

# ●研究成果●

## 1. 研究背景および研究目的

本項では、本研究で取り組んできた廃石膏ボードと建設汚泥のリサイクルについて、その現状と課題、研究の着眼点と研究目的について述べる。

石膏ボードは、全世界で大量に利用されている建設材料の一つである。石膏ボードの原料は、排煙脱硫プロセス等から副生物として発生する化学セッコウと、天然鉱物である天然セッコウである。セッコウの化学式は  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (2 水セッコウ) であり、結晶中に 2 分子の結晶水を有している<sup>1)</sup>。セッコウを加熱すると結晶水が脱水し、2 分の 1 分子の結晶水を有する半水セッコウ(焼セッコウ)となる。一方、焼セッコウを水と混合すると結晶中に水を取り込んで 2 水セッコウを生成し、自己硬化性を示す。石膏ボードは焼セッコウと水を混合したセッコウスラリーを紙で挟んで硬化させたものであり、その加工性の良さ、断熱、耐火、防音性の高さから、建築物の内壁材として広く利用されている。しかしながら、我が国の家屋の寿命はおよそ 30 年であることから、建築物に組み込まれた石膏ボードは 30 年前後で建設廃棄物となる。このように発生する廃石膏ボードは「解体系」と呼ばれ、建設工事で発生する端材である「新築系」と区別されている。新築系廃棄物はその 80% が石膏ボードの原料としてリサイクルされているにもかかわらず、解体系廃棄物はわずか数% しかリサイクルされていない。そこで、平成 22 年には解体系廃石膏ボードのリサイクル率を現在の数% から 20% に高めるという数値目標が設定された<sup>2)</sup>が、平成 22 年現在、その目標の達成には未だ至っていない現状である。

一方、建設汚泥はトンネル工事のシールド工法や、湖沼の浚渫工事等で発生する、いわゆる「泥」である。建設汚泥は乾燥すると一見土のような特性を示すが、降雨等で再び水を含むと泥の性質に戻る「再泥化」が問題となる。

建設および解体工事で発生する建設廃棄物は発生量が膨大であることから、これまでもリサイクルおよび減量化が進められてきた。平成 12 年 11 月に施行された建設工事にかかる資材の再資源化等に関する法律(建設リサイクル法)では、木材等の特定建設資材を用いた建設物に係る解

体工事および新築工事等において、資材の分別解体や再資源化が義務づけられ、いくつかの資材については「特定資材」として重点的に再資源化・リサイクルする取り組みが進められてきた。そのなかで、特定資材に指定されていないものの、その発生量が膨大である建設廃棄物として廃石膏ボードと建設汚泥が問題となっている。昨年行われた建設リサイクルに関する施策の見直しにおいても、廃石膏ボードと建設汚泥は、再資源化およびリサイクル技術が未成熟であることから、特定資材の指定が見送られている<sup>3)</sup>。

先述の通り、セッコウを加熱して得られる焼セッコウは水と混合することにより自己硬化性を示す。この焼セッコウを適切な条件で建設汚泥と混合すると、土のような性質を示す。また、セッコウを添加したセメントや石灰系の材料を主成分とする固化材を用いて建設汚泥を固化することも可能であり、このようにして得られた「再生土」は建設工事の路盤等に再利用できることから、平成 18 年に国土交通省より、一定規模の大型工事では建設汚泥を再生土として再利用する指針が出されている<sup>4)</sup>。これらの背景から、近年廃石膏ボードを回収して紙を剥離して取り出した廃セッコウを用いて、建設汚泥や軟弱地盤の固化材、路盤材等への利用を目指す環境ビジネスが全国で急速に広まっている。これについては平成 20 および 21 年度に環境省が行った調査検討事業<sup>5)</sup>においても取り上げられており、廃石膏ボードの新たなリサイクル法として着目されているものの、業界へのヒアリングではセッコウからのフッ素化合物の溶出に対する対策が課題であると指摘されており、その対策の確立が急務であると言える。

我々研究グループでは、廃石膏ボードを建設汚泥などの固化材としてリサイクルする際、原料として用いられている化学セッコウに含まれるフッ素化合物などの化学物質の問題に着目して検討を進めてきた。化学セッコウ中に含まれるフッ素化合物は、セッコウが副生される工業プロセスに依存している。例えば、リン酸製造では原料のリン鉱石(フッ素アパタイト、 $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$ を主成分とする)にフッ素が含まれており、リン酸製造後に発生する化学セッコウ(リン酸セッコウ)にはフッ素化合物が不純物として含まれる可能性がある<sup>6)</sup>。同様に、フッ酸製造の原料である蛍石( $\text{CaF}_2$ )、あるいは火力発電で用いられる石炭中など、原料中に含まれるフッ素化合物等の不純物がリン酸やフッ酸製造、石炭火力発電の排煙排脱操作において生成するセッコウ中に混入する。

セッコウ中のフッ素はフッ化水素酸に代表される遊離のフッ化物イオン(F)、ケイフッ化物イオン(SiF<sub>6</sub><sup>2-</sup>)、フッ化カルシウム(CaF<sub>2</sub>)の形態を取っており、セッコウの凝結・硬化時間を変化させ、セッコウ硬化体の強度を低下させることなどが報告されている<sup>7)・9)</sup>が、先に示した廃石膏ボードの建設汚泥などの固化材等への利用に際しては、固化させて後得られる「再生土」がセッコウ中のフッ素化合物によって汚染土壌の原因になる可能性があることが最大の問題となる。

土壤汚染対策法においてフッ素化合物は、含有量については土壤 1 kg あたり 4,000 mg 以下を基準値としているが、溶出量については検液中のフッ素化合物の濃度が 0.8 mg/L 以下となることを求めている。図 1 に過去に調査された各種セッコウ試料中のフッ素化合物の含有量、および溶出試験を行った検液中のフッ素

化合物濃度をまとめた結果<sup>10)</sup>を示すが、多くの試料において、フッ素化合物の溶出量は基準値である 0.8 mg/L を上回っていることがわかる。建設汚泥に対するセッコウの混合比によって溶出量や含有量は低下するが、それは建設汚泥によってセッコウ中のフッ素化合物を単に希釈しているに過ぎないため、廃石膏ボードから回収されたリサイクルセッコウ

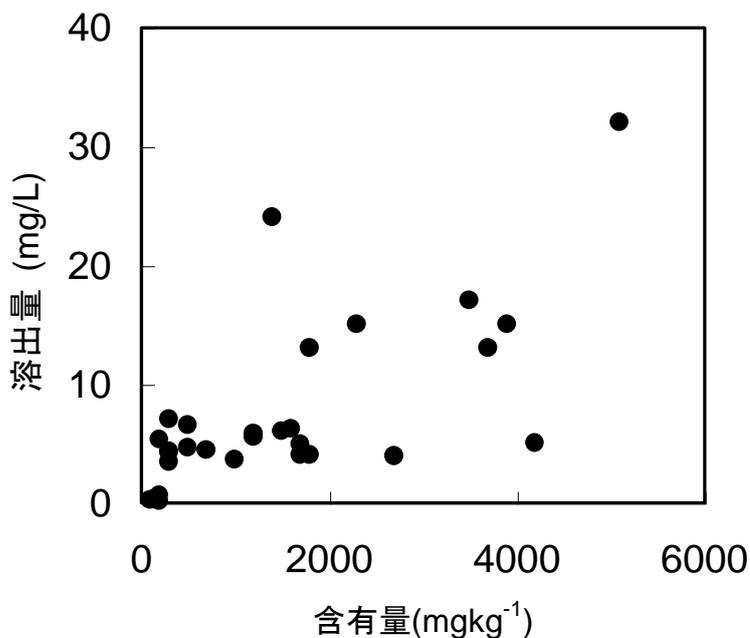


図1 種々の廃セッコウ試料中のフッ素化合物含有量と溶出量の関係

を安心かつ安全に用いるためには、セッコウ中のフッ素化合物を除去あるいは不溶化することが求められる。先の環境省での調査報告<sup>5)</sup>においても、最終的な再生土や固化材ではなく、原料として用いられるリサイクルセッコウそのものからのフッ素化合物の溶出を抑制する必要性が指摘されているところである。

以上のことより、セッコウを建設汚泥のリサイクルに活用する際、セッコウ中のフッ素化合物に注意を払う必要があると言える。一方、図 1 より、セッコウ中のフッ素化合物含有量と溶出量には大き

なばらつきが見られ、セッコウ中のフッ素化合物の存在状態に様々な形態があることが示唆される。本研究に先だって平成16から18年度に本助成事業で行った研究において、セッコウの種類によって不純物の溶解挙動に差がみられ、それはセッコウに存在する不純物の存在状態に起因することを明らかにしている<sup>11)</sup>。これはセッコウの製造条件によって不純物の存在状態を制御できることを示唆しており、不純物を含まない副生セッコウの製造条件構築にヒントを与える可能性が期待できる。そのために、各種副生セッコウの粒子レベルでの評価検討を進めているところである。

現在、我が国で行われている石膏ボード製造プロセスでは、不純物量が比較的安定している化学石膏および天然セッコウを原料として石膏ボードの製造が行われている。また、リン酸セッコウについても、水洗によってフッ化物をできるだけ除去する操作が行われている。しかし、解体建築物に組み込まれている数十年前に製造された石膏ボード中には、その製造元や原料組成によって種々の量のフッ素化合物が含まれている。このことは、建設物の解体に伴って発生する廃石膏ボードのフッ素量が安定しておらず、廃石膏ボードを原料として建設汚泥や土壌の固化材を製造すると、そのフッ素溶出量等が大きく変動する可能性があることを意味している。そのため、セッコウ中のフッ素化合物の存在量およびその挙動を調べ、それに対する対策を講じることが求められる。

現在セッコウ中のフッ素含有量は過塩素酸共存下での水蒸気蒸留によってセッコウを均一な溶液にしてから、水溶液中のフッ化物イオン分析法によって調べているが、この方法では専用の水蒸気蒸留装置を必要とし、操作が煩雑であり時間を要する。図2に示すように、廃石膏ボードを扱う現場で本法を用いて試料中フッ素含有量を知るためには、専門の業者に分析を依頼しなければならない。すべての廃石膏に対して分析を依頼するとなると、分析にかかる期間、現場で廃石膏ボードを保管しておく必要があり、生産性の低下は免れない。水蒸気蒸留に替わる方法として、セッコウを3mol/L希塩酸中で加温分解することにより溶液を得る前処理法が報告されている<sup>12)</sup>が、近年の労働衛生に関する規制強化の現状から考えると、危険物や劇物を用いた前処理法では安全確保のための施設の整備が必須となるなど現実的とはいえない。そこで、セッコウを容易に溶解して得られた溶液中の化学成分を分析することで、セッコウ中のフッ素量の概略を把握し、除去

あるいは溶出抑制の手法を講じることができれば、廃石膏ボード中の不純物量を適切に把握した上でのリサイクルが可能であり、廃石膏ボードの安全、安心リサイクルに貢献すると期待される。

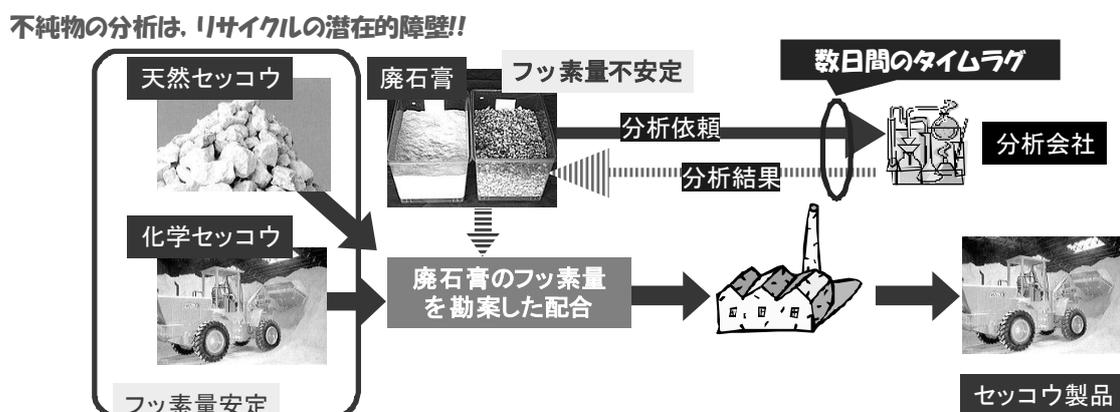


図2 セッコウリサイクルと分析技術の現状

一部の地方の廃石膏ボードには原料起源のヒ素化合物が含有している。これらについては製造地や製造年が特定されていることから回収段階でその種の廃石膏ボードを分別する操作が行われているが、解体現場で混入した試料までは判別が困難であることから、ヒ素化合物の含有の有無を評価する技術も、廃石膏ボードの安心リサイクルには重要となると思われる。

