



NIKKO
TECHNICAL REPORT

2024
04
NO.005

NIKKO TECHNICAL REPORT NO.005



本 社

〒674-8585
兵庫県明石市大久保町江井島1013番地の1
TEL.078-947-3131(代)

事業本部

〒101-0062
東京都千代田区神田駿河台3丁目4番地の2
(日専連朝日生命ビル5F)
TEL.03-5298-6701(代)

<https://www.nikko-net.co.jp/>



*n*からはじまる未来創造

沿革

- 1919- 1919 兵庫県神戸市に出資金50万円を以て「日本工具製作株式会社」設立
1920 兵庫県明石市に工場を新設
初商品となるショベルを発売
1921 本社を明石市に移転
- 1940- 1949 大阪証券取引所に上場
1951 コンクリートミキサ・ウインチなどの建設機械の製造を開始
1956 生コンクリートプラントの製造を開始
1958 アスファルトプラントの製造を開始
- 1960- 1962 江井島工場(敷地約10万m²)を新設し、製造を開始
東京証券取引所第一部に上場
パイプサポートの製造を開始
1963 パイプ足場の製造を開始
1966 各種コンベヤの製造を開始
1968 日本工具製作株式会社を日工株式会社に社名変更
合材サイロの製造を開始
1969 アスファルトプラントのオペレーター研修センターを開設
1971 日工電子工業(株)設立
1974 西独ベニングホーヘン社と技術提携
1977 代理店組織“トンボ会”を結成
1979 米国ボーイング社との技術提携
- 1980- 1981 生コンクリートプラントオペレーター研修始まる
1986 東京技術サービスセンターを開設
1988 台湾連絡事務所開設(現:台北支店)
1989 日工取引先持株会発足
協力工事店組織“アキツ会”を結成
財団法人日工記念事業団設立
1991 ベニングホーヘン社(ドイツ)と資本提携
決算期を11月30日から3月31日に変更
1994 ニッコーパウマシーネン(有)設立
資本金91億9,760万円に増資
トンボ工業(株)設立
1995 日工セック(株)設立
1999 北京駐在員事務所開設(現:日工上海北京事務所)
(社)日本建設機械化協会奨励賞受賞
- 2000- 2000 海外事業部開設
油汚染土壌浄化システムの製造・販売を開始
2001 プラスチック再商品化プラントの製造・販売を開始
中国現地法人日工(上海)工程機械有限公司設立
環境計量事業所を開設
2002 Bilfinger Berger Umwelt社(ドイツ)と汚染土壌浄化事業で業務提携
(株)新潟鐵工所とアスファルトプラント部門スポンサー引き受けについて基本合意
(株)新潟鐵工所との財産等譲渡契約書の正式締結
2004 日工(上海)工程機械有限公司、嘉定工業区への工場新設及び移転
2008 株式会社前川工業所の全株式の取得により子会社化
2018 自走式破碎機等を取り扱うモバイルプラント事業部を発足
2019 創立100周年を迎える
2020 NIKKO ASIA (THAILAND) CO., LTD. 設立
NIKKO NILKHOSOL CO., LTD. 設立
2022 宇部興機株式会社の全株式の取得により子会社化
2023 株式会社松田機工の全株式の取得により子会社化

NIKKO TECHNICAL REPORT 2024.04

NO.005



巻頭言

- 05 …… 建設バック・トゥー・ザ・フューチャー
 東京大学大学院工学系研究科 建築学専攻
 教授 野口 貴文

論文

- 09 …… 空練りによるフロック形成が高強度コンクリートのスランプフローに与える影響
 [出典]コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, pp.826-831, 2023
 坂本 恭裕 他
- 15 …… 廃石膏ボードを由来とする重金属類の不溶化特性を有した土壌改良材の開発とその変遷
 [出典]オリジナル
 蓬莱 秀人
- 37 …… コンテナを用いたアスファルト混合物の輸送時間拡大に向けた検討
 [出典]オリジナル
 寺内 崇仁 他
- 45 …… 水素バーナの開発 ～Phase2 アスファルト混合物製造試験～
 [出典]オリジナル
 長谷川 修磨 他
- 51 …… 無水石膏製造設備の安定した急速冷却キルンの開発
 [出典]オリジナル
 柳井 瑛 他

製品紹介

- 61 …… 自走式インパクトクラッシャー「KLEEMANN社製MR110i EVO2」について
- 65 …… IoTプラットフォーム 遠隔監視システム「remoop」
- 67 …… 仮設昇降階段システム ハングユニット-R
- 69 …… 合材サイロ遠隔出荷操作盤SiiLO
- 73 …… 画像認識AIによる骨材判別システム「GraSanMan」
- 75 …… 前川工業所製 小型解砕機

製造設備紹介

- 81 …… AIネスト導入による材料歩留り向上
- 83 …… 浸水防止性能試験場 設備紹介

編集後記

- 88 …… 企業理念
- 89 …… 編集後記

巻頭言

INTRODUCTION



建設バック・トゥー・ザ・フューチャー

東京大学大学院工学系研究科
建築学専攻 教授
野口 貴文



2024年(令和6年)は、十干十二支では「甲辰(きのえ・たつ)」の年であり、「成功という芽が成長していき、姿を整えていく」年になる。しかし、年明け早々に能登半島地震が発生し、不安な幕開けとなってしまった。被災された方々には心よりお見舞いを申し上げたい。現地では現在も復旧・復興作業が進められているが、今後、港湾や鉄道・道路の修復、仮設住宅の建設、生活インフラの整備などが早急に進められ、一刻も早く日常が取り戻されることを祈念する。

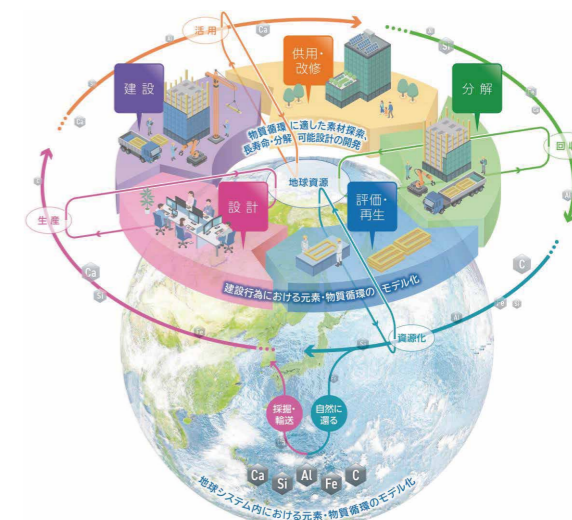
日本列島は、北米プレート、ユーラシアプレート、太平洋プレート、フィリピン海プレートという4つのプレート上に存在しており、幾つもの活断層を抱えている。そのため、何年かおきに巨大地震に見舞われるのは宿命であり、その境遇を踏まえての街づくり、交通網の整備、コミュニティの形成などを心がける必要がある。構造物の設計は、地震被害の調査を受けて確実に進歩してきている。1978年(昭和53年)の宮城県沖地震を受けて建築基準法が1981年(昭和56年)に改正され、建築物は「旧耐震」から「新耐震」に変わった。しかし、建築物の寿命は10数年と短いわけではなく、既存不適格(旧法・旧規定の基準で合法的に建てられた建築物)と呼ばれる建築物は一定数必ず存在し続ける。その結果、1995年(平成7年)の兵庫県南部地震(阪神淡路大震災)では、旧耐震と新耐震との間で住宅被害に大きな差が生じ、明暗を分けることとなったことは、今も記憶に鮮明に残っている。このように、構造物の設計は時代とともに変化してきている。それにもまして、構造物の建設技術、材料の製造技術、および品質管理・検査技術の変化・進歩は著しい。

2024年現在、多くの新設構造物の建設現場は、パネルやシートで囲われているため、中の詳細な様子を伺い知ることはできにくい。その中に入ると、トラックによって運び込まれた建設資材が立ち並んだクレーンによって運搬され、様々な重機が行き交い、単管パイプで組み立てられた足場・支保工が設置され、ポンプで圧送されたコンクリートが合板と締付け金物で形成された合板型枠中に打ち込まれて振動機で締め固められるといった光景が広がる。当然、作業服を着てヘルメットを被った多くの建設労働者が、墨出し、組立て、接合・溶接、加工・切断などの作業を人力で朝から夕までこなしている。建設業は、未だに最も労働集約的な産業の一つであることは間違いなく、昨今の情報化技術の飛躍的な発展にも関わらず、他産業と比較して生産効率の向上もそれほど図られてきていない。そのためか、近年、若手労働者、特に若手の建設技能労働者の不足が深刻な状況となっており、さらに生産効率が低下することが懸念される。構造物の解体工事現場でも同様に、パネルやシートで囲われた中で、重機を用いた部材の切断・解体・圧砕、労働者による鉄鋼の溶断などの作業が繰り返され、分別された建設廃棄物がダンプトラックに積み込まれて運び出され、中間処理場などに運搬されていく。また、建設資材の製造に関しては、鉄鋼は現在、高炉においては、鉄鉱石(酸化鉄)を原料とし、石炭から製造されたコークスを燃料兼還元剤として用い、シリコン・イオウ・リンなどの不純物除去用に石灰石を用いて製造されているが、電炉においては、電気エネルギーを用いて原料である鉄スクラップを溶融して製造されている。将来、新たな構造物の建設が不要になり、鉄鋼を高炉で新たに製造する必要がなくなって、高炉材がすべて電炉材に全て置き換わるとともに、電気エネルギーが再生可能エネルギーに転換されれば、鉄鋼は、完全にカーボンニュートラルでクローズドリサイクルが可能な建設資材になる。一方、コンクリートは現在、石灰石と粘土源(他産業の副産物が多く利用され、資源循環にある程度貢献している)から製造されたポルトランドセメントを水と練り混ぜて得られる結合材によって、碎石・砕砂・砂利・砂が繋ぎ合わされて製造されている。そして、廃コンクリートは、若干量がコンクリート用再生骨材として利用されているが、そのほとんどは路盤材などへのダウンサイクリングとなっており、再びコンクリートに戻ることのないほぼ一方的な流れとなっている。鉄鋼およびコンクリートは、現在、構造物の建設においては必要不可欠の建設資材となっており、世界中で大量に使用されているが、今後、2050年カーボンニュートラル社会の実現に向けて、両者には生き残りをかけた未曾有の試練が待ち構えている。

今から100年前の1924年(大正13年)、大正関東地震(関東大震災)の翌年、同潤会アパートが代官山、青山、江戸川橋、

横浜山下町に建設された。当時、一般的なコンクリートの配(調)合は、セメント:砂:砂利の割合が1:2:4であり、コンクリートの打込み部位に適した軟度が得られるように水が加えられていた。そのため、コンクリートを打込みやすい床スラブは水量が少なくなくて済み、軟らかいコンクリートでなければ打込みが困難となる柱・壁では多くの水を必要としたため、当時の構造物では、現状とは逆に、コンクリートの強度は柱・壁よりも床スラブの方が高いことが多い。すべての材料は1回の練り量に応じて「切箱」(1切=1立方尺=約27.8リットル)と称する木箱で容積計量された後、手練り、あるいはキューブ形ミキサ、ダブルコン形ミキサまたはドラム形(円筒形)ミキサによる練混ぜが行われていた。練り混ぜられたコンクリートは、2人一組でバケツや樽で運ばれ、現場でバラ板と棧木とを組み合わせて製作された型枠内に打ち込まれた後、硬練りコンクリートでは、木製の蜻で叩くようにして層の上面に水がしみ出るまで突き固められたり、丸竹・割竹の棒で突き固められたりしたが、軟練りコンクリートでは、先端に木製・鉄製の平らなへら状のものが付いた棒を用いて突きおよび攪拌がなされた。このように、1924年におけるコンクリートの製造・施工技術は原始的なものであり、コンクリート製造・打込みは土工・雑工が担い、工事機械の運転は鳶工が担うといったように、施工者の知識は乏しく、知識ある設計者の監督指導の下でコンクリート工事が行われていた。もし、現在、大規模プロジェクトの建設工事を任されている現場監督がタイプスリップして、100年前の建設現場に突如現れ、同潤会アパートの建設現場を任されたとすると、その監督は何を考へ、どのような行動に出るだろうか。現在用いている建設機械・機器・設備・装置類を欲し、それらを絵に描いて関連企業に開発を促そうとしたとしても、半導体やプリント基板自体があるわけではないので、現在の機器・装置類の実現は不可能である。むしろ、周囲から奇妙に思われ、要注意人物として扱われてしまうことになりかねない。そのため、2024年までに獲得してきた知識・経験を総動員するとともに知恵を振り絞って、1924年における機器・装置類を駆使して、材料性能を高め、施工品質を安定させ、生産効率を向上させるための様々な取組みを行うであろう。つまり、100年後の建設現場を思い描いての改善・開発である。このことは、やがて、100年かからずして実を結ぶこととなるに違いない。

では、100年後の2124年、建設資材として何が用いられ、建設現場はどのような状態になっているのであろうか。ここ数年の兆候からすると、2050年カーボンニュートラル社会の実現に向けて、建設資材のカーボンニュートラル化に向けた変革が急速に進み、コンクリートはCO₂を原料として製造される形になっているものと予想される(期待を込めての予想ではあるが)。より理想的には、地球上のすべての資源の元素レベルでの循環がコントロールされた形で建設活動が営まれ、その建設活動に必要なエネルギーもすべて再生可能エネルギーで賄われているであろう。すなわち、建設資材のすべては解体された構造物から再生される。そして、工場において再生建設資材を用いて部材の自動製造がなされ、部材が建設現場に自動搬送され、ロボットによる自動組立てがなされることにより構造物が完成するか、または、再生建設資材が建設現場に自動搬送され、ロボットによる自動化施工がなされることにより構造物が完成することになる。これらの動力源はすべて電気エネルギーであり、建設現場の騒音・振動は格段に低減するであろう。また、ロボットによる構造物の自動解体後、建設廃材は、その場で化合物(元素)ごとに分別されて、中間処理場(または建設資材再生工場)に自動搬送されて、次なる建設工事へと利用されていく(下図参照)。このような循環は、場所を越え、時代を越えたサプライチェーンとして最適化が図られた形になっているであろう。つまり、ある地域・時代に生じる建設活動・解体活動と、別の地域・時代に生じる建設活動・解体活動とはチェーンで繋がっており、その最適化はAIが図っているという世界である。もし、そのような時代に上記の現場監督がタイプスリップしたとすると、その監督はどのような仕事を見出し、社会に貢献しようとするのであろうか。2124年の建設現場における人間の業務とは何であらうか。もしかしたら、ロボットの点検業務しか人間の仕事はなくなっているかもしれない。いや、ロボットの点検すらロボットが行っているかもしれない。ロボットのスイッチのオンオフすらも自動でなされていることは容易に想像できる。残念ながら、私には、100年後の建設資材製造工場や建設現場における人間の仕事を見出す想像力は無さそうである。想像力豊かな方は、是非、100年後に人間はどのような仕事を行っているか、思い描いてみていただきたい。私にも確実に言えるのは、100年先の建設資材の製造方法、構造物の建設方法・手順に思いを馳せ、一歩でもその夢を実現できるように研究開発を進めるとともに、100年後にも残存する構造物となるよう、その設計・建設、利用建設資材の製造を確実に行っていかなければならないというくらいである。



<https://www.t.u-tokyo.ac.jp/press/pr2023-10-03-001>

Lined writing area with horizontal red lines.

論文

PAPER



空練りによるブロック形成が 高強度コンクリートのスランブフローに与える影響

坂本 恭裕¹・川崎 佑磨²・福山 智子³・金 侖美⁴

要旨: 高強度コンクリートの施工の増加が見込まれており、製造技術も対応していく必要がある。高強度コンクリートの流動性は、同配合・同環境でも、練混ぜ条件によって大きく異なる場合がある。本研究では、2軸強制練りテストミキサによる高強度コンクリート配合の練混ぜにおいて、空練り(練混ぜ初期における細骨材とセメントの練混ぜ)による流動性変化に着目した。その結果、空練りによるスランブフロー値差を確認し、Cryo-SEM、混和剤吸着量の分析から、空練りを行うことでブロックが形成され、その後に吸着する混和剤の量やタイミングに変化を生じさせ、流動性に差異が生じると考察した。

キーワード: 高強度コンクリート、2軸強制練りミキサ、空練り、ブロック形成、Cryo-SEM、混和剤吸着

1. はじめに

現在、我が国における社会問題として、「地球温暖化対策としていかに低炭素社会を実現するか」、「人口減少に伴う作業などの効率化をどのように促進するか」、「高齢化社会における技術継承をどのように効率よく行うか」など、様々な課題が挙げられている。

その中で、近年の自然災害の激甚化、頻発化等を踏まえ、より高強度化した建造物の建設など、防災・減災やインフラ老朽化対策等の国土強靱化といった政策から、今後、高強度コンクリートの施工は増加すると考えられる。また、日本全体の人口減少や建設業界における担い手不足といった問題から、工期削減などに伴い、プレキャストコンクリート製品の利用が促進されると予想する。さらに、JIS A 5308の改正(2019)における趣旨にも、高強度コンクリートの利用を推進するためと明記されていることから加速的に利用増加が見込まれる。

このような背景から、高強度コンクリートの施工はさらに増加し、施工技術だけではなく、パッチャープラントでの製造においても、その対応が求められる。

一方で、練混ぜ条件がコンクリートの流動性に影響を与え

ることも知られており¹⁾、その原因の一つとしてセメントに対する混和剤の吸着が挙げられている²⁾。セメント量が多くなる高強度コンクリートでは、通常のコンクリートよりもその影響が大きくなる。しかし、高強度コンクリートを対象とした配合において、上記影響の程度やメカニズムの解明を試みた事例は少なく、練混ぜ条件の違いに伴う流動性の相違の解明は急務であり、今後の高強度コンクリートの安定的な供給に寄与できると考える。

そこで本研究では、練混ぜ初期における細骨材とセメントの練混ぜ(以下、空練り)の有無や時間に着目して、高強度コンクリートの流動性に空練りが与える影響を考察した。既報³⁾として、ホバートミキサ(5L)でのモルタルにおける空練りの影響およびメカニズムについて報告したが、本報では、2軸強制練りテストミキサを用いてより実務に近い形で複数の実験を実施した。各空練り条件におけるモルタルフロー値とコンクリートのスランブフロー値や、既存の研究でも重要な指標であった細骨材の表面水や混和剤に着目し、Cryo-SEMを用いた物理的考察、混和剤吸着の化学的考察も加えて、流動性の差異が生じる理由について考察した。

表-1 高強度コンクリート『80-60-20L』の配合

粗骨材の最大寸法(mm)	スランブフロー(cm)	水セメント比(%)	空気量(%)	細骨材率(%)	単位量(kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 Pc
20	60.0	21.4	2.0	44.4	175	818	650	815	8.18

*1 日工(株) 技術本部 開発部 (正会員)

*2 立命館大学 理工学部 環境都市工学科 准教授 博士(工学) (正会員)

*3 立命館大学 理工学部 建築都市デザイン学科 准教授 博士(工学) (正会員)

*4 立命館大学 総合科学技術研究機構 助教 博士(工学) (正会員)

2. 空練りが各フロー値に与える影響

2.1 実験概要

本項では、本報において記述する全ての実験において共通の概要を示す。実験対象とした設計基準強度80N/mm²の高強度コンクリートの配合を表-1に示す。本研究では、この配合から、使用したミキサでの練混ぜ可能量である36L当たりの必要材料値を計算して後述する各試験を行った。使用材料を表-2に示す。

混和剤は単位セメント量に対して添加した。添加量は、各試験当日にコンクリート配合で行った予備試験の結果から、配合調整を行った値に設定した。使用ミキサは、それぞれ材料の動きが異なるように設計された羽根高さが異なる2種類(以下、A、Bとする)の2軸強制練りテストミキサ(60L)を使用し、試験環境は温度20±2℃、湿度50%以上の一定環境下の室内で試験を行った。

2.2 空練りの有無および空練り時間による影響

(1) 概要

図-1は練混ぜ方法について図示したものである。予備実験によるミキサの動力データから、空練り時間を含んだモルタル練混ぜを7分、粗骨材を投入してからのコンクリート練混ぜを3分の合計10分の練混ぜを行った。

細骨材の表面水とセメントによる初期吸着の影響を確認するため、空練りを行い、その後に細骨材および粗骨材の表面水分を差し引いた練混ぜ水と混和剤を投入して練混ぜる方法でモルタルを製作した。なお、湿潤状態の細骨材における表面水率は3%に統一した。

また、空練りの有無および空練り時間による影響を確認するため、モルタルの合計練混ぜ時間は7分に固定したまま、各ミキサによる空練り時間を0、30、60、90秒の4パターンに設定し、空練り時間に応じて練混ぜ水を投入した後のモルタル練混ぜ時間を変更した。そのモルタルに粗骨材を投入してフレッシュコンクリートを製作した。モルタル練混ぜ後とフレッシュコンクリート練混ぜ後のそれぞれのタイミングでフロー測定に必要な量のサンプリングを行い、モルタルフローおよびスランブフローの比較を行った。

(2) 実験結果および考察

各空練り時間のモルタルフロー値およびスランブフロー値を図-2に示す。ここで、空練り時間30秒のスランブフロー値とは、空練り30秒で作製したモルタルに粗骨材を投入した場合のフローを意味している。

ミキサA・B共に空練り時間の増加に伴い、モルタルフローおよびスランブフローが大きくなった。

モルタルフローに着目すると、2軸強制練りテストミキサで作製したモルタルの空練り30秒と90秒ではモルタルフロー値の差は約3cmであった。これに対し、既報³⁾のホバートミキサでのモルタルフロー値差は約10cm程度であり、ホバートミキサと2軸強制練りテストミキサでは違いがあった。

また、スランブフローにおいては、空練り時間が増加するほどフローが伸びており、同一配合にも関わらず各ミキサで

スランブフロー値差は20cmを超過している。これは、JIS A 5308にも記載されているコンクリートのスランブフロー60cmの場合の規定である±10cmよりも大きい。

このスランブフロー値差が生じた要因としては、粗骨材投入後の練混ぜではなく空練りが寄与していると考えられる。その理由として、①既報³⁾で空練りがモルタルフローに大きく寄与していること、②ミキサA・Bともに、スランブフロー値差と空練り時間の増加に伴うフローの増加率は同程度であることが挙げられる。

しかし、2軸強制練りテストミキサのモルタルフロー値差は3cmと既報³⁾に比べて小さいことから、コンクリートの流動性に寄与するモルタルの特徴はフロー値では表すことができない性状であるとの仮説をたて、以降の実験で検証することとした。

表-2 使用材料

材料	種類および品質
セメント C	低熱ポルトランドセメント 密度:3.23g/cm ³ 比表面積:3130 cm ² /g
細骨材 S	砕砂 岩種:安山岩 表乾密度:2.54g/cm ³
粗骨材 G	砕石 岩種:安山岩 表乾密度:2.67g/cm ³
混和剤 Pc	高性能減水剤 主成分:ポリカルボン酸系化合物

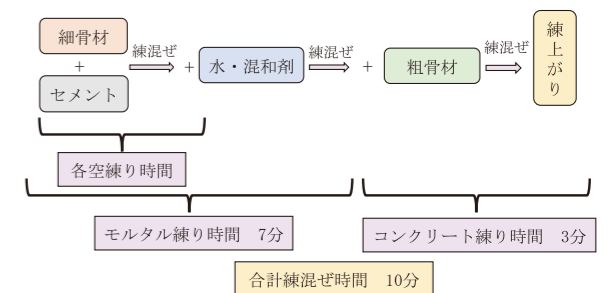


図-1 練混ぜ方法

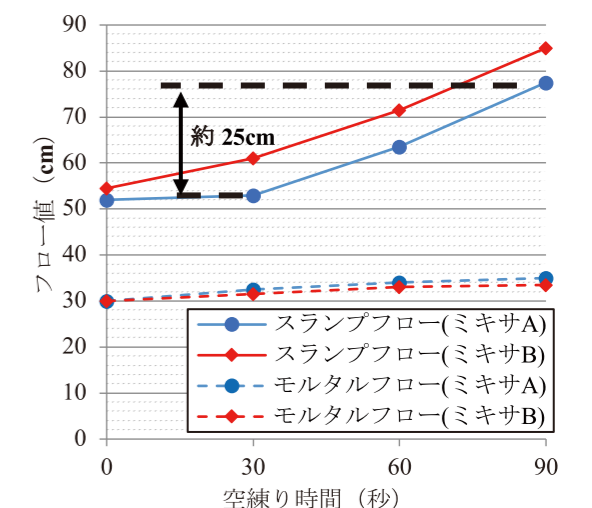


図-2 空練りによるフロー

2.3 モルタル性状差による影響

(1) 概要

前節の検討により推察した、モルタルフロー値差では表すことができないモルタル性状差の存在をより明確にするために、**図-3**のような練混ぜを行うこととした。モルタルをA・Bそれぞれのミキサで練混ぜ、そのモルタルをミキサAに移し替えることで粗骨材投入後の練混ぜ機構を一定とし、その際のスランブフロー値を評価した。

空練り時間は0, 30, 60, 90秒の4パターンとし、モルタルの移し替えによる条件を一定にするために、一貫して同じミキサで練混ぜを行うパターンにおいても、一度排出し、入れ戻す作業を行った。モルタルの移し替えに要する時間に関しても一定となるように、管理して実験を行った。その他の試験条件は、前節と同様の条件で実施した。

(2) 実験結果および考察

モルタル移し替え試験の各空練り時間に対するフロー値の結果を**図-4**に示す。前節と同様に、モルタルフローについては、ミキサによって差がないことが確認された。しかし、それぞれ違うミキサによって練混ぜた同じフロー値のモルタルを、ミキサAに移しコンクリートの練混ぜを行った場合は、一貫して同じミキサで練混ぜたスランブフロー値と異なる結果となった。

この結果から、モルタルフロー値では表すことができないモルタルの性状差が空練りで生じていることが推測できる。また、このモルタル性状差が、空練りによるスランブフロー値差につながっていると推測できる。

そのモルタル性状差を確認するために、空練りで生じていると考えられる、細骨材表面水のセメント粒子への移動やフロック形成、混和剤吸着量差を次章で検討した。

3. 空練りが流動性に与える影響

2章における結果から、空練りによってモルタルフローでは表すことができない性状差がスランブフローに影響していることが確認できた。そこで本章では、物理的試験として、細骨材の表面水がセメント粒子に対してどのような影響を及ぼしているのか、またその表面水で生じるフロックの形成について確認実験を行った。さらに、化学的試験として、流動性に大きく影響を及ぼす混和剤吸着量の測定を行った。

3.1 細骨材の表面水移動に関する実験

(1) 概要

空練り時間に応じて、細骨材の表面水がどのようにセメント粒子に吸着および移動しているかを定量化するために、赤外線多成分計を用いて試験を行った。実験に用いる材料は、セメントの代用として白色の粉体である炭酸カルシウム(密度:2.71g/cm³)と細骨材を用いた。炭酸カルシウムを用いることにより、水との反応もなく、粉体と細骨材の純粋な吸着の評価につなげることが可能と考えたためである。セメントの比表面積に対して、3000 cm²/gと同等であるため、水分の移動を評価するにあたっては影響ないと判断した。

赤外線多成分計による測定対象は色の波長とし、空練り後の材料表面における波長から吸光度を測定した。なお、細骨材の表面水と炭酸カルシウムの本来の色では波長差が生じにくい。そこで、炭酸カルシウムとの色波長差をより明確にするために、絶乾状態の細骨材に表面水3%となるように食紅で着色させた水を吸収させた。

各材料の計量値は、**表-1**に示した基準配合から36L当たりの必要材料値を計算した。測定条件は、空練り時間を30, 60, 90秒の3パターンとして、本練りを行う前の空練りのみを測定対象とし、試料の採取場所は、**図-5**に示すように、ミキサ平面に対して対角箇所と中心の3箇所から採取した。空練り直後の材料をステンレス製のバットに移し、表面を平滑に調整した後、その容器内を**図-6**に示すように6区分に分割した。各区分中央の表面色波長の測定を3回ずつ行い、1パッチ当たり計54回の測定を行った。

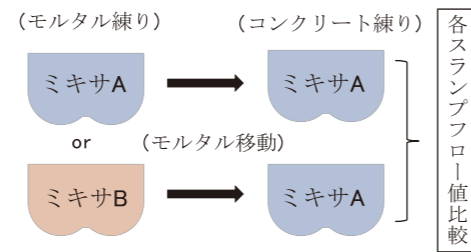


図-3 モルタル移し替え試験方法

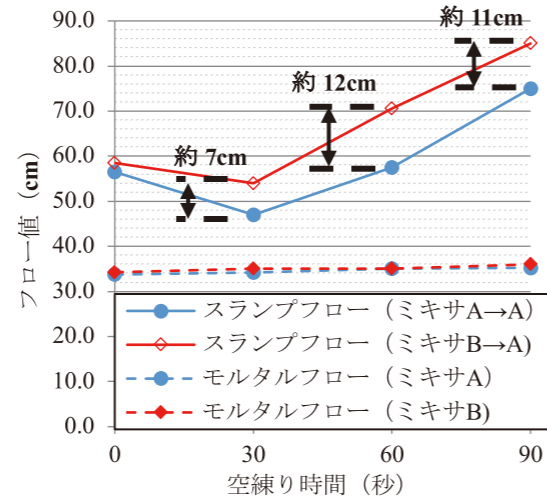


図-4 モルタル移し替え試験におけるフロー

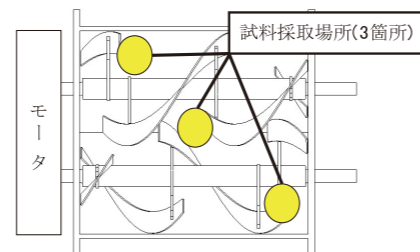


図-5 サンプルング箇所

(2) 実験結果および考察

ミキサごとの各空練り時間に対して測定した色吸光度の結果を**図-7**に示す。

各吸光度は、数値が大きくなるにつれて、着色箇所が多いことを示す。空練り時間の増加に伴ってミキサAでは吸光度が高くなり、炭酸カルシウムの着色箇所が多くなっている。一方ミキサBでは、空練り時間の増大に伴う炭酸カルシウムへの着色箇所の増加は確認できず、逆に炭酸カルシウムが着色した表面水を覆う結果となった。ミキサによって色吸光度の変化傾向が違うため、フロックの形成過程が異なることが推測される。

図-8は吸光度の結果に基づき考察したフロックの形成過程を模式化したものである。

ミキサAでは、空練り時間が増大すると細骨材の表面水がセメントに移りフロックを形成していることを示している。一方ミキサBでは、空練り時間が増大することで、セメント粒子が表面水を保持した細骨材の表面に付着しフロックを形成していることを示す。フロックの形成過程が異なるどちらのミキサでも、目視の結果から、空練り時間の増加につれてダマが多くなることは確認できた。

また、空練り時間の増加に伴って、各測定箇所のバラつきは小さくなっており、フロックが均一に形成していることが読み取れる。

3.2 セメントフロックの形成に関する実験

(1) 概要

セメントは加水されると水和反応によってセメント粒子の表面に正の電荷が発生して不安定となり粒子同士がくっついてフロックを形成する。そこで本報では、空練り時間に応じて、細骨材の表面水がセメント粒子に移動している影響を確認するため、Cryo-SEMを用いて、フロック形成量を定量化した。

測定方法は、空練りを行い作製したモルタル試料を練上がり直後に液体窒素を用いて瞬間冷凍を行い、その試料の切断面を、冷凍状態で観察することのできるCryo-SEMにて断面を250倍と500倍で観察する。同時に、250倍のSEM画像に対し、細骨材の主成分であるSiとセメントの主成分であるCaのマッピングも行うことで、細骨材とセメントの区別ができるようにした。

各ミキサで空練り時間は30, 90秒の2パターンとし、それぞれ250倍率のSEM画像から画像解析により、比表面積を算出した。フロックは、セメントの平均粒形以上とするため、15μm以上の直径を持つ粒子をフロックとして観察した。

(2) 実験結果および考察

各ミキサによる空練り時間に対するモルタルのSEM画像およびマッピング画像について**図-9**、また、画像から算出したフロックの比表面積の結果を**表-3**に示す。

前節の表面水移動の実験結果からも想定できる通り、

空練り時間が増大すれば細骨材の表面水による影響から、フロック形成が大きくなることで、比表面積差が生じることが確認できた。

また、500倍率のSEM画像からは、目視確認でもフロックの大きさが確認できる結果となった。

図-10は比表面積差の結果に基づき考察したモルタル中のフロックを模式化したものである

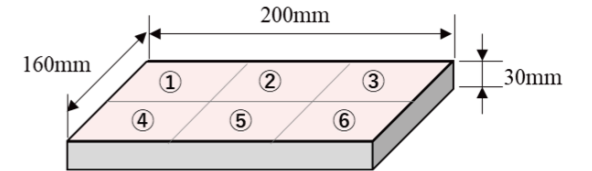


図-6 吸光度測定箇所

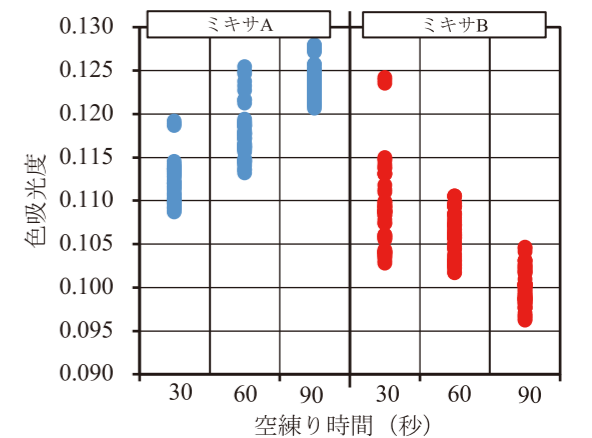


図-7 空練り時間における色吸光度

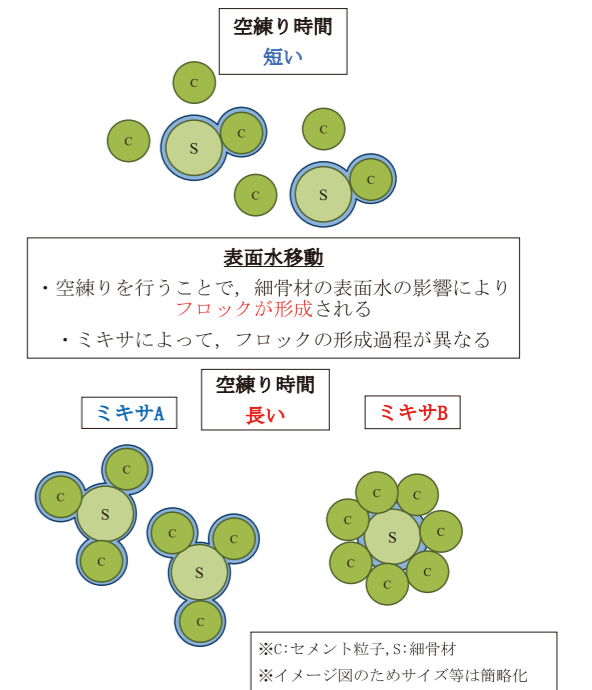


図-8 空練りによるフロック形成メカニズム

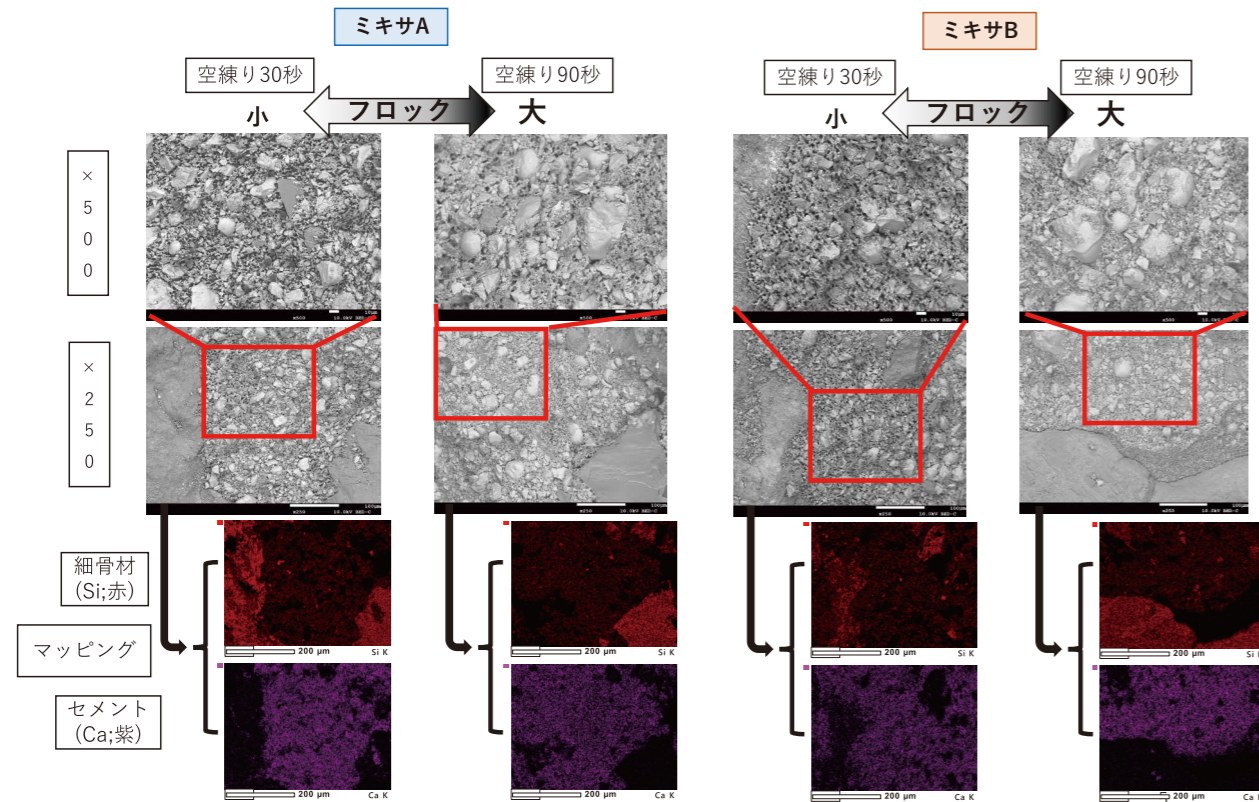


図-9 空練り時間におけるモルタルのSEM画像およびマッピング画像

3.3 混和剤吸着量に関する実験

(1) 概要

3.1および3.2から、細骨材の表面水の影響によりフロックを形成することが明らかとなった。そこで、本項では、空練り段階によるフロック形成が混和剤の吸着にどの程度影響を及ぼすのか確認するため、空練り時間に応じた混和剤吸着量の測定を行った。各材料の計量値は、表-1に示した基準配合から36L当たりの必要材料値を計算して作製したモルタルおよびフレッシュコンクリートを用いた。

遠心分離機で液相と固相に分離し、抽出した液相を熱分析することで、液相中の混和剤の残存量を測定した。

測定条件は、各ミキサそれぞれにおいて、空練り時間を0、30、90秒の3パターンとした。作製したモルタルおよびフレッシュコンクリートのモルタル分から分離したそれぞれの液相を採取して、各6回ずつ測定を行った。

(2) 実験結果および考察

ミキサごとの各空練り時間に対して作製したモルタルおよびフレッシュコンクリートからの混和剤残存量の結果を図-11に示す。各残存量の結果から、どちらのミキサにおいても、空練り時間が増加するに伴って、液相に残る混和剤が多くなる傾向にあることがわかった。そのことから、空練り時間が短い場合は、固相への混和剤吸着量が大きく、空練り時間が長い場合は吸着量が小さくなる結果を得た。混和剤が余ることで、後添加で見られるような、その後の流動性が向上すると考察できる。

図-12は混和剤吸着量の結果に基づき考察したフロックと混和剤の関係を模式化したものである。

表-3 フロックの比表面積

	比表面積 (1/m)	
	空練り 30 秒	空練り 90 秒
ミキサ A	24.66	19.44
ミキサ B	21.78	18.67

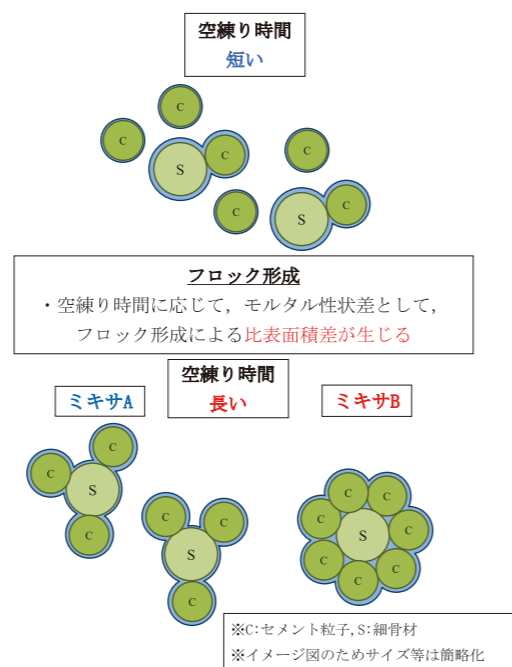


図-10 空練りによる比表面積差メカニズム

3.4 空練りが流動性に与える影響解明

各試験結果から、空練りを行うことにより、細骨材の表面水がセメント粒子と接触することでフロック形成され、比表面積が小さくなることで、混和剤吸着量が減少する結果を得ることができた。練混ぜ初期にフロックとなる量が多いと、本練りにおいて投入される水とセメント粒子が接する量が少なくなるため、先行吸着する混和剤量が減少したと考えられる。

