



*n*

NIKKO  
TECHNICAL REPORT

2020

04

NO.001

NIKKO TECHNICAL REPORT NO.001



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

## NIKKO 100years History

- 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m<sup>2</sup>)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

# NIKKO TECHNICAL REPORT

2020.04

NO.001

「NIKKO  
TECHNICAL REPORT」  
創刊にあたって

取締役社長

辻 勝



私達、日工株式会社は昨年8月13日に創立100周年を迎えることができました。

1919年創立より苦難もあり、様々な壁を乗り越えてここまで成長できたのも、皆様のご支援とご指導の賜物と、心から感謝申し上げます。

新中期経営計画を2019年に策定スタートし2年目を迎え「nから始まる未来創造」のスローガンの基、新たな一歩を踏み出し、更に100年を望む企業として技術革新に邁進して参ります。

創業当時の弊社はショベル、スコップ、ツルハシといった土農工具の製造、販売が主体でしたが、現在はアスファルト合材製造プラント、生コンクリート製造プラント、ベルトコンベヤ、環境リサイクル装置、仮設材、水門、止水板、破碎機、制御盤、動力盤、自走式破碎機、等々の製品に展開しております。

メーカーの責務は「技術開発」であり製品開発で皆様のお役にたてることです。

長きに渡りお客様から要望され実現してきた技術の蓄積こそが私達の“宝”です。

中には研究開発した技術が製品に結び付かないケースも多々ありましたが、いつか醸成し、複合し、形になる時が来ると信じております。

アスファルトプラント、コンクリートプラントの中心技術である「混練」、「燃焼」、「搬送」、「制御」を活かし化学、食品市場の製造設備や、各種生産工場のゼロエミッションを実現する環境リサイクル設備へと展開しております。

これからの100年もメーカーとして開発を止めることなく、技術を発信して参りたいと思います。

広く世の中に役立つ技術を目指し続ける企業の証として、「日工テクニカルレポート」を発刊いたします。

もし、弊社の技術に関心がおありでしたら是非ともご連絡頂きたくお願い申し上げます。

03 …… 「NIKKO TECHNICAL REPORT」創刊にあたって  
取締役社長 辻 勝

巻頭言

05 …… 日工(株)創立100周年と私との共同研究について  
徳島大学 橋本 親典教授

論文

07 …… 3次元画像解析手法を用いた2軸強制練りミキサの流動解析とその定量化  
[出典]コンクリート工学年次論文集(CD-ROM), Vol.40, ROMBUNNo.1205, 2018/06/15  
竈谷 武 他

13 …… 自立燃焼型バイオマス炭化装置と微粉炭バーナの開発  
[出典]オリジナル  
今田 雄司 他

23 …… アスファルト合材プラントイノベーション(現代編)  
[出典]アスファルト合材, No.123, PP.18-23, 2017/07  
藤嶋 勘 他

29 …… 半水石膏およびII型無水石膏の製造システムの開発  
[出典]オリジナル  
蓬萊 秀人 他

47 …… 油汚染土壌に対する熱処理修復技術の応用  
[出典]地盤と建設, Vol.32, No.1, PP.87-95, 2014/12/26  
神尾 昌宏 他

57 …… 2軸強制練りミキサのブレード形状が超高強度コンクリートの練混ぜ時間の短縮化に与える影響  
[出典]コンクリート工学年次論文集(CD-ROM), Vol.31, ROMBUNNo.1267, 2009/06/15  
吉田 元昭 他

製品紹介

63 …… 新型アスファルトプラント VPⅢ(Value Pack Ⅲ)

65 …… Hyperミキサ

77 …… 自走式破碎機 MC100Ri

73 …… PETボトル選別機「PETRIS」

79 …… 小型ドラム式乾燥機「マルチドライヤー」

製造設備紹介

81 …… ドライヤ・タンクの自動溶接ライン

83 …… ファイバーレーザー切断加工機の導入

随想

87 …… 二酸化炭素  
蓬萊秀人

編集後記

91 …… 編集後記

# 日工(株)創立100周年と私との共同研究について

徳島大学大学院社会産業理工学研究部  
社会基盤デザイン系 構造・材料分野 教授  
橋本 親典(はしもと ちかのり)



日工(株)が、本年度で創立100周年を迎えられたこと、大変偉大なことである。私が聞いた話では、日工(株)のトンボのマークは、もともと、農機具のメーカーであったことが由来しており、その日工が100年を迎えるということは、その途中に大恐慌や戦争があり、大変なことである。私が勤務する徳島大学は、今年、75周年であり、工学部の前身の高等専門学校はあと数年で100年である。1世紀とは、非常に長い年数である。建設機械関係で、100年続いた会社は全国でそんなにはいないと思われる。

ところで、日工(株)と私の共同研究は、約25年近くになる。創立100年と比較すると1/4程度で短い、私の教員生活33年のうち約3/4の年数である。日工(株)との共同研究は、非常に長い年数続いてきたと思っている。もちろん、現在も進行中である。

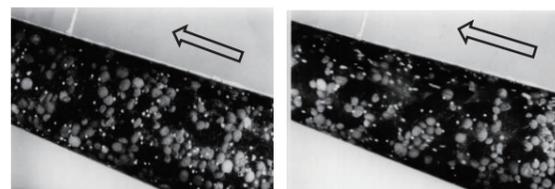
土木分野のコンクリートの研究は、大きく分けて、構造、材料、施工からなる。私の学位論文は、「フレッシュコンクリートの可視化モデルの開発」であり、フレッシュコンクリートを粗骨材相とモルタル相から成る固液2相流体と考え、フレッシュコンクリートの可視化モデルの開発に関する研究である。先の3分野のうち、施工に関する研究である。

“To see is to believe.(百聞は一見にしかず。)”とされているように、目で見ることができない流動現象を目視観察しようとする技術で、主として流体力学もしくはそれに関連の深い分野において発達してきた実験手法である。私が、博士課程の指導教員(岡村 甫 東京大学名誉教授)から与えられたテーマは、コンクリートの圧送性に関するものであった。岡村先生は、コンクリート構造が専門であった、しかしながら、東大のコンクリート研究室として、材料分野の研究を行う必要もあり、博士論文のテーマとして、材料と施工を合わせた「コンクリートの圧送性」が与えられた。