従来セッコウを原料とした工業製品は、セメントや石膏ボードに代表される、少品種大量生産で製造されるものであった。しかし、本研究で着目している廃石膏ボードリサイクルにおいては、建設物の解体現場で比較的少量の廃石膏ボードを回収し、それらを再資源化プラントに集約してボード原紙とセッコウに分離、得られたセッコウを加熱処理して焼セッコウなどを製造し、得られたセッコウを原料にして建設汚泥固化材などのリサイクル製品を製造することとなる。これらの各プロセスは異なる企業で行われる可能性があり、再資源化された原料だけが流通することが考えられる。その際、回収した廃石膏ボードに含まれる不純物に関する情報が正しく流通されないと、昨年話題となった「汚染米問題」のように、不適切な原料を用いてリサイクル製品が製造される可能性が危惧される。そこで、図3に示すような廃石膏ボードの有効利用の際の物流過程で、セッコウ中の不純物量等の安全性データを同時に流通させるリサイクルシステムの構築を導入することにより、原料中の不純物データが正しく流通することが期待される。

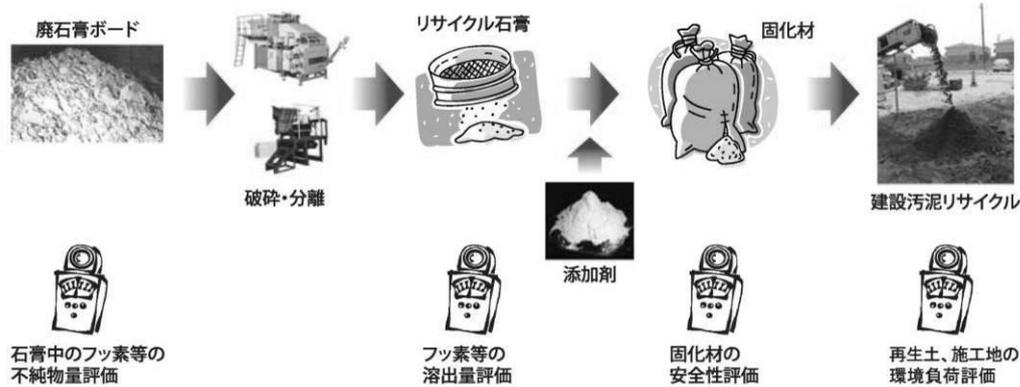


図3 本研究でイメージしている廃石膏ボード・建設汚泥リサイクルシステムの概念図

現在セッコウ中のフッ素化合物の制御技術として、種々の方法が提案されているが、たとえば代表研究者らが NEDO 技術開発機構のプロジェクトなどを通して開発したリン酸カルシウム系不溶化材の添加などの手法<sup>13)</sup>については、今年から建設汚泥の固化材などに用いることができる添加剤として販売される予定となっており、高い関心を集めている。

またセッコウと接触している土壌による環境影響の変化に関する調査も、国立環境研究所などによって積極的に行われている。それらの成果から得られた「対策技術」をリサイクルシステムに組み込むことができれば、不純物の対策が取られた、安心かつ安全な廃棄物リサイクルが構築できると期待される。

前節の背景を踏まえて、本研究ではリサイクル率の向上が求められている廃石膏ボード、建設汚泥の安心・安全なリサイクルの構築をめざし、

- (1) 廃石膏ボード中に含まれる不純物のオンサイト分析装置の試作
- (2) 分析結果および対策技術を電子マニフェストに付与して提供できるユビキタス端末を用いた物流システムの検討
- (3) 富山県をフィールドとした実証試験
- (4) アウトリーチ活動による普及・啓蒙

を行うことを目的として検討を進めた。

## 2. 研究方法

### 2.1 セッコウ中不純物の存在状態の評価・分析技術の開発

#### 2.1.1 試料および試薬

用いたセッコウ試料は、化学試薬の二水セッコウ(和光純薬工業(株)製, 以下試薬セッコウ), 各種化学工業や、排煙脱硫プロセスで発生した化学セッコウを用いた。セッコウ中のフッ素化合物評価のために、試薬セッコウに化学試薬(和光純薬工業あるいは関東化学製)のヒ酸ナトリウム、フッ化ナトリウム、ケイフッ化ナトリウム、フッ化カルシウム、を添加し、乳鉢および乳棒を用いて均一に混合し、種々のフッ化物量を有する「模擬化学セッコウ」を調製した。溶液調製時に用いた水は特に明記しない限り、超純水製造装置(日本ミリポア製 Mill-Q A10 型)で精製したものをを用いた。

#### 2.1.2 ガスクロマトグラフを用いたセッコウ中フッ素化合物評価法の開発

濃塩酸(関東化学(株)製)を超純水で希釈して調製した 10 w/v% 塩酸 10 mL に前節の方法で調製した模擬化学セッコウを 0.2 g 添加し、密栓した試験管中で 60 分間振盪させて試料を溶解させた。試料溶液にクロロトリメチルシラン(Acros Organics 製)を 0.5 mL 添加して 1 分間振盪後、トルエン(関東化学(株)製)を 2 mL 添加して 1 分間振盪させることにより、フッ化物イオンとクロロトリメチルシランが反応して生成したフルオロトリメチルシランをトルエン中に抽出させた。

トルエン中のフルオロトリメチルシラン量をガスクロマトグラフ((株)島津製作所製 GC-2014 型)を用いて分析した。分析に際しては、トルエンに内部標準としてn-ペンタンを添加し、充填剤を 10%, OV-1, 保持剤に Chromsorb-W (AWDMCS 80-100mesh)を充填した 3mmφ×3 m のガラスカラムおよび FID 検出器を用いて得られたフルオロトリメチルシランと n-ペンタンのピーク強度比を求めた。一方、各種化学セッコウについても同様の実験操作を行った。

#### 2.1.3 オンサイトモニタリングを指向した、セッコウ中フッ素化合物の簡易分析技術の開発

陽イオン(ローム・アンド・ハース社製 アンバーライト IR120B H 型)および陰イオン(同社製 アンバーライト IRA410 OH 型)交換樹脂をそれぞれポリプロピレン製ティーバックに入れて密閉し、蒸留水中に浸漬した。試薬セッコウを添加し、セッコウの溶解挙動を調べた。また、2.1.1 の手法で

調製した模擬化学セッコウおよび化学セッコウについて、上記の方法でセッコウ試料を溶解させ、イオン交換樹脂が入ったティーバックを取り除いた溶液中に含まれるフッ化物イオン濃度を、(株)同仁化学研究所製のアルフッソソを用いたランタン-アリザリンコンプレクソン吸光光度法を用いて測定した。吸光度の測定は(株)GE ヘルスケア バイオサイエンス社製、可視分光光度計 (Novaspec plus)を用いて行った。化学セッコウについては、既知量のフッ化ナトリウム試薬を添加したものについても同様の操作を行い、添加したフッ化物イオンの回収率を求めることにより、本法によるセッコウ中フッ素化合物評価法の正確さを検討した。

また、試料セッコウを純水中に懸濁させ、上記イオン交換樹脂を添加後振とうしてセッコウを溶解させて溶液を得た。得られた溶液中のフッ化物イオンは、環境水中のフッ化物イオンなどの簡易分析法として広く用いられている発色試薬である「パックテスト<sup>®</sup>」、および発色後の溶液の吸光度を簡易測定できる「デジタルパックテスト」(ともに(株)共立理化学研究所製)を用いて評価した。

#### 2.1.4 セッコウ中ヒ素化合物の簡易分析技術の開発

セッコウを溶解させるのに最適なイオン交換樹脂量を以下の手法で求めた。純水 20mL に種々の量の陽イオン交換樹脂と 0.5g の試薬石膏を加えた。シェイキングインキュベータを用いて 1500 rpm で 5 分間攪拌した後、セッコウの溶解の有無を目視で確認した。セッコウからのヒ素化合物の分離の可否を評価するため、種々の量のヒ酸ナトリウムを添加したセッコウ試料 0.12 g に 20 mL の純水および 2.0 g の陽イオン交換樹脂を加え、1500 rpm で種々の時間混合した。5 分ごとの溶液中の全ヒ素濃度をモリブデンブルー法に基づいた市販のパックテスト( (株)共立理化学研究所製)を用いて測定した。

## 2.2. 各種化学セッコウの溶解挙動の評価

種々の化学セッコウの試料をエチレングリコールに懸濁させ、光学顕微鏡にて粒子の形状を観察し、試料中のフッ化物イオン量を、2.1.2 節で述べた塩酸溶解-ガスクロマトグラフ分析法にて評価した。化学セッコウ 2.5 g を 1 L の超純水を入れたガラス容器に加え、攪拌させながら 10 秒間隔で懸濁液をサンプリングした。サンプリングした懸濁液をポアサイズ 0.45  $\mu\text{m}$  のメンブレンフイ

ルターにて加圧濾過して液相を回収し、液相中のカルシウムおよび硫酸イオン濃度をそれぞれ測定し、溶解速度を評価した。

### 2.3. 海外における石膏ボード、建設汚泥に関する環境問題の調査

平成 20 年 10 月 29 および 30 日に、ドイツにある世界最大のリン酸塩メーカーである BK Giuliani GmbH およびこの日本法人であるビーケー・ギューリニ・ジャパン(株)の協力を仰ぎ、世界最大規模の石膏ボード・建材メーカーである Knauf Intenational GmbH の R&D センター、および BK Giuliani GmbH 所において、ドイツ・ヨーロッパにおけるセッコウボードリサイクル等に関する調査、意見交換を行った。Knauf International GmbH は本研究の共同研究者の数名が籍を置くチヨダウーテ(株)と資本・業務提携を行っている。一方、BK Giuliani GmbH は、石膏ボードの品質を制御する薬剤の開発・製造を行っており、Knauf International GmbH とも友好的な関係を有している。

本研究グループがこれまでに構築してきた海外の諸機関とのネットワークを活かし、海外における同種の課題に対し、本成果の活用可能性の是非を検討した。建設汚泥リサイクルに関しては、李明博政権で大規模な浚渫汚泥のリサイクル事業を展開している韓国の現状と課題について、代表研究者が所属している富山高専が国際学術交流協定を締結している慶熙大学等の協力を得て調査を行った。

セッコウに起因する環境問題については、肥料製造時に副生するリン酸セッコウに着目し、我が国のリン資源の輸入先でもある北アフリカ諸国の現状と課題について、代表研究者が交流を進めてきた筑波大学北アフリカ研究センターおよび海外大学共同利用事務所の協力を得て、チュニジアの研究者との意見交換を通して現状の調査を行った。

### 2.4. 廃石膏ボードリサイクルの事例調査

前項で開発したセッコウ中の不純物評価技術の有用性の評価に加え、我が国で廃石膏ボードを用いたリサイクル事業に取り組む事例の調査を目的に、廃石膏ボードの回収、リサイクルを進めている民間企業に協力を仰ぎ、実際に分析装置の試作品を持ち込んでその問題点と改善点につ

いてご指導をいただく機会を設けた。一方、我が国で廃石膏ボードを用いたリサイクル事業に取り組む事例の調査を目的に、廃石膏ボードの回収、リサイクルを進めている民間企業に協力を仰ぎ、石膏ボードリサイクルにおけるビジネスモデルの調査を行った。

### 3. 研究結果と考察

#### 3.1 セッコウ中不純物の存在状態の評価・分析技術の開発

##### 3.1.1 ガスクロマトグラフを用いたセッコウ中フッ素化合物量の評価

10%塩酸に模擬化学セッコウ試料を添加し、クロロトリメチルシランを用いて液中のフッ化物イオンをフルオロトリメチルシランに変換した後、トルエン中に抽出されたフルオロトリメチルシラン量をガスクロマトグラフで評価した。図 4 に、セッコウ試料中に添加したフッ化物イオン量に対するトルエン中に添加した n-ペンタンに対するフルオロトリメチルシランのピーク強度比を示す。図には、セッコウ中にフッ化物としてフッ化ナトリウム、フッ化カルシウム、ケイフッ化ナトリウムをそれぞれ添加して検討した結果を示す。図より、いずれのフッ化物を添加した場合も、セッコウ中のフッ化物イオン含有量が 1000 mg/kg 程度まで良好な直線性を示していることがわかる。以上の結果より、塩酸溶解-ガスクロマトグラフ分析法により、セッコウ中のフッ素化合物の定量が可能であると期待される。

