

廃石膏ボードを建設用資材に再生利用するために

～入口から出口までの取り組みの現状と課題～

袋布昌幹

富山高等専門学校 准教授

藤田巧

チヨダウーテ株式会社 環境事業本部 副本部長

野口真一

一般社団法人 泥土リサイクル協会 事務局長

[キーワード]

廃石膏ボード、フッ素、DCPD（リン酸水素カルシウム二水和物）、軟弱土、建設汚泥、浚渫土砂、リサイクル、固化材

1. はじめに

石膏ボードは、石膏（硫酸カルシウム）を芯材として表裏面を石膏ボード用原紙で被覆成型した建築用内装用材料で、建築物の内装材として大量に使用されている。

石膏ボードは不燃性、耐火性および遮音性を持つほか、その加工性が良く、寸法安定性に優れており、安価である機能性建材であることから世界中で約 75 億 m² 生産されている。

石膏ボードに使われる原料石膏は火力発電所からの排煙脱硫石膏やリン酸製造などから副生する副産石膏が 7 割にも及ぶ。また、ボード用原紙はほぼ全量が新聞紙や段ボール故紙を使用している。つまり、石膏ボード自体が各種産業から発生する未利用資源を再利用したものであり、我が国の他産業の副産資源を大量に使用することにより資源循環型の一翼を担ってきたものである。

しかしながら、建築物がその寿命を終えた後に、石膏ボードは大量の廃棄物となり、その大半が最終処分場に埋め立て処分されている。廃石膏ボードは、製造時、建物の新築時および解体時に発生しているが、今後、老朽化した建物の解体の増加に伴って排出量の増加が予想されている。平成 18 年より廃石膏ボードは、管理型最終処分場への処分が義務付けられたものの最終処分場をめぐる環境問題もあり、新たな最終処分場の確保は困難な状況となっており、その逼迫が現実となりつつある。そのため、廃石膏ボードの再資源化の促進が強く求められている。

一方、建設廃棄物として建設汚泥の再資源化率が極めて低い水準にとどまっており、建設汚泥の最終処分量をいかに削減するかは喫緊の課題となっている。

そのような状況のもと、近年廃石膏ボードを建設汚泥の再資源化に利用する新技術開発が広く行われるようになった。本稿では廃石膏ボードを建設汚泥の再資源化に活用する技術の現状とその課題について、著者らの最新の成果も含めて概説する。

2. 石膏ボードの生産量と排出量

石膏ボードの生産量は戦後右肩上がりに成長し、平成 9 年にはピークとなったが、それ以降は減少して 5 億 m² 台で推移し、平成 21 年は 4.4 億 m²、原料石膏使用量は 385 万トンとなっている。

石膏ボードの製造現場で発生する廃石膏ボードは、全量石膏ボード原料として再利用されている。また、建築物の新築現場で発生する石膏ボード端材も相当量がボード用原料として再利用されている。しかし、寿命の尽きた建築物の解体工事に伴い、発生する解体系廃石膏ボードは、現在約 100 万トンに及ぶが、その再資源化は遅々として進まず膨大な量が最終処分場に埋め立て処分されている。また、今後その発生量は右肩上がりに増加し続けると推計されている（図-1）。