圧送性の中でも、管内閉塞の問題が未解明であったため、私は、圧送管を流動するコンクリートが閉塞する現象を対象とした。試行錯誤の結果、実際のコンクリートでない、コンクリートを可視化することを思いついた。その結果、フレッシュコンクリートの可視化モデルという試験方法を開発した。

写真-1は、テーパ管を流動するコンクリート中に発生する材料分離現象を撮影したものである。粗骨材粒子として人工軽量骨材粒子を、モルタルとして無色透明な吸水性高分子樹脂水溶液で置換した疑似コンクリートである。流動中のコンクリートの内部の粗骨材粒子とその周辺のモルタルの動きを可視化することを目的として開発した可視化モデルである。テーパ管出日付近に粗骨材のアーチングによる大粒径骨材の不規則な動きや微小振動を伴う流れが発生する。骨材粒子の一時的なかみ合せによってモルタル相の流路断面が減少する。その結果、モルタル相のトレーサ粒子の速度が速くなり、白い糸を引くような軌跡で写ることになる。

従来、ブラックボックスであったフレッシュコンクリート内部の力学的挙動、すなわち、流動中に発生する材料分離現象やコンクリートの流動機構を観察し、これらの知見に基づき、コンクリート工学的見地からコンクリート施工機械の高性能化を追求してきた。種々の施工機械を対象にしてきたが、30才前半から共同研究を継続してきたのは、2軸強制練りミキサのみである。



安定圧送状態

不安定圧送状態

写真-1 テーパ管を流動する可視化モデル

写真-2は、透明なアクリル樹脂で作製した2軸強制練りミキサのモデル内に可視化モデルを投入したものである。図-1は、可視化実験によって得られたミキサ内の流動機構を示す。この研究成果は、日工のミキサの開発に少なからず貢献したのではないかと自負している。

一方、2017年7月から、国土交通省発注のコンクリート工事において、一般の土木用コンクリートのスランプの積算基準が、8cmから12cmに変わった。筆者の研究室にある過去のコンクリート標準示方書を調べた限りにおいて、昭和31年土木学会制定コンクリート標準示方書本文の表中に「かなりマッシブなコンクリートのスランプの最大値7.5cm」との記載がある。ここから推測すると、昭和31年当時から積算基準はスランプ8cm前後であったと思われる、60年以上続いたものが変わることになる。日工(株)の創業100年に比較すると短い、戦後の高度成長期から平成に至るまでの間ずっとスランプ8cmと思うと、非常に長い時間である。このスランプ8cmが12cmに変わった。

これは、2016年3月に国土交通省の「コンクリート生産性向上検討協議会(会長:前川宏一横浜国立大学大学院教授)」において設置された「流動性を高めたコンクリートの活用検討委員会(委員長:筆者)」で「流動性を高めた現場打ちコンクリートの活用に関するガイドライン」(以後、「ガイドライン」と記す)が制定され、荷卸し時のスランプの参考値として12cmが示されたためである。

本ガイドラインの最終目標は、締固めの不要の高流動コンクリートの普及である。しかしながら、荷卸し時の目標スランプ8cmの発注が土木用コンクリートのこれまでの常識であったため、一足飛びにスランプの自由度を上げることは短期的な混乱を招きかねない。荷卸し時の目標スランプ8cmのままになってしまう恐れもある。そうならないように、設計時に目標スランプを定める際の荷卸し時の目標スランプの参考値を12cmとし、この参考値を国土交通省が通常のコンクリート工事の積算基準とし適正化した。現場での打込み時のスランプを確実に8cm以上に確保できることになる。

これにより、日常化されたスランプ変更の協議がほとんどなくなり、発注者、施工者ともに生産性が向上するとともに、適切なスランプで施工できることから、施工の生産性向上およびコンクリート構造物の品質向上につながるものと期待される。

前述したとおり、生産性向上に寄与する究極のコンクリートは、高流動コンクリートである。現場での締固めが不要になるということは、生コンの製造を含めコンクリート工全体が完全自動化になる。コンクリート工が情報化施工技術の1つとなり、生産性の問題のみならず、コンクリート工が昼間から夜間の施工になり、夏場の暑中コンクリートの問題も解消できる。

しかしながら、高流動コンクリートは、通常のコンクリートと異なり、セメントや混和材が多く高粉体量、かつ、化学混和剤量の添加量も増える配合である。一方、骨材事情はさらに悪化し、再生骨材が主流になる。このような状況では、今以上に高い練混ぜ性能を有するミキサが必要である。ビッグデータやAI等の技術革新と共に、高性能な2軸ミキサの開発に期待したい。

できれば、日工(株)の創業200年に貢献できる技術を期待したい。

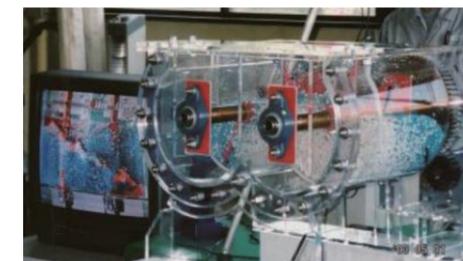


写真-2 可視化モデルを用いた2軸強制練りミキサの練混ぜ性能実験風景

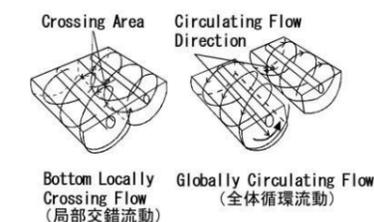


図-1 可視化実験によって得られたミキサ内に発生する2つの主要な流動機構

# 3次元画像解析手法を用いた 2軸強制練りミキサの流動解析とその定量化

Flow analysis and quantification of bi-axial forced-mixing type mixer using three-dimensional image analysis method