以上の結果から、空練りの有無、空練り時間がモルタルの性状に影響を与えることが明らかとなった。特に、細骨材の表面水とセメント粒子によってフロック形成することで、混和剤の吸着量が増え、練混ぜ直後のフロー値が異なることから、フロック形成量をコントロールすることで、練混ぜ直後のスランプフロー値を制御できると推測する。

ただし、空練り時間を長くすることが重要ではなく、本練り時に投入される混和剤の吸着を受け入れる状態が空練りで整えられているか、が重要であると考えられる。

また、3.1で行った表面水移動の結果からもわかるように、ミキサによってフロック形成過程が異なることも明らかとなった。これらの結果から、このフロック形成における最適な状態を造るためには、例えばミキサの性能などが影響すると考えている。

4. まとめ

本研究で得られた知見について、以下にまとめる。

- 2軸強制練りテストミキサにおいて、フロー値では現れない、フロック形成量といったモルタルの性状差が、その後のコンクリートのスランプフロー値に大きく寄与している。
- 空練りについては、同じ配合・環境においてもモルタルの性状に影響を与えていることが確認できた。そのメカニズムとして、混和剤が投入される前に、細骨材の表面水とセメントの接触時間が増加することでセメント粒子がフロック形成されることにより、比表面積が小さくなり、混和剤吸着量が減少する。その余った混和剤がその後の練混ぜにおけるフレッシュコンクリートにおけるスランプフロー値の増加に寄与する。
- 練混ぜ機構による材料の動き方によって、空練り時のフロック形成過程が異なる。

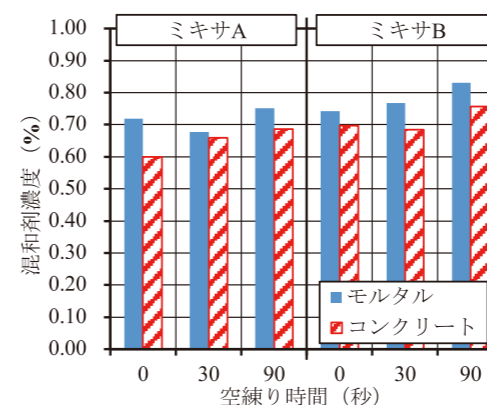


図-11 空練り時間における混和剤残存量

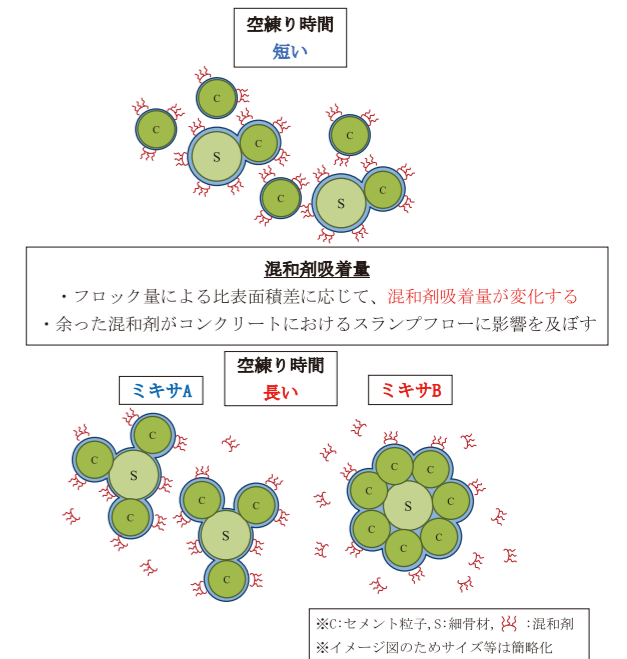


図-12 空練りによる混和剤吸着量差メカニズム

参考文献

- 安田和弘, 近松竜一, 十河茂幸: 高性能AE減水剤を用いた高流動モルタルの練混ぜに関する一実験, 土木学会第53回年次学術講演会, 1998.10
- 菅侯匠, 日比野誠, 大内雅博, 岡村甫: 高性能AE減水剤の作用効果に及ぼす練混ぜ方法の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.325-330, 1998.7
- 坂本恭裕, 川崎佑磨, 福山智子, 金侖美: 高強度コンクリートを対象とした空練りがモルタルフローに与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.1, pp.850-855, 2022.6

筆者紹介

SAKAMOTO Yasuhiro
坂本 恭裕
2012年入社
開発部 開発2課

廃石膏ボードを由来とする重金属類の不溶化特性を有した 土壌改良材の開発とその変遷

蓬莱 秀人

日工株式会社 技術本部

概要

石膏ボードは、耐火性や遮音性に優れ、しかも安価であることから、建築資材として広く普及している。そして、その生産量を反映して家屋の解体に伴って発生する石膏ボードの廃棄物（以下、廃石膏ボードと記載）が増大し、最終処分場が逼迫する懸念が顕在化しつつある。このような状況から、廃石膏ボードのリサイクル技術の開発が急務であると言われている。筆者らは、廃石膏ボードから半水石膏ならびにⅡ型無水石膏を製造する装置の開発を行い一早く市場に投入している。本稿では、それらの装置で製造した半水石膏やⅡ型無水石膏の利用先として多くの需要を見込むことができる土木用資材の土壌改良材にスポットを当て、当社における研究開発の背景とその足跡を辿る。とりわけ、加水することで硬化する半水石膏の特性が、軟弱地盤や泥土などの土壌改良材として有効であることと、半水石膏とⅡ型無水石膏の混合割合を変えることにより硬化時間を任意に調整することが可能な固化材としての有効性を検討している。続いて、この廃石膏ボード由来の半水石膏を母材とし、アルミナと酸化カルシウムとを豊富に含有している石炭灰と高炉スラグとを化学当量的にエトリンガイトの生成量が最大となるように配合した複合リサイクル材料を考案している。そして、この複合リサイクル材料が、土壌の改良材のみならず土壌汚染物質であるフッ素、六価クロム、カドミウム、鉛、ヒ素などの重金属類の不溶化剤として有効であることを明らかにしている。

キーワード: 重金属の不溶化剤, 土壌改良材, エトリンガイト, 石膏, 石炭灰, 高炉スラグ

1. はじめに

廃石膏ボードから半水石膏ならびにⅡ型無水石膏を製造する装置の開発経緯とその将来展望について、既刊のNikko Technical Report Vol. 1, No. 1, 2020.「半水石膏およびⅡ型無水石膏の製造装置の開発」でその詳細に触れている。本稿では、それらの装置で製造した半水石膏やⅡ型無水石膏の用途先として多くの需要を見込むことができる土壌の改良材ならびに重金属類の不溶化剤にスポットを当て、開発の背景とその足跡を辿る。

まず、「第2章 背景」では、石膏ボードが建築物の内装材として普及に至るまでの時代背景について概観する。そして、普及後に必ず到来する石膏ボードの廃棄物の取り扱いに関する法規制の経緯と廃石膏ボードの再資源化の動向について俯瞰している。

「第3章 石膏の種類とその特徴」では、石膏の生成起源による分類を試みた上で、物質としての本質である結晶構造の違いによる分類の概要ならびにその特徴について触れている。

「第4章 廃石膏ボード由来の土壌改良材」では、廃石膏ボードから製造した半水石膏が、土壌の改良材や泥土の固化材として極めて有効であることについて触れる。そして、加水することで硬化する半水石膏の特性（水硬性）が、土壌の改良材として有効ではあるものの、その硬化時間が速すぎると、

逆にその作業性が損なわれる恐れもある。そこで、半水石膏とⅡ型無水石膏の混合割合を変えることで、その施工作業に最も即した硬化時間を任意に調整することができる土壌の改良材を検討している。

「第5章 廃石膏ボード由来の不溶化剤」では、廃石膏ボードから製造した半水石膏を母材とする複合リサイクル材料が、重金属類の不溶化剤としての有効性についてスポットを当てる。まず、エトリンガイトが重金属類の不溶化に極めて有効であることと、それを構成している鉱物がアルミナ、酸化カルシウム、硫酸カルシウムであることに着目している。そして、化学当量的にエトリンガイトの生成量が最大となるように、それらを豊富に含んでいる産業副産物である石炭灰と高炉スラグとを廃石膏ボードから製造した半水石膏に最適配合した複合リサイクル材料を考案している。その上で、この複合リサイクル材料が、土壌の改良材のみならず土壌汚染物質であるフッ素、六価クロム、カドミウム、鉛、ヒ素などの重金属類の不溶化剤として極めて有効であることを明らかにしている。

なお、土壌汚染対策法の概要とその浄化工法ならびに当社における土壌浄化プラントの開発の変遷と将来展望に関しては、既刊のNikko Technical Report Vol.4, No.1, 2023「省エネルギー型油汚染土壌浄化プラントの開発とその変遷および将来展望」でその詳細について報告している。

2. 背景

石膏ボードは、耐火性や遮音性を有し、しかも、安価で施工性に優れていることから、家屋を始めとする多くの建築物の天井や壁などの内装材として今や世界に広く普及している。我が国では、高度経済成長期からの都市近郊部における住宅不足を背景に、新築住宅の建設戸数が急激に増大することと相まって、日本建築古来の土壁に代わる石膏ボードが壁材や天井材として普及を始める。そして、欧米の一般家屋に比べて新築材を多用した現代の日本家屋の耐用年数が30年程度と短いことにより、新築から解体までのインターバルが短くなり、欧米に比べて多くの廃石膏ボードを排出するに至っている。

廃石膏ボードは、その取扱いを誤れば有毒な硫化水素を発生し、土壌の環境基準を超えるフッ素が溶出する恐れがあることから、管理型の最終処分場に処分することが法律で厳しく規制されている。このことから、各自治体における管理型最終処分場の残容量が逼迫すると共に、廃石膏ボードの処分費用が高騰し、これと併せて不法投棄が増大するなどの弊害が懸念されている。これらのことを踏まえて、廃石膏ボードを農業用肥料や土壌の改良材としてリサイクルする機運が醸成されつつある。

以下では、石膏ボード普及の歴史的背景を俯瞰した上で廃石膏ボードの再資源化の必要性について法規制の側面から目を向ける。

2.1 歴史的背景

戦後間もない1950年に勃発した朝鮮戦争によるアメリカ軍からの特需を発端として、我が国は、1955～1973年の18年間にわたり年率10%を超える高度経済成長を遂げる。そして、そのことに応じるようにして欧米の近代的な衣・食・住文化が急速に日本社会へ浸透し生活様式が欧米化し始める。

農業や林業などの一次産業よりも、生産性がより高い重厚長大型の重化学工業を始めとする二次産業が、太平洋ベルト地帯で急速に拡大成長して行く。事業の経営者は、不足する労働力を農山村部に求め、農山村部で一次産業に従事していた多くの労働者は、雇用と豊かさや利便性を求めて都市部へと移り住むようになる。このことに加え、欧米の生活文化に憧れるようにして核家族化が進むことにより、世帯数が急激に増大して行く。たちまち都市近郊部での住宅不足が顕在化し社会問題へと発展して行く。

国は、不足する住宅供給量を増やすために、急ピッチで住宅の建設を推進した。これらの住宅は、一部洋風を取り入れた和洋折衷の文化住宅に代表されウサギ小屋とも揶揄された集合住宅などである。そして、この建設ブームによる旺盛な木材需要に応えるために、成長が速い杉や檜などの針葉樹の植林を積極的に推進する政策を採る。しかしながら、成木となるまでには数十年を要することから、北米やカナダから安価

な木材を緊急輸入するに至る。このとき、国内林業の保護政策を採らなかったことから、安価な海外産木材で国内需要が慢性的に満たされ、今や成木となった針葉樹林は建材として利用されることはなく、春先に大量の花粉を撒き散らして花粉症患者を増大させている。

住環境においては、畳文化から椅子文化へと欧米の生活スタイルが持てはやされるようになり、住居の構造や使用建材に至るまで、石膏ボードのような合理的、実用的、経済的な資材、化学素材や新しい施工法を用いたいわゆる新築材が好まれるようになる。元来、日本建築は、瓦屋根と木組み造りに土壁や木と紙からなる建具との組み合わせで、四季折々の気候変化と日常生活における実用性とを上手く調和させているのが特徴でもある。

日本家屋の象徴でもある土壁は、割った竹を葦盤目状に編み上げた竹小舞を下地とし、粘土質の壁土に稲わらなどを（すき）として水で練りこんで、それを左官が鏝で塗り上げる複数の工程に渡る工法である。そして、この土壁工法が高度経済成長期を境にして衰退し、石膏ボードを用いた乾式工法に置き換わって行く。

この石膏ボードは、土壁に比べて施工性が極めて高く、のこぎりやカッターナイフで容易に切断加工が可能である。そして、柱間の貫や胴縁を心材とし、石膏ボードを直接釘などで打ち付けて固定することができる。その上で、表面に壁紙を貼ることにより、見栄えの良い壁面に仕上げることができる。

時を同じくして、高度経済成長の負の遺産として公害が表面化し社会問題となる。光化学スモッグ、酸性雨、四日市ぜんそく、イタイイタイ病、水俣病などのキーワードで当時の悲惨な状況を想像することができる。大気汚染、水質汚濁、土壌汚染、騒音、振動、地盤沈下、悪臭などの典型7公害と呼ばれる住環境の悪化が国民の健康を蝕んで行った。このような状況から、遅きながら1970年の臨時国会いわゆる公害国会で、公害対策の14法案が可決することによって、国は、経済優先の政策から決別するのである。

大気汚染防止法では、硫黄酸化物や窒素酸化物の排出基準が強化されることにより、ばい煙発生施設に排ガス浄化装置として脱硫装置や脱硝装置が設置されるようになる。石炭や重油などの安価な燃料は、多くの硫黄を含んでおり、燃焼することにより硫黄酸化物を排出することになる。脱硫装置では、排ガスに含有する硫黄酸化物を化学反応により除去している。この硫黄酸化物の除去には多様な方法が存在するが、石灰（炭酸カルシウム： CaCO_3 ）で硫黄酸化物を中和する石灰-石膏法が主流を占めている。このときに、排ガス中の硫黄酸化物と石灰とが反応して排煙脱硫石膏（二水石膏： $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ）が析出する。これは、別名化学石膏とも呼ばれ、今や石膏ボードの主要な原材料として供給されるようになっている。なお、石灰石は、我が国で自給可能な鉱物資源で、その鉱脈は国内各地に存在し賦存量は膨大である。

2.2 廃棄物の資源循環

我が国は、大量生産・大量消費・大量廃棄の社会システムの下、高度経済成長を遂げてきた。そして、資源に乏しい我が国が持続的に経済成長して行くためには、限りある資源の3R, Reduce(減らす), Reuse(再利用), Recycle(再資源化)を徹底させ循環型社会を早く構築して行く必要がある。

環境省の1995年度の統計によると、全産業廃棄物4億トンに占める建設廃棄物の割合は8,000万トンの2割程度であるものの、全産業廃棄物の不法投棄量38.2万トンに占める建設廃棄物35.3万トンの割合は9割以上に上ることを指摘している。このような課題を解決すべく「建設工事に係る資材の再資源化等に関する法律」いわゆる建設リサイクル法が2000年(平成12年)5月31日法律第104号として施行される。同法では、コンクリート塊、アスファルト・コンクリート塊、建設発生木材、鉄くずの4品目を特定建設資材廃棄物として指定している。そして、一定規模以上の建設工事に関して、分別解体による特定資材の再資源化を義務付けている。このことにより、建設廃棄物の発生量の抑制と減量化を推進すると共に、分別解体により建設資材の再資源化や再利用を促して、適正な処理が行われていることを監視する枠組みとなっている。

加えて、建設リサイクル法施行から20年が経過した環境省の2020年度の統計によれば、特定建設資材廃棄物の年間発生量の中で、コンクリート塊が3,500万トン、アスファルト・コンクリート塊が2,500万トン、建築廃木材が500万トン排出されている。そして、これらのリサイクル率は、アスファルト・コンクリート塊が99.5%と最も高く続いてコンクリート塊が99.3%、建築廃木材が96.2%となっている。さらに、これらのリサイクル用途は、アスファルト・コンクリート塊が、リサイクル合材および路盤材として、コンクリート塊は、路盤材として、廃木材は、木材チップなどの燃料として再利用されている。

また、同法により分別解体が義務化されたことに伴い、従来は重機でミンチ解体されて建設混合廃棄物として扱われていた廃木材や廃石膏ボードなどが分別されるようになった。しかしながら、分別解体の結果、最終的に残される建設混合廃棄物が減少傾向に転じているものの、中間処理業者でどのように分別が行われ、再資源化施設もしくは、最終処分場へ、どのように搬出されているか統計的に実態が整理されていないのが現状で、そのリサイクル率は63.2%に留まるものと推計されている。

本稿で研究対象となる廃石膏ボードの発生量は、一般社団法人の石膏ボード工業会の2022年度の統計資料によると、国内の石膏ボード生産量が年間400万トンに上り、そのことを反映してか、家屋の解体に伴い発生する廃石膏ボードも年間120万トンを超え、やがては400万トンに近づいて行くものと予測されている。

ただし、廃石膏ボードの発生量がコンクリート塊に比べて1/30の120万トンと少ないこと、利用先を始めその再利用技術の確立が未熟であること、などから特定建設資材廃棄物への

指定が見送られている。このため、現在のところ廃石膏ボードをリサイクルする法的強制力が伴わないことから、原則的に最終処分するしか術がなく、各自治体における管理型最終処分場が逼迫し、処分費用の高騰に伴う不法投棄などの弊害を招く恐れが懸念されている。

この管理型最終処分場への処分は、廃石膏ボードの処分方法が、廃棄物の処理と清掃に関する法律(以下、廃掃法と記載)により厳しく規制されていることに起因している。法規制の根拠としては、石膏ボードが有毒な硫化水素(H₂S)の発生因子となりうることで、土中に生息する硫酸塩還元菌の分解作用を受けて硫化水素が発生することが知られている。その条件として、①:硫酸塩還元菌の生息、②:水の存在、③:30℃前後の温度、④:酸素の無い嫌気状態、⑤:硫酸塩還元菌の代謝エネルギー源となる紙などのセルロースや糖質の存在など、①～⑤の条件が全て揃うことにより、硫化水素が発生することが知られている。

このような背景から廃掃法では、廃石膏ボードの処分に関して、管理型の最終処分場に埋め立てることになっていた。ところが、1998年(平成10年)7月16日付の環水企第299号環境庁水質保全局長通知の規制緩和の一環で、廃石膏ボードから紙を取り除いた石膏紛に関しては、硫化水素発生因子の栄養源としてのセルロースが除去されることにより、硫化水素の発生が無くなるとの知見から、ガラスや陶磁器類と同様の安定型の最終処分場への埋め立てに規制が緩和された。分離した紙に関しては、製紙会社へのリサイクルや焼却処分が実施されている。

特に注目に値することは、最終処分費用が管理型よりも安定型の方が安価である理由から、廃石膏ボードの中間処理業において新しいビジネスモデルが創出されたことである。中間処理業者は、石膏ボードの新築端材や分別解体品を従来通りの管理型最終処分費用で引き受け、紙と石膏とを分別して、石膏のみを安定型に最終処分することで差益が生まれる。この差益を得るために石膏ボードの紙と石膏とを分別するための多様な分別装置が開発され社会実装されて行った。

しかしながら、同ビジネスモデルが中間処理業者の間で持てはやされたのは東の間であった。国立環境研究所が実施した研究¹⁾によると、安定型に最終処分した石膏紛であっても微量の紙の繊維(セルロース)や接着剤としての糖質が残留しており、これが栄養源となり有毒な硫化水素を生成することを明らかにしている。このことを受けて、2006年(平成18年)6月1日付け環産発第060601001号環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部長通知「廃石膏ボードから付着している紙を除去したものの取り扱いについて」によって、規制緩和措置が解除され、例えば紙が除去された良質な石膏紛であっても管理型に最終処分するように再び規制が強化される。

管理型と安定型の処分費用の差益を得ていた廃石膏ボードの中間処理業者は、たちまち成す術を無くしたことは容易に

想像できる。このことに端を発し、廃石膏ボードから紙を除去した石膏紛を再生資源として他の用途に活用する新たなビジネスとしての機運が民間主導で醸成され始める。

ただし、廃石膏ボードの本来のリサイクルとしては、石膏ボードの原材料として再利用する「ボードtoボード」が理想ではあるが、石膏の流通量全体を勘案した場合、新規石膏ボードの原材料としてリサイクルすると、たちまち流通の上流側に位置する排煙脱硫石膏の行き場が失われてしまう。したがって、「ボードtoボード」に替わる新たな用途を創出する必要がある。筆記具のチョークや運動場の白線、医療用ギブスなど身近な製品でも石膏が多く利用されているが、年間発生量が120万トンであることから勘案して、多くの需要が見込める農業用肥料や土木用資材などへのリサイクルが妥当であると考えられる。この場合、硫化水素の発生やフッ素の溶出に留意する必要がある。

一方で、国内に豊富に賦存する石灰(炭酸カルシウム)は、第一段階で、燃焼排ガスの硫酸化合物除去のための中和剤として利用し、第二段階で、この時の副産物として生成する排煙脱硫石膏を石膏ボードの原材料として再利用し、第三段階で、建材としての役割を終え不要となった廃石膏ボードを農業用肥料や土木用資材として再々利用して、最終的には土に戻すことができる。このように、石灰はカスケード利用が可能な極めて有用な国産資源であると言える。

3. 石膏の種類とその特徴

本章では、石膏の生成起源ならびに物質の本質でもある結晶構造の違いによる分類に関して、その概要と特徴について俯瞰する。

3.1 石膏の生成起源による分類

石膏は、その生成の起源から「天然石膏」と人工的に副産される「化学石膏」ならびに廃石膏ボードから製造した「リサイクル石膏」に大別することができる。

3.1.1 天然石膏

天然石膏は、46億年前の太古の原始地球にまでその起源を辿る必要がある。原始地球は、地球全域にわたる猛烈な火山活動により、噴煙と一緒に亜硫酸ガス、水蒸気、二酸化炭素などが地球内部から大量に放出されていた。300気圧にも上る高温高压の大気には、まだ酸素(O₂)が存在せず、33%にも及ぶ二酸化炭素(CO₂)を始め、窒素(N₂)、水蒸気(H₂O)、亜硫酸ガス(SO₂)その他のガスで満ち溢れていた。

やがて地球全体が冷え始めると、大気中の水蒸気が凝縮し、それに伴って亜硫酸ガスが溶け込むことにより大量の硫酸の雨となって大地を浸食して行った。このとき、大地からカルシウムを始めとする多様な鉱物が溶出して海洋に流れ込み、その中のカルシウムイオン(Ca⁺)と、硫酸イオン(SO₄²⁻)とが結合し

て二水石膏(CaSO₄・2H₂O)を析出し、海底に沈んで石膏の地層を形成したものと考えられている。後に、この地層が地殻変動により地上に隆起したことで、天然石膏の鉱脈として石膏を採掘できるようになった。

3.1.2 化学石膏

化学石膏は、化学工業の製造プロセスで副次的に生成するもので、排煙脱硫石膏やリン酸石膏、チタン石膏、フッ酸石膏などがある。

排煙脱硫石膏は、火力発電所などの燃焼排ガスに含まれる硫酸化合物を除去するときに、その中和剤として炭酸カルシウム(CaCO₃)や水酸化カルシウム(Ca(OH)₂)が用いられ、その中和物として二水石膏(CaSO₄・2H₂O)が生成する。硫酸化合物は、石炭や石油などの化石燃料に含有している硫黄分が燃焼することにより一酸化硫黄(SO)、二酸化硫黄(SO₂)、三酸化硫黄(SO₃)、三酸化二硫黄(S₂O₃)などを生成し、これらを総称してSO_xと呼んでいる。これらのSO_xは、酸性雨や光化学スモッグなどの大気汚染を招き、公害病である四日市ぜんそくなどの健康被害を引き起こす。このことから、大気汚染防止法により、ばい煙発生施設から排出される硫酸化合物の排出量や排出濃度が厳しく規制されている。

リン酸石膏とチタン石膏は、それぞれリン鉱石やチタン鉱石から硫酸を用いて有用物を単離するが、単離後の硫酸(H₂SO₄)を中和する目的で石灰(CaCO₃)が利用され、その中和物として二水石膏(CaSO₄・2H₂O)を得る。

フッ酸石膏は、蛍石(フルオロライト:CaF₂)からフッ酸(HF)やフッ素樹脂の原材料となるフッ素(F)を硫酸(H₂SO₄)により抽出した後、その中和物として二水石膏(CaSO₄・2H₂O)が析出する。

3.1.3 リサイクル石膏

建設リサイクル法の施行に伴い、一定要件を満たす建築物は、分別解体を行うことが義務付けられることは既に述べている。特に、家屋の内装材として多用されている石膏ボードは、環境省の「廃石膏ボード現場分別解体マニュアル」に基づき分別解体することが推奨されている。そして、分別解体した廃石膏ボードは、中間処理業者に持ち込まれて紙や不純物を取り除いて粉碎され、リサイクル石膏となる。

それらの用途先として、第2章でも触れているが、石膏ボードに循環利用すること、すなわち、廃石膏ボードから石膏ボードを再生することが考えられる。しかしながら、石膏ボードの原材料として化学石膏である排煙脱硫石膏が6割近くを占め、年間製造される400万トンの石膏ボードの内、実に240万トンが化学石膏由来となっている。このことは、石膏ボードが排煙脱硫石膏の受け皿として受給バランスを調整する極めて重要な役割を担っていることになり、現在の産業構造において無くてはならない存在となっている。

以上のことより、廃石膏ボードを回収して再び石膏ボードにリサイクルすると、たちまち上流側の排煙脱硫石膏が行き場を失い溢れてしまう。このことから、廃石膏ボード由来のリサイクル石膏は、石膏ボードの再生以外で多くの需要を見込むことができる農業用肥料や建築ならびに土木用資材としての再利用が期待されている。

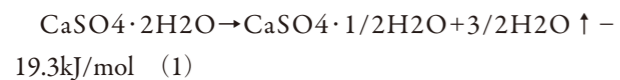
なお、廃石膏ボードから製造したりサイクル石膏を農業用肥料や土木用資材として有効利用する場合には、フッ素の溶出に留意する必要がある。このことは、フッ化カルシウム(CaF₂)が微量に混入している排煙脱硫石膏が、石膏ボードの原材料に使用されていることに起因している。特に、石炭焚き火力発電所においては、燃料である石炭に螢石(フッ化カルシウム)などの鉱物が微量に混入しており、石炭が燃焼するときに分解してフッ酸(HF)が生成し、燃焼排ガスに混入している。これが、硫酸化合物と一緒に石灰で中和処理されるために、排煙脱硫石膏にフッ化カルシウム(CaF₂)として微量に混入してくるものと推察される。

3.2 石膏の結晶構造の違いによる分類²⁾

石膏は、その結晶水の数により二水石膏(CaSO₄・2H₂O:硫酸カルシウム2水和物)、半水石膏(CaSO₄・1/2H₂O:硫酸カルシウム1/2水和物)、無水石膏(CaSO₄:硫酸カルシウム)の3種類に大別することができる。さらに、結晶構造の違いから半水石膏は α 型と β 型に、無水石膏は、Ⅲ型、Ⅱ型、Ⅰ型に分類することができる。加えて、無水石膏のⅢ型には α 型と β 型が存在することが確認されている。これらのことから、石膏は結晶水の数ならびに結晶構造の違いから7種類に分類することができる。

3.2.1 二水石膏(CaSO₄・2H₂O)²⁾

二水石膏は、自然界では非常に安定しており、針状の結晶構造が特徴である。また、多少の水に溶解するが化学的には水とほとんど反応しない。この二水石膏を130～180℃の温度管理の下、加熱処理(脱水反応)することにより、水硬性の半水石膏(硫酸カルシウム1/2水和物)を生成する。そのときの熱化学式を式(1)に示す。



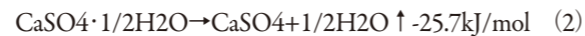
なお、右辺のマイナス表示は吸熱反応を示している。

また、石膏の耐火性に関しては、質量の20.9%の結晶水を保持する二水石膏(CaSO₄・2H₂O)が石膏ボードの母材となっている。この結晶水が脱離・蒸発するときに式(1)で示す大量の熱を吸収して温度上昇を抑制するために、耐火材として優れた特性を有している。

3.2.2 半水石膏(CaSO₄・1/2H₂O)²⁾

半水石膏は、加水すると水和反応により硬化する特性(水硬性)を有している。そして、先述の通り α 型と β 型が存在して

いるが、 α 型は緻密な構造で粒子密度が高く、水硬時の強度が β 型よりも大きいことから医療用のギブスなどに用いられている。一方の β 型は、ポーラス状の空隙があることから粒子密度が α 型よりも小さく、石膏ボードなどの建築資材として利用されている。これら半水石膏を180℃以上で加熱処理することにより、結晶水が外れた無水石膏(硫酸カルシウム)を生成する。その熱化学式を式(2)に示す。



3.2.3 無水石膏(CaSO₄)²⁾

無水石膏は、結晶構造の違いからⅢ型、Ⅱ型、Ⅰ型が存在し、Ⅲ型にはさらに α 型と β 型とが存在する。Ⅲ型無水石膏は、180～350℃の範囲で加熱することにより生成し、空気中の湿気を吸って半水石膏に戻る。水への溶解度は半水石膏よりも大きな値を示す。したがって、半水石膏にⅢ型無水石膏が混在している場合には、Ⅲ型無水石膏が半水石膏に転化し終わるまでは、半水石膏は二水石膏に転化することができない。Ⅱ型無水石膏は、350～1,000℃の範囲で加熱することで得られ、加水しても半水石膏に戻らないことから別名不活性無水石膏と呼ばれている。Ⅰ型無水石膏は、1,100℃以上の加熱により生成することができる。さらに、大気圧下でこれ以上温度を上昇させると、酸化カルシウム(CaO)と二酸化硫黄(SO₂)とに熱分解する。

4. 廃石膏ボード由来の土壌改良材

本章の第1節では、廃石膏ボードから紙と異物を除去して製造したりサイクル石膏に、加熱処理を施すことで半水石膏(CaSO₄・1/2H₂O)ならびにⅡ型無水石膏(CaSO₄)を製造し、これらが有する水を加えると硬化する特性(水硬性)が、土壌の改良材として有効であることを検討している。そして、第2節では、半水石膏の硬化速度が極めて速いことによるハンドリング性の低下を改善するために、硬化速度が遅いⅡ型無水石膏を添加することに着目し、これらの混合比率と硬化速度との関係を検討し、土壌改良材としての有用性を明らかにしている。

なお、本章の研究で用いた半水石膏ならびにⅡ型無水石膏の試料は、筆者らが開発した半水石膏及びⅡ型無水石膏の製造装置で生産したものである。そして、粘土試料は、成分調整された工業製品であるMCクレー(カオリン)を用いている。さらに、供試体に使用する混練水は、水質の違いによる強度発現への影響が最も少ないと考えられる蒸留水を用いている。

4.1 リサイクル石膏から製造した半水石膏の土壌改良材としての有効性

本節では、リサイクル石膏から製造した半水石膏が、土壌の改良材として有効であることを明らかにするために、同半水石膏をセメント安定処理土に適用している。その際、半水石膏が

加水から数分で硬化することと高い吸水性とを有していることから、より高い含水比の泥土への適用が有効であると考えられる。このことから、高含水比な粘土地盤への適用性を視野に入れ、含水比を120%と140%に試料調整した2種類の粘土に対して一軸圧縮試験を行い、半水石膏の地盤工学的有意性を検討している。これらの既往の研究として、亀井らが実施した検討報告³⁾⁴⁾などがある。

このときの安定材としては、強度特性や経済性を配慮して高炉セメントB種(JIS R 5210)を使用している。

4.1.1 供試体の作製と実験

本節の実験は、安定処理土の締固めを行わない供試体作製方法⁵⁾に準拠して、セメント安定処理土供試体を作製している。この方法は、高含水比で多量の安定剤の添加を必要とする粘性土の改良を目的としたものである。

配合条件は、含水比120%および140%の軟弱粘性土を安定処理することを想定し、含水比(W/S, W:Water, S:Soilの質量を表す)を120%と140%の2種類とし、セメント添加量(C/S, C:Cementを表す)を10%としている。また、今回対象とした土に半水石膏を混入した際にモールドに打設可能かを検討し、半水石膏混入率(B/S, B:Basaniteを表す)として、W/S=120%の場合には0%、5%、10%、15%、20%の5配合を、W/S=140%の場合には0%、10%、20%、30%、40%の5配合を設定している。

供試体は、粘土試料であるMCクレーに混練水とセメントを添加して所定の含水比とし、半水石膏が均一に分散するようにミキサーで攪拌している。

完成した供試体は、含水比、湿潤密度の測定を行い、鋳鉄製のモールド($\phi=50\text{mm}$, $H=100\text{mm}$)に打設している。そして、モールドに打設した供試体の乾燥を防ぐためにポリエチレン製の袋で被い、恒温室(20±2℃)で24時間養生している。その後、モールドから供試体を取り出し、ポリエチレン製のケースに入れ、再び恒温室(20±2℃)で所定の養生期間(Tc=28日)まで気中養生し、所定の養生日数を経過した供試体に対して一軸圧縮強度試験を実施している。

4.1.2 実験結果および考察

種々の半水石膏混入率(B/S)に対する代表的な応力-ひずみ曲線を図-1⁶⁾と図-2⁶⁾に示す。図-1は、W/S=120%、図-2は、W/S=140%の場合である。いずれのB/Sにおいても応力値は、軸ひずみ量の増加に伴って顕著な立ち上がりを示している。ここで、B/S=0%の応力-ひずみ曲線に着目すると、W/S=120%の場合には、応力値は軸ひずみ量1.5%程度においてピーク値230kN/m²に達し、軸ひずみ量が2.0%程度を超えると急激に減少している。W/S=140%の場合でも、応力値は軸ひずみ1.0%程度でピーク地180kN/m²に達した後、急激に減少する傾向を示した。

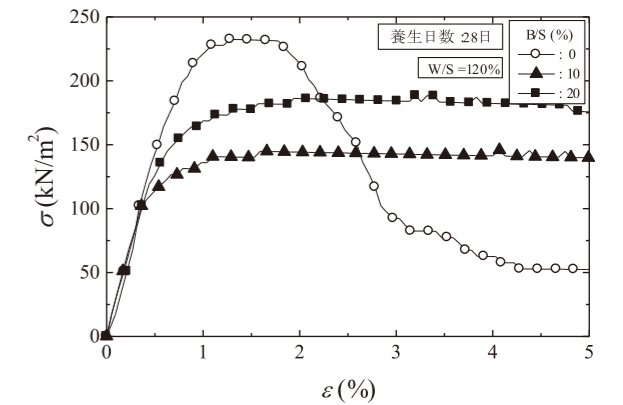


図-1 W/S=120%
半水石膏混入率に対する応力-ひずみ曲線⁶⁾

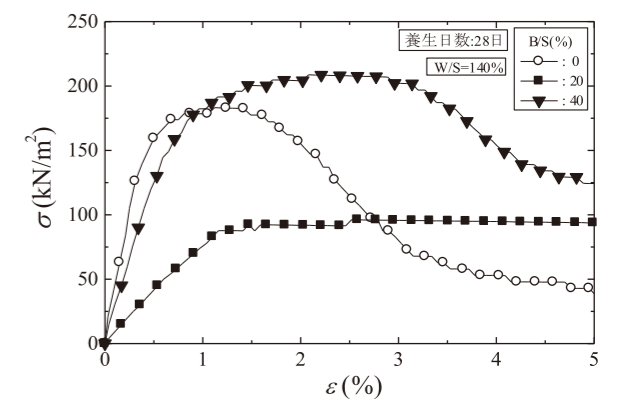


図-2 W/S=140%
半水石膏混入率に対する応力-ひずみ曲線⁶⁾

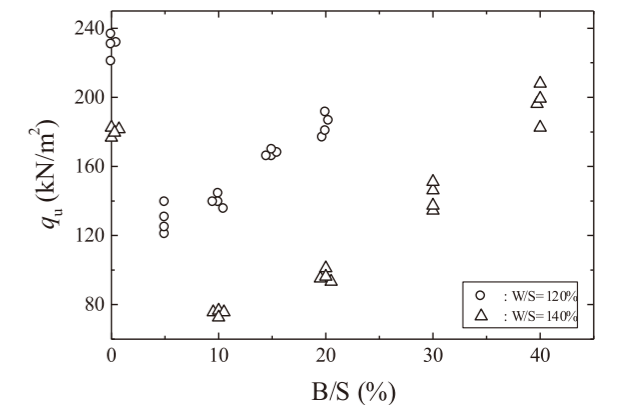


図-3 一軸圧縮強さと半水石膏混入率との関係⁶⁾

一方、半水石膏を混入した場合の応力-ひずみ曲線に着目すると、応力値に明瞭なピークが認められなかった。W/S=140%でB/S=40%の場合には軸ひずみ量が3.0%を超えると応力値に低下が認められるが、他のB/Sの試料においては、応力値が最大値に達した後も、その値は軸ひずみ量の増加に伴って減少していない。このことは、地盤の靱性が増大し、その耐久性が高くなることを示唆している。すなわち、半水石膏を混入することによって、粘り強い地盤材料となることが明らかとなった。この点に関しては、半水石膏量とエトリンサイト生成量との間に密接な関係(半水石膏量の増加に伴うエトリンサイト生成量の増加)があるものと考えられる。

次に一軸圧縮強さ(qu)の大きさに着目すると、B/Sが小さい場合には、セメントのみを添加した場合(B/S=0%)よりqu値が低下する結果となった。しかしながら、半水石膏を添加する場合に限ると、B/Sの増加に伴ってqu値が増大しており、W/S=140%、B/S=40%の場合には、セメントのみの場合より大きなqu値を有することがわかる。

qu値とB/Sの関係を明瞭に表すために、qu値とB/Sの関係を図-3⁶⁾に示す。W/Sの違いによらず、B/S=5~10%程度の場合には、qu値はB/S=0%の場合と比較して急激に減少している。しかしながら、さらにB/Sを増加させると、その増加に伴ってqu値がほぼ直線的に増大して行くことが判る。とくに、W/S=140%の場合には、B/S=40%においてqu値がB/S=0%のqu値の1.1倍程度まで増加している。

このことは、軟弱地盤を安定処理する際に、少量の半水石膏を混入する場合はセメントによる強度増加を抑制するが、より多くの半水石膏を混入することによってqu値を効率よく改善できる可能性を示唆している。また、石膏は吸水性が高いためB/Sの増加に伴って自由水が減少することによっても強度が高くなるものと考えられる。今回の実験結果から、特に高含水比を有する粘性土に対しては、より高いB/Sが可能となることから、より大きなqu値の発現が期待できる。一方、他の処理方法によって作製された半水石膏を用いた既往の実験結果においても、B/Sの増加に伴ってqu値が増加する傾向が得られている³⁾⁴⁾。

半水石膏混入による強度低下の主要因としては、石膏の混入によってセメントの水和反応が阻害されていることが考えられる。セメントを構成しているクリンカー鉱物の一つにアルミネート相(C₃A)があるが、このアルミネート相は、水との反応が急激で瞬時に大量の熱を放出し硬化するという性質を有している。通常、このようなアルミネート相の水和熱を抑制するために、セメントの製造過程において、凝結遅延剤として石膏が添加されている⁷⁾。本節の研究で混入した半水石膏も、セメントの製造過程で用いられているように凝結遅延剤として働き、アルミネート相の硬化を過剰に抑制し、強度減少を引き起こしたものと推察される。このような一軸圧縮強さの低下に対する対応策としては、使用するセメントのアルミネート相の量を低下させる方法が考えられ、例えばアルミネート相の量を低下させた耐硫酸塩ポルトランドセメントの使用などが考えられる。

以上のことから、セメント安定処理土作製時には、半水石膏が吸水し二水石膏化することによって、自由水が減少する。B/Sの増加に伴って、このようなメカニズムで自由水が減少し、その結果強度が増加することも推察される。したがって、リサイクル石膏から製造した半水石膏は、高含水比の軟弱地盤を改良する際に用いることにより、廃石膏を大量に消費できることから廃石膏処理問題の解消に繋がるとともに、混入率の増加に伴って強度の増加が見込めると言う地盤工学的な有意性の両面から、非常に有効であると推察される。



