度変動は安全面、ガス組成及び溶融スラグの挙動といった観点から重大な問題を引き起こす可能性も有り得るので、その対策として廃プラの供給システム及び低温ガス化炉で想定される変動を可能な限り吸収し、その変動幅の最小化を実現する条件の確立が本二段ガス化システム開発成功のキーファクターである。本課題の解決に向けたベンチスケールによる要素技術開発実験にて解決策を用意しているのでそれの実証プラントによる確認を行いう予定である。

上記項目の解決により原単位面で化石原料ベースの工業プラントに勝るとも劣らない性能を有し、且つ1.(1)③項に述べたいわゆるタフなプロセスが完成すると考えている。

#### 3. ガス化技術開発の一般的動向

部分酸化ガス化技術は欧米で重質油、残渣油等液体原料をベースに開発され、アンモニア他基礎化学品の合成に多数建設、実用化されている。10数年前には石炭のガス化技術が開発され、我国で大規模化学工業プラントとして実現し、固体の原料化も可能となった。しかしながら石炭のガス化については前処理として石炭を水スラリー化(CWM: Coal Water Mixture)するのが一般的で、石炭を液状化しなければならないという問題点も合わせ持っている。廃プラについてはスラリー化が技術的に難しく、次善の策として廃プラ自身の溶融又は重油に廃プラを混合・加熱・溶解させ、ガス化原料化を計るというプロセスが米国を中心に開発されている。又、我国においても廃プラのガス化メタノール合成技術が開発研究されているが、まだ実用化には至っていない。本技術は従来のガス化プロセスから発想を転換し、荏原製作所が保有する内部循環流動床技術、石炭の加圧流動床による燃焼技術及び宇部興産が保有するガス精製技術の統合により実現する加圧二段ガス化技術で、廃プラ中の不燃物抜き出し及び塩ビ系プラスチックに起因する塩素問題を同時に解決しようとするプロセスである。

#### 4. 廃プラのフィードストックリサイクル実用化への課題

- (1) リサイクル不適物の分別
- (2) 廃プラの嵩比重、組成及び発熱量変動に対するプロセス上の対応
- (3) 廃プラのガス化炉供給にかかる加圧ドライファイドシステムの確立
- (4) 低温ガス化炉における加圧系からの不燃物排出及びその冷却システム
- (5) 高温ガス化炉における耐火物の選定及び腐食対策

## II. 廃プラの高効率輸送システム

### 1. 開発の必要性

容器包装廃プラを始めとする廃プラ、シュレッダーダスト等は一般にその嵩比重が小さく、具体的な一例として中国地方某市的一般家庭から分別された廃プラの自然状態における嵩比重を測定したところ、 $0.03\sim0.06 \text{ t/m}^3$  程度であった。2000年度から施行される容器包装リサイクル法は同法対象廃プラが全国の自治体から個別分散状態で発生し、その再商品化施設は非常に限られた特定地区にしか立地されないことを前提に、広域収集による再商品化を想定している。しかしながら圧縮をしない自然状態の容器包装廃プラは10トン車輌に1トンも積載されないものであることから、厚生省は容器包装リサイクル法の適用を申請する自治体に対して、一律に収集した容器包装廃プラの圧縮及びその梱包、更に10トンを輸送単位とする目的で10トン以上の保管施設の設置を義務づけるに至っている。

従来、自治体は容器包装廃プラを厨芥類と共に焼却を前提に対応策を取ってきたので、分別廃プラの圧縮・梱包・保管という必要性はなかったが、リサイクル法適用を申請する場合には新たに広域における輸送を前提とした、容器包装廃プラの圧縮・梱包システムの確立というインフラ整備が、喫緊の課題として生じている。この社会的ニーズに対応する技術確立を目的に、中国地方某市における一般廃棄物分別廃プラ圧縮梱包システムを中心に、山口県宇部市への圧縮梱包廃プラの一般車輌による輸送に関して報告する。

### 2. プロセスの概要

容器包装廃プラの大幅な輸送効率向上を目的に、一廃分別廃プラの圧縮梱包システムの概要について述べる。

#### (1) 開発コンセプト

- ①全国自治体から分散発生する容器包装廃プラの広域輸送を前提に、その高効率輸送システムの確立に資する。
- ②容器包装廃プラの再商品化技術に認定されているガス化、油化及び高炉還元のいずれの再商品化技術にも対応できる圧縮梱包システムとする。
- ③容器包装廃プラには一部食品残渣が付着していることを前提に、圧縮梱包による防臭機能を附加させる。
- ④容器包装廃プラには付着水があるということを前提に、圧縮梱包による防水機能を附加させる。
- ⑤圧縮梱包廃プラを10トンに達するまで保管義務を負う自治体及び容器包装廃プラのリサイクル義務を負う再商品化事業者における衛生の一時保管を目的に、圧縮梱包廃プラ自体の腐敗を抑制する。

⑥一時保管及び圧縮梱包廃プラのハンドリングが容易である。

#### (2) プロセスの紹介

中国地方某市に設置した廃プラの圧縮梱包実証プラントの概略工程を下記に示す。

- 一廃プラの受入：某市にて分別収集された状態で受け入れる。
- 一破碎：一軸破碎機により 200 mm 程度に廃プラを破碎する。
- 一磁力選別：吊り下げ式磁選機で大物鉄分を分離する。
- 一圧縮・成形：回転する圧縮室内に破碎廃プラを強制供給しながら回転圧縮による圧縮成型を行う。尚、圧縮廃プラの強度維持及び変形防止を目的に、プラスチックネットを圧縮成型廃プラの外周に巻き付ける。
- 一梱包：防臭、液漏れ、腐敗及び飛散の防止等を目的に、ポリエチフィルムによる圧縮成型廃プラの全面を密閉梱包する。
- 一移動：梱包品の外装フィルムを損傷しないよう、専用アタッチメント付圧縮梱包廃プラ搬送車による移動を行う。
- 一保管・出荷：一時的保管及び出荷作業を行う。

#### (3) 実証プラント能力及び製品仕様

- ①原料（分別廃プラ）受入能力：

6 トン/時 (40 トン/日)

—原料嵩比重： $0.03\sim0.06 \text{ t/m}^3$

- ②製品（圧縮梱包廃プラ）生産能力：5.9 トン/時

- ③製品の性状

—製品寸法： $1100 \Phi \times 1000 \text{ H}$

—製品嵩比重： $0.35\sim0.45 \text{ t/m}^3$

#### 3. 実証プラントにおけるフロー

#### 4. 実証プラントによる実験内容

廃プラの圧縮梱包実証プラントは既に設置されており、運転条件の確立に向けてテストを行っている。本年11月よりガス化プラントが実証試験に入る所以降、本廃プラ圧縮梱包実証プラントも本格稼働を行う予定になっており、稼働に伴い下記内容の技術検証及び最適運転条件を確立させることにより、容器包装廃プラの高効率輸送システムの確立に寄与したいと考えている。

##### (1) 圧縮減容化率の向上

- ①嵩比重  $0.35\sim0.45 \text{ t/m}^3$  の運転条件確立及び再現性確認

- ②限界圧縮率の確認： $0.5 \text{ t/m}^3$  の可能性追求

##### (2) 最適フィルムラッピング条件の確立

- ①広域輸送及び再商品化までの保管期間を考慮した最適ラッピング条件の確立

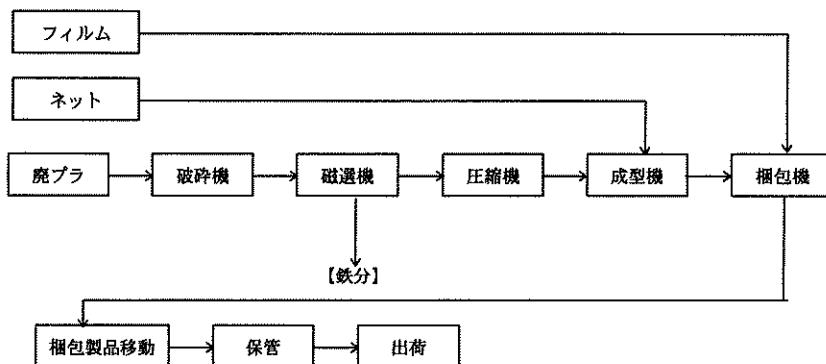


図3 実証プラントにおけるフロー

②衛生管理（臭気、腐敗、液漏れ、飛散等にかかる対策）、保存性、経済性等再商品化事業の永続性にかかる要件を満足する最適ラッピング条件の把握

③梱包時の異物混入による破損等その影響度の把握  
(3) 長期保管の限界把握

①屋外保管条件によるフィルムに対する紫外線の影響  
②屋外での限界保管期間の確認

#### (4) 副資材コストの削減

- ①主要副資材であるフィルムの国産品採用テスト
- ②ネットの国産化対応の可能性
- ③国産副資材による最適巻数の検証及び副資材コスト削減の可能性の検討

#### (5) 最適破碎及び破袋条件の確立

- ①圧縮梱包の前処理として要求される破碎及び異物除去条件の確立
- ②再商品化の段階で要求される圧縮梱包廃プラスチックの破

#### 袋条件の確立

##### (6) 最適輸送条件の確立

- ①一般車輌による輸送を前提に輸送限界を考慮した梱包形状及び寸法の検討
- ②輸送に伴う梱包廃プラスチックのハンドリング条件の確立  
(特殊アタッチメントによるハンドリングでの破袋率及びその防止策の検討)

#### おわりに

容器包装廃プラスチックの再商品化技術の一つに認定されているガス化について、その実証プラントによる確認事項及び課題を中心に述べてきたが、現段階ではまだあくまで予測に過ぎないレベルである。本年10月末には実証プラントが完成し、引き続き一廃分別廃プラスチックを原料にガス化による化学原料用合成ガス製造の実証が始まるので、来年には初期レベルの実証結果に基づいた知見が発表出来ることを期待しつつ本報告の結びとする。

## 無溶解アルミ缶リサイクルシステム\*

豊臣英延\*\*・中村光治\*\*  
中本京子\*\*

## 要 約

使用済みアルミ缶を10mm未満のチップに破碎し、チップよりゴミ、砂等の不純物を分離除去するとともに鉄片を除去してから、チップ同士こすり合わせながら研磨させ、同時に延性衝撃を加えて、チップ表面の有機物塗料を除去することを特徴とする、使用済みアルミ缶の無溶解アルミ新再生方法。

## 1. はじめに

アルミニウムはその優れた性質により多方面で活用され、量的にも鉄鋼に次ぐ地位を占めている。また、アルミニウムはリサイクル効率の高い材料である。すなわち、2次合金地金を製造するエネルギーは新地金のそれの約3%、CO<sub>2</sub>発生量は3~10%といわれている。

資源有効利用、環境保全の両面からアルミニウムのリサイクルは重要な課題である。アルミニウムリサイクル協会の資料によると、1998年度のアルミ製品需要量は3942千tに達し、その内缶材は318千t、スチール缶のエンドタブ材の158千tを加えると、アルミ缶材出荷量は476千tになる。

1997年4月に施行された「容器包装リサイクル法」の予告効果もあり、1996年のアルミ缶リサイクル率は70%に達し、Can-to-Can比率も50%に向上了した。

アルミ缶の素材はMg、Mn等の有価な金属を多く含みCan-to-Canのリサイクルが望ましいが、現実的には铸物材や脱酸剤への転用が多い。

アルミ缶の特性からアルミ缶には(1)缶厚が薄い。(2)金属の酸化及び飲料液への溶出防止のため、有機塗膜で被覆されている。(3)TiO<sub>2</sub>等の塗料を用いて外表面に印刷を施している。等の特徴があり、その結果、

(1)リサイクル時の歩留まりが悪い。(2)Can-to-Canへの完全リサイクルが困難であるなどの問題点がある。

## 2. 従来法とその問題点

現在の我国のRSI(Remeit Sow Ingot、使用済みアルミ缶を精錬し、再びアルミ缶用の2次地金に再生したもの)の生産量は9350t/月といわれその85%が溶解法によりインゴットを製造している。

図1に従来法の概念図を示す。

- ①解碎：ソフトプレスを解碎、異物除去
- ②焙焼：缶表面の有機塗料を除去
- ③溶解：反射炉、低周波誘導炉等で溶解
- ④铸造：インゴットに铸造

溶解法の問題点として以下の2点が重要である。①溶解工程において酸化ロスが発生し、歩留まりが約80%と低い。②焙焼後のチップ表面にTiO<sub>2</sub>等の塗料が残留し、溶解工程で一部還元され、溶湯中に混入する。過剰のTiは延性を阻害し、圧延・深絞り加工等のその後の塑性加工に重大な影響を及ぼす。

上記問題点を解決する種々の手段が考案されているが完成されていない。すなわち塗料はく離剤を用いた湿式処理法では設備費用の増加、2次公害への懸念があり、乾式法では酸化被膜、塗料の除去が不十分であるか又は生産性に問題があった。

## 3. 無溶解新再生システムの概要

図2に新システムの概念図を示す。従来の溶解プロセスと比較して次の2工程において顕著に異なる。

①破碎：高速回転の引き裂き作用による破碎機を開発し、従来のシャーリングによる破碎チップと全く異なる効率的研磨に適した破碎チップを加工することを特徴とする専用吸引式減容破碎機である。

②研磨：アルミ缶のリサイクルに始めて本格的な研磨

\* 平成11年11月11日本会第103回例会において発表

\*\* 株式会社ハイネット 開発グループ

平成11年9月3日受理

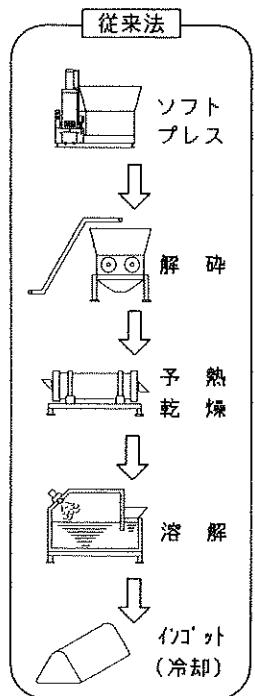


図1 従来システムとの比較 従来法の概念

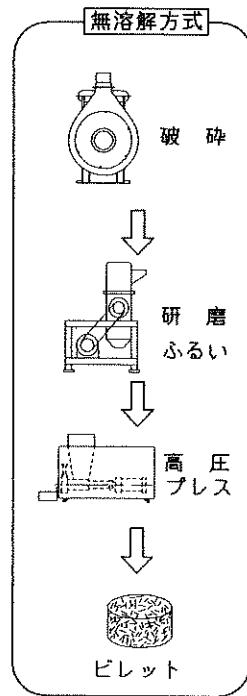


図2 従来システムとの比較 新システムの概念

工程を採用し、工業的な規模での事業化を可能にする。当社が独自に開発したチップ同士をこすり合わせる研磨剤不要の新延性研磨法を採用し、アルミチップ表面の有機物、 $TiO_2$ 等の塗料を99%除去している。表1に無溶解再生アルミの化学分析結果を示す。Ti等の不純分が少なく、Mg, Mn等の有価金属を多く含む。

③形成：プレスによりビレットを製造し、アルミの溶湯比重の2.3を上回る2.5の比重の製品を製造する。その後のアルミ製品製造のための溶解で、溶湯上に浮くことがなく、酸化ロスが少ない溶解が可能となる。

図3に本システムのサンプルを示す。

#### 4. 新再生システムの各工程

①破碎：破碎工程は新開発した吸引式破碎減容処理機で原料のアルミ缶を1辺が10 mm未満のチップに引き裂き作用で破碎する。破碎チップは後工程の研磨効率を考えて折り目がない形状にした。

破碎機の気流でチップを搬送する気流磁選を実施し、オンラインで異物を除去し製品への異物混入を防止している。

②研磨：破碎後のアルミチップは研磨機に挿入され、約650 rpmで回転するドラムに落下する。アルミチップは研磨されながら回転ローターの外周で遠心力による押付け力により研磨剤不要のチップ同士の相互摩擦により研磨される。そして約10 mm目のローター外周側制御格子のスクリーンを通過した研磨片は次工程の1 mm目の振動スクリーンで選別され、除去した篩下はサイクロンおよび集塵機に運ばれ捕集される。また、捕集された篩下のアルミ粉体及びダストは、焼却灰溶融溶用燃料のテルミット原料として再利用される。研磨工程で発生するアルミ微粉による、粉じん爆発防止を目的として低酸素濃度の雰囲気中で運転している。

#### ③形成

種々のサイズの塊状製品を製造することが可能であ

表1 無溶解新再生アルミ成分 (%)

S i	F e	C u	M n	M g	C r	Z n	T i	P b	N i	A l
0.37	0.36	0.19	0.88	2.3	0.02	0.11	0.06	<0.01	<0.01	95.7

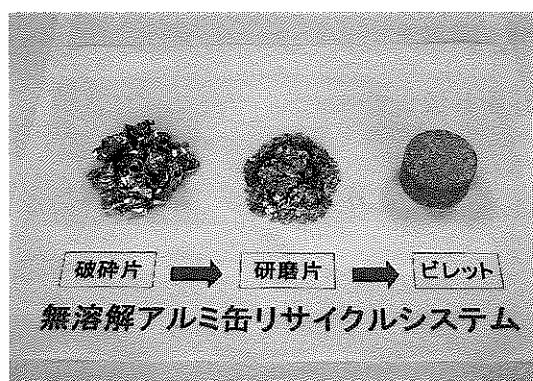


図3 本システムのサンプル

り、当社の製造中の約100g(42×28mmの円筒形)の製品は生産性、高加圧を考慮してメカニカルロータリープレスを採用している。

### 5. 無溶解新再生システムの経済的な効果

従来溶解法による溶解用インゴットの製造法の製品歩留まり(製品重量/原料挿入重量)はアルミドロスより金属を回収した後に約80%といわれている。一方プレスによりビレットを製造する当新再生システムでは歩留まりは95%に達しており、スラブ製造時の酸化ロスが減少し、高歩留まりを達成している。

非溶解法であることによる省エネルギーに加えて、歩

留まりの向上による資源有効利用も寄与することができた。アルミ再生製品製造コストに対する原料費の比率は約70%と大きく歩留まり差によるコスト低減効果は大きい。

### 6. 結 言

(1) 鋸ハイネットはアルミ缶の再生に当たり、破碎と研磨を中心とした新システムを開発し、2000年に事業化する。

(2) 品質の高い再生地金の確保により、新地金の消費を抑えてアルミ缶需要増加に対応できる。また、再生地金は缶に再利用できるので、用途に困ることがない。

(3) 何回も同じ製品にリサイクルして使用する、いわゆるリサイクルの高度化が呼ばれるようになっている。幸いアルミ缶は分別して回収し、アルミ合金以外の異物を除去することにより、本システムは比較的簡単に元と同じアルミ缶材に低コストでリサイクルする事が可能である。この無溶解法を徹底することにより、再資源化価値が高まり、より高価な売却取引が可能となる。

### 参 考 文 献

- 1) アルミ缶リサイクル協会資料
- 2) 日本アルミニウム連盟資料
- 3) 日本鋳造鋸アルミ缶新再生法
- 4) 大隅研治 報文名「使用済みアルミ飲料缶のリサイクル」

# 自動車産業の静脈部\*

—産業のリサイクル化を目指して—

外川 健一\*\*

On the Venous Sectors of Automobile Industry

Ken'ichi TOGAWA

## はじめに

本稿で取り扱う自動車リサイクルの諸問題は、シェッダースト問題が引きがねとなって大きな社会的関心を集めている。筆者の専門は資源・環境問題に関する社会経済学であるが、技術革新が社会システムに及ぼす影響に大変関心を持っている。本稿ではまず廃車の処理・リサイクルシステムについて概観し、今後の産業社会システムのベクトルに関する私見を述べたい。

## 1. 廃車の処理システム

図1を参照にしながら、廃車リサイクルのシステムをみてみよう。現在おおよそ年間500万台発生しているという廃車は、主として新車メーカー系列のディーラーか、中古車整備・販売業者を経由して回収される。背後に買取需要が付随することがほとんどなので、廃車の大半はこれらのルートで、自動車解体業者のもとへと運ばれている。また第3のルートとして、ユーザーが直接廃車を自動車解体業者へ持ち込むケースもあるが、それはごく希である。なお、路上放置車も大きな社会問題である。原則では車両の保有者がその回収処理費用を負担すべきであるが、現実には地方自治体が税金を用いて処理費用を負担しているケースも見られる。業界団体である自工会・自販連・全軽協・輸入組合も基金等を創出し問題解決に乗り出しているが、十分には機能していないのが実状である。なお、表1に最近の自動車廃車台数の推移を示したが、その数は景気変動に大きく左右される。というのは、前述のように廃車発生は新車・もしくは中古車への買取とともに発生するため、景気の動向と

廃車台数とはパラレルの関係にあると考えられるからである。しかしこのような関係は、万国共通とは言えない。たとえば韓国では、1997年末から1998年にかけて大不況に見舞われたが、この間に廃車台数はむしろ増加した。これは韓国が、公共交通網の充実しているソウル都市圏に人口集積した国土構造を持っているため、多くのソウル周辺の住民が、自動車の所有をいったんあきらめたことに起因するようだ。

## 1.1 自動車解体業者

解体業者の主な仕事は、いわゆる中古「部品取り」、すなわち廃車からまだ使用可能な部品(ドアやエンジン、ミッションなど)を取り除く行為である。これら中古部品は、国内の自動車整備業者にはもちろんのこと、海外市場にも供給される。このため日本の多くの解体業者のヤードでは、安価で品質の良い日本の中古部品を求めて渡来した外国人バイヤーがしばしば観察される。ところで解体業者の大きな悩みは、自分自身が部品メーカーではないことから、売れ筋部品の迅速な調達が困難なことである。そこで、中古部品の在庫管理ネットワークを形成し、在庫を融通しあうという動きが出てきている。

自動車解体業者の仕事としてもう一つ重要なことは、中古「部品取り」に伴う「前処理」という工程である。これは中古部品以外の有価物になる廃油、バッテリー、触媒等を取り外す行為であるが、同時に有価物としては取り引きされない、いわゆる廃棄物も処理しなければならない。しかし廃棄物処理にはコストがかかるため、一部の解体業者では、オイルの抜き取りを十分に行わなかったり、「カネ」になる部品取り・前処理だけを行い、その後処理はシェッダーや業者等に任せることの多いケースが多く観察された。

解体業者はその大半が零細企業(2, 3人で解体作業を細々と行っているケースも多々ある)であり、転業

\* 平成11年11月11日本会第103回例会において発表

\*\* 九州大学 石炭研究資料センター

平成11年9月1日受理

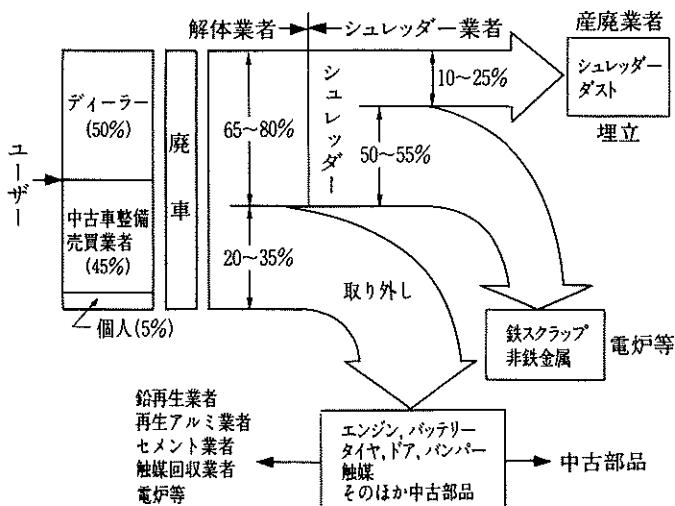


図1 廃車のリサイクルシステム  
資料)自工会資料等より作成。(%はおおまかな比重)

表1 自動車廃車台数の推移

年 (西暦)	自動車保有台数 (万台)	廃車台数 (万台)	廃車台数の 伸び率(%)
1978	3,412.1	256.9	
1979	3,623.1	304.4	18.5
1980	2,785.6	339.1	11.4
1981	3,962.0	336.3	-0.8
1982	4,133.6	354.5	5.4
1983	4,293.2	378.6	6.8
1984	4,452.4	384.5	1.6
1985	4,615.7	394.2	2.5
1986	4,797.2	389.3	-1.2
1987	4,990.2	408.8	5.0
1988	5,245.0	417.3	2.1
1989	5,509.3	461.4	10.6
1990	5,769.8	517.2	12.1
1991	5,991.5	530.8	2.6
1992	6,165.8	521.6	-1.7
1993	6,326.3	486.2	-6.8
1994	6,501.1	477.9	-1.7
1995	6,685.7	502.2	5.1
1996	6,880.5	513.0	2.2
1997	7,000.7	552.3	7.7
1998	7,081.8	506.8	-8.2

注) (廃車台数) = (前年度保有台数) + (当年度新車販売台数) - (当年度保有台数)

なお、この廃車台数には、中古車市場の商品の在庫増加分、輸出中古車、手回り品として海外へ輸出される中古車も含まれており、即スクラップ処理される台数ではない。

資料)自工会、日本鉄リサイクル工業会、日本鉄源協会

・廃業も頻繁に見られる。また、いわゆる3K業種であることが一般的で、多くの解体業者の労働環境は、決して満足のいくものではない。

解体業者は全国で約5,000~6,000社あると言われているが、その実数は系統的な統計もないためほとんど把握できない。筆者が1997~98年の職業別電話帳(タウンページ)をもとに全国の自動車解体業者をカウントしたところ、5,012という数字を得た。「実際に活動している専業解体業者は1,000社程度でしかないのではないか。」とコメントしているシェレッダー業者もある(伊藤、1997, p. 14)。全国の自動車解体業者数に関してはこのほか、自動車研究所の研究による5,705という数字がある。

## 1.2 シュレッダー業者

部品取りと前処理が施された車輌本体部分は、自動車解体業者の手を離れ「シュレッダー業者」と呼ばれる鉄スクラップ加工処理業者へと引き渡される。シュレッダーとは、衝撃とせん断の機能を備えた破碎効果の大きいハンマ型の設備である。廃車の本体はこのシュレッダーにかけられた後、プラスチックやガラス、ゴムなどからなる比重の軽いシュレッダーストと呼ばれるごみ(これは埋立処理される)と、比重の重い鉄屑とに選別される。シュレッダー業者はここで得られる良質の鉄屑

・非鉄金属を、電炉メーカー或は二次合金メーカーにリサイクル原料として販売することにより主利益を得ている。こうして、自動車解体業者・シュレッダー業者の手により、廃車の約75%(重量比)がビジネスとしてリサイクルされているのである。

バブルの好況期には、多くの鉄スクラップ加工処理業

表2 普通・小型乗用車における原材料構成比推移（単位：%）

	1977年	1980年	1983年	1986年	1989年	1992年	1996年
銑鉄	3.2	2.8	2.2	1.7	1.7	2.1	1.8
普通鋼鋼材	61.6	60.5	59.5	57.7	56.9	54.9	52.1
特殊鋼鋼材	16.1	14.7	14.3	15.0	15.1	15.3	16.9
非鉄金属	4.7	5.6	5.6	6.1	7.4	8.0	9.6
合成樹脂	3.5	4.7	5.7	7.3	7.5	7.3	7.5
その他	10.9	11.7	12.7	12.2	11.4	12.4	12.1
合計	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

注)「その他」には、塗料、ゴム、ガラス、繊維、木材などが含まれる。合成樹脂やそのほかの構成比が高いということは、シュレッダーダスト発生量増加の可能性が大きいことを暗示している。

資料)自工会材料部品委員会,『鉄源年報』1999年。

者が争ってシュレッダー設備を導入・増設したが、バブルの崩壊とともに廃車台数も減少し、目下シュレッダー業者は、収益悪化・稼働率の低下に苦しんでいる。またシュレッダーに含まれる鉄などの有価物の比率が低下してきたことも、シュレッダー業者への追い撃ちとなっている。かつて日本の自動車メーカーはエンジン本体の効率向上、廃棄エネルギーの回収、樹脂成分の利用による軽量化により、燃費の改善を進めてきた。このため自動車原材料に占める樹脂成分の比率が増大し、これに対応して鉄成分の比率が減少しているのである(表2)。

### 1.3 シュレッダーダスト問題

最近の自動車解体業者・シュレッダー業者にとって最も衝撃的な事件は、何と言っても豊島事件に起因する、シュレッダーダストの管理型埋立地処理への移行に伴う、処理費の高騰であろう。埋立費用が高騰すれば、当然ながら埋立処理業者にダスト処理を委託するシュレッダー業者の経営は苦しくなる。一方で、1998年から1999年にかけて、国内の景気後退により、製品価格である鉄スクラップ価格も急落している(バブル経済華やかりし1990年1月の炉前価格(関東・中部・関西のH2メーカー値平均)は21,400円であったのが、1998年12月にはその1/3にも満たない7,000円にまで下落した)。すなわちシュレッダー業者はダブルパンチにあえいでいる。そこで、シュレッダー業者が解体業者から廃車ガラを引き取るときに、処理費用を要求する事態が観察され始めた。同様のことは、解体業者とディーラー等との間や、ユーザーとディーラーとの間ででも観察されている。これまで廃車は基本的には「有価物」であった。しかし豊島問題を契機として、下取りディーラーから解体業者への廃車引き渡しの段階を中心に、「廃車」を引き渡す側がコストも負担するという「逆有償」が観察されるようになった。

ところで逆有償で廃車を受け取ることは、廃掃法ではその廃車を財(原材料)ではなく廃棄物として引き取ったと見做されるので、「逆有償」で廃車を受け入れる解体業者は、産業廃棄物処理業免許を取得することが必要

となった。問題は、既存の解体業者には一匹狼的な業者が多く、相当数の業者が必ずしも産業廃棄物処理業の許可を得る水準にはないことである。加えて許認可権をもつ行政の対応も統一されておらず、ある自治体では許可される装備であっても、別の自治体ではそうではないケースもみられる。中央省庁と自治体セクションの間でも、どの水準で許可すべきかの議論が十分になされていなかったことも考えられる。

さて、ビジネスとしての自動車リサイクルは、いかに効率よく大量に廃車を集めかにかかっている。そこでこの環境規制を逆手にとり、ビジネスチャンスにしようとしている自動車解体業者も日々存在する。あえて廃棄物処理業の免許を取得し、環境に配慮した解体ヤードを設置し、「お宅になら安心して廃車処理を任せられる」という信頼感をユーザーとディーラーに与え、より多くの廃車を確保しようとしているのである。また、自動車メーカーとディーラー、一部鉄鋼メーカーと損害保険業界も、自動車解体ビジネスへの新規参入を試みている。

## 2. 「静脈」産業と産業の「静脈部」

廃棄物処理・リサイクルに携わる産業として、「静脈産業」という概念がある。この用語は人間と自然のあいだの物質代謝の様相を、人体の循環系にたとえて表したものである。人間が生命活動を行うためには、心肺から各細胞に栄養素や酸素を乗せた血液を動脈系統を通じて運ばなければならない。しかし同時に老廃物や二酸化炭素を再び血液に乗せ、静脈を通して心肺に戻す必要もある。そしてこの「捨てる」という機能が不完全であれば、人間は正常な生命活動を行えなくなる。エコロジストや一部の経済学者達は、このような循環系としての生態系の機能を、「種としての人間による経済活動」と「生態系」とのあいだの、物質とエネルギーのフローとしてアナロジー的に置き換え、検討してきた。すなわち生産過程・消費過程を通じて、必然的に廃棄物が発生するということに着目し、モノを生産し、使うという活動を「動脈」の系統とし、廃棄物の適正処理や、リサイクルとい

う活動を「静脈」の系統と称して、2系統のアンバランスを検討するようになってきたのである。

そこで循環系のメカニズムを産業界に置き換えて、既存の製造業を「動脈産業」、廃棄物処理・リサイクルを専門として取り扱うビジネスを「静脈産業」とし、後者の育成を急務とする論調が、最近見受けられるようになった。静脈産業は、廃棄物処理業とリサイクル事業から構成されると考えられる。前者は、総務庁統計局の『サービス業基本調査報告』において、一般廃棄物処理業・産業廃棄物処理業に分類され、統計も整備されている。後者は、静脈系のアナロジーを用いることにより、排出された再生資源を収集する「眞の静脈部」たる「再生資源回収業」(以下「回収業」と略す)と、収集された再生資源を加工処理する「心臓部」たる「再生原料・再生製品加工業」(以下「再生業」と略す)の2つに分類できる。

「回収業」とは、原料としての古紙や鉄スクラップ・アルミスクラップなどを回収し、それをユーザー(「再生業」が主)に卸す事業であり、「再生業」とは、回収された再生資源を、分別・修繕・加工など何らかの手を加えて再利用できる形にし、いわゆる動脈産業に原料を供給する事業である。「回収業」としては、商業統計表において「再生資源卸売業」に関する統計データがある程度整理されている。一方「再生業」に関しては、工業統計表において「更生タイヤ製造業」「再生ゴム製造業」「鉄スクラップ加工処理業」などが、産業として認知され、統計が整備されているものもある。しかし、古紙リサイクルの場合、再生資源のユーザーは製紙メーカーであり、ここでの古紙はヴァージンパルプの補完原料として利用されているにすぎず、再生利用自体がその産業の主要活動ではない。このようなことが、リサイクル事業を「静脈産業」として独自に抽出することを困難にしている。また、広義の「リサイクル」で考えれば、動脈産業内部での廃棄物「減量化：reduce」や廃棄物「回避：refuse」をどのように評価・把握すべきかという問題も生じてくる(なお、通産省では今年度から、「自動車解体業者」を日本産業分類の1カテゴリーに加える作業を開始している。)。

そこで筆者は拙著の中で「静脈産業」という用語に対し、「産業の静脈部」という概念を主として用いた。自動車リサイクルの問題を考察する際には、自動車メーカーによる製造段階での廃棄物「減量化：reduce」や廃棄物「回避：refuse」以外にも、自動車ディーラー等による中古車流通の現状、自動車メーカー自身によるリサイクル事業への関与等、すなわち「自動車産業の動脈部」と「自動車産業の静脈部」の相互関係を、より適切かつ動的に把握し、全体としての自動車産業を新たな視点で