籠谷 武<sup>\*1</sup>・中島 翼<sup>\*2</sup>・橋本 親典<sup>\*3</sup>・渡邊 健<sup>\*4</sup>

**要旨:**近年、高強度・高流動コンクリートのような高粉体量の配合が多い。これらは、従来の低スランプコンクリートに比べ、粗骨材割合が少ないため、コンクリートミキサによる練混ぜ時間は長くなる傾向にある。2軸強制練りミキサの高性能化にはミキサ内のコンクリート流動を明らかにする必要がある。本研究では、フレッシュコンクリートの可視化実験による3次元画像解析手法を用い、ミキサのブレード回転方向および、ブレード傾斜角度の違いによるミキサ内モデルコンクリートの流動挙動を解析し、定量化した。

**キーワード:**2軸強制練りミキサ, 可視化実験, 3次元, 画像解析

## 1. はじめに

近年、高強度コンクリート、高流動コンクリート、超高強度モルタル等の数多くの高性能コンクリートが出現している。これらは構造物の設計や施工の概念を大きく変化させるだけでなく、配合設計や練混ぜ等の製造技術に対しても大きな影響を与える結果となった。これらのコンクリートは、超微粒子であるシリカフェームや高炉スラグ微粉末、フライアッシュなどの混和材を混合し、従来に比べ粉体量が多い。高粉体配合の高性能コンクリートは、普通コンクリートに比べ、材料本来の性能を発揮する状態まで練混ぜるのに時間を長くとる必要がある。例えば100N/mm<sup>2</sup>を超える超高強度コンクリートの練混ぜ時間は、通常120秒以上を必要とする。このため、レディーミクストコンクリート工場では、供給能力の低下が問題となっている。この原因は、高強度コンクリート配合が、高粉体量であり、かつ単位粗骨材量が850kg/m<sup>3</sup>前後で極端に粗骨材量が少ないことにより、粗骨材粒子群の回転・衝突による練混ぜが期待できないためである。そのため、高性能コンクリートの練混ぜ時間の短縮を可能とする2軸強制練りミキサの高性能化が要求されている。

これまで橋本ら<sup>1)</sup>は、2軸強制練りミキサのコンクリート練混ぜ機構の解明を目的とし、フレッシュコンクリートの可視化モデルを用いて、ミキサ内のコンクリートの挙動をビデオ画像で記録する試験方法を提案した。この手法を用いて、吉田ら<sup>2)</sup>は、ブレード形状の違いによる混合度を定量的に評価し、練混ぜ性能への影響を明らかにし、ミキサの性能向上へと役立てた。

本研究では、粉体量が多い高強度コンクリートに適したコンクリートミキサによる新たな練混ぜの可能性を追求すべく、可視化実験による3次元画像解析手法を用い、ブレードの回

転方向、ブレードの傾斜角度が、モデルコンクリートの流動に与える影響を解析し、定量化した。

## 2. 2軸強制練りミキサの流動形態

図-1に2軸強制練りミキサの練混ぜに寄与する2つの流動機構の概念を示す<sup>3)</sup>。1本のシャフト回りには、“らせん流動”が形成される。隣り合ったシャフトから逆位相に発生するらせん流動によりミキサ内を循環する“巨視的な練混ぜ”は「全体循環流動」と呼ばれ、投入された粒度が大きく異なる各種粉体材料を均一に混合する流れを形成する。2本のシャフト間において逆位相のらせん流動が交互に衝突し合うことにより形成する“微視的な練混ぜ”は「局部交錯流動」と呼ばれ、セメント粒子と水の接触頻度を高め、セメントの水和反応を活発にする作用を与える流れを形成する。

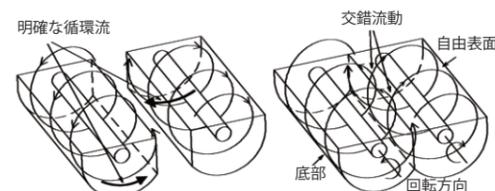


図-1 2軸強制練りミキサの流動形態<sup>3)</sup>

## 3. 2軸強制練りミキサのブレードの回転方向

2軸強制練りミキサの回転方向を図-2に示すように、外側から内側へ回転する方向を正回転、内側から外側へ回転する方向を逆回転と定義する。コンクリート分野での2軸強制練りミキサのブレード回転方向は、正回転方向である。その理由の一つにブレードとケーシング間への粗骨材の噛み込みの影響を緩和することが挙げられる。

一般的な練混ぜ量の場合、練混ぜ中の材料高さはミキサ軸中心より下に位置するため、ブレードがケーシングへ接近するときの粗骨材を噛み込むスペースを極力少なくできるようになっている。これを逆回転方向に回した場合、ブレードが粗骨材を運びながらケーシング中央へ進入するため、粗骨材を噛み込みやすくなるのである。

一方、化学や食品分野においては、ニーダ<sup>4)</sup>のように逆回転方向に回すミキサは存在する。ニーダとは2本の混合翼が互いに逆方向に回転し、混合物をせん断・圧縮・引き伸ばして練り混ぜる装置のことであり、主に粘性材料に使用される。しかし、噛み込みの懸念のある材料では一般的に使用されない。冒頭での説明のように近年の高強度コンクリートのように高粉体配合が増えており、これらは高粘性のモルタルをいかに早く練り混ぜられるかが重要であるため、ブレードの回転方向による練混ぜへの影響を解明することは重要であると考えられる。

## 4. 実験概要

### 4.1 使用ミキサ

本実験で用いたモデル2軸強制練りミキサの写真と諸元を写真-1、表-1に示す。実験に用いたモデル2軸強制練りミキサの容量は34.5ℓであり、公称2.25m<sup>3</sup>の実機ミキサの約1/65の縮尺モデルである。ミキサケーシング部は透明のアクリル樹脂製であり、ミキサケーシング部を固定している架台とモータ部に遮られている部分以外は、いずれの方向からも内部透視が可能である。ブレードは連続らせん形状で、複数のアームによりシャフトに固定されている。また、ミキサ軸回転速度はモデルコンクリートが実際のコンクリートの流動に近くなるように設定し、実験を行った。

### 4.2 使用材料

実験では、高粘性コンクリートを1相系の粘性流体と仮定し、モデルコンクリートとして無色透明である高吸水性高分子樹脂水溶液(密度1.0g/cm<sup>3</sup>)を用いた。モデルコンクリートの粘性は、高分子樹脂の添加量によって変化させることが可能である。モデルフレッシュコンクリートの粘性は、ミニスランプフローを用いて評価し、添加量4.0g/ℓでフロー値250mmで一定とした。また、流動の挙動を追跡する着目トレーサー粒子(以降、トレーサー粒子と称する)として、直径20mmの高弾性樹脂球を用いた。