写真-1 本節の実験で用いたW/S=140%のMCクレ-⁸⁾

表-1 本節の実験で適用した硬化時間の評価⁸⁾

硬化指標	試料の硬化状態
レベル1	流動性がある
レベル2	流動性はないが水分が多く簡単に解れる
レベル3	湿り気があり手で塊を崩すことができる
レベル4	指で押さえると少し変形する
レベル5	指で押さえても変形しない

4.2 硬化時間を任意に調整可能な土壌改良剤

リサイクル石膏に加熱処理を施すことにより製造した半水石膏を軟弱地盤に適用させる研究事例⁹⁾では、半水石膏の硬化速度が速いことからトラフィカビリティの改善が早期にはかれるなどの有意性が認められている。しかしながら、その半水石膏の硬化速度が極めて速い場合、逆に作業性に制約を及ぼす場合もある。このことに鑑みて本節では、II型の無水石膏の水和反応速度が半水石膏に比較して遅いことに着目して、リサイクル石膏由来の半水石膏とII型無水石膏との混合割合を変化させることにより、軟弱地盤を想定したMCクレ- (カオリン)の硬化時間との関係を検討し、その土壌改良材としての有効性を明らかにしている。

4.2.1 供試体の作製と実験

本節の実験では、半水石膏を高含水比な軟弱地盤に土壌固化材として適用する場合を想定して、質量50gのMCクレ-に加水を行いW/S=120%、140%、160%、180%の4種類の含水比に調整している。加水は試料のpHや混入イオンに影響を及ぼす可能性が少ないものと考えられる水温15±2℃の蒸留水を用いている。W/S=140%に調整した試料の状態を写真-1⁸⁾に示す。各含水比に調整した試料に対してB/S=10%、20%、40%の配合を設定している。

次に、硬化時間が速い半水石膏と硬化時間が遅いII型無水石膏の混合割合(A/B、A: Anhydrite(II型無水石膏)を表す)とその硬化時間との関係を検討するためにA/B=0%、10%、20%、40%の配合を設定している。また、試料として質量50gのMCクレ-に加水を行いW/S=100%、120%、140%、160%、180%の5種類の含水比に調整している。そして、これら5種類の試料に対して添加量(A+B)/Sを10%に設定している。

なお、硬化時間の評価に関しては、簡易的にしかも瞬時に評価可能な指標を検討する必要がある。表-1⁸⁾は試料の硬化時間を簡易的に評価するために、筆者らが本節の実験で考案した指標である。このことは、半水石膏の硬化時間が数分から数十分で完了する 경우가多く、試料の調整や硬化度の評価に一軸圧縮試験のように時間を要する測定は適切ではないと考えられたからである。また、半水石膏などの硬化時間の測定に、この指標を適用させても本節の研究の範囲であるB/S=10%、20%、40%とA/B=0%、10%、20%、40%の配合に限り、相対的に硬化時間を比較検討することが可能であると考ええる。ここで、実際の測定にあたっては、個人差が生じないように同一人物が行うようにしている。

本節の実験は、室温20±2℃に調整した室内で実施し、各含水比を調整した試料に半水石膏ならびに半水石膏とII型無水石膏との混合物を添加してから30秒間実験用スプーンで攪拌してから、指標のレベル3「湿り気があり手で塊を崩すことができる」の状態に至るまでの時間を硬化時間と定め1分毎に目視と触診により判定を行っている。レベル3を本節の研究における硬化時間の判定基準に定めたのは、目視と触診により明らかに硬化の判定が可能なる状態であること、レベル4ならびにレベル5よりも短時間で評価を行うことが可能であるからである。

なお、本節の研究においては、半水石膏ならびにII型無水石膏の配合割合により、その硬化時間を任意に調節することが可能か否かに着目しているので外乱要因となるセメント類は添加していない。

4.2.2 実験結果および考察

(1) 各W/S(%)におけるB/S(%)と硬化時間との関係⁸⁾

半水石膏の添加率(B/S=10%、20%、40%)の違いが、軟弱地盤を想定したMCクレ- (W/S=120%、140%、160%、180%)の硬化時間に及ぼす影響について実施した実験結果を図-4⁸⁾に示す。なお、各配合に対して3回の試験を実施し図中にプロットしている。図より、半水石膏添加率B/S=10%の場合、W/S=120~140%では20分以内に硬化しているが、W/S=180%では硬化するまで50分を要している。次に、B/S=20%と40%では、いずれの含水比であっても約20分以内で硬化している。また、B/Sの違いが硬化時間に及ぼす影響に関しては、全てのW/S(%)に対してB/Sの増加に伴いグラフのプロットが下側にシフトして行く傾向が認められる。

一方、図-5⁸⁾は、含水比(W/S=120%、140%、160%、180%)の違いが各半水石膏の添加率(B/S=10%、20%、40%)の硬化時間に及ぼす影響についてプロットしたものである。図より、W/S=120%の場合、硬化時間は5分以内に収まっているが、W/Sが増加するにつれて各B/S(%)の硬化時間が指数関数的に増加しているのが明らかである。とくに、W/S=180%では、硬化時間がB/S=40%が5分、B/S=20%が20分、B/S=10%が50分を要している。全ての半水石膏添加率にお

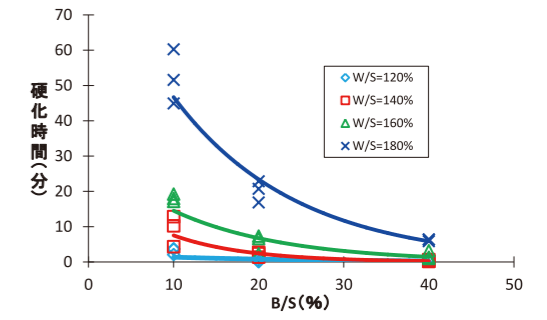


図-4 各W/S(%)におけるB/S(%)が軟弱粘土の硬化時間に及ぼす影響⁸⁾

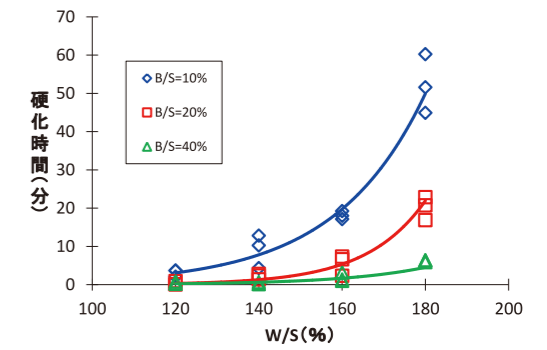


図-5 各B/S(%)におけるW/S(%)が軟弱粘土の硬化時間に及ぼす影響⁸⁾

表-2 石膏の溶解度⁸⁾

温度(℃)	二水石膏(g/L)	半水石膏(g/L)	III型無水石膏(g/L)	II型無水石膏(g/L)
0	1.756	10.919	11.721	3.793
10	1.934	9.494	10.182	3.313
20	2.047	8.198	8.789	2.879
30	2.104	7.024	7.508	2.486
40	2.115	5.965	6.362	2.134

いてもW/S=140%から硬化時間が顕著に長くなる傾向が認められる。

半水石膏の硬化メカニズムに関する研究^{10~26)}は古くから知られている。中でも、大門らの研究報告¹⁸⁾によれば、半水石膏の溶解度と溶解速度、二水石膏の溶解度と核生成から結晶成長などの定性的な関係について、その機構を明らかにしている。また、半水石膏の硬化時間を遅延させる研究¹⁹⁾に関しては、山田らがクエン酸ナトリウムや酢酸ナトリウムを硬化遅延材として添加することにより、半水石膏の溶解速度や二水石膏の晶析速度が低下することを確かめている。この他にも半水石膏に有効な硬化遅延材として、有機質ではアラビアゴム、ゼラチン、デンプンなどが、無機質ではホウ砂、リン酸ナトリウムなどが知られている。

本節の研究で適用したリサイクル石膏から製造した半水石膏が軟弱地盤を想定した高含水比なMCクレ-の中で水和

反応を起こして硬化するプロセスを検討する上で、二水石膏と半水石膏の溶解度に差があることに着目して以下では考察を試みる。

既往の研究で、安達らが提唱した石膏の溶解度に関する計算式²⁰⁾を用いて行った計算結果を表-2⁸⁾に示す。表は、左から二水石膏、半水石膏、Ⅲ型無水石膏、Ⅱ型無水石膏の各温度における溶解度(g/L)を表している。同表より、10℃の二水石膏の溶解度が1.934g/Lであるのに対し、半水石膏が9.494g/Lであることから半水石膏の溶解度が二水石膏の溶解度の5倍近く大きいことがわかる。半水石膏すなわち硫酸カルシウムの1/2水和物(CaSO₄・1/2H₂O)は硫酸塩であるから、その一部は水に溶解してカルシウムイオン(Ca²⁺)と硫酸イオン(SO₄²⁻)に電離しているものと考えられる。このとき溶媒の水に対して半水石膏が潤沢に存在する場合、半水石膏の溶解速度に支配されるが最終的にカルシウムイオンが飽和の状態に至る。

溶解度が半水石膏の1/5である二水石膏からみると既にカルシウムイオンが過飽和の状態になっていることが容易に推定することができる。過飽和になったカルシウムイオンは結晶水を取り込みながら二水石膏すなわち硫酸カルシウム2水和物(CaSO₄・2H₂O)を晶析させる。この少量の二水石膏が核種となり二水石膏の析出速度が連鎖的に加速して行くものと考えられる。このことは、二水石膏を加熱処理して半水石膏を製造する場合、収率が悪い半水石膏には二水石膏が多く残っている。この二水石膏が核種となることから収率の低い半水石膏ほど硬化時間が速くなることに起因している。

このことと並行して、二水石膏の析出量が増加することにより、溶液中のカルシウムイオンが減少し、過飽和の状態から不飽和の状態へと移行する。これらの機構の繰り返しにより半水石膏の溶出が進行するのである。このような水和反応プロセスを経て半水石膏が二水石膏に転化して行くものと推察される。

これらのことから、図-4⁸⁾及び図-5⁸⁾のように含水比が高い試料の領域においては、半水石膏が溶出し過飽和になるまでの時間が含水比の小さい試料に比べて長くなることは容易に推測することができる。このことから、カルシウムイオンが過飽和に至ってから二水石膏が析出するために、含水比が低い試料ほどこの反応が速くなり試料の硬化時間が早まるものと考えられる。

(2) 各W/S(%)におけるA/B(%)と硬化時間との関係および考察⁸⁾

Ⅱ型無水石膏と半水石膏との混合割合A/B(%)の違いが硬化時間に及ぼす影響について実施した実験結果を図-6⁸⁾に示す。なお、試料に対する混合物(半水石膏とⅡ型無水石膏)の添加率を10%に設定している((A+B)/S)×100=10%)。これは、(1)目で検討した各W/S(%)におけるB/S(%)と硬化時間の関係と同様に含水比の違いに対しても最も顕著に硬化時間の差が表れる添加率であると考えられたから

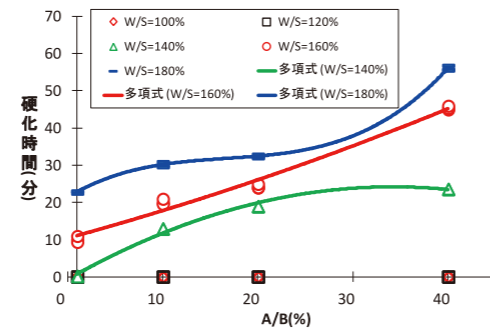


図-6 各W/S(%)におけるA/B(%)が軟弱粘土の硬化時間に及ぼす影響⁸⁾

である。また、(1)目と同様に各配合に対して3回の試験を実施し図中にプロットしている。

図より、W/S=100%と120%の場合に着目すると、A/B(%)の値が増加しても硬化時間の遅延は認められなかった。このことは、W/S=100%と120%の含水比の値がその他の試料に比べて小さく、溶媒である水が少量であることから、半水石膏の混合割合が少量であっても溶出するカルシウムイオン濃度が飽和状態になるまでの時間が短くなるからであると考えられる。逆に、二水石膏の溶解度の側面から含水比の値が大きいその他の試料と比較検討すると、含水比の小さい試料はカルシウムイオン濃度が過飽和状態になるまでの時間が含水比の値が大きい試料に比較して短くなり、二水石膏の結晶析出が早まるものと推察される。これらの理由から、本節の研究における含水比の値が小さいW/S=120%以下の領域において、Ⅱ型無水石膏の硬化遅延材としての有効性が認められないものと考えられる。

次に、図のW/S=140~180%の高含水比の試料に着目すると、A/B(%)の値が増加するにつれて硬化時間が伸びていることが明らかである。なかでも、W/S=180%の場合、A/B=40%で急激に硬化時間が伸びており、W/S=160%の場合、A/B(%)と硬化時間が比例関係にある。さらに、表-2⁸⁾より、溶解温度10℃の場合の半水石膏とⅡ型無水石膏の溶解度を比較すると、半水石膏が9.494g/Lであるのに対しⅡ型無水石膏は3.313g/Lと約1/3小さい値を示している。また、このときの二水石膏の溶解度は1.934g/Lである。したがって、溶解度の値は半水石膏>Ⅱ型無水石膏>二水石膏の順番に小さい値になっている。

これらのことから、高含水比の試料に潤沢にある溶媒に対して、二水石膏の結晶析出に因る溶媒中のカルシウムイオン濃度が半水石膏のみならずⅡ型無水石膏の支配を受けているものと推察される。

二水石膏の硬化のメカニズムは、微量の二水石膏が核種となり二水石膏の結晶が析出して針状に成長することにより硬化が進行するものと考えられている。この過程において、半水石膏の溶解度より二水石膏の溶解度が約1/5小さいために、全量の半水石膏が溶出して溶媒中のカルシウムイオン濃度が

約1/5以下に低下するまでこの二水石膏の析出が進行するものと考えられる。

次に、Ⅱ型無水石膏の溶解度は半水石膏の約1/3程度であるため、半水石膏の溶出が完了して溶媒中のカルシウムイオン濃度が約1/3以下に低下してからⅡ型無水石膏の溶出が始まるものと考えられる。このことにより、A/B(%)の値が大きい試料ほど半水石膏の溶出が完了した後からⅡ型無水石膏の溶解速度にカルシウムイオン濃度が支配されることになり、二水石膏の側面からカルシウムイオン濃度が過飽和になるまでに時間を要することになる。これらの理由により、A/B(%)の値が大きくなるほど硬化時間が遅延されるものと考えられる。とくにこのことは、図-6⁸⁾から明らかのように、W/S(%)の値が大きいほど顕著に表れておりW/S=180%の場合は、その硬化時間は指数関数的に長くなっていることがわかる。

さらに、Ⅲ型無水石膏の10℃における溶解度は表-2⁸⁾より、10.182g/Lと半水石膏の溶解度9.494g/Lよりも大きい値を示している。このことから、Ⅲ型無水石膏の添加量を増加させることにより、溶媒中のカルシウムイオン濃度はさらに高まり二水石膏の析出速度が速くなるものと推察される。半水石膏に対して硬化速度を遅延させたい場合にはⅡ型無水石膏の添加量を増量し、逆に硬化速度を促進させたい場合にはⅢ型無水石膏の添加量を増量することにより、さらに広い範囲で硬化時間を任意に調整することが可能となることが示唆される。

また、表-2⁸⁾より、二水石膏の溶解度は溶媒の温度が上昇するとその値も増加しているが、半水石膏、Ⅲ型無水石膏ならびにⅡ型無水石膏は溶媒の温度上昇に対して逆に溶解度が低下する傾向にあることがわかる。これは、「3.2.1 二水石膏」で触れた二水石膏から半水石膏に至る熱化学式(1)と「3.2.2 半水石膏」で触れた半水石膏から無水石膏に至る熱化学式(2)が共に吸熱反応になっていることに起因していると考えられる。これらのことは、半水石膏やⅢ型無水石膏ならびにⅡ型無水石膏の加水による硬化時間は温度が低いほど速くなることを裏付けている。

以上のことから、半水石膏とⅡ型無水石膏の混合割合を変化させることにより、任意に硬化時間をコントロールすることが可能であることが明らかとなった。このことは、半水石膏を母材とする固化材の硬化時間が極めて早いために、今まで適用できなかった固化材に水を加えスラリー状にして圧送する深層混合処理工法への適用など、土壌改良材としての用途がさらに広がるものと期待される。

5. 廃石膏ボード由来の不溶化剤

既往の研究³³⁾で筆者らは、廃石膏ボードから製造した半水石膏に石炭灰ならびに高炉スラグを配合した複合リサイクル材料を検討し、その材料中に生成するエトリンガイトが廃石膏ボード由来のフッ素の不溶化に極めて有効であることを明らか

にしている。

そして、この複合リサイクル材料は、化学当量的にエトリンガイトの生成量が最大となるように、前述の半水石膏にアルミナ源として石炭灰ならびに酸化カルシウム源として高炉スラグを配合したもので、フッ素の不溶化のみならず、六価クロムやカドミウムなどの重金属類の不溶化にも有効であることを示唆している。なお、複合リサイクル材料は、廃石膏ボード由来の半水石膏やⅡ型無水石膏を母材とする水硬性を有していることから、土壌の改良材として有効であることは、本稿の第4章で触れたとおりである。

まず、本章の第1節では、土壌汚染対策法(以下、土対法と記載)とその土壌環境基準を概観する。そして、第2節では、廃石膏ボード由来の半水石膏を母材とする複合リサイクル材料が重金属類の不溶化に有効であることを、重金属を溶解させた模擬汚水により検討している²⁷⁾。さらに、第3節では、同複合リサイクル材料が、実際の重金属類の不溶化剤として有効であることを検証するために、ヒ素や鉛などで複合汚染された実汚染土での適用性を検討している⁶⁴⁾。

5.1 土壌汚染対策法と環境基準

5.1.1 土壌汚染対策法の背景

戦後の復興を終え、工業製品の大量生産、大量消費、大量廃棄により国民に豊かさや利便性、夢と希望を享受してきた高度経済成長であったが、その代償として公害問題や環境破壊、さらには地球温暖化問題などの禍根を将来に残すことになっている。

典型7公害と言われる大気汚染、水質汚濁、騒音、振動、臭気、地盤沈下、土壌汚染は、健康被害、環境破壊などの副作用を招きながら公害問題として対策が講じられて行く。その中でも欧米に遅れること10年余り、最も施行が遅れた土対法(土壌汚染対策法)が2003年に施行される。既に四半世紀前から施行されている他の6公害(大気汚染、水質汚濁、騒音、振動、臭気、地盤沈下)に関する法律は、産業活動に伴う副産物や廃棄物の排出濃度や排出量を規制することにより、公害の発生や被害の拡大を未然に防止することを目的としている。これらの法律に対して土対法は、過去に汚染された土壌の状況を把握すると共に、地下水の摂取や汚染土壌の直接摂取などによる人への健康被害の防止措置を講ずることを目的としている。土壌汚染防止法ではなく土壌汚染対策法と命名されたのもこのことに起因している。

本法では、一定要件を満たす土地の改変において、土壌の調査を行うことが土地所有者に求められる。土壌調査は、まず、対象となる土地の登記簿などから地歴を過去に遡り、工場などの事業所の存在が確認できた場合、何を製造していたか、そのプロセスで原材料や関連する薬剤、燃料や洗浄油などの使用の有無を調査する。この文献調査により、土壌汚染の可能性が疑われる場合、概況調査としてボーリング調査を実施し、

土壌と地下水の汚染の有無を調査する。このことにより、土壌の環境基準を超える汚染が発覚した場合は、詳細調査を実施し、汚染物質、汚染の範囲、汚染濃度などを明らかにし、行政に報告すると共に、対策を講じる義務が土地所有者に生じる。

具体的な対策としては、地下水を通じて汚染が拡散しないような防止策を講じると共に、土地利用の目的に応じて土壌浄化の方針を決定し、その対策を図ることが求められる。特に、第二種特定有害物質である重金属類による汚染に関しては、汚染土壌の溶出量基準(mg/L)と含有量基準(mg/kg)との両面から検討を進めることが重要となる。概ね、不溶化処理を施す対策が一般的となるが、汚染物質の含有量基準が環境基準を超過する場合には、汚染土壌そのものを掘削除去することや洗浄浄化することなどの対策が必要となる。

5.1.2 土壌の環境基準

土対法では、国が定める土壌の環境基準として26種類の特定有害物質を指定している。これらには、第一種特定有害物質としてVOC(Volatile Organic Compound:揮発性有機化合物)類を11種、第二種特定有害物質として重金属類10種、第三種特定有害物質として農薬類5種の合計26種類が指定されている。そして、その規制基準には、水への溶出量基準と含有量基準とがある。

特に、本節の研究の対象である第二種特定有害物質には、水銀(Hg)、カドミウム(Cd)、鉛(Pb)、六価クロム(Cr(VI))、等の重金属類が含まれる。身体への影響は、水銀による水俣病やカドミウムによるイタイイタイ病などが公害病として知られている。水俣病はメチル水銀による中毒中枢神経疾患であり、運動失調、感覚障害、聴力障害などの症状が現れる。イタイイタイ病は、多発性近位尿細管機能異常や骨軟化症が主な症状である。

また、これらの重金属類は、酸化物、水酸化物、硫化物などの化合物の形態で土壌中に存在しているものと考えられる。さらに、重金属類は、地下水の存在下でその水素イオン濃度の影響を強く受けて溶出し、原子担体のイオン状態でも存在していることが知られている。このように重金属類は、原子やイオン単独の状態でも有害であることから、第一種や第三種特定有害物質のように分解して無害化を図ることはできない。したがって、土壌から重金属類を除去する方法として物理特性を利用する場合は、比較的その融点や沸点が高温のものが多いことから、大量のエネルギーを消費し浄化コストが嵩むことが課題となる。

以上のことから、前項でも触れたが、重金属類の化合物の多くは土粒子の表面に付着していることに着目し、汚染土壌の粒度の小さいシルト質、粘土質を分級する洗浄工法などを適用して土壌中の重金属含有量を減じる方法が有効である。また、含有量は基準を満足しているが溶出量が基準をオーバーする場合においては、不溶化剤などを適用することが経済的に有利となる場合が多い。

5.2 複合リサイクル材料によるフッ素・六価クロム・

カドミウム・鉛の不溶化

廃石膏ボードから紙と異物を除去して製造したりサイクル石膏にはフッ素が含有していることから、これを土壌改良材として用いる場合には、フッ素の溶出に注意を払う必要があることは本稿の第3章でも触れている。

筆者らが行った既往の研究²⁸⁾では、軟弱地盤に見立てた高含水比(140%)の工業的に成分調整されたカオリンに、リサイクル石膏から製造した半水石膏と高炉セメントB種を添加したものを供試体として、そのセメント添加量とフッ素の溶出濃度(mg/L)との関係を検討している。その結果、カオリンに対して高炉セメントB種を添加しない供試体の場合、半水石膏を10%添加するだけでフッ素の溶出濃度が土壌環境基準の0.8mg/Lを超過するのに対して、同カオリンに高炉セメントB種を5%添加した供試体の場合、半水石膏を50%添加してもフッ素の溶出濃度が土壌環境基準を大きく下回っていることを報告している。

さらに、そのことに関して、エトリンガイトがフッ素の不溶化に有効であることの既往の研究報告²⁹⁾から、供試体中のエトリンガイトの生成量とフッ素の溶出濃度との関係を検討している。ここで、エトリンガイト(Ca₆Al₂(SO₄)₃(OH)₁₂・26H₂O)は、石膏(CaSO₄)、アルミナ(Al₂O₃)、酸化カルシウム(CaO)と水(H₂O)との水和物で、アルカリ環境下でボズラン反応により生成することが一般的に知られている³⁰⁾。これらのことから、供試体中に生成されるエトリンガイト量(X線回折強度で評価)は、カオリンのアルミナ含有量に支配的となることを指摘している。

加えて、筆者らが行った既往の研究³¹⁾では、カオリンに含まれるアルミナ(Al₂O₃)や酸化カルシウム(CaO)等の鉱物が、エトリンガイト(Ca₆Al₂(SO₄)₃(OH)₁₂・26H₂O)生成の外乱要素とならないようにカオリンを用いず、半水石膏のみを母材とした供試体を作製し、高炉セメントB種の添加量を変化させてエトリンガイトの生成量とフッ素の溶出濃度との関係を検討している。その結果、母材である半水石膏に対して、高炉セメントB種の添加量を変化させた場合、高炉セメントB種に含まれるアルミナと酸化カルシウムとが半水石膏とボズラン反応によりエトリンガイトを生成し、その生成量が高炉セメントB種の添加量と極めて密接な相関があることを示し、同時にこのことから、フッ素溶出濃度との間にも密接な相関関係があることを明らかにしている。

そして、半水石膏中のエトリンガイトの生成量を増大させることが、フッ素不溶化に最も有効であると結論付け、エトリンガイトの生成量は高炉セメントB種のアルミナ含有量により支配されることを推定している。しかも、このことは、化学当量的に供試体中のアルミナが不足することを意味しており、アルミナ源として石炭灰などを補助添加剤として添加することが経済的に有意であると主張している。

以上の研究結果から、エトリンガイトの生成量を増大させる

ことがフッ素の不溶化に極めて有効であることに着目し、廃石膏ボードから製造した半水石膏を母材として、産業副産物である石炭灰と高炉スラグを配合した複合リサイクル材を考案している。この複合リサイクル材料は、母材の半水石膏(CaSO₄・1/2H₂O)に対して、アルミナ(Al₂O₃)源として石炭灰、酸化カルシウム(CaO)源として高炉スラグを添加し、化学当量的にエトリンガイト(Ca₆Al₂(SO₄)₃(OH)₁₂・26H₂O)が最大量生成される配合を決定している。

次に、この複合リサイクル材料に対してアルカリ刺激剤として高炉セメントB種の添加量を増大させて行き、エトリンガイトの生成量(X線回折強度)とリサイクル石膏由来のフッ素の溶出濃度との関係を検討している。その結果、複合リサイクル材料に対して0～4%のアルカリ刺激剤の添加量の範囲において、急激にエトリンガイトの生成量が増大し、4～32%の添加量範囲ではエトリンガイトの生成量は微増に留まっている^{32～34)}。

筆者らが研究の対象としているこれらの産業副産物で製造した複合リサイクル材料は、泥土や軟弱地盤に対して土壌改良材ならびに土壌固化材としての機能を有し、さらに、重金属類の不溶性性を併せ持つリサイクル材料であれば極めて有効な材料であると考えられる。

本節では、廃石膏ボード由来の半水石膏を母材とする複合リサイクル材料が重金属類の不溶化に有効であることを検討している。特に、土壌の重金属汚染の中でも報告事例^{35～39)}が多い六価クロム(Cr(VI))、カドミウム(Cd)、鉛(Pb)に着目して、模擬的に濃度調整した重金属汚染水を製作し、これらの模擬汚染水を直接複合リサイクル材料に添加混合して供試体を作製している。その上で、その養生時間とこれら重金属類の溶出濃度との関係を検討し、複合リサイクル材料の地盤環境工学的有効性を明らかにしている。

5.2.1 実験に用いた材料と模擬汚染水用試薬

(1) 半水石膏

半水石膏の特徴に関しては、本稿の第3章で詳しく記載しているのでここでは割愛する。

(2) 石炭灰

石炭灰は、石炭炊きの火力発電所で副産物として生成する。石炭に含有している無機成分(灰分)が石炭の燃焼に伴い溶融し球場になってボイラーから飛散し、電気集塵機などで捕捉されたものがフライアッシュと呼ばれている。

一方、成分はフライアッシュと同等であるが、ボイラーから飛散せず、溶融してボイラー底部に堆積したものを冷却粉砕したものをクリンカーアッシュと呼んでいる。両者ともセメント原料や人工骨材などの土木用資材として有効利用されている。

近年では、東日本大震災の影響で原子力発電所が全停止した経緯から、石炭焚き汽力発電所の再稼働ならびに新規建設が進み石炭の消費量が増大している。このことにより、フライ

表-4 本節の研究で用いた石炭灰の主要化学成分(%)²⁷⁾

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
58.3	27.6	4.2	2.8	1.1

表-5 本節の研究で用いた高炉スラグの主要化学成分²⁷⁾

構成成分	割合(%)
SiO ₂	33.6
Al ₂ O ₃	14.3
Fe ₂ O ₃	0.2
CaO	42.5
MgO	7.3
SO ₃	0.9
TiO	1.2
MnO	0.2

アッシュやクリンカーアッシュの年間発生量は震災前の1,000万トンから1,300万トンに迫る勢いで増加している。

本節の研究では、密度:1.95g/cm³以上、粉末度(ブレーン法):2,500以上の土木用資材として一般的に市販されているJIS II規格品(JIS A 6201)のフライアッシュを使用している。石炭灰の主要化学成分を表-4²⁷⁾に示す。表より、シリカ(SiO₂)が58.3%で過半数を占めるが、エトリンガイトの構成成分であるアルミナ(Al₂O₃)は27.6%、酸化カルシウム(CaO)は2.8%含まれていることがわかる。このことから、石炭灰はアルミナ源の補助添加剤として有効であると考えられる。

ただし、フライアッシュは石炭の燃焼により高温の熟履歴を経ていることから、粒子表面が溶融してガラス化(アモルファス化)しており、アルカリ環境下でないとボズラン反応が進行しないことに注意を要する。

(3) 高炉スラグ

高炉は、鉄鉱石とコークスを混合して高温に加熱し、鉄鉱石の主成分である酸化鉄をコークスで還元して鉄を製造する縦型の炉である。鉄の純度を上げるために生石灰(CaO)を高炉に投入し、鉄鉱石に含まれている不純物をこの生石灰で吸収分離する。溶融して不純物を吸収した生石灰を急冷したものが高炉スラグである。高炉スラグは、年間2,400万トン前後発生しており、セメント原料、道路用の路盤材などに有効利用されている。

本節の研究では、密度:2.89gcm³、粉末度(ブレーン法):4,700の土木用資材として一般的に市販されている高炉スラグ粉末(JIS A 6402)を使用している。高炉スラグの主要化学成分を表-5²⁷⁾に示す。表より、シリカ(SiO₂)が33.6%含まれているものの、エトリンガイトの構成成分となるアルミナ(Al₂O₃)は14.3%、酸化カルシウム(CaO)は42.5%含まれていることがわかる。このことから、高炉スラグは酸化カルシウムならびに

アルミナ源の補助添加剤として極めて有効であると考えられる。

ただし、高炉スラグは高温の熱履歴を経ていることから、石炭灰と同様にガラス化(アモルファス化)しており、アルカリ環境下でないとボズラン反応が進行しないことに注意を要する。

(4) 高炉セメントB種

高炉セメントは、高炉スラグをセメントクリンカーに混合して生産されており、品質はJIS R 5211で規定されている。高炉スラグの混合割合により、A種(5%を超え30%以下)、B種(30%を超え60%以下)、C種(60%を超え70%以下)が規定されている。

本節の研究では、密度 $3.04\text{g}/\text{cm}^3$ 、粉末度(ブレン法): 3,750の土木用資材として一般的に市販されている高炉セメントB種を使用している。高炉セメントB種の主要化学成分を表-6²⁷⁾に示す。表より、エトリンガイトの構成成分であるアルミナは8.7%、酸化カルシウムは54.1%含有している。また、セメント安定処理材としてセメントを過度に添加する場合には六価クロムの溶出が懸念されることから、セメントの添加率を可能な限り少なくすることが望ましい。

本節の研究では、高炉セメントB種をボズラン反応誘発のためのアルカリ刺激剤として使用している。

(5) 六価クロム(Cr(VI))

六価クロムは、強い酸化作用を持ち有機物と反応して安定な三価クロムとなるが、極めて有毒である。このことから、土壤の環境基準では、その溶出量基準が $0.05\text{mg}/\text{L}$ 以下の厳しい値に定められている。いずれにしても、雨水に溶け込んで地下水に混入し、生活飲料水を脅かす汚染物質である。自然界では三価クロムの状態で存在するが、高温雰囲気酸化作用を受けて六価クロムとなる。特にセメントにはその製造プロセスから六価クロムが含有していることが考えられる。

本節の研究では、クロム化合物の中で水への溶解度が比較的大きい重クロム酸カリウム($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$)を試薬として用いた。重クロム酸カリウムは、赤橙色の結晶で密度は $2.67\text{g}/\text{cm}^3$ 、融点 398°C 、沸点 500°C 、水への溶解度は $149\text{g}/\text{L}$ (0°C)の特性がある。

(6) カドミウム(Cd)

カドミウムは、銅、銀、ニッケルなどの合金や蓄電池の電極などに多く使用されており、その製造工程や中間処理、最終処分工程により大気中に飛散することや排水に混入する可能性がある。人体に有害で国内の環境被害としてはイタイイタイ病が有名である。これらのことから、土壤の環境基準では、溶出量基準が $0.01\text{mg}/\text{L}$ 以下の厳しい値に定められている。六価クロム同様、雨水に溶け込んで地下水に混入し生活飲料水を脅かす汚染物質である。

本節の研究では、カドミウム化合物の中で水への溶解度が比較的大きい塩化カドミウム(CdCl_2)を試薬として用いた。

表-6 本節の研究で用いた高炉セメントB種の主要化学成分²⁷⁾

構成成分	割合 (%)
SiO_2	26.3
Al_2O_3	8.7
Fe_2O_3	1.9
CaO	54.1
MgO	3.7
SO_3	2.0

塩化カドミウムは、無色の個体で粉体では白色を呈する。密度は $4.047\text{g}/\text{cm}^3$ 、融点 568°C 、沸点 964°C 、水への溶解度は $90\text{g}/\text{L}$ (0°C)の特性がある。

(7) 鉛(Pb)

鉛は、その化合物としてガラスやバッテリーの電極、火薬の原料として一般的に使用されている。また、古くより光明丹などの赤色顔料などに利用されており、人類にとって馴染み多き重金属である。人体に対して蓄積性があり鉛中毒として食欲不振、貧血、尿量減少などの症状がある。これらのことから、土壤の環境基準では、溶出基準が $0.01\text{mg}/\text{L}$ 以下の厳しい値に定められている。

本節の研究では、鉛化合物の中でも水への溶解度が比較的大きい硝酸鉛(II) ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$)を試薬として用いている。硝酸鉛(II)は、無色の個体で粉体では白色を呈する。密度は $4.53\text{g}/\text{cm}^3$ 、融点 470°C 、沸点は融点の 470°C で分解するため存在しない。水への溶解度は $52\text{g}/\text{L}$ (20°C)の特性がある。

5.2.2 実験方法

(1) 複合リサイクル材料と模擬汚染水の作製

複合リサイクル材料は、石炭灰、高炉スラグ、半水石膏に含まれるアルミナ(Al_2O_3)、酸化カルシウム(CaO)、半水石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$)の構成割合から、エトリンガイト($\text{C}_6\text{A}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$)の生成量が化学当量的に最大となる配合設計に基づき作製している。ここで、エトリンガイトは、 1mol のアルミナに対して 3mol の酸化カルシウムと 3mol の石膏とが水和反応して 1mol のエトリンガイトを生成する^{40~49)}。

模擬汚染水は、前述の通り水への溶解度が大きい重金属類の化合物を試薬として選定している。このことから、この複合リサイクル材料が重金属類の不溶化剤としてより厳しい条件下での溶出試験となる。

添加する模擬汚染水の濃度倍率を順次上げていき、供試体から溶出濃度が環境基準を上回る濃度倍率を予め探り当ててから、養生時間と溶出濃度との関係を検討することとしている。

(2) 供試体の作製と養生および検液の作製

本節の研究では、養生時間に対するエトリンガイト生成量と重金属類の溶出濃度との関係を明らかにするために、エトリン

ガイト生成の外乱要因と考えられる土を用いずに複合リサイクル材料を母材とした供試体の配合設計を行っている。供試体の作製は、重金属毎に複合リサイクル材料に対してアルカリ刺激剤として高炉セメントB種を4%添加した供試体と、ブランクテストとして高炉セメントB種を添加しない供試体とを作製している。ブランクテストは、複合リサイクル材料で生成するエトリンガイトの重金属類に対する不溶化(吸着)性能と、エトリンガイト以外の素材(石膏、高炉スラグ、石炭灰)の不溶化(吸着)性能の差を明らかにするために実施している。また、複合リサイクル材料に対して含水比が100%となるように各濃度の模擬汚染水を添加攪拌し、各供試体の養生時間を1, 3, 5, 168, 336, 504時間の6通りに設定して、室温($20 \pm 2^\circ\text{C}$)、相対湿度(35~45%)の環境下で所定の養生時間まで気中養生を行っている。

そして、所定の養生時間を経過した供試体に対して、六価クロム溶出試験用、カドミウム溶出試験用、鉛溶出試験用の検液を作製している。

5.2.3 複合リサイクル材料のエトリンガイト生成量とフッ素溶出濃度との関係

筆者らの既往の研究³³⁾で明らかにされた養生期間4週における複合リサイクル材料のエトリンガイト生成量(X線回折強度)と、フッ素溶出濃度との関係を図-7³³⁾に示す。これは、複合リサイクル材料の母材となる半水石膏が廃石膏ボード由来であることから、フッ素の溶出濃度が土壤の環境基準を超過する場合があります。複合リサイクル材料中でボズラン反応により生成されるエトリンガイトにより、このフッ素の溶出を自ら抑制するものである。

図より、C/M(%) (C:高炉セメントB種, M:複合リサイクル材料)が0~4%の範囲でエトリンガイト量が急激に増大し、これに連動する形でフッ素の溶出濃度が急激に減少していることがわかる。さらに、C/M(%)が4~32%に至っては、エトリンガイト生成量が穏やかに増大している。この時のフッ素溶出濃度は、 $0.1 \sim 0.2\text{mg}/\text{L}$ の範囲で土壤の環境基準の $0.80\text{mg}/\text{L}$ を大きく下回る値を示している。また、この範囲においてこれ以上のフッ素溶出濃度の減少傾向は認められない。

次に、図-8³³⁾にリサイクル石膏で製造した半水石膏に高炉セメントB種を添加した時のC/B(%) (B:半水石膏)とエトリンガイト生成量との関係と、複合リサイクル材料に高炉セメントB種を添加した時のC/M(%)とエトリンガイト生成量との関係との比較を示す。図より、複合リサイクル材料のエトリンガイト生成量が、半水石膏のエトリンガイト生成量よりも5~10倍多くなっていることが明らかである。

このことに関して、リサイクル石膏で製造した半水石膏の場合に着目すると、エトリンガイトの生成に必要なアルミナと酸化カルシウムは、高炉セメントB種のみからの供給に限定されることから、エトリンガイトの生成量はC/B(%)に支配され、C/B(%)

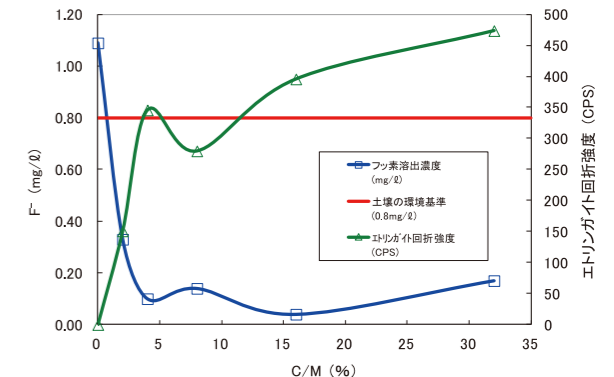


図-7 C/Mとフッ素溶出濃度・エトリンガイトX線回折強度(CPS)との関係³³⁾

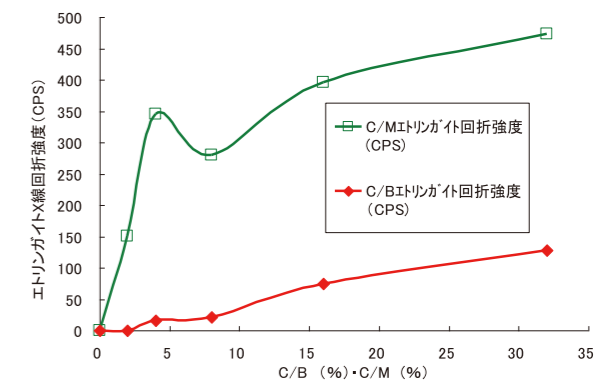


図-8 C/B・C/MとエトリンガイトX線回折強度(CPS)との関係³³⁾

の増加と共にエトリンガイト生成量もほぼ比例するように増大している。これに対して複合リサイクル材料の場合、エトリンガイトの生成量が最大となるように配合設計を行っていることから、C/M(%)が $0.0 \sim 4.0\%$ の範囲でアルカリ刺激剤(高炉セメントB種)によるボズラン反応が進行し、エトリンガイトの生成量が急激に増大したものと考えられる。

本節の研究では、アルカリ刺激剤として安価で市場に多く流通し、かつ入手が比較的容易である高炉セメントB種を選定している。セメントが重金属類の不溶化に有効であることは一般的に知られている事実であり、本節の研究においてもセメントの影響力を極力抑えるため、図からわかるように、その添加量をボズラン反応によるエトリンガイトの生成量が全体生成量の70%以上を占め、かつ重金属の不溶化に必要な充分であると考えられるC/M=4.0%に限定している。