考察できるからである。

### 3 産業のリサイクル化とリサイクルの産業化

1997年5月に公表された通産省による「使用済み自動車リサイクル・イニシアティブ」(以下「イニシアティブ」と略す。)には、シュレッダーダストの減量化、自動車のリサイクル率の向上が、今後の大きな課題の1つであると記されている。また通産省は、「イニシアティブ」発表前にシュレッダーダスト対策として、

1. リサイクル性の向上を目指した具体的な数値目標の設定と処分場の確保
2. 有害物質使用量の削減を企図した数値目標の設定
3. 解体マニュアルの作成・配布
4. リサイクルマインパーク構想等の技術開発

の4つを挙げている。このうち4.に関して少々私見を述べたい。この構想は、シュレッダーダストを焼却しエネルギーリサイクルを行なながら、残渣のダストは廃家電製品の原型埋立分とともに鉱山に集め、鉱山の持つ選鉱・精練技術を駆使しながら、ダストに含有されている鉛などの目的重金属の分離回収を、公害対策を徹底しつつ行なうという計画である。もとより金属鉱山は選鉱(分別)、精練施設および技術を有している。これらの多種の貴金属を含有する原料から目的金属を分離回収する技術には、公害防止対策についてもある程度の体制が整えられている。そこで、この金属鉱山の選鉱(分別)・精練・坑廃水処理に関する技術を活用し、既存施設および採鉱跡・敷地(ストックヤード)等を有効利用すれば、少ない追加投資でリサイクル事業遂行のためのインフラ整備が可能であるとしている。回収対象金属には、シュレッダーダストに含まれる銅、亜鉛、鉛、マンガンなどが挙げられている。実際に、家電製品リサイクルに関しては、家電リサイクル法の施行に伴い、秋田県の小坂や宮城県の細倉で、処理プラントの計画が進行中である。

鉱山・製錬所の有する技術、施設、立地等を有効活用し、非鉄金属資源の完全な循環型社会システムの構築を目指した同構想には、評価できる点も多々ある。しかしこの構想が当初採用した「シュレッダーダストは枯渇なき新たな資源」というスローガンに、筆者は疑問を感じている。構想では、シュレッダーダストを中心とする原料は「有限な鉱物資源とは異なり、現在の生活水準が営まれる限り、無限の一定の量と安定した品位が確保されることになる。」としている。しかしそのダストも、もとをただせば有限な鉱物資源に至るのではなかろうか。そして何よりも問題点は、「現在の生活水準が営まれる限り」という修飾句である。これでは、現状の大量消費・大量廃棄型の「使い捨て社会」を前提として認めたことになる。いま最も求められているのは、「持続可能

な発展」をベースにした新しい経済システムの構築であり、我々の生活様式そのものの見直しであったはずである。実のところ廃車問題は、効率性と無限の成長を信じている先進諸国の病であると筆者は考えている。財の廃棄後をほとんど省みなかった、これまでの経済システムそのものの変革という視点を忘れてはならない。

「リサイクルの産業化」という言葉をしばしば耳にする。産業の空洞化が指摘され、将来のリーディング・インダストリーが不透明な現在、リサイクルを産業として育成させたいとする政策はそれなりに意義はある。しかし、同時に求められているのは環境と調和した経済システムの構築であり、産業全体が廃棄物を削減し、財の廃棄後をも考慮を入れた、「産業のリサイクル化」もまた重要なである。そして「リサイクルの産業化」と「産業のリサイクル化」をバランスよく組み合わせることが、今後のリサイクル政策に求められている大きなポイントであると考えられる。同時に自動車リサイクルの問題を、既存業者のみの問題とせず、メーカー・ディーラー・整備業者、そしてあらゆる関連産業が一体となって、解体業者・シェレッダー業者とともに「自動車産業の静脉部」を構成し、一般消費者もこの問題に関与することが重要であると考える。

#### 4. 市場リサイクル・公共リサイクル・ 市民リサイクル

リサイクルの採算性の問題、すなわちリサイクルを市場経済の中でいかに成立させるかに関しては、郡嶋 孝の議論が参考になる。郡嶋は、リサイクルの形態を市場リサイクル・公共リサイクル・市民リサイクルの3つに分類し、それぞれの強調点は資源問題・廃棄物問題・文化および社会問題であるとしている。我々の経済はすでにビジネスとしてのリサイクルを保持してきた（糞尿を肥料としてリサイクルするビジネスや、古紙・鉄スクラップのリサイクルビジネス等）。郡嶋は、このように市場において自然発生的に行われているリサイクルを「市場リサイクル」と呼ぶ。それは主として、資源問題に対応したリサイクル（処女資源の使用が経済的困難なので、代替資源としてリサイクル資源を用いる）として、営まれてきた。一方、廃棄物処理費の高騰・最終処分地の確保難が主たる契機となって、廃棄物の削減を意図した行政主体のリサイクルは、「公共リサイクル」と呼ばれる。換言すれば、前者は資源問題への対策としてのリサイクルであり、後者は廃棄物問題への対策としてのリサイクルである。そして前者は、私企業の経済効率性という尺度で動いているが、後者は、効率性そのものを目標とすべきではないものであるという。

郡嶋のユニークな論点は第3の概念たる「市民リサイ

クル」である。それはコミュニティやボランティア活動を基礎としたリサイクルであり、そのリサイクルは目的ではなく、単なるごみの減量化でもない。「ごみを作らないこと、ごみを出さないこと、すなわち『ゆりかご（生産）から墓場（処理）まで』のごみの最小化を求める」として、「経済のあり方」「生活様式のあり方」を見直す手段であるという。このような生活様式の変革は、大量生産・大量消費・大量廃棄という経済システムからの決別と「生活」・「暮らし」・「地域」の「自立」を進める可能性を持つ。今後の「リサイクル社会」において、企業や行政による廃棄物リサイクル問題をはじめとする環境問題全般に対する情報公開を推進させ、それを利用しながらあるべきリサイクル社会への道程を示すためにも、この市民リサイクルは大きな役割を果たすであろう。

#### 5. 再び「産業のリサイクル化」そして 「生活のリサイクル化」の議論

最近の廃棄物リサイクル政策の特徴の1つに、容器包装リサイクル法・家電リサイクル法による関係者の役割分担の議論がある。たとえば前者では「消費者は容器包装廃棄物を分別出し、市町村の分別収集に協力すること、市町村はそれを分別収集すること、事業者は市町村が適切に分別収集した容器包装廃棄物を、自ら又は指定法人などに委託し、再商品化する責任（引き取り及びリサイクル義務）がある。」ということが示されている。

ところで、飲料容器のリサイクルに関しては、小型ペットボトルの流通が認められたせいもあり、再利用瓶のシェアが減り、使い捨て容器のそれがむしろ増えている傾向がある。使い捨てペットボトルの回収システム整備も徐々に進行しているが、再生製品の需要（ペットボトルに関してはペット由来の繊維で製造されたユニフォームなど）が果たして本当にあるのかという問題が残されている。

表3は植田和弘によるもので、同じ飲料をプラスチック容器で消費者に供給する場合と、再利用瓶で供給する場合の、費用・経費を比較したものである。近代経済学では基本的に、完全競争市場においては、市場メカニズムによって効率的な資源配分が達成されると考える。したがって、生産・流通・消費・廃棄の各段階において、各経済主体は、自己の満足（効用）を最大化するよう、あるいは自己の利潤を最大化するよう行動することとなる。

この表の例では、生産者はコストが安い方（この場合プラスチック容器）を選択し、同じく流通業者も、重量が小さく運搬が容易な流通費の安いプラスチック容器を

表3 使い捨て容器と再利用容器とのコスト比較

	生産	流通	消費	廃棄	処理	合計
プラスチック容器	a1(1)	b1(1)	c1(1)	d1(1)	e1(6)	p1(10)
再利用瓶	a2(2)	b2(3)	c2(2)	d2(2)	e2(0)	p2(9)

資料) 植田和弘『廃棄物とリサイクルの経済学』、有斐閣、1992、p. 30

選択するであろう。効用最大化原理で行動する消費者は、購入段階では安価で持ち運びしやすいプラスチック容器を選択し、廃棄段階では使用後保管したうえで小売店へ返却するよりも、自治体の（無料）ごみ処理サービスに依存する行動を選択するであろう（ただし、近年ごみ処理サービスを有料にする自治体が急増してはいるが。）。さて、公共部門が担うごみ処理の段階では、再利用瓶は厳密には何度か使用した後やがてはごみになるが、その処理費用はゼロとは言わないまでも、ほとんど無視できる状態にある。しかし、プラスチック容器の処理は、収集運搬コスト、焼却時の高熱発生による焼却炉の損傷対策コスト、さらにはダイオキシン対策のコスト等、多額の公害防止費用が必要なのである。

表3における（ ）内の仮想数値例では、生産から廃棄までの総費用は、プラスチック容器が  $a_1 + b_1 + c_1 + d_1 = 4$  であるのに対し、再利用瓶は  $a_2 + b_2 + c_2 + d_2 = 9$  である。しかしそれに処理コストを加えると、前者では  $p_1 = 10$  となるのに対して、後者では  $p_2 = 9$  となる。これはあくまでも仮想的な数値例であるが、現実も同じような傾向にあると言えよう。このことは、生産・流通・消費・廃棄の各段階で最終的な処理を考慮しないことにより、ごみを増加させてしまった例と判別できる。モノは「生産→流通→消費→廃棄」という一連の流れの中にあるにもかかわらず、個々の意思決定は「分断」された状態にある。植田はこのような現代の経済社会を「分断型社会システム」と呼び、このことが潜在的資源たる廃棄物のリサイクルを阻害していると指摘している。

筆者の言う「リサイクルの産業化」とは、「リサイク

ル」を産業として育成させ、表3でいう  $e_1 = 6$  をできるだけ小さくするという戦略であり、それなりの意義を持つ。しかし、廃棄物リサイクル問題のより本質的な解決のためには、トータルコストである  $p_1$  と  $p_2$  との比較を通じて、各経済主体が行動できるような社会システムの構築も一方で考えるべきであろう。それはたとえば、規制や課税・デボジット制度などの経済的手法によって、 $a_1 > a_2$ ,  $b_1 > b_2$ ,  $c_1 > c_2$ ,  $d_1 > d_2$  を実現させる新しい経済システムの構築である。そしてそれは、生産・流通段階では「産業のリサイクル化」と称することができ、消費段階を含めれば「生活のリサイクル化」とも呼べるだろう。しかし問題は、「産業のリサイクル化」あるいは「生活のリサイクル化」をいかに人間の経済にビルトインさせるかであり、それらは残された大きな課題である。

### 謝 辞

本稿の作成にあたっては九州大学大学院比較社会文化研究科博士後期課程在学中の村上理映さんにお世話をになりました。この場を借りてお礼申し上げます。

### 参 考 文 献

- 1) 伊藤秀夫：使用済み自動車の処理（解体とシェッター）現状と課題、自動車研究、vol. 19, No. 10, pp. 13~17, 1997.
- 2) 植田和弘：廃棄物とリサイクルの経済学、有斐閣、1992.
- 3) 郡嶽 孝：市民運動とエコライフ—消費主義と生活主義—、環境情報科学、vol. 19, No. 4 pp. 13~19, 1990.
- 4) 郡嶽 孝：リサイクルの採算性をめぐる諸問題、廃棄物学会誌、vol. 2, No. 2 pp. 30~35, 1991.
- 5) 外川健一：自動車産業の静脈部—自動車リサイクルに関する経済地理学的研究—、大明堂、150 pp., 1998.
- 6) (リサイクル・マイン・パーク) 西日本調査部会、リサイクル・マイン・パーク 西日本調査部会報告書 平成8年3月, 1996.

## 廃車シュレッダーダストの資源化システムの開発\*

古賀 愛紹\*\*・Abel BISSOMBOLO\*\*\*  
 秦 正道\*\*\*\*・森 祐行\*\*\*\*\*  
 古山 隆\*\*\*\*\*・富田 修一\*\*\*\*\*

## Development of a Recycling System of Shredded Automobile Residues

Yoshitsugu KOGA\*\*, Abel BISSOMBOLO\*\*\*,  
 Masamichi HATA\*\*\*\*, Sukeyuki MORI\*\*\*\*\*,  
 Takashi FURUYAMA\*\*\*\*\* and Shuichi TOMITA\*\*\*\*\*

## 1. はじめに

わが国の自動車産業は戦後の経済成長の牽引車の役割を果してきた。その様子を図1に示す。1965年から1990年までは四輪自動車保有台数<sup>1)</sup>(図1上段)は毎年約200万台の割合で増加していた。新車台数<sup>2)</sup>(図1中段)もオイルショックによって一時的な減少が見られたものの増加の一途を辿り、また、廃車台数(前年の保有台数+当年の新車台数-当年の保有台数)が新車台数と連動して増加していた。しかしながら、バブル経済が崩壊した1990年以降においては、保有台数の増加は徐々に減少し、また、新車台数と廃車台数も減少の傾向を示すようになってきている。新車台数に対する廃車台数の割合である廃車率(図1下段)を見ると、1991年から70%を越え、1998年現在では86.2%となっている。このことは5台の新車が購入されると約4台の車が廃車になることを表している。廃車率は今後も増加することが予想されるため、将来は廃車率100%、つまり、1台の新車が購入されると1台の車が廃車になるという自動車販売市場の飽和状態が起こり、この結果、保有台数、新車台数および廃車台数はほぼ一定になることが予想される。

著者等は、過去に廃車の増加に伴う廃車処理の問題を

予測して、廃車からアルミニウム、銅、鉛、亜鉛等を回収するための新しいシステムを開発し、実用化した<sup>3)</sup>。しかしながら、廃車から有価金属を回収した後に残る廃

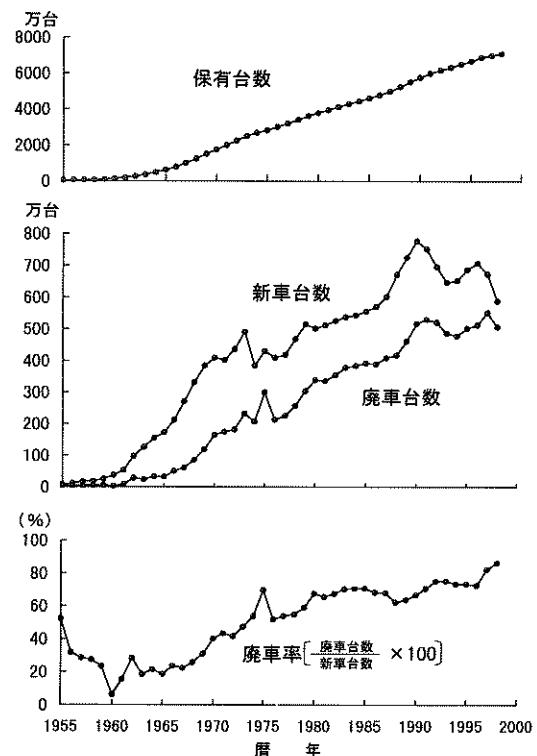


図1 わが国における四輪自動車の保有台数・新車台数・廃車台数および廃車率の経年変化

\* 平成11年11月11日本会第103回例会において発表

\*\* 九州メタル産業株式会社

\*\*\* 九州大学工学部訪問研究員

\*\*\*\* 株式会社エコーデック

\*\*\*\*\* 九州大学大学院工学研究科地球資源システム工学  
専攻教授、助手、院生  
平成11年8月6日受理

車シユレッダースト（以後、廃車ダストと略）は適切な処理方法が確立されていないために、現在、有害物質の漏洩や処分場の不足といった社会問題が深刻化している。そこで、著者等は有害物質の漏洩に関する問題に対応するために、廃車ダストの安定化について研究を行い、市販のセメントと構造が簡単なドラムミキサーを用いることで廃車ダストの鉛溶出値を規制値（ $0.3 \text{ mg/l}$ <sup>4)</sup>以下に抑制できることを明らかにした<sup>5)</sup>。今回は、処分場の不足に関する問題に対応するために、トロンメルスクリーンと立型シグザグ空気選別機（以下シグザグ選別機と略）を用いて、廃車ダスト中に含まれる綿・スポンジ類や軽質プラスチックを回収し、それらを減容機でブリケット化して固体燃料に資源化するシステムの開発を行った。

## 2. 自動車に使用される原材料の推移

自動車のリサイクリングを考える場合、自動車を構成する原材料を知る必要がある。自動車1台当たりの総重量指数と自動車の原材料の重量指数<sup>6)</sup>を図2に示す。1973年の1台当たりの総重量を100とすると、自動車の総重量指数は徐々に増加し、1997年では141.3になっていることから、自動車は年々大型化していると考えられる。総重量指数に連動して普通鋼、特殊鋼等の鉄材も1997年ではそれぞれ73.6, 23.9と増加している。また、

非鉄金属ではアルミニウムが1985年以降急速に増加しており、1973年の重量指数が2.8に対して1997年では10.6と約3.6倍になっている。非金属では合成樹脂が年々増加しており、1973年の重量指数が2.9に対して1997年では10.6とアルミニウムと同様に約3.6倍になっている。今後さらに自動車の大型化が進むと、軽量化を図るためにアルミニウムや合成樹脂の重量指数は増加すると思われる。一方、廃車を処理している自動車スクラップ処理工場においては鉄とアルミニウムのシステム的な回収は行われているが、合成樹脂などの非金属のリサイクリングはほとんど行われておらず、専ら埋め立て処分されているのが現状である。

## 3. 実験試料

本研究では、九州メタル産業㈱のシユレッダープラントから通常の廃車処理で供給されたシユレッダースト（廃車ダスト①）、および、予め電線の大部分を取り除いた廃車を処理して供給されたシユレッダースト（廃車ダスト②）の2種類を使用した。各廃車ダストの重量頻度分布を表1に示す。両者とも類似した分布を示しており、+8mmの重量割合は65.3%と66.1%であった。表2に各廃車ダスト（+8mm）の構成物の重量割合を示す。綿・スポンジ類、プラスチック及びゴム等の可燃物の重量割合はそれぞれ91.1%と91.5%であった。なお、廃車ダストをサンプリングしたときにどちらの場合も雨

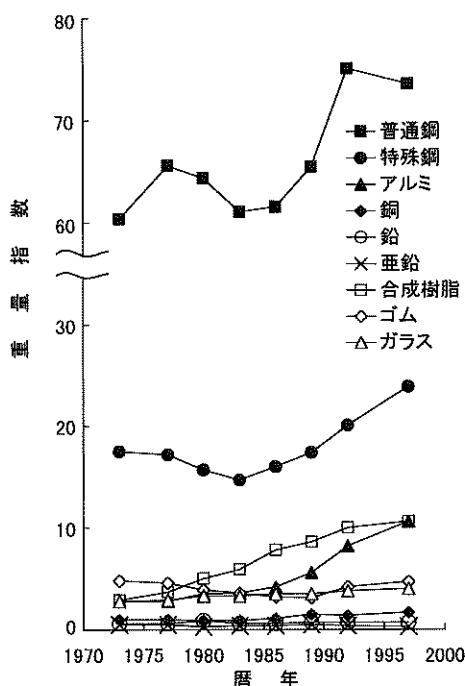


図2 自動車に使われた原材料の重量指数  
(1973年の1台当たりの総重量を基準値100とする)

表1 各廃車ダストの重量頻度分布(%)

粒径区分	廃車ダスト①	廃車ダスト②
+70mm	5.7	2.2
-70+45mm	6.1	5.4
-45+30mm	6.9	8.7
-30+20mm	8.8	10.7
-20+8mm	37.8	39.1
-8mm	34.7	33.9
計	100.0	100.0

表2 各廃車ダスト(+8mm)の構成物の重量割合(%)

構成物	廃車ダスト①	廃車ダスト②
綿・スポンジ類	49.9	40.1
プラスチック	33.3	30.2
ゴム	7.9	21.2
ガラス・小石	0.5	0.3
電線	2.3	2.3
金属	6.1	5.9
計	100.0	100.0

が降っていたために、水分はそれぞれ約32.1%と22.9%となっていた。

#### 4. 実験装置

廃車ダストの資源化システムのフローシートを図3に示す。今回、廃車ダストから綿・スポンジ類や軽質プラスチックなどの軽質物を回収する作業は九州メタル産業㈱で行い、軽質物を減容機でプリケット化する作業は飼御池鉄工所で行った。以下に各装置の概略を述べる。

##### 4.1 振動グリズリー

振動グリズリーは廃車ダスト中の+150 mmのゴムやプラスチックなどを除去すること、および、塊状のダストをほぐすことを目的として設置した。しかし、廃車ダストの形状が一定でないために、選別精度を上げるために横棒を数本取り付けて網目状に改良した。また、処理能力を上げるために、新たにグリズリーのホッパーの真下にふるいを設け、また、ホッパー下部を切り落として出口を広くし、廃車ダストを排出されやすいように工夫した。

##### 4.2 原料ホッパー

原料ホッパーは処理量700 Kg/h、給鉱速度0~1.3 m/minの仕様で給鉱口に解碎パドルを設置していたが、

ホッパー内で生じる廃車ダストの棚吊り現象を防止するために、以下の改良を行った。はじめに、廃車ダストが滑り落ちやすくなるようにホッパー内部の片方の側面にビニールシートを貼り付けた。次に、他方の側面に棚吊り状の廃車ダストを崩すための搔き落とし機を設置した。これらの改良によって、廃車ダストを定常給鉱できるようになった。

##### 4.3 トロンメルスクリーン

当初のトロンメルスクリーンは直径600 mm、長さ1085 mmの円筒の中部に孔径50 mmのスクリーン（総面積0.8 m<sup>2</sup>）がついていたもので、回転数は15 rpm、傾斜は10度に設定していた。しかし、実際に運転を行うと、廃車ダストの多くが団子状の塊となってトロンメル内で廃車ダストの逸走が起こり、トロンメルオーバーサイズ産物（以後、T.O.S. 産物と略）の重量割合が多くなった。そこで、当初の孔径を50 mmから65 mmに拡大し、また、直径600 mm、長さ280 mm、孔径80 mmのスクリーンを追加した。さらに、トロンメルの内側に4つのしきり板を取り付け、廃車ダストが長く滞留できるようになると共に、回転数を上昇させて廃車ダストの塊を十分ほぐれるような工夫を凝らした。

##### 4.4 振動スクリーン

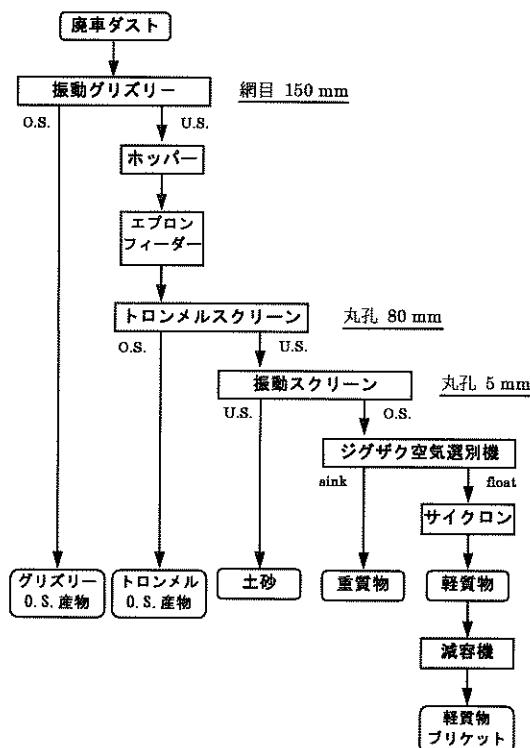


図3 廃車シャレッダーダストの資源化システムのフローシート

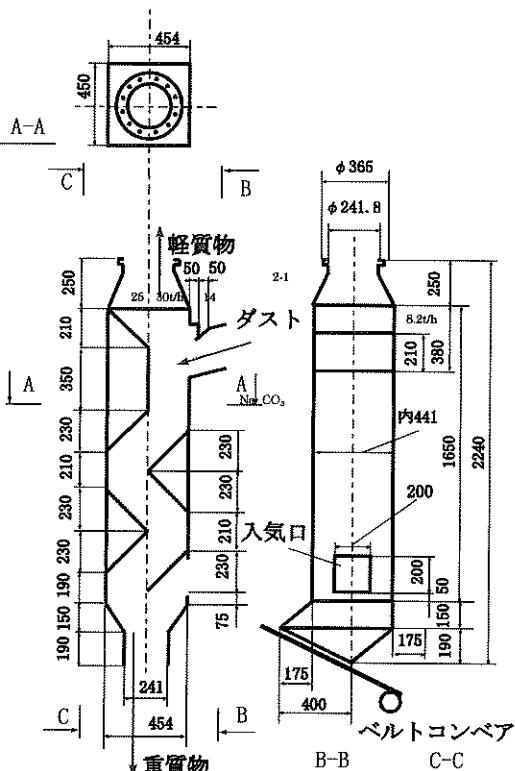


図4 立型ジグザグ空気選別機の模式図

ガラスや土砂等の不燃物を事前に除去するために、表面の平らな打ち抜き鋼（直径 5 mm）の振動スクリーンをジグザグ選別機の前に設置した。これにより、廃車ダストの給鉱量に対して常に約 6 % の割合で不燃物を除去することができるようになった。

#### 4.5 立型ジグザグ空気選別機

立型ジグザグ選別機の模式図を図 4 に示す。選別機の真上からプレートファンによって  $70 \text{ m}^3/\text{min}$  の空気が吸い上げられる。トロンメルスクリーンのアンダーサイズ産物（80 mm 以下）はジグザグ空気選別機の上部の側面から振動フィーダで給鉱され、選別機内で上昇する空気の流れによって軽質物と重質物に選別される。これまでの予備実験の結果に基づき、廃車ダストから綿・スポンジ類およびプラスチック（見かけ比重はそれぞれ約  $1.2 \text{ g/cm}^3$  および約  $1.5 \text{ g/cm}^3$ ）を分離できるように選別機内の風速は  $12\sim15 \text{ m/sec}$  になるように設定した。なお、プレートファンに近いダクトの内部および選別機の上部と下部の風速を測定した結果、それぞれ  $38.0 \text{ m/s}$ 、および、 $36.5 \text{ m/s}$ ,  $9.4 \text{ m/s}$  であった。

#### 4.6 サイクロン集塵機

サイクロン集塵機は直径 680 mm、高さ 2100 mm、処理量  $240 \text{ kg/h}$  の仕様で、下部に直径 250 mm、幅 300 mm、回転数  $0\sim11 \text{ rpm}$ 、処理量  $200 \text{ kg/h}$  のロータリーパルプを設置した。しかし、100 mm 程度の木片がローラー

タリーパルプ内に挟まり、ゴム板を破損させてサイクロン内部と大気との気圧差を十分に保つことができなくなった。そこで、ゴムの厚さを 5 mm から 12 mm に変更すると共に、ロータリーパルプにインバーターを取り付けて回転数を  $18 \text{ rpm}$  まで上げられるような改良を行った。

### 5. 資源化システムの操業結果

#### 5.1 各産物の重量頻度分布

本システムによって得られた T.O.S 産物、軽質物および重量物の重量頻度分布を表 3 に示す。トロンメルの孔径は 80 mm であるが、廃車ダスト①のトロンメル OS 産物には  $-70 \text{ mm}$  が 23.1% 存在した。その内訳は  $-70+45 \text{ mm}$  が 17.3%，  $-45+30 \text{ mm}$  が 2.6%，  $-30+20 \text{ mm}$  が 0.6%，  $-20+8 \text{ mm}$  が 1.3%，  $-8 \text{ mm}$  が 1.3% であった。これは水分や土砂などによって廃車ダスト同士が団子状の塊になったためである。廃車ダスト②の場合も似たような重量頻度分布を示している。廃車ダスト①の軽質物は  $-8 \text{ mm}$  が最も多く、次に  $-20+8 \text{ mm}$ ，  $-30+20 \text{ mm}$  となった。重質物は両廃車ダストとも  $-20+8 \text{ mm}$  が最も多く、次に  $-8 \text{ mm}$ ，  $-30+20 \text{ mm}$  となった。

#### 5.2 各産物の構成物の重量割合

各産物の  $+8 \text{ mm}$  の構成物の重量割合を表 4 に示す。

表 3 各産物の重量頻度分布 (%)

粒径区分	T.O.S 産物		軽質物		重質物	
	廃車ダスト①	廃車ダスト②	廃車ダスト①	廃車ダスト②	廃車ダスト①	廃車ダスト②
$+70 \text{ mm}$	76.9	57.8	1.0	0.0	1.0	0.3
$-70+45 \text{ mm}$	17.3	29.5	3.3	1.9	3.6	6.1
$-45+30 \text{ mm}$	2.6	4.6	6.0	4.1	12.4	14.8
$-30+20 \text{ mm}$	0.6	1.7	7.4	7.7	13.0	16.3
$-20+8 \text{ mm}$	1.3	3.5	40.0	49.6	47.2	42.7
$-8 \text{ mm}$	1.3	2.9	42.3	36.6	22.8	19.8
計	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

表 4 各産物 ( $+8 \text{ mm}$ ) の構成物の重量割合 (%)

構成物	T.O.S 産物		軽質物		重質物	
	廃車ダスト①	廃車ダスト②	廃車ダスト①	廃車ダスト②	廃車ダスト①	廃車ダスト②
綿・スポンジ類	28.7	18.4	61.2	72.6	28.8	26.2
プラスチック	21.5	24.9	27.4	22.5	36.0	41.7
ゴム	43.8	53.3	7.0	3.5	14.3	20.1
ガラス・小石	0.0	0.0	0.3	0.1	3.0	1.1
電線	0.9	1.9	1.3	0.6	4.3	4.6
金属	5.1	1.5	2.8	0.7	13.6	6.3
計	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

表5 エプロンフィーダの周波数と各産物の処理量の関係

エプロン フィーダの周 波数(Hz)	各 産 物								合 計	
	軽質物		重質物		T.O.S産物		土 砂			
	kg/h	%	kg/h	%	kg/h	%	kg/h	%		
35	300.0	42.7	210.0	29.9	150.0	21.4	42.0	6.0	702.0	
45	495.0	49.2	273.0	27.2	177.0	17.6	60.0	6.0	1005.0	
55	531.0	48.8	333.0	30.7	156.0	14.4	66.0	6.1	1086.0	
65	720.0	50.8	405.0	28.6	216.0	15.3	75.0	5.3	1416.0	
75	786.0	48.0	468.0	28.6	294.0	17.9	90.0	5.5	1638.0	
85	969.0	41.7	625.8	26.9	598.2	25.7	133.2	5.7	2326.2	
95	990.0	42.1	672.0	28.6	570.0	24.2	120.0	5.1	2352.0	

表6 軽質物の出荷量

出荷日	重量(t)	
	廃車ダスト①	廃車ダスト②
1998年10月6日	5.99	
10月12日	8.73	
11月10日	6.98	
11月23日	9.46	
11月30日	7.37	
12月9日	6.13	
12月18日	6.62	
1999年1月15日		6.03
2月1日		7.79
2月15日		6.40
小計	51.28	20.22
総出荷量	71.50	

T.O.S 産物ではゴムの割合が最も多く、廃車ダスト①では43.8%，廃車ダスト②では53.3%となった。軽質物では綿・スポンジ類の割合が最も多く、廃車ダスト①では61.2%，廃車ダスト②では72.6%で、ゴム、金属、電線の混入は少なくなった。なお、軽質物中の金属のほとんどは扁平に潰れた空き缶であった。重質物では両廃車ダストとも似たような構成物の重量割合を示した。

### 5.3 資源化システムの処理量

廃車ダスト①を用いて本システムを操業した場合のエプロンフィーダーの周波数と各産物の処理量の関係を表5に示す。エプロンフィーダーの周波数を上げると軽質物の重量は増加するが、重量割合を見ると、周波数 65 Hz で最大の50.8%(廃車ダストの給鉱量 1416 kg/h)となり、以後、周波数を上げても重量割合は減少している。

一方、T.O.S 産物の重量割合は周波数を上げると徐々に減少するが、65 Hz を越えると逆に増加している。従って、本システムでは、エプロンフィーダーの周波数を 65 Hz に設定して操業することによって効率よく軽質物を生産できると考えられる。

### 5.4 資源化システムの運転実績

本システムを用いて生産した軽質物の出荷量を表6に示す。1998年10月1日から12月18日までは通常の廃車ダスト①を原料として操業を行い、51.28 t の軽質物を生産した。さらに、1999年1月10日から2月15日までは予め電線を除去された廃車ダスト②を原料として操業を行い、20.22 t の軽質物を生産した。

## 6. 軽質物ブリケットの分析結果

廃車ダスト①及び廃車ダスト②を原料として生産された軽質物はそれぞれ朝日池鉄工所に送られ、減容機(マルチホーマー MH150: メインモーター 110 kw, ヒーター 12 kw)でブリケット化される。各ブリケットの直径の長さの平均および嵩比重を表7に示す。直径の長さは両者ともほぼ同じであるが、廃車ダスト①のブリケットの方がかなり圧縮されて作られたために嵩密度は大きくなっていた。各ブリケットの分析結果を表8に示す。事前に電線を除去した廃車ダスト②のブリケットは発熱量が高く、また、塩素および銅が低かった。

## 7. まとめ

近年、廃車ショレッダーダストの不法投棄により有害ガスや土壤汚染の発生がしばしば報じられている。ショレッダーダストは現在管理型処分場で埋立処理すること

表7 各軽質物ブリケットの直径と長さの平均および嵩比重

ブリケット名	直径の平均 (mm)	長さの平均 (mm)	嵩比重 (g/cm <sup>3</sup> )
廃車ダスト①	26.2	86.6	1.41
廃車ダスト②	26.2	84.5	1.19

表8 各軽質物ブリケットの分析結果

項目	単位	廃車ダスト①	廃車ダスト②
発熱量	(Kcal/kg)	4470	5910
可燃分	(%)	60.3	72.65
水分	(%)	1.05	0.52
Cl	(%)	2.19	1.56
Cu	(%)	2.25	1.34
Al	(%)	8.07	1.51
S	(%)	0.19	0.66
Sn	(mg/kg)	260	216
Zn	(%)	0.58	0.57
Pb	(%)	0.62	0.17
P	(%)	0.05	0.09