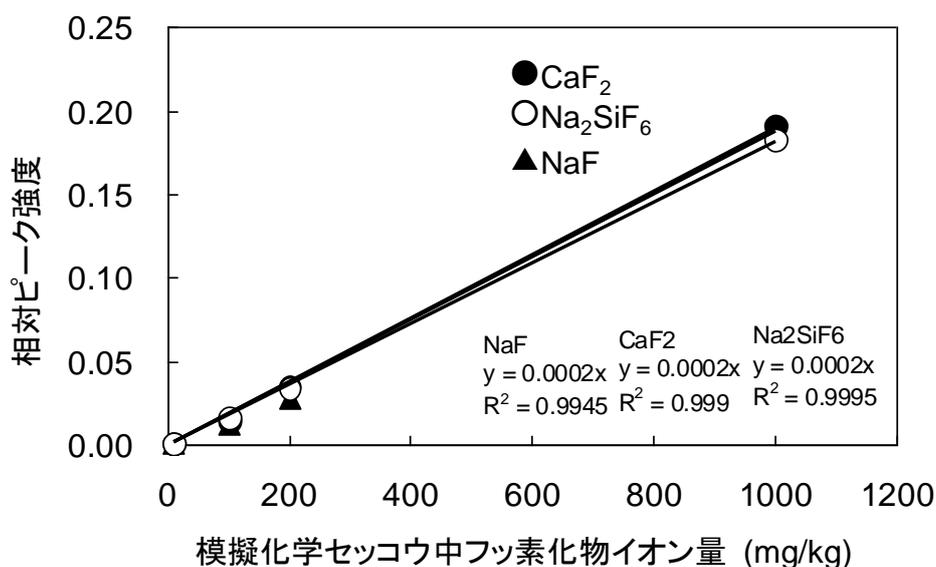


図 4 塩酸溶解-ガスクロマトグラフ分析法による、模擬化学セッコウ中フッ化物イオン量評価結果

### 3.1.2 オンサイトモニタリングを指向した、セッコウ中フッ素化合物の簡易分析技術の開発

図 5 に陽イオンおよび陰イオン交換樹脂を浸漬させた蒸留水中にセッコウ試料を添加して、5分間振盪した試料、およびイオン交換樹脂を浸漬していない試料の外観を示す。図より、イオン交換樹脂を用いることにより、セッコウ試料を短時間で溶解させることができることがわかる。



図 5 イオン交換樹脂を浸漬した蒸留水へのセッコウの溶解性  
左: イオン交換樹脂浸漬 右: 蒸留水のみ

これは、図 6 に示すようにセッコウの溶解平衡において、右辺のカルシウムイオンおよび硫酸イオンをイオン交換樹脂によってトラップすることにより平衡を右に移動させ、セッコウの溶解を促進させることができるためである。

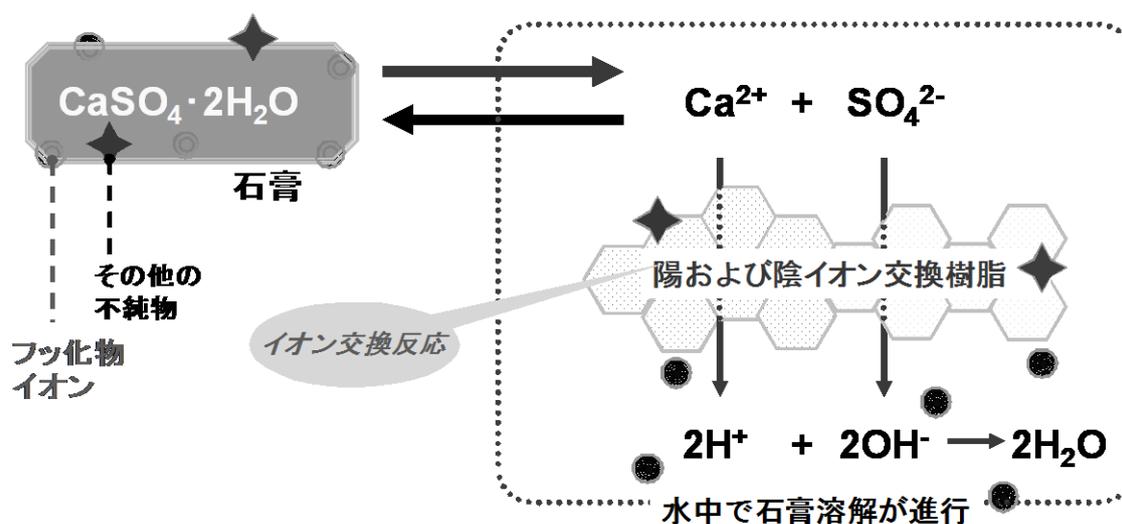


図 6 イオン交換樹脂を用いたセッコウの溶解機構の模式図

その際、セッコウ中に含まれるフッ化物イオンを溶液中に残存させることができれば、共存イオンが存在しない環境下で液中のフッ化物イオンを簡便な吸光度法などで測定できると期待される。そこで、フッ化物イオンにカルシウムイオン、硫酸イオンを共存させた溶液を 20 mL 調製し、イオン交換樹脂を 0.5 g 添加して種々の時間振とう後、それらイオンの残存量を評価した。結果を図 7 に示す。図より、振とう開始後 5 分後には、溶液中のカルシウムおよび硫酸イオンは 50% 以上分離されるが、フッ化物イオンの濃度は大きく変動しないことがわかった。

この結果より、イオン交換樹脂を用いたセッコウの溶解時間は 5 分間に設定した。

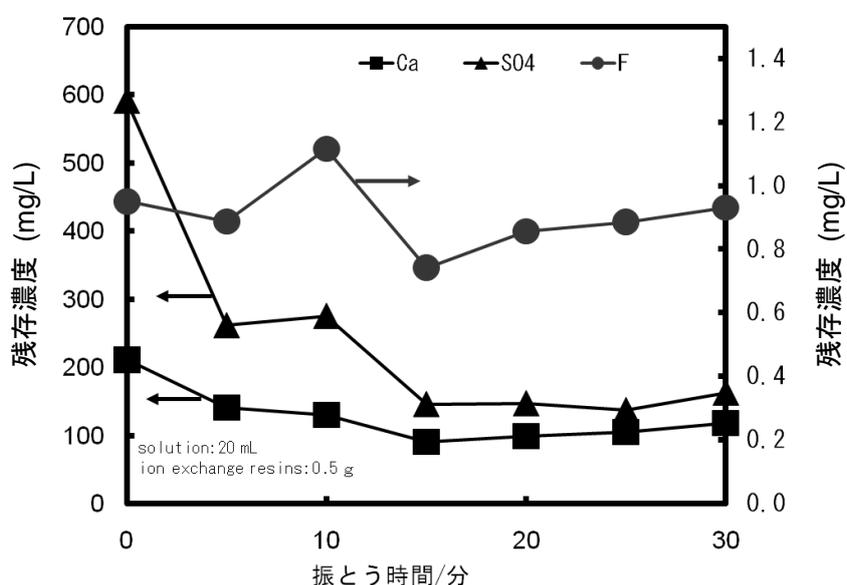


図 7 陽イオンおよび陰イオン交換樹脂による溶液中のフッ化物イオンの分離効率評価結果

化学セッコウに種々の量のフッ化ナトリウムを添加して乳鉢で均一に混合して得られた試料を用いて、前節の方法で溶解させて均一な溶液とした。得られた溶液中に JIS K0101 に従ってアルフッソン溶液を添加してその吸光度を測定した。結果を図 6 に示す。図より、セッコウ中のフッ素化合物、よい直線性が得られていることが確認できた。同じ操作を 8 回行って繰り返し精度を評価した結果、物量が 1000 mg/kg まで極めて良好な直線性を示すことがわかった。この方法を用いて種々の化学セッコウ中のフッ素化合物量を評価した結果、高い精度で分析が可能であることがわかった。

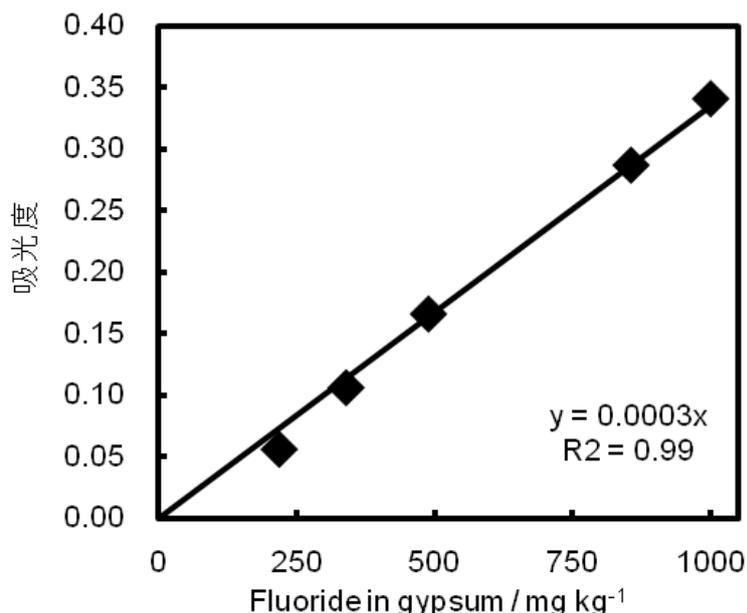


図8 フッ素化合物を種々の量添加したセッコウ中のフッ素濃度分析結果

本法を用いて化学セッコウ中のフッ化物イオン含有量を評価した。2種類の化学セッコウを用いてフッ素化合物の濃度を評価した。その際、化学セッコウに所定量のフッ化ナトリウムを添加して同様の評価を行うことにより、本法の有用性を評価した。結果を表1に示すが、高い回収率でセッコウ中のフッ素化合物を検出できたことから、オンサイト分析でセッコウ中のフッ素化合物含有量をある程度予測する手法として、本前処理技術は極めて有用であると期待される。

表1 イオン交換樹脂溶解・吸光光度法による、化学セッコウ中フッ化物イオン量の分析結果

| 試料      | フッ化物イオン含有量の測定値 (mg/kg) |     |        | 回収率*(%) |
|---------|------------------------|-----|--------|---------|
|         | セッコウ                   | 添加量 | 添加後含有量 |         |
| 化学セッコウ1 | 193                    | 208 | 381    | 95      |
| 化学セッコウ2 | 2094                   | 995 | 2802   | 91      |

\*{(添加後含有量)/(セッコウの含有量)+(添加量)}×100 で算出

そこで、アルフッソによるフッ化物イオン分析に代えて、環境水中の各種成分の簡易分析法として広く用いられているパックテスト®を用いて同様の分析を試みた。分析はパックテストで採取、発色させた溶液の吸光度を簡便に分析できる可搬型装置であるデジタルパックテストを用いた。

結果、図9のように比較的良好な直線性を得ることができた。

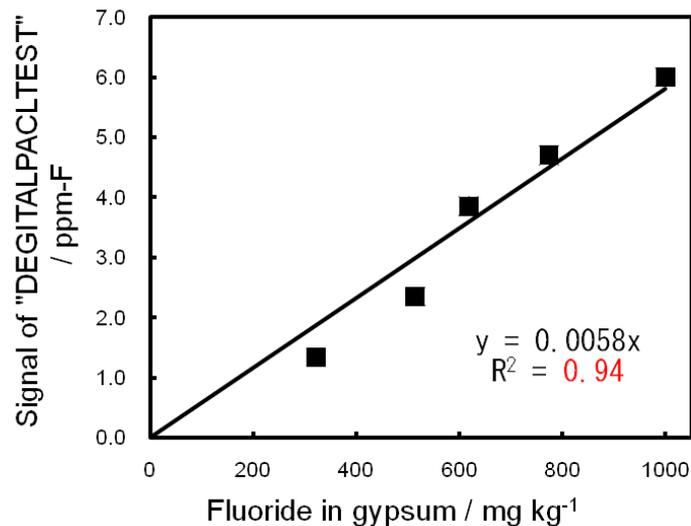


図9 デジタルパックテストを用いたセッコウ中フッ素化合物含有量の評価試験結果

以上の結果より、イオン交換樹脂を用いた前処理技術を導入することにより、極めて簡便な手法を用いてセッコウ中のフッ素化合物量を評価できることが明らかとなった。

通常、公定分析法によるセッコウ中フッ素化合物含有量の評価は、専門の分析機関にサンプルを送付し、おおむね10日後に結果が返送される。この結果は証明書として公的に使用できる正確さと精度を有するものの、日々廃石膏ボードを回収する現場ですべての試料に対してこの手法を導入することは費用面でも時間ロス面の面でも極めて困難であると言える。それに対して本手法は公的に証明を受けるものではないが、それに近い正確さを有するデータをわずか30分ほどで得ることができる。日々の業務においては、出荷されるロットごとに本手法のような簡易分析法で比較的正確なデータを取得し、定期的に外部機関による公定分析によってそのデータの信憑性を高めることができれば、廃石膏ボードを安心、安全に流通させるツールとなるものと考えられる。