なお、エトリンガイトの定量方法として本節の研究では粉末X線回折法を適用したが、個体^{27)AI NMR}を用いた新たな方法や、粉末X線回折を行う場合の乾燥や分製の影響を明らかにした既往の研究報告がある^{50~51)}。さらに、本節の研究と同様に、産業副産物を利用した土の固化技術や重金属溶出抑制に関する研究報告が知られている^{52~53)}。

以下では、この複合リサイクル材料が六価クロム(Cr(VI))、カドミウム(Cd)、鉛(Pb)等の重金属類の不溶化に関する有効性を検討する。

5.2.4 六価クロム(Cr(VI))の不溶化

図-9²⁷⁾に、土壤環境基準の1,000倍濃度に調整した六価クロムの模擬汚染水を、含水比100%になるように添加した供試体の六価クロム溶出濃度と養生時間との関係を示す。六価クロムに関する土壤環境基準は、0.05mg/Lが溶出基準となっており、本節の研究では同基準の10倍、100倍、1,000倍、10,000倍で溶出濃度を検討し、溶出濃度が同基準に近づくレンジの倍数の図を載せている。10倍、100倍濃度に関しては、同基準である土壤溶出基準0.05mg/Lを満足し、分析下限値を下回る値となった。このため、図は、重クロム酸カリウム($K_2Cr_2O_7$)の六価クロムイオン濃度が、環境基準の1,000倍となるように調整した汚染水を添加したものである。なお、この時の六価クロム含有量は、計算上50mg/kgとなる。これとあわせて、ブランクテストの目的で、複合リサイクル材料にアルカリ刺激剤を添加しない供試体を作製し溶出試験を実施している。

図は、両対数グラフであるので変化が少ないように観察されるが、ブランクテストの供試体に着目すると、養生時間0～168時間(1週間)までは、溶出濃度(2.22～2.29mg/L)に大きな変化は認められない。このことは、エトリンガイトの生成が伴わなくても複合リサイクル材料に含まれている鉱物類に六価クロムが吸着しているものと推定される。そして、168時間(1週)を過ぎて504時間(3週)に至る間、緩やかな溶出濃度の減少(2.29→1.33mg/L)が認められる。これらのことは、複合リサイクル材料の中で養生時間を経るごとに少量であるが、エトリンガイトの前駆体であるモノサルフェイト($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$)やカルシウムアルミノフェライト($6CaO \cdot 2Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$)系化合物などが生成し、六価クロムを吸着していることが示唆される⁵⁵⁻⁵⁷⁾。

次に、アルカリ刺激剤を添加した供試体に着目すると、養生時間0～5時間まではブランクテストの供試体同様、溶出濃度(2.20～1.78mg/L)に大きな変化は認められないが、養生時間5～168時間の間から溶出濃度が減少(1.85→0.41mg/L)に転じている。さらに、2～3週の養生期間を経るにしたがい、溶出濃度(0.41→0.12mg/L)が低下して行き、土壤環境基準の0.05mg/Lには至らないものの2倍濃度の0.10mg/L当たり収束することが予測される。エトリンガイトが六価クロムの不溶化に有効であることは、既往の研究⁵⁸⁻⁶⁰⁾でも報告されていることから、養生時間におけるエトリンガイトの生成量の違いにより、六価クロムの溶出濃度に差が生じたものと推察される。

一方、重金属類の溶出濃度に関して、土壤のpHがそれに大きく影響を与えることが既往の研究⁶³⁾でも知られており、以下では、本節の研究における供試体のpHの影響に関して考察する。

まず、複合リサイクル材料に含水比100%となるように蒸留水のみを加えた場合のpH値は6.8～7.3を示した。このことは、複合リサイクル材料の素材である石炭灰や高炉スラグは、その生成過程における熱履歴から、水に不溶なガラス化が進行

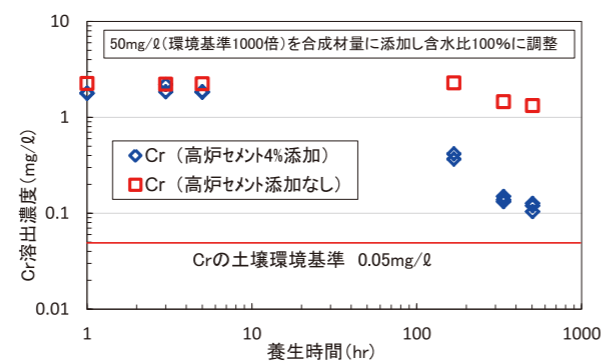


図-9 養生時間(hr)とCr溶出濃度(mg/L)の関係²⁷⁾

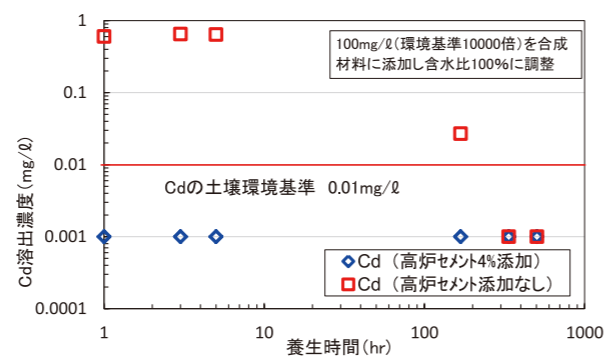


図-10 養生時間(hr)とCd溶出濃度(mg/L)の関係²⁷⁾

していると推察され、水(蒸留水)と反応して水酸化物(アルカリ性)がほとんど生成していないためであると考えられる。

次に、重クロム酸カリウム($K_2Cr_2O_7$)を蒸留水に溶解させた1,000倍濃度の模擬汚染水を複合リサイクル材料に添加して供試体を作製したときのpH値は、アルカリ刺激剤を加えないブランクテストの供試体が弱酸性の5.0～5.2を示し、アルカリ刺激剤を加えた供試体はアルカリ性の11.2～11.6を示した。このとき、アルカリ刺激剤として高炉セメントB種を4.0%添加したことにより、複合リサイクル材料がアルカリ環境となり、ガラス化していた石炭灰や高炉スラグが溶解し、水酸化物とエトリンガイトが連鎖的に生成しているものと推察される。

また、一般廃棄物の焼却灰からの重金属類の溶出濃度の検討を行った貴田らの研究⁶³⁾によると、両性金属であるクロムの溶出濃度はpH値が7前後で最も減少し、これを起点としてpH値が小さくなくても(酸性)、逆に大きくなっても(アルカリ性)その溶出濃度が増大することを報告している。

以上のことより、貴田らの研究結果⁶³⁾を前提とした場合、供試体のpH値7以上のアルカリ環境においてクロムの溶出濃度が増大すること、エトリンガイトの生成量が増大することによってクロムの溶出濃度が減少することが相反する関係となる。したがって、本節の研究では、遅効性のエトリンガイトの生成量が増大してくると考えられる168～504時間において、エトリンガイトがアルカリの影響に打ち勝ってクロムの溶出濃度を大きく減少に転じていることが示唆される。

5.2.5 カドミウム(Cd)の不溶化

図-10²⁷⁾に、土壤環境基準の10,000倍濃度に調整したカドミウムの模擬汚染水を、含水比100%になるように添加した供試体のカドミウム溶出濃度と養生時間との関係を示す。カドミウムの土壤環境基準は、0.01mg/Lが溶出基準となっており、六価クロムの場合同様、各倍率濃度において溶出濃度と養生時間との関係を検討したところ、図に示す10,000倍濃度のレンジで大きな変化が見られた。この時のカドミウム含有量は100mg/kgとなる。これとあわせて、六価クロムの場合同様ブランクテストの目的で、複合リサイクル材料にアルカリ刺激剤を添加しない供試体を作製し溶出試験を実施している。まず、ブランクテストの供試体に着目すると、養生時間0～5時間に至るまでは溶出濃度(0.65～0.60mg/L)の変化は認められず、5～168時間(1週)の間で溶出濃度が減少(0.03→0.001mg/L)に転じていることが観察される。さらに、336～504時間(2～3週)に至り、土壤の環境基準を下回る値にまで減少(0.001mg/L)している。アルカリ刺激剤を添加しないが、六価クロムの場合同様エトリンガイト以外のカドミウム不溶化に有効な鉱物が生成されたものと推察される。また、カドミウムの汚染水として塩化カドミウム($CdCl_2$)を適用したが、塩化物イオンと複合リサイクル材料の構成成分とが結び付き、新たな鉱物を生成している可能性も示唆される。

次に、図よりアルカリ刺激剤を添加した供試体に着目すると、終始一貫して環境基準の1/10である0.001mg/Lを推移していることがわかる。このことから、同複合リサイクル材料は本節の研究の条件下において、カドミウムの不溶化に極めて有効である。ただしこの場合、アルカリ環境におけるカドミウムの不溶化と、エトリンガイトの吸着性能とが相乗的に寄与していることが示唆される。

以下では、六価クロムの場合同様、本節の研究における供試体のpHの影響について考察する。

まず、塩化カドミウムを溶解させた10,000倍濃度の模擬汚染水のpH値は6.8を示した。次に、この模擬汚染水を複合リサイクル材料に加えて供試体を作製した時のpH値は、セメントを加えないブランクテストの供試体がほぼ中性の6.2～6.9を示し、アルカリ刺激剤を添加した供試体は、アルカリ性の11.4～11.9を示した。このとき、アルカリ刺激剤として高炉セメントB種を4.0%添加した場合、六価クロムの場合と同様の理由でポズラン反応が急激に進行しているものと推察される。

また、カドミウムは、アルカリ環境において溶解度の小さい水酸化カドミウム($Cd(OH)_2$)などの水酸化物を生成することから、アルカリ刺激剤を添加したpH値11.4～11.9の供試体に関しては、アルカリの影響によりカドミウムの溶出濃度が終始一貫して0.001mg/L以下を推移しているものと推察される。pH値が中性の6.2～6.9を示したブランクテストに関しては、アルカリの影響もエトリンガイトの影響も受けないことから、養生時間0～5時間までは溶出濃度に変化は認められない。次に、336～

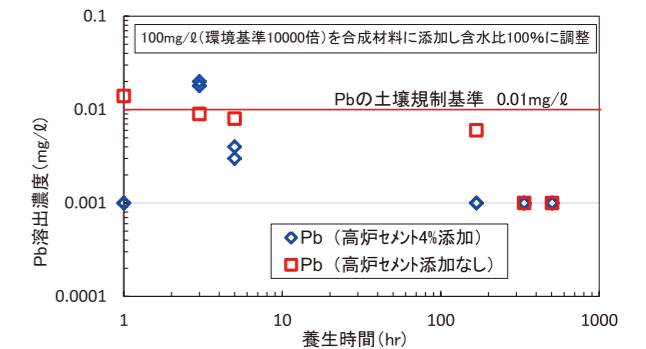


図-11 養生時間(hr)とPb溶出濃度(mg/L)の関係²⁷⁾

504時間においては、上記でも述べた通り、エトリンガイト以外のカドミウム不溶化に有効な鉱物が、生成されたことが示唆される。

5.2.6 鉛(Pb)の不溶化

図-11²⁷⁾に、環境基準の10,000倍濃度に調整した鉛の模擬汚染水を、含水比100%になるように添加した供試体の鉛溶出濃度と養生時間との関係を示す。鉛の土壤環境基準は、0.01mg/Lが溶出基準となっており、カドミウムの場合と同様、各倍率濃度において溶出濃度と養生時間との関係を検討した所、図に示す10,000倍濃度のレンジで大きな変化が見られた。この時の鉛含有量は100mg/kgとなる。これとあわせて、六価クロムの場合同様ブランクテストの目的で、複合リサイクル材料にアルカリ刺激剤を添加しない供試体を作製し溶出試験を実施している。

図より、アルカリ刺激剤添加の有無を問わず養生時間の全域に渡り、鉛の溶出濃度の低減(0.02→0.001mg/L)が見られる。このことは、鉛の汚染水として硝酸鉛($Pb(NO_3)_2$)を適用したが、硝酸塩と複合リサイクル材料の構成成分とが結び付き、新たな鉱物を生成している可能性も示唆される。また、エトリンガイトが鉛の不溶化に有効であることは、既往の研究でも報告されている⁶¹⁻⁶²⁾。

以下では、六価クロム、カドミウムの場合と同様、本節の研究における供試体のpHの影響について考察する。

まず、硝酸鉛を溶解させた10,000倍濃度の模擬汚染水のpH値は酸性の3.5を示した。次に、この模擬汚染水を複合リサイクル材料に加えて供試体を作製した時のpH値は、セメントを加えないブランクテストの供試体が酸性の3.8～4.2を示し、アルカリ刺激剤を添加した供試体はアルカリ性の10.8～11.2を示した。このとき、アルカリ刺激剤の作用により、ポズラン反応が急激に進行しているものと推察される。

また、一般廃棄物の焼却灰からの重金属類の溶出濃度の検討を行った貴田らの研究⁶³⁾によると、両性金属である鉛の溶出濃度はpH値が9前後で最も減少し、これを起点としてpHが小さくなくても(酸性)、逆に大きくなっても(アルカリ性)その溶出濃度が増大することを報告している。

以上のことより、貴田らの研究結果⁶³⁾を前提とした場合、供試体のpH値9以上のアルカリ環境において鉛の溶出濃度が増大すること、エトリンガイトの生成量が増大することによって鉛の溶出濃度が減少することが相反する関係となる。したがって、本節の研究では、遅効性のエトリンガイトの生成量が増大してくると考えられる168～504時間において、エトリンガイトがアルカリの影響に打ち勝って鉛の溶出濃度を大きく減少に転じていることが示唆される。

5.3 複合リサイクル材料による実汚染土の不溶化

前節では、廃石膏ボード由来の半水石膏を母材とする複合リサイクル材料が、重金属類の不溶化に極めて有効であることを六価クロム、カドミウム、鉛の模擬汚染水を用いて実証した。本節では、この複合リサイクル材料をヒ素・六価クロム・鉛などで複合的に汚染された実汚染土壌^{65)~68)}に適用し、より実際的な不溶化剤としての有効性を検討している。

5.3.1 実汚染土の供試体と検液の作製

本節の研究⁶⁴⁾で供試体として用いた実汚染土壌は、トンネル工事での発生土をサンプル試料として入手したもので、事前の溶出試験結果から、ヒ素(As)のみならず鉛(Pb)、六価クロム(Cr(VI))の溶出濃度が土壤環境基準を超過していることが判明している。また、この実汚染土壌の試料は、サンプリング個所の違いからA、B、Cの3種類の試料に分類している。試料Aは、粘土及びシルトが少ない砂質土を主とする土壤である。試料BとCは、粘土およびシルトを主とする土壤である。

次に、事前に実施した溶出試験結果から、As溶出濃度が最も低い値を示した資料Aに関して、不溶化剤の添加量が比較的少ないM/S(%) (M:不溶化剤, S:実汚染土壌)が0～10%の範囲で、土壤環境基準を下回るものと予測された。したがって、この範囲で精度を高めるためにM/S(%)を0, 5, 10, 20%に設定している。このことに対して、As溶出濃度が比較的高い値を示した試料BとCに関しては、不溶化剤の添加量の範囲を拡大してM/S(%)を0, 10, 20, 40%に設定している。ここで、M/S=0%はブランクテストである。このブランクテストは、供試体作製から養生を経て溶出試験までの全ての操作手順を他の供試体と同様に行い、これをベンチマークとしてM/S(%)と重金属類の溶出濃度(mg/L)との関係を相対的に検討するために実施している。

また、前節の研究²⁷⁾では、高含水比の軟弱地盤を研究の対象としていることに準じて、同試料の乾燥重量+不溶化剤に対して含水比が100%になるように蒸留水を加えて攪拌し、設定したM/S(%)の値に対して3検体ずつ合計36検体の供試体を作製している。これらの供試体を室温(20±2℃)、相対湿度(35～45%)の環境に調整し4週間空气中養生を行っている。

検液の作製に関しては、所定の養生期間を経過した供試体を乳鉢で粉碎し、粉碎した供試体10gに対して100gの水を

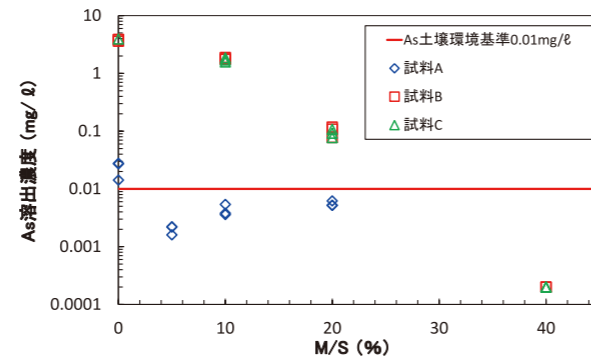


図-12 M/S(%)とAs溶出濃度(mg/L)との関係⁶⁴⁾

加えてスターから6時間振とうし、上澄み液を濾過して、ヒ素、六価クロム、カドミウム、鉛の溶出検液を作製している。本節の研究⁶⁴⁾では、溶媒の不純物、pH、溶出における攪拌時間間などの要因が、重金属類の溶出濃度に影響を及ぼすものと考えられたこと、複合リサイクル材料のエトリンガイト生成に関する前節の研究²⁷⁾との相対的な検討を行うために、検液作製方法は筆者らの既往の研究²⁷⁾³³⁾³⁴⁾に準拠している。このことから、供試体の作製ならびに溶出試験による溶媒には、水質の違いによる各重金属イオン濃度への影響がもっとも少ないと考えられる蒸留水を用いている。

5.3.2 実汚染土におけるヒ素(As)の不溶化

図-12⁶⁴⁾にM/S(%)とAs溶出濃度(mg/L)との関係を示す。なお、ヒ素に関する土壤環境基準は0.01mg/Lが溶出基準となっている。まず、試料Aに着目すると、M/S=0%のときAs溶出濃度は、図より、土壤環境基準の1.40～2.80倍の0.014～0.028mg/L(平均値=0.023mg/L)を示し、M/S=5%以上で、土壤環境基準の1/2～1/10である0.005～0.001mg/LにAs溶出濃度が減じている。

次に、試料B及び試料Cに着目すると、M/S=0%のときのAs溶出濃度は、土壤環境基準の362～388倍である3.616～3.884mg/L(平均値=3.769mg/L)の高濃度を示し、M/Sの増大に伴い緩やかな曲線を描きながらAs溶出濃度が低下し、M/S=40%では土壤環境基準の1/10倍である0.001mg/Lを大きく下回っている。図より、試料B及び試料Cに関しては、M/S=30%以上で土壤の環境基準である0.01mg/Lを下回るものと推定される。

試料Aと試料B及び試料CとのAs溶出濃度の差に関して、同じトンネル工事現場から採取したサンプル試料であっても試料Aは、シルト(0.075～0.005mm)と粘土(0.005mm以下)が少ない砂質(2～0.075mm)を主とする土壤であるのに対し、試料B及び試料Cはシルトと粘土を主とする土壤であった。このことから、試料Aは質量当たりの表面積(比表面積)が試料B及び試料Cに比べて小さいことは明らかで、ヒ素が土粒子表面に均一に付着しているものと考えられ、このことが、As溶出濃度が低い値を示した要因であると推察される。土粒子の

形状や表面状態を考慮せずに密度が一般的な球体であると仮定すると、単位質量当たりの表面積(比表面積)は平均粒子径が1/n倍になるとn倍になる。このことから、M/S=0%における試料AのAs溶出濃度の平均値に対して、試料B及び試料CのAs溶出濃度の平均値が3.769/0.023≒164倍になることから、試料B及び試料Cの平均粒子径は試料Aの1/64倍に相当するものと推定される。

また、土壤中のヒ素は、As(V)がヒ酸(H₃AsO₄)をAs(III)が亜ヒ酸(H₃AsO₃)を形成し、水の存在でヒ酸イオン(H₂AsO₃⁻, HAsO₃²⁻, AsO₃³⁻)として鉄やアルミの水酸化物に吸着している。そして、pHが8.0～9.5以上に高くなることにより、ヒ素の溶出量が増大する傾向を示す⁶⁹⁾。ここで、エトリンガイトを生成するためには高いpH環境が必要となるが、このような条件下においても本節の実験のヒ素の溶出濃度は減少に転じている。その主因は、複合リサイクル材料から合成されるエトリンガイト等が、ヒ素の不溶化に寄与しているものと考えられる。

以上のことから、本節の研究で用いた複合リサイクル材料は、ヒ素で汚染された実汚染土壌を対象として、不溶化剤としての有効性を明らかにしている。

5.3.3 実汚染土における六価クロム(Cr(VI))の不溶化

図-13⁶⁴⁾に、実汚染土壌に不溶化剤を適用した場合のM/S(%)とCr(VI)溶出濃度(mg/L)との関係を示す。なお、六価クロムに関する土壤環境基準では0.05mg/Lが溶出基準となっている。図より、試料Aの値に着目してM/S=0%のとき、土壤環境基準の1/50倍以下である0.0003～0.0007mg/L(平均値=0.0005mg/L)の値となり、M/Sが増大しても測定器の分析下限値近くを示している。次に、試料B及び試料Cの値に着目すると、M/S=0%のとき、土壤環境基準の1.52～0.76倍である0.076～0.038mg/L(平均値=0.058mg/L)を示し、M/S=20%までは大きな変化はなく、土壤環境基準の1/1.7～1/2.5倍である0.03～0.02mg/Lを推移している。そして、M/S=40%のとき、土壤環境基準の1/50倍である0.001mg/L以下の値を示している。

以上のことから、本節の研究で用いた複合リサイクル材料は、六価クロムで汚染された実汚染土壌を対象として、不溶化剤としての有効性を明らかにしている。その主因は、複合リサイクル材料で合成されるエトリンガイトやその前駆体であるモノサルフェイト及びカルシウムアルミノフェライト等であると考えられる⁵⁴⁾。

なお、エトリンガイトが六価クロムの不溶化に有効であることは、既往の研究でも報告されている⁵⁸⁾。

5.3.4 実汚染土における鉛(Pb)の不溶化

図-14⁶⁴⁾に、実汚染土壌に不溶化剤を適用した場合のM/S(%)とPb溶出濃度(mg/L)との関係を示す。なお、鉛に

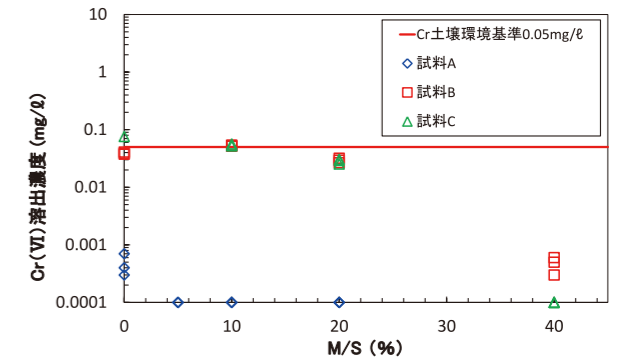


図-13 M/S(%)とCr(VI)溶出濃度(mg/L)との関係⁶⁴⁾

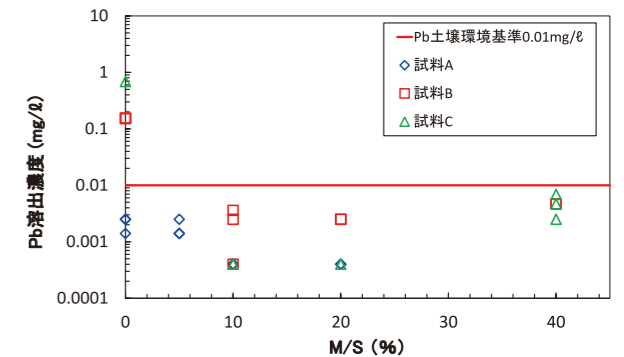


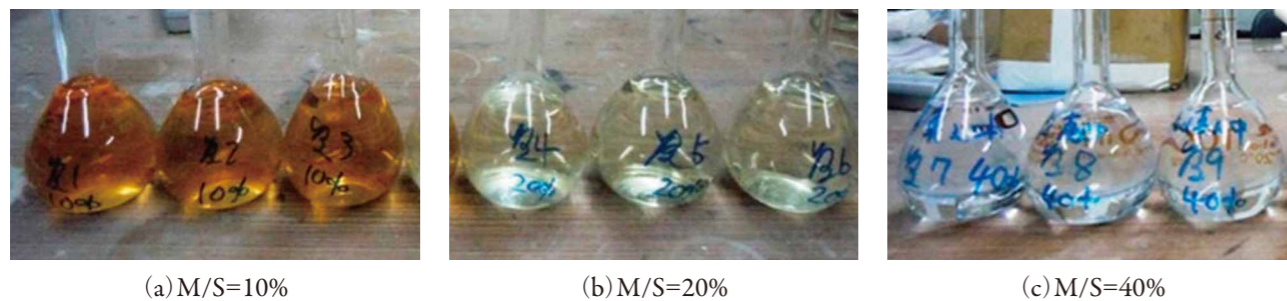
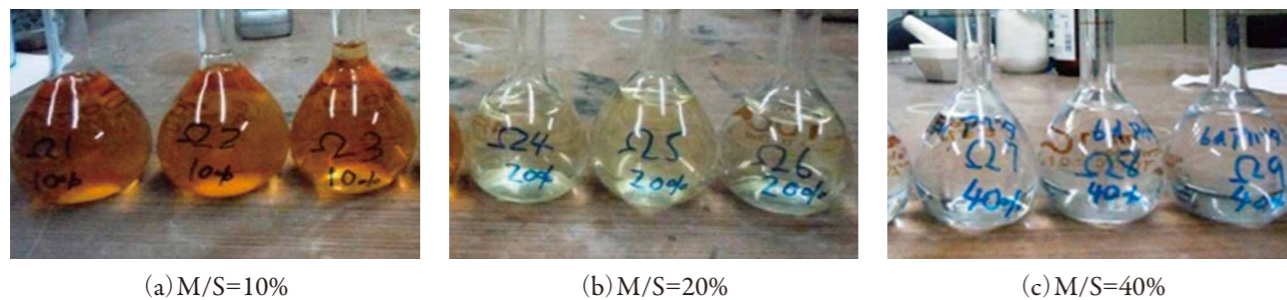
図-14 M/S(%)とPb溶出濃度(mg/L)との関係⁶⁴⁾

関する土壤環境基準では0.01mg/Lが溶出基準となっている。図より、試料Aの値に着目してM/S=0%のとき、土壤環境基準の1/10～1/3.3倍である0.001～0.003mg/L(平均値=0.002mg/L)の値を示し、M/Sの増加に伴い0.001mg/Lを下回っている。次に、試料Bに関して、M/S=0%のとき、環境基準の15倍に相当する0.152～0.154mg/L(平均値=0.153mg/L)を示している。M/S=10%以上で大きく減少し、土壤環境基準の1/3.3～1/2.0倍である0.003～0.005mg/Lを推移している。そして、試料Cに着目すると、M/S=0%のとき、土壤環境基準の67～69倍に相当する0.674～0.688mg/L(平均値=0.681mg/L)を示し、試料B同様にM/S=10%以上で大きく減少し、土壤環境基準の1/2～1/10倍である0.005～0.001mg/Lを示している。

以上のことから、本節の研究で用いた複合リサイクル材料は、鉛で汚染された実汚染土壌を対象として、不溶化剤としての有効性を明らかにしている。その主因は、複合リサイクル材料で合成されるエトリンガイトやその前駆体であるモノサルフェイト等であると考えられる。なお、エトリンガイトが鉛の不溶化に有効であることは、既往の研究でも報告されている⁶¹⁾。

5.3.5 実汚染土における検液の色

試料Aの供試体から製作したM/S=0, 5, 10, 20%の全ての検液(12液体)に関して、呈色や懸濁は認められず無色透明であった。このことは、試料Aがシルト及び粘土が少ない砂質土を主とする土壤であり、重金属類のヒ素、六価クロム、

写真-2 試料Bの供試体から作製した検液の色⁶⁴⁾写真-3 試料Cの供試体から作製した検液の色⁶⁴⁾

鉛の溶出濃度が極めて小さい値を示していることから関連づけられる。すなわち、土粒子全体の単位質量当たりの表面積(比表面積)が他の試料に比べて小さいために、検液の色を呈する重金属類やその他の不純物の土粒子表面への付着量が少ないためであると考えられる。

次に、写真-2⁶⁴⁾及び写真-3⁶⁴⁾に試料B及び試料Cの供試体から生成した検液が呈した色の変化を示す。両写真とも(a)はM/S=10%で、黄褐色を呈しており、側面から光を照射しても光の通路が一様に光って見えるチンダル現象が起こらないことから、懸濁は認められない。同じく(b)はM/S=20%で、薄い黄褐色を呈しており、(a)同様に懸濁は認められない。同様にして(c)はM/S=40%で、無色透明である。なお、試料B及び試料CともにM/S=0%の検液は、肉眼で観察する限りM/S=10%の検液と同色・同濃度で懸濁も認められなかったので写真は割愛している。ここで試料Bと試料Cの検液が黄褐色を呈していることに関して、クロムや鉄などのアクア錯体⁷⁰⁾が生成している可能性が考えられる。アクア錯体は、水溶液中で核となる金属原子に水分子が結合(配位結合)して形成する大きな原子集団である。特に、核となる重金属原子が遷移元素である場合、その水溶液が綺麗な色を呈することが知られている⁷¹⁾。

本節の研究で不溶化の対象としている六価クロム(Cr(VI))は、遷移金属に属する元素であり水溶液中では6つの水分子と配位結合して[Cr(H₂O)₆]³⁺などのアクア錯イオンを形成し、黄褐色を呈することが知られている。また、本節の実験で用いた試料は、トンネル工事の発生土であることから、ヒ素、六価クロム、鉛の含有は自然由来であると考えられる。中でもクロムは、六価クロムの形態よりも三価クロムの形態として自然界には多く存在することが知られている。このことから、検液の発色は、三価クロム由来でアクア錯イオンが生成した影響による可能性が考えられる。

一方、鉄は、特定有害物質に該当しないことから、本節の研究で不溶化の対象ではないが、クロム同様遷移金属類に属し、6個の水分子と配位結合して[Fe(H₂O)₆]³⁺などのアクア錯イオンとして存在し、その検液は黄褐色を呈することが知られている。また、鉄は、平均的な土壌の中で最も多く含まれている遷移金属であり、クラーク数順位⁷²⁾は4位で、平均的な土壌には質量%で4.7%含まれている。最も、本節の研究で不溶化の対象としているクロムと鉛は、クラーク数順位21位と36位であり、そのクラーク数は、0.02%と1.5×10⁻³%で、鉛は遷移元素に属さない。このことから、検液が呈する黄褐色は、鉄のアクア錯イオンが生成することによる影響が最も大きいものと推定される。

以上のことから、本節の研究で用いた不溶化剤はM/S=40(%)まで増大することにより、黄褐色に呈するアクア錯イオン等を吸着して検液を無色透明とし、かつ重金属類のヒ素、六価クロム、鉛の溶出濃度を土壌環境基準以下に不溶化する機能を有することが明らかである。この主因は、本節の研究で不溶化剤として用いた複合リサイクル材料が生成するエトリンガイト等の吸着作用によるものであると考えられる。

6. おわりに

石灰石は、我が国で自給することができる鉱物資源である。その埋蔵量が膨大であることから、安価で、しかも物理化学的に安定しており人畜無害である。このことから、昔より農業、建築、土木、鉄鋼、セメント、食品などの業界を問わず多様な分野で利用されている。石灰石(CaCO₃:炭酸カルシウム)からは、焼成することにより生石灰(CaO:酸化カルシウム)が生成し、これに加水することで消石灰(Ca(OH)₂:水酸化カルシウム)を得ることができる。これらは、その特性や用途に応じて多角的に使い分けられている。

特に、本稿でも取り上げた通り、炭酸カルシウムや水酸化カルシウムを排煙脱硫の中和剤として用い、そのことにより生成される排煙脱硫石膏を石膏ボードの原材料として再利用している。やがて、建材としての役割を終えた廃石膏ボードを農業用肥料や土壌の改良材として再々利用して土に戻している。このように、石灰は多段階に渡りカスケード利用することができる優れた鉱物である。なお、産業副産物からなる複合リサイクル材料において、エトリンガイトの合成に欠かすことができない酸化カルシウム(CaO)は、高炉スラグ由来である。そして、そのルーツは石灰石に遡る。

一方で、今や現代社会においては、温室効果ガスの削減、資源の有効利用(3R:Reduce, Reuse, Recycle)、エネルギーの合理的利用(エクセルギーとエネルギー効率の向上)などの課題解決に向けた取り組みに注目が集まっている。

本研究で開発に取り組んできた複合リサイクル材料は、実に、それらの観点に立脚した極めて優れた材料となり得るものと考えられる。産業副産物である廃石膏ボード、石炭灰、高炉スラグを複合リサイクル材料の素材として有効活用しているが、それらの単独素材のみでは、土壌環境基準を超過するフッ素、六価クロム、カドミウム、鉛などが溶出することが明らかとなっている。その上で、これらの産業副産物を化学当量的にエトリンガイトが最大量生成する配合とすることで、自ら含有する重金属類を不溶化するだけでなく、環境基準の数十倍に相当する高濃度の重金属類の不溶化にも有効であることを実証している。

以上のことなどから、この複合リサイクル材料は、水硬性の半水石膏を母材とする固化材としての有効性と、重金属類の不溶化性能とを合わせ持つ極めて優れた材料であると言える。

謝辞

本稿の執筆は、故・亀井健史先生(元宮崎大学教授)の継続的なご指導による成果を基盤として成し得たものである。ここに記述して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 独立行政法人国立環境研究所:安定型最終処分場における高濃度硫化水素発生機構の解明ならびにその環境汚染防止対策に関する研究, pp.6-15, 2005.
- 2) 無機マテリアル学会, セメント・セッコウ・石灰ハンドブック, pp.138-160, 1996.
- 3) 亀井健史, 珠玖孝行:廃石膏ボードから再生した半水石膏を混入したセメント安定処理土の一軸圧縮強さ, 地盤工学ジャーナル, Vol.2, No.3, pp.237-244, 2007.
- 4) 亀井健史, 加藤孝明, 珠玖孝行:半水石膏の地盤改良材としての有効利用-廃石膏ボードの再利用-, 地盤工学ジャーナル, Vol.2, No.3, pp.245-252, 2007.
- 5) 地盤工学会, 土質試験の方法と解説:安定処理土の締固めをしない供試体作製, pp.225-262, 1990.

- 6) 蓬萊秀人, 亀井健史, 小川靖弘, 志比利秀:半水石膏生産システムの開発とその地盤工学的意義-廃石膏ボードの再生-, 地盤工学ジャーナル, Vol.3, No.2, pp.133-142, 2008.
- 7) 無機マテリアル学会, セメント・セッコウ・石灰ハンドブック, p.149, 1996.
- 8) 亀井健史, 蓬萊秀人:リサイクル石膏を用いた硬化時間が任意に調節可能な地盤改良材の開発, 地盤と建設, Vol.32, No.1, 2014.
- 9) 亀井健史, 鶴飼恵三, 珠玖隆行:廃石膏ボードから再生した半水石膏の地盤改良材としての有効利用, 土と基礎, Vol.55, No.10, pp.26-28, 2007.
- 10) 山内俊吉, 田賀井秀夫:石膏の研究(第1報), 窯業協会誌, Vol.61, No.690, pp.600-604, 1953.
- 11) 檜山眞平, 福井博:石膏の加熱変化について(第1報), 石膏と石灰, Vol.1995, No.16, pp.765-769, 1955.
- 12) 村上恵一, 島村佳尚, 田中弘文:石膏の脱水温度に関する研究, 石膏と石灰, Vol.1957, No.31, pp.1522-1528, 1957.
- 13) 藤井欽二郎:高温に於ける石膏の分解に就いて, 石膏, Vol.1952, No.7, pp.320-323, 1952.
- 14) 安藤直彦:焼セッコウ製造技術の進歩, 石膏と石灰, Vol.1986, No.200, pp.33-37, 1986.
- 15) 村上恵一:セメントと石膏, 窯業協会誌, Vol.71, No.811, pp.C333-C338, 1963.
- 16) 村上恵一, 花田光雄:天然無水石膏の水和に関する研究, 石膏, Vol.1953, No.8, pp.350-357, 1953.
- 17) 村上恵一, 田中弘文:化学石膏の脱水温度に関する研究, 石膏と石灰, Vol.1956, No.24, pp.1260-1266, 1956.
- 18) 大門正機, 李郷喜, 近藤連一:半水石膏の水和機構に関する研究, 窯業協会誌, Vol.78, No.900, pp.277-282, 1970.
- 19) 山田保:半水セッコウ凝結の遅緩および促進作用について, 石膏と石灰, Vol.1967, No.91, pp.255-259, 1967.
- 20) 安達正雄, 谷本明:純水における硫酸カルシウムの溶解度表示式, 石膏と石灰, Vol.1975, No.135, pp.63-72, 1975.
- 21) 永井彰一郎, 関谷道雄, 山川一雄:無水石膏系プasterの研究(第1報), 窯業協会誌, Vol.59, No.665, pp.525-529, 1951.
- 22) 安藤直彦:排煙脱硫セッコウの特性と利用, 石膏と石灰, Vol.1974, No.131, pp.164-168, 1974.
- 23) 寺田一郎:排煙脱硫セッコウの品質について, 石膏と石灰, Vol.1975, No.137, pp.155-160, 1975.
- 24) 炭村榮一:コンクリート技術の歴史第8回, コンクリート工学, Vol.31, No.2, pp.65-70, 1993.