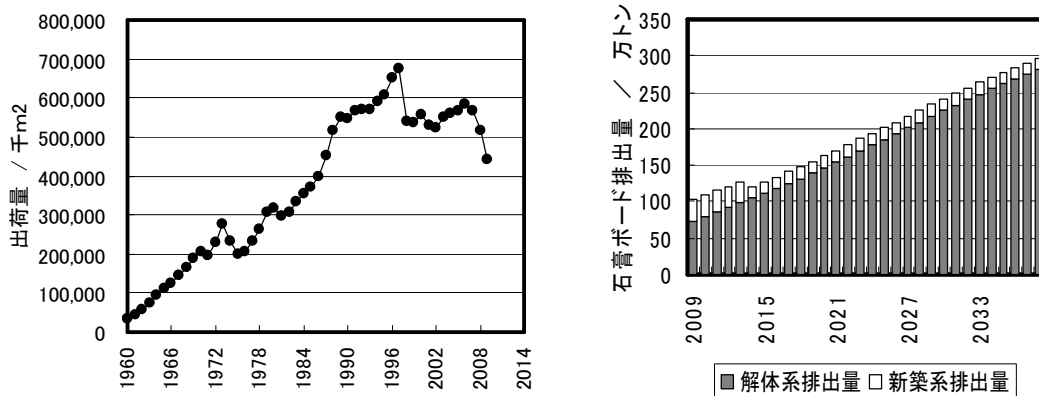


図-1 石膏ボードの出荷量と廃石膏ボードの出荷量

3. 廃石膏ボードの再資源化技術

3.1 石膏ボードの原料

廃石膏ボードを石膏ボードの原料として再資源化することは、一見理想的な手法と考えられるが、いくつか問題がある。廃石膏ボードから回収された石膏はその結晶サイズが小さい。石膏ボードを製造する際、石膏の結晶の大きさがその生産性および強度に大きな影響を及ぼす。結晶の大きさが小さくなると嵩密度が小さくなるために、石膏ボードを製造する際により多くの水を必要とする。混水量の増加は、結果として生産性の低下、コストの上昇、さらには製品である石膏ボードの強度の低下につながる。そのため、石膏ボード原料への廃石膏ボードからの石膏の混入量は10%程度が上限となっている。そこで、廃石膏ボードの混入率を増やすために、回収された廃石膏の微細な結晶を大型化する技術開発が進められている。

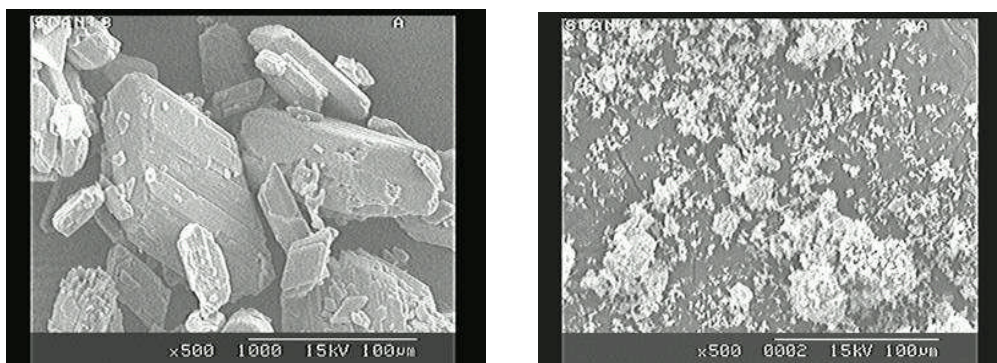


図-2 原料石膏粒子（左）と廃石膏粒子（右）の粒子形状のSEM画像

3.2 セメント原料

セメント製造時の仕上げ工程で凝結遅延材として石膏が使用されている。しかし現状は天然石膏や排煙脱硫石膏が主流であり、廃石膏は品質の問題等からほとんど使用されていない。

3.3 廃石膏ボードリサイクルの課題

廃石膏ボードから分離した石膏粉を用いて建設汚泥や軟弱地盤の固化材などの土木資材として使用する場合、土壌汚染のリスクを考える必要がある。

石膏の環境面に与える影響について配慮が必要なものとして、①アスベスト②重金属類の溶出③フッ素化合物の溶出④硫化水素の発生が知られている。アスベストは過去の一時期ごく一部の特殊製品のボード用原紙にアスベストが