が義務付けられているが、処分場が不足していることから、シェレッダーダストを資源化する必要に迫られている。本研究では、立型シグザグ空気選別機を用いた廃車シェレッダーダストを開発した。これにより綿・スponジ類やプラスチック等の軽質物を選別回収し、それらをブリケット化して固形燃料にすることことができた。今後は、軽質物以外のゴム、重質プラスチック、金属類、電線および土砂の資源化についても検討を行い、廃自動車の完全なリサイクルシステムの確立を行う予定である。

#### 謝 詞

当システムの運転およびデータ整理にご協力いただいた1998年度九州大学工学部資源工学科学生、松浦敬臣氏に厚く感謝の意を表する。

#### 参 考 文 献

- 1) 自動車工業会：1998日本の自動車工業，p. 12-13 (1999)
- 2) 自動車工業会：1998日本の自動車工業，p. 8-9 (1999)
- 3) 森 勝行他：資源処理技術，Vol. 44, No. , p. 1-4 (1997)
- 4) 日本環境衛生センター：新廃棄物法令集 p. 261 (1997)
- 5) 森 勝行他：資源処理技術，Vol. 46, No. 1, p. 9-12 (1999)
- 6) 自動車工業会：1998日本の自動車工業，p. 52 (1999)

## 液相分解法による廃プラスチック処理\*

亀山光男・辰元克充\*\*

Liquid Phase Cracking of Waste Plastic

Mitsuo KAMEYAMA and Katsunobu TATSUMOTO

## 1. はじめに

最近、埋立処分場の容量不足や、ゴミ焼却場から排出する排ガス中に含まれる高濃度のダイオキシン問題等から、一般廃プラスチックの処理についての関心が高まっており、基本的な方策として、廃プラスチックの再資源化が望まれている。

さらに、1997年4月に容器包装リサイクル法が施行され、ガラスびんとPET容器については再資源化が義務づけられた。また、2000年4月にはその他のプラスチック容器も再資源化が義務づけられることになっており、廃プラスチックの再資源化に対する要求は、今後益々高まる物と思われる。

一般廃プラスチックの再資源化の主な方法として、

- ①マテリアル・リサイクル
- ②サーマル・リサイクル

があげられる。PETボトルのように单一品種で選別収集・回収される物はPETボトルや繊維の原料としてマテリアル・リサイクルされ、他のプラスチック容器を含む一般廃プラスチックは、スーパーごみ発電の燃料にすることやごみ固形燃料(RDF)化あるいは油化して燃料とするサーマル・リサイクルが考えられている。

いずれにしても、廃プラスチックの再資源化を行い資源循環型社会を構築するためには、個々の技術開発だけでなく実際の選別収集、運搬、プラスチック処理、再利用を含めたリサイクルシステムを検討する必要がある。

一方、弊社は昭和40年代から石炭と溶媒を混合して水素雰囲気下で加圧加熱処理を行う石炭の直接液化技術の研究開発を実施してきた。そこで、石炭液化技術の応用として、プラスチック油化への適用を試みた。これは、廃プラスチックと溶媒とを混合し、液相中でプラスチッ

クの加熱処理を行う方法(液相分解油化法と呼んでいる)で、この研究過程において、一般廃プラスチックの新しい減容化・運搬方法や液相分解油化法についての知見が得られたので、その一部について紹介したい。

## 2. 廃プラスチック処理フローと概要

一般家庭から排出される廃プラスチックには発泡トレイやカップ、アイスのカップ、カップラーメンの容器、納豆や豆腐の容器が多く(当社調べ)，そのため大変嵩張ってしまい、嵩比重が0.01~0.02程度になる。このような嵩高い廃プラスチックを処理する場合、通常、廃プラスチックが入った袋を破袋・粗粉碎した後に溶融処理や微粉碎処理に移行するのが普通であるが、本研究では破袋・粗粉碎処理を省略して処理することができる。

廃プラスチックの処理フロー略図を図1に示したが、手順は次のようになる。

## ①加熱混合工程

廃プラスチックと溶媒を混合する。溶媒として廃エンジン油のような廃油や重油を使用する。また、廃プラスチック中にポリ塩化ビニル製品が含まれていても加熱混合処理ができる。この時点での廃プラスチックの容積は約1/30に減容化され、100°C以上で流体、室温では固体状態になる。そこでこの工程を簡易油化工程と呼び、得られた物を簡易処理油(又は減容化物)と呼ぶことにした。

## ②液相分解油化工程

簡易処理油を430°C前後で液相分解処理する。この工程で簡易処理油の脱塩素と液相分解油化処理を行い分解油を得る。分解油は一部②の加熱混合工程の溶媒として循環使用するか、残りは製品油とする。

各工程の概要を記す。

\* 平成11年11月11日本会第103回例会において発表

\*\* 三井石炭液化株式会社 技術部  
平成11年9月13日受理

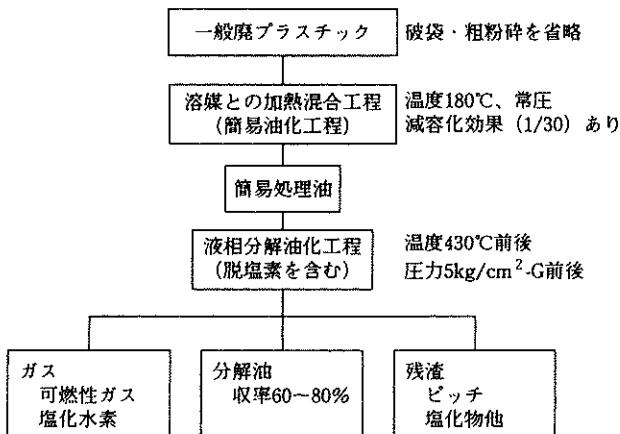


図1 廃プラスチックの処理フロー

### 3. 溶媒との加熱混合による減容化

加熱混合工程（簡易油化工程）で使用する装置略図を図2に示した。この装置は熱媒により溶媒温度を約200°Cまで加熱することができる。この内部に溶媒を入れて180°Cまで加熱した後、ポリ袋に入っている廃プラスチックを粉碎せずに、袋ごと投入する（写真1）。投入した廃プラスチックは数分で溶媒中に融け込み、溶媒30kgに対して廃プラスチック30kgを約30分くらいで融かし込むことができる。その後、溶媒に廃プラスチックが融け込んだ物（簡易処理油）を抜き出した（写真2）。この簡易処理油の冷却物は固体として取扱うことができる。

溶媒に投入した廃プラスチックの容積は約1000リットル

（1m<sup>3</sup>）に対し、処理後の容積は約50リットルだったので減容化率は約1/20であった。



写真1

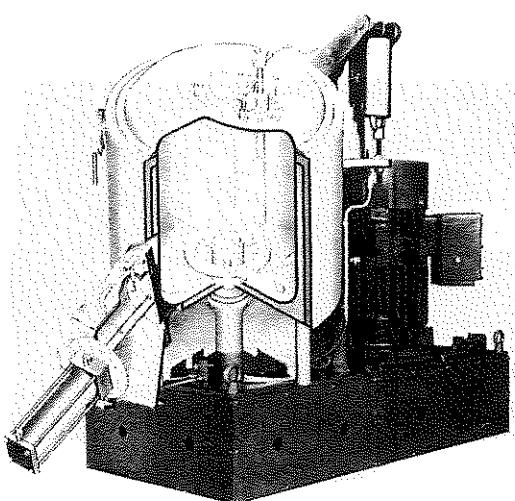


写真2 簡易油化試験装置略図

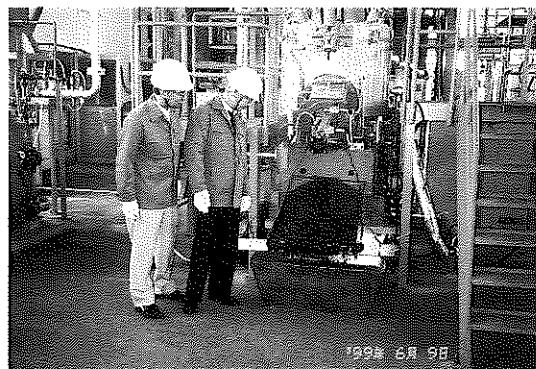
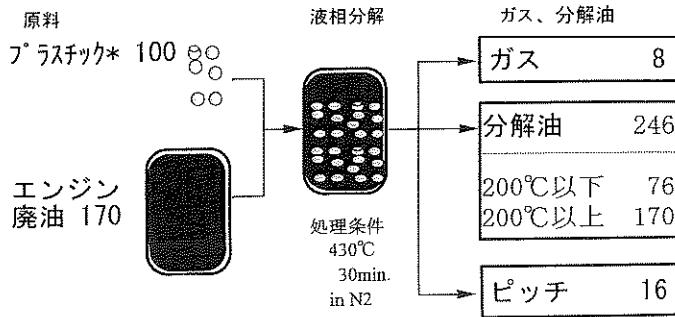


写真2



(\*プラスチック: PE 47, PP 18, PS 35)

図3 液相分解法による基礎試験結果例-1

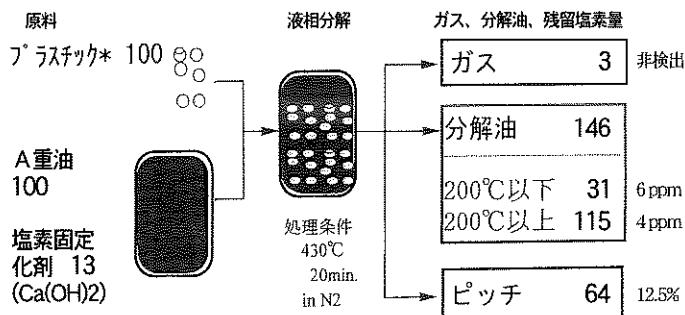


図4 液相分解法による基礎試験結果例-2

#### 4. 簡易処理油の液相分解油化

液相分解油化の試験は、内容積 500 cc の圧力反応容器を使用し、プラスチックとしてポリエチレン、ポリプロピレン、ポリスチレン、PVC、エポキシ樹脂、フェノール樹脂等の原料ペレットを用いて実施した。

手順は、圧力反応容器にプラスチックと溶媒を室温で投入して窒素置換した。その後、密封して 430°C まで昇温し、20~30分保持した後冷却した。冷却後、ガスと分解液を回収し、分解液は更に常圧蒸留（最高温度 360°C）にて分解油と残渣とに分離した。その結果例を図3, 4に示した。

図3から、投入したプラスチックの重量を100とした時の溶媒（ここではエンジン廃油を使用した）の量は170で、液相分解の結果得られた分解油の量は246であった。そのため、使用したエンジン廃油の量を差し引くと76となり、即ち、投入プラスチックに対する分解油收率は76%であると計算された。

図4は、塩素の固定化剤として水酸化カルシウムを使用した例であるが、分解油中の残留塩素量は 6 ppm 以下であり、塩素の殆どが残渣中に固定化されていること

が確認された。

このように、液相分解により廃プラスチックを高收率で分解し、塩素を全て残渣中に固定化できることが確認された。

現在、10kg/時処理能力の連続装置（写真3）により、自治体から排出される実物による試験運転を実施し、大

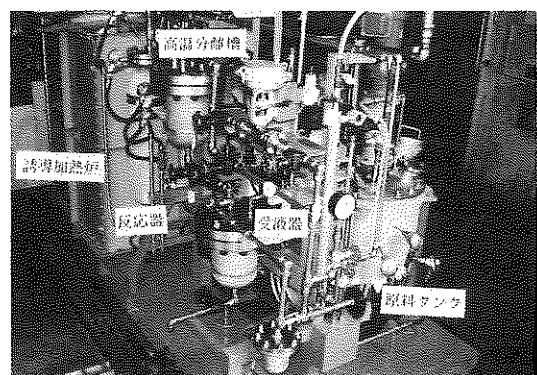


写真3 連続式脱塩素・液相分解試作装置  
三井石炭液化株式会社（平成9年度試作品）

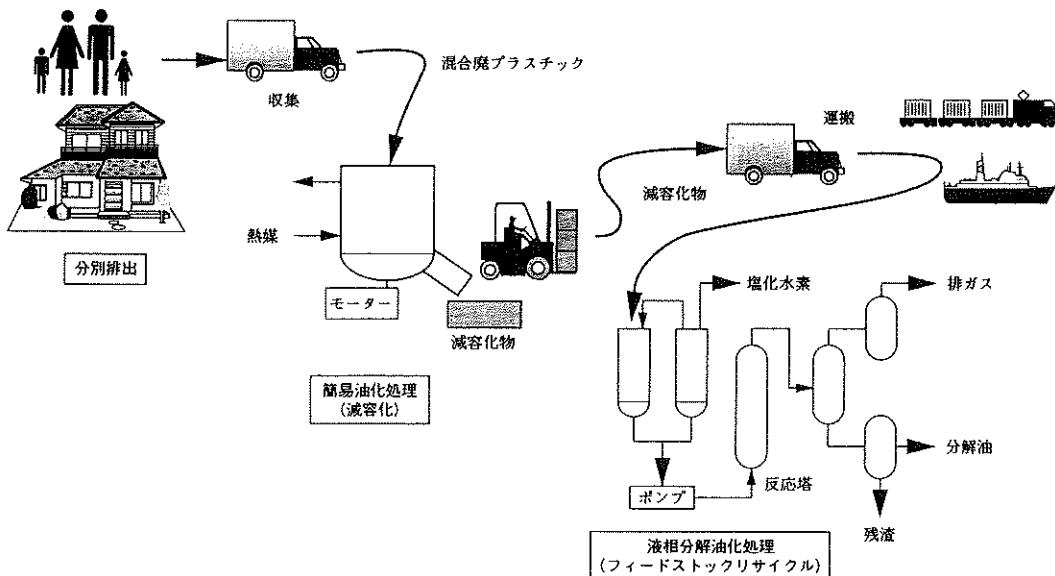


図 5

型装置設計のためのデータを取得中である。

## 5. おわりに

以上のように簡易油化及び液相分解油化について簡単に記したが、これらの技術に基づいて想定した廃プラスチックのリサイクルシステムを図 5 に示した。

これは、最初に、消費者から分別排出された廃プラスチックを、消費地において簡易油化処理を行って減容化する。これにより一時保管場所のスペースを少なくすることができ、また、その後の輸送効率が向上する等のメリットが生じる。次に、そこで得られた簡易処理油（減容化物）は、次工程である液相分解油化設備まで運搬して集約し、集中油化処理を行うというもので、これによ

り油化コストの低減が期待できる。

また、液相分解油化法で得られる分解油の主な用途は燃料であるが、今後、化学原料として再利用する可能性を推進していきたい。

## 6. 謝辞

この研究は、科学技術庁の平成 7~9 年度及び平成 10~12 年度科学技術振興調整費による「生活者ニーズ対応研究」の一環として実施している。また、研究遂行にあたり、通産省工業技術院資源環境技術総合研究所炭化水素工学研究室佐藤芳樹博士の御指導を賜り、この場をお借りして深く感謝の意を表する。

## 都市ごみの固形燃料化事業について\*

宮代一利\*\*

The Project of Producing and Using the Refuse Derived Fuel Made from Municipal Waste

Kazutoshi MIYASHIRO

## はじめに

1997年4月11日、厚生省は全国のごみ焼却場1150施設のダイオキシン濃度測定結果を公表し、緊急対策基準超過施設が72施設もあることが判明した。この事実は、小型焼却炉で一般ごみを焼却する現在のごみ処理方法を継続することが、環境面で危険であることを示しており、ごみの固形燃料化による広域処理、更に一步前進してエネルギーの有効利用を促進する時代が到来したと言えよう。

本稿では、第三セクター方式により一般廃棄物を固形燃料化し、廃棄物が持つエネルギーの有効利用事業を開発する具体例を紹介しながら、将来の大型廃棄物発電事業の方向性について述べることにする。

## 1. 廃棄物発電

## 1.1 日本における廃棄物発電

日本で排出される一般廃棄物は年間約5,000万トンで、その処理は廃棄物の処理及び清掃に関する法律において自治体の固有業務と定められ、各自治体毎に実施されてきた。全体として見ると、約4分の3が焼却され、残りの4分の1の大半は直接埋め立てられ、リサイクル率は数%にすぎない。

焼却することにより容積は小さくなるが、焼却後の有害物を含む灰は埋立に回されており、直接埋立を含む排出量の約3分の1を埋め立てているのが現状である。国土の狭い日本においては、ごみの埋め立て地の不足が大きな問題となっている。今後は、埋立にできる限り頼らない廃棄物処理システムの構築が不可避である。

また、廃棄物処理が自治体毎に実施されているため、

日本国内に約2千カ所のごみ焼却炉が散在し、そのほとんどが規模の小さいものとなっているため、技術的にも、経済的にも熱回収によるごみの有効利用は困難な状態となっている。

更に、収集から処理まで各自治体毎に実施しているため、分別の度合いも異なり、プラスティックを混入したまま焼却処理されている例も少なくない。このプラスティック混入家庭ごみを焼却すると、食塩や塩化ビニル樹脂に含まれる塩素が有機物と混合焼却される際にダイオキシンが生成するため、大きな社会問題となっている。

エネルギー資源の大半を海外から輸入している日本において、ごみから効率良く熱を回収することは有効なエネルギー供給方法と言える。従って、多様な性状のごみをリサイクルし、ごみの燃焼によって発生する灰も安全に処理できる廃棄物発電システムが、21世紀に望まれる循環型社会システムの一翼を担うことは確実である。

1974年に東京都江東区のごみ処理場において、出力1万kWを越える日本初の大型廃棄物発電が実現した。20年以上が経過した現在でも、全国約2千カ所のごみ焼却場のうち、発電を行っている所は1割に満たない。これは、日本のごみ焼却場が各自治体毎に設置されているため、扱うごみの量が少なく、発電規模にまで至らないことが主な理由である。廃棄物発電が普及するためには、大量のごみを広域収集するシステムが必要である。また、収集するごみを一般廃棄物に限定する必要はなく、燃料として安全に使用できるのであれば産業廃棄物も同時に燃焼対象とすることもスケールメリットを得るための方策であり、法改正が望まれる。

## 1.2 廃棄物発電事業を実現するための課題

日本において経済性がある大型廃棄物発電事業を実現するための問題点は、次の3つが考えられる。

まず第一に、法規制上の問題がある。一般廃棄物の処理は各自治体に処理義務が課せられているため、行政区域を越えるいわゆる越境が原則としてできないため、大

\* 平成11年11月11日本会第103回例会において発表

\*\* 三泰マテリアル株式会社 地球環境エネルギーカンパニー 環境リサイクル事業センター  
平成11年9月28日受理

量のごみを一ヵ所に集めることができ難である。また、一般廃棄物と産業廃棄物の規制上の違いがあり、基本的にこれらを混合処理することができない。この様な法律体系では有効な廃棄物発電の実現は困難であるので、実状に合わせた規制緩和が期待される。

次に、住民の意識の問題がある。ごみの処理は自治体がしてくれるものであり、家庭から排出されるごみはごみ捨て場に置いておけば自然と消えてなくなるという意識により、日本人は一般的にごみの有効利用やごみ処理行政の経済性について関心が薄いと言われている。その結果、NIMBY (Not In My Back Yard) 現象が定着しており、自らの住んでいる地域に廃棄物処理施設を設置することに強い抵抗感を示す。国民一人一人が意識を変えていくことはもちろん重要であるが、大型廃棄物発電所の計画時点から、単なる無味乾燥な行政ベースの処理場としての計画ではなく、住民もその計画立案に参加する都市整備計画の不可欠要素として位置づけるなどの前向きな取組が肝要であろう。

第三には、これまでの一般廃棄物処理は自治体による行政主導であったため、廃掃法に定められた処理方法にこだわりすぎ、効率的なシステムの構築や積極的な技術導入による改良、改善が行われていないことがあり、これが大型廃棄物発電事業実現の障害となっている。今後は、民間の活力を導入することにより、効率的な廃棄物処理の導入と徹底的なリサイクルを同時に実現することを目指すべきであろう。

民間企業の大型廃棄物発電事業への進出の形態は、民間企業が単独で廃棄物発電所を建設し、自治体から一般廃棄物の処理を委託される形（昨今注目を浴びているPFI方式）と、自治体と民間企業の共同事業とする形（いわゆる第三セクター方式）が考えられる。いずれにしても、民間の活力をうまく利用すれば、効率的な経営と継続的な新技術の導入によるコストダウンが実現されることは間違いない。

## 2. ごみ固形燃料化 (RDF)

近年、日本においてもごみを固形化して燃料とすることにより、ごみの輸送性・貯蔵性・燃焼性を高めるRDF (Refuse Derived Fuel: ごみから作った燃料) が、廃棄物処理の一方法として注目を集めている。

### 2.1 RDF の定義

上述の通り、RDF とは本来はごみから作った燃料というシンプルな英語の略語である。日本においては今のところ明確な定義はないが、アメリカでは ASTM (American Society for Testing and Materials: アメリカ材料検定協会) において 7 段階に分類し、明確に定義している。(表1)

この定義から分かるとおり、受入れるごみの種類にかかわらず、使用する際の形態により分類している。アメリカではごみを燃料として認識しているが、日本の場合は、ごみそのものを一般廃棄物と産業廃棄物に分類していることを考えると、単なる処理対象としかみなしていないところに基本的な考え方の相違が見られる。また、現在日本の RDF は、ASTM の分類 RDF-5 に該当するものを指すが、この RDF の製造方法は固形化の工程でコストがかかるため、必ずしも経済的に最良の方法ではなく、長期保存、長距離輸送などの必要がある場合に有効性を発揮する一方にすぎないと見える。今後は様々な燃焼技術の開発、導入により、より広い意味でのごみの燃料化が推進されるべきと考えられる。

### 2.2 RDF の製造方法

RDF は、ごみから燃料として有効利用できる成分を選別し、燃焼しやすい形に加工して製造される。その主要な製造工程は、破碎・乾燥・選別・成形の 4 つの要素技術からなるが、各要素技術そのものは既存技術であって、それらの組み合わせによりシステムとしての特徴が現れる。アメリカで主流と言われる「フラフ RDF (ふわふわした燃料の意)」は、その製造工程に成形工程がない。

表1 ASTM による RDF の製品分類

分類	内容	種類
RDF-1	粗大ごみを分離除去した通常の都市ごみ	-
RDF-2	6-in,-square 通過が95%の粗い粒度のRDFで、金属類を分類する場合と分類しない場合とがある	Fluff-RDF (軟質ごみ燃料)
RDF-3	2-in,-square 通過が95%の細かい粒度のRDFで、金属類やガラス類を分類したもの	
RDF-4	10-mesh screen 通過が95%の粉状のRDFで、金属類やガラス類を分類したもの	Dust-RDF (微粉ごみ燃料)
RDF-5	ペレット状、キューブ状もしくはブリケット状に固めたRDF	Pellet-RDF (成形ごみ燃料)
RDF-6	液状のRDF	-
RDF-7	ガス状のRDF	

表2 固形燃料化施設の設置状況

県	事業主体	施設名	設置年度	稼働状況	能力	メーカー	RDF利用先	総事業費
愛知県	田原町	田原町リサイクルセンター	S62.4	稼動	47 t/日	三菱レイヨンエンジ	民間熱利用	
千葉県	習志野市		S62	休止	20 t/日	荏原		
三重県	朝日町川越町一部事務組合	環境クリーンセンター	S63.4	休止		三菱レイヨンエンジ		
北海道	富良野市	富良野リサイクルセンター	S63.7	稼動	7.2 t/7Hr	中道機械	暖房用熱源	3億円
北海道	札幌市環境局	札幌市資源化工場	H2.3	稼動	200 t/13Hr	恵東開発	北海道熱供給公社熱利用	26億円
奈良県	日本リサイクルマネジメント	奈良県廻原事務所	H2.11	稼動	8 t/7Hr	RMJ	民間熱利用	
栃木県	日本リサイクルマネジメント	栃木県野木事務所	H4.11	稼動	10 t/7Hr	RMJ	町営風呂、民間熱利用	
富山県	砺波広域事務組合	砺波リサイクルセンター	H7.4	稼動	28 t/7Hr	RMJ	場内冷暖房、待機施設暖房用	26.9億円
大分県	津久見市	ドリームヒュエルセンター	H8.12	稼動	32 t/8Hr	Jカトレル	太平洋セメント	24億円
滋賀県	愛知郡広域行政組合	リバースセンター	H9.4	稼動	22 t/7Hr	RMJ	民間利用	19.5億円
群馬県	邑楽郡板倉町	板倉町資源化センター	H9.4	稼動	23 t/7Hr	RMJ	場内冷暖房、民間利用	24.2億円
北海道	留萌市	留萌リサイクルプラザ	H10.3	稼動	20 t/8Hr	栗本鐵工所	場内熱利用	8.7億円
群馬県	水上夜野新治衛生施設組合	奥利根アメニティパーク	H10.3	稼動	40 t/15Hr	石川島播磨重工業	場内熱利用、小型発電	22.1億円
静岡県	御殿場市小山町広域行政組合	御殿場・小山RDFセンター	H10.3 H11.3延期	150 t/日	Jカトレル	民間利用などを検討	80億円	
広島県	甲世衛生組合	エコワライズセンター	H10.3	稼動	16 t/7Hr	RMJ	民間利用	13.1億円
高知県	津野山広域町村事務組合	クリーンセンター四万十	H10.3	稼動	6 t/7Hr	RMJ	民間利用、町内利用を検討	6.8億円
福岡県	苅田町等第三セクター	苅田エコプラント	H10.10	稼動	42 t/日	三菱マテリアル	三菱マテリアル	26億円
三重県	海山町	海山町リサイクルセンター	H11.3	稼動	20 t/7Hr	RMJ	民間利用、県RDF発電利用検討	18.1億円
島根県	加茂町外三町清掃組合	雲南エネルギーセンター	H11.3	稼動	30 t/7Hr	RMJ	場内利用、民間利用検討	28.1億円
山口県	新南陽市		H11.3	稼動	48 t/8Hr	RMJ/NGK	場内利用、セメント利用	37.8億円
山口県	美祢地区衛生組合		H11.3	稼動	28 t/8Hr	IHI宇部興産、荏原	セメント利用	21.1億円
群馬県	多野郡鬼石町	鬼石町リサイクルプラザ	H11.3	稼動	15 t/7Hr	恵東開発	町内利用を検討	
兵庫県	宍粟郡広域行政事務組合	宍粟環境美化センター	H11.2	稼動	30 t/日	神戸製鋼所	神戸製鋼所内熱利用	19.8億円
群馬県	多野郡中里村	多野郡一般廃棄物処理施設	H11.3	稼動	6 t/7Hr	RMJ	民間利用を検討	6億円
山梨県	甲南環境衛生組合		H11.3	稼動	10 t/8Hr	石川島播磨重工業		10.3億円
和歌山県	太地町		H12.3	建設中	6 t/7Hr	三和動熱		5.64億円
福岡県	椎田築城町共立衛生施設組合		H12.3	建設中	25 t/7Hr		セメント利用を検討	
山口県	豊浦豊北清掃施設組合				28 t/日			

日本で既に稼働しているシステムは、全て固形化する方式のため成形工程を持ち、成形機の種類により RDF の形狀が異なっている。日本における固形燃料化事業実施事例一覧を表2に示す。

### 2.3 日本における RDF の特徴

日本における RDF の第一の特徴は、固形化されていることにある。輸送コストの高い日本においては、固形化による輸送性の向上は大きなメリットであるが、燃焼してエネルギーを取り出すことが最終的目的であることを考えた場合、わざわざ工程を増やし、コストをかけて成形することが必ずしも最良の方法とは言えない。燃焼方法を含め、トータルなシステムとしての合理性の追求が今後の課題となろう。

第二の特徴として、その製造工程で石灰分を添加していることが挙げられる。石灰の添加により、成形しやすく、また、腐敗が抑制され、輸送性・貯蔵性が向上すると言われているが、燃焼時に発生する飛灰の量が増えるというデメリットが意外に忘れられている。RDF の燃焼実験の結果、石灰の添加により、塩素によるボイラ

系統の腐食とダイオキシン類の発生を抑制する効果があるとの報告も見られるが、石灰の添加自体は不可欠の要件ではなく、地域特性や経済性を考慮してその要否を決めるべきであろう。

### 2.4 RDF の課題と今後の見通し

RDF の最大の問題点は、安定的な受容の確保が困難なことがある。表2に示した実施事例の中でも、RDF 化したものの製造量に見合った需要を確保できないために、結局埋め立てているケースも見られるが、これでは、一体何をしているのか分からぬ。

RDF の需要が拡大しない理由として、まず塩素の含有量が多いことが考えられる。木くずや紙くずのみを対象としている RDF ならば大きな問題にはならないが、一般ごみを対象とする場合には、この問題は避けて通ることができない。特にプラスティック混入家庭ごみの場合は、ポリ塩化ビニルやポリ塩化ビニリデンといった塩素含有プラスティックが塩素の供給源となる。この対策としては、ごみ処理の基本である住民による分別が肝要である。また、塩素含有プラスティックの識別・分離シ

ステムの導入、塩素含有燃料の燃焼技術の開発、耐食材料の導入などにも期待が寄せられている。

RDF の需要が拡大しないもう一つの理由は、RDF を燃料として使用するためには、有償で買い取らなければならぬことにある。石炭の 3 分の 1 程度のカロリーで、しかも灰処理問題がある RDF を、金をかけて購入することは非現実的である。かと言って、現在の法律では廃棄物処理として RDF を使用（いわゆる逆有償）する場合には、廃棄物処理業、廃棄物処理施設の許可を受ける必要があるが、わざわざこの許認可を取得する面倒をかけるなら使わないというスタンスになってしまうため、現状では産業界における RDF の大量使用は期待薄と言わざるを得ない。RDF を推奨し、導入しようとするならば、RDF を万能と考えず、現在のごみ処理コストを少しでも低減できれば良しとする考え方でないと、産業界が RDF を燃料として本格的な使用に踏み切ることはまずないと思われる。

廃棄物発電の項でも触れたが、今後は廃棄物処理とリサイクルを同時に実現できる一貫処理・リサイクルシステムの構築が重要と考えられる。技術的に見れば、RDF の製造・燃焼発電・灰処理の一連の工程は相互に密接に関係して組み上げることで、RDF の消費問題に適切な対応ができるようになる。但し、繰り返すが、行政のごみ処理費用が現状よりも大幅に改善されることは期待すべきではないが、一貫システムであればトータルの採算管理ができるメリットがある。

次章では、総合的なシステムを作り上げる方法として、第三セクター方式の有効性を述べてみたい。

### 3. 第三セクター方式

第三セクターとは、第一セクターである自治体と第二セクターである民間企業が、共同で出資して作る会社である。自治体にとって一般廃棄物の処理は固有の業務であり、クリーンかつ低成本で実現することが望まれる。一方、民間企業は企業経営のノウハウや技術を幅広くこの分野においても提供できるであろう。双方の利害や立場が合致することにより、第三セクターが設立されることになる。

三菱マテリアル株式会社（以下三菱と略す）らは、1997年1月に福岡県京都郡苅田町と共同で、RDF 製造の第三セクター会社「苅田エコプラント株式会社」（以下エコプラントと略す）を設立した。本章では、この例に則して、第三セクターによる固形燃料化事業について述べる。

#### 3.1 第三セクター会社の概要と運営

新しく設立された第三セクター会社の概要を表3に示す。

新会社は、苅田町と民間企業3社が出資して設立した。社長は苅田町の町長が就任し、資本金の過半数も苅田町が受け持っている。これらのことから、一般廃棄物の処理責任を本来的に受け持っている行政として、その責任を果たすことへの強い意志を見ることができる。一方、民間企業は主力のセメント工場を立地している町への地元貢献を主目的とする三菱マテリアルと、廃棄物発電の実現を目指す電源開発㈱と、町のメインバンクである福岡銀行が参加している。

施設の能力は RDF の製造で毎時 6 トン、粗大ごみの処理施設も併設しており、こちらは毎時 2 トンとなっている。当面は町内のごみを処理することが主目的であり、一日 8 時間程度の操業をしているが、施設の能力からすると、操業時間を延長することにより一日当たりの処理可能量は増やすことが可能である。

新会社の運営形態を図1に示す。

エコプラント社の固形燃料化施設、粗大ごみ処理施設の建設資金は、エコプラント社自ら調達するが、資金調達のための支援は出資者が行う。この点が町から見た第三セクター方式のメリットであり、町は起債の必要がなくなるばかりでなく、建設資金の約 2 分の 1 は民間が実質負担する。

施設の運転及び日常業務については、各出資者から必要に応じて適宜出向する技術者、経理・総務などの事務専門職が担当するので、弾力的な経営を行うことができる。

エコプラント社の収入源は、町からの廃棄物処理委託費と三菱への RDF の販売代金であるが、民間ベースの安定的な運転による変動費の低減、処理対象ごみの増加

表3 苅田エコプラント株式会社の概要

1.会社名	苅田エコプラント株式会社	
2.所在地	福岡県京都郡苅田町鳥越町1の3	
3.資本金	9,800万円	
4.代表者	伊塚 工（苅田町長）	
5.出資比率	苅田町 51.0% 三菱マテリアル 34.0% 電源開発 10.0% 福岡銀行 5.0%	
6.事業内容	一般廃棄物、産業廃棄物の固形燃料への加工 及び販売	
7.敷地	全体敷地面積 3.2ha RDF設備敷地面積 13,560平方メートル	
8.処理能力	RDF製造施設 42t/7hr 粗大ごみ処理施設 10t/5hr	
9.投資額	約32億円	
10.社員	6名 従業員9名 計15名	
11.工事期間	着工 平成9年7月 竣工 平成10年10月	