### 3.1.3 セッコウ中ヒ素化合物の簡易分析技術の開発

セッコウ中のヒ素化合物を前節の手法で溶解させると、陰イオンのヒ酸イオンあるいは亜ヒ酸イオンとして溶液中に残存させることになる。陰イオン交換樹脂を用いると硫酸イオンとヒ酸イオンの両者が取り込まれる可能性が危惧される。そこで、セッコウ中のヒ素化合物の分析のために、図10に示すように陽イオン交換樹脂のみを用いて石膏の溶解を試みた。ここでセッコウ中のカルシウムイ

オンはイオン交換樹脂にトラップされることでセッコウの溶解が促進されるが、硫酸イオンは溶液中に残存し、液性は酸性にシフトする。しかし、ヒ素化合物の分析で用いられるモリブデンブルー法では、溶液を硫酸酸性にする必要があることから、このことはかえってヒ素化合物の分析を容易にすると期待される。

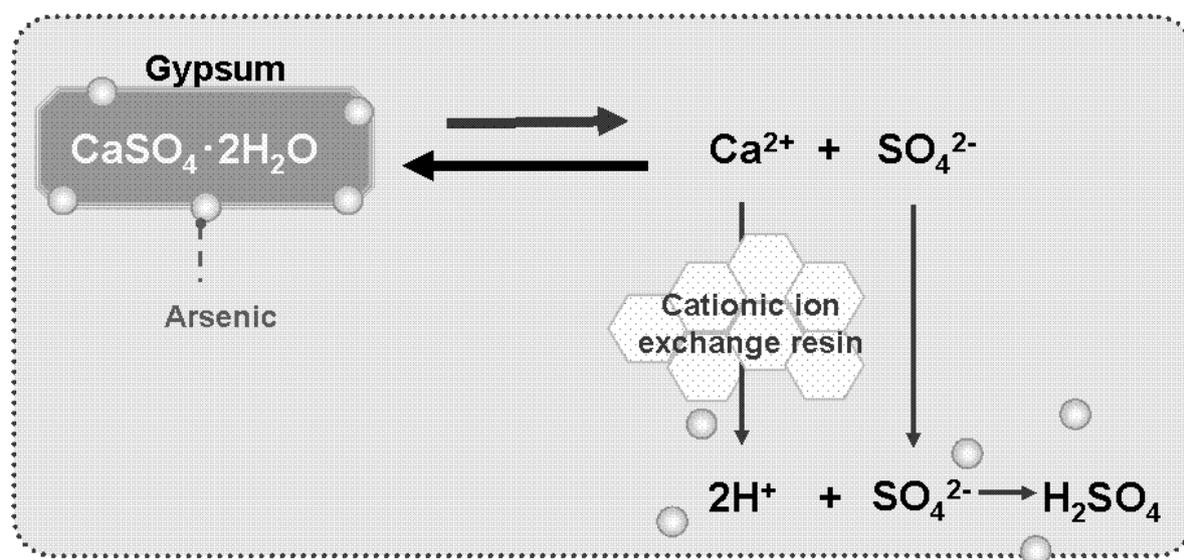


図 10 陽イオン交換樹脂によるセッコウの溶解プロセスを用いたヒ素の分離プロセスの概念図

その際、セッコウ中に含まれるヒ酸イオンを溶液中に残存させることができれば、共存イオンが存在しない環境下で液中ヒ酸イオンを簡便な吸光光度法などで測定できると期待される。そこで、ヒ酸イオンを含む溶液を 20 mL 調製し、イオン交換樹脂を 0.5 g 添加して種々の時間振とう後、ヒ酸イオンの残存量を評価した。結果を図 11 に示す。図より、ヒ酸イオンはほぼ定量的に溶液中に残存することが確認できた。セッコウ中のフッ素化合物分析の際に行った操作と同様に、水 20 mL に種々の量の陽イオン交換樹脂のみを用いて 5 分間振盪させることにより、セッコウの溶解量を調べた。結果を図 12 に示すが、イオン交換樹脂量に比例して溶解できるセッコウの量が増加することが確認できた。この手法を用いて陽イオン交換樹脂を添加した水にセッコウを加えた結果を図 13 に示す。図に示すように、5 分後にはセッコウを溶解できることがわかった。

種々の量のヒ酸ナトリウムを添加したセッコウを用いて、本法の適用可能性を評価した。結果、図 14 に示すように、イオン交換樹脂による溶解後に得られた溶液中のヒ素濃度を簡便なパックテスト

で評価することにより、セッコウ中のヒ素含有量を見積もることができることが見いだされた。

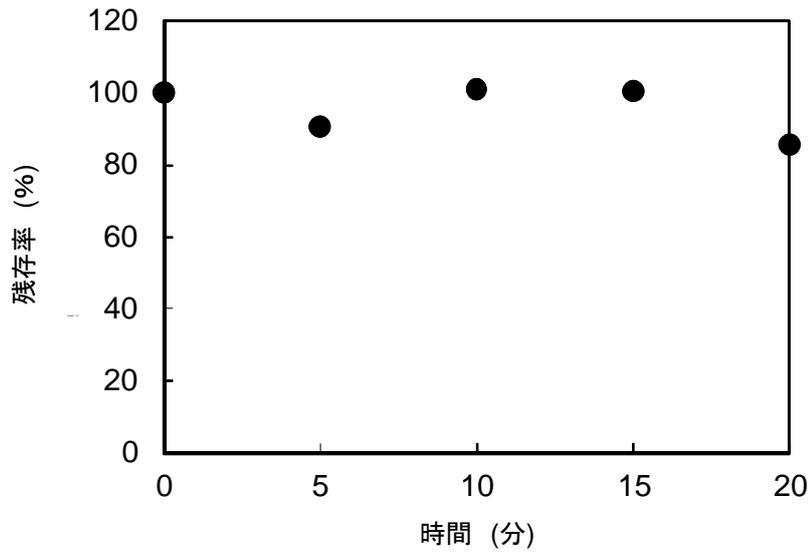


図 11 陽イオン交換樹脂による溶液中のヒ酸イオンの残存率評価結果

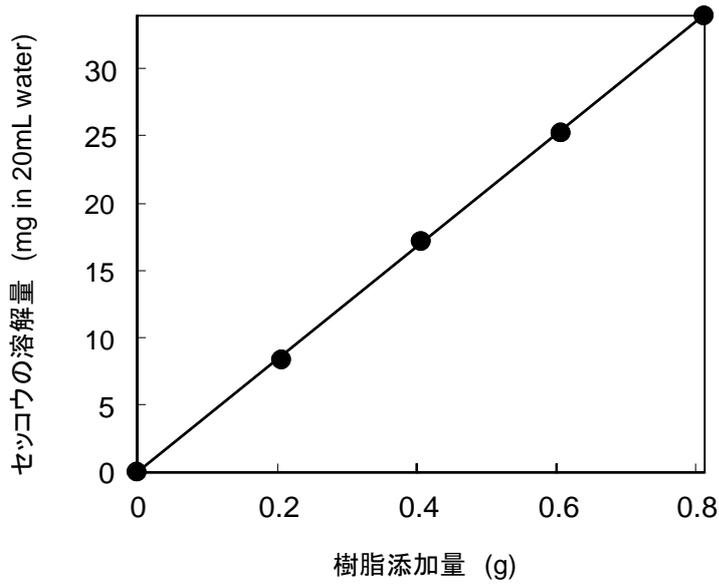


図 12 陽イオン交換樹脂によるセッコウの溶解量評価結果



図 13 陽イオン交換樹脂によるセッコウの溶解挙動(左:イオン交換樹脂なし, 右:あり)

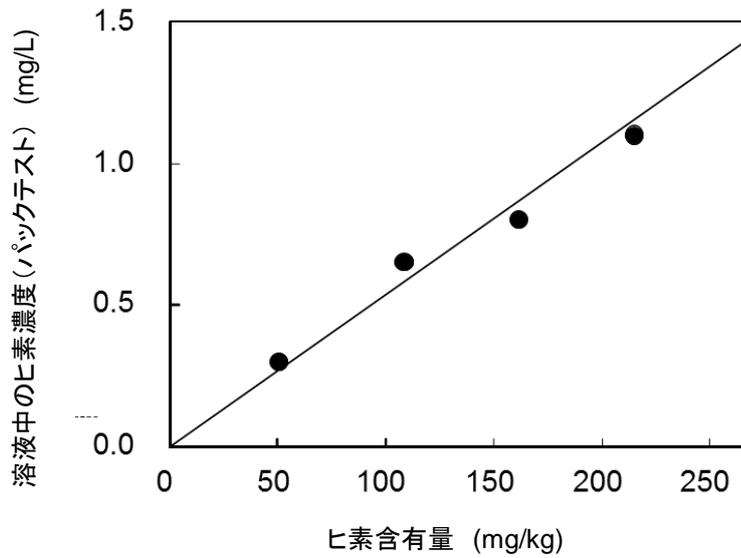


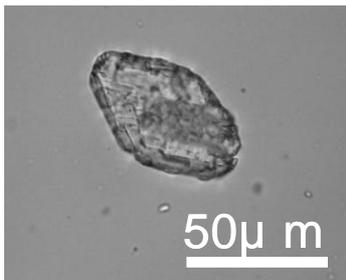
図 14 種々の量のヒ素化合物を添加したセッコウを用いた分析結果

### 3.2. 各種化学セッコウの溶解挙動と不純物

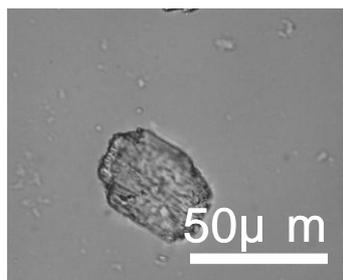
図 15 に本実験で用いた化学セッコウの光学顕微鏡写真を示す。本実験では、排煙脱硫セッコウ、リン酸セッコウを用い、比較のため、化学試薬を溶解させた溶液から晶析させたセッコウ(合成セッコウ)

#### 排煙脱硫セッコウ

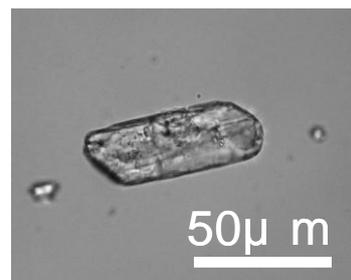
試料 A



B

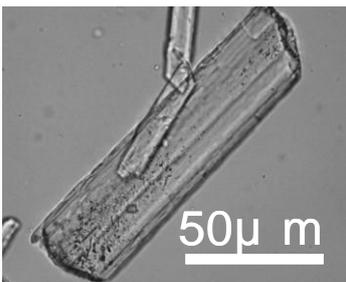


C

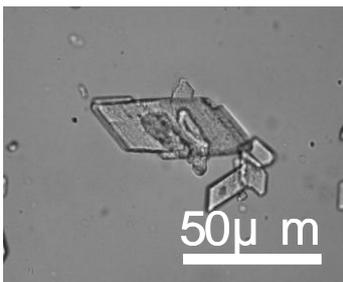


#### リン酸セッコウ

試料 D



E



#### 合成セッコウ

F

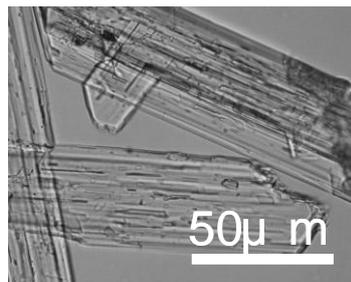


図 15 実験で用いた化学セッコウの粒子径状

コウ)も併せて用いた。

試料 A について、水中に溶出したカルシウムおよび硫酸イオン濃度の経時変化を図 16 に示す。図より、セッコウ試料は 5 分間の間で速やかに溶解していることがわかる。この結果を基に、板状粒子の均一溶解に関するモデル式であるコアモデルを用いて溶解速度を評価した。コアモデル