含まれていたことがあるが、製造された年月日などで特定が可能であり、(社)石膏ボード工業会のホームページにも情報開示されているため対応は可能である。また、重金属類も製造年月日と製造場所で同じく特定が可能で対応可能である。硫化水素の発生は石膏が水中で一部融解して生成した硫酸イオンが嫌気条件化で硫酸還元菌によって還元され、硫化水素が発生するものであるが、硫化水素発生条件の解明やその対策技術の開発がいくつか行われている。その結果、水はけの良い箇所や通気性の良い条件では硫化水素の発生が見られないことや、鉄系の化合物を添加することにより硫化水素を難溶性の硫化鉄として安定させることが出来ることが示されている。

一方、フッ素化合物の溶出については、環境省の調査においても廃石膏ボードを土木資材へリサイクルする場合の技術課題となっており、その対策が望まれている。石膏ボードの原料は天然石膏と各種産業から副生された化学石膏であるが、後者の石膏にはフッ素化合物が含まれているものがある。これは、各種産業の使われる原料中に含まれるフッ素化合物が石膏に移行するためである。例えば、リン酸製造においてはリン鉱石を硫酸で分解し、リン酸液と石膏が得られるが、そのリン鉱石はフッ素アパタイトを主成分としている。リン鉱石を分解したときフッ化物イオンは得られる石膏に移行する。また、排煙脱硫石膏は火力発電所等で石炭や石油の燃焼による排ガスに石灰等を反応させ硫黄酸化物を吸収除去して得られる石膏であるが、石炭中に含まれるフッ素化合物が石膏に移行する。現在では石膏の晶析技術の進展や洗浄工程の導入などで石膏中のフッ素化合物の含有量は低減しているが過去に製造された石膏ボードには比較的高濃度のフッ素化合物が含まれているものもある。したがって、フッ素化合物を含む石膏を原料とした固化材を建設汚泥や軟弱地盤に用いると、土壌がフッ素化合物で汚染される危惧がある。

3.4 フッ素化合物の対策技術

フッ素は、蛍石、水晶石、リン鉱石、など広く天然鉱物中に存在する元素である。フッ素はきわめて反応性が高くほとんど全ての元素と反応し、工業的にきわめて価値のある元素である。しかしながら、長期間にわたって数 mg/L 以上のフッ化物を摂取することにより、歯や骨に影響を与えることが知られている。例えば 1.5mg/L 以上摂取すると歯のエナメル質表面に白濁や褐色の濁りを生じる班状歯の出現率が急激に増加することがわかっている。この成果等から我が国では排水、大気、土壌中のフッ素含有量に関して種々の法規制が制定されている。

筆者らは、その対策としてリン酸カルシウムに着目しフッ素不溶化剤の研究開発を行った。生体内では、種々の化学プロセスが選択的かつ高効率で進行している。その中でフッ素化合物は、生体内で歯や骨などの硬組織に選択的に沈着することが知られており、これは硬組織の主要無機成分である水酸アパタイトが種々のイオンとイオン交換しやすい結晶構造を有することに起因している。この反応を環境中の低濃度フッ素化合物に適用できれば、従来処理が困難とされていた石膏や汚染土壌中のフッ素化合物等への適用が可能となると考えられる。歯の虫歯予防のために歯科で行われる「フッ素塗布」に着目し、リン酸カルシウム的一种であるリン酸水素カルシウム二水和物 (DCPD) が水溶液中のフッ素化合物と特異な反応性を示すことを見いだした。この反応は水溶液中で DCPD 粒子表面にナノ表面構造を誘起することに特徴を持つものである。DCPD は汚染土壌中の少量のフッ素化合物、廃水中の錯体を形成した難分解性フッ素化合物、さらに石膏中のフッ素化合物までも容易に難溶性のフッ素アパタイトを生成して不溶化する。その不溶化については、硫酸酸性下での 500 年試験にも耐えうる極めて優れた安定性を示す。リン酸カルシウム的一种を用いた DCPD を用いることにより、図-3 に示すように、石膏中のフッ素化合物を難溶性のフッ素アパタイトとして不溶化し、溶出量を検出下限以下まで低減できる。