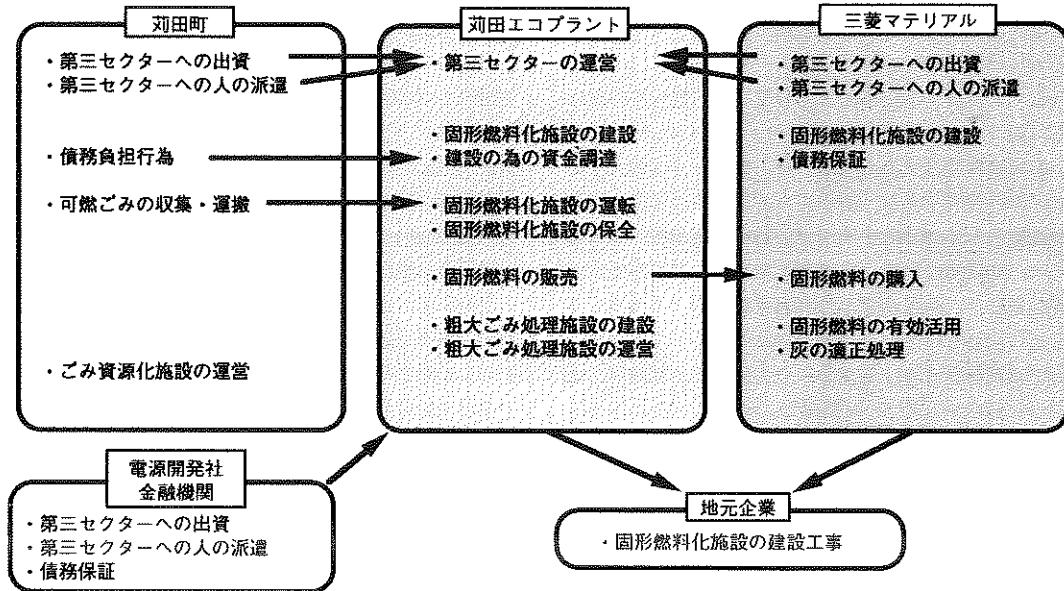


図1 第三セクターRengeエコプラント社の運営形態

による減価償却費の低減などにより利益が出る場合、出資比率に応じて町には割戻金が、その他の出資者には配当金が支払われる。

### 3.2 全体システムの概要

今回のエコプラント社方式では、Renge町とエコプラント社と三菱がそれぞれ役割を分担し、廃棄物の処理と発電によるサーマルリサイクルの一貫処理システムを実現していく計画である。すなわち、Renge町は自治体の固有業務である一般廃棄物処理のうち廃棄物の収集・運搬を担当し、エコプラント社がこれを受け取って RDF を製造し、その後 RDF は三菱が燃料として引き取り、燃焼に伴って発生する灰の処理までを分担することになっている。詳細について、図2に示す全体フロー図に沿って説明を加える。

#### (1) Renge町の分担

Renge町は従来より可燃ごみ・不燃ごみ・粗大ごみ・資源ごみの4分別で収集しているため、可燃ごみはプラスティックが含まれる。エコプラント社にて固体燃料化の対象としているごみはプラスティック混入家庭ごみと可燃性粗大ごみである。町当局は将来的には、塩化ビニル樹脂などの燃料化不適物の住民による分別を行う方針ではあるが、今回、第三セクター設立に際してはこれまでの収集システムを維持することとした。

#### (2) エコプラント社の分担

エコプラント社は町が収集した可燃ごみと粗大ごみを受け取り、固体燃料化施設及び粗大ごみ処理施設にて燃料化不適物を分別後、乾燥・成形工程を経て RDF を生

産する。燃料化不適物のうち、鉄類は選別後資源化、その他のガラスや陶器のかけらなどは最終処分場にて処分する。製造した RDF はすべて三菱にて消費するので、RDF の形状や水分などは使用者である三菱の要求条件に合わせて製造する。使用者が不特定の場合に比べると、燃焼方式や地理的条件に合わせた RDF を製造できるので、RDF 製造工程の合理化を図ることができる。例えば、今回の場合、エコプラント社の RDF 製造工場から使用先である三菱のセメント工場までの距離が非常に近いため、長距離輸送、長期保存の必要がないので、RDF に添加する石灰の量を必要最小限に抑えることによって、焼却灰の発生量を抑制することができた。また、成形についても、通常より大きめの成形をしているが、使用者側でこれをうまく消費しており、成形にかかる電力は3割以上抑えられている。

#### (3) 三菱の役割

三菱はエコプラント社が製造した RDF を全量有償にて買い取り、セメント製造の補助燃料として使用する。将来的には廃棄物発電の検討もしている。燃焼による焼却灰は、セメント工場にて原料の一部として有効利用される。RDF に含有される塩素がセメント製造工程に持ち込まれるため、これによる運転阻害を回避する必要があるので、塩素の抜き出し装置を新設することで対応した。

### 3.3 第三セクター方式のメリットとデメリット

#### (1) 長期安定性

第三セクターは自治体と民間企業が経営責任を持つこ

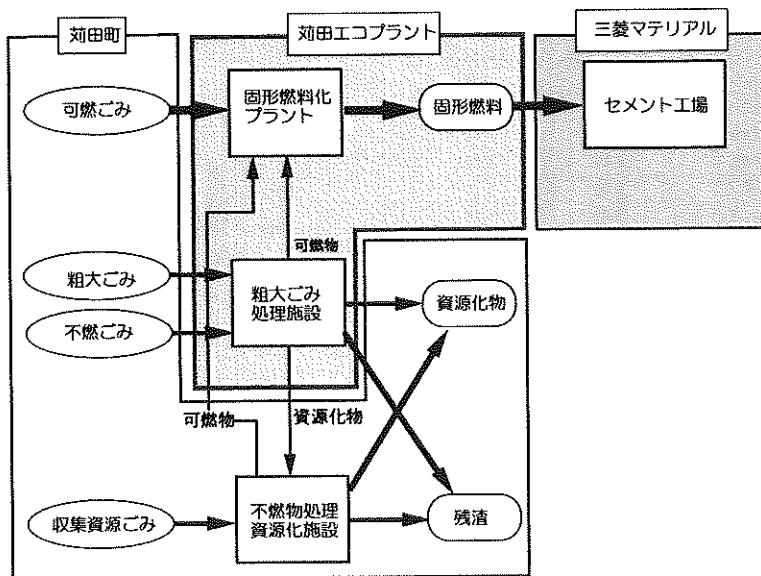


図2 荘田町における事業概要

とになるので、長期安定性と経済合理性が確保されるメリットがある。

荘田町にとって、町内の廃棄物が確実に処理されること、RDFの需要先が確保できること、焼却灰の処理負担が軽減されることなどが長期的に保証され、廃掃法に定められている自治体の処理責任は完結されることになる。

一方、三菱にとっては、RDFを燃料として事業を開くためには、長期安定的な燃料の供給が保証される必要がある。地元貢献とともにRDF化事業の新しいパターンを実現でき、今後の環境リサイクル事業の進展にプラスとなることが期待できる。

#### (2) 経済的優位性

民活を導入した民間ベースの事業運営により、荘田町では廃棄物処理コストの低減を図ることができた。また、今回の場合は、エコプラント社と三菱の工場が隣接しているために、定期的なメンテナンスや偶発的に発生する運転トラブルなどを、三菱のメンテナンス部門の支援によって解消することで、安定的な継続運転が可能となる。

#### (3) 新規技術対応

民間企業は競争力を維持するため、継続的に技術開発に取り組んでいる。廃棄物処理について言えば、燃焼技術、灰処理技術、ダイオキシン除去・分解技術などの開発を挙げることができる。自治体の補助金による自主事業では補助金ゆえにいろいろと設備に手を入れるために条件が加わり、新技術の導入は容易ではない。エコプラント社は民間企業なので、社会情勢に遅れることなく

新規技術導入が可能となる。このことにより、万全の環境対策を施すことができる。

#### (4) 起債の不要

第三セクター自らが、施設の建設費用を金融市場から最も有利な条件で調達するので、町は地方債の起債の必要がなくなり、起債枠を他の用途に振り向けることができる。

#### (5) 補助金を受けられない

一般には固形燃料化施設、粗大ごみ処理施設は厚生省の国庫補助の対象でありながら、第三セクターが民間会社であることから、この補助を受けることができなくなる。但し、今回のエコプラント社の場合には、補助金を受けた自主事業の場合よりも、15年間の総コストは第三セクターの方が安いことが明らかとなり、民活導入の経済合理性を示す例となっている。

なお、平成9年度より固形燃料化施設は通産省の補助対象となつたため、今後は第三セクターによる民間ベースでのRDF化事業の展開が促進されることになろう。

### 5. 固形燃料化施設の操業

1997年1月に会社設立後、地元説明会等の準備を経て、同年7月に起工式を執り行い、翌1998年7月に全建設工事を完了した。実質の工期は約13カ月であった。1998年8月1日に受電を開始し、試運転期間を経て、1999年1月からは安定操業を続けている。

本章では、操業の実績や今後の課題などについて述べることとする。

表4 荘田エコプラントの運転実績（1999年）

単位	生ごみの受入量 トン	RDF製造量 トン	稼働時間 時間
1月	864	558	181
2月	753	465	149
3月	863	542	173
4月	1035	607	200
5月	951	559	179
6月	1077	597	173
7月	1024	597	199
8月	934	551	185

### 5.1 運転状況

本施設には試運転を含めて1998年10月からごみを投入している。これまでのごみの処理量と固体燃料の製造量及び運転時間を表4及び図3にまとめる。

上述の通り、本年1月からは安定操業に入り、以来8月まで8カ月の運転を継続しているが、その間に処理した生ごみの総量は約7,500トン、製造されたRDFは約4,500トンとなっている。運転時間も試運転期間を含めると間もなく2,000時間に達する。

### 5.2 初期トラブルとその解決

初期トラブルの主な項目とその解決方法について次に紹介する。

1. 計画ごみ質と実際の試運転開始時のごみの質が違ったため、更には布団ごみなどの不適物の処理のため、破碎設備・選別設備・乾燥設備・搬送設備の一連の破碎粒度と処理能力の調整に手間取った。実際の調整は閉塞箇所の拡幅を順次行いながら、一次破碎機と二次破碎機の各々のスクリーンの開口サイズの変更によって解決した。
2. 乾燥設備の排ガス系のダスト量がテストプラントからの想定を遙かに越えたための捕集設備の改造に手間取った。実際の改造としては、サイクロンの一部チャンバー化、二重ダンパーの大型化等によって解決した。
3. 乾燥設備以降の乾燥ごみの残留やそれに伴う火災の発生が頻発し、残留しないような機器の改造と冷却を兼ねた散水設備の設置などにより解決した。
4. 供給機（振動設備）の振動が想定より大きく、架台の補強を行い、全体の振動を軽減し、合わせて手摺の振れ止め、他の架台との分離等の対策を行なった。
5. 設計当初は搬送設備一部開口があったが、生ゴミの臭気対策として、負荷運転開始に合わせて、全て塞ぎ、集塵系のフローシートを見直して、搬送系全体

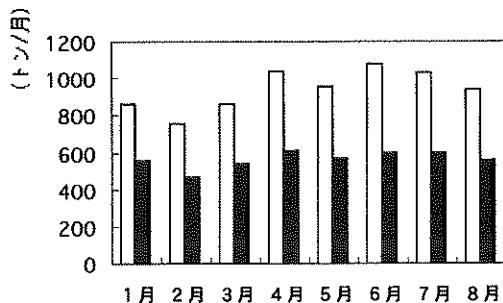


図3 運転実績のまとめ (1999年)  
□生ごみ処理量 ■RDF 製造量

を負圧に維持して、場内に臭気を出さない構造とした。具体的には搬送コンベアのサイドカバー増設だけでなく全ての軸のシール強化、点検口のパッキンの強化、ボルト止めのカバーのコーティング、集塵配管の増設等徹底的に臭気の発生箇所を塞いだ。

### 5.3 今後の課題

運転開始して約1年間で、安定運転の実現まで達成しているが、今後はランニングコストの削減が大きな課題となる。これまでの運転で、破碎設備の刃や、成形機のダイの摩耗が当初の想定より早く、寿命をいかにして延ばすかという点が一番の課題として明らかになってきたが、一部溶射等による摩耗の軽減と、選別設備の保守点検サイクルを短くして不適物の除去を徹底的に行っていくことで対応することとしている。

## おわりに

廃棄物処理の問題は現代社会において、避けて通ることのできない問題となっているが、エネルギー資源の一つとしての将来的な可能性を秘めていると言える。第三セクター方式は、これまで、自治体と民間企業が別々に取り組んできた廃棄物問題とエネルギー問題に、共同戦線を張る複合的なシステムである。我々民間企業は、今後も技術開発、システム開発を推し進め、近い将来に到来する地球規模での循環型社会システムが構築されるために役立ちたいと願うものである。

## 参考文献

- 1) 阿部 正, 米国のごみ処理発電プロジェクト (中央法規)
- 2) (社)日本工業技術振興協会, “廃棄物処理システム技術研究会廃棄物専門家養成講座”史料
- 3) 天野敏男, “プラスティック種類判別技術の開発動向”, 化学経済, 44, (3), 69 (Mar. 1997)

## 超高温材料研究センターと超高温材料研究所の活動について\*

舛 本 弘 毅\*\*

The Activities of Japan Ultra-high Temperature Materials Research Center  
and Japan Ultra-high Temperature Materials Research Institute

Hiroki MASUMOTO

## 1. はじめに

(株)超高温材料研究センター / (株)超高温材料研究所は、平成2年3月に設立されて以来、10年になろうとしているが、この機会に両社設立の背景、最近の我が国における超高温材料開発の状況と両社の関連、今後のありかた等について要約した。

## 2. (株)超高温材料研究センター設立の背景

昭和63年10月1日付けで施行された「産業技術に関する研究開発体制の整備に関する法律(昭和63年法律第63号)」に基づき、新エネルギー・産業技術総合開発機構(略称:NEDO)の「研究基盤整備事業」が発足した。この事業は、今後わが国が進めていくべき高度な産業技術の研究開発の推進に必要な施設・設備で、個々の企業では整備することが困難なものをNEDO等が出資等を行うことによって「研究基盤施設」として整備し、広く内外の企業・研究者等の共用に有料で供することにより、研究開発の進展を図ることを目的としている。現在、研究基盤施設の整備・運営は、NEDO、地方公共団体および民間が出資した第三セクター方式により昭和63年から平成2年の間に設立された5つの整備法人が実施している。これらの第三セクターの事業内容は、最新鋭の研究施設と設備を国が主体となって保有・整備し、これを研究者が賃借することによって使用するというユニークな発想に基づいており、最新の研究設備の設置と整備、寿命と更新を考えれば、研究者や研究機関の経済的、知的な負担が軽減されることとなり今後の研究形態として注目される方と言える。

新産業技術の発展のために新材料の開発・実用化の果たす役割はきわめて大きいものがあるが、構造材料の分野においても、近年、極限環境における適用性の向上が注目を集めている。特に、1000°Cを越える超高温環境においても十分使用に耐え得る先進材料=超高温材料の実現が強く望まれる状況となっている。超高温材料研究センター(以下、センターとする)はこうした背景の中で、超高温材料の創製と、その超高温下での物性・機能等を試験・評価するための諸施設を整備し、広く一般の利用に供することを目的として平成2年3月に株式会社として設立され、平成4年7月に全面オープンした。出資団体は、NEDO、山口県、岐阜県、宇部市、多治見市及び民間企業45社である。事業場所として、本社及び素材創製と基礎特性評価を行う山口センターが山口県宇部市に、実用化特性評価を行う岐阜センターが岐阜県多治見市に設置された。センターの事業は、研究設備等賃貸事業であって、その内容は以下の通りである。

- (1) 研究・評価試験設備賃貸：民間企業等単独では保有が困難な大規模かつ先端的な設備を整備し民間企業や大学等に広く開放する。
- (2) 研究室賃貸：民間企業の第二研究所として、また民間企業と大学等の共同研究所として中長期的に研究室や実験室を貸与する。
- (3) 設備利用支援：設備利用者に対する設備運転の指導・助言を行う。

センターに設置する設備については、研究開発の進展状況に応じて常に最先端性を維持し、利用結果が常に信頼されるよう、先端性と信頼性を具備させることを基本的な方針とした。

\* 平成11年11月11日本会第103回例会において発表

\*\* (株)超高温材料研究所

平成11年8月31日受理

### 3. (株)超高温材料研究所設立の背景

センターの目的は、上述したように超高温材料の創製・評価のための施設・設備を研究者に貸貸することにあるが、センターの事業を支援すると共に、その先進的設備を活用した受託評価試験事業、研究事業、各種交流事業等を行なうことを目的に民間セクター方式で研究事業情報交流事業を行う株超高温材料研究所が、センターと同時に設立された。設置場所はセンターに呼応して、本社と山口研究所は山口県宇部市、岐阜研究所は岐阜県多治見市、所在はセンターと同一個所である。出資団体はセンターへ出資した民間企業45社である。

超高温材料研究所（以下、研究所とする）の事業内容は以下の通りである。

(1) 受託評価試験事業：産学官の研究機関からの依頼による試験・評価を実施する。

#### (2) 受託研究事業

- ①センター設備の先端性、信頼性を常に維持するため、素材創製、評価技術に関する基盤研究を経常的に実施する。
- ②21世紀を指向したテーマを設定し、国の支援策等の導入を図り、産学官共同のナショナルプロジェクトを実施する。
- ③国際共同研究助成事業等を活用した国内外の研究者による共同研究事業を実施する。
- ④研究成果及び材料特性データを提供する。

### (3) 情報提供・研究交流事業

- ①研究リーダーを中心とした研究員による、先進的シーズ・ニーズ、あるいは研究動向等に関する共同調査・情報提供事業を実施する。
- ②産業界、学界、官界等の広範な人材ネットワークを活用した研究交流事業を実施する。
- ③講演会・シンポジウム等の企画実施を通じて、国内外の研究者・研究機関との各種情報交流事業を実施する。

(4) 研修事業：企業からの技術者・オペレータを受け入れ、実践的な研修を実施する。

平成11年8月末の従業員は56名で、主として出資団体からの出向者から成り、ほぼ全ての従業員は両社を兼務している。他に、派遣会社員、NEDO 産業技術研究員（研究所）も勤務している。

### 4. 超高温材料に対するニーズ

超高温材料とは、約 2000°C に至る超高温という環境の中で、高比強度（強度/密度）、高比剛性、耐熱性、耐熱衝撃性、耐酸化性、耐食性を有し、既存材料では達成できない高性能を有する構造材料を指している。センター設立準備段階においては、表1の技術分野で超高温材料の開発のニーズがあると考えられた<sup>2)</sup>。

これらの他にも、輸送用機器分野として自動車エンジン用材料・排気ガス浄化用材料、地球環境問題分野として温室効果防止等広範な先端技術分野への超高温材料開

表1 超高温材料の開発が必要とされる各種技術分野とその温度環境

#### (1) 航空・宇宙分野

超音速航空機(マッハ2~6)		次世代宇宙往還機(マッハ25)	
機体	表面温度	機体	表面温度
エンジン *1)	インテーク 温度 燃焼器 温度	エンジン *2)	インテーク 温度 燃焼器 温度
	~1500°C ~2800°C *3)		~1700°C ~3000°C

\*1) エアーブラムジエットエンジンの場合、 \*2) スラムジエットエンジンの場合、

\*3) 超高温材料を使用可能な温度まで冷却システムにより冷却

#### (2) エネルギー分野

エネルギー技術	対象部材	温度条件 (°C)
高温ガス炉	高温熱交換器	850~1000
核融合	第一壁、ブランケット	1000~2000
固体電解質型燃料電池	電解質	800~1000
石炭ガス化	炉、熱交換器	1300~1800
高効率ガスタービン	タービンブレード*他	1300~1600

#### (3) 素材製造プロセス分野

素材製造プロセス	対象部材	温度条件 (°C)
超高温炉	ヒーター、反射板、耐熱材	2000~3000
溶解炉	耐火煉瓦、ノズル	~2000
ホットプレス	ダイス、断熱材	2000~2500
H I P	ヒーター、材料ケース、断熱材	~2000

発が期待されている。これら材料に対するニーズは、つまるところ省エネルギー、省資源、環境保全と不可分となるもので、環境の高温化と過酷化に耐える材料の開発に帰することができるといえる。これらの分野での材料開発は、主としてナショナルプロジェクト（以下、ナショナルとする）を始めとする多くのプロジェクトで推進されているが、対象技術分野は社会情勢の変化により多種多様化しており、将来を見定めた効果的な材料開発が望まれている。一方、材料開発の波及効果は広く産業全般に及ぶものと予想される。

### 5. 超高温材料研究開発の現状

前節で超高温材料に対するニーズをまとめたが、これに対する超高温材料の現状について述べる。現用の高温材料と今後超高温材料として期待される材料を整理して表2に示した<sup>3)</sup>。

表中の合金鋼は現在火力発電用の蒸気発生ボイラ及び蒸気タービン用として多く用いられている材料であるが、使用可能な上限温度はフェライト系鋼で600°C、オーステナイト系鋼で700°Cである。また超合金は、ジェットエンジン、ガスタービン等のガスジェネレーター用として多く用いられている材料で、特にNi基超合金は、合金設計理論の進展と、部材の単結晶化、部材の強制冷却、セラミックス溶射による遮熱コーティング等の技術的進歩により使用可能温度が年々高められている。しかしそれでも上限温度は1050°Cであり、熱効率向上のため燃焼ガス温度を1350°Cから1500°Cまで高めたいとのニーズに応えることが困難となりつつある。またこの合金の融点が約1400°Cであるため、融点以上の温度での使用は考えられない。従って、現在の超高温材料に対する要求は、このNi基超合金を超える高温材料の開発に向けられている。この期待に応えられる材料として、金属間化合物、高融点金属合金、セラミックス及

び複合材料があげられるが、これらに関連するナショナルとその開発対象材料をまとめて表3に示した。この中には後述する研究所委託プロジェクトとその対象材料も記してある。各プロジェクトでは、目的に応じて対象材料が選定され、目標とする特性、機能も設定されている。これらの中には、成果としてNi基超合金、TiAl金属間化合物、非酸化物セラミックス等実用化段階に至っている材料もある。

### 6. 超高温材料の開発とセンター設備の関連

現在有望視されている超高温材料は、上述したように、金属間化合物、高融点金属合金、セラミックス、複合材料（主として繊維強化材料）等であるが、これらの材料の研究開発に与えるセンター設備の有効性について述べる。

センター設備の仕様については、最終的には会社設立直後に結成された官・学の15の研究機関の研究者から成る技術諮問委員会によって決定された。設備は素材創製設備群と特性評価設備群に大別される。主要設備は開業時には30種類であったが、その後の需要動向により、特性評価設備を増強している。設備能力においては、材料に対するニーズ及び設備製作面からの最新のシーズを盛り込み、何らかの点で同種既存設備の能力を超えるよう留意した。仕様検討以来約10年を経ているが、能力の先端性はいさかも失われてはいないと自負している。以下に主要設備の特徴と、これまでの主たる使用実績について記す<sup>4)</sup>。

#### 6.1 材料創製設備群

超高温材料の創製方法は、素材と加工法により、溶解一凝固法と粉末の成型一焼結法に大別されるが、センター設備では、複合材料のための繊維と、繊維を用いた織物の製造を除けば、ほぼ全てkgオーダーで試作する事が可能である。

表2 現用高温用材料と超合金を超えると期待される超高温材料群

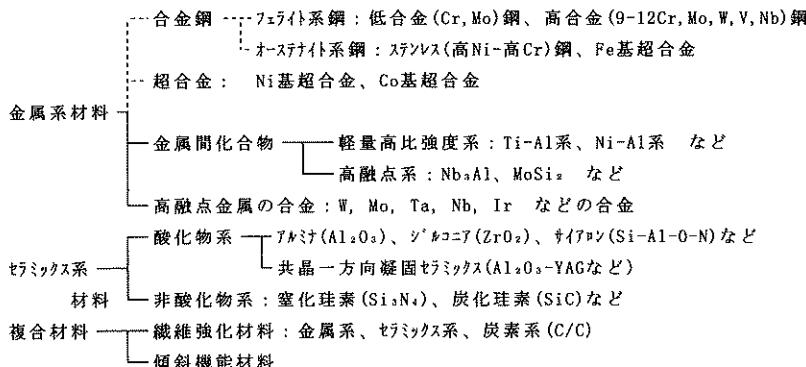


表3 1980年以降の高温材料に関するナショナルプロジェクトの対象材料

材 料 プロジェクト(期間)		金 属 系			セラミックス		繊維・粒子強化複合材(マトリックス)			
		合 金		金 属 間 化 合 物	非酸化物	酸化物	金 属	金 属 間 化 合 物	セラミックス	
		Ni 基 超合金	高融点 金属	高強度	高融点 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> SiC 等	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ZrO <sub>2</sub> 等	Al, Ti 超合金	(WMC) (PRM)	(CMC) (PRC)	炭素繊維強化 炭素(C/C)
旧次世代 ア'ロ'ジ'エ'クト	1)高性能結晶制御合金 ('81-'88) 2)セラミックス ('81-'92) 3)複合材料 ('81-'88)	○			○		○			
新エネルギー 省エネ'ー'ズ	4)セラミックガスバーナー ('88-'98) 5)水素燃焼タービン(WB-NET) : *4) ('93-'98)	○	○W, Mo		○			○ SiC	○ 3D	
産業科学 技術研究 開発	6)超耐環境性先進材料 ('89-'96) 7)先進機能創出加工技術 ('90-'96) 8)ナノセラミックス ('94-'98)			○TiAl ○Nb-Al	○ ○		○TiAl		○ 2D ○	
NEDO先導調査・提案公募等	(テーマ多数) ('92 - )			☆	☆耐食性		☆	☆	☆	
地域大型 ア'ロ'ジ'エ'クト	9)複合機能部材構造制御技術 ('93-'98) 10)複合材料新成形技術 ('94-'91) 11)高融点金属高度加工技術 ('96-2001) 12)エラストマー'トライ'マテリアル ('98-2002)		☆ Nb ☆ Fe-Al			○		☆ Ti系、超塑性 ☆	☆ 3D	
地域コンソーシアム	13)ナノスコピック複相組織制御 ('97-'99)						☆粒子強化(TiAl)			
NSS先導研究	14) MGC超高効率タービンシステム ('98-2000)					☆				

○:これまでと現在のナショナルプロジェクト対象材料; ☆: (株) 超高温材料研究所が受託している材料、\*4) 評価を受託

まず金属系材料は、主として溶解→凝固法により創製されるが、その設備として次の二つが挙げられる。

A) プラズマアーク溶解炉(プラズマ出力 375 kW): 主として、溶解、積層凝固により金属間化合物、高融点金属合金(Ti, Nb 等)の試作に利用される。B) ブリッジマン溶解凝固炉(最高鋳型温度 2200°C; 最大単結晶試料寸法  $\phi 80 \times 200$ ): 超合金の一方向凝固による単結晶の試作。現在では酸化物系共晶組成セラミックス単結晶(MGC 材料)の試作に用いられ、画期的な成果が得られつつある。

溶解法と並立する材料創製法として、粉末素材の成型・焼結法があるが、これには以下の設備により、粉末の作成、粉碎・混合、成型・焼結が一貫して行われている。これらの設備は同時に複合材料の創製も可能である。

C) メカニカルアロイング設備(試料処理量鉄換算 5 kg): 金属及びセラミック粉末の機械的な粉碎・混合・合金化による素材粉末の調整に用いられるが、溶解では得られない合金の作成や製品組織のメソスコピック化が可能となるため、きわめて注目されるプロセスとなっている。D) ホットプレス(最大荷重 3.5 MN; 最高温度

2500°C; 製品最大直径  $\phi 300$ ): 最大荷重と製品寸法が大きいことより、工業化試作のための利用が多く、成果として実用化された例が多い。E) 高温高压焼結設備: E.1) 超高温 HIP(最高温度 3000°C; 最高圧力 200 MPa; 処理室寸法  $\phi 250 \times 600$ ); E.2) 超高压 HIP(最高温度 2000°C; 最高圧力 1 GPa; 処理室寸法  $\phi 50 \times 100$ ): 超高温、超高压を活用し、単なる加圧・焼結のみでなく、高温・高圧反応容器としての利用も見られる。F) CVI/CVD(最高温度 2000°C): 複合材料の緻密化の他に、表面改質にも多用されている。

表面改質には、F) の他に G) の利用も多い。

G) プラズマ溶射設備(プラズマガン出力 80 kW): 単体の金属あるいはセラミックコーティングに加え、2種類以上の粉末の同時溶射による組成傾斜膜の試作也可能である。また溶射による薄膜の製作も試みられている。

以上創製設備の利用現況を述べたが、当初予想されていなかった使用法が試みられ、かつ優れた成果が得られていることも多く、センターとしてはきわめて嬉しいところである。

## 6.2 特性評価設備群

超高温における基礎特性評価設備としては、以下の設備があるが、特に熱特性評価設備の設計・製作と測定法の確立には、工業技術院計量研究所の支援を得ている。H) 高温 X 線回折装置（最高試料温度 2500°C 以上）：常温から高温までの温度変化や時間経過に伴う結晶構造の変化を解析することが可能で、2次元検出イメージングプレートによる高感度短時間の測定（約 2 分/箇所）を特徴とし、構造解析の他に熱処理条件の決定にも多く用いられている。I) 超高温熱特性評価システム：I.1) 熱定数測定装置；I.2) カロリーメーター；I.3) 放射率測定装置；I.4) 熱膨張率測定装置：これらは最高 2000°C までの温度域で、熱拡散係数、熱伝導率、比熱、エンタルピー、融解熱、凝固熱、放射率、熱膨張率の測定が可能である。新材料の特性評価に不可欠となっている。

実用特性としての力学特性評価は、各設備で最高 2300°C での試験が可能であり、以下の設備が設置されている。

J) 極超高温材料引張試験機（最大荷重 100 kN, 200 kN 及び 250 kN。計 4 基），K) 極超高温疲労試験機（最大荷重 250 kN。計 2 基），L) 極超高温クリープ試験機（最大荷重 30 kN。計 5 基）：対象となる強度特性は、引張、圧縮、曲げ、引張—圧縮疲労、クリープ等であり雰囲気制御も可能である。

また、特色のある試験機として、2軸引張圧縮疲労試験機がある。

M) その場観察機構付き高温多軸疲労試験機（最大荷重 100 kN の直交 2 軸引張・圧縮疲労；最高温度 1800°C；走査型レーザー顕微鏡による 1600°C, 500倍の表面その場観察）：各種材料の平板十字型試験片について、直交する X-Y2 軸の応力下における材料の変形、破壊挙動を調査するもので、試験片表面の組織変化、亀裂の成長等のその場観察も可能である。

最後に実用特性の内、耐環境性評価には模擬腐食性環境中で試験を行える以下の設備があり、センター発足以来、環境問題が重視されるに従って増強されつつある。N) 热サイクル / 热衝撃試験機試験（温度範囲 -190~2300°C；热サイクル 30 K/min；热衝撃は 100 K/s 以上）：繰返し急熱・急冷による耐酸化性、耐熱衝撃性を評価する。O) 極超高温酸化／揮散試験機（最高温度 2300°C；最高実用真空度 13 mPa），P) ガス腐食試験装置試験機（最高温度は 950~1700°C で雰囲気による。計 3 基）：長時間加熱や加熱・冷却サイクルによる耐腐食性・耐揮散性（昇華）を評価する。Q) エロージョン試験機（最高温度 1700°C；ガス流速マッハ 3 以上；試験時間は 60 分以内）：高温高速ガス流を与えて、耐エロージョン性を評価する。

特性評価設備は、超高温における開発材料の基礎特性、実用化特性の評価には不可欠の設備となっているが、試験・評価方法の高精度化と安定化については常時検討・改善が為されており、さらに開発材料の実用化促進のため、国家的なデータベース作成へと使途を展開しつつある。

### 6.3 センター設備の利用

センター設備を利用されるには 2 つの方法がある。1 つは研究者が直接センターへ出向いて自分で設備を使用されることである。センターは使用に先立って使用条件を検討し、使用前に設備操作法を指導する他、使用中にもオペレーターや研究者が必要な都度助言に応じている。他の 1 つは、素材創製や試験・評価を超高温材料研究所へ委託されることである。研究所の中核研究者は前述したようにセンターと兼務しているため設備については精通しており、全てを委託されることに問題はない。いずれの場合も、実施内容について守秘義務は厳守されており、十分に信頼していただけると確信している。

## 7. 研究所の研究・調査活動

研究所の主たる事業は、センター設備を活用した受託評価試験と研究事業であるが、センター設備の利用促進の目的もあって、現在の活動の大部分は NEDO からの委託研究（ナショプロ）で占められている。平成 4 年度から 11 年度までの委託件数と金額は年々増加し、これまでの委託テーマは延べ 30 件に達し、平成 11 年度の委託テーマは 20 件、金額は 9.2 億円となっている。研究対象は、表 3 にも示したように構造材料としての超高温材料が多いが、最近は無機機能性材料も増加している。

以下に平成 10, 11 年度の委託テーマの中で、主だったものの概要を示す。

超高温材料として、a) 複合機能部材構造技術（地域大プロ）(H5-10)：多層皮膜耐環境性、高強度、耐久性等の複合機能を有する C/C コンポジットの開発。b) 高融点金属系部材の高度加工技術（地域大プロ）(H10-14)：現用 Ni 基超合金よりも高い耐用温度を有する Nb 合金の開発。c) MGC 超高効率タービンシステム技術（ニューサンシャイン計画先導研究）(H10-12)：MGC 材料<sup>5)</sup>を活用した超高効率タービンシステム技術の研究開発等がある。対環境問題としては、d) エコ・テイラードライボマテリアル創製プロセス技術（地域大プロ）(H10-14)：環境に優しく、省エネ省資源に対応したトライボ材料創製技術の開発がある。また機能材料としては、e) 熱電素子の開発 (H8-13)：低温エネルギー有効活用のための熱電変換技術の開発と実用化（日、米、仏間の国際共同研究），f) 超高温オプトメカニカル複合材料（NEDO 先導調査）(H10-11)：

高温で光・電波に対する透過性を有する複合材料の研究開発、等も実施している。

これらも含め、社内外の試作開発材料については当然その特性が試験・評価されなければならないが、超高温域における新たな試験評価技術の開発に関連した研究として、g) 水素燃焼タービン用超高温材料の開発(ニューサンシャイン計画)(H5-10)：2000°Cに至る温度域における超高温材料の力学・物理・化学特性の試験・評価方法の開発と評価；h) 機能材料の熱物性計測技術と標準物質に関する研究(科技庁知的基盤整備推進制度)(H9-13)：1500°C以上の温度域における熱拡散率と熱膨張係数の測定法の確立及びデータベースの作成、i) 金属材料の線膨張係数測定方法、熱拡散率測定試験法、高温腐食試験法の標準化作業(NMC 高温材料分科会等)(H5-13)：表記試験法についての JIS 原案の作成、等がある。

さらに超高温材料実用化のためのデータベース作成のため、即効的知的基盤整備事業(H10-11)として、j) 耐熱複合材料長期耐久性評価手法確立のための研究、k) 構造用耐熱複合材料のデータベース構築に関する研究：金属基複合材料、l) 構造用耐熱複合材料のデータベース構築に関する研究：MGC 材料、も分担実施している。これらの研究では、社外の学識経験者による技術委員会を結成し、年間3～4回の委員会開催により研究指導を仰ぎ、研究能力の向上に努めている。すなわち、現在では、単に超高温材料の創製のみでなく、超高温・超高压プロセスを活用した新たな無機機能材料の開発、試験評価方法の確立とデータベースの作成へと、対象分野は広がりつつある。これは、センター設備の先進性と卓越性及び研究所の活動の成果が認知され始めたことによるものと考えている。

今後の超高温材料の研究開発と実用化にはこれらの研

究開発の遂行も重要であるが、さらに長期的な展望に立脚した開発方針が必要であろう。通商産業省では、現在、将来の産業政策樹立のために、化学・プロセス技術分野、バイオテクノロジー分野等、13の技術分野で32の項目を選び、学会・産業界団体等に依頼し、平成12年3月末を目指に各分野の産業技術戦略を策定している<sup>6)</sup>。この内、無機材料分野では、非鉄金属分野、ファインセラミックス分野、耐熱材料分野があるが、耐熱材料については超高温材料研究所が主体となって作業を進めている。ここではこれまで述べてきた超高温材料も含めて広く今後の耐熱材料の目的を設定し、その実現に向けての道筋を描くことが求められている。この中には今後のセンター/研究所のあり方も論議されるものと思われる。

## 8. ま と め

㈱超高温材料研究センター/㈱超高温材料研究所の設立の目的、最近の我が国における超高温材料の研究開発の状況と両社の関連、さらに現在の研究開発活動、今後の超高温材料の技術戦略への対応等について概説した。今後のセンター・研究所の活用の参考になれば幸甚である。

## 参 考 文 献

- 1) NEDO NEWS 産業技術研究基盤整備事業特集号、10, 105, (1990)
- 2) 昭和63年度調査報告書 NEDO-IT-8804 超高温材料用設備技術調査、NEDO, 1-4頁 (1989)
- 3) 田中良平：超高温材料国際シンポジウム XI 予稿集、超高温材料シンポジウム事務局、1-12頁 (1997)
- 4) 萩原定秀、化学装置、37, 1, 1-5 及び 11-15頁 (1995)
- 5) 和久芳春：日本ガスタービン学会誌、27, 2, 3-8頁 (1999)
- 6) 滝本浩司：工業技術、40, 7, 24-27頁 (1999)

## ゼオライト一水系ヒートポンプによる排熱利用\*

溝 田 忠 人\*\*

Use of Waste Heat with Zeolite-Water Heat Pump System

Tadato MIZOTA

Zeolite-water heat pump system has been discussed on the merit for effective use of low temperature waste heat. Zeolite and water combination at around room temperature provides a special state of water molecules as "zeolitic water", the entropy of which was proved to be far lower than that of ice at 273 K by assuming water as an independent component. The low entropy state is synonymous with the very low temperature state usable as low temperature heat sources and necessary to improve the Carnot efficiency of a thermal engine. Although the basic mechanisms of the heat pump system had been proposed about 20 years ago, it has not become popular until now. The reasons why it has not used actually, are also discussed from both the basic and the practical stand points.