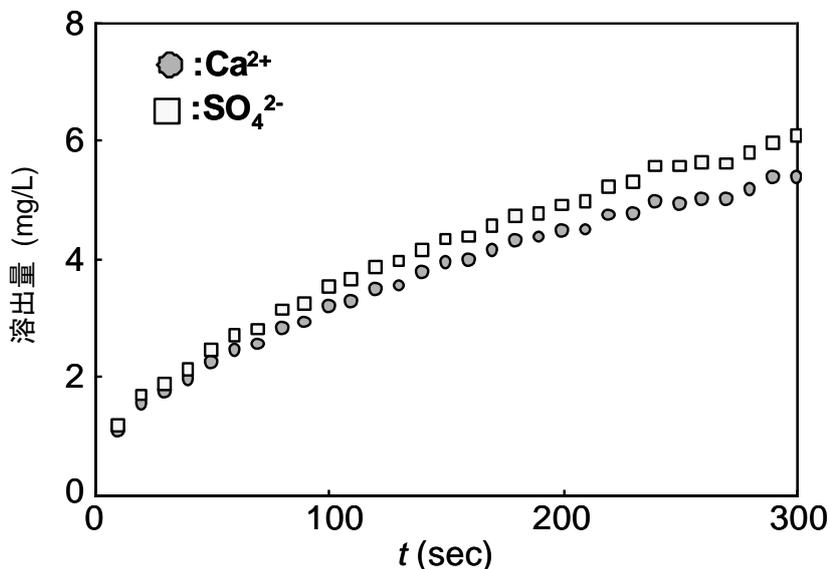


図 16 化学セッコウ(試料 A)から溶出したカルシウムおよび硫酸イオン量の経時変化

は、各イオンの溶出量の分率  $X$  が時間  $t$  に関して(1)式の関係を示すとするモデル式である。

$$[1-(1-X)^{1/2}]^2 = kt \quad (1)$$

このモデル式を用いて、図 16 のデータを変換すると、図 17 に示すような直線関係が得られ、溶解速度  $k$  を求めることができた。同様に他のセッコウ試料についても溶解速度  $k$  を求めた結果を図 18 に示す。図には図 15 で示したセッコウの粒子径状も併せて示している。化学セッコウの溶解速度には、10 倍近い違いが見られることがわかった。また図より、化学セッコウの溶解速度は、セッコウの粒子径状が板状になるほど高く、球状になるほど低いことが見いだされた。

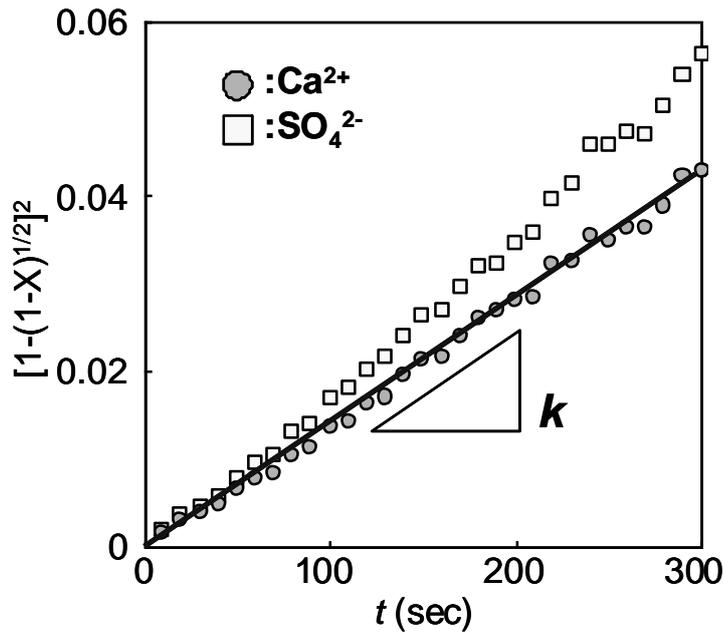


図 17 コアモデル式を用いた化学セッコウ(試料 A)の溶解速度  $k$  の評価

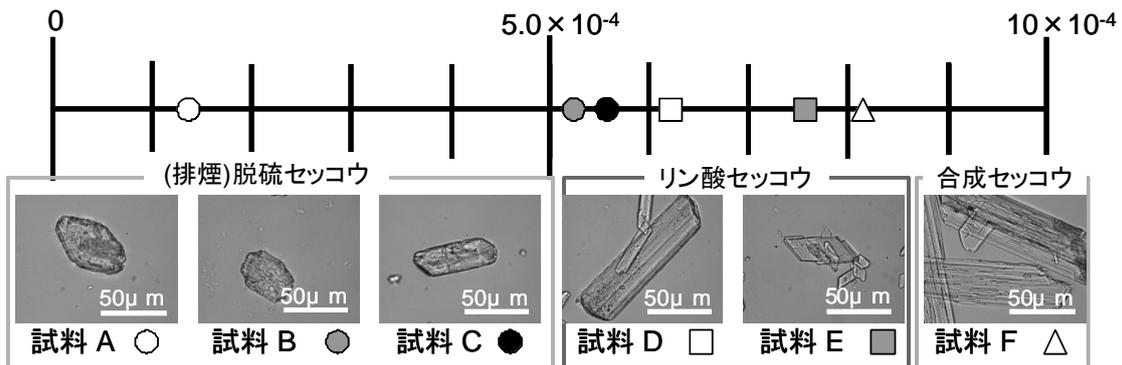


図 18 種々の化学セッコウの溶解速度

先に示したガスクロマトグラフによる分析結果より、試料 A のフッ化物含有量が試料 B および C よりも低いことから、粒子の形状と不純物含有量との間に何らかの関連があるものと考えられる。

### 3.3. 海外の石膏ボードリサイクル等に関する調査

#### 3.3.1 セッコウの品質管理と不純物

Knauf Intenational GmbH のセッコウ部門である Knauf Gips KG 社のプロジェクトマネージャーである Harald Schmitt 氏より、セッコウの品質管理と不純物の関係に関する技術開発の動向に関する情報提供を受けた。石膏ボードの原料として、我が国では火力発電の排煙排脱プロセスで発

生する排脱セッコウを大量に原料として用いているが、Knauf 社が排脱セッコウを石膏ボードの原料としたのは 1977 年であり、その際にすでに排脱セッコウを石膏ボードの原料としていた日本の排煙排脱プロセスを大いに参考にしたとのことであった。

我が国で石膏ボードの原料として排脱セッコウを用いる際、発電所から供給されてくるセッコウを原料として受け入れるが、ドイツの事例では排石膏ボードメーカーサイドが提案した排脱プロセス技術を電力会社に提供することにより、石膏ボードの原料として適した品質を有するセッコウを供給できる工夫を行っていることが示された。その際、脱硫プロセスの操業条件の不都合により、燃料の燃焼灰がセッコウに含まれることが考えられるが、このような不純物は石膏ボードの品質低下につながることから、セッコウ中の不純物と粒子形状に関する調査が行われている。結果、不純物がセッコウに混入すると、セッコウ粒子の形状が大きく変化することが明らかとなり、原料の粒度分布測定でセッコウの品質制御のみならず排脱プロセスの操業条件を評価できる技術を開発している<sup>13)</sup>ことが報告された。

本研究で、セッコウの粒子形状に着目した不純物制御技術の開発を行っているが、ヨーロッパで行われているこのような取り組みは、我々の研究にも大いに参考になる事例であるとの印象を受けた。

セッコウ粒子形状の制御については、BK Giulini GmbH 社の Thomas Staffel 氏より欧米で行われている技術が紹介された。ここでは、ある種のリン酸塩を添加することにより、セッコウ粒子の成長を制御し、石膏ボードの特性を制御できる技術であり、アメリカの USG 社が特許を有しているが、その薬剤を世界的なリン酸塩メーカーである BK Giulini GmbH が大量に供給しているとのことであった。本研究で進めているセッコウの不純物制御において、このようなセッコウ粒子の成長を制御できる技術は何らかのヒントを与えるものと期待される。

一方、セッコウの化学的な品質について、Bundesverband der Gipsindustrie e.V 社の Hans-Jörg Kersten 氏より説明を受けた。ヨーロッパ石膏工業会(Association of European Gypsum Industries)では、排脱セッコウについて、表 2 に示す品質基準を定めている。

表 2 ヨーロッパでの排脱セッコウに関する品質基準

|  | 基準値       | 単位  |
|--|-----------|-----|
| 水分量  | 10 未満     | wt% |
| CaSO <sub>4</sub> ・2H <sub>2</sub> O 含有量   | 95 を超えること | wt% |
| 水溶性マグネシウム塩含有量                              | 0.10 未満   | wt% |
| 水溶性ナトリウム塩含有量                               | 0.06 未満   | wt% |
| 塩化物含有量                                     | 0.01 未満   | wt% |
| CaSO <sub>4</sub> ・1/2H <sub>2</sub> O 含有量 | 0.50 未満   | wt% |
| pH 値                                       | 5-9       |     |
| 色 (L*a*b*法)                                | 白色であること   |     |
| 臭気   | 自然であること   |     |
| 毒性   | 毒性のないこと   |     |

この基準は石膏ボードの原料として排脱セッコウを用いることを前提としており、本研究でターゲットとするような建設汚泥のリサイクルのような土壌改良用途に用いることを考えたものではない。そのため、我が国でリサイクルセッコウの品質を考える時には、新たな基準作りが必要であるとの結論を得た。

### 3.3.2 EU の廃棄物管理と廃石膏ボードリサイクル

引き続き Hans-Jörg Kersten 氏より、ヨーロッパ、特にドイツにおける廃石膏ボードの現状について聞き取り調査を行った。ドイツでは、回収されたセッコウは付着したボード原紙を剥離せずにそのまま粉砕し、粉砕されたものの 75% は肥料などの土壌改良材としてリサイクルされ、廃棄物処分場にて最終処分しているという現状が紹介された。ドイツでは、各家庭で DIY として石膏ボードを利用することも多いが、それらのリサイクル率が 20% と低いとのことであった。一方、廃棄される石膏ボードの品質管理については、製品に印刷されている製造コード番号を用いた追跡を行うことができるが、リサイクルに要するコストが高価であり、それがリサイクルの最大の障害の一つであるとの認識が示された。

また、石膏ボードリサイクルの事例として、セッコウの破砕機を搭載した大型トレーラーを現場まで運び、オンサイトで廃石膏ボードを破砕し、粉末としてリサイクルする事業を行っている、デンマークの Gypsum Recycling International 社や、日本における中間処理業で利用できる装置を販売

しているドイツの Die Recyclinganlage der GFR 社の事例が紹介された。

一般的にヨーロッパ、特にドイツは「環境先進国」と言われ、我が国で開催される展示会では、この種のヨーロッパ発の技術がしばしば紹介されている。今後、石膏ボードについてもこの種の技術が紹介されることがあると考えられるが、今回紹介を受けた技術については、廃石膏ボードを路盤材等に適用することを念頭に置いた技術ではないことから、単にヨーロッパの技術を輸入することでリサイクルが促進されるとは言えないことを確認することができた。

一方、廃棄物として石膏ボードを考えた際の各種法基準について意見交換を行った。ヨーロッパにおいては廃棄物に対する法的規制は比較的厳しいとされているが、我が国で言うところの土壤汚染対策法に相当する規制については、ドイツが先行しているとのことであった。その際、例えば、工場用地では比較的基準は緩いが、子供の遊び場になっているような場所では、厳しい基準が定められているなど、適用場所に応じて安全性をランク付けし、それぞれ種々の規制値を設定していることが紹介された。その際、廃石膏ボードについては、天然セッコウと異なり、汚染物質が含まれている前提で危険性が定義されており、特に飲料水として使用される水源への汚染の可能性に対しては極めて厳しい規制を定めているという事であった。

また、廃棄物に対する規制値が地域によってまちまちであり、その値を統一する方向であることが紹介された。また、EU 加盟国全てに対してドイツのような土壤汚染に対する規制を定めることを求めているが、加盟国からの反対もあり、すぐに実現するとも言えない現状が報告された。

我が国では廃棄物をリサイクルして土壤に適応する際、土壤汚染対策法で画一的な基準が制定されているが、適用される場所によっては安全性を評価した段階的な基準設定を行うことも、リサイクル拡大につながる一つの手法になり得ると考えられる。

代表研究者らから、現在本研究で進めている研究内容について、そのアウトラインを紹介した。Knauf 社は中国にも幅広く事業を展開していることから、今後もこのような情報交換を行いながら、日本のみならず、アジア諸国の石膏ボードリサイクルに対して種々検討を進めていくことを確認した。