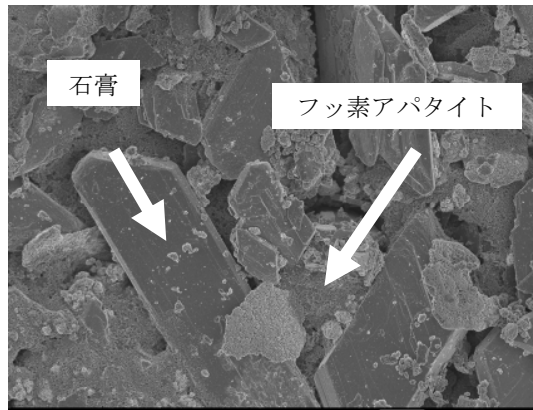


図-3 DCPD 添加した石膏資料の FE-SEM 像

しかしながら、市販品の DCPD は高価であり、フッ素との反応性も低いものが多いことがわかり、この技術を実用化するにはコストの低減やフッ素との反応性を高め安定させる必要があった。

DCPD は水溶液中でその粒子表面にナノスケールの微細粒子を析出させた「ナノ表面構造」を誘起して活性化し、その後速やかにフッ化物イオンと反応して難溶性のフッ素アパタイトを生成する。そこで、DCPD の粒子表面にフッ素との高い反応性を有するナノ表面構造を図-4 のように誘起させることにより反応性の低い DCPD であっても、市販品の DCPD の性能を上回るフッ素不溶化能力を引き出すことができることを明らかにした。

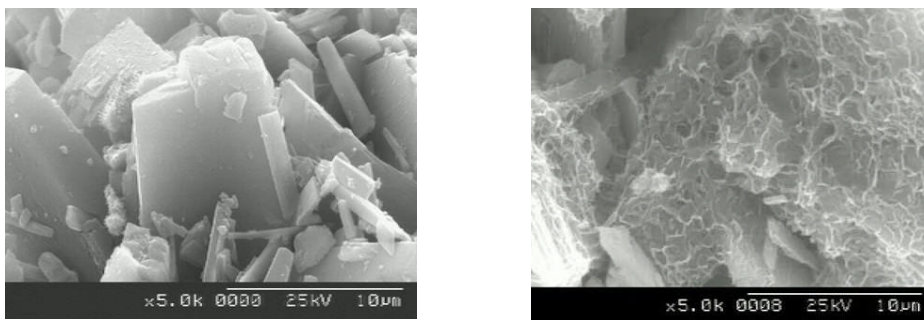


図-4 市販品 DCPD (左) と粒子表面にナノスケールの微細粒子を析出させた DCPD (右) の SEM 画像

この DCPD を用いて各地の廃石膏のフッ素不溶化能力を評価した結果を図-5 に示す。廃石膏のフッ素溶出量はそれぞれ溶出量および溶出特性が異なるため、環境基準である 0.8mg/L 以下まで低減させるために必要な添加量はそれぞれ異なる。そのため、DCPD の添加にあたっては、事前に最適添加量の見積もりを行うことが望ましい。