## 1. エネルギー事情

COP3において、我が国は、温室ガス排出量の削減目標を、2012年までに90年レベルの6%減と設定した<sup>1)</sup>。その後、既に1990年当時より約15%エネルギー消費が増加しており、目標として掲げた2012年までの残り11年間で20%に及ぶ排出削減を行わなければならない。先進国はそれでも、エネルギー消費の伸びは抑えてきているが、中国など発展途上国のエネルギー消費は、急上昇している<sup>2)</sup>。削減目標は地球的には達成が困難で、環境の悪化は深刻な事態になる可能性がある。

大方の努力にも拘わらず、我が国において、エネルギーの消費が増大する理由の1つは、従来の省エネルギー指向が「エネルギー利用効率を上げること」を主眼にして来たことによると思われる。熱機関の理論的エネルギー効率は、言うまでもなく、カルノー効率  $\eta_C$  によって規定される。

$$\eta_C = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (1)$$

ここに、 $T_1$  は高温度熱源の温度、 $T_2$  は低温度熱源（排熱）の温度である。一般に、後者は、室温（最終的には

海水温度）で規定されるので、(1)式で示される効率を上げるためにには  $T_1$  を大きくする必要がある。実際、各種の炉においては、操業温度を高くして効率を上げようと努力してきた。セラミックエンジンも同じ発想である。しかし、高温を発生させるためには、石油、石炭、天然ガス、電力などの良質なエネルギーを多く使用しなければならない。逆に言えば、大量消費に裏付けられて、高効率が達成されるという日本など先進国の図式が見えてくる。開発途上国も同様な発展を指向すれば、省エネルギー大量消費世界が出来上ってしまう。これでは、温暖化防止などの目的には、逆行する。このジレンマ<sup>3)</sup>を解決するには、いずれにせよ、3つしか道はない。第1は、生産力を落として、世界の成長を過去に引き戻すこと。これができないことが分かっているから問題が深刻なのである。第2は、化石燃料を用いない自然エネルギー等を利用する技術開発を行うことである。そのため太陽光・熱、風力、温度差発電、核融合、原子力利用など種々の試みが追求されている。第3は、熱の有効利用である。これは、さらに2つに分類できる。3-1は、蓄熱によるエネルギーの有効利用である。言い換えると、エネルギー利用に時間差を作り有効に利用する技術である。これは、種々試みられているが、いずれにせよ、低温排熱を利用できる場合に、特に有効であろう。3-2は、カルノー効率の向上で、前述の理由で、ここでは、高温の利用による効率の向上を議論の対象から外すと、より低

\* 平成11年11月11日本会第103回例会において発表

\*\* 山口大学工学部機能材料工学科

平成11年8月30日受領

い  $T_2$  を利用し、(1) 式の効率を上げることが最後に残る。この観点は、海洋温度差発電、液体 LPG の利用等の少数の例を除いて積極的には取り組まれていない。なぜなら、氷のような室温以下の温度の物質を地球上で見つけることはできても、高温熱源と遠く隔たった場所にあるので、有効利用できず、また、室温以下の温度のエネルギーは、一般にエネルギー密度が小さいので、大きな規模の有効利用が人々難しいからである。

## 2. ゼオライト水の位置づけ

従来、前述の 3-2 の最後の観点に関しては、低い  $T_2$  を探すことが追求されてきた。地下水、河川水、海水等の利用は、温度がさほど低くないので、大量に使うことによってエネルギーの量を稼いできた。より温度の低い天然の氷は、固体であり、前述のように、存在場所が、利用場所と距離的に離れていたり、冬期と夏季のように時間的に隔たっていて、利用は限られる。

しかし、全く別の観点から、これは、今後、有望になる。それがゼオライトの利用である。結論的に言えば、低温の物質ではなく、「低温と同価の状態」の物質を利用するのである。一般に「温度」即ち「状態」と考えがちであるが、必ずしもそうではない。ゼオライトの中に存在する水、すなわち「ゼオライト水」が正にそれ「低温の状態」と同価なのである<sup>3)</sup>。この「状態」を手に入れれば、我々は、あたかも  $T_2$  の低いものを入手したと同じように、(1) 式により機関のカルノー効率を高めることができて、低温の熱源を有効に利用する可能性が生まれる。また、ゼオライトを蓄熱に用いることもできるので、3-1 の観点との融合もある。ゼオライト水は、水蒸気、水、氷、超臨界水の 4 様に加えて、「第 5 の水の状態」と考えることもできる<sup>3)</sup>。この事を納得するためには、ゼオライト水の熱力学的性質を理解する必要がある。

## 3. ゼオライト水の熱力学

ゼオライト水は、一般に結晶水と自由水の中間の「状態」と考えられてきた<sup>4)</sup>。これには理由があり、比較的低い温度（室温～300°C 程度）で容易に脱水し、脱水した後温度を下げるとき空気中の水分を吸って復水する。一般には、結晶水のようにしっかりと結晶学的位置をとらず、従って、液体の水と結晶水の中間の構造と思われてきた。ところが、どういう間違いか、「結晶水」が「結晶した水」即ち「氷」とすり替わって議論されるようになってしまった。確かに、氷は結晶状態であるから、水分子の結晶学的位置は明確であるが、ゼオライト水には、構造的に乱れがあるので、エネルギー的にも氷より高い状態と考えられてしまった。実際には、(a) 水

和したゼオライトと脱水したゼオライトの熱容量を絶対零度から測定しその差を取ることにより「ゼオライト水の熱容量」が算出できると考えられた<sup>5~9)</sup>。こうすると、ゼオライト等の相転移が無いと仮定して、温度  $T$  における水和ゼオライトと脱水ゼオライトのエントロピーの差  $S_{DW}(T)$  は、

$$S_{DW}(T) = \int_0^T \frac{C_p^h(T)}{T} dT - \int_0^T \frac{C_p^d(T)}{T} dT \quad (2)$$

ここに、 $C_p^h(T)$  は、水和ゼオライトの熱容量、 $C_p^d(T)$  は脱水ゼオライトの熱容量である。

(2) 式に基づいて、測定がなされ、ゼオライト水のエントロピーが算出され<sup>5~9)</sup>、氷と水の中間の値のものが数多く報告された<sup>5~9)</sup>。しかし、この方法は、ゼオライトと水の相互作用を無視できると仮定した極めて荒い近似にすぎないのである。ゼオライトのフレームワークや陽イオンと水分子の相互作用が脱水過程で現れるエネルギーなので、単に脱水物と水和物の熱容量の差をとったのでは、この相互作用が評価されおらず、(2) 式によつては、ゼオライト水のエントロピーが求められないものである。

他方、(b) ゼオライトからの水の脱水エネルギーや、それと可逆と考えられる水和エネルギーを測定すると、水や水蒸気の状態は明確に分かっているので、ゼオライト水のエントロピーが求まる。室温 (298 K) におけるゼオライト水のエントロピー  $S_{ZW}(298)$  は、

$$S_{ZW}(198) = S_V^\circ - R \ln \frac{P}{P_0} - \frac{\Delta H_h^P}{298.15} \quad (3)$$

ここに、 $S_V^\circ$  は、統計熱力学的に求められた標準状態 (0.101325 MPa, 298.15 K) における水蒸気のエントロピーで、188.825 JK<sup>-1</sup>mol<sup>-1</sup>。 $\Delta H_h^P$  は温度 298 K、平衡圧  $P$  における水和エンタルピー、絶対温度で割ると水和によるエントロピー変化となる。ただし、298 K においては、平衡水蒸気圧が  $P$  なので、標準圧 (0.101325

MPa) から圧  $P$  に可逆膨張する可逆仕事  $W_\alpha = RT \ln \frac{P}{P_0}$  が考慮されなければならない。このため系に可逆的に熱  $Q = -W_\alpha$  が導入されエントロピーが  $Q/298.15$ だけ増加する。(3) 式では、原理的に正しいエントロピーを算出することができる<sup>10)</sup>。しかし、先駆的な研究<sup>10)</sup>の中に、水蒸気のエントロピーの値の扱いや、ゼオライトと平衡に共存する水蒸気の状態の扱い等に問題があり<sup>4)</sup>不幸にも、たまたま、水と氷の中間程度のエントロピーが出されて、以後の研究に影響したようである。

#### 4. ゼオライト水のエントロピー

(3) 式の各項をゼオライトの水和に関して求めると、標準状態の水蒸気の可逆膨張の仕事  $W_a = RT \ln \frac{P}{P_0}$  より、この膨張に伴う水蒸気のエントロピー変化：

$$\Delta S_a = -\frac{W}{T} = -8.31441 \times \ln \frac{3167.47}{101325} \\ = 28.8217 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$$

水蒸気水和熱と脱水熱が可逆的と仮定して、水和熱の測定<sup>11,12)</sup>により、

$$\Delta H_d = -\Delta H_h^p = 64 \text{ kJmol}^{-1} \text{ とする。}$$

$$\Delta S_h = -\frac{\Delta H_h^p}{T} = -\frac{64 \times 10^3}{298.15} = -214.657 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$$

$$S_{Zw} = S_v^\circ + \Delta S_a + \Delta S_h = 188.825 + 28.8127 - 214.657 \\ = 2.98 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$$

ただし、上の計算においては、ゼオライトの平衡水蒸気圧は、298 K における水の水蒸気圧と同じと仮定した。この仮定は、水和熱を測定した際、水の平衡圧 (3167 Pa) 下で行ったことによる<sup>11,12)</sup>。このことは、水和エンタルピーの絶対値が、かなり水和した状態では、余り大きく変化しない<sup>11)</sup>ことにより妥当と考えられるが、直接測定値が無いので、この仮定を修正し、脱水エンタルピーは同じで、平衡圧を 273 K の氷の水蒸気圧 610 Pa とすると、

$$\Delta S_a = -\frac{W}{T} = 8.31441 \times \ln \frac{610}{101325} \\ = 42.508 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$$

$$S_{Zw} = S_v^\circ + \Delta S_a + \Delta S_h = 188.825 - 42.508 - 214.657 = 16.67$$

注 1) このことは、標準状態の水蒸気のエントロピーから、水のエントロピーを求めるによって容易に確かめることができる。298 K の水の平衡蒸気圧は、3167.47 Pa、水蒸気の蒸発エンタルピーは、43.991 kJmol<sup>-1</sup>、とし、(3) 式にこれらのデータを当てはめると、

$$S_v^\circ(298) = 188.825 - 8.31441 \times \ln \frac{3167.47}{101325} \\ - \frac{43.991 \times 10^3}{298.15} = 70.09 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$$

これは、化学便覧基礎編Ⅱによる値、69.91 JK<sup>-1</sup> mol<sup>-1</sup> と 0.26% の差である。

JK<sup>-1</sup>mol<sup>-1</sup> と少し大きな値になる。同様に、我々行ったゼオライトヒートポンプの最低到達温度、255 K<sup>13)</sup>における氷の蒸気圧 106.7 Pa を平衡圧として、 $S_{Zw} = 31.2 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$  を得る。実際には、脱水が進むと脱水エンタルピーの絶対値も大きくなるので<sup>11)</sup>、この値は、少し大きすぎると見えるが、いずれにせよ、298 K の水のエントロピー、69.91 JK<sup>-1</sup>mol<sup>-1</sup>、および 273 K の氷のエントロピー、41.5 JK<sup>-1</sup>mol<sup>-1</sup>、に比べると、遙かに小さい値である。また、重要なのは、これらの計算は、あくまでも H<sub>2</sub>O が独立成分と仮定して求めたということである。ゼオライト水のエントロピーは、各含水状態において、平衡水蒸気圧と微分水和エンタルピー（または平衡水蒸気圧の温度変化）を測定し評価するのが正しいが、信頼性の高いこの種の実験は未だ系統的には行われていない。

#### 5. ゼオライト水の利用

このようにゼオライト水のエントロピーが、273 K の氷よりも、極めて低いことが分かったが、この状態が実際に使用できることが重要である。即ち、ゼオライト水に現実にアクセス出来なければ、陳列ケースの中のダイヤモンドと同じで、何の役にも立たない。ゼオライトの脱水状態、即ち陽イオンを含んだフレームワークを容器に例えると、中に入っている「エントロピーの低い水」を出したり入れたりして使えるかどうかである。実際に水蒸気を介してそれが可能である。即ち、ゼオライト—水蒸気—水の三者の平衡を扱うことが簡単にできるのである。

次に重要なのが、ゼオライトの水和状態と脱水状態が容易に変換できると言う点である。これは、従来からゼオライト水は、室温～300°C 程度の温度で容易に脱水する事が知られており、同時に、この様な温度域は、従来排熱等として、利用されなかった低温の領域なのである。更に実用上重要な点は、脱水後もゼオライト構造が安定で、水分子の「容器」としてのフレームワークをしっかりと保っている事である。従って物性が変らず、繰り返し脱水・吸水ができる事である。

#### 6. ゼオライトヒートポンプの普及を妨げた原因

ゼオライトとヒートポンプの研究の歴史：Tchernev が、十分魅力的な、太陽熱ゼオライトヒートポンプを20年も前に提唱し<sup>14,15)</sup>、また、当時興味を持った人が多かったにもかかわらず、このシステムが実用化されなかった理由を明らかにする必要がある。恐らく、ゼオライトの研究者とヒートポンプの研究者の意志疎通の悪さが 1 つ大きな原因であった<sup>3,13)</sup>。

水の状態の解明：原理的な理解に関しても、前述のよう

なゼオライト水のエントロピー状態が正しく議論されてこなかったことが、利用に関する確信を鈍らせ、開発の意欲を途中で挫折させてきたのではないかろうか。

**脱水挙動と空気の存在：**もう1点注意すべき点がある。それは、これも、ゼオライトの性質が十分理解されれば当然解決されることであるが、ゼオライトの脱水挙動についてである。例えば、空气中で脱水するのと、真空中で脱水するのでは、全く見かけの脱水温度が異なる。この場合空気は、ゼオライトの構成成分ではないので、当然のことながら、カイネティックな問題とされる。カイネティックな問題の解决の為には、高温にすることを少しも考える。極端に高温になると、ゼオライト自身が分解してしまう。もしくは低温排熱や太陽熱の利用温度から隔たってしまう。従って、ゼオライトの利用は魅力の無いものとなってしまう。ゼオライトヒートポンプを空気の存在下で構成しようという要求は当然であるが、そこに大きな落とし穴があったと思われる。

ゼオライトは高温にすれば空气中でも脱水する。しかし、脱水したゼオライトは、可逆的に水と平衡を保つ。即ち水蒸気圧が僅かに上がると吸水する。この場合、脱水した水が、空気の存在下では、すぐ近くで凝縮し水になることが考えられる。その際凝縮熱により蒸発が誘導され蒸気圧が上がる。空気というこの系の相互作用に無関係な気体成分の存在下では、ゼオライトベッドのいたるところで、不均質に凝縮および蒸発熱、水和および脱水熱など正負の熱エネルギーが交錯し、空気の存在のため、水蒸気のやり取りが妨げられ、ゼオライト水、水、水蒸気の3態が不均質に入り乱れる。結局脱水したH<sub>2</sub>Oが取り除かれない限り、全体としての平衡をずらすことができず、脱水が進行しない。即ち、ゼオライト粒子近傍の動き難い空気の中の水蒸気の拡散によって脱水速度が支配される。

空気の存在下で効率的に水を取り去るには、強制的に送風するしかない。だが、ゼオライトという細かい粉状物質もしくは、その固化体中に、くまなく送風することは容易ではない。もし、大気圧下でそれを行うと空気を高温に加熱するエネルギーと送風のエネルギーの両方が必要である。脱水を旨くやるには、空気の水分含量（湿度）を低くする必要があるので、送風量は増え、かなりのエネルギー消費になる。また、ゼオライトの吸水時には、ゼオライトから水和熱を奪ってやらなければならぬが、空気の運ぶ熱も同時に奪う必要があり、冷却効率を下げることになる。いずれにしても、空気の存在下で、ゼオライトヒートポンプを稼動することは、難しいことになる。

ゼオライとヒートポンプは脱気システムでゆっくりと：一方真空脱気したシステムでは、システム内の蒸気圧差

によって水蒸気が移送されるので（常温付近の気体の水分子の速度は400~600 m/sと速い）、熱交換速度が律速となろう。ゼオライトベッドの中では決して液体の水を生じさせないような「ドライ運転」が重要である。しかし、ここでも、けい酸塩としてのゼオライト粉体の熱伝導度は小さいので設計にはこの特徴を生かした配慮が必要である。また、真空の保持も、既成技術より高いレベルが必要である<sup>16)</sup>。

**発想の転換：**市販の固体吸着式ヒートポンプの装置のカタログを見ると、1時間で数回~10回程度の吸脱着を行うように設計されている。これは、電動コンプレッサー式の連続運転装置との競合を照準をおいているためであり、従来の電力を用いた熱機関の発想を踏襲したものである。これでは、固体吸着材、特にゼオライトヒートポンプの利点は生かせない。ゼオライトヒートポンプはゆっくりとしたサイクル、例えば1日1サイクルの様な速度で、設計すべきである。建物の冷暖房、深夜電力の利用、太陽熱の利用などは、この方が原理的に合っているばかりでなく、熱交換速度の困難を克服することができる。当然かさばり大きくなることは覚悟しなければならない。しかし、ゼオライトヒートポンプの蓄熱容量は、氷蓄熱に比較して大きく、決して他のシステムに遜色はない<sup>13)</sup>。

以上まとめると、ゼオライト一水系ヒートポンプは、脱気したクローズドシステムで運転することを基本とすべきである。また、ヒートサイクルは、熱伝導を考慮して、十分ゆっくりと平衡運転に近づけることによって、高い効率を得ることができる。

## 7. ゼオライト一水系ヒートポンプのメリット

問題点はあるが、それを上回るメリットも多い、すなわち、1) 100~200°C付近の低温の熱源と室温付近の熱源の2つのみで動く、2) 基本的に電力などの他の熱源が要らない、3) 蓄熱容量が大きい、4) ゼオライトと水という環境問題的に安全で安価な物質で構成できる、5) 蓄熱のための断熱装置が要らない。6) 吸着材として非晶質物質に比べて、熱膨張が無く、何度も繰り返し使用でき、耐久性が高くメインテナンスが簡単である、7) 热交換目的ばかりでなく、各種の物質の低温乾燥などにも使える<sup>17)</sup>。これらは、全てが必ずしも完全に証明されたメリットではない、例えば、5)に関して、A型ゼオライトが、ヒートポンプ稼動条件で、どのくらい耐久性があるかなどは、研究課題である。

以上のように、ゼオライト一水系ヒートポンプには、省エネルギー技術として、従来のシステムに無い魅力的な特徴があり、応用範囲も極めて広い<sup>13)</sup>ので、実用機の開発と多くの分野への応用を期待したい。

## 謝 辞

ゼオライトヒートポンプの研究は、平成11年度新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の新産業技術創造型提案公募事業のプロジェクトに採用され、研究が開始された。本報告は、これを視野にいれて、これまで行ってきた研究を整理し、特に理論的側面を明確にする目的でまとめたものである。この過程で、鎌超高温研究所山口研究所、所長松村義一氏をはじめ、榎本弘毅、岡本晃、山本雅章の各氏はこのテーマについて論議していただき、有用な助言をいただいた。中国技術振興センター「ゼオライトヒートポンプシステム」研究会、平成11年NEDO研修会(宇部)などの機会を与え、論議して下さった方々に感謝します。同時に、これらの会における多くの方々との討論に啓発されたことに感謝します。

## 引 用 文 献

- 1) 佐々木宣彦、我が国のエネルギー政策について、エネルギー・資源、20(1), 18, 1999.
- 2) 西山 孝・劉婕、GDPとエネルギー消費動向から推測した中国のエネルギー需要見通し、エネルギー資源、18(4), 346, 1997.
- 3) T. Mizota, *et al.*, Zeolite-Water Heat-Pump System for Effective Use of Waste Heat, Proceedings of the 13<sup>th</sup>, Int. Conf. on Properties of Water and Steam (Toronto, Canada), 1999.
- 4) 溝田忠人、ゼオライトの水和熱とそのヒートポンプ蓄熱への応用、熱測定、24(1), 79-89, 1997.
- 5) G. K. Johnson, *et al.*, Thermodynamic studies of zeolites: analcime and dehydrated analcime, Am. Mineral. 67, 736, 1982.
- 6) G. K. Johnson, *et al.*, Thermodynamic studies of zeolites: natrolite, mesolite and scolecite, Am. Mineral. 68, 1134, 1983.
- 7) G. K. Johnson, *et al.*, Thermodynamic studies of zeolites: heulandite, Am. Mineral. 70, 1065, 1985.
- 8) B. S. Hemingway and R. A. Robie, Thermodynamic properties of zeolites: low-temperature heat capacities and thermodynamic functions for phillipsite and clinoptilolite, Estimates of the thermochemical properties of zeolitic water at low temperature, Am. Mineral., 69, 692, 1984.
- 9) A. Howell, *et al.*, Thermodynamic properties of zeolite stilbite, Zeolites, 10, 525, 1990.
- 10) L. P. Van Reeuwijk, The thermal dehydration of natural zeolites, Mededelingen Landbouwhogeschool Wageningen, Nederland, 74, 1974.
- 11) T. Mizota, *et al.*, Hydration enthalpies of synthetic Na-A, cation-exchanged-A and some natural zeolites for evaluating as heat exchange absorbent. Thermochim. Acta, 266, 331, 1995.
- 12) 溝田忠人、中山則昭、ゼオライトの水和熱測定のための2つの装置および平衡水蒸気圧測定装置、熱測定、25(3), 67, 1998.
- 13) 溝田忠人、ゼオライト一水系ヒートポンプ、応用鉱物学の新分野、鉱物学雑誌、28(2), 47, 1999.
- 14) D. I. Tchernev, Solar energy application of natural zeolites. Natural Zeolites, L. B. Sand and F. A. Mumpton eds., Pergamon, Oxford, 479, 1978.
- 15) D. I. Tchernev, The use of zeolites for solar cooling. Proc. 5th Int. Conf. on Zeolite, Rees, L.V.C. ed., 788, 1980.
- 16) 溝田忠人、石川征記、佐藤隆介、田中一成、ゼオライトヒートポンプの試作と継手、熱測定、26(2), 35, 1999.
- 17) 溝田忠人、ゼオライトで氷の製造、資源と素材 115, 195, 1999.

## 火山噴出物（シラス）の工業的な高度利用について\*

陣内和彦\*\*・木村邦夫\*\*\*

Advanced Industrial Utilization of Volcanic Ejecta, Shirasu

Kazuhiko JINNAI and Kunio KIMURA

## 1. はじめに

酸性火山噴出物の一種であるシラスは、南九州をはじめ東北、北海道まで国内に大量に産出し、海外でも環太平洋の火山国などに広く分布する。これは多くの可能性を秘めた我が国産の有用資源の一つである。

シラス利用に関する試験研究は昭和20年代後半頃から、鹿児島大学・同県工業試験場（現、工業技術センター）において着手され、その後、昭和41年以降九州工業技術試験所（現、研究所）・宮崎県工業試験場（現、工業技術センター）などでも銳意取り組まれてきた。その結果、それぞれ特徴ある多くの研究成果が得られ、シラスの多方面への利用可能性が明らかにされてきた。

それにもかかわらず、現在までに工業化・企業化に結びついた例は多くない。その理由は研究のほとんどが既存の材料や素材をシラスで置き換える研究、つまり代替材料としての利用研究であり、シラス特有の性質を有効に活用した研究開発が少なかったためである。これらの研究は「シラスでなければ」という視点から行われるべきであり、さらに企業化・工業化に結び付くためには相当の経済効果が前提となる。

本文では、これまでの工業的利用に関する研究開発を概括し、特に企業化に成功したシラスバルーンを中心にして、その後の高度利用に関する研究開発事例を紹介する。

## 2. 火山ガラス質堆積物、シラスの分布と特徴

南九州のシラスに代表される火山ガラス質堆積物とは、火山碎屑物に分類される主に第四紀に噴出した軽石流の堆積物、あるいはガラス質凝灰岩と呼ばれるものである。軽石流は、カルデラ形成に伴って放出されるため、

阿蘇、姶良、支笏、十和田、洞爺等の大規模なカルデラ周辺に厚く堆積している<sup>1)</sup>。ガラス質凝灰岩は、各種の放出物が集合膠結してできた火山碎屑岩のうち、破片の大きさが4mm以下のいわゆる凝灰岩に分類されるもので、主としてガラス破片より成り<sup>2)</sup>、これは軽石流に比べ堆積量は少ないが各地に堆積しており、「白土」と呼ばれている。我が国の火山ガラス質堆積物の埋蔵量は、表1に示すように約2千億トンと推定されている。

シラスの化学成分は酸性のマグマ起源であるため、シリカを主成分としてほぼ均質であるが、鉱物組成は産地と種類により異なっている。筆者らの調査結果では、特にガラス含有率が軽石流堆積物の31~75wt%に比べガラス質凝灰岩では78~98wt%と多い。分離したガラスの化学分析値の平均値を表2に示す。

この様なシラスは資源工学的な視点からは、①資源量として豊富に賦存し、比較的安価に安定供給可能、②化学成分・鉱物組成などがほぼ均質、③軽石や火山ガラス粒子の形状・性質が特徴的、④主成分の火山ガラスが未知の可能性を秘めている、など優れた特性を有する。

一方、シラス利用における問題点の一つは不純物を含

表1 主要な溶結凝灰岩、軽石流、及び降下軽石の分布面積、厚さ及び体積<sup>1)</sup>

図中番号	名 称	面 積 (km <sup>2</sup> )	最大厚 (m)	平均厚 (m)	体 積 (km <sup>3</sup> )
1	摩周	—	70	50	25~30
2	北見	268	—	50	13
3	十勝	1250	250	50	60+
4	支笏	1200	300	50	60
5	洞爺	370	200	50	19+
6	十和田	900	—	50	45
—	箱根	300	—	50	15
—	飛驒	>200	—	100	>20
7	耶馬溪	350	—	100	35
8	九重	139	—	80	11
9	阿蘇	3504	—	50	175
10	姶良	3870	—	40	155
11	阿多	668	—	40	27

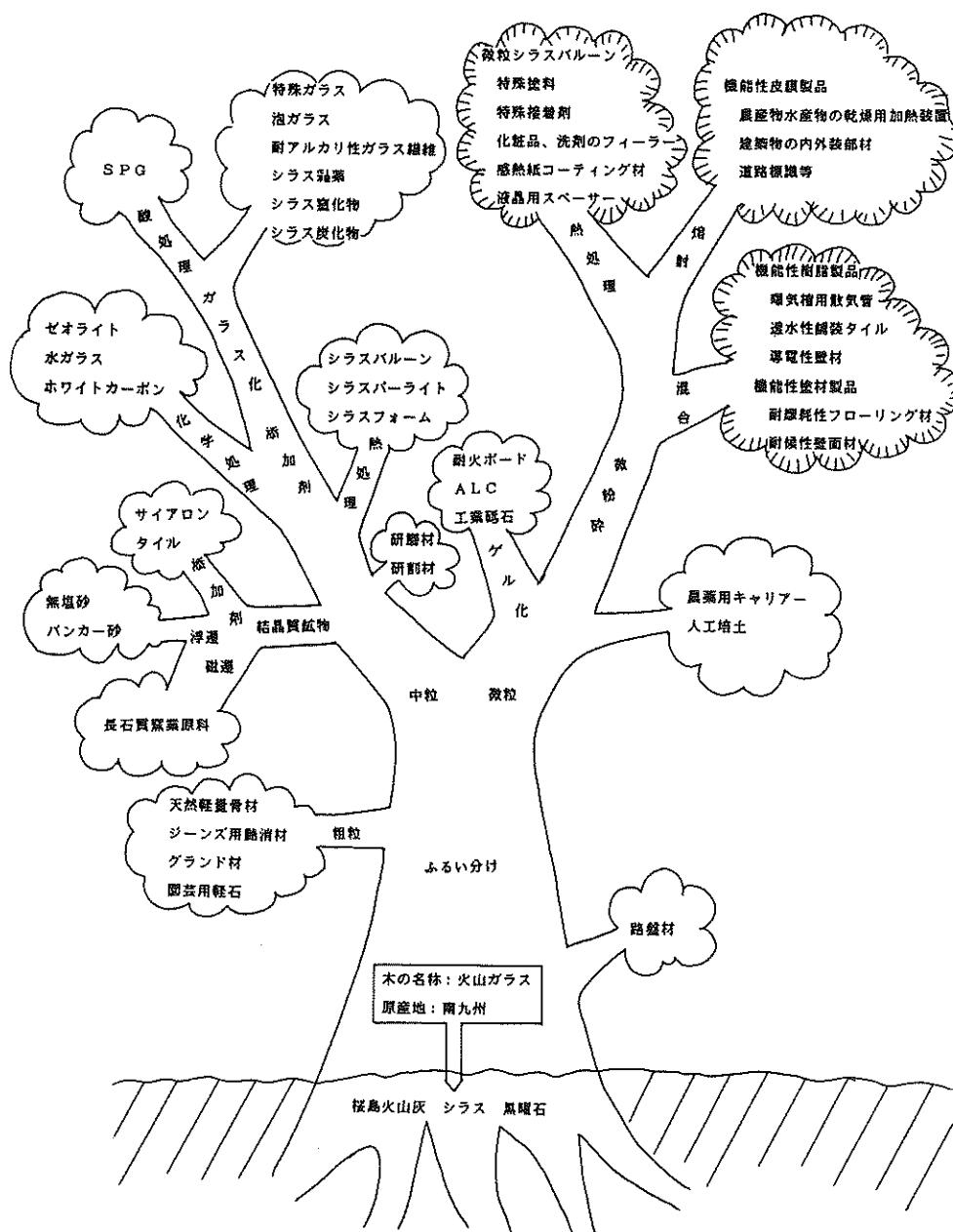
\* 平成11年11月11日本会第103回例会において発表

\*\* 九州大学先端科学技術共同研究センター 教授

\*\*\* 九州工業技術研究所粉体プロセス研究室 室長  
平成11年9月5日受理

表2 分離したガラスの化学分析値の平均値 (wt%)

$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{MgO}$	$\text{CaO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	Ig. loss	合計
73.34	0.16	13.19	1.45	0.29	1.08	3.61	3.39	3.41	99.92

図1 「シラスの樹」シラス利用の現状と今後<sup>13)</sup>

むことである。ニューセラ、ファインセラ原料として用いるときに製品の品質・特性低下の原因となる。そのため必要な原料の脱鉄処理や火山ガラス質の分離精製について実験室的に、あるいは一部の企業で行われているが、コストと技術的な面から限界がある<sup>3)</sup>。しかし、今後とも安価な天然原料を使うことによってセラミックス製品のコスト低下を図ることは有益である。

### 3. シラスの工業的な利用

シラスの利用は、①シラスをそのまま利用する方法、②シラスを整粒・粉碎して利用する方法、③シラスを熱処理する方法、④シラスに他の成分を加えて熱処理・水熱処理する方法、および⑤還元材を用いて加熱処理する方法に大別される<sup>4)</sup>。現在までの研究開発と工業的な利用及び進行中の研究を「シラスの樹」<sup>5)</sup>として図1に示す。