図 19 Knauf International GmbH および BK Giuliani GmbH で行った意見交換会の様子

### 3.3.3 韓国における浚渫汚泥リサイクルに関する課題の調査

韓国では李明博政権の元、大規模な開発事業が積極的に展開されている。その一つとして慶尚道、京畿道、忠清道、全羅道にある四大河川(洛東江、漢江、錦江、榮山江)の浚渫汚泥のリサイクル工事を大規模に行う事業が昨年初旬からスタートしている。これは合計 5 億 6 千万立米の浚渫土砂および汚泥のリサイクルを対象としており、全体の 55% に及ぶ汚泥の有効利用法の一つとして、本研究で対象となっている固化材を用いた再生土へのリサイクルに関心が集まっている。そのため、韓国の多くの民間企業が日本の民間企業に積極的な技術移転のオファーを行っているところである。また、日本の固化材を無許可でコピーした製品も韓国国内で紹介されている。

国立富山高専および慶熙大学は、これまでの連携を活かして韓国の環境ベンチャーである OHK 社に対して本研究の共同研究者である(株)ETS ジャパンが固化材に関する技術指導を行うことで一昨年 7 月に覚書き文書を締結している。これは、本研究事業によって安心・安全な建設汚

泥リサイクル技術を東アジア諸国と共有するネットワークが形成されたことを意味し、本研究の大きな成果の一つである。

このバックボーンを活用し、昨年 3 月に韓国の環境府が公募した韓国四大河川の浚渫汚泥リサイクルに関する技術提案に関して、OHK 社と慶熙大学等 6 社が共同提案した内容が採択され、本研究で構築された手法等が韓国でも展開される可能性が高まっている。また、下水配管に伴う軟弱地盤の固化材の需要も高いことから、建設汚泥や軟弱地盤の固化材による土壌汚染のリスクの低減は急務であると言える。表 3 に日本および韓国の土壌汚染基準の比較を示す。韓国の土壌環境基準には「溶出量基準」は存在せず、「含有量基準」のみが存在する。特にフッ素化合物

表 3 日本および韓国の土壌汚染基準

|    | 日本         |           | 韓国(含有量基準, mg/kg) |        |        |
|----|------------|-----------|------------------|--------|--------|
|    | 含有量(mg/kg) | 溶出量(mg/L) | 第 1 地域           | 第 2 地域 | 第 3 地域 |
| F  | 4000 以下    | 0.8 以下    | 400 以下           | 400 以下 | 800 以下 |
| Cd | 150 以下     | 0.01 以下   | 4 以下             | 10 以下  | 60 以下  |
| Pb | 150 以下     | 0.01 以下   | 200 以下           | 400 以下 | 700 以下 |
| As | 150 以下     | 0.01 以下   | 25 以下            | 50 以下  | 500 以下 |

第 1 地域：水田および学校用地など、第 2 地域：森林など、第 3 地域：路盤等

やヒ素化合物については、含有量基準が我が国より一桁前後基準が厳しいことから、セッコウを用いて建設汚泥や軟弱地盤の固化材を製造する際には、セッコウ中に含まれるフッ素化合物やヒ素化合物量の把握は必須であると考えられる。そのため、先に述べたオンサイト分析装置は、韓国におけるセッコウを用いた固化材の環境影響評価法として有用であると期待される。

このことを踏まえ、今年 2 月 28 日に韓国慶熙大学において、河川等の浚渫汚泥のリサイクルに関する韓日国際シンポジウム(International Symposium for Dredged Sediment Recycle in Korea and Japan)を開催し、情報の共有を行った。

### 3.3.4. 北アフリカ諸国におけるセッコウに起因する環境問題

本研究の成果を、チュニジア・ハマメットで一昨年 11 月に開催された「チュニジア-日本 文化・科学・技術学術会議 第 10 回記念大会(TJASSST10)」などで発表した。北アフリカ諸国は、豊富なり

ン鉱石を埋蔵しており、我が国もリン資源の多くをモロッコをはじめとする北アフリカ諸国から輸入している。これら北アフリカ諸国ではリン鉱石を採掘、輸出しているだけでなく、リン鉱石からリン酸やリン酸塩を製造し、それを肥料や化学製品の原料として輸出している。リン鉱石からリン酸を製造する際には、製造されるリン酸量を上回るセッコウ(リン酸セッコウ)が副生する。前述の通りリン酸セッコウにはリン鉱石起源のフッ素化合物が含有するが、これらの国々ではセッコウに起因する環境インパクトの評価およびその対策技術の開発に関心が高まっている。近年、モロッコやチュニジアなどの北アフリカ諸国に加え、リン鉱石を有する中東諸国から研究論文の提供等を求められる機会に接してきた。

一昨年 11 月の発表の後、チュニジアの研究機関との打合せを持つことができたが、そのなかで、セッコウに起因する環境インパクトの評価および制御技術について今後積極的にセミナー開催等を通して情報交換を行うことで基本的に合意した。その際、北アフリカ諸国と日本との交流の窓口の機能を果たしている筑波大学・大学間共同利用施設および筑波大学北アフリカ研究センター (ARENA) の協力、助言をいただきながら進めていくことになった。

本研究の共同研究者の丁子哲治(国立富山高専)は筑波大学 ARENA の客員研究員の立場にあり、代表研究者の袋布も昨年 4 月から ARENA の客員研究員を仰せつかることとなっていることから、本研究事業の成果の北アフリカ諸国との共有および今後の展開がスムーズに進むものと期待されるが、今年初頭に発生したチュニジアに始まる北アフリカ諸国の政変崩壊の影響で、現在はこの取り組みは停止せざるを得ない状況にある。チュニジアの政変が落ち着きを取り戻した後、この取り組みをさらに推進していきたいと考えている。

## **3.2. 石膏ボードリサイクルの事例調査**

### **3.2.1 ビジネスモデルの調査**

また、我が国で廃石膏ボードを用いた優れたリサイクル事例については、地域の産業、中間処理業、公設試験研究機関、大学等の産学官連携により、いくつかの商品を上市し、高い評価を受けている北海道札幌市の事例に着目し、ビジネスモデルの調査を行った。

地球環境への影響が大きい建設廃棄物リサイクル企業には、当然のごとく、倫理的企業活動が要求される。しかしながら企業である以上、このような倫理的企業活動も収益に貢献しなければその持続的活動が困難となる。全国で展開されている廃石膏ボードリサイクルにおいて、そのリサイクルがビジネスベースで成功していると考えられる事例を選び、その企業の取り組み形態を聞き取り調査し、この種の事業が成功する因子を倫理的企業成長モデルの立場から検討した。

倫理的企業活動の実践には倫理的企業文化の浸透が必要不可欠である。マーフィーは、倫理的企業活動を実践するための手段を、「倫理的企業政策の組織化」と「その実行」に区分している。そのうち、「倫理的企業政策の組織化」としては、企業理念・企業行動基準などフォーマルな組織(構造)を指摘しており、「その実行」としては、経営者の役割などインフォーマルな組織(企業文化)を指摘している<sup>18)</sup>。そのため、企業倫理の実践には倫理的企業文化の浸透が必要不可欠である。一方、シャインによれば、企業文化とは集団として獲得された価値観・信念・仮定であり、企業が繁栄を続けるに連れて、それらが共有され、当然視されるようになったものである。中でも企業文化の本質は、学習され共有された暗黙の仮定であり、社員はその暗黙の仮定を基にして、毎日の行動を行っている<sup>19)</sup>。企業文化の最も暗黙的で本質的なものは、無意識の当たり前の信念・認識・思考および感情という行動の背後に潜む基本的仮定である。この基本的仮定は、質問調査票などでは評価できず、評価するには実際に現地に赴くインタビュー調査などが必要となる。本研究でも実際に企業に訪問して経営者や社員の方々にインタビューを行い、倫理的企業文化の浸透した企業が企業成長を達成する企業成長モデル、換言すれば、企業倫理による企業成長モデルを示すことを試みた。

共同研究者の宮重は、製薬企業において、患者を助けようという倫理的企業文化が浸透しているならば、このような製薬企業は患者を助けるための画期的な新薬を研究開発しようとする企業活動を実践することになり、その結果、これまでに存在しなかったような画期的な新薬が研究開発され、新たな市場を創造のうえ企業成長を達成できることを検証している<sup>20)</sup>。この理論を援用すれば、建設廃棄物リサイクル企業においても、環境への貢献という倫理的企業文化が浸透しているならば、このような建設廃棄物リサイクル企業は環境に貢献する画期的な製品を研究開発しようとする

企業活動を実践することになり、その結果、これまでに存在しなかったような画期的な製品が研究開発され、新たな市場を創造のうえ企業成長を達成できるようになるはずである。

そこで、北海道内で展開されている事例から、この種のモデルの検討を試みた。

札幌市を中心とする廃棄物収集処分企業(一般・産業廃棄物処理企業)A社の社長のリーダーシップのもと、環境への貢献を企業理念とした資源再生企業への転換を目指している企業がある。同社は事業領域を廃棄物処分という事業内容ではなく、環境への貢献という企業理念に基づいて決定しており、10年後には環境へ貢献する製品を製造するメーカーになっている可能性すらある企業である。同社では環境への貢献という倫理的企業理念を倫理的企業文化として浸透させるために、全従業員にクルドカードを配布のうえ毎日の朝礼で読み上げる活動を2年間に渡って実施している。その他にも、従業員満足を目指した企業活動や、同社の企業方針を知ってもらうための広報活動、更には同社を育ててくれた地域社会への寄付活動などにも積極的に取り組んでいる。一方の企業B社は障害者雇用に積極的なチョークメーカーとして知られる企業である。北海道の工場においても多くの障害者を雇用しているが、今ある彼らの能力で作業が出来るよう、そのレベルに応じて工程を組み直すことにより非常に高い生産性を達成している。同社は企業の収益に貢献する彼らの優れた能力を活用しつつ企業活動を展開のうえ十分な収益を得て、黒字経営を維持しているのである。

A社の社長が環境への貢献という企業理念の達成のために、石膏廃ボードの100%リサイクルを目指して100社を超える企業を訪ね歩く中で、B社の工場長と出会い、環境への貢献という理念に共感した両社が石膏廃ボードを利用したラインパウダーの研究開発に成功した。この環境に貢献する新製品をB社が築き上げた流通経路を通じて販売することによって、両社は収益を得て企業成長を達成することになったのである。特に白線引きのラインパウダーの販売において、大きな取引先となる教育機関に販路を拡大するためには、教育機関がすでに支払い口座を持っている取引先に商品を卸す必要があるが、B社はチョーク販売等を通してすでに販路を確立していたため、流通面での課題も容易に解決することができたのである。

その他の事例においても、環境への貢献という理念に共感する企業が企業ネットワークを形成

して新製品を研究開発したものであり、このような企業ネットワークによる新製品の研究開発においては、問題を解決する技術だけではなく、倫理的理念を共有できることが重要になることを示すことができた。

平成 20 年に本研究課題が採択された際には、回収された廃石膏ボードを全国規模で建設固化材としてリサイクル、利用することを想定し、電子マニフェストに先に述べたオンサイト分析で得られたデータを付与することをイメージしていた。しかし、廃石膏ボードリサイクルを積極的に推進している事業者と種々の情報を共有する中で、以下の事実が明らかとなった。廃石膏ボードを原料としたリサイクル製品は、基本的に安価なものが多いため、多大な輸送コストをかけて広範囲に流通させるのに適さない。そのため、地域の企業が組織体を形成して産学官の共同研究等で得られた研究成果、開発品をベースに新規産業を創出している事例が多い。このことより、たとえばある地方である製品が廃石膏ボードを原料として生産されたとしても、それと競合する製品が他の地方から流れ込んでくる可能性は低いことを意味している。これらのことから、廃石膏ボードのみならず廃棄物を原料としたリサイクル製品を事業として展開するためには、図 20 に示すような地域内で「地産地消」によって資源が循環できるローカルなビジネスモデルを構築し、その組織体の中でセッコウ中の不純物やセッコウからのフッ素化合物の溶出量などの分析結果を流通させる仕組みを組み込むことができると考えられる。一方、地域で構築された技術およびビジネスモデルをそれぞれの地方の特性に合わせて共有、移転していく「オープン型」のイノベーションモデルを展開することが、我が国全体の廃棄物の安心・安全リサイクルにつながるものと期待される。



図 20 「地産地消」と「オープン技術共有」による  
 廃石膏ボードリサイクルネットワークのイメージ図

### 3.2.2 オンサイト分析装置のフィールドテスト

前節で開発，試作したセッコウ中フッ素化合物含有量の評価装置を用いて，廃石膏ボードリサイクルを実際に行っている全国の事業所を訪問し，本技術の有用性および今後の開発の方向性などを議論，共有した。