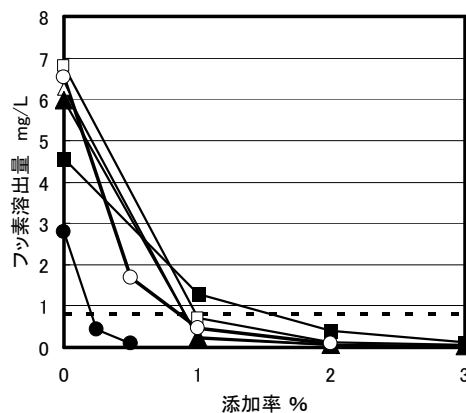


図-5 DCPD を添加した廃石膏からのフッ素溶出量

このようにフッ素溶出量を制御した廃石膏を用いることにより、フッ素汚染の恐れが無く安心安全な建設汚泥等の再資源化が可能となると期待される。

4. 建設用資材への利用

4.1 建設発生土

従来より、公共工事においては、コスト削減等の観点より設計の段階から切土、盛土のバランスをとる等、建設発生土の現場内利用が進められている。しかしながら、廃棄物の不法投棄に伴い生ずる廃棄物混じり土の存在や軟弱土の取扱いの不具合等の事案が散見されている。例えば、一部の公共工事において、発注者による建設発生土の行先把握がなされておらず、結果として、工事間で利用されていない建設発生土のごく一部が、大量の土砂の放置等の形で不適正に処理され、自然環境・生活環境に多大な影響を及ぼしている。

この様な背景から、現在では各公共工事の発注者が建設発生土の行先を完全に把握するプロセス管理と工事間利用の促進が並行して実施されている。

4.2 建設汚泥

建設汚泥を含む建設廃棄物の不法投棄問題は依然として全国各地で見逃げせない状況にある。

このような状況を踏まえ、国交省により、平成 18 年 6 月に『建設汚泥の再生利用に関するガイドライン』をはじめとする通知類が策定された。地方主管部局並びに地方公共団体や関係特殊法人等は、これら通達類を参考とし、建設汚泥の適正処理の強化による不法投棄の廃絶を目指した行政指導が行われている。

しかしながら、建設汚泥再生およびその利用についてはこのような行政機関の奨励、努力にも拘らず現在のところ十分な成果が得られるには至っていない。その理由として、建設汚泥処理に関する法解釈は一律でないうえに再生品利用手続きが煩雑であり、また品質に対する信頼性が疑問視され、手続き等の作業効率を優先し、環境問題に配慮することなく最終処分場での処理を選択していることが挙げられる。

一方、昨今では COP15 における CO₂ 排出量の規制や COP10 において生物多様性の損失速度を減少させるため環境破壊の抑制が議論されており、企業にとってその対応は必至である。建設汚泥は、図-6 に示すとおり、建設副産物の中において運搬時に最も CO₂ を排出する産業廃棄物であることから原位置で建設汚泥を処理するリサイクル促進は CO₂ 削減や環境破壊の抑止に直結し、その取り組みが注視されている。

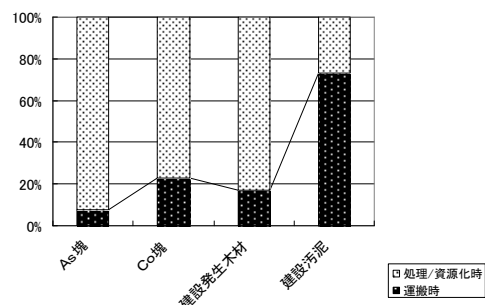


図-6 建設副産物における CO₂ 排出量のプロセス別の割合

4.3 浚渫土砂

港湾・空港等においては、浚渫土砂の有効利用、舗装撤去材の再生利用、スラグの受け入れなど、リサイクル型の事業実施を図ってきており、また、それに必要な技術開発が進められ、所要の成果が得られている。

一方では、循環型社会の形成を目指した取り組みが各方面で鋭意検討され、また、各種資材の再資源化の促進が求められていることから、港湾・空港等においても、関係者間の密接な連携を強化し、より一層のリサイクル促進を図ることを目的に、平成 12 年 4 月より「港湾・空港等リサイクル推進協議会」が設置され、リサイクル技術指針を策定し、運用されている。

近年では、浚渫土砂の有効利用に関して、これまではその多くは海洋投棄により処分されていたが、全国的に受け入れ地が無くなってきており、陸上部への利用が喫緊の課題となっている。