シラスの特性を活かした利用の今後の方向として次のような展開が考えられる<sup>5)</sup>。

- ①天然含水アモルファス：超微細加熱発泡粒子、溶射断熱皮膜などへ（人工的に同様の含水素材を得るには、高温・高圧の条件下で処理する必要があるため、膨大なエネルギーを要する。）
  - ②反応性のよい均質な火山ガラス：セラミックス原料、化学原料などへ（耐酸性・耐海水性高強度コンクリート用フィラーとしての可能性）
  - ③ガラス特性：耐アルカリ性、耐熱衝撃性、高強度発現など（GRC用耐アルカリ性繊維など）
  - ④粒子の構造：軽量骨材、研削・研磨材、人工培土、ろ過・吸着材などへ（不規則形状の活用）
- 以下に、工業化への成功事例として、シラス中の火山ガラスの加熱発泡特性を活用した「シラスバルーン」とその更なる高度処理利用研究について述べる。

### 4. シラスバルーン(SB)の開発と利用

#### 4.1 加熱による火山ガラスの発泡メカニズム

熱処理して発泡体を得る場合の発泡源は、黒曜岩・真珠岩等と同様に、粒子中に含まれる水分である。一般に天然ガラス岩は、水の含有量によって、2 wt%以下：黒曜岩、2~5 wt%：真珠岩、5 wt%以上：松脂岩と分類されている<sup>6)</sup>。これによればシラス中の火山ガラスは真珠岩に分類され、表2の化学組成もほぼ真珠岩に近い値を示している。また、熱分析と粉末X線回折等によりガラス粒子表面には風化層が存在することが分かった<sup>7)</sup>。火山ガラス質堆積物の生成年代は、軽石流堆積物で約2~3万年前、ガラス質凝灰岩ではさらに古く、それ以来現在まで風化作用を受けていることになる<sup>7)</sup>。

加熱発泡機構モデル（図2）によると、この風化表面層は、発泡に不可欠な水分の粒子外への拡散を抑え、発泡体を球形に保ち、同時に熱処理時の発泡体相互の融着を防止する効果を有する<sup>7)</sup>。シラスバルーン製造工程にこの表面層を壊す粉碎工程を用いると、シラスバルーン取率を低減させる原因となる。

#### 4.2 シラスバルーンの工業生産

原料を選鉱処理して結晶質鉱物を除いたもの、あるいは天然でガラス質が濃縮された二次堆積物を、製品の目標粒度に応じて粒度調整し、これを1000°C前後で短時間焼成を行うとシラスバルーンが得られる<sup>8)</sup>。

量産工程の一例を図3<sup>9)</sup>に示す。これによれば、原料は空気とプロパンガスに随伴されて熱媒体流動層炉内に供給され、焼成物は冷却されて製品サイロに捕集される。焼成物から未発泡物を除去する方法として、水中浮沈分離を行っている企業もある<sup>9)</sup>。

シラスバルーンの生産量は年々着実に伸びており、現在年間約2万トン生産されている。これは原料の埋蔵量からしても未だ微々たるものであり、今後の工業用資材

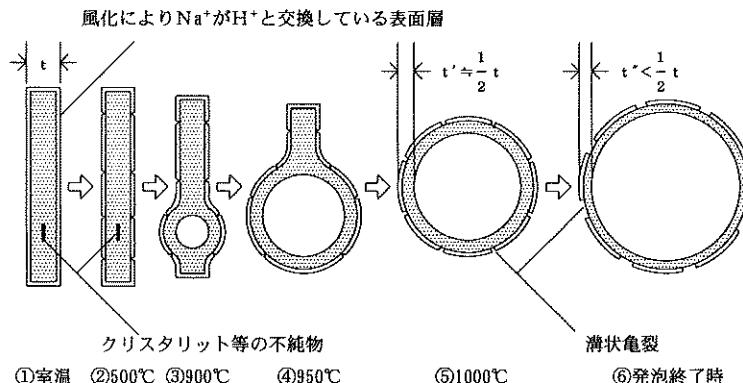
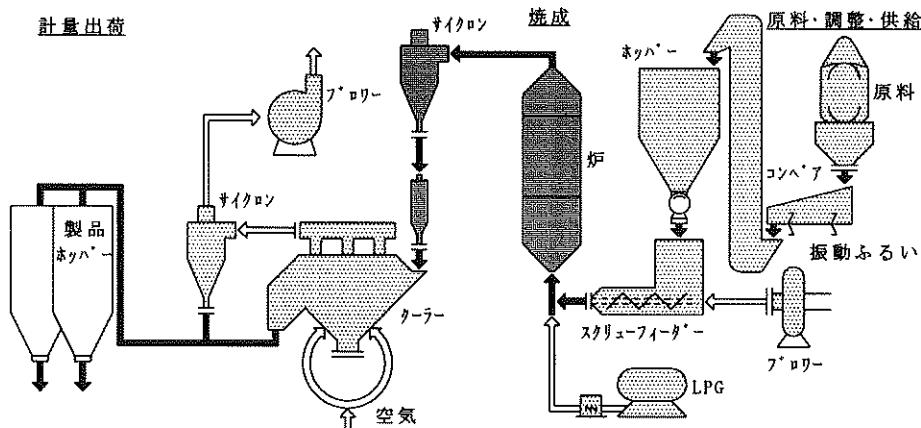


図2 火山ガラス粒子の加熱発泡機構モデル<sup>7)</sup>

図3 シラスバルーン製造工程の一例<sup>9)</sup>

としての発展可能性は大きい<sup>10)</sup>。現在、シラスバルーンはセメント系建築材料に多く利用されているが、今後の潜在的な需要を考えると、黒曜岩系バーライトの国内資源の枯渢、アスペスト使用の規制などの要因もあり、ビルの高層化に伴う軽量壁材、床材、内装材等に膨大な需要が予測される<sup>10)</sup>。

現在、シラスバルーンは国内7社以上の企業で生産されており、確認されている企業名とその商品名、連絡先を表3に示す。

#### 4.3 シラスバルーンの物性とその利用

シラスバルーンの外観は球状で、内部の隔壁がほとんどない単一発泡体が多い。物性は原料と製造条件によってかなり変化する。代表的な12種の製品について、平均中位径、均一度（60 wt% 篩下粒径を 10 wt% 篩下粒径で除した値）、密度、吸水率、強度、熱伝導率などを測

定した<sup>9)</sup>。各測定値の最小値～最大値を表4に示す。

シラスバルーンは、軽量で低熱伝導性であり、組成がアルミニケイ酸塗であるため不燃性・高融点、無毒・不活性でガス発生がない等の優れた特性を有するので、非常に多方面の用途が考えられる。利用形態は、①そのままの形で利用する方法と、②複合化素材（定形材、不定形材）として加工利用する方法の二つに大別される。

①としては、微細中空ガラス球の開発ニーズである油蒸発防止材をはじめ、化学消火剤、爆薬の増感剤、触媒触媒担体、不定形断熱保温材、電気絶縁材などへの利用が考えられる。

②としては、配合マトリックスの種類を選ぶことによって、さまざまの用途が開ける。また、繊維などを配合して曲げ・引張強さを向上させ、複合効果を著しく高めることもできる。樹脂複合材の場合、シラスバルーンは

表3 シラスバルーンの企業名、商品名、連絡先

会社名・担当部署	商 品 名	住 所 お よ び 電 話・FAX番号
イヂチ化成(株) 吉田工場	ウインライト	〒891-13 鹿児島郡吉田町宮ノ浦1004 TEL 0992(94)2681 FAX 0992(94)2307
三機化工建設(株) サンキライト部	サンキライト	〒242 神奈川県大和市下鶴間1742-7 TEL 0462(76)5554 FAX 0462(76)1375
釧路石炭乾溜(株)	シリカバーレン	〒085 釧路市貝塚3丁目4番1号 TEL 0154(41)8477 FAX 0154(43)1256
(株)シラックスウ	シラックス	〒890 鹿児島市武岡4丁目22番6号 TEL 0992(82)6836 FAX 0992(82)6836
大建工業(株) 岡山工場資材課	D S R F	〒702 岡山市海岸通り2丁目5-8 TEL 086(265)6113
美瑛白土工業(株)	タイセツバルーン	〒071-02 北海道上川郡美瑛町字美沢共和 TEL 0166(92)1654 FAX 0166(92)1890
(株)カルシード 研究開発部	テラバルーン テラファイン	〒290 千葉県市原市五井南海岸8-2 TEL 0436(23)8891 FAX 0436(23)8894

表4 市販シラスバルーンの一般的な物性値

平均中位径	( $\mu\text{m}$ )	30 ~ 300
均一度	(-)	2.1 ~ 4.2
タップ充填かさ密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )		0.07 ~ 0.36
空気置換粒子密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )		0.65 ~ 1.20
熱伝導率 ( $\text{kcal}/\text{m}\cdot\text{h}\cdot\text{°C}$ )		0.049 ~ 0.093
強度*	(wt%)	5.21 ~ 49.1
白色度	(-)	71.7 ~ 82.5

\*80kgf/cm<sup>2</sup>静水圧加圧後の水中浮揚物割合

耐熱性・難燃性を向上させるだけでなく、熱硬化性樹脂の場合は硬化時の発熱をおさえ収縮・変形を低減すると言われている。セメント、石膏などの無機系マトリックスについては、各種建材が製造されている。金属系マトリックスについては、約800°C以下の低融点金属との複合材への利用が開発されつつある。

不定形複合材の特殊な用途では、教材用紙粘土の素材として大量に利用されている。従来品より軽量化でき、乾燥割れがなく、また塑像中に他の芯材を入れて造形ができるなどの特徴がある。また、類似の用途としては、接着剤、バテ用充填剤、左官用モルタル補修剤、塗料などがある。特に、シラスバルーンを混入した特殊塗料やコーティング材は断熱・耐火性を有し、防火、結露防止、保温効果の向上などに寄与している。その他、炭素系軽量複合材、ゴム用充填剤、合成紙充填剤などにも用いられている。

## 5. 超微粒中空ガラスフィラーの開発<sup>11)~14)</sup>

### 5.1 開発の必要性と方策

シラスバルーンの問題点はせん断力に対して弱いことであり、樹脂やセメントなどと混練する時に壊れ易い。現在最も微粒の製品の平均粒径は、約30μmであり、これを更に微細化することができれば、強度も上がり、特殊塗料・特殊接着剤・洗剤・化粧品など付加価値の高い新用途が開ける。

一方、天然の火山ガラス堆積物は微粒子の含有割合が少ないので、必然的に粉碎工程が必要となる。

10μm以下の粉碎粒子からのシラスバルーンの収率は非常に小さい。その理由は、昇温時に水分の粒子外への拡散を抑えていた風化表面層のほとんどが粉碎により破壊されることと、微粒子になるほど粒子外への水分の拡散速度が大きくなることなどにより、ガラスの軟化時まで残存すべき水分が少なくなるためと考えられる。

この問題を解決する方法として、①10μm以下に粉碎した粒子表面に人工的に風化表面層に相当する表面層を形成する試み（九州工業技術研究所）<sup>11), 12)</sup>、及び②

極端な急速加熱により発泡させる試み（鹿児島県工業技術センター）<sup>13), 14)</sup>がなされた。

以下に、高品位微粒中空ガラスフィラーの開発を目指して行われた①について述べる。

### 5.2 ガラス粒子の表面処理による発泡性付与

#### —沈殿析出法によるアルミナ水和物被覆—

これまでに人工的な風化表面層を形成する方法として、希塩酸溶液による加圧熱水処理<sup>15)</sup>、及びアルミナコーティングによる方法<sup>12), 13)</sup>を試みた。その結果、未処理試料に比べて約10倍の収率で表5に示すような微粒・高強度・白色の中空ガラスフィラーが得られた。

しかし、水熱処理では回分処理である上にエネルギー消費型であり、一方の尿素一均一沈殿法によるアルミナ水和物被覆<sup>15)</sup>では多量の尿素を必要とし、未反応の尿素を含む廃液が出ること、70°C以上までの加温を要するなど、共に工業化技術としては問題がある。

そこで更に、沈殿剤を反応溶液に直接滴下してアルミナ水和物被覆を形成する方法を検討した<sup>17)</sup>。

[試料と処理法]：火山ガラス原料としては福島県産の通称福島白土<sup>16)</sup>を解碎・水簸分級した5~10μmの粒子を用いた。アルミナ水和物被覆は、所定濃度・量の硫酸アルミニウム水溶液に所定量の試料を懸濁させ、攪拌しながら所定量の沈殿剤を所定時間一定速度で滴下することによって行った。

加熱発泡は、図4に示す装置<sup>12)</sup>を用い、下部より試料を空気と一緒にさせて行った。加熱発泡後、タップ充填かさ密度、粒子密度、水中浮揚物含有割合を測定した。また、水中浮揚物について8MPa静水圧非破壊物含有割合および白色度を測定した。

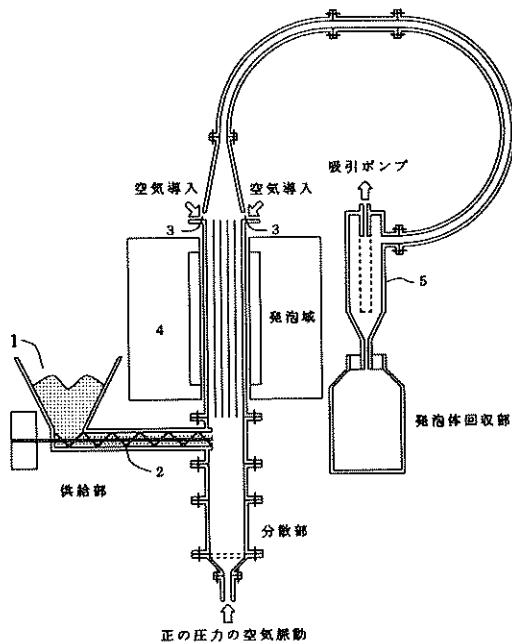
[アルミナ水和物被覆反応]：粒子表面にアルミナ水和物を沈積・被覆させるための沈殿剤としては、弱酸塩水溶液が適すると考えられるので、予備実験として、重炭酸、酢酸、シュウ酸、ギ酸の各アンモニウム塩の水溶液を沈殿剤として用いる被覆実験を行った。

その結果、重炭酸アンモニウムを沈殿剤として選択し、沈殿剤の濃度、滴下速度、反応槽内攪拌速度を変化させて被覆実験を行った。なお、沈殿剤の滴下総量は硫酸アルミニウムと反応する当量とした。

[加熱発泡性]：アルミナ水和物被覆を行ったときの重炭酸アンモニウムの滴下時間と、加熱発泡処理後の試

表5 微粒中空ガラスフィラーの物性

平均中位径	( $\mu\text{m}$ )	12.5
タップ充填かさ密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )		0.40
空気置換粒子密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )		0.84
強度（表2参照）(wt%)		93.5
白色度(-)		87.8

図4 加熱発泡装置<sup>12)</sup>

料の粒子密度との関係を図5に、水中浮揚物含有割合との関係を図6に示す。

滴下処理時間2hにおいて加熱発泡後の粒子密度が最も小さく、水中浮揚物含有割合も最も多くなっている。

また、得られた中空体（写真1）は強度値に対応する8MPa静水圧非破壊物含有割合は98wt%以上、白度は88~90であり、高強度・白色の中空ガラスフィラーを得ることができた。

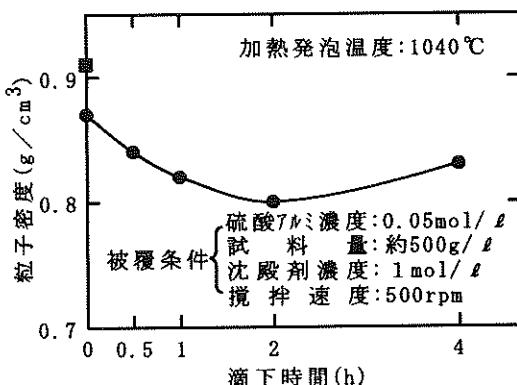


図5 重炭酸アンモニウムの滴下時間と粒子密度との関係

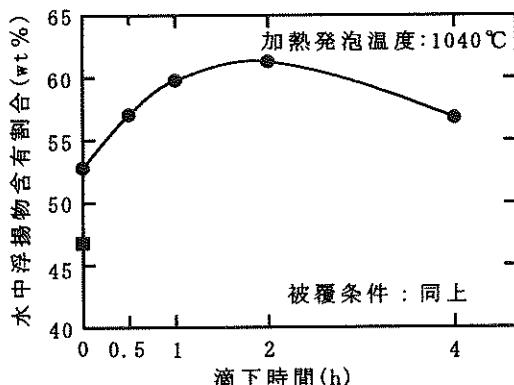


図6 重炭酸アンモニウムの滴下時間と水中浮揚率との関係

## 6. 光触媒機能を有する微細中空ガラス球の調整

最近、環境浄化に関連して  $TiO_2$  などの光半導体触媒の研究が注目を集めている<sup>18)</sup>。

$TiO_2$  は結晶構造によって、ルチル型、アナーゼ型、ブルッカイト型の3つに分類されている。工業用塗料や化粧品などによく使われているのはルチル型であるが、アナーゼ型のエネルギーギャップは 3.2eV、ルチル型は 3.0eV で、アナーゼ型の方が伝導帯の下端が上にあり還元力が強いため、光触媒としてはアナーゼ型が適していると言われている<sup>19)</sup>。

筆者らは先に、粒径約 200 mm のシラスピルーンに、tetra-n-butoxy titanium (TNBT) を加水分解してチタニア水和物を被覆した後、加熱して酸化チタン被覆シラスピルーンを調製した<sup>20)</sup>。また、四塩化チタン溶液に原料を懸濁させ、沈殿剤を滴下して原料表面にチタニア水和物を被覆した後、加熱発泡と同時にアナーゼ型酸化チタン被覆微粒中空ガラスフィラーとする方法（加熱発泡同時結晶化被覆法）についても明らかにしている<sup>21)</sup>。こ

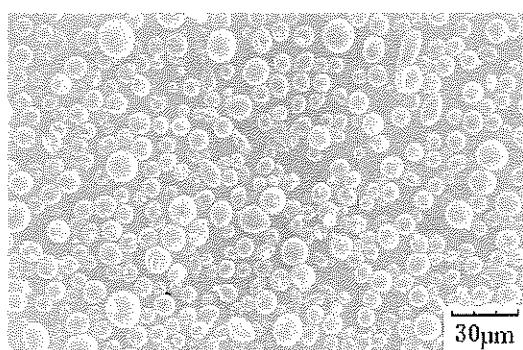


写真1 微粒中空ガラスフィラーの顕微鏡写真

表 6 被覆条件

試料 g	TiO <sub>2</sub> 換算 mass%	チタン源			沈殿剤	
		種類	mol/l	ml	mol/l	ml
39	2.5	TiCl <sub>4</sub>	0.05	250	0.5	163
38	5	TiCl <sub>4</sub>	0.1	250	1	163
36	10	TiCl <sub>4</sub>	0.2	250	2	163
38	5	Ti(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	0.1	250	1	200
38	10	Ti(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	0.2	250	2	200
38	10	(C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> O) <sub>4</sub> Ti	0.2	250	0.8	125

こでは、チタン源の影響及び被覆量を変化させること等について検討した結果を紹介する。

[試料]：前記福島白土<sup>16)</sup>を乾燥・解碎・分級して出荷されている丸中白土(株)のシルト#500を再度10及び30 μmで水簸・乾燥した試料を出発原料とした。

[チタニア水和物被覆]：チタン源として四塩化チタン(TiCl<sub>4</sub>) 塩酸混合水溶液(1:2.5 mol), 硫酸チタン(Ti(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>) 硫酸混合水溶液(1:2 mol), TNBT((C<sub>4</sub>H<sub>9</sub>O)<sub>4</sub>Ti) エタノール希釈液等を用いた。被覆処理は、原料粉末を上記希釈液に常温で分散させ攪拌しながら、四塩化チタン溶液、硫酸チタン溶液の場合は沈殿剤として炭酸水素アンモニウム(NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub>)水溶液を滴下し、TNBT溶液の場合はH<sub>2</sub>Oを含有するエタノールを滴下して行った。被覆条件を表6に示す。ここに示した沈殿剤の総滴下量を2時間で滴下した。被覆処理後、脱液・洗净し、一昼夜乾燥して発泡試験に供した。

[加熱発泡]：前記図4に示す装置<sup>12)</sup>により行った。

[その結果]：表6に示す条件で原料粉末にチタニア水和物を被覆した後、加熱発泡させて得られたアナターゼ型酸化チタン被覆微粒中空ガラスフィラーの粉末X線回折図を図7に示す。なお、表6に示したTiO<sub>2</sub>換算量は酸化チタン被覆微粒中空ガラスフィラーの重量に対

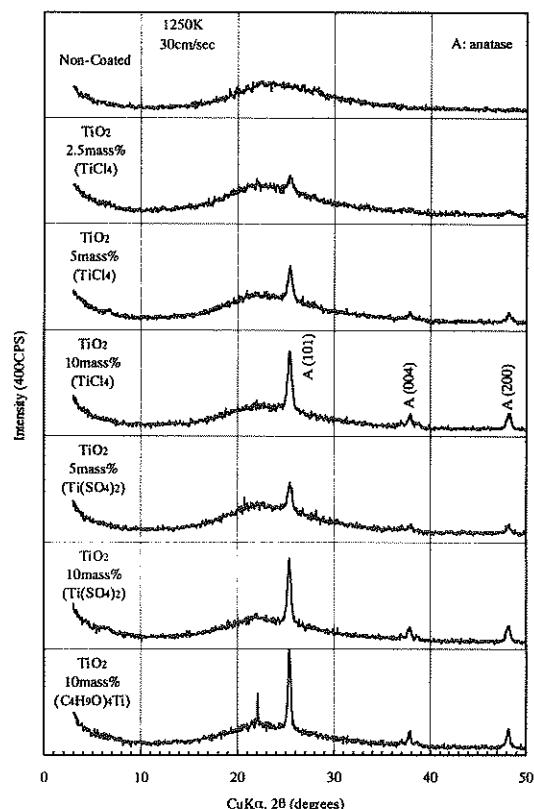


図7 微細中空ガラスフィラーの処理条件と粉末X線回折図

するTiO<sub>2</sub>の重量割合を示す。2.5 mass%ではアナターゼのピークが見られ、TiO<sub>2</sub>被覆量の増加と共に、ピーク高さが高くなり、004及び200面のピークも明瞭になった。チタン源による差異は、TNBTの場合は他と異なり、ピークがシャープで、22°付近に別の結晶相が認め

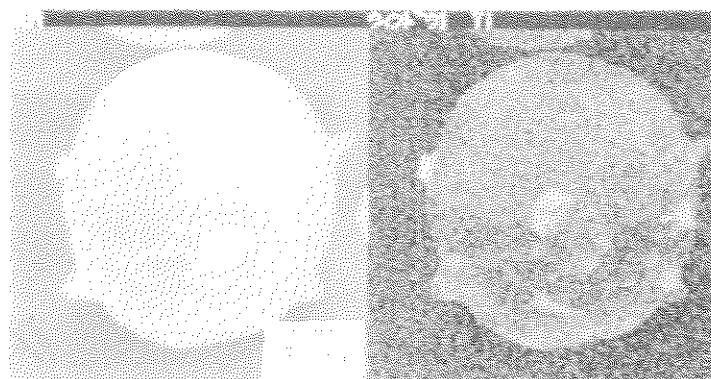


写真2 TiO<sub>2</sub> 10 mass% 被覆微粒中空ガラスフィラーのEDX

られる。この結晶相は sodium titanium silicate ( $\text{Na}_2\text{TiSi}_2\text{O}_7$ ) と思われる。他のチタン源で認められないのは、被覆処理開始時の懸濁液の pH が 1 以下で、原料表面の酸に溶出されやすい Na, K, Fe 等のイオンが被覆処理初期に溶液中に溶出したためと考えられ、本実験方法は、原料表面の洗浄も兼ねている方法であると言える。TNBT の場合は、このようなイオンの溶出が起こらず、加熱発泡時にチタニア水和物と原料表面の Na イオンが反応したと思われる。

加熱発泡試料の密度は、約 0.9~1.1 g/cm<sup>3</sup> であったが、被覆処理後の乾燥温度に依存し、130°C 付近が最も軽量となった。また、8 MPa 静水圧加圧後の非破壊率は何れの試料も 90 mass% 以上であり、酸化チタンを被覆した試料では若干強度が上昇している<sup>21)</sup>。

四塩化チタンをチタン源として、 $\text{TiO}_2$ 換算 10 mass% を被覆したのち加熱発泡させて得られた酸化チタン被覆微粒中空ガラスフィラーの EDX 観察結果<sup>21)</sup>を写真 2 に示す。チタンの分布は、固まりも認められるが、概ね粒子表面に一様に被覆されている。

今回調製したアナーゼ型酸化チタン被覆微粒中空ガラスフィラーは、半透明中空粒子の表面を活用した環境浄化への適用が期待される。環境浄化への応用研究では、酸化チタンの表面で光触媒の酸化還元反応ができるだけ活性に起こすことが重要な課題である。

上記の各種調整方法の差により光触媒活性も異なると思われるので、今後、フィラー単体、各種バインダーを用いて塗布した面の光触媒活性の測定を行いながら、調整方法と光触媒活性との関係を明らかにし、高効率の環境浄化用アナーゼ型酸化チタン被覆微粒中空ガラスフィラーの調製を行う予定である。

## 7. む す び

フィリピンではピナッボ火山からの膨大な噴出物がマニラ市や周辺地区で建設資材として利用され、人々から「天からの贈り物」と喜ばれており、また、インドネシアのジャワ島では肥沃な火山灰質土壤が農業に適しているため、国の人口の 9 割近くが狭い同島に集中しているという話である。

しかし、産業構造が著しく高度化した我が国においては、火山噴出物の有効利用が図られるためには多分野に関連するさらに高度な技術開発が求められる。本文ではシラスピルーンの開発とその高度利用に関する研究開発について紹介した。天然自然に隠された無限の可能性に期待しつつ、今後とも更なる発展を目指したいと考えている。例えば、人類共通の課題であるエネルギー・環境問題への対応など、新たな視点からの研究開発への取り組みも望まれる。また、現在海外では当該分野の研究開

発は殆ど行われていないので、我が国の先進技術としての確立も国際貢献の立場から意義あることである。

最後に、新たに開発された技術シーズがその時代のニーズに合致して、具体的に陽の目を見るには多くの条件を満たすと共に、著しい経済効果も必要とする。それを実現するには地道ながら継続的且つ挑戦的な研究開発がその支えとなり、力となる。筆者らは20年以上に亘り「火山珪酸塩工業(VSI)研究会」(ホームページ: <http://www.kniri.go.jp/stuff/stuff/kimura/vsi-j.html>) の運営に参画しているが、あらためて関係各位の御賛同とご協力をお願いする次第である。

## 参 考 文 献

- 1) 荒牧重雄: 火山第 2 集, 1(1) 47~51 (1957)
- 2) 久野 久: 「火山及び火山岩」岩波書店 (1976) 1~43
- 3) 謙山幸男, 隋内和彦, 木村邦夫: 浮選, Vol. 23, No. 3, 144~157 (1976)
- 4) 鹿児島県立博物館資料: シラスは何に利用されるのだろう? (1992)
- 5) VSI 研究会編: 「新時代を築く火山噴出物—その性状と利用の手引き—」リアライズ社 (1995) 189~202
- 6) 浜野健也: 烟業協会誌, 73(1) 64~68 (1965)
- 7) 木村邦夫, 浜野健也: 烟業協会誌, 84(2) 70~75 (1976)
- 8) 木村邦夫, 隋内和彦, 謙山幸男: 烟業協会誌, 80(2) 84~91 (1972)
- 9) 隋内和彦, 木村邦夫: 工業材料, 29(3) 30~34 (1981)
- 10) 玉井孝生: VSI (火山珪酸塩工業) 研究会ニュース, 6(4) 1(1991)
- 11) 木村邦夫, 隋内和彦, 立山 博: 日本セラミックス協会学術論文誌, 99(12) 1240~1244 (1991)
- 12) 岡田博美, 木村邦夫: VSI (火山珪酸塩工業) 研究会ニュース, 8(2) 4~5(1993)
- 13) 鹿児島県工業技術センター: 「地域技術おこし事業研究成果報告書」(1993) 45~138
- 14) 裕山研一, 神野好孝: 有田国際ファインセラミックス・シンポジウム 1992年講演録, 202~203 (1992)
- 15) 中村浩之他: 日本セラミックス協会学術論文誌, 101(7) 773~778 (1993)
- 16) 竹内常彦他: 東北の工業用鉱物資源第Ⅲ輯, 17~22 (1963)
- 17) 木村邦夫他: 資源・素材学会平成 7 年度春季大会講演要旨集, 244 (1995)
- 18) 藤嶋 昭: 日本化学会編季刊化学総説 No. 23 「光が関わる触媒化学」, 学会出版センター, p. 129~138 (1994).
- 19) 砂田 薫: TRIGGER 9808, 日刊工業新聞社, 12~15 (1998).
- 20) 李 尚勲, 木村邦夫, 太 源弼, 申 大容: 資源と素材, (115) 107~110 (1999)
- 21) Dae-Yong SHIN and Kunio KIMURA: Journal of the Ceramic Society of Japan, 投稿中

## マイクロバブルの高機能性と水質浄化\*

大成博文\*\*・佐賀孝徳\*\*・渡辺勝利\*\*  
 前田邦男\*\*\*・松尾克美\*\*\*

## High Functional Characteristics of Micro-bubbles and Water Purification

Hirofumi ONARI, Takanori SAGA, Katsutoshi WATANABE  
 Kunio MAEDA and Katsumi MATSUO

High functional characteristics of micro-bubbles and water purification effect using the techniques of the bubble are investigated. Two types of micro-bubble generator are useful to control the generation of plant plankton and cut off the plankton flowing for downstream in the surface layer of dam lake. Further, the bleeding conditions of oyster raised by injection of the micro-bubble are investigated in Hiroshima Bay. It was clear that micro-bubbles supply at regular intervals help a remarkable growth of raising oyster. These effects associate with the high functional chemicophysical characteristics of micro-bubbles having diameter about 10~30 μm.