図 21 事業所における分析装置のデモ，意見交換の様子

廃石膏ボードは回収後、図 22 に示すように破砕機によってボード原紙とセッコウ粉末に分離され、その後さまざまな用途に利用されている。ボード原紙は再生紙の原料としてリサイクルが可能であるため、破砕機メーカーは分離されるボード原紙からセッコウをできるだけ分離する機構を開

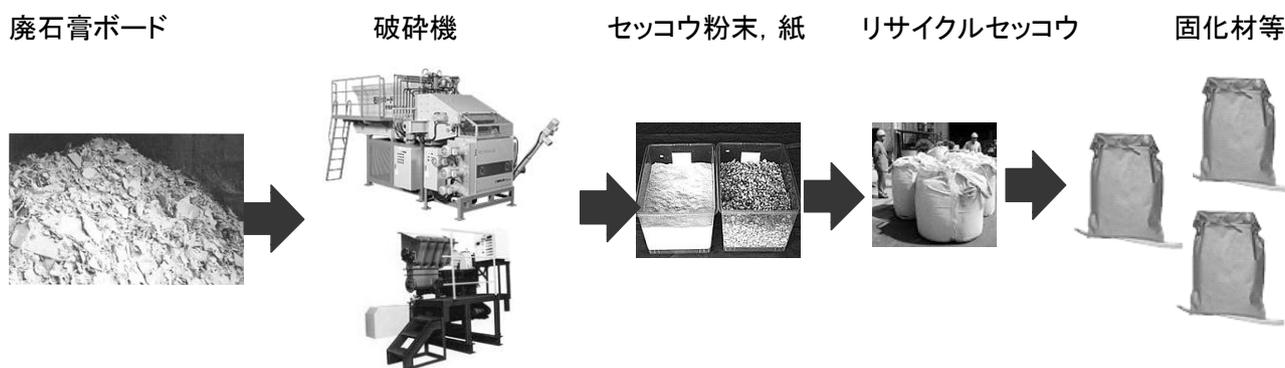


図 22 回収された廃石膏ボードの再原料化プロセスの模式図

発、導入しているが、ユーザーはどのメーカーの製品を使うにせよ、破砕機によって廃石膏ボードを破砕・分離する工程は避けて通れない工程と言える。

ユーザーとの意見交換の中で、廃石膏ボードを建設汚泥や土壌の固化材としてリサイクルする際に常に評価したい事項は、「セッコウ中の不純物の含有量」ではなく、破砕機で破砕後に得られるセッコウからの「不純物の溶出量」が土壌環境基準に適合しているかどうかであり、この情報を短時間かつ簡便に評価できる方法があれば、製品の安全性の担保につながるために広く利用されたとの指摘を受けた。また、破砕機から回収されたセッコウ粉末に添加剤を添加してフッ素化合物等の溶出抑制を行う際には、その前後で抑制効果を簡便に評価できる手法の開発が渴望されていることを共有した。

一方、一部の廃石膏ボードにはヒ素などが含有していることが指摘されている。これらの石膏ボードは生産地、生産時期が特定されているため、回収される廃石膏ボードに印刷されている商品名等でその判別が行われているが、解体工事時に混入する破片に対しての対策を行うためには、セッコウ中に含まれるヒ素化合物の含有量を評価できる技術が求められていることもあわせて共有することができた。この成果をもとに、平成 22 年度にはセッコウ中のヒ素化合物の簡易分析技術の

開発を行うことができた。

## 4. アウトリーチ活動・その他

### 4.1. 研究ワークショップ

#### 4.1.1 平成 20 年度のワークショップ

平成 21 年 2 月 24 日に、富山市のゴルフアートとやまにおいて、「第 4 回廃棄物の循環利用に関するワークショップ ―建設廃棄物の安心・安全な循環利用を目指す地域連携の姿とは―」を開催した。会場には、冬の北陸地方での開催という条件にもかかわらず、全国から 80 名近い参加者があり、廃石膏ボードリサイクルに対する関心の高さを実感させられるものであった。

##### 1) 講演

開会に先立ち、富山県生活環境文化政策課環境政策課廃棄物対策班主幹の坂森重治氏より挨拶があり、本研究を立ち上げるきっかけともなった、富山県が NPO 法人エコテクノロジー研究会に委託して行ってきた、県内企業の廃棄物削減アドバイザー事業や、富山県の建設廃棄物リサイクルに関する施策が紹介された。

講演(1)として、近年廃石膏ボードリサイクルで大きな社会的関心を集めている「硫化水素問題」について、埼玉県環境科学国際センター(平成 21 年 4 月より日本工業大学教授)の小野雄策氏より、「廃石膏ボードの埋立における硫化水素発生とその防止技術」に関する講演があった。講演では、廃石膏ボードを水が浸るようなところ、かつ嫌氣的条件に長期間おくことによって硫酸還元菌の作用によって硫化水素の発生する可能性があること、その対策技術として、鉄化合物の添加、鉄系の土壌中に埋入することにより硫化物イオンを硫化鉄として固定させ、硫化水素の発生を抑制できることが紹介された。また、土壌環境基準の立場で廃石膏ボードをみると、フッ素化合物の溶出が最大の問題点であることが紹介され、本研究でターゲットとしているフッ素化合物の評価・制御技術を廃石膏ボードリサイクルに組み込むことの重要性が改めて浮き彫りとなった。

講演(2)として、長岡市内で民間企業と廃石膏ボードを添加した固化材を用いて軟弱地盤の固化に取り組んでいる長岡工業高等専門学校の尾上篤生教授より、「汚泥のセメント/石灰改良に及

ぼす半水石膏添加の影響について」の講演があった。汚泥の固化・リサイクルにおいて、セッコウをそのまま使うのではなく、セメントや石灰を用いた固化材の添加剤として用いることも多い。尾上教授は、種々の条件で地盤固化効果を評価し、セッコウ添加が有用な条件についての調査を行った結果を示した。セッコウの利用用途によって求められるスペックは異なることから、どのような用途に廃石膏ボードが利用されるか、それを見越した物流の「しくみ」の検討が必須であることが見いだされたと思われる。

講演(3)として本研究のアウトラインについて、代表研究者である富山工業高等専門学校准教授の袋布昌幹が講演を行った。

休憩を挟み、具体的な廃石膏ボードリサイクルの事例紹介が2件行われた。

4.1.1 節で示した、北海道で産学官連携により廃石膏ボードリサイクル製品の実用化・製品化に成功している北清企業(株)取締役社長の大嶋武氏より、北海道地域で立ち上げている「北海道地区石膏リサイクル研究会」の活動や、廃石膏ボードを用いたグラウンドライン用粉末の開発等について、事例を交えた紹介が行われた。グラウンドラインについては、北海道に地盤を持つチョーク製造を行う企業との連携を核としており、地域に根ざした産業と連携した新しい環境ビジネスを立ち上げることの重要性を示す事例であると考えられる。

一方、大都市圏で廃石膏ボード回収・リサイクルを事業化している(株)タケエイ経営企画部グループ長代理の川口知司氏からは、同社が出資をしている(株)ギプロおよび(株)グリーンアローズホールディングスの事例を交えながら、廃石膏ボードリサイクルを本格的な事業として添加するためのビジネスモデルについて説明があった。中でも、回収した廃石膏ボードの品質を保証するため、分析・計量部門を社内に内製化すること、リサイクルしたセッコウを活用する企業にも出資社に加わってもらうことにより、リサイクル先の責任を明確にする仕組みなど、ビジネスとして廃棄物リサイクルに取り組む一つの方向性が示されていたと思われる。

## 2) 総合討論

総合討論は、本研究の共同研究者である、泥土リサイクル協会の野口真一が進行役を務め、1)の講演の講師がパネリストなり、廃石膏ボードの品質の安全性およびリサイクル用途を透明化する

「廃棄物の見える化」と、廃棄物リサイクルに求められる地域産業に密着した産業創出について議論を行った。

「廃棄物の見える化」に関するディスカッションでは、埼玉県環境科学国際センターの小野氏より、廃棄物問題では対策が後手後手になる事例が多くみられるが、リサイクルを行う企業の立場では、企業の CSR の立場、および企業の長期的な視野に立った戦略に基づく化学物質戦略の必要性が指摘された。北清企業(株)の大嶋氏からは、このようなリサイクル事業を展開する際、それぞれの企業を有する強みを生かした成熟した市場を構築するため、知らないこと、やったことのないことが連続するこの種の取り組みをいかに進めていくかが重要であるとの意見が出された。また、(株)タケエイの川口氏からは、品質の定量化においては、廃石膏ボードを回収する企業で分析部門を内製化して計量証明を発行できる体制を用意するためには、年間3万トンレベルの廃石膏ボードを収集して再資源化する企業規模が必要であることも紹介された。また、原料化されたセッコウを利用した企業側の責任を明確化するために、リサイクル事業の出資者にこれらのユーザー企業を加える戦略についても紹介があった。一方、長岡高専の尾上氏からは、路盤材等に用いる固化材は、その成分がブラックボックス化することによりどのような原料が用いられているかが見えづらい現状が報告され、廃棄物の物流、品質評価を可視化することの重要性が見いだされたと思われる。

一方地域産業に密着した産業創出に関しては、大嶋氏より「廃棄物処理業はサービス業である」という時代の変化に対応した、新しい産業創出を廃棄物処理業から興すことができる可能性が指摘される一方、小野氏からは、それぞれの地域特性に適した廃棄物物流に関するデータ取りがなされていない問題点が指摘された。また、川口氏からは現在首都圏や大都市圏での廃石膏ボードリサイクルの事業は、半径20～30km圏内で年間3万トンの廃石膏ボードを回収、再資源化できることが採算のボーダーラインであり、富山県のような地方都市では、このモデルをそのまま適用することができない現状が浮き彫りとなった。

本研究では、富山県をフィールドとした廃石膏ボードおよび建設汚泥リサイクルを目指した取り組みを進めているが、上記の現状を鑑みても、現在進めている廃石膏ボードの品質をオンサイト

で評価できる技術, その情報を廃棄物と共に流通させる物流システムの構築は, 極めて有用かつ喫緊の課題であるとの認識を得た。

#### 4.1.2 平成 21 年度のワークショップ

2月26日に東京都品川区の「アワーズイン阪急」で開催したワークショップには, 全国から約70名の参加者が集まり, 本研究課題の関心の高さが伺えるものとなった。

ワークショップでは, 石膏ボード製造から建設汚泥のリサイクルと, 入り口から出口の立場で廃石膏ボードの現状と課題についてご紹介いただくためのプログラムを企画した。石膏ボード製造業の業界団体である(社)石膏ボード工業会の林専務理事からは, 石膏ボードの製造プロセスの概略から, 廃石膏ボードの現状と課題に関する最新の情報をご提供いただいた。共同研究者である(一般)泥土リサイクル協会の野口真一からは, 建設汚泥リサイクルの最新動向と, 廃石膏ボードを用いた固化材の現状と課題に関して, 「本音の情報」が参加者と共有した。また, 種々の産業の倫理的活動, CSR と企業成長に関して, 国立富山高専の宮重講師から製薬業界を例として講演をいただいた。

休憩を挟んで, 代表研究者の国立富山高専の袋布が本研究課題の概要と, セッコウのフッ素問題, それに対する技術開発の動向と最新の成果を紹介した。また共同研究者である国立富山高専の間中助教からは, 3.1.節で述べた分析技術の紹介および学生によるデモが行われた。

講演では多くの質問, 意見が参加者から寄せられ, ワークショップの後に行われた意見交換会でも参加者間の意見交換が夜遅くまで展開された。

#### 4.1.3 平成 22 年度のワークショップ

平成 23 年 1 月 6 日に東京都品川区にあるキャンパスイノベーションセンター東京において開催した。ワークショップには, 全国から約 70 名の参加者が集まり, 本研究課題の関心の高さが伺えるものとなった。

ワークショップでは, 石膏ボードリサイクルに必要なしくみづくりの方向性を考えることを目的に, 学術的なセッコウ研究について, 日本大学理工学部の小嶋芳行教授より最先端の知見をご紹介いただいた。また, 本研究で得られた 3 年間の研究成果に関して代表研究者の富山高専の袋布

が全体像を、ビジネスモデル調査と分析技術開発に関する成果をそれぞれ共同研究者である富山高専の宮重および間中がプレゼンテーションした。また、パネルディスカッションでは、共同研究者である泥土リサイクル協会の野口の座長で、産学連携、地域での連携などのあり方について産業界、大学関係者の方々と意見を交換した。