### 4.3 実験パラメータ

#### 4.3.1 ブレードの回転方向

モデルミキサブレード構成と回転方向を図-3に示す。パラメータは正回転、逆回転の2パターンとした。正回転の

ブレード構成で逆回転させると、材料が逆方向に送られ、ケーシング内を循環しないため、逆回転時は、シャフトを左右入替えて、ブレードが材料を循環させるように変更した。また、本実験におけるもう一つのパラメータであるブレードの傾斜角度は0度とした。

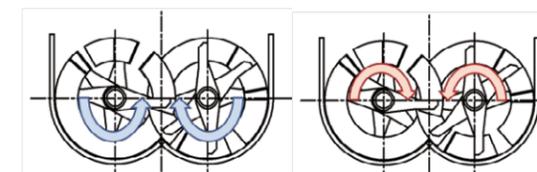


図-2 ブレードの回転方向

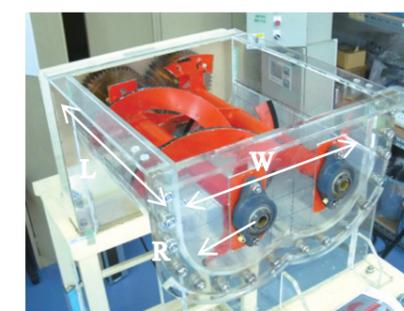
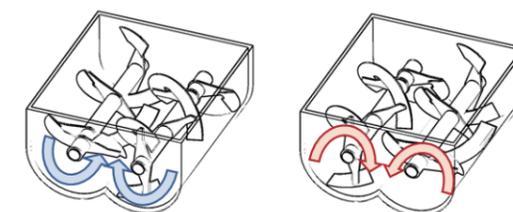


写真-1 モデルミキサの容器形状

表-1 モデルミキサに関する諸元

練混ぜ容量	(ℓ)	34.5
ケーシング長さ	L (mm)	474
ケーシング幅	W (mm)	536
ケーシング半径	R (mm)	135
モータ動力	P (kW)	0.2
軸回転速度	N (min <sup>-1</sup> )	37.5



左:正回転, 右:逆回転  
図-3 回転方向および形状

#### 4.3.2 ミキサブレード傾斜角度

傾斜ブレード取付図を図-4に示す。ブレードは、アーム先端に取り付けられる。通常のブレードは図の0度の配置のものである。本実験では、このブレード前面に傾斜ブレードを取付け、傾斜角度を0度(傾斜ブレードなし)、15度、35度で変化させた。また、回転方向は、正回転で行った。

\*1 日工(株) 産業機械技術センター(正会員)

\*2 徳島大学大学院 先端技術科学教育部 知的力学システム工学専攻 博士前期課程 (学生会員)

\*3 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部理工学域 社会基盤デザイン系 教授 工博(正会員)

\*4 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部理工学域 社会基盤デザイン系 准教授 博(工)(正会員)

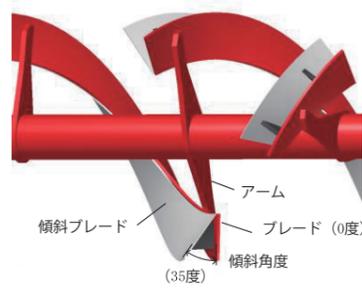


図-4 傾斜ブレード取付図

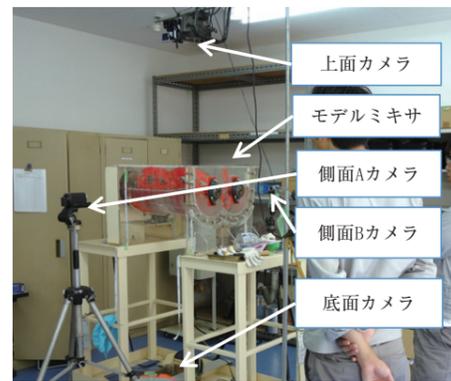


写真-2 可視化試験風景

4.4 実験方法

実験および、解析手順を以下に示す。また、写真-2に試験風景を示す。

- 図-5に示すように、トレーサー粒子の位置座標(x, y, z)の読み取りのため、ケーシングに黒線にて50mm単位でスリットを描き、10mm単位で読み取れるよう補助メモリを記した。ケーシング底面の画面中心に原点をとり、x-y平面とした。側面画面にはz軸を縦方向にとり、x-z平面とした。ケーシングは曲面のため、50mmのスリット間隔はビデオ画面では長さが異なる。y軸とz軸の位置座標はこの曲面を考慮して修正した。
- 所定の粘性に調整したモデルフレッシュコンクリート34.5ℓをモデルミキサ内にゆっくりと投入した。
- 5色のトレーサー粒子をミキサ内モデルコンクリート表層の中央と四隅に計5箇所投入した。
- 撮影用ビデオカメラをモデルミキサの上面、底面、両側面の4箇所から撮影する位置に固定した。
- ミキサを所定の回転速度で回転させ、数分の間、トレーサー粒子の挙動をビデオ撮影した。
- 画像処理方法は、回転開始後に回転速度が一定になった後、画像に出現する5色の各トレーサー粒子を適当な時間から10秒間、0.4秒間隔で計25点の(x, y, z)座標を計測した。取得総数は25点×5色=125点となる。5色の各トレーサー粒子軌道から流動の特性を確認した。また、座標取得総数を倍の250点に増やした場合も同じ傾向になった。そのため、取得数125点は十分な点数と判断した。
- 図-6に示すように、取得したトレーサー粒子の単位時間あたりの(x, y, z)座標の移動距離から3次元の速度ベクトル(Vx, Vy, Vz)発生分布を求めた。また、連続する2つの速度ベクトルのなす角度θを内積によって求め、その発生分布を求めた。