- 25) 高橋聡:セッコウ固溶体への挑戦, Journal of the Society of Inorganic Materials, Japan, Vol.7, No.288, pp.480-486, 2000.
- 26) 村上恵一:CaSO₄-H₂O系の研究(I), 石膏, Vol.1951, No.3, pp.119-124, 1951.
- 27) 亀井健史, 蓬萊秀人:複合リサイクル材料による六価クロム・カドミウム・鉛の不溶化, 地盤工学ジャーナル, Vol.12, No.4, pp.397-408, 2017.
- 28) 亀井健史, 蓬萊秀人:高炉セメントB種による半水石膏のフッ素不溶化技術の開発, 地盤工学ジャーナル, Vol.4, No.1, pp.91-98, 2009.
- 29) 徳光俊章, 佐藤健司, 戸田健司, 盛永博子, 上松和義, 佐藤峰雄:エトリンガイトによる水溶液からのフッ化物イオンの除去, Journal of the Ceramic Society of Japan, Vol.114, No.8, pp.729-732, 2006.
- 30) 無機マテリアル学会:セメント・セッコウ・石灰ハンドブック, pp.417-418, 1996.
- 31) 亀井健史, 蓬萊秀人, 鶴飼恵三:半水石膏・石炭灰・高炉セメントB種を用いた安定処理土中のフッ素・六価クロム・ホウ素の不溶化, 地盤工学ジャーナル, Vol.5, No.3, pp.449-461, 2010.
- 32) 蓬萊秀人, 亀井健史, 松田哲夫, 伊藤哲男, 出口宗治:半水石膏に含まれるフッ素の不溶化技術, 地盤と建設, Vol.28, No.1, pp.31-38, 2010.
- 33) 亀井健史, 蓬萊秀人:複合リサイクル材料によるフッ素の不溶化技術, 地盤と建設, Vol.31, No.1, pp.21-28, 2013.
- 34) Kamei T, Ahmed A, Horai H, Ugai K. :A novel solidification technique for fluorine-contaminated basanite using waste materials in ground improvement applications. Journal of Material Cycles and Waste Management, Vol.17, No.2, pp.380-390, 2015.
- 35) 猪股敏郎:土壌汚染の現状と今後の課題, 環境技術, Vol.24, No.1, pp.39-43, 1995.
- 36) 石川浩次, 大野博之:土壌汚染問題と地質技術者の役割・課題, 応用地質, Vol.50, No.6, pp.362-373, 2020.
- 37) 阪部秀雄, 沢幸平, 中山義久, 白木音信:セメント系改良土などからの六価クロム溶出の現状と傾向-過去3年間の溶出試験データに基づく分析-, Vol.61, No.1, pp.7-10, 2012.
- 38) 黄琬恵, 中山徹:日本の農用地土壌汚染対策に関する研究-東アジアの稲作地域における土壌汚染対策と土地利用についてその1-, 日本建築学会技術報告集, Vol.16, No.33, pp.671-676, 2010.
- 39) 川崎晃, 荒尾知人, 石川覚:湛水管理によるカドミウムのコメへの蓄積軽減とその問題点, 日本衛生学雑誌, Vol.67, No.4, pp.478-483, 2012.
- 40) 李琮揆, 大場陽子, 坂井悦郎, 大門正機:3CaO・Al₂O₃-CaSO₄-2H₂O-CaCO₃系の水和物の合成, 無機マテリアル, Vol.5, May, pp.194-199, 1998.
- 41) 李琮揆, 大場陽子, 坂井悦郎, 大門正機:3CaO・Al₂O₃-CaSO₄-2H₂O-CaCO₃-NaSO₄-H₂O系の水和物の合成, 無機マテリアル, Vol.4, May, pp.196-204, 1997.
- 42) 吉良欣一, 間木野義男, 村田良彦:エトリンガイトの脱水と再水和, Gypsum & Lime, Vol.170, No.1, pp.7-13, 1981.
- 43) 吉良欣一, 間木野義男, 山本博一:エトリンガイトの炭酸化, Gypsum & Lime, Vol.159, No.1, pp.48-53, 1979.
- 44) 福原実, 後藤誠史, 浅賀喜与志, 大門正機, 近藤連一, 小野吉雄:ラトラカルシウムアルミノフェライト-セッコウ系のエトリンガイト生成期における水和反応速度と鉄の挙動, 窯業協会誌, Vol.88, No.8, pp.435-440, 1980.
- 45) 原島亜弥, 伊藤公久:高炉スラグとアルカリ性水溶液との反応によるエトリンガイトの生成条件, 鉄と鋼, Vol.101, No.11, pp.8-15, 2015.
- 46) 安江任, 金井謙介, 小嶋芳行, 荒井康夫:繊維状3CaO・Al₂O₃・3CaCO₃・32H₂Oの合成と性質, Journal of the Ceramic Society of Japan, Vol.100, No.8, pp.1053-1059, 1992.
- 47) 田中稔, 橋詰源蔵, 松井博:排煙脱硫工程でのα型半水セッコウ, セッコウウイスキーおよびエトリンガイトの製造と用途, Gypsum & Lime, Vol.150, No.1, pp.22-28, 1997.
- 48) 露木尚光, 岡龍一郎, 宮川継男, 笠井順一:エトリンガイトの生成に及ぼすグルコン酸ナトリウムの影響, 日本セラミックス協会学術論文誌, Vol.98, No.4, pp.332-338, 1990.
- 49) 佐藤賢之助, 齋藤豪, 佐伯竜彦, 菊池道生:エトリンガイトの生成量および生成起源が長期間硫酸塩に浸漬した高炉セメント系材料の耐硫酸塩性に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, Vol.68, No.1, pp.396-403, 2014.
- 50) 金橋康二, 相本道宏:個体²⁷Al NMRによるエトリンガイトの新規定量方法, セメント・コンクリート論文集, Vol.66, No.1, pp.266-272, 2012.
- 51) 伊藤義也, 越川茂雄, 鶴澤正美, 山口晋:エトリンガイトを含むセメント硬化体の機器分析における前処理条件, セメント・コンクリート論文集, Vol.63, No.1, pp.85-90, 2009.
- 52) 栗原宏武:産業副産物を利用した土の固化技術に関する研究, 資源処理技術, Vol.41, No.3, pp.8-17, 1994.
- 53) 伊藤裕恭:廃棄物からの重金属溶出抑制, Journal of the Society of Inorganic Materials, Japan, Vol.12, No.1, pp.497-503, 2005.
- 54) 盛岡実, 中村圭介, 三五弘之, 田中智, 町長治, 青山芳夫:カルシウムアルミノフェライト系化合物の水和にもなう六価クロム固定化挙動, Journal of the Society of Inorganic Materials, Japan, Vol.12, No.1, pp.3-11, 2005.
- 55) 盛岡実, 中村圭介, 七沢章, 坂井悦郎, 大門正機:カルシウムアルミネート系化合物の六価クロム固定化挙動に及ぼす硫酸イオンの影響, Journal of the Society of Inorganic Materials, Japan, Vol.12, No.1, pp.12-17, 2005.
- 56) 盛岡実, 中村圭介, 田中智, 町長治, 三五弘之, 青山芳夫:カルシウムアルミノフェライト系化合物の六価クロム固定化挙動に及ぼす硫酸イオンの影響, Journal of the Society of Inorganic Materials, Japan, Vol.13, No.1, pp.40-46, 2006.
- 57) 橋本敦美, 伊藤靖, 佐藤道生, 羽原俊祐:合成したセメント水和生成物による微量元素(六価クロム, ヒ素, セレン, ホウ素, フッ素およびアルミニウム)の固定について, セメント・コンクリート論文集, Vol.66, No.1, pp.71-78, 2012.
- 58) 依田侑也, 茂木淳, 大場陽子, 坂井悦郎, 大門正機:ドロマイト-高炉スラグ微粉系材料の水和と六価クロム固定, 日本セラミック協会, 年会・秋季シンポジウム講演予稿集, p.148, Mar, 2009.
- 59) 寺井徹, 三国彰, 小松隆一, 池田攻:種々のpH条件で調整したポートルンダイト懸濁液によるクロム(VI)エトリンガイトの合成, 日本セラミック協会学術論文誌, Vol.114, No.1328, pp.299-302, 2007.
- 60) 磯崎昭徳, 成川知弘, 奥谷忠雄:エトリンガイト捕集/誘導結合プラズマ発行分析法によるクロム(III)及びクロム(VI)の分離・定量, 分析化学, Vol.44, No.2, pp.111-115, 1995.
- 61) 松村光夫, 山本朋睦, 上宮成之, 小島紀徳:CaO-Al₂O₃-CaSO₄水和固化物からの鉛の溶出に及ぼすエトリンガイトおよびモノサルフェイトの生成の影響, 化学工学論文集, Vol.25, No.5, pp.752-757, 1999.
- 62) 松村光夫, 小島紀徳:石炭灰・都市ゴミ焼却灰・脱硫スラッジ混合物からの鉛の溶出挙動, 日本エネルギー学会誌, Vol.79, No.5, pp.436-445, 2000.
- 63) 貴田昌子, 野馬幸生:廃棄物の溶出特性, 廃棄物学会誌, Vol.7, No.5, pp.410-421, 1996.
- 64) 亀井健史, 蓬萊秀人:不溶化剤としての複合リサイクル材料の実汚染土への適用性, 地盤と建設, Vol.36, No.1, pp.31-38, 2018.
- 65) 小川剛:土壌汚染の現状と今後の課題, 安全工学, Vol.12, No.4, pp.161-167, 2001.
- 66) 福永勲:土壌・地下水汚染対策の現状と課題, 生活衛生, Vol.47, No.3, pp.155-169, 2003.
- 67) 丸茂克美:自然由来の重金属に起因する土壌汚染問題への地球化学的アプローチ, 地学雑誌, Vol.116, No.6, pp.877-891, 2007.
- 68) 石原舜三:砒素鉱物資源の地質学, 資源地質, Vol.61, No.2, pp.138-143, 1996.
- 69) 吉村尚久, 赤井純治:土壌および堆積物中のヒ素の挙動と地下水汚染-総説-, 地球化学, Vol.57, pp.137-154, 2003.
- 70) 中原勝儼:錯体化学の基礎, 金属表面技術, Vol.29, No.3, pp.150-157, 1978.
- 71) 大瀧仁志:溶液中のイオンの形と色, 化学と教育, Vol.48, No.6, pp.356-359, 2000.
- 72) 小沼直樹:地殻の元素存在度, 化学教育, Vol.20, No.3, pp.163-168, 1972.

筆者紹介



HORAI Hideto
蓬萊 秀人
博士(工学)
1986年入社
技術本部

コンテナを用いたアスファルト混合物の 輸送時間拡大に向けた検討

Study to expand the transportation time of asphalt mixture using containers.

寺内 崇仁・河邊 真治
TERAUCHI Takahito, KAWABE Masaharu
日工株式会社 開発部4課

概要

アスファルト混合物(以下、合材)の生産量は年々減少しており、それに合わせて、全国に点在しているアスファルトプラント(以下、AP)も減少している。そして、合材の生産性を改善するため、APはさらに減少すること(以下、統廃合)が予想される。合材の品質は温度に大きく依存することから、APの統廃合が進むと、現在のダンプトラックに合材を積載して舗装現場まで輸送する方法(以下、現行方法)では、合材の温度低下によって、供給不可能なエリアが拡大することが懸念される。よって、合材の温度を維持することは、供給可能なエリアの拡大に向けて、重要な要素技術となる。

田村ら¹⁾(2021)は、現行方法における合材の温度変化について検討を行っており、外気に晒される合材の表面よりも、ダンプトラック荷台と接触する合材の底面の方が著しい温度低下を示すことから、筐体への熱伝導と外気への熱伝達を抑制できる、合材の輸送コンテナを開発することが、供給可能なエリアを拡大する上で有効であると報告している。これらのことを踏まえて、筆者らは、特殊保温材を施工したコンテナ(以下、コンテナ)の試作と改良を重ねてきた²⁾³⁾。本稿では、コンテナを用いた合材の保温特性について検討を行った。

1. 緒言

現行方法において、合材は一般的に1.5~2時間を超えると、温度低下により品質が劣化し舗装ができなくなる。このため、合材の輸送時間が2時間以内に収まるように全国に分散してAPを建設してきたが、「2022年度アスファルト合材統計年報」⁴⁾によると、公共投資抑制の影響を受けて、2000年に7,000万tあった合材製造数量が、2022年には3,900万tへと約44%減少しており、その製造数量の減少に合わせてAPの数も1,500基から1,000基へと、約34%減少していることが読み取れる(図-1参照)。

また、近年、温室効果ガスによる地球温暖化の影響から、豪雨災害等の更なる頻発化・激甚化などが予測され、国際社会は2050年の温室効果ガス排出量実質ゼロ(カーボンニュートラル)に向けて動き出した⁵⁾⁶⁾。無論、道路業界においてもカーボンニュートラルに向けた取り組みに注力しており、APにおける運営方法の見直しによる、合材生産性の改善(以下、APの革新)が求められる。

加えて、ドライバーの労働時間が減少(自動車運転者の労働時間等の改善のための基準の一部改正⁷⁾)することや、工場の働き手が減少すること等の人員不足に関する問題があり、経営合理化のため、さらにAPの統廃合が進むことが予測される。APの統廃合が進行すると、合材を供給

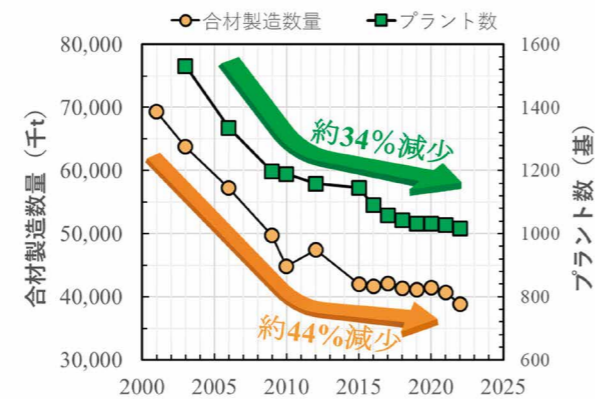


図-1 合材製造数量とプラント数の推移
(出展 2022年度アスファルト合材統計年報⁴⁾より編集)

できないエリアの拡大が懸念されるため、合材を長距離輸送できる技術の開発が鋭意進められている。

合材の長距離輸送を可能にする方法に関して、合材温度が低くても一定の品質を担保する技術と、合材の温度低下を抑制する技術とがある。前者は、アスファルトに少量の水を添加し、発泡させることで流動性を増大させる、フォームドアスファルトなどを挙げることができる。後者は、現行方法に用いている保温シートや、加熱ヒータを実装した容器などを挙げることができる。筆者らは後者の技術に着目し、2021年

から、合材を長時間保温可能なコンテナの開発に取り組んできた。本稿では、実際にコンテナへ投入した合材の保温特性について調査を行ったので、その概要を報告する。

2. 試験概要

2.1 試験に用いたコンテナの仕様

試験に用いたコンテナの外観を図-2に、その仕様を表-1に示す。コンテナは一般構造用圧延鋼材(SS400)製とし、外装に特殊保温材と、それを保護する形で板金を施工している。また、コンテナは上部から合材を投入し、下部から排出する構造になっている。投入口の蓋(以下、投入ゲート)は自重で閉じ、排出口の蓋(以下、排出ゲート)は、図-2に示すようにコンテナが接地した状態でロックピンを抜き取り、コンテナを持ち上げると、排出ゲートが開き、合材が排出できるようになっている。

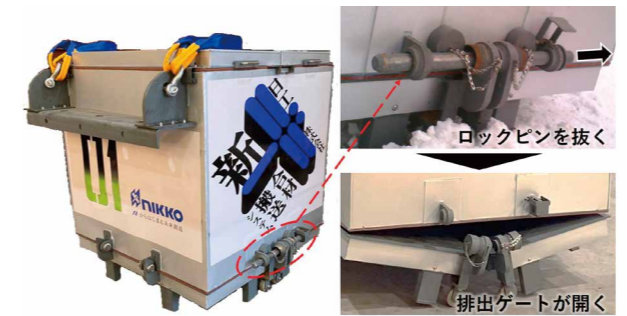


図-2 コンテナ外観

表-1 コンテナ仕様

内容量	1.73 m ³
質量	964kg
材質	SS400

2.2 試験条件

試験は合材の温度低下が著しい、冬期の寒冷地で実施した。試験手順を、以下の箇条書きと、図-3で示し、試験条件を表-2に示す。

【試験手順】

- ①コンテナを投入ゲートが開いた状態で、フォークリフトを用いて、合材排出口下部である、APの本体下へ運搬する。
- ②合材をコンテナが満杯になるまで投入する。
- ③合材表面がコンテナすりきりになるように均す。
- ④投入ゲートを閉じ、後述するシース熱電対とデータロガーを用いて21時間に渡り連続で温度測定する。

コンテナで合材を保温中、コンテナ内部12点の温度と外気温を、シース熱電対(K型)で測定し、データロガーで記録した。



図-3 試験手順

表-2 試験条件

実施日	2023/2/21~2023/2/22
天候	雪
試験場所	北海道 札幌市内
試験環境	屋外(静置)
平均気温	-5.3°C
合材	密粒度アスファルト(13F)再生50%
出荷温度	177°C
合材量	3366kg

なお、12点の測定点(以下、測定点)と使用機器を図-4に示す。ここで、測定点の位置関係を詳細に表すために、コンテナの対角を通る鉛直方向の断面を斜断面と定義し、熱電対の挿入に関して、水平方向をx軸、鉛直方向をy軸と定義する。このx軸の熱電対に関して、コンテナに施工した特殊断熱材の仕様上、熱電対は角部のみ挿入可能であった。そして、x軸に関しては、コンテナの構造がy軸を対象として線対称であることから、温度分布も線対称になることが予想される。よって、x軸に関しては、合材中心より一方向のみ温度測定している。このことに対し、y軸に関しては、コンテナの構造の違いから、放散の挙動が異なることが予想されるため、合材中心から上方、下方へ向けてそれぞれ温度測定している。

3. 評価

合材の保温時間が長くなることで、合材とコンテナ内壁との接触境界面における温度低下は不可避であるが、実際の舗装現場においては、アスファルトフィニッシャーのスクリュード等により合材が攪拌され、温度がほぼ一様となる。

よって、本検討においては合材「全体」の平均温度が一般的な合材受入れ温度(以下、150°C)に達するまでの時間を保温可能時間と定義している。

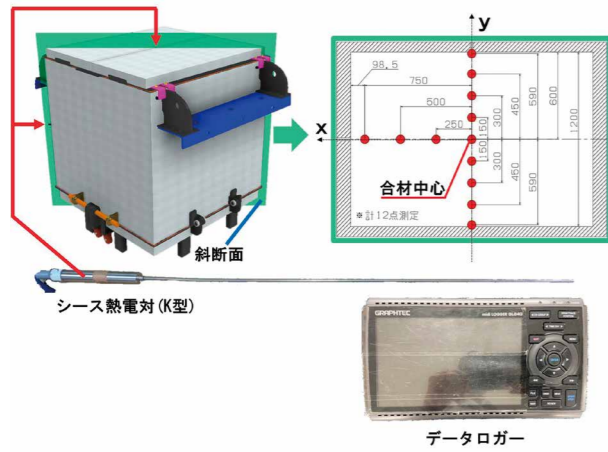


図-4 測定点詳細と使用機器

3.1 試験結果

図-4に示す測定点の平均温度と経過時間の関係を図-5に示す。

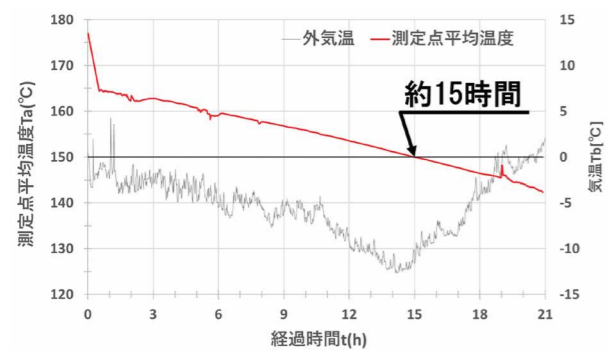


図-5 測定点の平均温度と経過時間の関係

図-5より、測定点の平均温度が150℃に達する時間は約15時間と読み取れる。

しかし、これは前述に定義した合材「全体」の温度ではなく、最も合材の温度低下が顕著と予測されるコンテナ角部の温度が反映されていない。このことから、測定点以外の合材温度を、後述する熱解析シミュレーションにて補完して、合材「全体」の平均温度を算出している。

3.2 熱解析を用いた保温可能時間の推定

合材全体平均温度を算出するために、熱流体解析ソフトウェア(シーメンスPLMソフトウェア・コンピュータショナルダイナミクス(株)製:STAR-CCM+ Ver.18.02)を用いて、試験結果に対して逆解析を行っている。

3.2.1 3次元モデルの作成

まず、コンテナと同一形状の3次元モデルを作成している。また、経過時間による合材内部の温度分布や、合材全体平均温度との関係を調査するために、図-4にて定義した斜断面に加え、コンテナの中心を通り側面と並行位置にある鉛直方向の断面(以下、基準断面)を定義している。これらを図-6に示す。

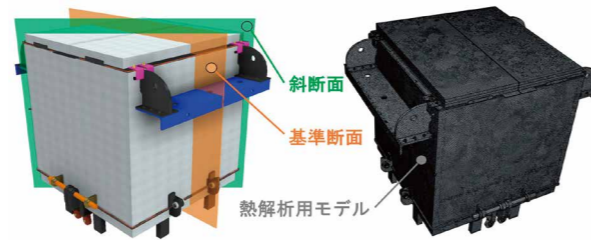


図-6 3次元モデルと定義断面

3.2.2 解析条件

外気温は、合材の温度低下の勾配に影響を及ぼすため、本試験において、コンテナを用いた合材の保温を検討する上で、重要なファクターである。このことから、逆解析の結果が、可能な限り試験結果を再現するように、実測した外気温の近似関数を作成し、熱解析シミュレーションに実装している。その近似関数に加え、経過時間と実測した外気温の関係を図-7に示す。また、熱解析シミュレーションに使用した条件を表-3に示す。合材密度は実測重量とコンテナ容量から算出し、初期温度については、合材は出荷温度の177℃、コンテナは近似関数から算出して-0.8℃としている。特殊断熱材は積層構造のため、熱伝導率や比熱、密度は各種と記載し、層厚は積層した合計の厚さを示す。合材の熱伝導率は、合材の比熱と密度を固定し、熱伝導率の値を変更しながら熱解析シミュレーションを行い、測定点の実測データと熱解析シミュレーションが近似した時の値を採用している。

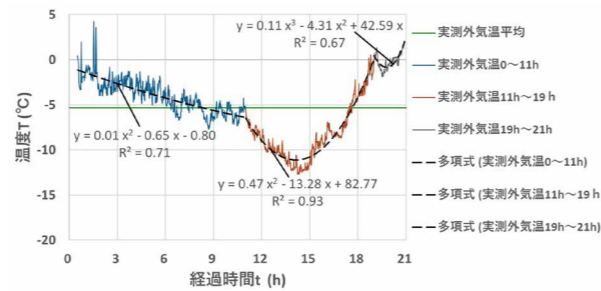


図-7 実測した外気温と近似関数

表-3 解析条件

	合材	SS400	特殊断熱材
密度 ρ [kg/m ³]	1947.9	7850	各種
層厚 l [mm]	600※	6	70
比熱 c [J/(kg・K)]	1280	473	各種
熱伝導率 λ [W/(m・K)]	1.25	51.6	各種
初期温度 T ₀ [°C]	177	-0.8	-0.8

※合材の層厚は合材中心からコンテナ壁面までの距離を指す

ここで、熱伝導率、比熱、密度が一定の場合に関して、x,y,zで表記する直行座標系における3次元熱伝導の微分方程式を式-1に示す⁹⁾¹⁰⁾。さらに、式-1を変形したものを式-2に示す。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad \dots [式-1]$$

T : 温度 [°C]

t : 時間 [s]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad \dots [式-2]$$

$$\alpha : \text{熱拡散率} [m^2/s] \quad \left(\alpha = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \right)$$

式-2は、熱拡散率αの値が大きいほど(熱伝導率λの値は大きいほど、比熱cと密度ρの値は小さいほど)温度変化が顕著であることを示す。

次に、本試験に用いたコンテナの構造を簡略化したものを図-8に示し、その境界条件に関する微分方程式を式-3に示す。また、式-3は、異種個体が完全接触し、熱抵抗を考慮しない場合のものである。

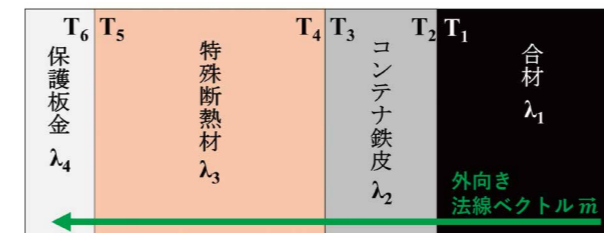


図-8 コンテナの構造(簡略図)

$$T_1 = T_2$$

$$T_3 = T_4$$

$$T_5 = T_6$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial m} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial m}$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_3}{\partial m} = \lambda_3 \frac{\partial T_4}{\partial m}$$

$$\lambda_3 \frac{\partial T_5}{\partial m} = \lambda_4 \frac{\partial T_6}{\partial m}$$

… [式-3]

そして、図-8の保護板金と外気の境界における、自然対流による熱伝達を式-4に示す。

$$h(T_7 - T_{Air})^{\frac{5}{4}} \quad \dots [式-4]$$

h = 熱伝達率 [W/(m²・K)]

T₇ = 保護板金の表面温度 [K]

T_{Air} = 外気温度 [K]

3.2.3 解析結果

測定点に対して逆解析を行い、その結果、算出された合材全体、基準断面、斜断面の平均温度推移を図-9に示す。図-9中における、紫の二点鎖線で示すダンプ試験時の合材平均温度は、「運搬中のアスファルト混合物の温度特性の考察」¹⁾より編集したものであり、ダンプ試験時の外気温は、その試験を行った1月の兵庫県内における外気温の実測データである。また、表-4にシミュレーションで求めた経過時間毎の基準断面と斜断面の温度分布を示す。この表-4より、合材の温度低下は、コンテナ上部が、コンテナ下部よりも顕著であることが読み取れる。

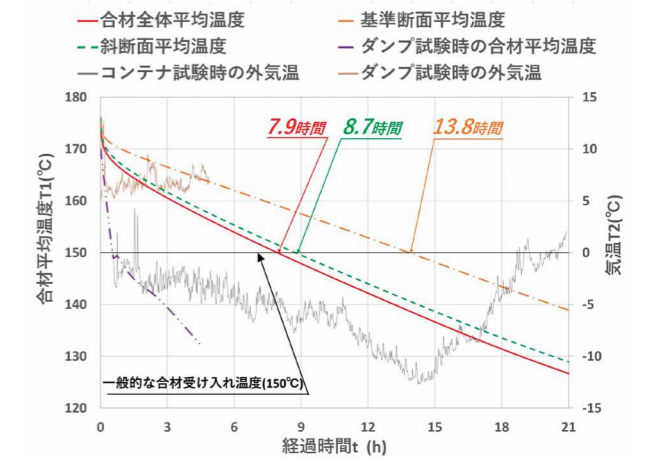
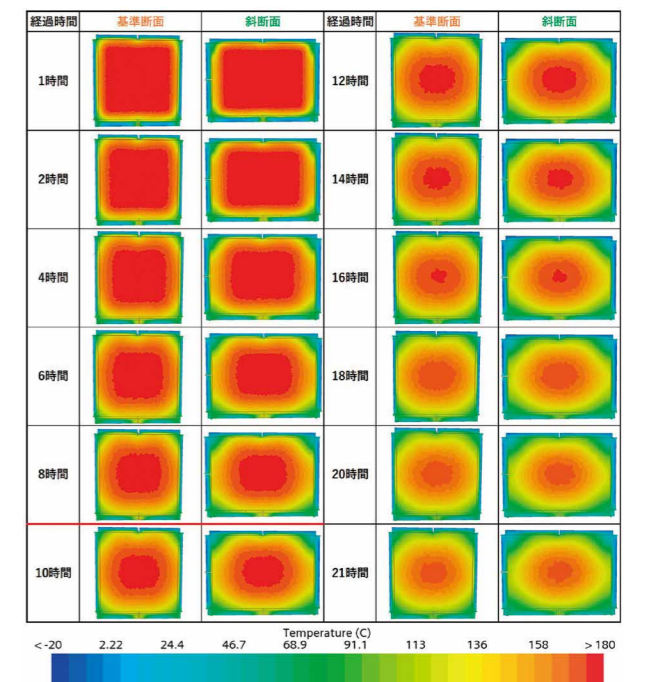


図-9 合材平均温度算出結果 (ダンプ試験時の合材平均温度: 出展「運搬中のアスファルト混合物の温度特性の考察」¹⁾より編集)

表-4 経過時間毎の基準断面と斜断面の温度分布



4. 考察

4.1 合材投入直後の温度低下

合材投入直後の、赤い実線で示す合材全体平均温度と、紫の二点鎖線で示すダンプ試験時の合材平均温度に着目するため、図-9より、経過時間が0時間～2時間の範囲で抜粋したものを図-10に示す。

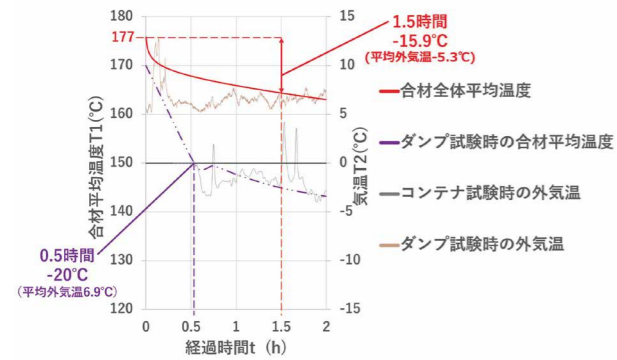


図-10 合材平均温度算出結果一部抜粋

図-10より、合材投入直後から0.5時間までの温度低下勾配を算出すると、合材全体平均温度では-15.9°C/h、ダンプ試験合材平均温度では-45.5°C/hと、いずれも急激な温度低下を示している。ダンプ試験の目的は、運搬中の合材の温度分布と挙動を明らかにすることであり、「温度低下の挙動を大きく捉えるために」(田村ら,2021,p34¹⁾)保温養生を行わなかったことと、大きな熱容量を有するダンプ荷台に熱を奪われた結果、急激な温度低下が起こったと考えられる。また、コンテナへ合材を投入した直後の急激な温度低下(以下、初期温度低下)についても、合材から、温度測定開始時の外気温である-0.8°Cに等しい温度の鋼板へ熱伝導した可能性が高い。このことから、合材の保温可能時間を延長するためには、コンテナを予熱して合材と外気の温度差を小さくする等、鋼板への熱伝導を抑制する方法が有効であると言える。

4.2 保温可能時間と温度低下速度

図-9より、177°Cで合材を出荷した時、コンテナの保温可能時間は7.9時間という結果が得られた。これは、前述の通り、合材投入直後こそ、初期温度低下が見られるが、その後の温度低下は緩慢になるためである。ここで、経過時間に対する合材全体温度の変化率を、温度低下速度と定義し、その関係を図-11に示す。また、温度低下速度は、0.5時間毎に算出してプロットしたものであり、その算出式を式-5に示す。

図-11より、時間経過と共に合材温度が低下し、それに応じて温度低下速度が緩慢になる。また、時間経過による外気温の変化(以下、 ΔT_{Air})は、合材投入直後から14時間経過後において、-12.2°C(-0.8°Cから-13°Cに低下)であるが、合材全体温度と外気の温度差(以下、 ΔT)に対して、

7.7%と小さい値を示すため、温度低下速度に大きな変化が認められない。これらの内容を図-12と式-6に示す。

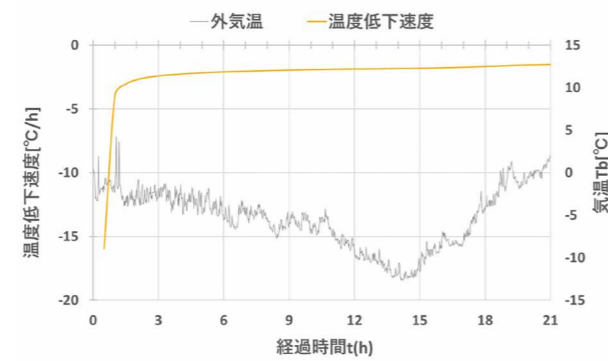


図-11 経過時間と温度低下速度の関係

$$\frac{T_t - T_{t-0.5}}{0.5} \text{ [}^\circ\text{C/h]} \quad \dots \text{[式-5]}$$

$T_t = t$ 時間経過時の温度 ($t = 0.5, 1, 1.5 \dots$) [°C]

$T_{t-0.5} = (t - 0.5)$ 時間経過時の温度 [°C]

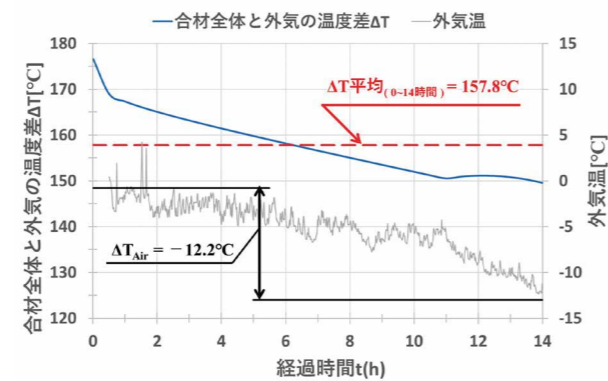


図-12 ΔT と ΔT_{Air} の関係

$$\frac{\Delta T_{Air}}{\Delta T_{平均}} \times 100 = \frac{12.2}{157.8} \times 100 \cong 7.7\% \quad \dots \text{[式-6]}$$

続いて、図-11では大きな変化が認められなかった、 ΔT による温度低下速度の変化を詳細に表すため、図-11の温度低下速度を一部抜粋したもの(温度低下速度が、-3~-1.5°C/hの範囲)と、 ΔT の関係を図-13に示す。

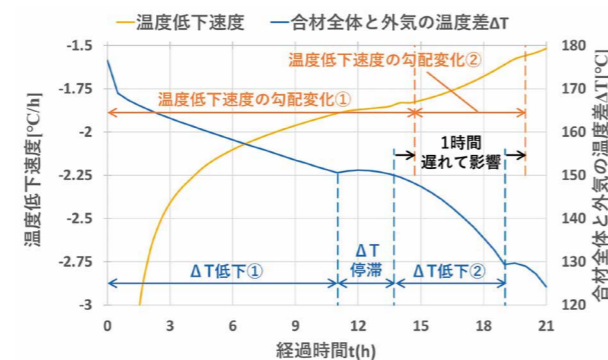


図-13 温度低下速度と ΔT の関係①

まず、 ΔT の推移について述べる。前述の通り、合材投入直後から14時間経過後において、 ΔT_{Air} は ΔT に対して小さい値を示すため、 ΔT_{Air} が ΔT に及ぼす影響は極めて小さいと言える。よって、結果的に外気温が-13°Cまで低下しても、外気の温度低下速度より合材全体の温度低下速度の方が速いので、 ΔT は終始一貫して縮小している。逆に、外気の温度低下速度の方が速い場合には、 ΔT は増大することになる。これらをまとめたものを表-5に示す。

表-5 合材全体温度、外気温および ΔT の関係

経過時間	0時間	14時間	21時間
合材全体温度	177°C	138.5°C	126.7°C
外気温	-0.8°C	-13°C	2.5°C
ΔT	177.8°C	151.5°C	124.2°C

次に、 ΔT が温度低下速度へ及ぼす影響について述べる。合材の温度低下速度は、コンテナ表面の単位面積当たりの放散熱(以下、熱流束)に比例し、さらに、この熱流束は、熱伝導率と ΔT に比例することが知られている。これらのことから、合材の温度低下速度は、 ΔT に比例することになる。具体的に図-13より、合材の温度低下速度は、合材をコンテナへ投入した、初期温度低下の直後から14時間を経過するに至り、 ΔT に比例して-3.0°C/hから弧を描くようにして-1.8°C/hまで低下しているのが分かる。その後、合材の温度低下速度は、19時間を経過するまで-1.8°C/hから-1.6°C/hへ緩やかに低下していることが分かる。以上のことから、合材の温度低下速度が ΔT に比例していることが裏付けられる。さらに、合材の温度低下速度は、 ΔT が ΔT_{Air} に関連していることから、外気温の影響を少なからず受けていると言える。しかし、 ΔT 低下②において、外気温が約10°C上昇しているにも関わらず、温度低下速度の差は、0.2°C/hと影響が小さい。これは、先に述べた通り、 ΔT_{Air} が ΔT に及ぼす影響は極めて小さいことに加え、コンテナの大部分が特殊断熱材に覆われており、鋼板が外気に晒される面積が小さいことや、特殊断熱材が層厚70mmと厚く、外気温の影響が僅かな程度にとどまるためだと考えられる。

このように、氷点下の環境においても、外気温の変化による影響が極めて小さく、コンテナを用いた合材の保温可能時間が、一般的な輸送時間である1.5時間と比較して、約5倍に相当する7.9時間を示したこと(図-9参照)は、当コンテナが、合材の長距離輸送にとって有効な手段となり得ることを示唆している。

4.3 断面温度分布と放熱箇所の調査

図-9より、橙色の一点鎖線で示す基準断面平均温度と緑の破線で示す斜断面平均温度、ならびに、赤い実線で示す

合材全体平均温度とを比較すると、最も温度が高いのは基準断面、次いで斜断面、そして、合材全体平均温度と続いている。とりわけ、基準断面の温度が最も高くなるのは、この基準断面における放熱面積が最小となるために、合材からの放散熱量が抑えられるからであると考えられる。一方で、合材全体の平均温度が最も低い値を示すのは、図-14の赤丸で示したコンテナの投入・排出ゲート部における隙間などに、特殊断熱材を施工できないために放散熱量が多くなることを、シミュレーション結果でも反映されているものと推察される。以上のことから、コンテナの投入・排出ゲート部の隙間による温度低下の影響は、基準断面と斜断面の合材においては限定的であると考えられる。

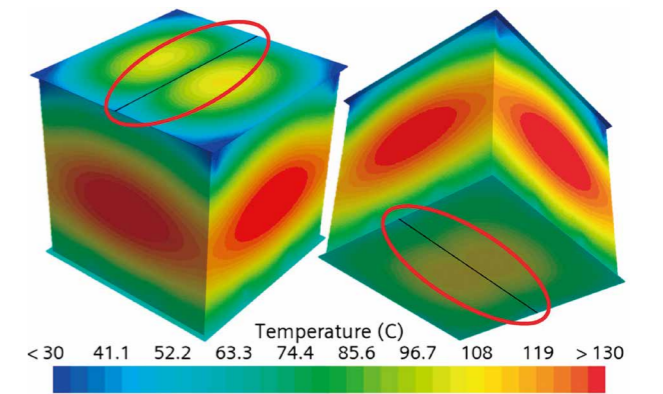


図-14 21時間経過後の合材表面の温度分布

また、表-4に示す経過時間が21時間の温度分布と、図-14に示す合材表面の温度分布に着目すると、コンテナ角部から合材の温度低下が進行し、中心部では温度低下があまり見られないことが分かる。この合材中心部での温度低下が小さいことに関しては、合材の熱伝導率が低いことが理由であると推測できる。合材の熱伝導率は、常温のガラス材料と同等(新編 熱物性ハンドブック⁸⁾)で、1.25W/(m·K)(表-3参照)と低い値を示す。これにより、合材中心部は、コンテナに施工した厚さ70mmの特殊断熱材に加え、層厚600mm、熱伝導率1.25W/(m·K)の合材自らの断熱材に覆われていることに相当するため、21時間保温後においても、大きな温度低下が見られなかったと考えられる。

このことから、合材保温可能時間を延長するための方法として、一定以上のコンテナ容量を確保することが有効であると考えられる。このことは、合材自らが一定の断熱性能を有するものの、その断熱効果を十分に発揮させるためには、600mm以上の層厚が必要であることがシミュレーション結果から明らかとなっている。そして、コンテナの形状を熱放散面積(比表面積)が最小となる球に近づけることが最も理想である。とりわけ、コンテナ角部の合材温度の低下が著しいのは、熱放散面積(比表面積)が大きくなること、断熱材とし

での合材層厚が薄くなること、特殊断熱材の施工が難しいことなどを、そのことの根拠として挙げることができる。

以下に、コンテナの熱放散面積の削減について、具体的な方法を2点述べる。1点目は、前に述べたように、熱放散面積(比表面積)が小さくなるようにコンテナの形状を変更することである。例えば、コンテナを円柱形状にすることで、同容量のコンテナでも、角形形状よりも熱放散面積(比表面積)の削減が可能であり、コンテナからの熱放散が抑制できる。2点目は、投入・排出ゲートの統一である。本試験で用いたコンテナは、前述の通り、上部から合材を投入し、下部から合材を排出する構造になっているため、投入・排出ゲートのそれぞれに、特殊断熱材が施工不可能な箇所が存在する。よって、コンテナが反転可能な装置を設ける等の方法で、合材の投入・排出を同一ゲートから行うことが可能になれば、特殊断熱材が施工不可能な箇所を削減でき、コンテナからの熱放散を抑制できる。

5. まとめ

本試験における、結果と考察を以下に要約する。

- 氷点下の環境下でも特殊断熱材を施工したコンテナを用いれば、合材を7.9時間保温可能である。
- 合材をコンテナに投入した直後は、外気温に等しい鋼板への熱移動により合材温度が急激に低下する。
- 本試験において、コンテナ内の合材は、中心部の温度低下が小さく、角部で温度低下が顕著である。
- 合材の熱伝導率は低く、合材中心部では周囲の合材が断熱材として作用する。
- 時間経過による合材の温度低下勾配は、外気温の影響を受けるが、特殊断熱材がコンテナ表面を大幅に覆っている場合、その影響は小さい。

- 合材の保温可能時間を延長するためには、一定以上のコンテナ容量を確保することや、コンテナの熱放散面積(比表面積)を削減することが有効だと推測できる。

6. 今後の展開

将来、カーボンニュートラルや、働き手の不足から、APの革新により、APの統廃合が進むと予測される。その時、現行方法では、合材を供給できないエリアの拡大が懸念される。

そこで、筆者らは合材を長時間保温可能なコンテナの開発に取り組んできた。当開発の最終目標は、合材の貯蔵や運搬システムの構築にある(図-15参照)。これは、主要プラント(図-15のセンタープラント)に合材の生産を集約し、プラントの瞬発力を維持しつつ、合材が連続的に生産されることを指す。その背景には、合材の保温にコンテナを用いることで、1つのAPを拠点とした、合材供給可能なエリアの拡大がある。このシステム構築の第一歩として、コンテナを寒冷地や離島などへ実装することを目指している。そのためには、合材の投入・排出や運搬が容易な構造へコンテナを改良することや、コンテナ容量を見直すことが必要になると予測するため、まずは、情報収集を予定している。

また、前述の通り、初期温度低下が著しいため、保温可能時間を確保するために、合材を通常より高温で出荷する必要がある。これは、中温化合材のような、出荷温度を下げてCO₂排出量を削減している技術に逆行することになるため、排熱を利用したコンテナの予熱など、初期温度低下を抑制し、従来と同等の温度域で出荷可能な方法の検討も必要である。

今後も、今回のサンプリングデータや熱解析シミュレーションを活用し、コンテナの改良検討を進めて行く所存である。

参考文献

- 1) 田村彰啓, 蓬萊秀人, 川村克裕: 運搬中のアスファルト混合物の温度特性の考察, 第34回日本道路会議論文, 論文番号3183, 2021.
- 2) 田村彰啓: 運搬中のアスファルト混合物の温度特性の考察, 日工テクニカルレポート第三号, pp.33-42, 2022.
- 3) 河邊真治, 蓬萊秀人, 川村克裕: コンテナを用いたアスファルト混合物の保温特性に関する調査, 第35回日本道路会議論文, 論文番号 3217, 2023.
- 4) 一般社団法人日本アスファルト合材協会 資料・広報委員会 資料部会: 2022年度アスファルト合材統計年報, pp.12-13, 2023.
- 5) 外務省
https://www.mofa.go.jp/mofaj/ic/ch/page1w_000121.html
アクセス日: 2023年12月4日
- 6) 地球温暖化対策推進本部: 日本のNDC(国が決定する貢献), 2021.
<https://www.mofa.go.jp/mofaj/files/100285591.pdf>
アクセス日: 2023年12月4日
- 7) 自動車運転者の労働時間等の改善のための基準の一部を改正する件, 厚生労働省告示第367号, 2022.
- 8) 日本熱物性学会: 新編 熱物性ハンドブック [日本熱物性学会編], pp300, 2008.
- 9) 門出政則: 改訂版 熱伝導の順問題解と逆問題解, pp1-7, 2022.
- 10) 北山直方: 図解 伝熱工学の学び方, pp26, pp51-55, 2015.