4.4 具体的な利用方法

上述の通り、建設業においては、建設発生土のうち軟弱な土砂に対して、また、建設汚泥や浚渫土砂等の高含水の土砂については利用用途に応じた要求品質を満足するためには適切な処理を行う必要があり、その代表的な処理方法である「安定処理」において種々の固化材が開発されており、それらのひとつとして石膏が使用されていた。石膏を主体とした固化材の特徴は以下の通りである。

水硬性石膏中の**半水石膏が二水石膏に変化して中性領域で固化**する。このため、処理土も中性である。また、固化反応が早く数 10 分で反応が終了するため泥土を短時間で処理することができる。更に、重金属等の有害物を含まないため環境にやさしい材料である。処理土は、土地造成等の埋め戻しとして再利用されるほか植生土壌としても使用することができる。

また、石膏単体の固化材では、一般的にその強度は低いほか、水にさらされた場合、再泥化してしまうため、近年、石膏系固化材の強度を改良した、弱アルカリ系の固化材が開発されている。これはスラグ等を用い弱アルカリ性にすることでホズラン反応により強度を増加させ、また石膏の緩衝作用により施工土の pH は速やかに中性領域に低下する。更に、石膏には有害重金属含有の問題もないことから、処理土は路床、路盤材等への埋戻し材のほかピートモス等の材料と併用することで植生土壌としても使用できる。

そもそも石膏は、昭和 60 年頃に石膏ボード業界の飛躍的な発展があり、セメント業界の安定的な需要にも支えられ、原料石膏の需要が大幅に伸びた。しかし、その頃より国内の天然石膏鉱山の全てが採算面の理由で閉山になり、以後、化学石膏のみの使用で国内の全ての需要を賄っていたため、国内化学石膏のみでの操業が不可能となり、海外からの石膏輸入でその需要を満たしてきた。そのため、一般的な固化材に比し、高価なものとなっており、固化材としての利用が敬遠されていた。

そこで、供給面の拡大とコスト低減を目指して、多くの企業が廃石膏ボードを再資源化した固化材の開発に取り組んでいる。その特徴は、廃石膏ボードから紙と石膏を分離し、得られた石膏を加熱して半水石膏にするものである。半水石膏は水と混ぜると硬化する特性を持っているため、この特性を利用して高含水の土砂等を固化するのである。また、石膏はセメント系の固化材および石灰系の固化材の混和材としても利用することができ、軟弱地盤の強度を向上させることもできる。

以上のことからこれらの固化材は、シールド工事や浚渫工事で発生する建設汚泥に添加して再生土として再利用したり、建設発生土のうち軟弱な土砂や軟弱地盤に添加してその強度を向上するために用いることができる。

しかし、上述の通り**廃石膏ボードに含まれるフッ素化合物がその利用の障壁**となっている。そのため、本稿で述べた不溶化材の添加など、その溶出抑制対策が石膏の固化材への利用の重要な鍵となっている。



写真-1 石膏系固化材を用いた建設汚泥の再資源化利用例

5. 終わりに

本稿では建設廃棄物の中でリサイクルが渴望されている廃石膏ボードと建設汚泥について、その現状と課題、さら

に著者らの最新の研究成果を概説した。通常の建設工事と異なり、廃石膏ボードのリサイクルでは廃棄物収集、中間処理等、他の業種との連携が必須となる。これらの業種間で廃石膏ボードを再資源化の中で、フッ素化合物に代表される環境リスクを正しく理解、共有することが今後の課題となると考えられる。一般的に廃棄物は遠距離の輸送がコスト面で困難であることから地域内での循環利用、すなわち「地産地消」のビジネスモデルの構築が必須である。その際に単なる技術の導入だけでなく、異業種連携による新しい連携体が社会に対するガバナンスを強く意識して取り組むことが求められる。

リサイクルを単なる利益を生むビジネスと捉えるのではなく、循環型社会構築の重要なセグメントと意識し、高い倫理観と社会に対する透明性をもった企業活動として取り組むことが、今後の循環型社会形成において重要になるであろう。