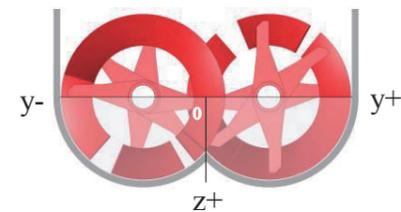
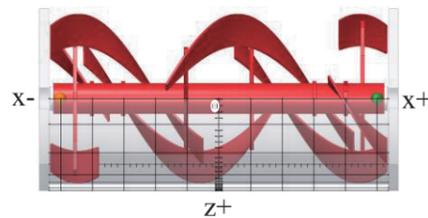
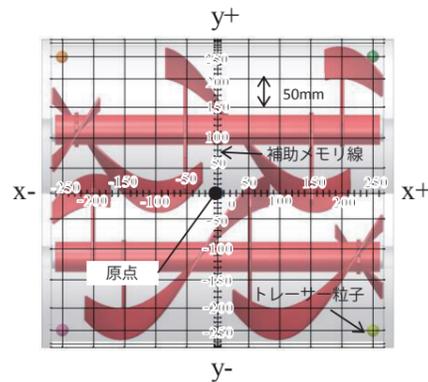


図-5 モデルミキサ位置座標

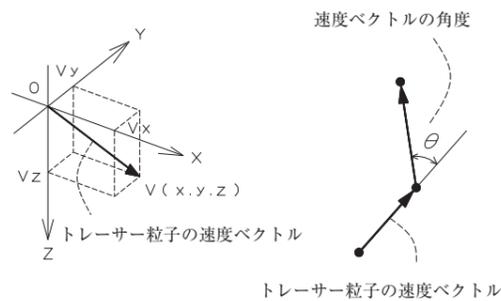


図-6 速度ベクトルの各成分方向および角度

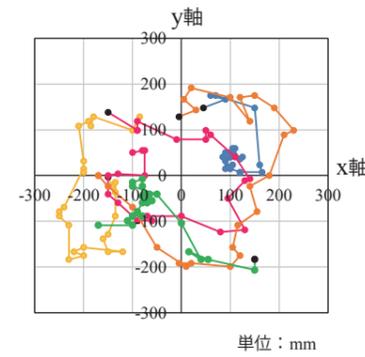


図-7 正回転のトレーサー粒子分布状況

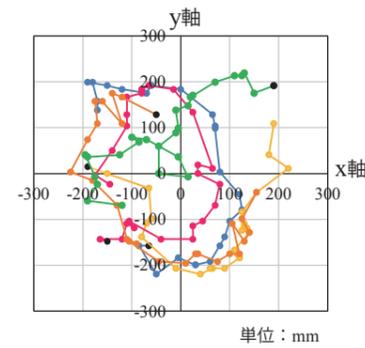
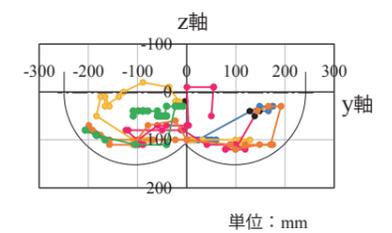
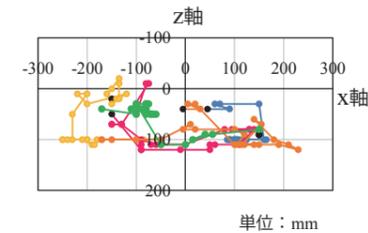


図-8 正回転のトレーサー粒子分布状況

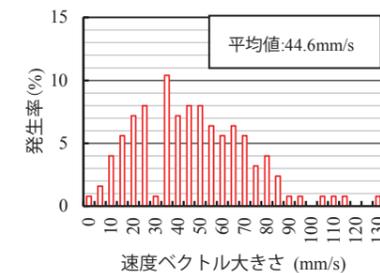
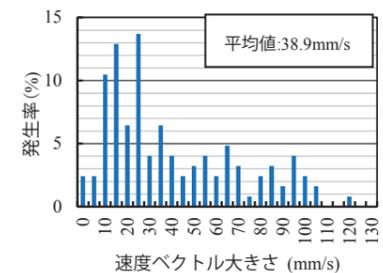
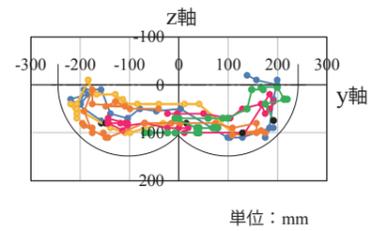
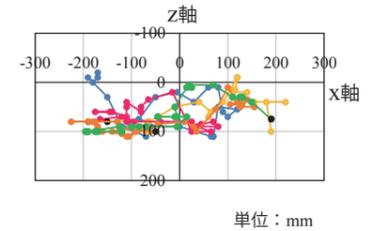


図-9 正回転(左)、逆回転(右)の速度ベクトルVxyzの分布状況

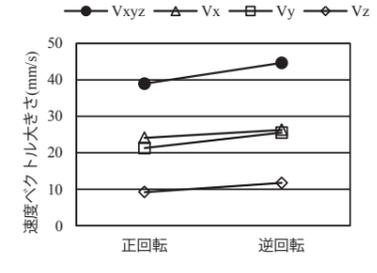


図-10 正回転、逆回転の速度ベクトル平均値

5. 実験結果および考察

5.1 回転方向の違いによる影響

正回転の画像解析から得られた各トレーサー粒子のx-y平面、x-z平面、y-z平面の分布状況を図-7に示す。また、計測開始点を黒点で示す。

x-y平面の分布状況からは、各トレーサー粒子は時計まわりに循環していることが確認された。トレーサー粒子はケーシング外周側を循環する粒子と途中でケーシング中央の軸間側へ流れていく粒子とに別れた。x-z平面、y-z平面の分布状況からは、各トレーサー粒子が、z方向に上下に動きながら画面内を一周していることが確認された。x-y平面で、ブレードのエネルギーにより発生したケーシング内を一周する流動は、全体循環流動を表していると考えられ

る。また、ケーシング中央でトレーサー粒子のx軸、y軸、z軸方向への移動が混在しているのは、軸間のブレードによるエネルギーがこの領域でぶつかりあっているためであり、この流動は局部交錯流動を表していると考えられる。