図-15 合材の貯蔵や運搬システムの構築

筆者紹介

TERAUCHI Takahito
寺内 崇仁
2024年入社
開発部 開発4課

KAWABE Masaharu
河邊 真治
2021年入社
開発部 開発4課

水素バーナの開発 ～Phase2 アスファルト混合物製造試験～

長谷川 修磨・北野 裕樹・今田 雄司
Hasegawa Shuma, Kitano Yuuki, Konta Yuji

概要

世界的な温暖化対策として、2015年にパリ協定が策定された。そのため、日本政府は2021年に「2030年度に温室効果ガスを2013年度から46%削減すること」を目指す表明をした。アスファルトプラント(以下、APと記述)業界においても目下の課題に向けて温室効果ガス排出量の削減に精力的に取り組んでいる。APにおいて温室効果ガスであるCO₂を最も排出するのは、骨材の乾燥加熱で消費する化石燃料由来のものであるため、これらに代わる次世代の燃料としてCO₂を発生させない水素燃料を使用できるバーナの開発を行っている。当社は、東京ガスエンジニアリングソリューションズ株式会社と水素バーナを共同開発し、2023年3月には500kW水素バーナの開発に至った¹⁾。本稿では、開発した500kW水素バーナがAPで、実際に運用が可能であることを検証した水素バーナによるアスファルト混合物製造試験について報告する。

1. 緒言

18世紀後半の産業革命以降、人類は化石燃料を大量に消費しながら熱、電気エネルギーの恩恵を受けてきた。その代償として大気や海洋、河川などの環境への負荷も大きく、近年の異常気象で集中豪雨やエルニーニョ現象、ラニーニャ現象などが頻繁に発生するようになってきた。特に1850年以降は気温が上昇しており、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の第6次評価報告書によると、今世紀末までには3.3~5.7℃の上昇になるだろうと言われている。このことから、国連のグレート事務総長が、このままでは温暖化よりも深刻な沸騰化の時代が到来することになってしまうと発言し警鐘を鳴らしている。

このような環境問題に対して全世界が危機感を共有している中、2015年にパリ協定が第21回気候変動枠組条約締約国会議(COP21)で採択され、目的として「世界の平均気温上昇を産業革命以前と比べて2度より十分低く保ち、1.5℃以内に抑える努力をする」ことが掲げられた。近年では、2023年11月に開催されたCOP28で1.5℃目標の実現に向かうために、2030年までに再生可能エネルギーの容量を3倍に、省エネ率を2倍にすることを掲げ、化石燃料からの脱却を更に加速させる意思を各国が提示している²⁾。

パリ協定に伴って、2021年に日本は2030年度に温室効果ガスを2013年度から46%削減することを目指す表明をしている。目標を達成するため、経済産業省が中心となり「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」を策定した。

グリーン成長戦略では、産業政策・エネルギー政策の両面から、成長が期待される14の重要分野実行計画を策定され、エネルギー関連産業の1分野として水素があげられる。水素では2050年に2,000万吨程度、供給コスト20円/Nm³程度以下(2024年都市ガス熱量単価程度)を目指しており、エネルギー業界での導入拡大が見込まれる³⁾。

また、戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)第3期の課題にスマートエネルギーマネジメントシステムの構築があり、次世代の社会インフラを確立するため、再生可能エネルギー由来の電気や水素、熱を効率的に活用するとしている⁴⁾。

現在、APで排出されるCO₂の内訳は、骨材乾燥加熱による燃料由来が79%、事務所等での電力使用由来が19%、重機燃料その他由来が2%となっている。重油を基準にした時の発熱量当りのCO₂削減効果として、ガスへの燃料転換で都市ガス25%、プロパンガス15%の削減が期待されるが、これ以上の削減には他の技術との併用が必要である。そして、過去に開発したグリセリンや木質タール、もみ殻、炭化燃料などの燃料を使用したバイオマスバーナはバイオマス燃料の導入によってCO₂の削減が可能である⁵⁾が、バイオマス燃料を利用する場合には、発生地域からの運搬や利用するための供給体制も重要になることから、短期間でのAP全体へ利用を拡大することは難しい。

このような状況を踏まえて、これまでAPで使用されてきた化石燃料の代替燃料として、今後期待されている水素燃料を使用できるバーナの開発を行った。水素は、燃焼時に酸素

表1 AP使用燃料と水素燃料の比較⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾

燃料	A重油	プロパン	都市ガス(メタン)	水素
大気圧における沸点(℃)	150以上	-42.1	-161.6	-252.9
体積当たり低位発熱量(MJ/Nm ³)	-	91.2	41.6	10.8
質量当たり低位発熱量(MJ/kg)	41.9	46.6	50.2	120.4
発熱量当りCO ₂ 排出量(tCO ₂ /GJ)	0.0693	0.059	0.0499	-

と結びつき水を生成するのみでCO₂は発生しないため、非常にクリーンなカーボンニュートラル燃料である。燃料の安全性も考慮するとAPで利用し易いために、水素バーナ開発の優先度を高め、最短で製品精度を高めため、2022年より東京ガスエンジニアリングソリューションズ株式会社と水素バーナの共同開発を開始し、2023年3月には500kW水素バーナを開発した。

本試験では、開発した水素バーナを小型試験プラントへ実装し、アスファルト混合物を製造した。製造したアスファルト混合物の試験施工までを行い、小型試験プラント運転時のバランスと舗装材としての品質を評価する。そして、水素燃料を使用することで燃焼排ガスの水蒸気が増えるため、排ガス中の水蒸気がアスファルト混合物の品質とAP運転時の骨材温度制御、機器へ及ぼす影響を確認した。本稿では、前田道路株式会社小型試験プラントで水素バーナを用いてアスファルト混合物を製造した実装試験結果を報告する。

2. APにおける水素燃料

2.1 AP使用燃料と水素燃料の比較

全国のAPでバーナに使用している燃料の多くはA重油が使われている。都市部や沿岸部では、都市ガスやプロパンガス燃料の利用範囲が拡大してきており、工業関係設備のガス燃料化も急速に加速してきている。APで主に使用している燃料と水素燃料の比較を表1に示す⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

大気圧下20℃では、A重油のみが液体で存在し、プロパン、都市ガス、水素は気体で存在する。体積当たり発熱量はプロパン>都市ガス>水素であり、都市ガスの代わりに水素ガスを使用して同じ熱量を得るには4倍程度の流量が必要となる。

水素は他のガス燃料と比べて沸点が-252.9℃と低いため、液化させるには多くのエネルギーが必要となるが、質量当たりの発熱量が120.4 MJ/kgであり、他の燃料の2倍以上の発熱量を持っている。水素をクリーンな燃料で液化するためにエネルギーは必要であるが、液体にすることで体積が1/800になるので効率良く運搬できる。そしてこれから政府がカーボンニュートラルに向けて推進していく燃料となり注目されている。

2.2 APでの水素への燃料転換

APのバーナに使用している燃料から水素へ燃料転換を行う場合にメリットとして、骨材乾燥においてCO₂を排出しなくなる事が挙げられる。APでカーボンニュートラルを目指す上で重要な点であるが、現状水素へ燃料転換を行う場合、いくつかの課題が挙げられる。

- ・設備、燃料にかかるコストが高くなる
- ・低温液化状態での貯蔵
- ・気化をグリーンエネルギーで賄う必要性
- ・APで必要な量の水素供給が困難

現段階では、水素は従来の燃料よりコストが高いことに加え、都市ガスの様にパイプラインで供給ができる箇所が少ないため、水素燃料を貯蔵する設備のコストが設備投資への抑制になっている。そのため、APでの水素利用が普及するには、まずは水素の供給量が増加し、水素のインフラを整える必要がある。

表2 試験パラメータ

燃料	・重油 ・CNG ・水素 ・CNGと水素混焼(30%、50%、80%)
骨材流量	・5 t/h ・3 t/h(水素専焼のみ)

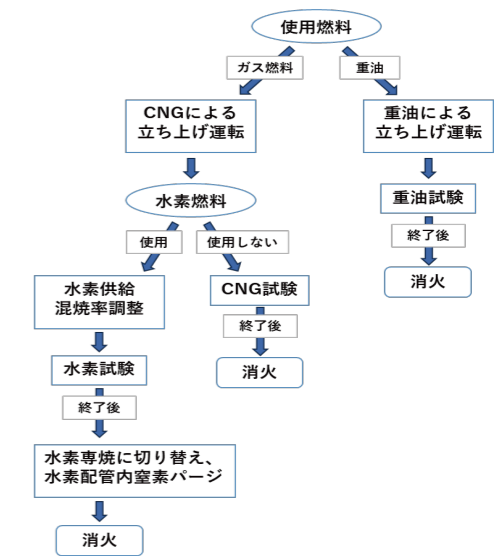


図1 運転方法フローチャート

3. 合材製造試験

3.1 試験条件

重油による試験は重油専用バーナで実施した。CNG (compressed natural gas 圧縮天然ガス、都市ガス13A)と水素の混焼は熱量を基準として水素の導入割合を変えて実施した。

水素使用後に消火する時は、配管中で残留水素と空気が可燃混合気にならないよう水素専焼状態にしてから窒素パーズで消火を行い、そのまま配管内部のガスを置換した。そして、運転中の骨材温度調整は骨材温度が210℃で安定するように燃料流量を制御しながら骨材乾燥を行った。本試験で実施したパラメータを表2に、運転方法のフローチャートを図1に示す。



写真1 水素バーナ

3.2 試験設備

前田道路株式会社小型試験プラントに2023年3月に東京ガス株式会社と共同開発した500kW水素バーナを設置した。設置した水素バーナの外形を写真1に示す。

3.2.1 水素バーナ

本試験での水素バーナの着火方法は従来の弊社ガスバーナ同様に、都市ガスでのパイロット着火を行った。都市ガスと水素はバーナ内のガスライン内で混合される元混合方式を採用し、1本のバーナノズルで都市ガスの専焼から水素の混焼、更に水素の専焼まで燃焼することが可能である。燃焼空気はバーナ後方にあるファンから供給し、水素燃料の流量に対して必要な空気量比率を任意に変更しながら調整を行った¹⁾。

3.2.2 燃料供給ライン

試験で使用したCNG燃焼装置を写真2に示す。CNG供給ラインでは流量計、電磁弁、ボールバルブ等を含む燃焼装置を使用した。本試験ではプラントへの影響を調査するために混焼率を任意に変更可能なように流量を調整できるようにした。

水素供給ラインではカードル(ポンペをまとめて枠組みし、ガスの取り出し口を集約したもの)から14.7MPaの水素が供給され、減圧ユニットにより0.2MPaまで減圧された水素が供給される。水素流量はマスフローコントローラを使用して量を調整した。

ガス燃料は高圧にするほど容積を小さくすることができるため容量当たりの熱量が高くなり、ポンペのサイズや配管径を小さくすることができるメリットがある。そのため、容積を小さくしてエネルギー密度を高くするために、CNGと水素は共に14.7MPaの高圧でポンペに充填されている。しかし、高圧のまま使用すると機器の損傷や急激な圧力変動で失火など



写真2 燃焼装置

の要因となるため減圧してから燃焼装置に供給している。

CNGと水素の供給ラインが合流管で合わさり、水素バーナに燃料を供給する。専焼時に切り替えられるように切換弁、水素供給ライン側には逆流に対する安全対策として、逆止弁を取り付けた。

3.2.3 試験プラント

試験で使用した小型試験プラントを写真3、プラント内ユニット機器の仕様を表3に示す。乾燥キルンのサイズはΦ1100mm×3500mmであり、プラントの骨材乾燥能力は5t/hである。水素バーナは当社の従来ガスバーナと同様にレトロフィットできるようにした。この水素バーナを小型試験プラントの重油バーナと入替し、合材製造試験を行った。

3.3 試験測定項目

下記に本試験で測定した項目を示す。

- ・骨材温度(投入骨材、排出骨材)
- ・骨材含水(試験前後の骨材含水比)
- ・排ガス成分 (NO_x、O₂、CO、CO₂、SO_x、H₂O、煤塵測定)
- ・排ガス量

骨材温度と骨材含水はベルトコンベヤ(ドライヤ通過前)とホットエレベータ(ドライヤ通過後)で骨材をサンプリングして測定する。排ガス成分と排ガス量の測定は小型試験プラント煙突部の測定口で測定を行った。排ガス成分の測定方法を表4に示す。

3.4 合材製造試験結果

3.4.1 骨材乾燥加熱結果

骨材供給量5t/hでの各燃料の専焼における骨材乾燥加熱の結果を表5に示す。各試験条件で加熱後の骨材温度を比較すると194~203℃の温度であることから水素は都市ガスと骨材加熱能力は同等で、温度上昇速度などの制御性に関しても同等で運用できた。

表5に示すように加熱前の骨材含水比は水素専焼時4.1%であり、重油専焼時の5.3%より低い値であるが、加熱後の骨材含水比が水素専焼時で0.08%と他の燃料専焼時と比べて高い値となった。水素専焼時の骨材含水比でもアスファルトの品質は従来と変わらないことを前田道路株式会社により確認した。

燃料の流量値は、乾燥後の骨材温度が安定している状態で測定している。試験条件から骨材の乾燥加熱に必要な熱量を試算し、熱効率を算出した。水素は重油と比べ熱効率が55.8%と低い数値を示したが、CNGの54.6%と同程度の熱効率であったため、都市ガスと同様に運用可能である。一般的に水素火炎からの輻射熱は通常の炭素を含む輝炎より十分小さいため、水素の熱効率がA重油と比べて低い結果となったと考えられる⁹⁾。どの燃料においても40%もの無効熱があるため、この小型試験プラント特有の影響があり、材料投入口等からの浸入空気が多いため、排ガス温度による無効熱が考えられる。



写真3 小型試験プラント

表3 小型試験プラント仕様

ユニット名	仕様※
ドライヤ	寸法：Φ1100×3500L 能力：5 t/h
バグフィルタ	濾布：72本 (50m ³)
排風機	風量：90m ³ /min 静圧：310mm Aq(3.1kPa)
第一煙道	径：Φ380

※記載なき単位は mm

表4 排ガス測定法

測定項目	測定法	機器
水分量	吸湿管法	-
ガス組成分析	オルザット法	-
煤塵量	円形ろ紙法	-
硫酸化合物	イオンクロマトグラフ法	-
窒素化合物	イオンクロマトグラフ法	-
CO	単光源二光束非分散赤外線吸収法	CGT-7000

表5 骨材乾燥加熱結果

燃料	[]	重油100%	CNG100%	水素100%
骨材供給量	[t/h]	5	5	5
加熱前骨材温度	[°C]	17	16	17
加熱後骨材温度	[°C]	194	203	196
加熱前骨材含水比	[%]	5.3	3.6	4.1
加熱後骨材含水比	[%]	0.02	0.01	0.08
バグ入口温度	[°C]	82	70	78
重油流量	[L/h]	42.0	0.0	0.0
CNG流量	[Nm ³ /h]	0.0	33.0	0.0
水素流量	[Nm ³ /h]	0.0	0.0	130.2
燃料熱量	[kW]	429	372	390
骨材加熱熱量	[kW]	74	78	75
骨材水分熱量	[kW]	184	125	143
有効熱量	[kW]	257	203	218
熱効率	[%]	60.0	54.6	55.8

表6 排ガス測定結果

使用燃料	[-]	重油100%	CNG100%	水素30%	水素50%	水素80%	水素100%	水素100%
骨材流量	[t/h]	5	5	5	5	5	5	3
CO ₂ 濃度	[%]	4.1	2.7	1.8	1.3	0.7	0	0
O ₂ 濃度	[%]	15.5	15.6	16.5	16.9	16.7	17.7	17.6
CO濃度	[ppm]	1472	275	71	15	8	3	3
煤塵量	[g/m ³]	0.007	0.005未満	0.005未満	0.005未満	0.005未満	0.005未満	0.005未満
SO _x 濃度	[ppm]	3未満	3未満	3未満	3未満	3未満	3未満	3未満
NO _x 濃度	[ppm]	16	5	13	13	13	15	14
NO _x 濃度(O ₂ 16%換算)	[ppm]	15	5	14	16	15	23	20
排出ガス量(湿り)	[Nm ³ /h]	2250	1970	1960	1950	1930	2240	1980
排出ガス量(乾き)	[Nm ³ /h]	1950	1770	1810	1790	1670	2010	1780
排ガス水分量	[Vol%]	13.2	10.4	7.9	8.2	13.5	10.3	10.1
骨材含水比	[%]	5.61	3.56	4.09	4.09	3.56	4.09	4.09

表7 水蒸気量試算結果

使用燃料	[-]	重油100%	CNG100%	水素30%	水素50%	水素80%	水素100%	水素100%
骨材流量	[t/h]	5	5	5	5	5	5	3
骨材由来水蒸気量	[Nm ³ /h]	369.8	229.7	265.3	265.3	229.7	265.3	159.2
燃料由来水蒸気量	[Nm ³ /h]	55.6	66.0	92.2	87.1	102.0	130.2	110.0
大気由来水蒸気量	[Nm ³ /h]	27.9	25.6	26.4	26.1	24.4	29.5	26.1
理論水蒸気量	[Nm ³ /h]	453.4	321.3	383.9	378.5	356.1	425.0	295.3
実際水蒸気量	[Nm ³ /h]	297.0	204.9	154.8	159.9	260.6	230.7	200.0
凝縮水蒸気量	[Nm ³ /h]	156.4	116.4	229.1	218.6	95.6	194.3	95.3
凝縮水量	[L/h]	125.7	93.6	184.1	175.7	76.8	156.1	76.6

3.4.2 排出ガス測定結果

各条件における排ガス測定結果を表6に示す。

表6に示すようにCO₂濃度は重油専焼時に4.1%であり、CNG専焼時は2.7%と減少していることが確認できた。これは発熱量当りのCO₂排出係数が重油よりCNGの方が低いためである。水素燃料の混焼率が高くなるにつれCO₂濃度が減少していき、水素専焼の条件ではCO₂は検出されなかった。水素は燃焼時に酸素と結びつき水を生成するのみでCO₂は発生しないため、現象結果と一致した。また、CO濃度もCO₂濃度と同様に水素燃料の混焼率が高くなるにつれCO濃度が減少していく傾向を示しており、特に重油は小型試験プラントのため、キルン長さが短く燃焼しきる前に温度の低い材料に冷やされてしまい未燃が多くなっていると考えられ、1472ppmという数値を示している。水素専焼でCOが検出されているが機器誤差の範囲内(CO測定レンジ2500ppm、誤差±2%)であると考えられる。

表6に示すように煤塵量はガス燃料で測定限界以下であり、重油でも規制値より低い値であるため、水素燃焼による問題はみられなかった。

NO_x濃度をO₂濃度16%で換算した値のグラフを図2に示す。APで使用する場合に懸念点としてサーマルNO_xが挙げられる。これは大気汚染防止法でNO_xの排出量に基準値が設けられており、骨材乾燥炉の排出基準値は230

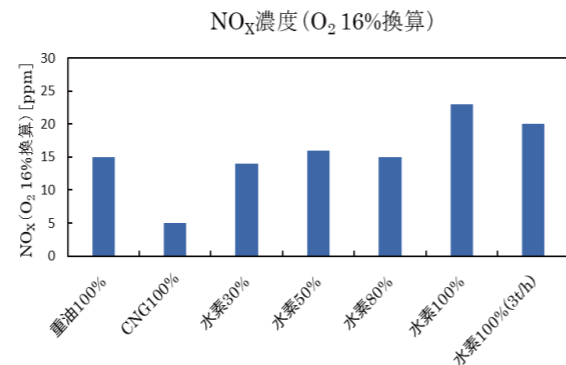


図2 NO_x濃度(O₂16%換算)結果

ppmとなっているため基準を満たす必要がある¹⁰⁾。今回測定したすべての条件で基準値と比べ低いNO_x値となっている。水素専焼でのNO_x値が23ppmであり、CNG専焼の5ppmと比べて高い値となり、開発段階での試験と同様の結果を示した。水素は燃焼速度が速く、局所的な高温部分ができるため、サーマルNO_xがCNGより増加することが知られており、このような傾向と一致している。

排出ガス内の水分量の測定結果から、試算した凝縮水蒸気量の値を表7に示す。

試験結果より、実際の水蒸気は重油専焼で297.0Nm³/h、CNG専焼で204.9Nm³/h、水素燃焼で230.7Nm³/hとなった。

理論値では、水素1Nm³を燃焼した時に0.8kgの水が発生する。表7に示すように水素は重油やCNGと比べ、燃料

由来の水蒸気量の割合が多くなるため、水素燃料を使用すると骨材乾燥での総水蒸気量が増加することになる。しかし、試験条件ごとに骨材含水が3.56~5.61%とバラつきがあるが、今回行ったすべての条件で排ガス中の水蒸気量の割合として骨材由来のものが多いため、実際の水蒸気量に対して燃料由来の水蒸気量の影響は許容範囲である。加えて、試算した凝縮水蒸気量の値は、水素燃料の混焼率に比例する結果になっていないことが確認できた。

これは、排ガス温度によって飽和水蒸気量が変わるため、表7に示すように凝縮水蒸気量が76.6~184.1L/hとバラつきがある結果になったと考えられる。水素燃料への転換を行うことで一概に凝縮水蒸気量が増えるわけではなく、排出ガスの温度を管理すれば凝縮水の排出量を減らすことが可能であることも、予備試験で行った小型試験プラントで排ガス温度を上げた時の煙突や煙の様子から確認することができた。

4. 結言

500kW水素バーナを開発し、本アスファルト混合物製造試験の結果から懸念としてあった水素燃焼における水蒸気発生の影響とアスファルト合材の品質においては、これまでのガスバーナ同様の運用ができること、そしてアスファルト合材の品質に問題がないことが確認された。

一方で、AP実機へ水素バーナを設置するには前述した「設備、燃料、貯蔵コスト」、「水素燃料の確保」などの社会的課題が残っている。都市ガスとグレー水素の熱量当たりの単価差が約2倍、グリーン水素とグレー水素では約6倍の単価差がある。これらの問題を解消できるように、まずは2030年を目途に水素が利用し易くなるように支援、補助金などの議論がなされているため、いつでも水素バーナ設備をAPへ実装できるようにする。一般的なAPに用いられる出力5MW以上のバーナへのスケールアップを進めていく予定である。Phase1での試験結果から500kW水素バーナは水素に加えて、都市ガス燃焼においても低NO_xでの燃焼を維持できることから、都市ガス専焼でも使用できるようになっている。

また、AP以外の分野でもカーボンニュートラル達成に向けて水素が期待されているため、水素バーナの燃焼技術、低NO_x化技術を活かして、新たな製品の開発にも注力している。

References

1 北野 裕樹, 今田 雄司 2023 水素バーナの開発 ~Phase 1~ NIKKO TECHNICAL REPORT No.004, pp.39-44.

- 2) 経済産業省 資源エネルギー庁
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2020html/1-3-1.html>
 (参照日2024年1月19日)
- 3) 経済産業省
https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/index.html
 (参照日2024年1月19日)
- 4) 内閣府
https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/sip3rd_list.html
 (参照日2024年1月19日)
- 5) 日工株式会社 2023日本建設機械施工協会 機械部会 路盤・舗装機械技術委員会 令和4年度活動報告
- 6) ENEOS
<https://www.eneos.co.jp/business/sds/gasoline/>
 (参照日2024年1月19日)
- 7) Iwatani
<https://www.iwatani.co.jp/jpn/business/energy/basic-knowledge/fuel/>
 (参照日2024年1月19日)
- 8) 小林 秀昭, 早川 晃弘 (2016年) 「カーボンフリーアンモニア燃焼」日本燃焼学会誌 第58巻 183号pp.41-48.
- 9) 武野 計二 (2010年) 日本燃焼学会誌 第52巻 160号 pp.121-129.
- 10) 環境省
<https://www.env.go.jp/air/osen/law/t-kise-6.html>
 (参照日2024年1月19日)

筆者紹介



HASEGAWA Shuma
 長谷川 修磨
 2022年入社
 開発部 開発1課



KITANO Yuuki
 北野 裕樹
 2015年入社
 開発部 開発1課



KONTA Yuji
 今田 雄司
 2002年入社
 開発部 開発1課

無水石膏製造設備の安定した急速冷却キルンの開発

柳井 瑛・田中 翔太
Yanai Akira, Tanaka Shota

概要

石膏ボードは防火性、遮音性、寸法安定性に優れており、一般的に建築資材において多用されている。近年では老朽化した建築物の解体にともない石膏ボードによる廃棄物（以下、廃石膏ボードと記述）が大量発生し、廃石膏ボードの廃棄量は今後増加していく傾向にあるため、再利用など有効利用方法が研究されている。当社は、無水石膏がセメントの凝結遅延材として一般的に用いられていることから、廃石膏ボードから無水石膏を製造する無水石膏製造設備を2014年に開発し市場投入している。ところが、当該装置の無水石膏を冷却するプロセスにおいて、熱による機器への損傷が著しく頻繁に修理を必要とすることが課題となっていた。本稿では、冷却能力と耐久性とを向上させた間接方式の冷却キルンを新たに開発し運用を開始したので、その概要と特徴について報告する。

1. 緒言

石膏ボードは、約20%の結晶水が安定した形で含まれるため防火性に優れ、遮音性、寸法安定性、工事の容易性などの特徴を有し、古くは、大正12年に旧帝国ホテルの内装と天井に採用されてから現代に至るまで一般家屋やオフィスビルなど建築物で幅広く利用されている。とりわけ、我が国の木造建築の耐用年数が欧米に比べて20年程度と短く、老朽化した建築物の解体にともない廃石膏ボードが大量発生し、年々増加傾向にある。¹⁾²⁾そして、石膏ボードの年間出荷量は400万トンにも及んでいることを反映して、やがて、廃石膏ボードの発生量もこの値に近づいていくものと予測されている。このことから、地方自治体における最終処分場が逼迫し、処分費用の高騰に伴う不法投棄などの社会問題へと発展して行くことが懸念されている。

我が国は、大量生産、大量消費、大量廃棄の社会システムの下で経済成長を遂げてきた。近年では、資源枯渇や環境破壊などの社会問題が指摘されるようになってきている。以上のことから、廃石膏ボードのリサイクル化に関しても、大量の需要を見込むことができる農業用肥料や土木建築用資材などへの有効利用が待ち望まれている所である。

このような時代を背景にして、当社は、廃石膏ボードをセメントの原材料として大量にリサイクルすることができる無水石膏製造設備を開発した。この無水石膏製造設備は、二水石膏である廃石膏を1,000℃まで加熱することにより、結晶水を

熱脱離して無水石膏を生成する原理に基づいている。そして、この高温の無水石膏をスクリュ方式の冷却装置で200℃まで冷却している。ところが、高温の無水石膏による冷却装置への熱損傷が著しく頻繁に修理とメンテナンスを必要としていた。

本稿では、これらの課題を解決すべく耐久性とメンテナンス性を向上させた間接キルン方式の冷却装置を新たに開発し運用を開始したので、その概要と特徴について報告する。

2. 石膏

石膏は硫酸カルシウムを主成分としている鉱物であり、「二水石膏(CaSO₄・2H₂O:硫酸カルシウム2水和物)」、「半水石膏(CaSO₄・1/2H₂O:硫酸カルシウム1/2水和物)」、「無水石膏(CaSO₄:硫酸カルシウム)」の3種類に分けられる。半水石膏はα型とβ型が存在し、無水石膏はⅢ型、Ⅱ型、Ⅰ型に分けられ、さらにⅢ型はα型とβ型が存在する。その中でも半水石膏と無水石膏について説明する。³⁾

2.1 半水石膏

半水石膏は、焼石膏とも呼ばれ前述したようにα型とβ型が存在しており、α型は緻密な構造で粒子密度が高く、水硬時の強度がβ型よりも大きいことから骨折時の治療用具であるギプスといった医療用途に用いられる。また、加圧焼成することで生成されることから一般的にはオートクレーブ

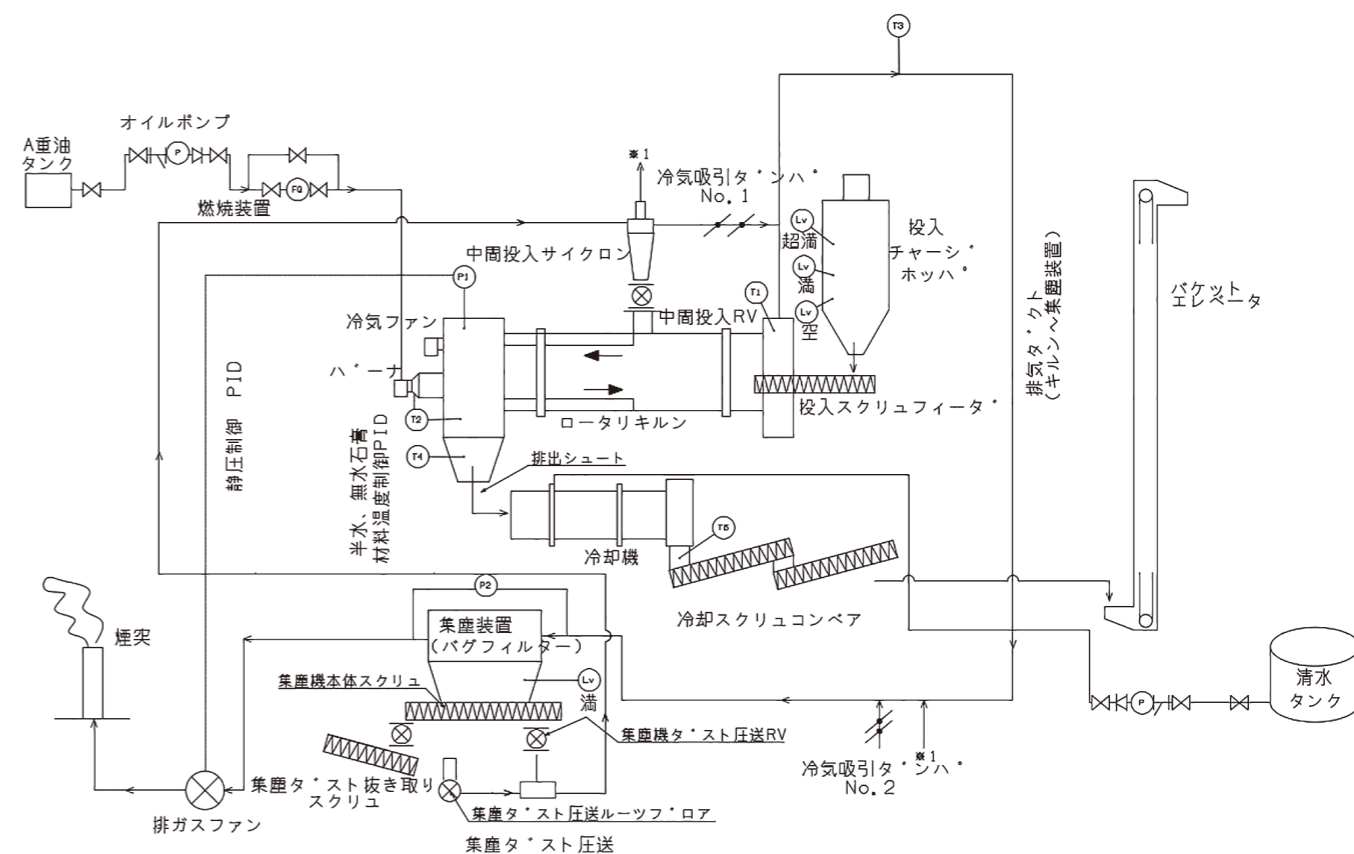


図2-1 II型無水石膏設備のシステムフロー図

(圧力釜)での蒸し焼きで製造されるため、キルン方式での製造は難しい。β型は、ポーラス状の空隙があるため粒子密度がα型よりも小さく、石膏ボード等の建築資材として利用される。α型と違い加圧を必要としないため、キルン方式で製造可能である。また、半水石膏を180℃以上で加熱処理することにより、結晶水が熱脱離した無水石膏を生成することができる。⁴⁾

近年は、半水石膏の水硬生を利用し、添加剤としてセメントと混ぜ合わせることで土壌の改良剤とする用途が増えてきている。但し、半水石膏は吸湿性が高く大気中の水分を吸水し、二水石膏に戻ってしまう為、品質管理が難しいことから、製造後すぐに利用することが推奨されている。⁵⁾

2.2 無水石膏

無水石膏は、前述したようにⅢ型、Ⅱ型、Ⅰ型が存在しており、さらにⅢ型に関してはα型とβ型に分類される。Ⅲ型無水石膏は、180~215℃の温度帯で加熱することにより生成され、空気中の水分を吸って半水石膏に戻る。その吸湿性より、塗料・樹脂などの乾燥材として利用される。Ⅱ型無水石膏は、330℃以上で加熱することによって得られ、加水しても半水石膏に戻らないことから、不活性無水石膏とも呼ばれている。

その性質上、長期間の貯蔵が可能であること、さらには、必要量に応じて製造し貯蔵することができるなどの運用上の調整ができる材料である。Ⅰ型無水石膏は、1180℃以上の加熱により生成される。Ⅱ型、Ⅰ型ともに吸湿性がないことから建設系フィラー材として建築材に幅広く利用される。⁴⁾

3. II型無水石膏製造設備

本無水石膏製造設備は、乾燥加熱領域と焼成領域を設け、投入から排出まで材料が1方向に流れる過程で半水石膏が生成され、最終的には無水石膏を製造できるようにした。

システムフロー図を図2-1に、設備全体像を写真2-1に示す。

図2-1より、II型無水石膏製造設備フローを説明する。まず、材料は投入スクリュから焼成キルンに投入され、焼成キルン内で乾燥・加熱・焼成される。1000℃となった材料は排出シュートを通過して冷却装置に投入。冷却装置後段には付帯設備が配置されており、それらの付帯設備に対して熱損傷を防ぐため、各装置の耐熱温度200℃以下になるように材料を冷却する。冷却された材料はスクリュを通過しエレベーターに送られるというフローとなっている。



写真2-1 II型無水石膏製造設備

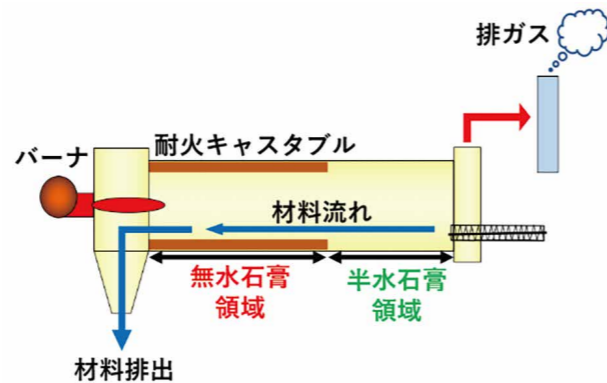


図2-2 焼成キルン内部

直接冷却		間接冷却	直接+間接冷却
スクリュ方式	キルン方式	スクリュ方式	スクリュ方式
材料流れ	材料流れ	材料流れ	材料流れ

図2-3 従来冷却方式一覧

3.1 焼成キルン

図2-2は焼成キルン内部を示し、図の右側より材料が供給される。リフターが取り付けられている部分は半水石膏を生成する乾燥加熱領域になり、この領域では、石膏を掻き揚げ自由落下させ、石膏をペール状に分散することで、材料の表面積を大きくする。これにより短時間で表面水を乾燥後、材料を180℃まで昇温し、半水石膏を効率良く製造することができる。

無水石膏を生成する焼成領域においては、バーナ燃焼による熱風及び火炎からの輻射熱により耐火キャストブルが蓄熱される。そして、乾燥加熱領域を通過した半水石膏がバーナ火炎と蓄熱された耐火キャストブルとの空間を通過する時に、1000℃まで昇温され無水石膏になる。

3.2 冷却装置

3.2.1 従来方式

当社では、これまでに4種類の冷却方式を採用してきた。これらの方式にはそれぞれメリット、デメリットがあり、対象となる材料加熱温度帯やシステム構成により区別してきた。以下では従来の冷却方式についてその特徴を説明する。従来冷

却方式一覧を図2-3に示す。

(1) 直接冷却方式

当社が採用してきた直接冷却には、図2-3に示す通りスクリュ方式とキルン方式とがある。両者は、キルン・スクリュ内部の材料に対してノズルより直接水を噴霧する方式である。

メリットは、水の顕熱と潜熱を100%有効利用することが可能であり、冷却水の水温を制御するためのクーリングタワーなどが不要になることである。また、機械構造よりメンテナンスが容易であることが考えられる。

デメリットは、水を直接噴霧するので凝縮すると石膏の付着要因となること、更には石膏が熱分解して生成する硫酸化合物と水とが反応して、硫酸を生成し、煙道内や機器の腐食が激しくなることである。とりわけ、キルン方式では、内部で材料を分散させ、表面積を広くし、材料全体に噴霧水が接触できるようにするため、材料の粒径や分散状況で熱交換状況が変化してしまうことがある。材料の粒度分布が変わると更に顕著に影響を及ぼし、材料の物理形状変化が激しい材料を採用すると付着によるトラブルが発生する可能性がある。

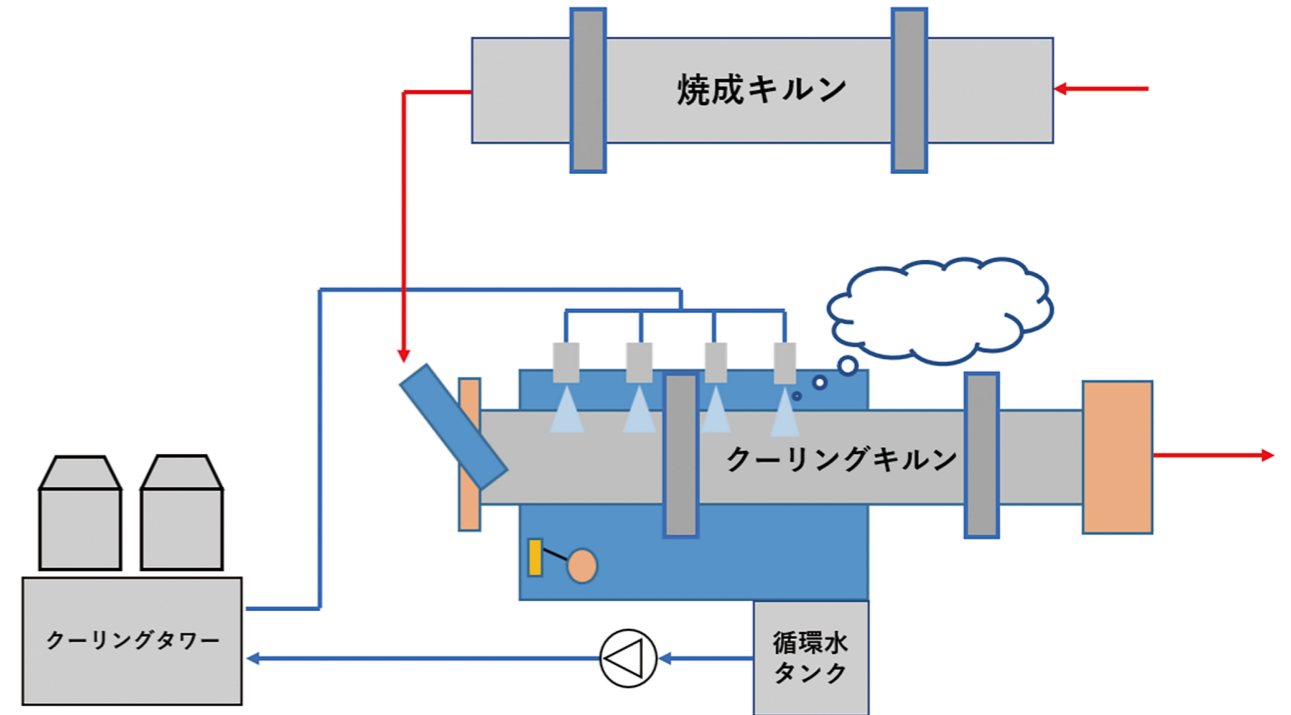


図3-1 間接冷却キルン方式フロー図

(2) 間接冷却方式

当社が採用してきた間接冷却のスクリュ方式では、二重構造のスクリュ軸とジャケット方式としたスクリュトラフに水を循環させることにより間接的に冷却する方式である。

メリットは材料と水蒸気が接触しないため、水蒸気による材料の品質劣化が発生しないことである。

デメリットは、鋼材を介しての間接冷却を行っているため、水の潜熱を100%冷却に使用することができないことで、直接冷却よりも大量の水を使用することになる。また、これらの水は、クーラで冷却して再利用するため、循環経路が複雑かつ設置面積が広くなることがある。この方式では、材料と鋼材との熱のやり取りに依存するため、冷却効率は接触面積と熱伝達率に影響される。