## 1. はじめに

わが国の閉鎖水域では、環境基準を達成できない水域が半数を占め深刻な状況が続いている。また、相当数のダム湖においても、アオコや底部酸欠水における汚濁問題が発生している。さらには、海域においても、汚濁や赤潮の発生に伴って、漁獲量が激減している。たとえば、広島のカキでは、この2年間で100億円を越える被害が発生、九州地区における海老漁の壊滅的打撃、さらには、愛媛県における真珠の水揚げは、現在、最盛期の約380億円の1割まで激減している。

このように、わが国の水および水生生物環境は、決して楽観できる状況ではなく、その有効な抜本的改善が期待されている。

この10年、著者らは、上記のマイクロバブル発生技術を用いて、ゴルフ場池の水質浄化、小河川における河川浄化と魚の育成、ダム湖の表層におけるアオコ発生制御、小池における蟹の育成、また、水産分野では、鰻、イカ、ブリなどの養殖実験において重要な成果を得てきた<sup>1~3)</sup>。

これらを踏まえ、本論では、マイクロバブルの物理化

学的特徴に基づく高機能性とその水質浄化およびカキの養殖などの事例について考察する。

## 2. マイクロバブル発生装置

マイクロバブル発生装置には、M型とW型の2種類がある<sup>3)</sup>。前者は、装置内に圧力水を送入し、負圧で吸入した空気塊を回転せん断によって、マイクロバブル化を実現する方法である。このM型の特徴は、10~30ミクロンの気泡径を有する超微細気泡のみを大量に発生させることにある。また、発生したマイクロバブルは、互いに反発して気泡同士の合体を妨げ、その単一気体の寿命も比較的長い。さらに、10ミクロンの気泡の水中上昇速度は毎秒0.1mm程度であり、きわめて小さい。M型にはM1~M3までの3種類の装置があり、さらに、その大きさにおいてもそれぞれ異なる3種類がある。図1にM1-LおよびS型装置の一例を示す。M1~3型装置の特徴を簡単に示す。

①M1型：マイクロバブルの発生出口が4つあり、マイクロバブルが四方に広がるため、装置内の均一分散に優れている。最適空気吸込み量は毎分1リットル前後である。

②M2型：マイクロバブルの発生出口が1つであり、装置内や水域における拡散能力に優れている。吸い込み空気量は、毎分3リットルほどで、M1型よりも多い。

\* 平成11年11月11日本会第103回例会において発表

\*\* 徳山工業高等専門学校土木建築工学科

\*\*\* 中電技術コンサルタント株式会社

平成11年9月27日受理

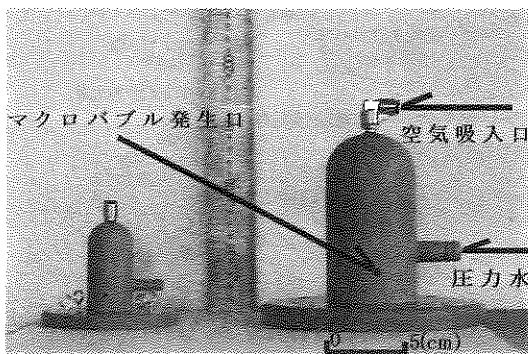


図1 マイクロバブル発生装置（M1型）

さらに、M1型と比較して目詰まりがないことから、自然閉鎖水域などの現場用として適している。

③M3型：上記2種の装置とは異なる送水方式を採用している。この装置によって、大型化および小型化がより可能となった。

次に、W型は曝気筒タイプの構造を有し、平均径数十ミクロン前後のマイクロバブルとマクロな気泡による循環流を形成させる装置であり、比較的深い(1m以上)水深の水域における適用が可能である。

### 3. マイクロバブルの発生機構

従来、数十ミクロン程度の微細気泡を発生させる方法には、①羽を高速回転させる、②細孔から空気を散気する、③突起物に衝突させる、④圧力急変部に空気を吸入し引きちぎる方法などがある。しかし、これらの方法には、以下の装置上の問題点が存在している。

- ①マイクロバブルを大量に発生できない。
- ②装置が大規模で複雑、そして高価。
- ③維持運転費が高い。

そこで、これらの問題点を解決するために、上述の特徴を有するマイクロバブル発生装置が開発された。ここでは、M型装置を中心に、マイクロバブルの発生メカニズムを考察する。

マイクロバブルは、以下の2段階の流体力学的なプロセスを経て発生する。

#### [第1段階]

装置中心部に液体および気体の2層旋回流を発生させ、その回転軸部分に空洞を形成させる。また、この回転空洞部分を巻き状に細くして、強力な回転せん断が発生させる。そして、装置上部から吸入した気体を、この空洞部に注入、通過させる。

#### [第2段階]

この気体空洞部を回転制御作用で、切断・粉碎することによって、マイクロバブルが大量に発生する。

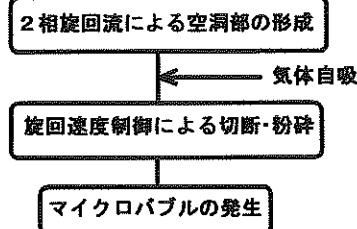


図2 マイクロバブルの発生機構の概念

この2段階を有する方式が、従来とは異なる特徴といえる。また、マイクロバブルは空洞部で、液体中の気体成分が溶出して発生した成分と、自吸した空気の両方から構成されており、これも重要な特徴として指摘される。以上を概念的にまとめて、図2に示す。

### 4. マイクロバブルの物理化学的特徴

図3に、水道水においてマイクロバブルが発生した様子を示す。マイクロバブルは、ほぼ均一な大きさを保持することから、気泡同士の合体や吸収が起こらず、単一気泡のまま水中に留まる。したがって、その寿命も長く、分散性にも優れている。また、蒸留水よりも水道水、さらには、水道水よりも海水において、マイクロバブルの発生が多い。

図4に、マイクロバブルの発生気泡分布を示す。この気泡分布は、光切断法(レーザー光膜を用いてマイクロバブルを撮影)を用いて、約200倍の倍率で撮影されたマイクロバブルの直径を直接読み取って求められた。その気泡径の最頻値は、10~20ミクロンであり、その平均気泡径は15ミクロン程度である。また、空気の自吸量の増加に伴って、20ミクロン以上の気泡が若干増加するが、15ミクロンを最頻値とする傾向はほとんど変わっていない。なお、この場合50ミクロン以上の気泡径は読み取られていないが、目視では、空気自吸量の増加に伴って、

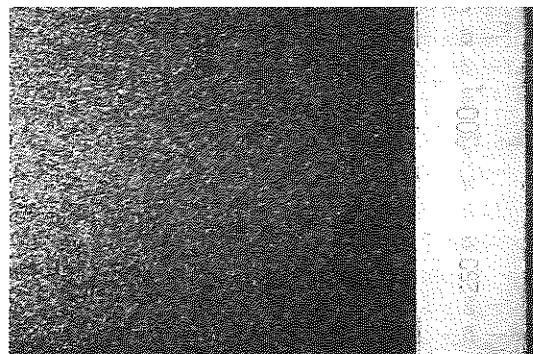


図3 水道水中で発生したマイクロバブル

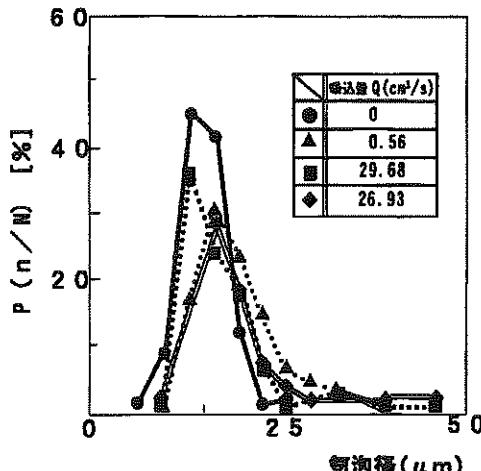


図4 マイクロバブルの発生分布（水道水）

50～数百ミクロンの気泡径の増加も認められた。

そこでマイクロバブルの物理化学的特徴を示す<sup>4)</sup>。

- ①短時間（発生して10分以内）においては、比重が増大する。長時間（1時間を越える）では、逆に比重は減少する。
- ②水素イオン濃度が増大し、弱アルカリ化する。
- ③水道水中の残留塩素が、20～30分程度のマイクロバブルによるバーリングではほぼゼロになる。
- ④自然蒸発の約十倍の量の蒸発が可能となる。

以上の4点のほかにも重要な物理化学的特性の存在が示唆されているが、それらを含めて、今後さらに明確な究明が必要と思われる。

## 5. マイクロバブル技術の適用例

マイクロバブル発生技術は、図5に示されるように多くの分野で多様な適用が可能となりつつある。この契機は、1998年7月24日付けの日刊工業新聞1面トップ記事で、マイクロバブル技術が広く紹介されたことにあった。その後、日経メカニカル誌の同年12月号によって、「日本の機械技術『世界一』」特集におけるマイクロバブルの「世界一認定」、今年になって、広島カキに関する6月27日のNHKニュース7における全国放送、読売新聞他の連続報道などによって、より詳しい紹介がなされ、その普及が進んだ。

そこで、本論では、ダム湖における水質浄化と広島カキの養殖に関する適用結果の一部を紹介する。

### 5.1 ダム湖における水質浄化実験

O県Aダムは、水力発電を主目的として建設されたが、昨今、ダム湖水の水質改善にも重大な配慮がなされている。本ダムにおける水質問題は「アオコ」の発生に

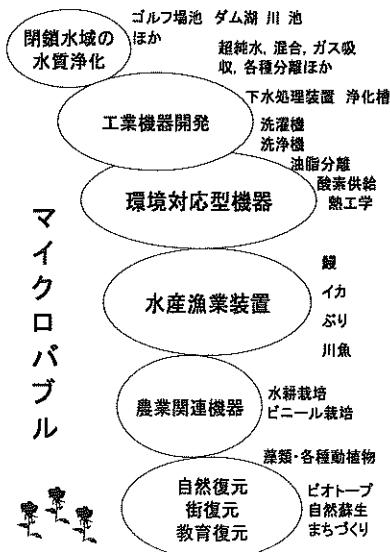


図5 マイクロバブル技術の適用分野

伴う水質汚濁にある。このアオコは、ダム湖上流にある養豚場からの排水が湖内に流入し、その有機性の汚れと高水温に起因して毎年大量発生する。

図6に、本実験を行ったダム湖の平面図を示す。この図からも明らかのように、実験はダム湖に流入する支流付近で行われた。

図7、8には、W型装置およびダム湖における設置概略を示す。本装置は、水深4m地点において、川の横断方向に14m間隔で6機設置された。このそれぞれの装置に、陸上に設置されたプロアからパイプを通して空気が送入された。その際の装置1機あたりの送風量は約140リットル/分であった。

本装置の設置目的は、ダム湖表層部分において鉛直方向の循環流を形成させることによって、①表層のアオコを下層に運ぶ、②下層の低温水塊を表層に運ぶとともに表層の高温水塊を下層に下げることによって、表

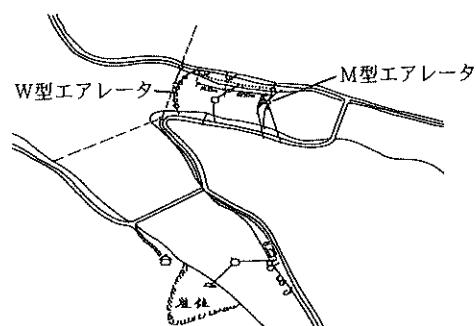


図6 マイクロバブル発生装置据付場所



図7 W型装置

層の水温低下でアオコの発生を制御する、③ダム湖を横断的に流体现象で遮断し、上流あるいは下流から発生したアオコの流出を遮断するなどにあった。

図9に、鉛直方向温度分布と濁度分布を示す。図中のW②～⑤の番号は、左岸から右岸方向に設置された装置の番号であり、装置の直上、装置の中間、装置から下流へ100mの地点の温度および濁度が比較されている。これより、ダム湖表層における装置の直上部分で2度前後の水温低下が認められる。また、装置中間地点およびその付近において、下流100mと比較して、若干の水温低下が実現されている。なお、装置の中間点においては、下降流が形成されるため、表層から3m付近までで水温が一様化している。一方、濁度は、水深2～3m付近で若干高いものの全体としては3mg/l以下で、この時点では顕著なアオコの発生が認められなかった。

図10に、アオコの発生がより顕著になったときのクロロフィルaおよび水温の縦断計測分布を示す。これより表層のクロロフィルaは、上流のM型装置を6機設置している部分で高く、下流のW型装置では、その値が極端に減少している。また、透視度は逆に上流のM型付近で低く、W型装置の下流で高くなっている。これは、M型装置付近でマイクロバブルによるアオコの浮上効果が若干、W型装置でのアオコの発生制御および下流方向へのアオコの流下を遮断した効果があったことを示している。

また図10には、水温の縦断分布も示されているが、これよりW型装置付近とその下流では表層において顕著な温度差が認められる。これは、W型装置によって形成された循環流のために、表層流の遮断が上下流で実現されたことを示している。

以上のように、上記の設置目的をほぼ実現する結果が得られたが、1998年度は、本ダムにおいて例年通りのアオコの発生がなく、上述の効果を十分確かめるまでには

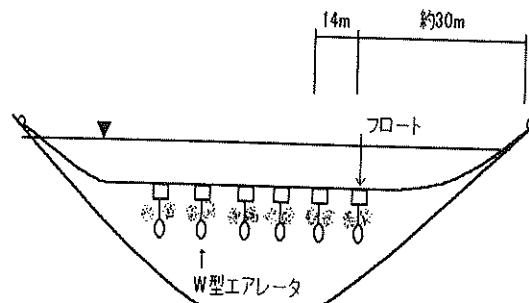


図8 W型装置の設置概略（横断面）

至らなかつたため、本年も継続して実験を行っている。

## 5.2 広島カキ養殖

1997年、1998年と、広島湾の養殖カキは、新種の赤潮とそれに付随して発生する酸欠現象によって壊滅的打撃を受け、その被害額は100億円以上とも言われている。この問題の核心は次の2つにある。

①ヘテロカプサ・サーキュラリスカーマを主とする植物性プランクトンによるカキの直接的斃死

②植物性プランクトンの斃死に伴って発生する無酸素水域による、いわゆる「酸欠」によるカキの斃死

昨年、一昨年における前者の最盛期には、1cc中に数万個も発生し、その死骸は赤い色を呈した「赤潮」となる。このヘテロカプサは、カキやアサリなど2枚貝のみに被害をもたらし、魚や人体には影響がないとされている。

この植物性プランクトンの斃死後に、海域で大規模な嫌気性分解が起こり、海全体の酸素濃度が低減し、いわ

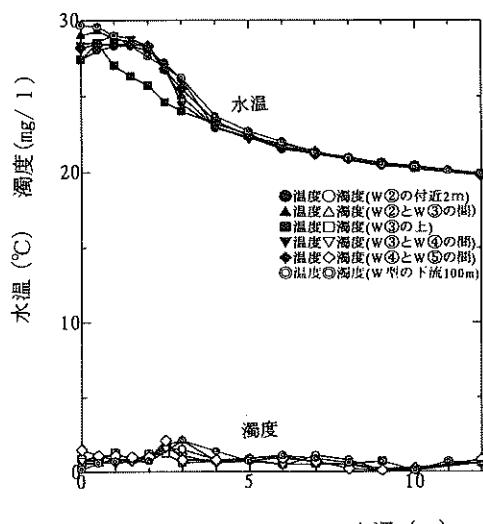


図9 鉛直方向温度分布と濁度分布

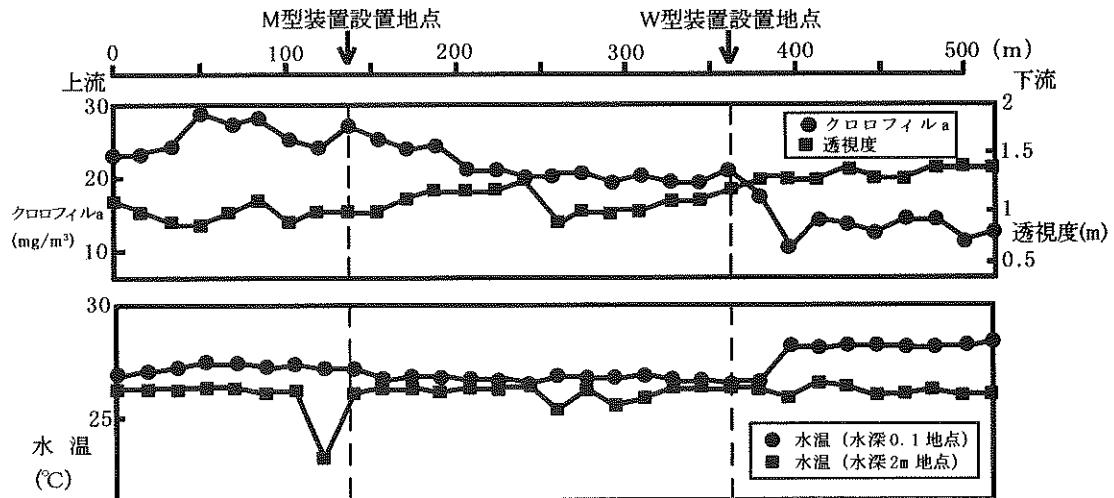


図10 クロロフィルaおよび水温の縦断計測結果

ゆる「酸欠」問題が発生する。昨年被害を受けたカキ漁師は口々に、この酸欠によるカキの大量死の方が、「大規模で、恐い」と強調する。

#### (1) 装置開発

熱心な地元漁師からの依頼を受け、このカキ問題へのマイクロバブル発生技術の適用を検討することになった。すでにダム湖深層における無酸素水域の改善問題に取り組んだ経験を踏まえ、その装置の基本を適用することを考えた。ところが、現場のカキ漁師からは、以下の要望が出され、結局、さらに装置改良の工夫が必要となつた。

①カキ筏は、一軒で20も30も持つており、装置はダム湖のような固定式でなく、持ち運び可能な、軽量のポータブル型にする。

②カキ筏でカキが吊り下げられている中に自由に装置が入れられるように小型にする。

③装置を入れる位置は、6 m, 10 m, 16 m の3箇所にしたい。これらの深さでもマイクロバブルの大量発生を可能とする。

④赤潮に伴って発生する「酸欠」状態を解決する溶存酸素の供給を可能とする。

これらの要望と現地調査を踏まえ、以下の装置開発を行った。

①カキ筏(23 m × 10 m)1つに、マイクロバブル発生装置(M2型)10個を標準装備可能とする。

②ポンプは小型で強力な水中ポンプ(チタン製、750 W)を使用し、ポンプ1台につきマイクロバブル発生装置を2台設置する。これを1システムとし、装置の最大持ち運び可能距離を20~25 mとする。

③装置の最大横幅は36 cm とし、カキ筏内への円滑な挿入を可能とする。

④ポンプの電源は、船に搭載の発電機(200 V)を利用する。装置を深い地点に設置した場合の供給空気量および供給空気圧の不足分を補うために小型コンプレッサーを用いる。本装置を用いた場合、空気自吸の限界は水深6 m 地点であり、それよりも深い水深ではコンプレッサーを用いることにした。

図11~13に、マイクロバブル発生装置、本装置の設置の様子、カキ筏における装置据付の概略を示す。

#### (2) マイクロバブルの養殖効果

図14に、カキ筏中央部で計測した溶存酸素濃度を示す。この場合の計測点は、マイクロバブル発生地点直上であり、マイクロバブル発生装置設置の水深は約10 mである。また、マイクロバブル発生装置1機あたりのマイクロバブル発生量は、毎分5リットルであった。海水マイクロバブルの特徴は、その気泡径が10~30ミクロンと小さく(自然海では、70~数百ミクロンの気泡が存在するとされている)、しかも大量に発生(自然海の約120倍)する。本図からも明らかのように、マイクロバブル発生後60分で1~1.5 mg/l、さらに約100分で、2~3 mg/lの増加が認められる。

なお、これらの値は、マイクロバブル発生の直上の値であり、この周辺では、その値がより低下する。また、水深5~10 mの間で溶存酸素濃度の増加していることが注目される。さらにマイクロバブル発生装置(水深10 mに設置)よりも下の領域でも溶存酸素濃度が若干増加しており、潮流によってマイクロバブルが下層にも運ばれていることが推測される。

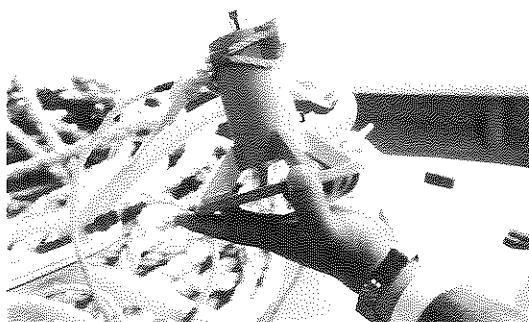


図11 マイクロバブル発生装置（M2型）



図12 マイクロバブル発生装置設置の様子

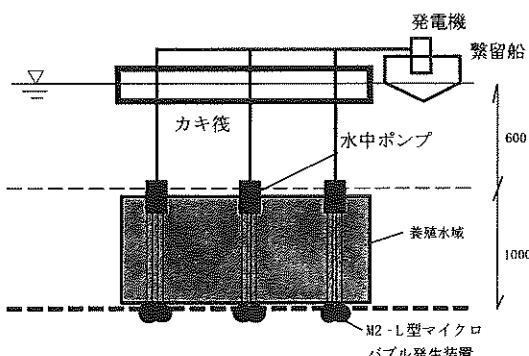


図13 カキ筏への装置設置概略

なお、マイクロバブルを発生させる前の状態は、水深5~15 m の水域で溶存酸素濃度が4 mg/l 前後の値を示している。これより、約1 mg/l の低減があるとカキの生育に関して危険状態、さらに1 mg/l 低減するとすべてが死滅するとされている。計測日の8月6日の状態は、危険域に達する直前の状態だったことから、上述の本装置における溶存酸素濃度の増分は、危険域に達した時に、それを回避する重要な効果と考えられる。

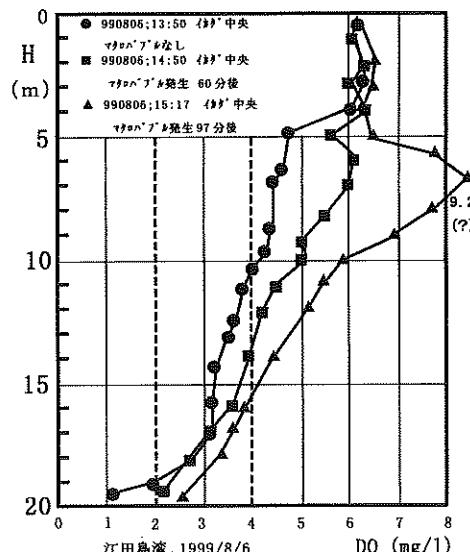


図14 カキ筏中央部の溶存酸素濃度分布

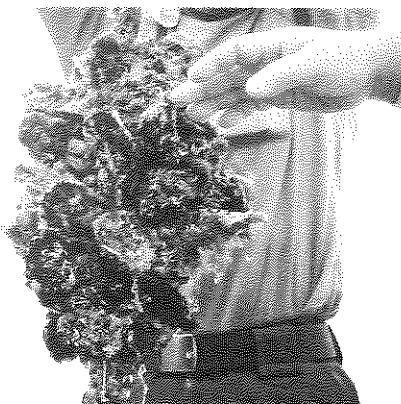


図15 マクロバブルで成長したカキ

幸いにも本年は今のところ（8月末現在）、昨年並の赤潮は発生していない。そこで、6月以来、マイクロバブルをカキに、1週間で4時間程度の割合で注入してきた。マイクロバブルを注入すると、水中でカキの口が通常よりも約2倍ほど大きく開くことが観察されたが、これは、カキの呼吸が活性化になったと思われることから、それが成長の向上をもたらすのではないかと期待された。

この予想通り、カキはみごとに成長を遂げつつある。図15には、マイクロバブルの注入がなされた「2年モノ」のカキが示されている。このカキの筏は、成長による重量増加で、その一部が水中に沈み込むほどになっていた。図16には、1年モノ、通称「若」と呼ばれるカキが示されている。この若の収穫は、広島湾で約30年にわたって

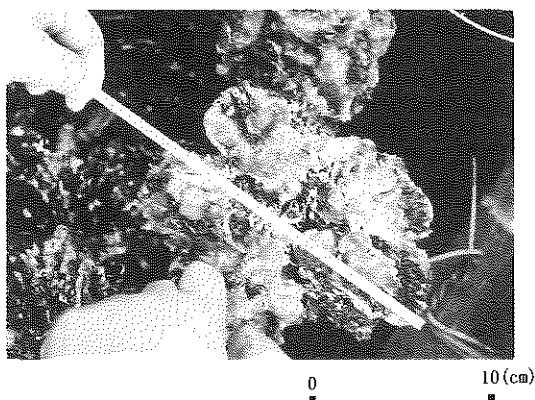


図16 マクロバブルで成長したカキ

1度もなされていないようであり、この復活は、カキ漁師や広島県にとって大きな朗報となり得る。このカキの生育ぶりは、3ヶ月で7~8cmほどの体長増加に現れており、これまでのカキの成長と比較すると、その増加率は約2倍に相当する。本カキの成長が続くと、本年12月には、30年ぶりの「若」復活が実現することが予想される。

## 6. おわりに

マイクロバブルの水質浄化および溶存酸素向上効果などの事例の一部を紹介してきた。これらの結果からも明らかなように、マイクロバブルの適用分野は広く、その有効性は、マイクロバブルの高機能性に起因している。今後、さらに厳密な物理化学的究明を行うとともに、さまざまな適用分野で、その効果を確かめることが重要である。なお、マイクロバブルの赤潮防御効果については、別稿で報告する予定である。

## 参考文献

- 1) 大成博文他：閉鎖性自然水域における汚水浄化法の開発、土木学会論文集、No. 553/V-33, p. 33-40, 1996
- 2) 大成博文：マイクロバブル発生技術による広閉鎖水域の水質浄化、混層流、11, 3, p. 263-266, 1997
- 3) 大成博文：マイクロバブル発生技術と水環境蘇生、日本高専学会誌、3, 4, p. 12-20, 1998
- 4) 石川並木他：マイクロバブルの物理化学的特徴、土木学会第54回年次講演会概要集、II, p. 514-515, 1999

## ジグ選別機の設計指針\*

——ジグとつきあって35年——

陣 内 靖 介\*\*

## How to Design and Operate an Air-Pulsated Jig

——An Old Friend of 35 Years' Standing——

Yasusuke JINNOUCHI

## 1. はじめに

圧縮空気を用いて U 字管状の水槽内の水に上下方向の往復運動をさせ、その水流を利用して石炭を比重選別する空気動ジグは1891年 Fritz Baum によって発明され以来、石炭選別機として世界中で使用され、現在でも機械選炭の半量近くを処理する代表的な選炭機である。その主な理由の一つは大量処理能力、容易な保守管理、低運転経費、長寿命、融通性など経済的、技術的な長所にある。選別精度の面で重液選鉱や重液サイクロンなどに劣るが、適正に運転すれば、原料炭も十分生産可能である。省資源・環境保全の見地から、ジグの石炭・鉱石以外への活用も様々な方面で検討されている。

ジグは最も古くから広く使われながら、最も分かっていない選別装置とも言われている。たとえば、昭和35年第10回全国選炭会議の講演で麻生はジグには分からぬことが多い喻として第2回国際選炭会議での Heidenreich 氏の言 “Aber die Setzmashinen haben die Gedicht.” を紹介している<sup>1)</sup>。

それから約40年、肝腎要の点は今もまだよく分かっていない。したがって、本報告の標題は正に羊頭狗肉と白状せざるを得ない。安請合は何ともお詫びのしようがないが、これまで多くの方々に指導・支援を戴きながらジグの脈動や分離成層の特性について力学的な観点から調べたことを、温故知新の観点から先達の成果も交えつつ、紹介することでご勘弁頂きたい。

ジグの起源について G. J. Lyman が愉快な説を紹介

している<sup>2)</sup>。洪水の被害に遭ったモザイク床のタイルを洗うために網籠に入れて水中で上下させたエジプトの親方がタイルが奇麗になっただけでなく、色別に見事に成層したことを知って大層喜んだことに始まると言うのである。ジグの歴史についてはバウムジグ発明100年を記念して1991年 Essen で開かれたシンポジウムでも紹介されている<sup>3)</sup>。それらを参考にジグの歴史をざっと振返ってみよう。ジグに関する最も古い記述は Georgius Agricola (1494-1555) の大著「鉱山学 DE RE METALLICA」(1556, 12巻) に見える<sup>4)</sup>。「鉱山学」は木版画の挿絵が多く、当時の鉱山冶金学の集大成で、その後長く世界の鉱山学に指導的な役割を果たした。図1はジグに関する挿絵である。粗鉱を入れた網底の手桶(選鉱篩 Setzkasten)を手に持って水槽内で上下させる、いわゆるハンドジグで、粒度別用の3種類の選鉱篩(床上の A, C および壁上の D)と作業状況が描かれている。左の職人は半月状の板 B で上層に集まった廃石を搔き出そうとしているところである。ハンドジグは熟練を要したとのことであるが、疲れる作業でもあったろう。16世紀から18世紀にかけてハルツ、ザクセン地方の金属鉱山で用いられたこれらのハンドジグはやがて英仏など欧州諸国にも知られ、普及していく。この金属鉱山の技術は1810年頃初めて石炭選別に利用されたらしい。しかし、本格的な利用は漸く1850年頃になってからである。この金属鉱石から石炭への転用はジグの著しい発展を促した。石炭は処理量が多いために小さな技術的改良でも大きな経済的利益を生んだからである。このため、ジグはわずか10年足らずの内に、すなわち1860代の頃には中央欧州の全炭鉱区に導入される。

石炭への転用に平行して金属鉱山でもさらにジグの発

\* 平成11年11月11日本会第103回例会において発表

\*\* 九州工業大学

平成11年9月21日受理



図1 ハンドジグによる選鉱（文献4から）

展は進んだ。それまでは粗鉱を乗せた網を静水中で動かす可動網型で、選別もバッチ式であった。これに対し上部を左右に2分割した水槽の一方に粗鉱を乗せる網を固定し、他方に設けたピストンによって水に往復動を与える固定網型が発明され、処理量、効率共にバッチ式に勝る連続式選別が可能になった。以後、数少ない例を除きジグは固定網式になる。固定網式ジグは図2のような素朴なものから始まったようであるが、1820頃にハルツ地方では既に図3に示すような曲り梃子の差動機構を備えたハルツジグが登場していた。このジグも1860年代には石炭選別に流用される。図3から分かるようにこの頃のジグは粗鉱が水槽中央の隔壁側から供給され、網面上を隔壁と垂直な方向に移動し、粒子は水と共に槽壁の流出口から排出される方式であった。この方式はやがて図4に示すようにジグを複数横に並べて選別室を連結し、粗鉱は選別室の一端から投入されて隔壁に平行に移動し、軽い粒子が多端から排出される現在と同じ方式へと進化

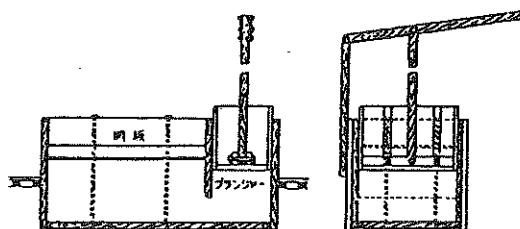


図2 固定網式手動ジグ

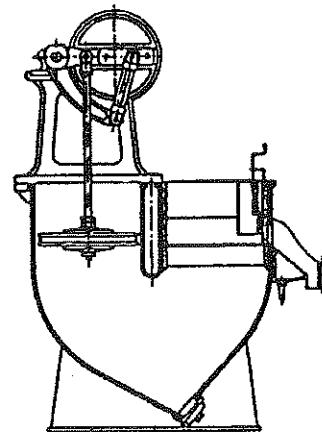


図3 ハルツジグ（文献3から）

する。

1891年ピストンの代りに圧縮空気を用いて水を駆動する画期的なジグが技師 Fritz Baum によって発明された。この発明により空気動ジグが発明者の名を冠して石炭選別の主力機として世界に普及していく。1954年9月 Essen で開催された第2回国際選炭会議 (ICPC)において網下に空気室を配置した新構想の空気動ジグ、TACUB (Takakuwa Air Chamber Under Bed) ジグが高桑らによって報告された<sup>3)</sup>。baumジグは空気室が選別室の横に位置するため脈動の不均一化または鈍重化の問題から大型化が困難であった。タカブジグはこの障害を克服するために考案されたもので、ジグ史上画期的な発明として評価が高い。このジグは特許権を得たドイツで大型化が進められ、BATAc (Baum-Tacub) ジグの名で世界的に最も普及した機種の地位を占めるに至る（図5）。

空気動ジグでは選別が水の往復動（脈動）によって行われるから、脈動は選別成績を支配する根本的に重要な因子である。したがって、ジグの設計や運転の際の根本

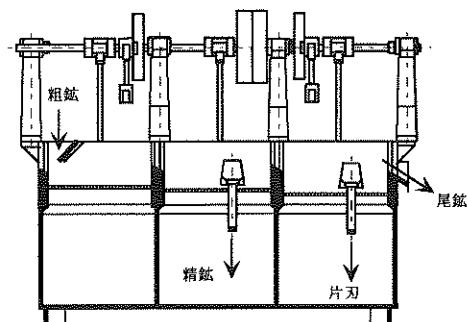


図4 複数区画型ジグ（文献3から）

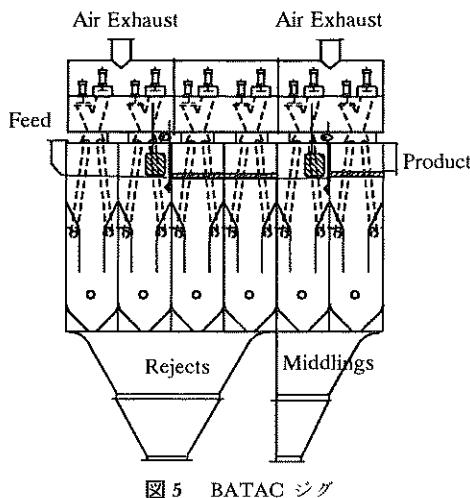


図5 BATAAC ジグ

的な最重要課題は原炭の性状に応じて選別に最適な脈動を与えることである。これを実現するためには二つの基本的な問題を解決しなければならない。一つは選別に最適な脈動を見付けること、今一つは最適脈動を発生させる方法を開発することである。前者は選別メカニズム、すなわちジグ理論と言われている粒子の分離・成層運動と脈動との関係に関する問題、後者は脈動メカニズム、すなわち空気室の圧力変動、粒子の抵抗と水の脈動との関係に関する問題である。

ジグの選別理論についてはこれまで多くの研究が行われてきた。提案された主な理論の一つは粒子の運動方程式の解析を基礎とする、いわゆる速度・加速度理論である。この範疇の最も古い理論は Rittinger の終末沈降速度理論である<sup>6)</sup>。球形粒子と速度<sup>2</sup>乗に比例する抗力を仮定すると、重力と浮力と抗力のつりあいから終末沈降速度は

$$V = K \sqrt{r(s - 1)} \quad (1)$$

ただし、 $r$  は粒子半径、 $s$  は比重、 $K$  は定数である。粒子は下から  $V$  の大きい順に成層する。この理論では粒度の効果が強調され過ぎて混粒選炭の実際を合理的に説明できない。実際のジグではほぐれた状態でも粒子はかなり密に存在する。そのため液体の比重が重液のように 1 より大きい値  $s_f$  になると考えると

$$V = K \sqrt{r(s - s_f)} \quad (2)$$

$V$  に対する粒度の効果が減り、成層は比重選別に近づく。干渉沈降 hindered settling の考え方である。

一方、Chapman<sup>7)</sup> は粒子が自由に沈降できる時間は短く、沈降速度に達する時間は無いとの見地から初期の加速運動に注目した。速度<sup>2</sup>乗に比例した抗力を受けて

静水中を静止状態から沈降し始めた球形粒子の速度  $v$  は

$$\frac{v}{v_t} = \tanh \left( 1 - \frac{1}{s} \right) \frac{gt}{v_t} \quad (3)$$

ここで、 $v_t$  は粒子の終末沈降速度、 $s$  は粒子の比重、 $g$  は重力加速度である。沈降開始直後の速度  $v$  および  $v$  を積分した沈降距離  $y$  は十分短い時間  $t$  に対して近似的に

$$v \approx \left( 1 - \frac{1}{s} \right) gt, \quad y \approx \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{1}{s} \right) gt^2 \quad (4)$$

粒子は粒度に無関係に比重別に成層する。また、Rafales-Lamarka<sup>8)</sup> は水の付加質量効果などを考慮して脈動流中の粒子運動を解析した。これらの速度・加速度理論は力学的には分かり易いが、何れも粒子間相互の干渉を無視しているという大きな欠陥がある。

これに対し、粒子を集團として取扱うべきとの考え方から Mayer は「ポテンシャル理論」を提案した<sup>9)</sup>。重力の位置エネルギーが最小になるように粒子の分離・成層が行われるというものである。しかし、この理論は力学的な考慮が全くなされておらず、脈動と粒子の運動との関係も不明である。この他、Vinogradov らにより統計力学的な取扱いも試みられた<sup>10)</sup>。しかし、これまでに提案された理論はいずれも脈動と粒子の運動との関係の把握が不十分で、選別過程を明確かつ定量的に説明できていない。