逆回転のトレーサー粒子のx-y平面、x-z平面、y-z平面の分布状況を図-8に示す。逆回転は、正回転と比較した場合、x-y平面で、ケーシング中央を通過するトレーサー粒子が多く確認された。また、ケーシング外周端まで流れるトレーサー粒子は少なく、x軸方向の移動間隔が逆回転では狭くなっている。つまりx軸方向への流動が減っている。また、x-z平面、y-z平面から確認できるように、ケーシング側面へ材料を持ち上げる流動が強まるため、y軸、z軸方向へ流れる流動が多くなっていることが確認された。

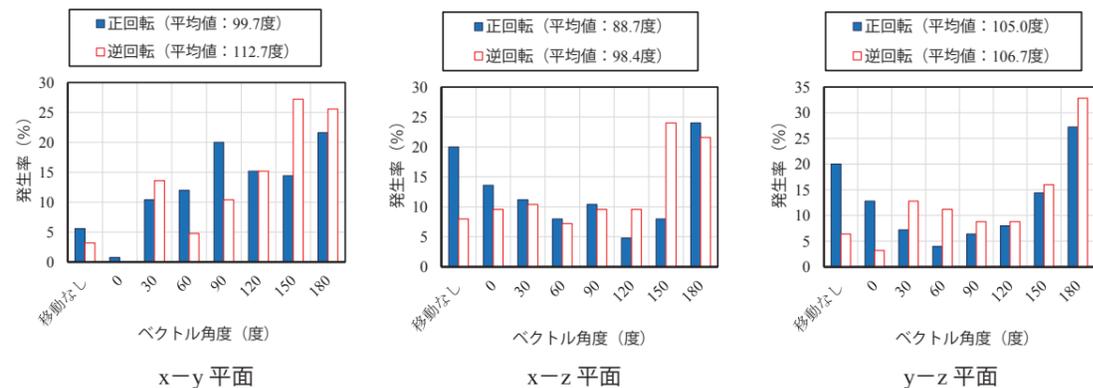


図-11 ベクトル角度θの分布状況

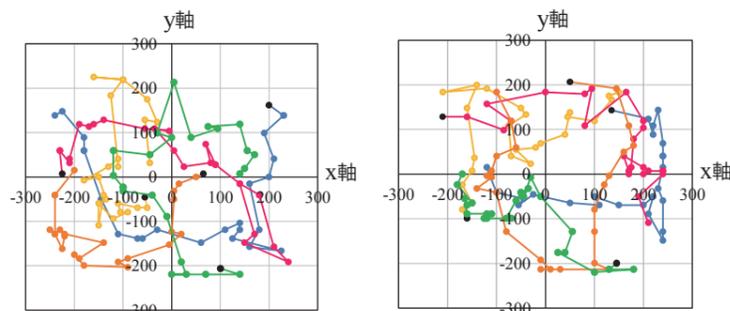


図-12 傾斜15度(左), 傾斜35度(右)のトレーサー粒子分布状況

次に、正回転と逆回転で得られた速度ベクトル $V_{xyz}$ に関する発生率を図-9に示す。また、得られた速度ベクトル $V_{xyz}$ ,  $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$ の平均値を図-10に示す。正回転の速度分布のピークは、10mm/s~25mm/sと85mm/s~100mm/sに二極化している。逆回転時は35mm/sに集中する一極型の正規分布が確認された。また、平均速度は、正回転が38.9mm/sに対し、逆回転は44.6mm/sと大きかった。これは、逆回転時の $V_y$ ,  $V_z$ が増加したためと考えられる。速度分布がより広範囲に発生している方が、様々な速度が存在し、コンクリートを効率よく練り混ぜることができる。よって、逆回転より正回転の方が練混ぜには有効であると考えられる。

また、連続する2つの速度ベクトルのなす角度θの正回転、逆回転のx-y平面、x-z平面、y-z平面での発生分布を図-11に示す。すべての平面において、正回転より逆回転の方がベクトル角度θが大きい値の発生率が大きくなることが確認できた。ベクトル角度θが大きくなるほど、流動による位置の変化が大きいためと考えられる。これは、正回転より逆回転の方が、2つの軸が回転することによって発生する回転エネルギーをコンクリートの流れにうまく伝達できていることを意味する。正回転の効率の良い練混ぜと逆回転の回転エネルギーの伝達とは、相反していることが明

らかになった。

この理由は以下のように考えられる。

x-y方向は、軸回転方向が異なっても循環方向が逆になるだけで基本的にエネルギーとしては大きな差がない。一方、上下方向のエネルギーの伝達は、回転方向により軸側になるか外側になるかで、大きな違いになったと考えられる。

今後、正回転と逆回転との違いは、実際のコンクリートミキサーを用いた種々の配合のコンクリートの練混ぜによって検討していきたいと考えている。

### 5.2 ブレード傾斜角度の違いによる影響

ブレード傾斜15度、傾斜35度の画像解析から得られた各トレーサー粒子のx-y平面の分布状況を図-12に示す。傾斜35度の分布状況からは、各トレーサー粒子は、傾斜0度の場合と同様に、時計周りにミキサー内を循環しており、画面端に沿って進む粒子と、途中でミキサー中心方向へ進む粒子とに別れた。また、傾斜0度では流動に追従できず、途中その位置に留りやすかったトレーサー粒子が確認されたのに対し、傾斜15度、35度では、その現象が確認されなかった。これは、ミキサー内の流動が強くなり、トレーサー粒子がその流れに追従しやすくなったためと考えられる。