(3) 直接+間接冷却方式

当社が採用してきた直接+間接冷却方式は、スクリュを二重構造にしてジャケットと軸の中空部に水を流す間接冷却と製品に直接水を噴霧する直接冷却の両方を採用した方式である。

メリットは、直接冷却と間接冷却の両方を採用していることで間接冷却スクリュよりは短時間で冷却できることに加えて、水の潜熱を利用することから装置サイズも小さくすることが可能である。

デメリットは、装置に対する熱損傷等の影響を直接冷却と間接冷却の両方から受けることから、耐久性が低いことである。

また、装置の設置スペースと機器点数が増えるため、トラブル発生の可能性が高く、著しく頻繁に修理が必要なことである。

3.2.2 新方式

新たに開発した間接冷却キルン方式のフロー図を図3-1に示す。

本冷却方式ではこれまでと同等の冷却能力を有しつつ、耐久性を高めるために間接冷却キルン方式を採用している。これまでの直接+間接冷却スクリュ方式では、熱負荷による機器の損傷度合いや複雑な構造による高頻度のトラブルにより、安定した運用が困難であった。これらの問題を回避するためできるだけシンプルな構造の間接冷却キルン方式を採用している。本方式を採用することにより、キルン回転数を任意に変更することで、材料温度がコントロール可能になった。よって、冷却対象の材料が変わったとしても回転数を変更することで材料に適した温度にコントロールすることができる。

(1) 投入シュート

投入シュートでは、焼成した1000℃近い高温の無水石膏が通過しクーリングキルンへと入って行く。シュートの冷却は、空冷二重方式を採用し、材質は鋼材の耐久性を考慮し、SUS310Sを選定した。

この空冷二重方式は、二重構造の空隙に冷却ファンで空気を供給することによって鉄皮温度の上昇を抑制できるようにしている。これによりトラフ温度は鋼材が赤熱する600℃以

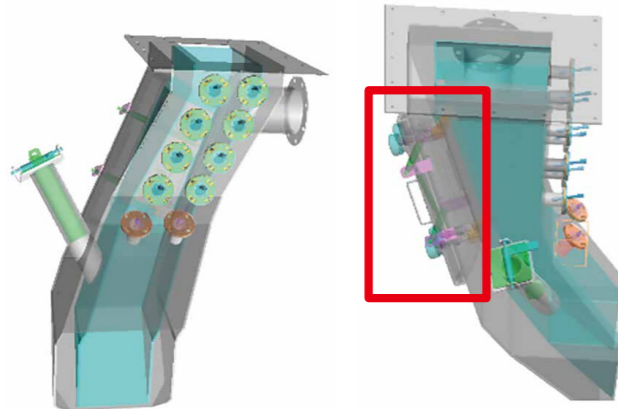


図3-2 投入シュート3Dモデル

上に上昇せず、安全に使用することができるようにした。また、複雑な構造によるトラブルを防ぐと共に、設置スペースをコンパクトにできる空冷式を採用した。

本シュートの懸念点として、落下した材料がシュートの1点に集中的に当たることが分かっている。そのために局所的な摩耗による損傷が想定される。摩耗対策として定期的な点検と図3-2のような構造にしてトラフを容易に交換できる構造にした。この構造によりシュートの摩耗及び熱損傷が進行した場合でも一部トラフを交換することで定期的なメンテナンスと部品交換により恒久的に使用できるよう設計した。対象材料の性状によっては、シュート内での材料詰まり等が発生するケースもあるため、今回は堆積する箇所にエア噴射ノズルを設置し、一定間隔でパルス動作させて堆積を防止できるようにしている。

(2)クーリングキルン

クーリングキルンは、焼成した材料を急速冷却させる装置であり、間接冷却キルン方式を採用している。写真3-1に実機の写真を示す。

クーリングキルンでは、キルン鋼材に水を噴霧して間接冷却することから投入側に配置する2つの支えローラーが水に接触する雰囲気下にある。当社で従来から採用しているフリクション駆動は水に接触する雰囲気下では使用することが困難なため、排出側の水と接触しない部分で本体を直接駆動させるチェーン駆動を採用した。また、水と接触する雰囲気下にある部分であるドラムローラー、支えローラーは、各々ステンレス製を採用した。

図3-3より、クーリングキルン内に投入される高温材料はキルン鋼材へ熱が移動するため、材料温度が下がる。高温に



写真3-1 クーリングキルン

なったキルン鋼材は外側から水による顕熱と潜熱で冷却された後に、再度高温材料からキルン鋼材へ熱が移動する。この熱のやり取りを繰り返すことで材料温度が冷却されるメカニズムである。運用中はこのような一連の流れで連続的に冷却している。

更には、冷却時、キルン上部に水噴霧し、キルン表面に沿って水が下方向に流れるため、水の顕熱を最大限に利用できる構造にしている。また、構造上、水の排水がほぼないため、ランニングコストを最小限で運用可能にしている。

図3-4に乾燥加熱と冷却の場合でそれぞれロータリーキルンの材料挙動を示す。乾燥加熱の場合は、リフターで持ち上げた材料をベール状に分散させて落下させることにより、表面積を広くとり、熱風との熱交換を効率良くしている。

冷却の場合は、冷却効率が材料とキルン鋼材の接触面積に大きく左右されるため、リフターを取付け低頻度で材料攪拌することで、キルン鋼材との熱交換を行っている。写真3-2のように、リフターの数が乾燥加熱の場合よりも少ないのは材料を掻き上げる回数が多いことによって材料落下時に発生する粉塵の飛散及び冷却に必要な接触面積の割合を必要以上に小さくしないためである。このような構造により、材料を均等に効率良く冷却している。

(3)水噴霧装置

水噴霧装置は、水の潜熱を最大限活用し省スペースで急速に冷却するために、狭いスペース内で広範囲かつ均一に噴霧可能なノズル選定及び設置位置を最適化した。

一般的に水噴霧ノズルとして用いられる噴霧形として扇型、円錐型が広く採用されており扇型は比較的広い範囲をカバーすることができる。本装置では広角扇型を採用し扇型

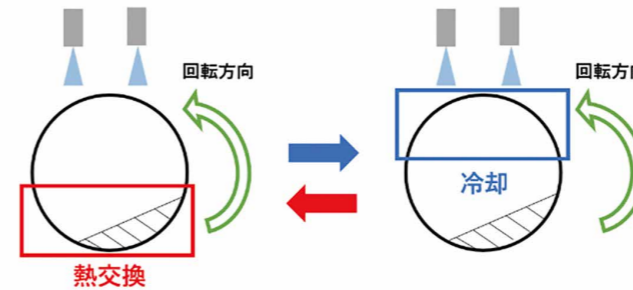


図3-3 冷却メカニズム

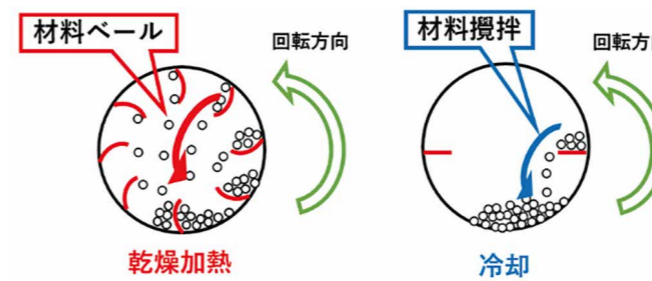


図3-4 ロータリーキルン内の材料挙動

よりもさらに噴霧角が大きく、広範囲をカバーすることができるノズルを選定している。このノズルは、異物通過径が大きく、不純物が通過した場合に目詰まり発生の可能性が低い。また、ノズル設置位置は面によって千鳥に配置することで少量のノズルで広範囲をカバーすることができる。

水の噴霧方式は、ランニングコストを優先し、水圧だけで噴霧できる1流体ノズルを採用した。蒸発しないでキルン表面を伝って水槽へ溜まった水はキルン鋼材保護の目的として再利用できるように汲み上げリフターをキルン外側に取り付けた構造にした。また、噴霧後にドラム下の水槽に溜められた水は、一定の水位に達すると排出されるようになっており、これらの水はクーリングタワーにより冷却後の水が約10~20℃冷却されるように、循環水を常時利用することで節水を可能にしている。写真3-3は水噴霧の様子と汲み上げリフターの様子である。

4. 間接冷却キルンの運用

ここでは、従来方式である直接+間接冷却スクリュ方式と新方式である間接冷却キルン方式のRUN1とRUN2を比較する。その際の運転データとしてRUN1を図4-1に、RUN2を図4-2に示す。



写真3-2 クーリングキルン内部



写真3-3 水噴霧の様子

図4-1のように直接+間接冷却スクリュ方式の運用では冷却装置出口温度が200℃後半~300℃を推移しており、付帯設備の耐熱温度である200℃以下まで十分冷却することができていないことがわかる。図4-2のように間接冷却キルン方式の運用では、材料の冷却装置出口温度は100℃~150℃を推移しており、付帯設備はトラブルがなく安定して運用している。

新方式での夏期と冬期の運用を比較するデータとしてRUN3を図4-3に示す。RUN3の夏期の運転では水温が20℃高くなり、RUN2の冬期の運転よりも冷却に水の顕熱を有効に利用できていない。図4-3より、冬期運転と比較すると冷却装置出口温度が平均して10℃上昇している。しかしながら、冷却能力は十分に発揮しており、耐熱温度である200℃以下に温度を抑えることができていたため、2022年12月から運用し、年間を通した運用データを見ると安定運用している。

5. 今後の予定

本冷却方式の対象となる材料は石膏であるが、コークス、鉄鉱石、アルミナなどの粉粒体など、直接水との接触ができない材料へ利用する装置として幅広く展開できると考えている。

MEMO

製品紹介

PRODUCT
INTRODUCTION



— 製品紹介 —

自走式インパクトクラッシャー 「KLEEMANN社製MR110i EVO2」について

はじめに

本文では、砕石業/中間処理業において重要な役割を持つ、自走式インパクトクラッシャー「KLEEMANN社製MR110i EVO2」について紹介する。



図1: KLEEMANN 自走式インパクトクラッシャー

国内における自走式破砕機の需要

近年、自走式の破砕機、ふるい機、土質改良機は業界内外において注目されている。災害復興において活躍する事例や自走式製品の質向上により自走式へ変更するメリットが非常に大きいからである。

KLEEMANN製品について

ドイツに本拠地のあるKLEEMANN社は自走式破砕機において世界トップクラスのシェアを誇るメーカーである。また、創業後150年以上の歴史を持つ老舗で、自走式破砕機のパイオニアメーカーだ。

今回は主力製品の1つである自走式インパクトクラッシャー「MR110i EVO2」を紹介する。

自走式インパクトクラッシャー

MR110i EVO2の特長

MR 110i EVO2 は様々な破砕用途への汎用性が高く、最高クラスの品質の製品が生成可能。1100×700mmの粉砕機入口と多数の技術的ハイライトにより、最高の費用対効果で驚異的な生産速度を達成。コンパクトな設計なので、持ち運びが簡単で、組み立てや分解も素早く行うことができる。

*豆知識

インパクトクラッシャーの破砕比は15:1。
砕石、砂利、コンリート廃材、アスファルト廃材、製鉄スラグ、コークス、などの破砕が可能な万能機。

一例

機種: MR110iEVO2(自走式破砕機)

投入サイズ
(500-0mm)

製品サイズ
(40-0mm)

駆動方式

エンジン直結のベルト駆動にて破砕機を稼働し、その他ベルト/フィーダは発電機にて稼働を行うハイブリッド駆動方式である。

技術的ハイライト

①コントロール



図2 コントロールパネル SPECTIVE

近年、破砕プラントに求められる要件が増加し、操作はますます複雑化しつつある。

その中で、「簡単に誰でも操作できる」をコンセプトとした図2「SPECTIVE」。

特徴として12インチのタッチパネルが装備されており機械での設定作業が簡単に行える。整理されたメニューナビゲーションのおかげで、情報を読み上げるのが非常に便利で、可視化された各機能の状態把握が容易である為、操作エラーが減少。

②CFSシステム



図3 CFSシステム(連続供給システム)

破砕機に対する均一な荷重は、優れた製品、最適な供給、低摩耗のために必要不可欠なポイントである。

連続供給システム(CFS)は粉砕室の充当レベルを検知する為に、ローターの負荷、およびモーターの使用率を監視している。

CFSは振動フィーダーとプレスクリーニングの周波数を制御し、プレススクリーンからの供給過多/低い供給量を回避することでクラッシャーの使用率を最適化する事が可能である。つまり、機械が均一な材料の流れを自動的に保証し破砕機への最適な負荷を確保する事でオペレーターの作業を容易にしているのだ。

③2次スクリーン



図4 2次スクリーン/リターンコンベヤ

コンパクトな設計で破砕機にスクリーンが連結されているオプションである。

効果的なふるい分けのための特大のふるい面を備えたシングルデッキ振動ふるいで、20 mm 未満の小さな粒子サイズにも対応できる1床振動ふるいを搭載。オーバー材料をリターンコンベヤへ送りホッパーへとループさせることにより、均質な材料を高い操作安全性と共に実現。

④選別装置(磁選機/ウィンドシフター)



図5 磁選機

永久磁石が搭載されており、非常に磁力が強い事が特徴。排出コンベヤと平行に設置されており、高さ調整をラジコンから操作する事が可能である。

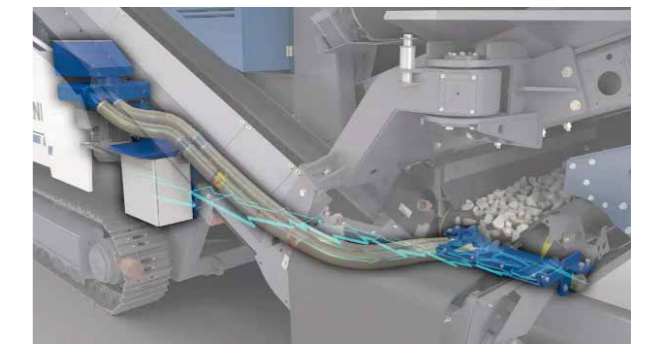


図6 ウィンドシフター(エア)

ウィンドシフターは、生産材料の品質の向上、汚染物質(木材やプラスチックなど)の除去、使用される材料に応じた空気流の設定調整が可能。

⑤輸送

輸送および稼働する際にはリモコン操作で2次スクリーンの脱着/リターンコンベヤの調整が可能である。トレーラー1台での搬送が可能であり図7の様になり、表1/表2の寸法となる。

	MR110i EVO2
全長 (mm)	17,400
全幅 (mm)	3,000
全高 (mm)	3,600
重量 (スクリーン除く)	43,900kg

表1 輸送時 機械寸法

	MS702
全長 (mm)	20,580
全幅 (mm)	3,000
全高 (mm)	4,190

表2 稼働時 機械寸法



図7 トレーラーにて輸送時 似姿

機械諸元

MR110i EVO2

エンジン	Scania 製 (Tire4)
燃料	軽油
燃料容量(約 L)	930
最大処理量 (約 ton/hour)	350

表3 エンジン諸元

	MR110i EVO2
破碎機ローター重さ (kg)	13,000
投入サイズ(約□ mm)	1,100×700
フィーダー 高さ(mm)	4,190
ホッパー容量 (m ³)	4.5

表4 破碎機諸元

弊社における取り組み

本事業部では海外製品の取り扱いに伴い、プラントメーカーとしてお客様へのメンテナンスを重要事項としている。その様な背景から、東京モバイルセンター(TMC)の設立や部品ヤードの拡充等を行い、サポート体制の充実を各拠点に行う事で全国でのメンテナンス体制の拡充を行っている。

部品・在庫に対する姿勢

東京モバイルセンターにて各機種、数台の在庫機を保有している。国内外の製品に係わらず納期が非常に長くなっていく為、長納期の課題解決として弊社での取り組みを行っている。

※特車申請が必要な場合は1～2ヶ月間要する。

トラブル対応

各支店のサービスマン、又は事業部の作業員が状況確認/修理を行うことで、長期間の機械停止を防ぐように活動している。現在では、トラブルにおける知見も深まり、新サービスであるアプリ等も発信予定である。

最後に

将来のインフラを支える砕石業/中間処理業における自走式破碎機は非常に大きい役割を担う機械の一つである。本記事内ではKLEEMANN社製の自走式インパクトクラッシャー(MR110iEVO2)について提言したが、破碎機には数多くの種類や用途があり一概にある機種だけが良いとは断言できない。しかし、その中でも弊社の取り扱い機種 KLEEMANN製品は自信をもってご提案できる機械であるのは事実である。今後もお客様の課題解決の手助けを行うべく、メーカーとしての強みを発揮し多角的な観点からの御提案/サポートを行う所存である。

筆者紹介



NAKANNO Satoshi
中野 智之
2021年入社
モバイルプラント事業部

MEMO

— 製品紹介 —

IoTプラットフォーム 遠隔監視システム「remoop」

1. はじめに

近年、多くの企業でDX化を推進する取り組みが広まっています。DXとは、デジタルトランスフォーメーションの略で「データやデジタル技術の活用により、新たな価値を創出し変革する」というものです。

コロナ禍を機にDX化が加速し、今後も伸び続ける見込みがある市場ですが、DXという言葉に耳にしたことはあっても何から始めたらいいのか、という戸惑いの声が上がっているのも現実です。総務省が行った「我が国におけるデジタル化の取組状況」についての調査(図1)では約6割の企業が「実施していない、今後も予定なし」と回答しています。

今回は、スモールスタートから始められるDX製品として開発いたしました、遠隔監視システム「remoop(リムーブ)」をご紹介します。

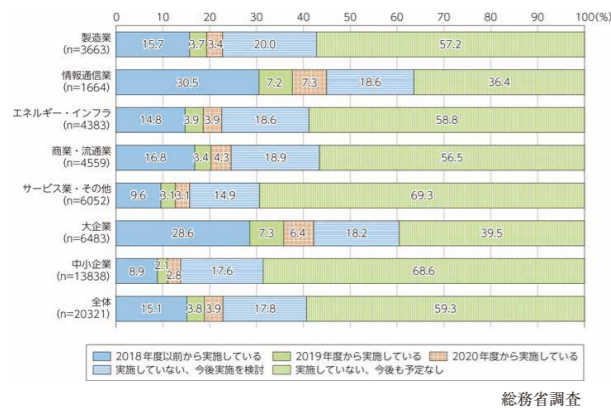


図1 DXの取組状況(日本)

2. 製品概要

remoopはRemote Monitoring Operationの略で、「遠隔監視」「遠隔操作」「データ収集」の三つの機能をもつ遠隔監視システムです。



図2 remoopロゴマーク

一つ目の機能「遠隔監視」では、作業者が現地から離れた事務所や自宅等から現地の状況をリアルタイムで確認することができます。作業場が遠方の場合や災害時等でも離れたところから監視することで、時間の削減や安全管理に役立ちます。

リアルタイムのカメラ映像は最大4台まで接続することができ、過去の映像はカメラ内に保存しているSDカードの容量に応じて確認することができます。その他、各種センサーからのデータは、1秒間隔で取得できます。

二つ目の機能「遠隔操作」では、機械や装置のON・OFF操作等が可能になります。手動だけでなく、閾値を決めて自動制御させることも可能です。スケジュールタイマーによる定期実行にも対応しています。

また、閾値に達した際、担当者へメール発報やLINE通知を行う機能もあります。遠隔操作を行うことで、移動の手間を省くことができ、工数を減らすことに繋がります。

三つ目の機能「データ収集」では、取り込んだセンサーのデータはクラウド上に保存されるため、リアルタイムのデータだけでなく、過去のデータも確認が可能になります。またPLCとの連動において、専用のゲートウェイと接続することで、設備の稼働データ等をクラウドへアップロードします。

保存クラウドは、AWS(アマゾンウェブサービス)を使用しています。アップロードされたデータはCSVの出力に対応しています。データ蓄積機能により現場のムダな作業の改善や、設備の保守点検のタイミングを把握し、データの「見える化」を実現します。

3. 構成について

remoopの構成は図3の通りになります。監視対象物の近くにセンサーやカメラを設置します。センサーは、弊社が開発した入出力ユニットが内蔵されているIoTデバイスに接続し、クラウドサーバーへ保存します。クラウドサーバーへ保存されたデータはスマートフォンやパソコンを使用してwebブラウザで閲覧します。



図3 remoop構成図

4. 特長について

remoopの強みは、入出力機能を同時搭載したことにより可能となりました監視機能と遠隔操作機能の両立です。リアルタイムのカメラ映像、各種センサーからのデータ情報、閾値設定や動体検知によるON/OFF出力、これらの情報を一つの画

面で一元管理することができます。

閲覧画面にはダッシュボード機能を構築しており、グラフの種類や配色等自由にカスタマイズすることができます。

例えば、図4のダッシュボードのように一つの画面で完結することによって、カメラ映像を見て周りの安全を確保した上で出力を出すことや、出力を出した後にカメラ映像を見て動作確認をすることができます。



図4 ダッシュボードイメージ画面

5. 納入事例

(1) 排水処理設備の遠隔監視

日常点検を自動化することにより毎日の見回り作業を削減し、目視確認を行っていた水位や電流値は閾値を超えるとアラート通知します。また、タンクに水が溜まると排水処理盤まで移動スイッチを押して排出していたところを遠隔で操作することにより作業の効率化を図りました。

(2) ベルトコンベヤの異常検知

振動、電流、温度センサーによってベルト状態を監視しています。閾値を超えた場合、アラート通知を行い、予知保全に貢献します。また、カメラによる遠隔監視でベルトの状態も映像で確認しています。

(3) 倉庫内の結露監視

倉庫で管理している製品の品質を低下させないため、温湿度センサーにより露点を計算し、結露防止対策を行っています。結露発生を防ぐために設定した条件に達すると自動で送風機を回すことも可能になります。

6. 仕様について



図5 IoT BOX写真

表1 IoT BOX仕様

電源	AC100V
寸法	530(W)×630(H)×255(D)
重量	約 16kg
使用環境	温度-20℃～60℃ 湿度 35%～80% (結露無きこと)
防塵防水	IP64 相当



図6 IoT デバイス写真

表2 IoTデバイス仕様

電源	DC24V	
	アナログ入力	アナログ出力
入出力点数	8点	2点
入出力レンジ	0～5VDC	0～5VDC
分解能	1.25mV 1/4096	1.25mV 1/4096
精度	±0.5%以内	±0.5%以内
入出力電流	最大 50mA	最大 50mA
	デジタル入力	デジタル出力
入出力点数	2点	4点
入出力レンジ	DC24V	DC24V
入出力電流	最大 50mA	最大 120mA

7. 終わりに

日工電子工業として、遠隔監視という新しい分野へ足を踏み入れることにより、今までご縁がなかった幅広い業種の企業様から、新たな引き合いをいただく機会が増えております。また、関西に限らず関東や九州方面での展示会にも出展することで、日本全国で製品の認知を広めています。

今後もより要望に沿える製品へ近づくため、新機能実装に力を入れ、最適な提案ができるよう取り組んで参ります。



図7 remoop紹介動画QRコード

筆者紹介



SAWAI Kana
澤井 香奈
2016年入社
日工電子工業株式会社
事業推進部 営業課 販売グループ

— 製品紹介 —

仮設昇降階段システム ハングユニット-R

1. はじめに

近年、職場環境や働き方が変化するとともに、職場の安全に対するニーズが高まっています。建設業界では墜落・転落による労働災害が多く発生し、現場ではより安全な機材の使用が求められています。

弊社では、社会変化に伴う現場のニーズを元に、独自のノウハウと経験を活かした仮設機材の設計開発・製造・レンタルを行って、安全かつ便利な仮設機材の提案に取り組んでいます。

本稿では、弊社が取り扱っている『仮設昇降階段システム／ハングユニット-R』についてご紹介いたします。

2. 製品概要

○製品名: ハングユニット-R

(NETIS登録製品No.KT-170045-A)

○型 式: HY-R

○寸 法: D2,134mm×W1,219mm×H1,350mm

○製品重量: 100kg (1ユニットあたり)

○積載重量: 1,000kg (総積載荷重)
200kg (1ユニット最大荷重)



写真1 施工例



写真2 施工例

仮設昇降階段システム／ハングユニット-R(以下ハングユニット)は、建築・土木現場など様々な現場で昇降高に合わせて設置することが出来る仮設昇降階段です。

現場の場所によって置き型・吊り型と選択が可能で、場所を選ばずに設置出来ることが特徴の一つとなっています。

また、コンパクト設計のハングユニットは、組立・解体作業の省力化となるため施工性が向上し、作業工程の短縮に繋がり、ラフタークレーンの日数軽減になるなど、経済性にも優れます。

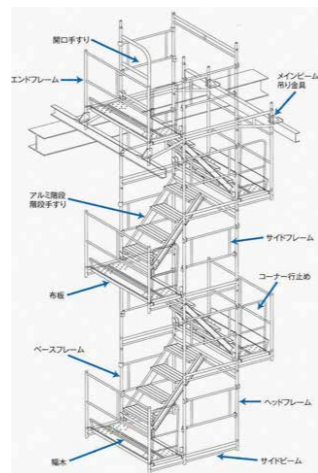


写真3 構成部材

人力による組立可

部材構成のコンパクト化を行うことにより、人力による組立・解体も可能となっており、スピーディーな運搬・設置が出来ます。

昇降階段の設置可能場所

昇降階段の上下に増設が可能で、高さも1,350mm毎での自在な乗込口を設定が可能なので、ハングユニットをレンタルする際、細かな調整をすることが出来ます。

コンパクト設計

昇降階段のサイズは、
(D)2,134mm
(W)1,219mm
(H)1,350mm
(基本ユニット)と省スペースでの仮設階段の設置計画が可能です。設置範囲の狭い現場などにも対応が可能となっています。

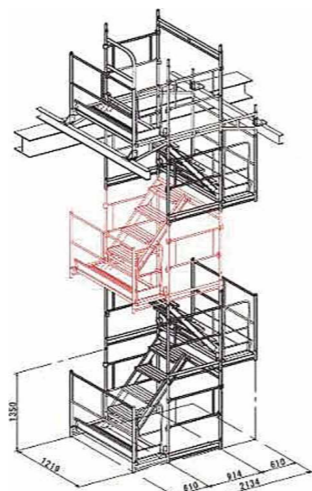


写真4 CAD図

高い段数が可能

メインビーム材の使用により最大10段の吊下げ・自立設置が可能です。またメインビームの追加及び補助ビームの使用により、10段以上の設置も可能です。
(許容荷重19.6kN/2枚組) ※適用条件有

その他

弊社製品の『アルミ製傾斜自在階段/ラク2タラップ』や『アルミ製傾斜自在ミニ階段/ニコ2タラップ』との相性も抜群です。吊固定方法は狭締金具のみで設置可能です。

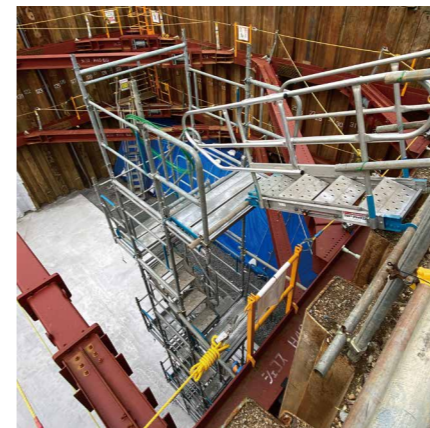


写真5 乗込口(ラク2タラップ使用)



写真6 乗込口(ニコ2タラップ使用)

適用条件

1. 注意報・警報など災害が想定される場合は設置・解体は出来ません。
2. 設置場所が設置面積W1.25m×L2.2mでH1.35mの1ユニット以上の自立スペースもしくは、吊元スペースを確保できる場所であってはなりません。
3. 基本的に高さは1ユニット層×10ユニット層まで、ただし10ユニット層以上使用の際は控え材を備え、強度計算にて積算許容荷重が確認できればそれ以上の設置も可能です。
4. ユニット組立時、その組立スペースが確保できる場所が必要です。



写真7 クレーンによる設置

3. おわりに

年々、安全規則の厳しさが増す建設業界ですが、法の厳格化、また足場となる仮設機材の進化により、着実に事故の割合は減少しております。

今回ご紹介したハングユニットも現場において、安全かつ便利に使用していただくことにより、建設業界の労働災害の減少に貢献していると考えております。今後も現場のニーズを汲み取り、安全・安心な仮設機材の提案に取り組んでまいります。

筆者紹介



SHINAGAWA Takumi
品川 拓実
2022年入社
日工セック(株) 東部営業所

— 製品紹介 —

合材サイロ遠隔出荷操作盤SiiLO

1. はじめに

近年、アスファルトプラント(以下AP)のオペレータの担い手が減少傾向にあると言われており、厚生労働省による働き方改革の影響も追い風となって、より少ない人数でAPを運転できるよう制御システムの改革が求められている。そのような需要を受け、日工電子工業株式会社と合材サイロ遠隔出荷操作盤「SiiLO」を開発した。

本製品は出荷工場とは別の工場から合材サイロの出荷操作を行い、一工場から多工場の合材サイロ出荷を行うことでオペレータの少人数化を目的として開発された。今回は合材サイロの遠隔出荷を可能とする操作盤を開発したが、将来的にはAP全体を遠隔操作し、さらなるオペレータの省人化が可能な制御システムを目指す。

2. 製品概要

SiiLOという名前の由来は

Silo(合材サイロ)

Internet of things (IoT)

Labor saving(省人化)

Operation system(操作システム)

の頭文字を合わせて出来ている。工場間の通信はインターネット経由で行われており、納入先によるVPN接続の用意が前提とされている。なお、遠隔出荷の実現にはSiiLOの他に

- 出荷口や場内の確認・監視用カメラシステム
 - 出荷口や受付と連絡するためのインターホンシステム
- の導入が必要になる。

SiiLOは専用ソフトウェアを導入したノートPCであるので、VPN接続が繋がる工場内であればSiiLOを移動させることが可能である(図1)。

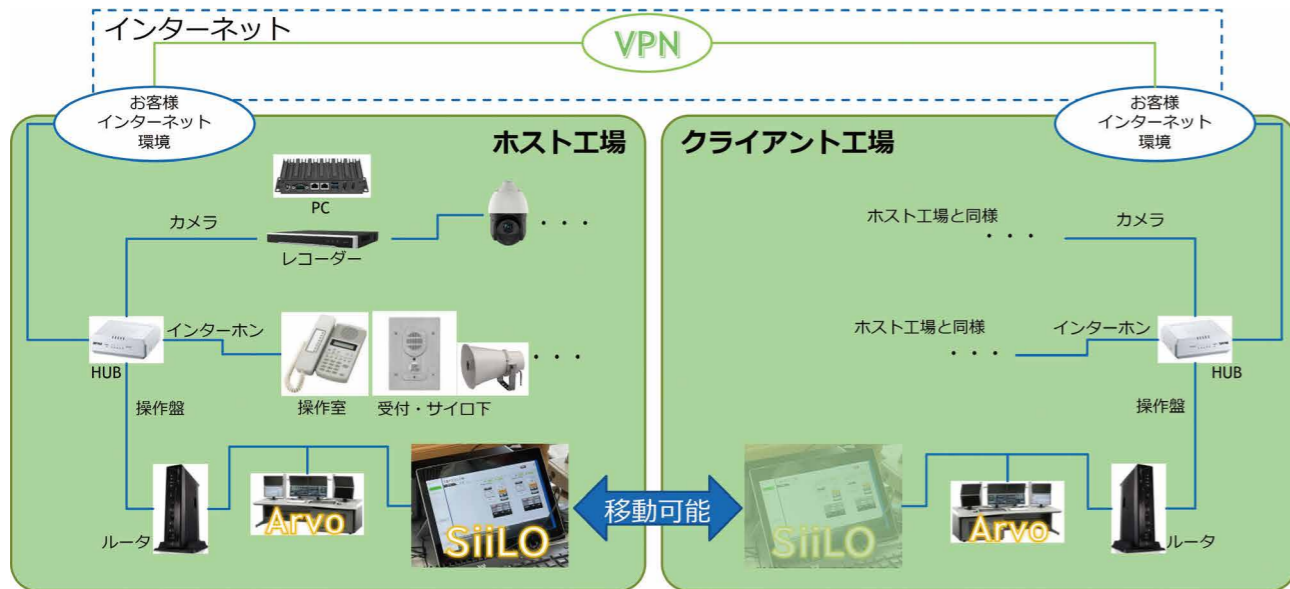


図1 遠隔出荷システム概略図

3. 遠隔出荷の概略的なフロー

- ①操作される側の工場(以下クライアント工場)のAP操作盤「Command-Arvo-AP」(日工電子工業株式会社製品、SiiLO対応可能なのはこの操作盤のみ)にて、遠隔出荷の受入スイッチを入れ、SiiLOによる操作を許可する。
- ②SiiLOを遠隔出荷する工場(以下ホスト工場)に設置する。

- ③クライアント工場に合材の引取者が到着したら、引取者が受付のインターホンを使ってホスト工場と連絡し出荷口へ移動する。
- ④オペレータがホスト工場からカメラシステムを用いて、クライアント工場の出荷口の安全を確認する。
- ⑤オペレータがSiiLOを用いて遠隔出荷を行う(図2)。

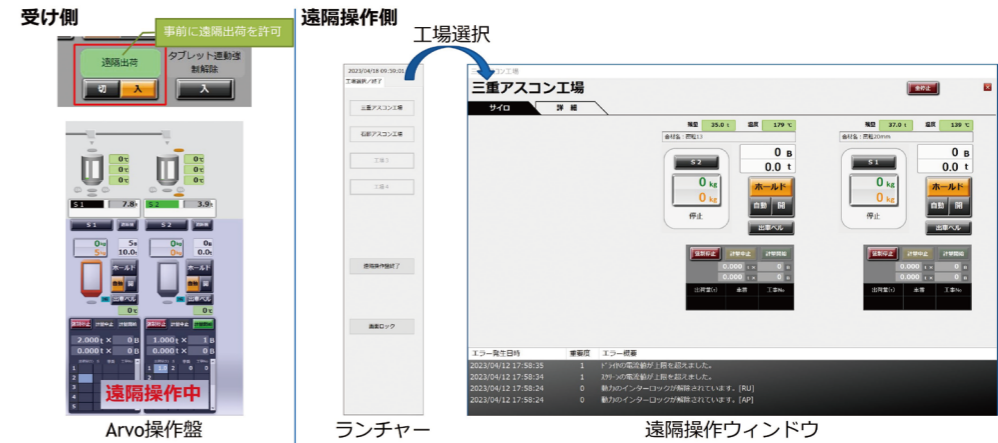


図2 SiiLO画面

4. 製品の導入とリスクアセスメント

本システムは株式会社昭建殿の石部工場および三重工場にて初めて導入を行った。開発を進めるにあたり、SiiLOを用いて同工場内の合材サイロ出荷を実験的にを行い、遠隔出荷になったときにどのような安全上の問題が生じうるかリスクアセスメントを行った。リスクアセスメントの結果、一人で複数のAPを同時に操作することは注意が散漫になり事故が生じる原因

となりうる、という考えのもとSiiLOでは複数工場を同時に起動できないようインターロックを用意した。さらに、遠隔出荷時でも通常時と同様に、

- カメラシステムを用いて必ず安全を確認すること
 - 通信異常時の対処方法を工場にて用意しておくこと
 - 合材の引取者に出荷口に立ち入らないよう説明すること
- を注意喚起として日工安全ガイドブックに記載した(図3)。

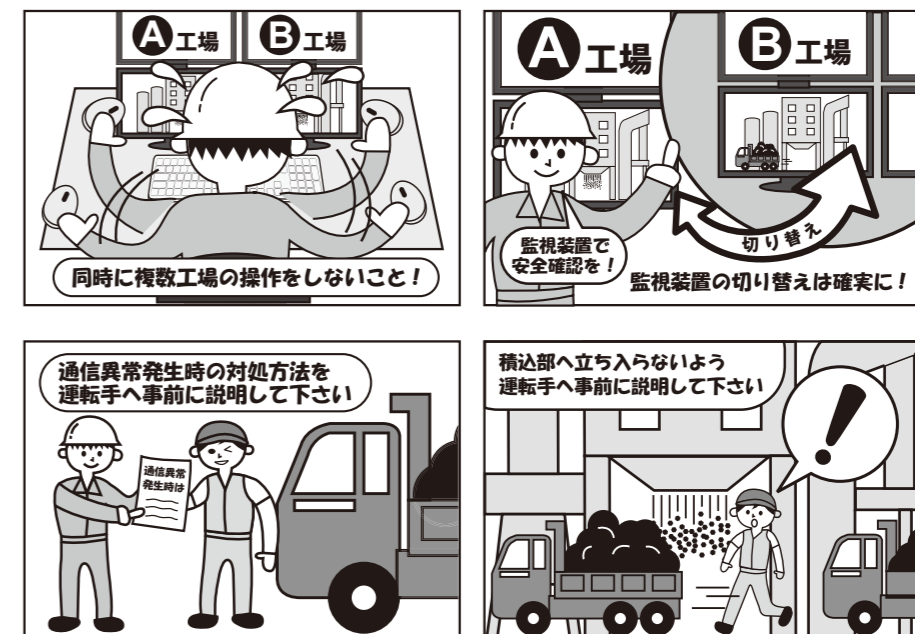


図3 安全ガイドブックの挿絵

5.伝票発行機

SiiLOを導入するにあたり、遠隔で伝票も発行したいと要望があがったので伝票発行をSiiLOから行うシステムも今回設計・導入した(写真1)。今後はオプションとして対応可能とする。



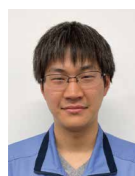
写真1 受付(右のBOXに伝票発行機を収納)

6.おわりに

今回、合材サイロ遠隔出荷操作盤SiiLOの開発及び導入を行った。導入後客先からSiiLOの更なるブラッシュアップが期待されており、依然改善の余地が存在する。しかし、将来的に更なる省人化を実現するための第一歩であると思う。

最後に、導入に多大なご協力いただきました株式会社昭建殿の皆様、製品開発を行っていただいた日工電子工業株式会社の開発チーム、および協力していただいた方々に感謝を申し上げます。

筆者紹介



DOI Akira

土井 晃

2019年入社

制御設計部

MEMO

— 製品紹介 —

画像認識AIによる骨材判別システム 「GraSanMan」

1. 開発背景

コンクリートは構造物の基礎など社会インフラを支える重要な材料です。主に水・骨材(砂利や砂などの総称)・セメントで構成されており、製造過程では指定した配合で正確に練り混ぜることが求められます。骨材を貯蔵する過程において、オペレーターや作業員の操作ミスで意図しない貯蔵場所に骨材を受け入れてしまうと、大量の骨材を抜き取らなければならない、場合によっては破棄しなければならないという課題がありました。この課題を解決するため、画像認識AIによる骨材判別システム「GraSanMan」を3年間の開発期間を得て2023年4月より販売開始しました。

2. 概要

本システムは、主に判別BOX(写真1,2)とPC(AIモジュール)で構成されており、受け入れホッパに投入された骨材は最初に、受け入れた骨材と貯蔵先が正しいか判別されます。AIで正しいと判断された場合は、受け入れ継続、判別が誤りと判断された場合には、人による正誤の確認が行われるフローとなります。(図1)上記フローによって、「人」と「AI」による骨材判別のダブルチェックを行うことが可能となり、間違った貯蔵場所へ骨材を投入してしまう確率を大幅に減らすことができます。(図2)

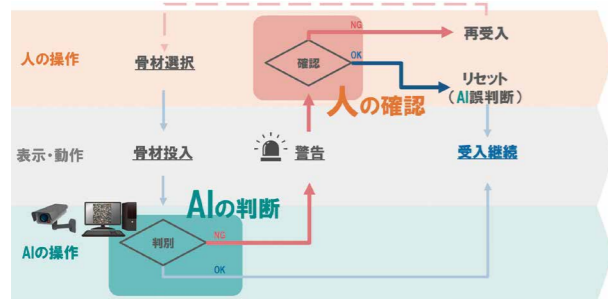


図1 GraSanManシステムフロー図

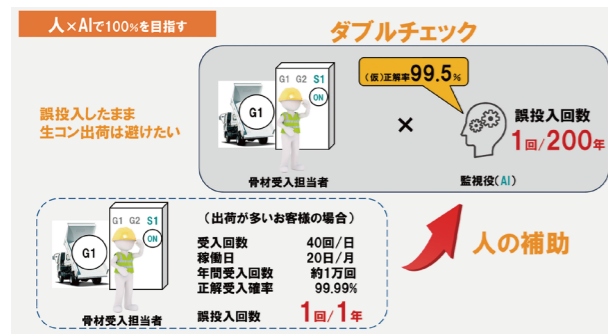


図2 GraSanMan 誤投入確率例



写真1 GraSanMan判別BOX(外観)



写真2 GraSanMan判別BOX(内部)