選別理論に並行して選別に最適な脈動波形についても研究や提案がなされてきた。上昇行程を重視した Rittinger<sup>6)</sup>、Chapman<sup>7)</sup>、Lovell<sup>11)</sup>、荒木ら<sup>12)</sup> の緩昇急降波形、選別が主に下降行程で起るとして、短い入気期間と長い膨張期の空気弁開閉を推奨した Bird の急昇緩降波形<sup>13)</sup>、Mayer<sup>9)</sup>、麻生ら<sup>14)</sup> の台形波形等である。このような提案や研究に刺激されて、様々な空気弁が開発され、弁開閉時期の効果が調べられた<sup>15)~17)</sup>。これらの中で、入気期間よりも長い排気期間を持った Bird 型の弁開閉時期または急昇緩降波形の脈動が次第に世界に広まり、最も普及していく。台形波や緩昇急降型の脈動がある程度自在に発生できるようになったのは澤田らが新型空気弁を開発してからである<sup>18)</sup>。田中らはこの新型弁を備えた連続選別式の小型ジグを用いて選別実験を行い、台形波形の脈動を与えることによって分離の速度と精度ともにかなりの改善が期待できることを確認した<sup>19)</sup>。飯島らは松島炭坑池島鉱業所の主選バウムジグの脈動波形可変型への改造と、改造による選別成績向上を報告している<sup>20)</sup>。実操業機による波形効果の驗証が空気動ジグ発明から百年余にして漸く可能になる。

一方、脈動はピストンジグの名残か既知と見なされることがあって、この発生のメカニズムに関する研究は選別メカニズムの研究に比べると少ない。空気動ジグの脈動が振動現象であるとの認識はかなり前からあったと思われるが、振動現象と考えるべきだと明言したのは Isenhardt<sup>15)</sup> が初めてのようである。振動理論に基く脈動の具体的な解析は昭和30年頃日本に始まる。井上ら<sup>21)</sup> は操業中のバウムジグの脈動について現地計測および理論解析を行い、脈動メカニズムは実用上 1 自由度強制振動系として取扱えること、脈動に対する粒子の抵抗はほぼ臨界減衰に近い大きな減衰効果を持つことなどを明らかにした。同じ須澤田ら<sup>22)</sup> は小型実験機による一連の詳細な実験と強制振動論に基く解析を行い、その成果に基いて脈動振動数を下げるによりジグの能力の大幅な改善が期待できることを幾つかの実操業ジグで証明した。陣内ら<sup>23,24)</sup> はフィードバック特性を持つ特異な強制振動系との観点から空気室圧やベッド抵抗の解析を含む脈動メカニズムの数学モデルを提案した。この数学モデルを利用して澤田らは台形波形を含む希望の波形の脈動を発生できる空気弁を開発した<sup>18)</sup>。荒木ら<sup>25)</sup> はこの空気弁を用いて希望の波形や波高の脈動を自動的に発生させるファジー制御システムを開発した。池島鉱業所主選バウムジグの改造はこれらの成果を踏まえて行われたものである。

空気動ジグの力学的な構造は極く単純化すれば、図 6 のように表せる。それは本質的に二つの異なるメカニズム、すなわちジグベッド内で起る選別と、脈動を引起こそ加振のメカニズムからなる。前者はベッドのはぐれが重要な役割を演じる干渉沈降の世界であり、後者は槽内の水がベッドの大きな減衰力を受けながら空気室の圧力変動によって加振される強制振動の世界である。ただし、図 6 に示すように主な因子間の複雑な双方関係は注意すべきである。たとえば、加振力として脈動を引起こそ空気室の圧力変動は逆に空気室容積の変動を介して脈動に影響される。空気動ジグが外観上の構造の単純さに反して複雑な応答を示す主な原因である。空気動ジグで起る現象を適確に理解するためにはこのようなフィードバック特性の存在を考慮に入れておくことが必要である。

現実の空気動ジグでは脈動の変化は粒子の分離・成層に影響するし、分離・成層の変化は粒子の運動やはぐれの変化による粒子抵抗の変化を通じて脈動に影響する。しかし、同じ脈動であれば、粒子の分離・成層にとって脈動の駆動源が圧縮空気かピストンか、あるいは他の何であるかは全く関係がない。同様に脈動も同じ粒子抵抗であれば、その分離・成層状態そのものには影響されない。したがって、ジグの特性を調査・把握するためには選別と脈動のメカニズムは一応切離して考えた方が

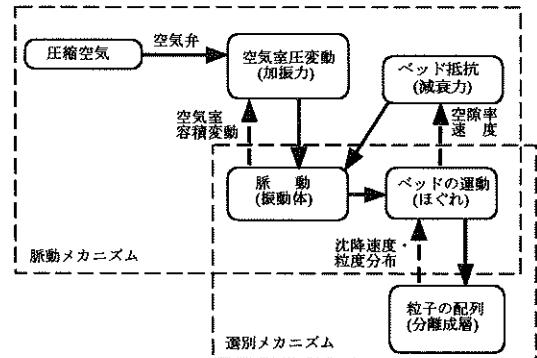


図 6 空気動シグの力学的構造

理解し易い。以下、先達の成果も踏まえながら、それぞれのメカニズムについて著者らが調べてきたことなどを紹介する。

## 2. 脈動メカニズム

### 2.1 空気室圧力波形と脈動波形との関係

空気動ジグの脈動メカニズムを大胆に単純化すると図 7 に示すようにばね  $k$  とダンパー  $c$  に支持された質量  $m$  を周期的に変動する力  $F(t)$  によって振動させる、いわゆる強制振動のメカニズムと考えることができる。ここで質量  $m$  はジグ槽内の水、ダンバー  $c$  は粒子群の抵抗、ばね  $k$  は選別室と空気室との水位差による重力の復元作用で、周期力  $F(t)$  は空気室内空気の圧力変動である。一般に振動系では力の変化が系の周期に比較してよほど緩慢でない限り、物体  $m$  の運動が力の変化に追随できず、両者の動きは全く違つて見えることが多い。図 8 は台形状に変化する周期力  $F(t)$  が作用した場合の質量  $m$  の動きを計算した例である。振動数比  $f/f_n$  (系の固有振動数  $f_n$  に対する周期力の振動数  $f$  の比) が 0.2 の例のように非常にゆっくり変化する力が作用する場合は  $m$  も力の変化に追随して台形状の動きをするが、 $f/f_n=2$  の場合のように力の変化がある程度早くなると、 $m$  の運動は正弦波形になり、振幅もかなり小さくなる。実用ジグでは脈動の固有振動数はおよそ 0.3 Hz 程度、振動数比 2 ~ 3 程度で運転されているから、脈動波形は圧力波形とかなり形が違つて、時間遅れも大きいのが普通である。

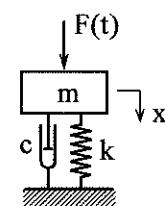


図 7 1自由度強制振動系

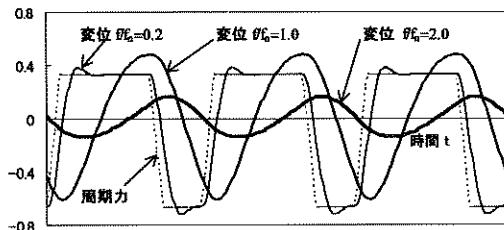


図8 周期力と振動変位との関係

脈動と圧力変動の関係だけでなく、シグでは圧力変動自体も振動数比によって大きく影響される。脈動の固有振動数はおおよそ水槽の水路長の平方根に反比例する。相似形のシグでも大きさが違えば、脈動の波高や波形が大きく違っても不思議ではない。

## 2.2 数学モデル

図7のモデルはあまりにも単純化されているので、設計・運転の定量的な指針など具体的な情報を提供できない。著者らが提案した数学モデルは、断面変化のあるU字管にモデル化した槽内の水の運動方程式、空気弁を出入りする空気量と脈動による空気室の容積変動を考慮した空気室圧の式、ベッド粒子の速度の式と連続の式、粒子の運動や拘束を考慮したベッド抵抗の式の計5式からなる<sup>23)</sup>。この数学モデルは抵抗の式以外は非線形性の強い微分方程式で、解析解は勿論、精度の良い近似解を求めるとも非常に困難であるから、数値的に解かざるを得ない。いわゆるコンピューターシミュレーションである。水槽の形状寸法、圧縮空気の圧力、空気弁の回転数やポート線図、選別粒子の粒度、沈降速度、着床時の空隙率とベッド厚、給水量などの諸条件を与えて、網室水位、空気室圧、ベッドの空隙率と変位などの時々刻々の状況を計算させる。図9は昭和49年に行った池島鉱業所主選バウムシグ1槽2区の通常運転時の網室水位、空気室圧およびベッド抵抗の計測結果と計算結果の一例

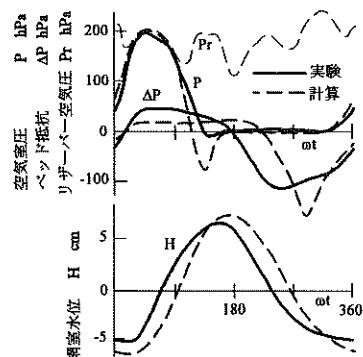


図9 池島鉱業所主選シグの定格運転時脈動

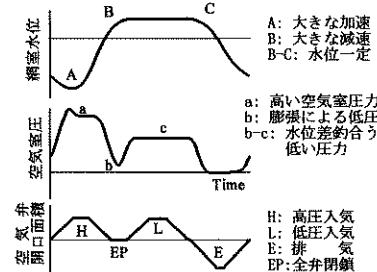


図10 台形波形脈動発生の原理

である<sup>23)</sup>。当時は九州大学の大型計算機センターに依頼せざるを得なかったが、パソコンが進歩した現在は通常のパソコンで手軽に計算できる。この数学モデルは池島鉱業所主選シグの改造の企画・設計にも利用された<sup>20)</sup>。

## 2.3 脈動波形の調整

選別に最適と言われてきた台形波形の脈動を発生させるために、澤田らは高圧の圧縮空気用と低圧空気用の二つの入気口と一つの排気口を持った新型空気弁を開発した<sup>10)</sup>。図10は台形波発生の原理図である。同図に示すように台形波形は初期の急速な上昇流の加速期A、適当な水位での急速な減速期Bおよびそれに続く水位一定の期間B-Cからなる。急速な加速は空気室に高圧の圧縮空気を送ることによって得られる。急加速された水位が適当な高さに達したときに入気口を閉じて空気の膨張による圧力低下を起こし、水を急速に減速、停止させる。水の停止の直前に低圧入気口を開けて網室と空気室との水位差に応じて低圧空気を送込めば、網室水位は低圧入気口を閉じて排気口を開くまで静止して一定に保たれる。図11に実験機で発生させた台形波の例を示す。この空気弁は高圧入気口を閉じる時期を少し早め、弁を閉じる膨張期間を少し短くすることによって緩昇急降型の波形も発生させることができる。

## 2.4 脈動の自動制御

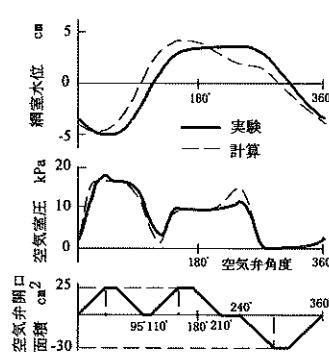


図11 実験機による台形波脈動の発生

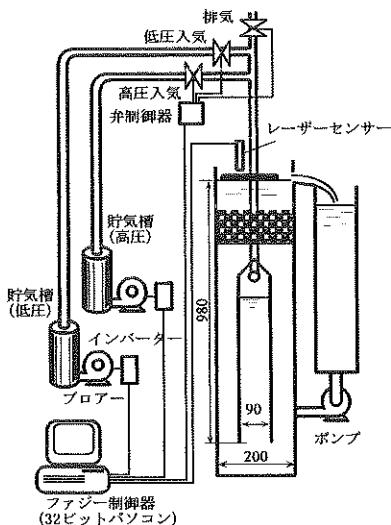


図12 振動制御実験機

台形波形の脈動は高、低圧の圧縮空気の圧力や新型空気弁入排気口の開閉時期を調節して発生させるが、単なる試行錯誤では実現が非常に困難なため、荒木らは希望の波高や平坦部を持った台形波形の脈動を自動的に発生できるファジー制御システムを開発した<sup>25)</sup>。図12に実験装置の概略を、図13に実験結果と計算結果の一例を示す。この制御システムを組込んだ数学モデルは希望の台形波形を発生に必要な圧力や弁開閉時期の条件を見つけることにも役立つ。

### 2.5 バウムジグの波形可変型ジグへの改造

台形波形の脈動は水の素早い応答を要求する。波高の均一化のために水槽を浅くできず、慣性が大きい大型バウムジグはその分不利である。これを克服するため久保らは膨張期の前に高圧空気を排気させ、さらに応答性の良い空気サーボ式のフラット弁を採用した<sup>26)</sup>。図14に池島鉱業所主選ジグの改造後の計測例を示す。高圧排気により空気室圧が大気圧以下に低下して脈動が十分減速され、台形波形が実現していることが分かる。

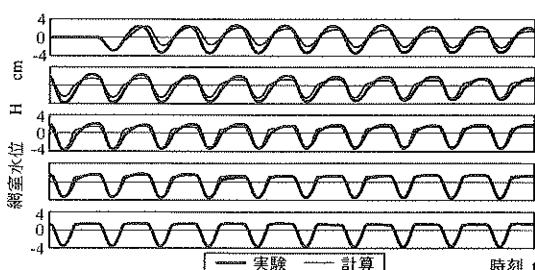


図13 台形波脈動の自動発生（振動数 0.8 Hz, 波高 5 cm, 平頂部 160°）

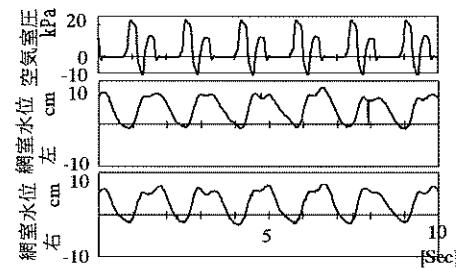


図14 池島主選バウム改造後の空気室圧および網室水位

## 3. 選別メカニズム

### 3.1 ベッドの運動とほぐれ

ベッドの総的な運動やほぐれは分離成層に決定的な影響を持つ。図15は直径 20 mm, 比重が 1.3 から 2.5 までの 8 種類の樹脂球からなる厚さ 30 cm のベッドに振動数 1 Hz, 波高約 9 cm の正弦波に近い脈動を与えた場合の、1 サイクル間の粒子の上下運動と脈動との関係を調べた実験と計算の一例である<sup>26)</sup>。同図に示すように脈動の上昇開始に少し遅れて、粒子は上面から順に浮上始め、各粒子間の変位の差が増加していることからも分かるように全体的に徐々にはぐれながら上昇する。そして  $\omega t = 160^\circ$  頃の底面の上昇から下降への急速な移行に現れているように、水流速度が最大になったころ底面から大きなほぐれが発生し、そのほぐれの波が上方に伝播していく。

底面に発生するほぐれは上昇流の最大速度が大きいほど大きく、ほぐれ波の伝播速度やベッドの全体的なほぐれの成長速度は構成粒子の平均的な終末沈降速度におよそ比例的である。

図16に台形波と正弦波の脈動を与えた場合のベッドのほぐれの計算例を示す。いずれも脈動振動数は 0.8 Hz, 波高 5 cm で、粒子は比重 1.3 ～ 1.6, 直径 6 mm の樹脂球である。振動数と波高が同じ場合、正弦波に比べて、台形波の方が上昇流の最大速度が大きく、粒子の浮上時間も長いので、上層までよくほぐれることが分かる。た

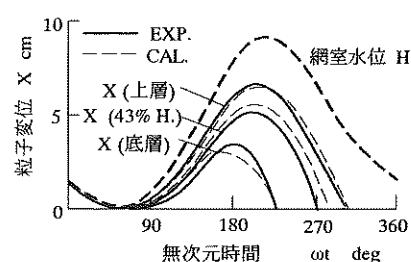


図15 脈動と粒子の運動（直線分布ベッド）

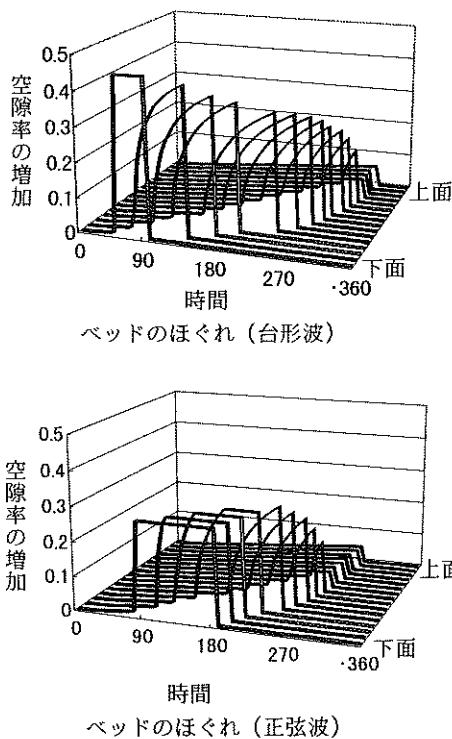


図16 ベッドのほぐれに対する脈動波形の影響

だし、全体的なほぐれの成長速度やほぐれ波の伝播速度自体は脈動にはそれほど大きく影響されないようである。なお、図16の空隙率は2.1の数学モデル中の粒子運動に関する2つの偏微分方程式を数値適に解いて求めたものである。

### 3.2 粒子の干渉沈降

ジグベッド内の粒子は密な状態で存在するから、粒子間相互の干渉は通常無視できない。終末沈降速度が  $U_1$  の均一な粒子からなるベッドを速度  $u$  の上昇流中に置かれた場合、ベッドの空隙率  $\epsilon$  と  $u$  との関係は Richardson-Zaki の実験式<sup>27)</sup> から  $u = U_0 \epsilon^{n-1}$  となる。粒子の周囲の流体に対する平均的な相対速度、すなわちすべり速度は

$$V_0 = u/\epsilon = U_0 \epsilon^{n-1}$$

この流動化ベッドの中に終末沈降速度が  $U_1$  の重比重粒子を1つ投入した場合、この粒子のすべり速度は周囲粒子の相対運動に対する干渉がなければ、

$$V_r = u/\epsilon = U_1 \epsilon^{n-1}$$

で与えられるはずである。図17は速度一定上昇流で流動化した均一粒子からなるベッドに投入した終末沈降速度  $U_1 = 68 \text{ cm/s}$  の重比重の粒子のすべり速度の測定結果で

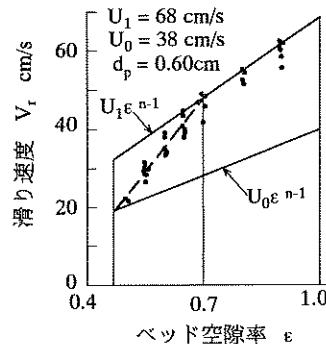


図17 粒子の干渉沈降

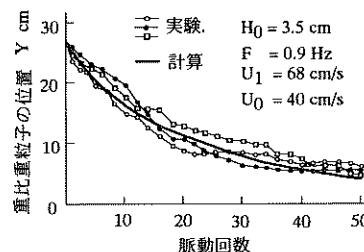


図18 重比重粒子の沈降経過

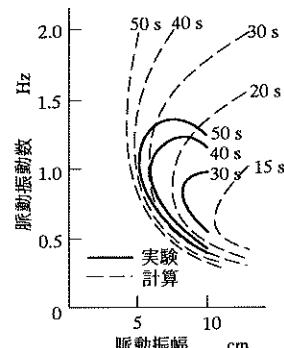


図19 重比重粒子の沈降時間

ある。同図に示すように空隙率が0.7以上では干渉を無視できるが、それ以下の値では着床時の値に近付くにつれて周囲粒子の干渉が強まり、周囲粒子に対する重比重粒子の相対的な滑り速度は零に近付く。図18はピストンジグで一定の振動数、波高の正弦波の脈動を受けて成層しているベッドに投入された1ヶの重比重の沈降経過である。ベッドは直径20mm、比重1.3~2.5の8種類の粒子からなり、投入された粒子はベッド下面の粒子（直径20mm、比重2.5）と同じである。計算値は図16に示した空隙率の計算値と図17の滑り速度の実験値を用いて計算したものである。両式とも定常状態の実験式をそのまま

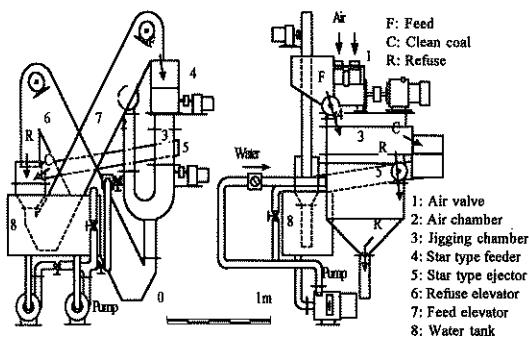


図20 脈動波形可変選別実験機

拡張利用したものであるが、実験値とかなり良く一致している。

図19に図18の実験において重比重粒子がベッド厚の90%だけ沈降するのに要した時間と脈動の振動数・波高との関数を示す。この実験結果は同一直径の球形粒子のパッチ選別であることなど特殊な条件下ではあるが、振動数や波高にも選別に最適な値が存在することを予想させる。

### 3.3 波形の効果

田中らは脈動の波形調整が可能な連続選別式実験機を用いて脈動波形の選別成績に対する効果について一連の実験を行った<sup>19)</sup>。図20に実験機の概略を示す。選別粒子は直径 6 mm 樹脂球で、比重が 1.31, 1.40, 1.53, 1.65 の 4 種類の粒子からなる。それらの重量%は順に 50, 20, 15, 15 で、着床時のベッド厚は 12 cm である。脈動波形は図21に示すように従来選別に最適な波形として提案された Bird らの急昇緩降波形、Rittinger, Chapman, Lovell, 荒木らの緩昇急降波形、Mayer, 麻生らの台形波形の 3 種類で、主な振動数は 0.8 Hz, 波高は 6 cm である。図22にこれら 3 種類の波形を与えた場合の、ベッドの下面からそれぞれ 3, 6, 9 cm の位置あった最も重い粒子（比重 1.63）と最も軽い粒子（比重 1.30）の 1 サイクル間の上下運動の高速ビデオによる測定結果の一例を示す。図22からどの波形の場合も粒子間の比重差による相対運動（分離成層）は程度の差はあっても上昇流中から始まっており、浮上後時間の経過と共に、空隙率の増大し、それに応じて分離が進展していることが分かる。しかし、図22に示すように台形波の場合が分離成層の開

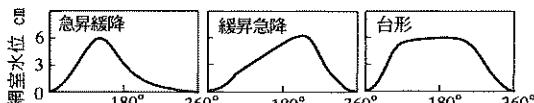


図21 試験波形

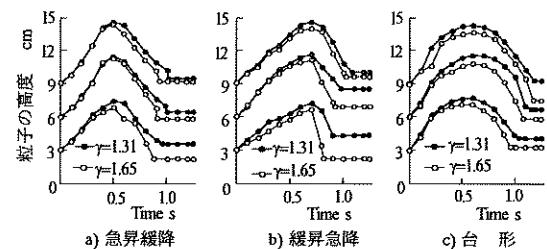


図22 粒子の上下運動の波形および比重による違い

始が早く、進展速度も大きい上に、浮上期間も長いので、分離成層が最も早い。この傾向は下層部では目立たないが、上層部では顕著である。

図23は各波形における処理量と不完全度（分離精度）との関係を示す。この例からも明らかのように処理量を増せば、分離精度は低下する。また、急昇緩降波形は他の波形に比べて分離精度が明らかに悪い。特に低処理量における精度が良くない。網下シグは空気室と網室との水位差が大きいので、波形が頂上が尖った急昇急降型になり易い。この波形は緩昇急降よりもさらに選別成績が悪くなる危険性が高い。一方、台形波と緩昇急降波は低処理量域では差がないが、大処理量域では台形波の方が分離精度が良い。なお、実用機における波形の効果は漸く検討が可能になったばかりの段階である。真に効果が明確な最適脈動はまだ霧の中と言って良い。

### 3.4 比重分離か、沈降速度分離か？

シグで粒度や形状が均一でない粒子を選別した場合、通常小さい粒子は比重が同じ大きい粒子よりも上方に成層するから、完全な比重別分離は期待できない。比重が 1.28, 1.41, 1.49, 1.61 の 4 種類、直径が 4.3, 6.0, 8.5, 12.0 mm の 4 種類の計 16 種類の樹脂球を容積で等配合した厚さ 13 cm のベッドについてパッチ方式で振動数 0.8 Hz, 波高 6 cm の台形波形の脈動を十分長時間与えた

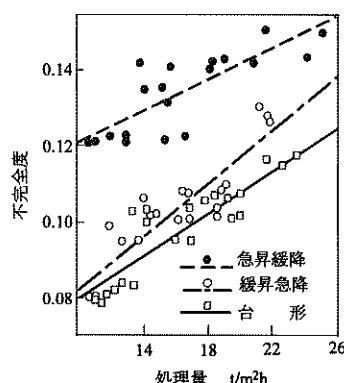


図23 選別性能への波形の効果

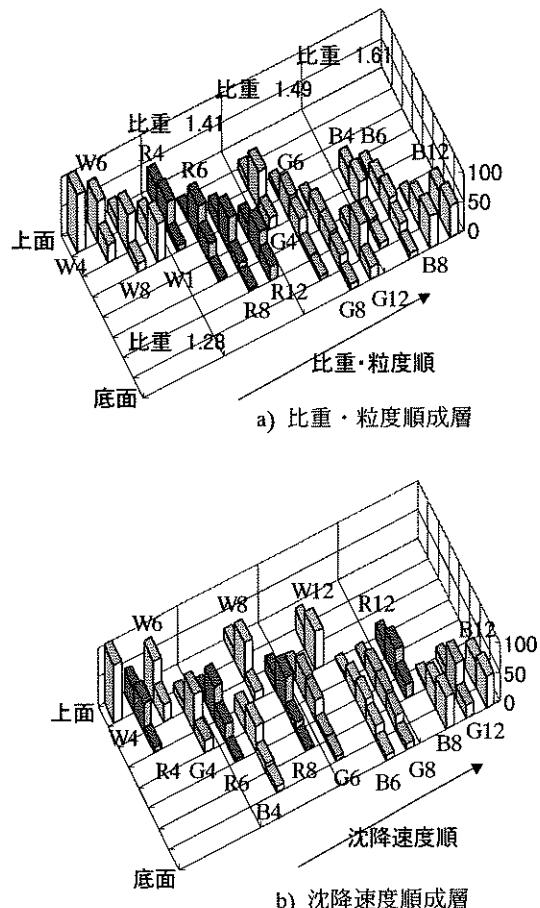


図24 成層後の粒子の分布

後の成層状態を調べた。図24に上下に8等分割したベッド各層に各種類の粒子が存在する割合に関する実験例を示す。同図においてw4などの記号は粒子の比重と直径を表す。比重順に並べた図a)と終末沈降速度順に並べた図b)との比較から分かるように粒度の影響を受けているが、選別結果は沈降速度別分離よりも比重別分離に近い。密な状態では小さい粒子が大きな粒子の間を擦り抜けて動き易い、いわゆる隙間流れ interstitial tricklingと言われる効果によるものである。また、粒子の分布には一部を除いてかなりのばらつきがある。この主な原因是流動化ベッドに必然的に起るほぐれの局所的な乱れである。大き過ぎるほぐれは成層を崩す。実際のジグでも行われているように成層の進行に伴って脈動波高を小さくすることは理に適っている。これらの両因子の効果を如何に簡明かつ定量的に把握するかはジグ理論構築への大きな鍵になる。

#### 4. む す び

ジグ、特に空気動ジグの基本的な特性について設計や運転の指針の観点から著者らがこれまでに調べてきたことを中心に紹介した。現在脈動のメカニズムについてはかなり具体的かつ定量的な指針が提供できるようになつたと考える。しかし、肝腎の選別メカニズムについてはまだ道遠しの感がある。選別過程の解明は網下給水を含めた水の運動と局所乱れを含めたベッドのはぐれと比重の他、粒度、形状を考慮した粒子の相対運動との三者の関係を定量的に把握することに他ならない。静止流体中を自由落下する3ヶの球の運動、いわゆる3体問題は解析が非常に困難な例として古くから知られている。ジグの選別過程はそれよりも遙かに複雑である。しかし、最近の計算機の発達、複雑系の解析技術の進歩は著しい。近い将来、ジグ選別にも具体的な指針が提供されることを期待してやまない。

なお、私事で實に恐縮であるが、著者とジグとの縁は1963年三菱重工業㈱の澤田幸隆氏が恩師の故河島佑男教授に研究再開を依頼したことに始まる。応用力学専攻の修士課程1年生で非線形振動の研究課題を探していた頃である。ジグのことも石炭のことも選鉱のいろはも知らず、正に○○○蛇であったことを直ぐに思い知られた。幸にも着手当初から九州大学麻生欣次郎教授や森佑行先輩、上司の九州工業大学井上順吉教授を始め多くの方々のご指導・ご支援のお陰で脈動機構設計指針の提供という当初の目標に随分と時間は掛りながらも一応到達し、東京大学今泉常正教授のお勧めで第8回国際選炭会議で報告する機会にも恵まれた。幕引き時かと考えていたところ、澤田幸隆博士の台形波発生用空気弁開発の提案が再度の切掛けになり、田中寅博士の波形効果の研究、九州工業大学荒木嘉昭教授の脈動制御の研究、三井松島炭坑下田芳久課長や鶴永田製作所久保泰雄部長らの主選バウム改造と研究を引き続き推し進めてくださる方々が次々に現れて、お陰で縁が続いて何時しか35年余の歳月が流れた。「バウムには詩がある。」は蓋し名言である。浅学非才故の苦勞も多々あったが、微かながら詩が聞えたような沁みとした喜びを一度ならず経験させて戴いた。これも偏に枚挙に暇がないほど、多くの方々の親身なご指導・ご支援の賜物と感謝している。末尾ながら、この機会を借りて厚く御礼申し上げる。

#### 文 献

- 1) 麻生・諫山・河本、ジグ選別に影響する諸要因について、選炭、11-51(1961), 86-92.
- 2) G. Y. Lyman, Review of Jigging Principles and Control, Coal Preparation, 11 (1992), 145-165.

- 3) E. Fellensiek und W. Erdmann, Die Setzsortierungsgeschichtliche und maschinentechnische Entwicklung, Symposium 100 Jahre Luftgepulste Setzmaschine, Essen (1991), 2-35.
- 4) G. Agricola, De Re Metallica, Translated by H. C. and L. H. Hoover, Dover Print, New York (1950).
- 5) T. Takakuwa and M. Matsumura, A Contribution toward the Improvement of the Air Pulsated Jig, *Proc. 2nd International Coal Preparation Congress*, Essen (1954), A II 8.
- 6) P. V. Rittinger, Lehrbuch der Aufbereitungskunde, Ernst und Korn, Berlin (1876).
- 7) W. R. Chapman, Washing an Unsized Feed Coal in a Baum Jig, *Proc. 2nd ICPC*, Essen (1954), A II 5.
- 8) E. E. Rafales-Lamarka, K. gidrodinamicheskim osnovam teorii obogashcheniya v pulsiruyushchikh potokakh, *Gornui Jururnal*, No. 10 (1953), 171-177.
- 9) F. W. Mayer, Eine neue Erklärung des Setzvorganges und ihre Folge für die zweckmäßige Gestaltung des Setzhubdiagramms, *Glückauf*, 87 (1951), 776-783.
- 10) N. N. Vinogradov et al, New Trends in Theory and Technology of Jigging Minerals, *Proc. 8th International Mineral Processing Congress*, Leningrad (1968), C-2.
- 11) J. W. Leonard et al, Coal Preparation, 4<sup>th</sup> ed., AIME, New York (1974), 9-99.
- 12) 荒木・平木, バウムジグ・エアサイクルの改良, 九州鉱山学会誌, 5-11 (1952), 20-23.
- 13) D. R. Mitchell et al, *Coal Preparation*, 2<sup>nd</sup> ed., AIME, New York (1950), 401-402.
- 14) K. Aso and Y. Isayama, Studies on the Stratification in Jig Concentration by the Partition Curve Theory, *Memoirs of the Faculty of Engineering*, Kyushu University, 21-2 (1962), 95-105.
- 15) F. Isenhardt, Improvements in Operation and Refuse Extraction in Baum Jigs as Effected by Klöckner-Humboldt-Deutz A. G., *Proc. 2nd ICPC*, Essen (1954), A II 3.
- 16) A. A. Hirst and W. M. Wallace, Air Cycles for Baum Jigs, *Proc. of 2nd ICPC*, Essen (1954), A II 6.
- 17) E. Fellensiek, Feinstkornsortierung auf einer neuartigen, in Doppelfrequenz gepulsten Durchsetzmaschine, *Glückauf-Forschungshefte*, 42-3 (1981), 130-136.
- 18) Y. Sawata, Y. Jinnouchi and S. Kawashima, Theoretical Analysis on Air-Pulsated Jigs with New Pulsation Mechanism, *Proc. 9th ICPC*, New Delhi (1982), D-1.
- 19) M. Tanaka et al, Effect of the Wave Pattern of Pulsation on the Performance of an Air-Pulsated Jig, *Proc. 11th ICPC*, Tokyo (1990), 139-144.
- 20) Y. Iijima et al, Improvement of Baum Jig into VARI-WAVE Type in Ikeshima Colliery, *Proc. 13th ICPC*, Brisbane (1998), Vol. 1, 257-265.
- 21) 小田・井上・秋田・敦賀, バウムジグストロークに関する研究(第2報), 選炭, 7-31 (1957), 38-44.
- 22) 沢田・鷺海, バウム水選機の新法則とその運用(第1報), 選炭, 7-31 (1957), 26-37.
- 23) 陣内, 空気動ジグ加振機構の力学的考察(第4報, 実用機への適用), 日本機械学会論文集, 42-364 (1976), 3834-3841.
- 24) Y. Jinnouchi and S. Kawashima, How to Predict and Optimize the Pulsation in the Air-Pulsated Jigs, *Proc. 8th ICPC*, Donetsk (1979), B5.
- 25) Y. Araki, Y. Jinnouchi et al, Fuzzy Control of the Wave Pattern of Pulsation in an Air-Pulsated Jig, *Proc. 12th ICPC*, Krakow (1994), 167-174.
- 26) 河島・陣内・浜田, 空気動ジグ加振機構の力学的考察(第2報, ベッドの減衰作用), 日本機械学会論文集, 40-333 (1974), 1309-1317.
- 27) J. F. Richardson and W. N. Zaki, Sedimentation and Fluidazation: Part I, *Trans. Institution of Chemical Engineers*, Vol. 32 (1954), 35-53.