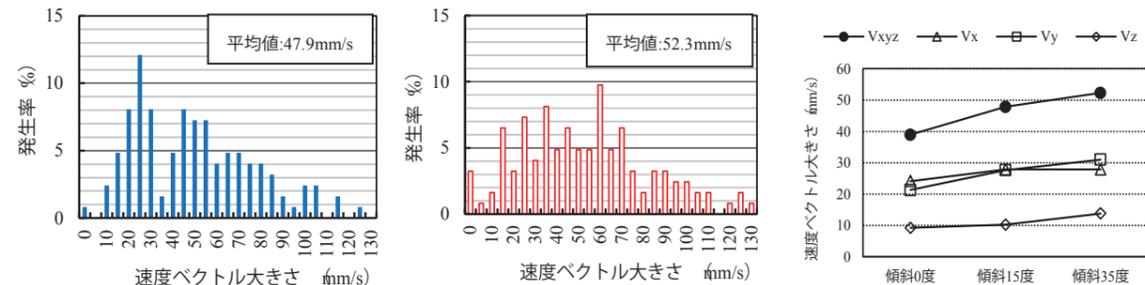


図-13 傾斜15度(左), 傾斜35度(右)の速度 $V_{xyz}$ の分布状況

図-14 傾斜角度ごとの速度ベクトル平均値

ブレード傾斜0度、15度、35度から得られた速度ベクトルの速度 $V_{xyz}$ に関する発生率を図-13に示す。傾斜0度(図-9 正回転(左)参照)に比べて、傾斜15度では、20~55mm/sの発生率が増加し、傾斜35度では、40~70mm/sの発生率が増加している。このように、0度、15度、35度の範囲では、ブレードの傾斜角度が大きくなるほど、速度ベクトルの発生率は最も高い位置が大きい方にシフトした。

また、得られた速度ベクトル $V_{xyz}$ ,  $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$ の平均値を図-14に示す。傾斜0度の平均速度が38.9mm/sに対して、傾斜15度で47.9mm/s、傾斜35度では、52.3mm/sに増加していた。傾斜0度と傾斜35度の( $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$ )それぞれの平均速度の増加率を比較すると、 $V_x$ が15.4%に対し、 $V_y$ が45.7%、 $V_z$ が50.0%となり、 $V_x$ 以上に $V_y$ ,  $V_z$ の上昇に影響を与えていることが確認された。

以上の結果から、ブレード傾斜15度、35度に変更することによって、軸回転方向の速度ベクトル $V_y$ ,  $V_z$ が増加し、流動全体の平均速度が増加したことを確認した。これは羽根を傾斜させることにより、羽根表面から裏側にかけて流れ込むモデルコンクリートの影響によるものと考えられるが、詳細な原因はまだ解明できていない。また、この影響により、ミキサー内全体での材料の動きが活発になり、練混ぜ性能の向上につながることも予見されるが、実際のフレッシュコンクリート練混ぜ時への影響に関しては、今後の検討課題とする。

### 6. まとめ

本研究は、コンクリート用2軸強制練りミキサーにてブレード回転方向と傾斜角度の違いが、コンクリートの流動に与える影響を、可視化実験にて3次元画像解析手法を用い、解析・定量化を行った。本研究の結果、以下のことが確認できた。

- 1) 1相系流体を用い、トレーサー粒子を3次元(x, y, z)座標でとらえ、その分布状況と速度ベクトルの大きさ、角度を解析することにより、ミキサー内の流動挙動をとらえ、定量的に評価することができた。
- 2) 正回転と逆回転を比較した場合、トレーサー粒子の分布状況および、速度ベクトルの大きさ、角度の分布傾向

からミキサー内全体で異なる流動特性を発生させることを確認した。

- 3) ブレード傾斜角度を0度、15度、35度に傾斜させることで、トレーサー粒子の平均速度は増加する傾向にあり、特にy軸、z軸方向の増加割合が大きくなった。

### 参考文献

- 1) 橋本 親典, 平井 秀幸, 辻 幸和, 田村 真: 2軸強制練りミキサー内のコンクリートの練混ぜ機構の可視化, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.1, pp.1037-1041, 1993
- 2) 吉田 元昭, 橋本 親典, 渡邊 健, 水口 裕之: 2軸強制練りミキサーのブレード形状が超高強度コンクリートの練混ぜ時間の短縮化に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1639-1644, 2009
- 3) 橋本 親典, 辻 幸和, 杉山 隆文: 練混ぜ時間が2軸強制練りミキサーの練混ぜ性能に与える影響, セメント・コンクリート論文集, No.51, pp.582-587, 1997.1
- 4) 日本粉体工業協会編 編集委員長 矢野 武夫: 混合練技術, 日刊工業新聞社発行, 6.3.3双腕形ニーダ, p198, 1980

### 出典

「籠谷武(日工), 中島翼(徳島大), 橋本親典(徳島大), 渡邊健(徳島大), 『3次元画像解析手法を用いた2軸強制練りミキサーの流動解析とその定量化』, コンクリート工学年次論文集(CD-ROM), Vol.40, ROMBUNNo.1205, 2018/06/15, (公社)日本コンクリート工学会」より許諾を得て転載。

### 筆者紹介



KAGOTANI Takeshi  
籠谷 武  
博士(工学)  
2004年入社  
開発部

# 自立燃焼型バイオマス炭化装置と微粉炭バーナの開発

Development of Self-sustaining Combustion Type Biomass Carbonizer and Pulverized Charcoal Burner

今田 雄司・北野 裕樹・姫路 佳孝・宗像 元・宇山 伸宏・木下 亮

KONTA Yuji, KITANO Yuuki, HIMEJI Yoshitaka, MUNAKATA Hajime, UYAMA Nobuhiro, KISHITA Ryo

日工株式会社 開発部 開発1課

## 概要

日本での温室効果ガスの削減中期目標は、2013年を水準として2030年には26%の削減を掲げている。環境省の温室効果ガス排出量(2018年度)調査では、前年度より3.6%の削減、2013年度の総排出量と比べて11.8%と目標に向かって着実に温室効果ガスの削減に取り組んでいる。今後もこれらを継続していくことで、目標削減数値に到達することは予想できる。しかし、日本のエネルギー自給率は2016年度で8.3%と非常に低い値になっている。今でも国内のエネルギー構成割合の半分以上は石油と石炭で占めており、化石燃料への依存度が高い状態である。そのため、温室効果ガスを削減できる技術の導入を更に積極的に進めていくことが必要である。

本開発では、建設業界の中で最も多くの温室効果ガスを排出しているアスファルトプラントでの温室効果ガスの削減に注目し、木質バイオマスを利用した炭化炉と微粉炭バーナの開発を行った。炭化炉は炭化する木質原料から発生する可燃性ガスを熱源として使用し、化石燃料を使用せずに炭化できる自立燃焼型炭化炉の開発を行った。また、アスファルトプラントでカーボンニュートラルを実践するための微粉炭バーナの開発も行ったので報告する。