3. 製品仕様

製品仕様は以下表1のとおりです。

表1 製品仕様

判別方法	機械学習による画像判別
粒径判別	約5mm以上
色判定方法	基準画像設定方式
判別時間	約10秒
誤判定処理	各骨材に対して「警告」「非常停止」「処理無し」の選択方式
誤判定通知	パトライト、画面エラーメッセージ
正解率	99.5%以上
	※当社フィールドテスト実績値

4. ソフトウェア紹介



図3 GraSanMan骨材判別機能(メイン画面)

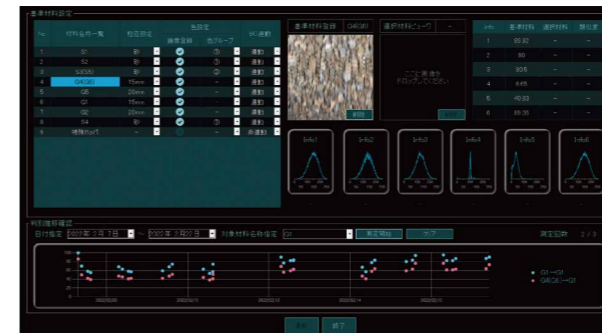


図4 GraSanMan骨材判別AI(設定画面)



図5 GraSanMan骨材判別AI(判別履歴確認画面)

本製品のソフトウェアについて以下ご紹介します。

〈メイン画面〉 ※図3

メイン画面左半分はコンベア上に流れる骨材をカメラ映像でリアルタイムに確認することができます。赤枠内の画像から、AIで受け入れた骨材と貯蔵先が正しいか判別します。また、判別結果は瞬時に画面右下表示され、音でも判別結果が分かります。メイン画面右半分は1日の受け入れた骨材(人が選択した骨材)とAIが判定した結果が分かります。正常に受け入れられた場合は、画像のタグが緑色に表示され、AIが誤投入と判断した受け入れは赤色に表示されます。受け入れた骨材の画像をクリックすると、その時受け入れた骨材が流れている動画も確認することができ、後から異物など骨材に問題があった場合のトレーサビリティの担保としても役立ちます。

〈設定画面〉 ※図4

設定画面左半分では、判別する骨材のグループ分けや誤投入判定時の処理方法(警告、非常停止、処理無し)が設定でき、設定画面右半分では色の判定を行う際に基準とする骨材

の画像をお客様で登録することが可能です。設定画面下部では、色の基準として設定した骨材に対して過去の判別結果とどれくらい色の違いがあるのかグラフで確認することができます。骨材の色が1年を通して変化してもお客様にて対応できる仕様となっています。

〈判別履歴確認画面〉 ※図5

本画面では、過去のAI判別結果の信頼度を確認できるようになっています。

5. 更なる進化

将来、プラント無人化に向けて人の操作も自動化していくことによって骨材そのものを判断することができる「骨材判別AI」は、さらに存在価値が向上していくと予想されます。

今後も、土木用プラント国内シェアNo.1企業として、「操作盤×データ×IoT×AI」の活用におけるプラットフォーム構築を強化し、お客様の工場におけるスマートファクトリー化に貢献してまいります。

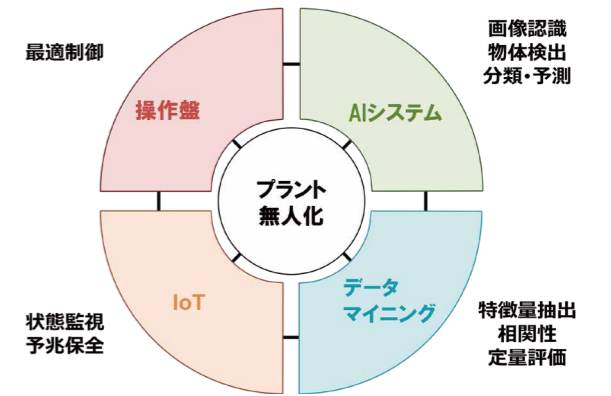


図6 スマートファクトリー構成図



◀GraSanMan紹介動画 (YouTube)

筆者紹介



FUJITANI Raiki
藤谷 来輝
2012年入社
開発部 開発4課

— 製品紹介 —

前川工業所製 小型解砕機

1. はじめに

破砕機は破砕対象物の性状(硬さ、大きさ、形状、比重、水分等)や破砕後サイズ、処理能力、稼働条件などにより適した機種を選定します。その種類は、ジョークラッシャー、ダブルロールクラッシャー、ハンマークラッシャー、シュレッダーなど破砕原理により各種あります。

その中で、小型解砕機はダブルロールクラッシャーに分類される破砕機で、歯の付いた2つのロール間に原料を通して圧縮および、せん断力で破砕します。

投入口が大きく、ロール歯により引掛掛けて噛み込んでいくので、200~400mm程度の大塊の解砕、破砕が可能です。

更に、ロール間隙を調整することで破砕後サイズを50~100mm程度で調整可能です。

今回は、コンパクトで大塊原料の解砕や1次破砕に最適な「小型解砕機」についてご紹介いたします。

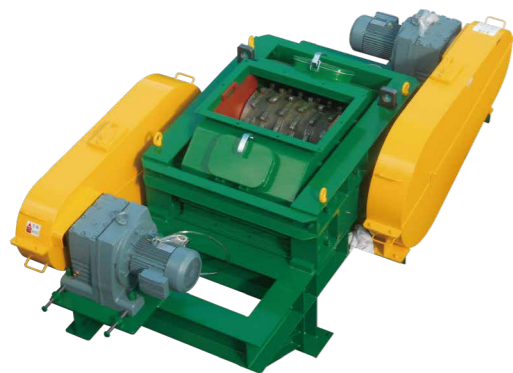


図1 小型解砕機 MRL-600型 外観

2. 小型解砕機の特徴

2-1 コンパクトで大塊の破砕が可能

通常、大塊原料を破砕する場合は、原料サイズにあわせて大型の破砕機を選定する必要があります。

しかし、小型解砕機は600~900mmの大きな投入口ながら低速回転、高トルクによりコンパクトサイズで大塊原料の破砕が可能です。

2-2 破砕後サイズの調整が可能

解砕歯の間隙を変更することで破砕後サイズの調整が可能です。

2-3 解砕歯先端は耐摩耗処理を実施

解砕歯先端は全て耐摩耗の肉盛溶接を実施し高寿命です。

2-4 低騒音、低振動

解砕歯の回転数は6回転/分と低速の為、騒音・振動が非常に小さく抑えられます。

2-5 省メンテナンスなシンプル構造

普段のメンテナンスは給油、給脂および解砕歯の摩耗点検で省メンテナンスです。

3. 構造

3-1 全体構造

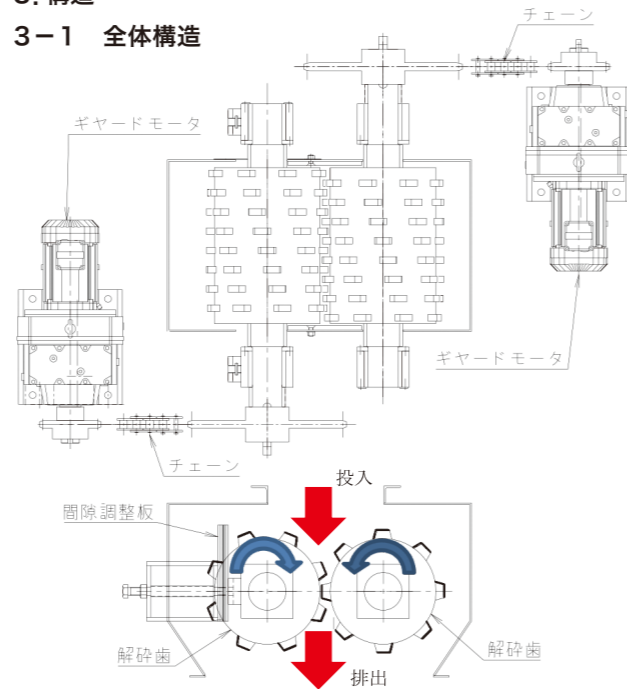


図2 小型解砕機 構造

- ・2つの解砕歯が内向きに回転し、上部から投入された原料は、2つの解砕歯間を通過する際に圧縮、せん断破砕されます。
- ・ギヤードモータからチェーンを介して解砕歯を駆動します。
- ・解砕歯は別々のギヤードモータで駆動していますので、回転数に差を付ける、片側のみ逆回転させることも可能です。
- ・解砕歯の種類、隙間により破砕後サイズを調整します。
- ・解砕歯の間隙は間隙調整板の抜き差しで行います。

3-2 間隙調整機構

間隙は調整板を抜き差しすることで変更します。また、原料サイズ、隙間に合わせロール歯の種類(細歯、粗歯)を選択します。

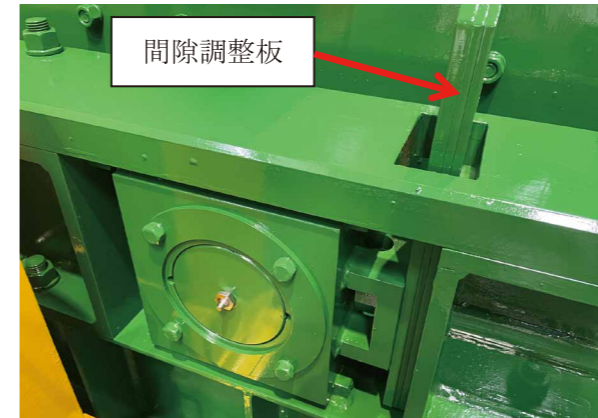


図3 間隙調整機構

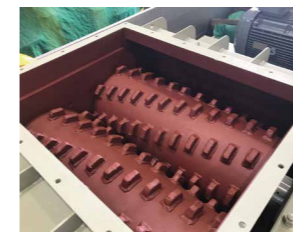


図4 細歯



図5 粗歯

3-3 解砕歯先端

解砕歯先端は全て耐摩耗の肉盛溶接を実施しており、摩耗が進行した場合は再度、肉盛溶接を行うことで補修可能です。



図6 解砕歯先端

4. シリーズ

型式	ロータ (mm)	モータ (kW)	処理能力 (t/h)
MRL-600	φ 406*600	3.7*2	5~10
MRL-900	φ 406*900	5.5*2	7.5~15

※処理能力は見掛比重1.0程度の原料を間隙50mmで破砕した参考値

5. 破砕対象物

200~400mm程度(厚みは150程度まで)の大塊。

尚、力を加えて曲がる、凹むもの(鉄、銅、軟質プラ、木材、ゴム等)は破砕できません。

また、水分や付着性のある物は付着閉塞する為、投入できません。

当社小型解砕機で実績のある処理物の例を以下に示します。



図7 コークス



図8 コンクリートブロック

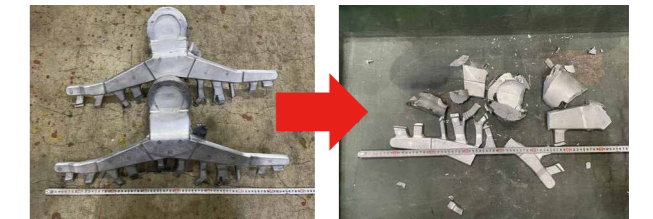


図9 アルミダイカスト



図10 プラスチック製品

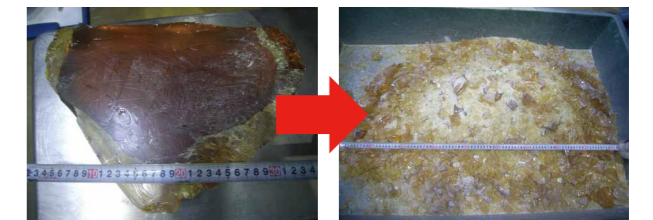


図11 樹脂成型品



図12 陶器類

6. 納入先

納入先事例を以下に示します。



図13 合金鉄破碎 MRL-600型



図14 コンクリートブロック破碎 MRL-900型



図15 飛灰破碎 MRL-900型



図16 アルミダイカスト破碎 MRL-600型



図17 電気部品破碎 MRL-900型

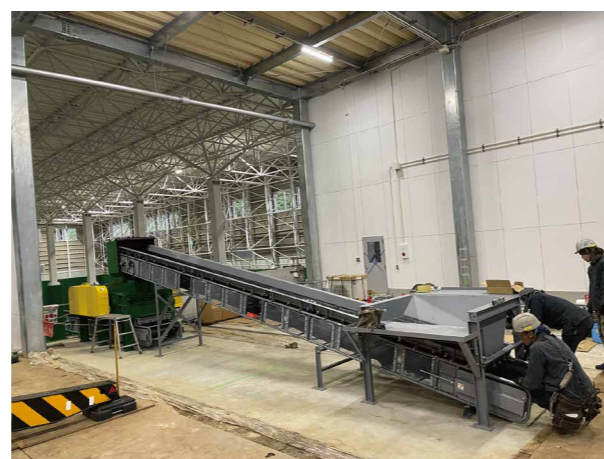


図18 陶器類破碎 MRL-600型

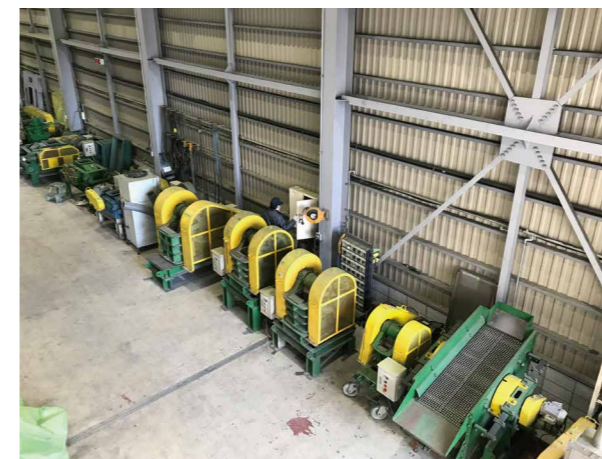


図19 常設テスト機



図20 破碎テスト風景

破碎機のお問合せの際には、下記についてご連絡ください。破碎可否ふくめて検討させていただきます。

- 処理物(名称、水分、付着性など)
- 破碎前サイズ(最大何mm、平均何mmなど)
- 破碎後希望サイズ(何mmアンダー何%など)
- 希望処理能力(何t/h、何kg/h)

お気軽にご相談ください。

筆者紹介



KOZAI Masahiro
小財 昌浩
1996年入社
(株)前川工業所 代表取締役社長

7. おわりに

破碎機選定にあたり、実際の原料を使用したの破碎テストが必要です。テストせずに仕様決定するとトラブルの原因となります。

前川工業所ではテスト機20台以上(小型解砕機は細菌、粗菌)を常設し、テストにて破碎後粒度、処理能力等の確認を行って破碎機の最終仕様を決定しています。

MEMO

製造設備紹介

MANUFACTURING EQUIPMENT INTRODUCTION



— 製造設備紹介 —

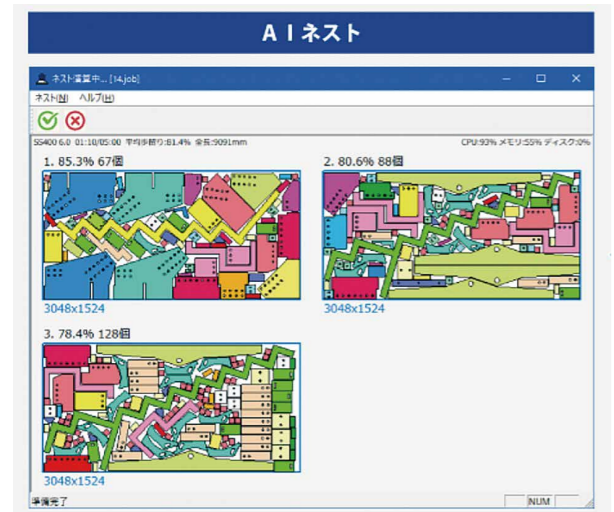
AIネスト導入による材料歩留り向上

1. はじめに

アスファルト、生コンプラントの大部分を構成している鋼材の内、鋼板の板取りのデータ作成を(株)テイクソフト(以下、ソフト社)製のSheetPartner(板金用CAD/CAMソフト)を以前から使用している。

従来、SheetPartnerの最適化自動ネステイングを用いて、顧客、ユニット毎、材質、板厚毎の板取り図(以下、仮ネス)を作成し、歩留り向上のために多くの仮ネスを集めた後、PC手作業で他ユーザーや他ユニットの部品を混合して歩留まり率が向上するよう組合せる作業を行っている。

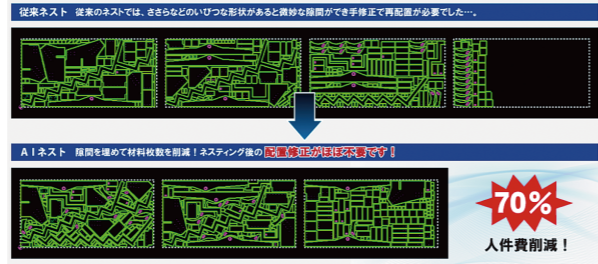
令和3年春にソフト社がAIネストを開発し販売がスタートし、セミナーや相談するなかで短時間で業界最高水準の歩留りが実現できる革新的なソフトとの事(多量で複雑多岐な形状部品(*下図)でも2分程度で高歩留り実現)で、月産平均400トンの鋼板を切断している当社としてはスクラップ量を削減によるコストダウンはもとより、環境問題(CO₂削減)にも貢献できるとの判断から導入を計画し、当初目標値に至るまで、数々の改善工夫を行い、目標達成に至ったので、ここに紹介いたします。



※ソフト社のHPより引用

2. AIネストとは(ソフト社のHPより引用)

AIネストは、人間の手操作による配置を超える高い歩留まりで自動的にネステイングを行うことができる。従来の自動ネステイング+手動配置で1時間以上かかっていた作業をわずか1分で計算し(計算時間は任意に設定可)、客先や納期ごとにエリアを分けて自動ネステイングすることも可能。AIネスト演算中も、リアルタイムで部品配置状態がプレビュー画面で確認でき、部品ごとや優先順位ごとに色分けされている為、部品の配置が



視覚的にも分かりやすくなっている。

3. 日工でAIネスト導入後の勘案事項

導入するにあたって現在の作業フロー等も含め多くの障害もありましたので、以下にその一部を紹介する。

(検討・問題点)

- 3-1 ユニットごとに大きさ、形状とも多種多様ある。
- 3-2 歩留り優先ではなく、納期が最優先である。
- 3-3 仮ネスから部品名(テキストファイル名)を吐出してネスト対象部品を集める方法が必要。
- 3-4 同一ネスト内(1枚の原材料内)で他顧客、他ユニットの部品が入乱れており、切断後に人による分別作業で工数が大幅に増加する。
- 3-5 その他 現在の作業フローでは円滑に流れない部分がある。

4. 問題解決

3-3で挙げた問題を解決すべく、ソフト会社と幾度となく相談し、自部署でも改善策の検討を行ったので、その内容の一部を紹介いたします。

4-1 AIネスト支援ツール

仮ネス上の部品名(テキストファイル名)を種類(顧客、装置、板厚)毎にcsvデータとして吐出し対象部品を選出する事とした。

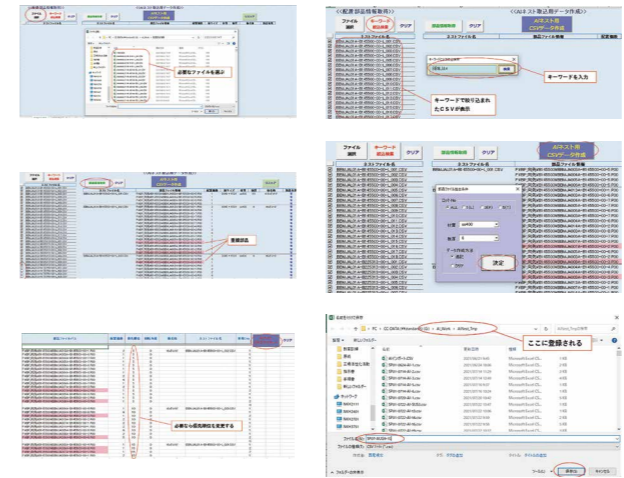
SheetPartner外から部品名を集めたcsvデータを取込むことは通常作業で行っているが、その逆の流れとなる。

そのためには、過去から蓄積されている多量の仮ネスからcsvデータの吐出をすることから始めた。次に出来上がったcsvデータの中から都度必要分をどのようにして選出して、どのように結合するのかの思索を繰り返した結果、自部署でデータベース(DB)を構築しエクセルでプログラムを作成し様々な選択方法を持たせてcsv出力する方向で検討に入った。

プログラムで考慮が必要なことを以下に示します。

- 1. 検索方法は?(何を検索キーにするかの種類)
- 2. 重複部品の処理方法は?(内部で自動で一時複製する)
- 3. ネスト優先順位は?(部品単位では自動採番にする)
- 4. 追加があった場合の順位付けは?
(順位数に間隔を開け追加の割込みも可能にする)

その他の詳細な仕様を作業担当者を交えて決定していき自職場でAIネスト支援プログラグが完成し、この問題は対応可能となった。



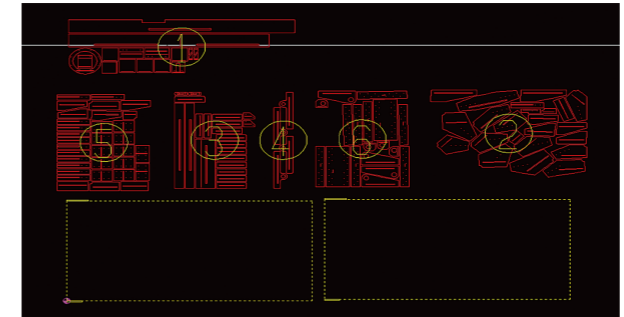
※AIネスト支援ソフトのイメージ画面

4-2 追加ネストでの優先順位与

配置部品の入乱れを軽減する方法としてAIネストには「エリア分けネスト」で一部混在、完全分離のモードも準備してくれている。

当社では大小多種多様な部品があり、特に大物部品に対して小物部品の比率差も大きく完全分離では歩留りの向上が期待値まで上がらない、一部混在も沢山を同時処理では多種な形状でラップ値の設定が難しい。

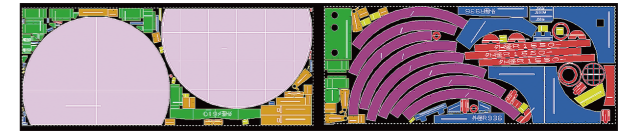
ソフト社とも相談し追加ネストで形状を見ながら部品群に優先順位を付与できるよう新たにソフト開発していただいた。



※下の白枠内の原材料を使用し黄丸内がネスト優先順位番号

4-3 多種混在ネストでの部品色分け

自動ネストのために混在部品の仕分けが困難であったので、画面上での色識別が可能のようにソフト社に要望し、ネスト結果で部品毎や優先順位(顧客、ユニット)等で部品塗り潰して(線のみも可)のカラーの画面表示、印刷も可能になり、混在した部品を視覚的に分かりやすくなり、現場での人の材料仕訳も正確性と作業スピードが向上した。



※ユニット毎に色分けしたPC画面イメージ

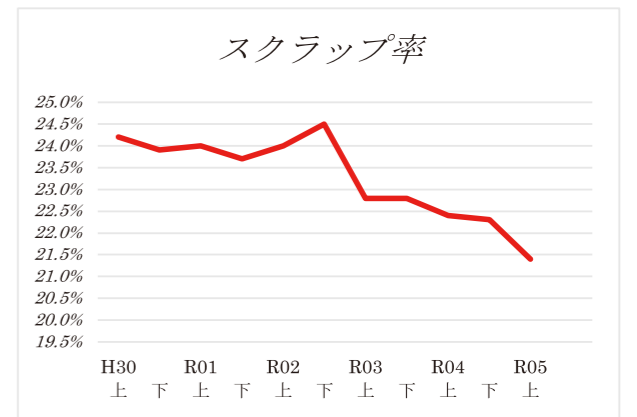
5. 現在の進捗

当社の使用鋼板の近年のスクラップ率はAIネスト導入以前は平均24.1%であったが、導入後2年半が経過したR05年8月現在までの平均は21.4%と当初目標の3%削減に至った。

当社の鋼材使用量からすると3%で年間144ton減となりスクラップ削減効果として大きなコストダウンとなっている。

また、AIネストは高歩留りネストが短時間でできるため手作業による詰込み作業が軽減されネステイング作業としては約15%の工数削減にも繋がっている。

他にもマクロ的視点で見て粗鋼生産で鋼材1ton作るのに2tonのCO₂が排出されているといわれていることから約300トンのCO₂削減効果もあり環境問題改善にも貢献できている。



※R05は8月末までの集計

6. 最後に

私達、材料データ作成グループは、現状の歩留り率に満足することなく更なる改善を目指して今後も精進してまいります。

AIネスト導入にあたりご尽力くださいました製造本部長、本社工場長をはじめ関係各所の皆様には厚くお礼申し上げます。

また、度重なるご相談にも懇切丁寧にご対応いただいた(株)テイクソフト殿に深く感謝申し上げますとともに、今後もSheetPartnerがなお一層機能強化されます事を祈念しております。

筆者紹介



MIZUTA Masahiro
水田 政広
1987年入社
材料課 材料1グループ

— 製造設備紹介 —

浸水防止性能試験場 設備紹介

1. はじめに

防水板タウンガードの紹介を、技法第二号・第三号でさせていただきます。

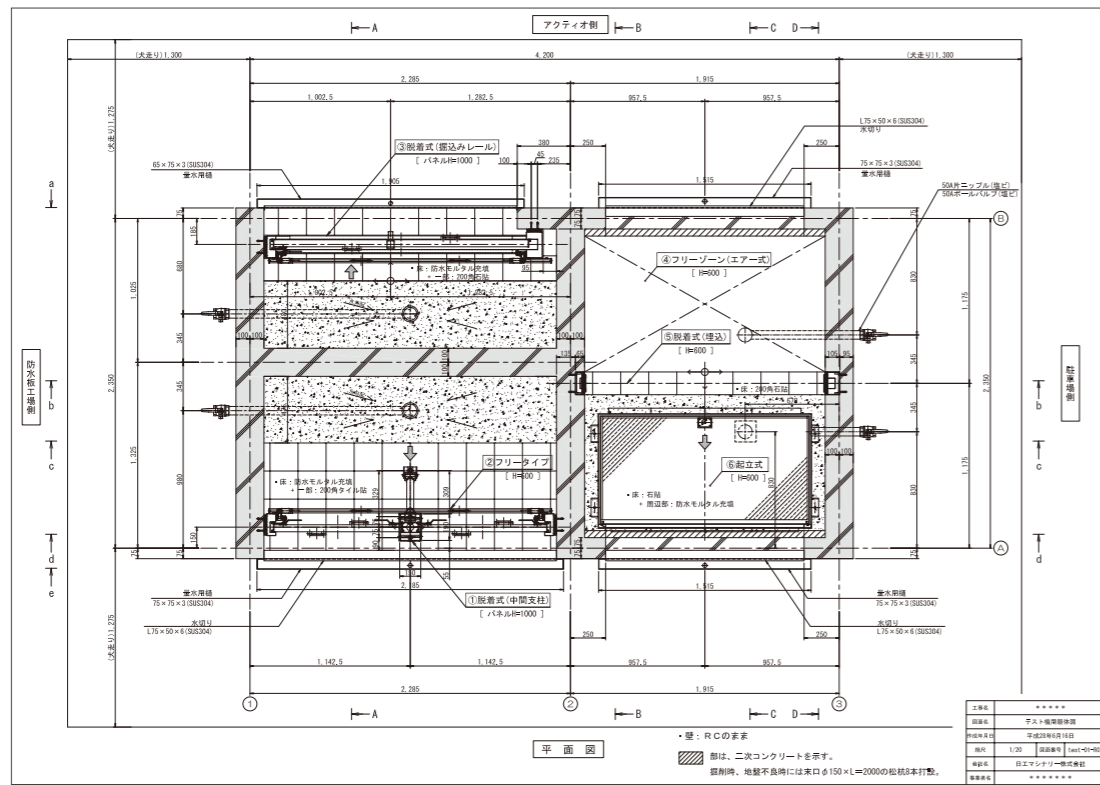
マシナリーではこれまでの20年間に、日本国内47都道府県に防水板タウンガードを設置納品してまいりました。それに伴いお客様から浸水防止性能(漏水量)について多くのお問い合わせをいただきました。

施工現場での漏水検査が困難なため、漏水量の確認が出来ません。その為マシナリーでは、防水板野田工場において

2016年にタウンガードの浸水防止性能試験場を開設し、漏水量およびたわみの測定を実施することにより、品質・性能及び施工が維持されていることを証明しました。

当時の止水高さは、H1000mmまでが標準でしたので、止水高1000mmまで測定が可能な試験場として水槽を4ヶ所もつけ、脱着式アルミ防水板3基、起立式防水板1基の試験場として開設しました。

旧浸水防止性能試験場躯体図を(資料1)及び(写真1)(写真2)に示す。



(資料1)



(写真1)



(写真2)

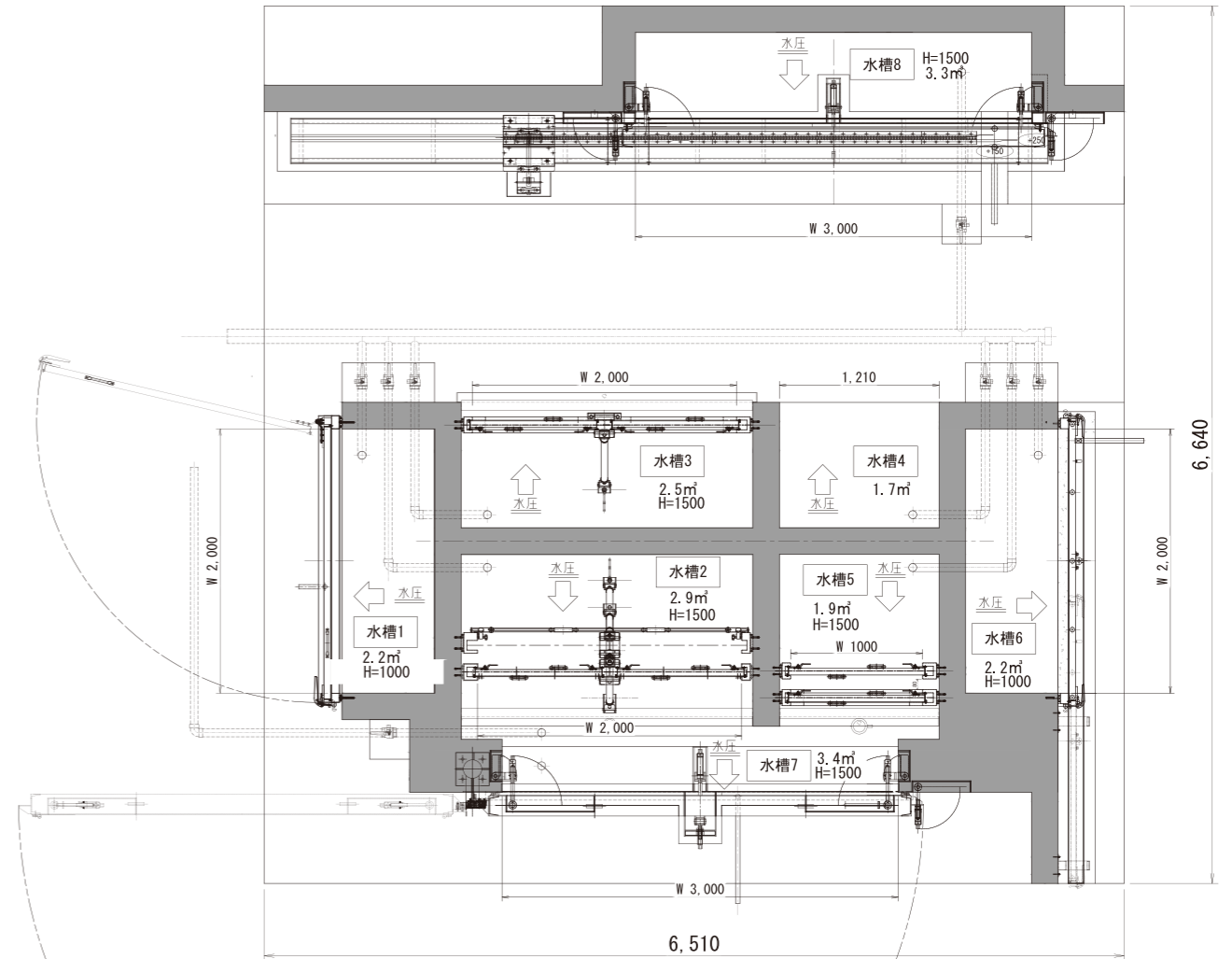
2. 新たな浸水防止性能試験場を

その後、各地で発生する大型台風・ゲリラ豪雨による高潮災害・河川の氾濫による浸水被害によって被害が増大し、浸水深も年々深くなっており、防水板の施工にあつてはお客様からの止水高さの設定も年々高くなってきています。

このような状況に即し、マシナリーでは以前からの浸水防止性能試験場(止水高さ1000mm)を更新し、水槽を8ヶ所開設し、

脱着式アルミ防水板7基、スイング式防水板2基、スライド式防水板2基、全11基を設置し、それぞれの止水高さを以前からの試験場より500mm高くし、止水高1500mmまでの漏水検査が可能な施設が完成しました。

新浸水防止性能試験場躯体図を(資料2)及び(写真3)(写真4)に示す。



(資料2)



(資料3)



(資料4)

3. 試験機仕様

1か所の水槽に型式の違った防水板を設置することにより、複数の防水板の漏水試験が可能となり、またパネルを使用し開口部を締め切ることにより、水槽の貯水量を減らすことが出来、

試験時間短縮にもつながった。

各水槽の試験機仕様を(表-1)試験機の写真を(写真5)~(写真13)に示す。

浸水防止性能試験場 試験機仕様

水槽	製品名	寸法 (mm)	写真
1	スイング式アルミ製防水板	W 2000XH 1000	5
2	脱着式アルミ製防水板 (2連X3段) 床フラットレール型	W 2000XH 1500	6
	脱着式アルミ製防水板 (2連X3段) 床直置き型	W 2000XH 1500	
	脱着式アルミ製防水板 (1連X1段) フリータイプ	W 2000XH 1000	7
3	脱着式アルミ製防水板 (2連X3段) 床溝掘込み型	W 2000XH 1500	8
4	フリーゾーン		9
5	脱着式アルミ製防水板 (1連X3段) 床直置き型	W 1000XH 1500	10
	脱着式アルミ製防水板 (1連X3段) 床溝掘込み型	W 1000XH 1500	
	脱着式アルミ製防水板 (1連X1段) フリータイプ	W 1000XH 1000	
6	スライド式アルミ製防水板	W 2000XH 1000	11
7	スイング式鋼防水板	W 3000XH 1500	12
8	スライド式鋼製防水板	W 3000XH 1500	13

(表-1)



(写真5)



(写真6)



(写真7)



(写真8)



(写真9)



(写真10)



(写真11)



(写真12)



(写真13)

4. 試験結果

今回浸水防止性能試験場を更新し、脱着式アルミ製防水板の止水高さを1500mmに、また新たにスイング式とスライド式防水板を設置した。

脱着式アルミ製防水板は500mm高くなったことにより、水圧の影響を受けパネルとパネルの間からの漏水量が増しはするが、

前回のものと比較しても浸水防止性能の等級は変わらない結果となった。

スイング式・スライド式防水板は逆圧仕様で、正圧仕様とくらべると厳しい設置状況ではあるが、浸水防水性能は良い結果を確認することが出来た。

各水槽での防水板の漏水量を(表-2)に示す。

浸水防止性能試験場 試験結果

水槽	製品名	寸法 (mm)	水位 (mm)	漏水量 (ℓ / (h・㎡))	浸水防止性能
1	スイング式アルミ製防水板	W 2000XH 1000	1000	0.05ℓ / (h・㎡)	WS-6 5等級
2	脱着式アルミ製防水板 (2連X3段) 床フラットレール型	W 2000XH 1500	1500	7.0ℓ / (h・㎡)	WS-4 3等級
	脱着式アルミ製防水板 (2連X2段) 床フラットレール型	W 2000XH 1000	1000	5.7ℓ / (h・㎡)	WS-4 3等級
	脱着式アルミ製防水板 (2連X3段) 床直置き型	W 2000XH 1500	1500	10.06ℓ / (h・㎡)	WS-3 2等級
	脱着式アルミ製防水板 (2連X2段) 床直置き型	W 2000XH 1000	1000	6.8ℓ / (h・㎡)	WS-4 3等級
	脱着式アルミ製防水板 (1連X1段) フリータイプ	W 2000XH 500	500	6.0ℓ / (h・㎡)	WS-4 3等級
3	脱着式アルミ製防水板 (2連X3段) 床溝掘込み型	W 2000XH 1500	1500	0.5ℓ / (h・㎡)	WS-6 5等級
	脱着式アルミ製防水板 (2連X2段) 床溝掘込み型	W 2000XH 1000	1000	0.46ℓ / (h・㎡)	WS-6 5等級
4	フリーゾーン				
5	脱着式アルミ製防水板 (1連X3段) 床直置き型	W 1000XH 1500	1500	12.4ℓ / (h・㎡)	WS-4 3等級
	脱着式アルミ製防水板 (1連X2段) 床直置き型	W 1000XH 1000	1000	4.68ℓ / (h・㎡)	WS-4 3等級
	脱着式アルミ製防水板 (1連X3段) 床溝掘込み型	W 1000XH 1500	1500	0.8ℓ / (h・㎡)	WS-6 5等級
	脱着式アルミ製防水板 (1連X2段) 床溝掘込み型	W 1000XH 1000	1000	0.5ℓ / (h・㎡)	WS-6 5等級
	脱着式アルミ製防水板 (1連X1段) フリータイプ	W 1000XH 1000	1000	12.18ℓ / (h・㎡)	WS-3 2等級
6	スライド式アルミ製防水板	W 2000XH 1000	1000	0.04ℓ / (h・㎡)	WS-6 5等級
7	スイング式鋼防水板	W 3000XH 1500	1500	0.31ℓ / (h・㎡)	WS-6 5等級
8	スライド式鋼製防水板	W 3000XH 1500	1500	0.14ℓ / (h・㎡)	WS-6 5等級

(表-2)

5. 終わりに

今回更新した浸水防止性能試験場での試験結果を参考に、それぞれの防水板において部材の改良、また新たな製品開発に取り組むうえで、より性能の高い製品を目指し「人と街を守る防水板」タウンガードが日本のあらゆる場所で災害対策に貢献できるよう努力してまいります。

筆者紹介



MORI Takashi
森 孝史
2015年入社
日工マシナリー(株)
営業部 課長

MEMO



編集後記

まずは、2024年1月1日に発生しました能登半島地震により犠牲となられた方々のご冥福をお祈りするとともに、被災された皆様に対しまして謹んでお見舞い申し上げます。

一日も早い皆様のご回復と被災地の復興を心よりお祈り致します。

土木関連製品であるアスファルトプラントやバッチャープラント、またショベルや仮設製品、環境製品等のメーカーである弊社は、被災地の復旧・復興に必ずや貢献できるものと信じ、これからも全力で支援してまいります。併せて、本技報にてご紹介致しました弊社の最新の技術・製品情報が、多くの皆様の様々な課題を解決する一助となることを願っております。

弊社では、ミッション(日々果たすべき使命)として「一歩先ゆくエンジニアリングから、社会基盤をアップデートする。」、またビジョン(実現したい未来)として「世界を、強くやさしい街に。」を掲げて日々活動しております。そのことを今一度胸に刻みつつ、私たちにできること、そしてやるべきことに精一杯取り組んでまいります。

最後になりましたが、この様な大変な中ではございますが、この度、弊社技報「日工テクニカルレポート」の第五号を発刊することができました。発刊にあたりまして、ご協力頂きました関係者の皆様方、並びにご多忙中にもかかわらず巻頭言をご執筆頂きました東京大学教授の野口様には、この場をお借りして厚く御礼申し上げます。

日工株式会社
会社情報



日工テクニカルレポート
第五号
令和6年4月発行
〈非売品〉

編集兼発行

日工株式会社 日工テクニカルレポート編集委員会
〒674-8585 兵庫県明石市大久保町江井島1013番地の1
TEL.078-947-3131(代)

印刷所

株式会社マテックス
〒651-0071 兵庫県神戸市中央区筒井町2丁目1-38
TEL.078-261-8484



営業品目

- ▶▶ アスファルトプラント
- ▶▶ コンクリートプラント
- ▶▶ 各種電子制御機器
- ▶▶ 容器包装リサイクルシステム
- ▶▶ 汚染土壌改良プラント
- ▶▶ パイプ枠組足場
- ▶▶ 各種仮設機材
- ▶▶ 破碎機
- ▶▶ スコップ
- ▶▶ リサイクルプラント
- ▶▶ ベルトコンベヤ
- ▶▶ 排水処理装置
- ▶▶ 建設副産物リサイクルシステム
- ▶▶ 設備用コンベヤシステム
- ▶▶ パイプサポート
- ▶▶ モバイルプラント
- ▶▶ ミキサショベル
- ▶▶ 防水板