講演では多くの質問、意見が参加者から寄せられ、ワークショップの後に行われた意見交換会でも参加者間の意見交換が夜遅くまで展開された。

## 4.2. 展示会出展など

本研究内容を広く社会に PR するため、以下の展示会等で研究プロジェクトの紹介を行った。

### 1) 2008NEW 環境展(平成 20 年 6 月 3～6 日, 東京ビックサイト)

本展示会は、廃棄物のリサイクル等に関する国内最大の展示会であり、期間中で約 17 万人の来場者がある。この展示会に設けた富山工業高等専門学校ブースの一部で、本研究プロジェクトを紹介するコーナーを設けた。会場では研究内容を紹介するパネルおよびパンフレットを用意し、ブース来場者に配付した。廃石膏ボードリサイクルに関する研究内容を展示することを展示会のプログラム等に掲載していたこともあり、本ブースを目的に来場される方など、関心の高さが浮き彫りとなった。

ブースに来られた 300 名以上の来場者に対して、本研究内容を紹介し、貴重なご意見を伺うことができた。

### 2) エコプロダクツ 2008(平成 20 年 12 月 11～13 日, 東京ビックサイト)

本展示会は、日本最大の環境展示会のひとつであり、前節の NEW 環境展が廃棄物業界を対象とした展示会であるのに対し、本展示会は一般向けの展示会のイメージが強い。

この展示会の中で開催された「エコプレゼンテーション・ステージ」において、「石こうボード・建設汚泥リサイクルに有用な環境ソリューション」というタイトルで本研究内容を簡単に紹介した。プレゼンテーション後、建設汚泥リサイクルに取り組む種々の企業などからの質問が寄せられ、本研究内容に関する関心の高さが伺えた。

### 3) NEW 環境展 2009(平成 21 年5月 25～28 日, 東京ビックサイト)

研究の内容を広く一般に公開することを目的に, 平成 21 年 5 月に東京ビックサイトで開催されたアジア最大の環境関連の展示会である「2009NEW 環境展」において研究室ブースを出展した。ブースでは, 廃石膏ボードリサイクルを行っている事業所の方々に多く来場いただき, 貴重な意見やアドバイスをいただくことができた。

ブース内では本研究事業の平成 20 年度の成果報告書を配布したが, 在庫が足りなくなって急遽取り寄せるなど, 研究成果に対する高い関心度をうかがい知ることができた。

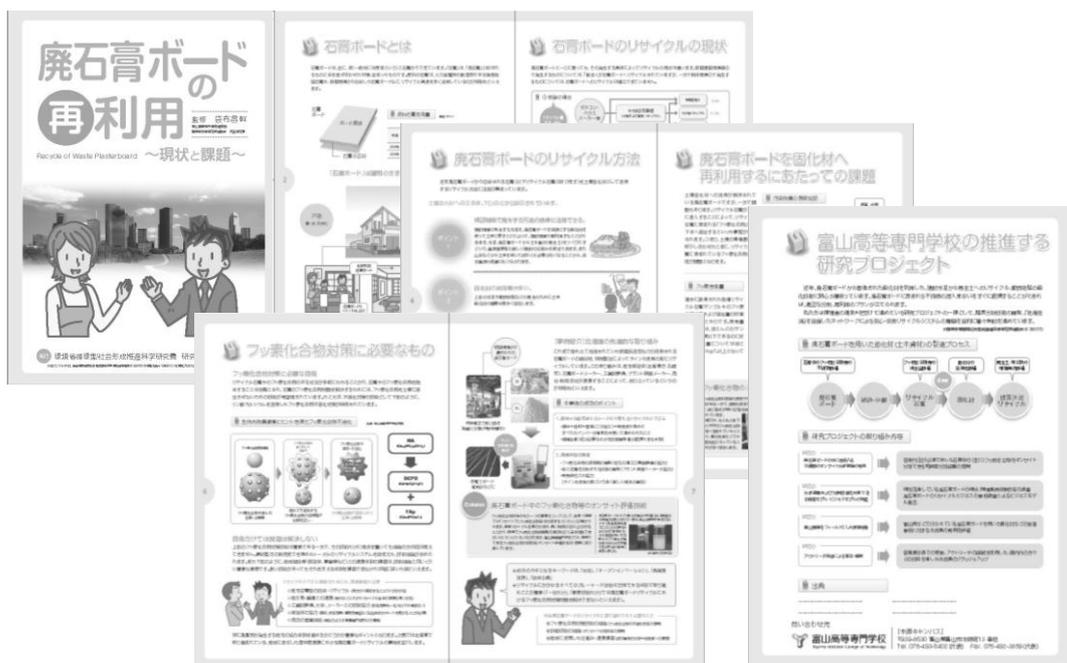
### 4) NEW 環境展 2010(平成 22 年5月 25～28 日, 東京ビックサイト)

昨年 5 月に東京ビックサイトで開催されたアジア最大の環境関連の展示会である「2010NEW 環境展」において研究室ブースを出展した。ブースでは, 廃石膏ボードリサイクルを行っている事業所の方々に多く来場いただき, 貴重な意見やアドバイスをいただくことができた。ブース内では本研究事業の昨年度の成果報告書を配布したが, 在庫が足りなくなるなど, 研究成果に対する高い関心度をうかがい知ることができた。

なお, 本冊子も今年 5 月に東京ビックサイトで開催される「2011NEW 環境展」において配布し, 広くご指導をいただくこととしている。

## 4.3. パンフレット等のマテリアル作成

これまでのアウトリーチ活動において, 実際に廃石膏ボードリサイクルに従事されている方々でも, セッコウ中のフッ素化合物の現状と課題, リサイクルの必要性などについての情報が共有されていないことが浮き彫りとなった。そこで, サイエンスライターを活用して, 一般にもわかりやすく本研究で取り扱っている廃石膏ボードのリサイクルに関する現状と課題に関するパンフレットを制作し, 2000 印刷した。発行後 3 ヶ月で 1200 部以上のパンフレットが展示会等で配布され, 本課題に対する関心の高さが浮き彫りとなった。



作成したパンフレット

#### 4.4. 表彰など

本研究をはじめとした、廃石膏ボードリサイクルなどの取り組みに対して、平成 20 年 11 月に日刊工業新聞社から第 3 回モノづくり連携大賞・特別賞が授与された。受賞理由は、高専発のイノベーションを、異業種の産学連携、数多くの競争的資金の支援を得ながら実用化に向けて進めてきた事例に対してであり、本研究内容が社会的に大きく PR される結果ともなった。

#### 5. 結論

本研究において、以下の成果を得た。

- 1) セッコウ中のフッ素化合物の含有量の評価技術の開発を、オンサイトで評価が可能な装置の試作を含めて進めた。ユーザーとの共有を通して、フッ素化合物以外の不純物含有量の評価技術に加えて、土壤環境基準への適合性を評価するため、石膏からのフッ素化合物等の溶出量を簡便に評価できる手法の開発が必要であると考えられた。
- 2) セッコウ中のフッ素化合物の含有量の評価技術に関する成果を活かし、セッコウ中フッ素およびヒ素化合物含有量評価技術について、オンサイトで評価が可能な前処理技術の構築を中心に進めた。結果、セッコウ中のヒ素化合物の含有量を1時間以内で評価できる技術を構築

することができた。

- 3) 石膏リサイクルの事例調査を通して、この種のリサイクルは「地産地消」的に地域の複数の事業者がネットワークを組織し、本研究で示したオンサイト分析の結果を共有できる仕組みを構築すること可能であることを見いだした。
- 4) 石膏リサイクルの事例調査を通して、異業種連携によるリサイクル技術をビジネスとして成功させる因子として、企業倫理の浸透、その企業倫理を共有できる企業間連携が大きなものであることを見いだした。
- 5) 海外での成果発表、事例調査を通して、韓国における大規模な建設汚泥リサイクル事業や北アフリカ諸国における肥料製造で発生する化学石膏による環境インパクトの対策に対し、本研究成果が適応できる可能性を見いだした。
- 6) 国内外で進められている建設汚泥リサイクル、石膏による環境負荷低減技術に関する取り組みを進める事業者や一般に対して本成果を紹介するメディアの作成、アウトリーチ活動を通して成果の PR、社会との共有を進めた。

## 6. 参考文献

- 1) 無機マテリアル学会編, “セメント・セッコウ・石灰ハンドブック”, 技報堂出版, p. 138 (1995)
- 2) (社)石膏ボード工業会, 環境省, 廃石膏ボードのリサイクルの推進に関する検討調査(2002)
- 3) 国土交通省, 建設リサイクル制度の施行状況の評価・検討について とりまとめ (2008)
- 4) 国土交通省, 建設汚泥の再生利用に関するガイドライン等 (2006)
- 5) 環境省, 平成 20 年度および 21 年度廃石膏ボードの再資源化促進方策検討業務・調査報告書(2009, 2010)
- 6) 梶, 津田, 石膏と石灰, No. 48, 162 (1960)
- 7) 天津, 石原, 関, 石膏と石灰, No. 27, 1319 (1957)
- 8) 田中, 旭硝子工業技術奨励会研究報告集, Vol. 13, 141 (1967)
- 9) Singh, M., *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, 1363 (2003)
- 10) (社)石膏ボード工業会, 解体廃石膏ボードの再資源化技術開発研究報告書(平成 11 年度 NEDO 技術開発機構委託研究), 14 (2001)
- 11) Tafu, M., Chohji, T., *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, Vol. 102, p.991 (2007)
- 12) 中山, 町, 青山, *分析化学*, Vol. 43, 241(1994)
- 13) Tafu, M., Chohji, T., *J. Eur. Ceram. Soc.*, Vol. 26, p. 767 (2006)
- 14) T. Chohji and M. Tafu, *Proceedings of the 6th Tunisian-Japanese Seminar on Culture, Science and Technology*, 163-165 (2006)
- 15) 丁子哲治, 袋布昌幹, 藤田巧, 羽田準一, “石膏溶解用水溶液”, 特開 2006-292407, 平成 17 年 4 月 6 日出願
- 16) A. Manaka, H. Sawai, M. Tafu, T. Toshima, T. Chohji, *J. Ecotech. Res, in press*
- 17) E.Y. Kim, J.C. Lee, B.S. Kim, M.S. Kim, J. Jeong, *Hydrometallurgy*, 86, 89-95 (2007)
- 18) Murphy, P.E., “Implementing Business Ethics,” *Journal of Business Ethics*, 7, 1988, pp.907-912.
- 19) Edgar H. Schein, “The Corporate Culture: Survival Guide,” Jossey Bass, 1999. (金井寿宏監訳「企業文化—生き残りの指針」白桃書房, 2004. )
- 20) 宮重徹也「医薬品企業の経営戦略—企業倫理による企業成長と大型合併による企業成長—」慧文社, 2005.

## 7. 謝辞

本研究を進めるにあたり以下の方々の協力を得た。

廃石膏ボードリサイクル等の調査においては、廃石膏ボードリサイクルのモデルとなる事業体を組織されている廃石膏ボードリサイクルのモデルとなる事業体を組織されている北海道の北清企業(株)、イーエス総合環境研究所(株)、地方独立行政法人・北海道立総合研究機構、廃石膏ボードの我が国のスタンダードといえる(株)ギプロ、廃石膏ボードの破砕機のメジャーメーカーである渡部工業(株)および(株)細田企画、廃棄物ビジネスの我が国のトップランナーの一つである三友プラントテクノロジー(株)、地域でのリサイクルを推進している沖縄県の(株)オキセイ企業、神奈川県中央環境開発(株)など、多くの民間企業の方々の助言、ご協力をいただいた。

セッコウの微細構造評価などについては、ボン大学の Robert Glaum 教授、BK Giuliani GmbH の Thomas Staffel 氏などの助言指導をいただいた。

海外における廃石膏ボードリサイクル等の調査においては、ドイツの BK Giuliani GmbH, Knauf Gips KGをはじめとする関連企業の方々の協力を得た。アウトリーチ活動に際しては、埼玉県環境科学国際センター小野雄策博士、(社)石膏ボード工業会の林専務理事、長岡工業高等専門学校尾上篤生教授、北清企業株式会社大嶋武取締役社長、株式会社タケエイ経営企画部川口知司グループ長代理、ビーケーギューリニ・ジャパン(株)木下久弥代表取締役社長をはじめとして多くの方々の協力を得た。これらの方々の支援、指導の結果、このように研究を進めることができました。心より御礼申し上げます。

また、実験的検討においては富山工業高等専門学校専攻科機能材料工学専攻小田浩之君、澤井光君、同物質工学科岡本香奈さん、環境材料工学科太田貴之君をはじめとして、富山高等専門学校の学生諸君の努力無しには、ここに示す成果はえられなかったものと思われる

一方ビジネスモデル調査においては、同専攻科灰谷美寿紀さん、南佳苗さんの支援を得た。この場を借りて心より感謝申し上げます。