## 1. 緒言

わが国は、戦後の高度経済成長によりエネルギー需要が拡大し、それに比例して化石燃料の使用量と二酸化炭素(以下、CO<sub>2</sub>)の排出量が増大していった。

また、国内で生産できる石炭からより安価で扱いやすい石油への燃料転換が急速に進み、海外から石油が大量に輸入されるようになった。このことから、1960年には石炭や水力などの国内天然資源によって58.1%あったエネルギー自給率が1970年には15.3%に減少している。その後、原子力発電の導入によりエネルギー自給率は2010年に20.2%まで回復したものの、東北大地震の影響を受けて原子力発電が全停止したことから、2014年には6.4%まで落ち込んでしまった。以降、徐々に原子力発電の再稼働が進んだことと、固定価格買い取り制度による再生可能エネルギーの普及促進により、2016年にはエネルギー自給率が8.3%までに回復している。

1997年の京都議定書では、締約国がCO<sub>2</sub>排出量削減目標を掲げ、CO<sub>2</sub>排出量を削減するための新しい技術の開発や制度の導入に取り組んできた。さらに、2015年のパリ協定では、多くの参加国がCO<sub>2</sub>の排出量削減に関してより具体的な目標を掲げ計画的に取り組んで行くことが約束された。

本研究は、再生可能エネルギーの中でもバイオマスの有効利用に注目している。これらの利用技術の中で、木材チッ

プを燃料として直接燃焼させて利用する熱風発生装置などが知られている。当社は、2013年にバイオマス固形燃料システムとしてロータリーキルンで木材チップなどの固形燃料を燃焼させ、生成した熱風をアスファルトプラント(以下、AP)の熱源として有効利用する装置の開発を行っている<sup>1)</sup>。さらに、2015年には木材チップをロータリーキルンで燃焼させ、熱風とマイクロ波によるハイブリッド型のアスベスト無害化装置の加熱実証試験も行っている<sup>2)</sup>。他には、木材チップを燃焼させることで生成する熱風をアスファルトプラントのみならず、バイオマス業界や建設業界などの他分野において、乾燥や加熱に利用する実証試験も行っている。

本研究では、炭化装置と微粉炭バーナの開発を行う。炭化装置は、これから木質バイオマスの利用が盛んになると発生量が多くなる土場パーク(間伐材の樹皮が雨や雪に晒される土場に不定期間放置され、高含水率で土の混入がある)、繁殖力が旺盛で伐採しても用途がない竹、そして一般的な木材チップを炭化実証試験の対象とする。

微粉炭バーナは、炭化装置を用いてこれらの木質バイオマスから製造した炭化物を燃料として扱うことが前提である。しかしながら、これらの木質バイオマスは流通量や調達コストなど極めて不安定な側面がある。したがって、比較的発生量が安定している一般廃棄物(家庭からのごみなど)から製造した炭化燃料を用いて燃焼テストを実施する。

表2-1 使用した木質材料の物性値<sup>3)</sup>

材料名	灰分 wt%(d.b.)	元素分析[wt%(d.b.)]				含水率 wt%(w.b.)
		C	H	N	O	
土場パーク	1.5	49.6	5.7	0.50	42.60	50±10
木材チップ	0.6	51.3	6.4	0.09	41.51	40±10
竹チップ	0.8	49.7	6.2	0.11	43.09	10±2



写真2-1 土場パーク(破碎後)



写真2-2 木材チップ



写真2-3 竹チップ



写真2-4 土場パーク(破碎前)

この炭化燃料は、製造過程で脱塩処理をする工程があるため、含水率が約30%と高くなる。この含水率は通年で安定しているが、これらの水分の影響により団粒の生成や付着の成長など極めてハンドリング性が悪く、燃焼し難い燃料である。それゆえ、この一般廃棄物由来の炭化燃料の有効性を実証することができれば、木質バイオマスから製造した炭化燃料の燃焼は十分可能であり、本研究で開発する微粉炭バーナの適用範囲が飛躍的に広がるものと考えられる。

## 2. 実験で用いた木質材料

### 2.1 木質材料の種類と元素分析

最初に今後本装置で取り扱う予定の原料、土場パーク、木材チップ、竹チップの木質材料3種類<sup>3)</sup>(写真2-1、写真2-2、写真2-3)を用いてそれぞれの元素分析を行う。土

場パークと木材チップは兵庫県赤穂市より、竹チップは淡路島の業者より購入した。最初に含水率を比較すると、土場パークが53.8wt%、木材チップが49.1wt%、竹チップが11.0wt%であった。土場パークと木材チップは、表2-1に示すように、一般的な原木の含水率を示した。竹チップは燃料用なので低含水率で安定している。

次に、それぞれの窒素含有割合を比較する。木材チップ0.09wt%、竹チップは0.11wt%の値を示しているのに対し、土場パークは0.5wt%で約5.5倍の量含有している。木質中の窒素は、木材の種類や季節、山林での生育状況により窒素含有量が変化する。特にパークはこれらの影響を受け易く、かつ、土場パークの場合には長期間放置するため、(写真2-4)多種類の木材パークが混在する。そのため土場パークを使用するときには窒素の含有割合が変わる可能性がある。

表2-2 TG分析条件

項目	条件
測定雰囲気	窒素雰囲気
昇温速度	10°C/min
測定温度	常温~1000°C



写真2-5 熱重量分析計

最後に、表2-1に示したそれぞれの灰分を比較する。木材チップ0.6wt%、竹チップ0.8wt%と0.2wt%の差に対して土場バーク1.5wt%の灰分は木材チップ、竹チップと比較すると1.9~2.5倍と多く含有している。この土場バークは、原木を破碎してチップとバークに分別しているため、放置することなくフレコンに投入している。よって、地面からの土や砂の付着が少ない状態の材料である。実際の利用時に土場バークは、雨や雪で高含水になり土や砂が付着している状況であることが想定される。

今後、木質原料を取り扱う中で、灰分が10wt%以上含有する原料が発生する可能性も考慮しておく必要がある。これらを燃焼させるときには灰分が多く発生するため、装置での灰量バランスの検討が必要である。

### 2.1 木質材料の熱重量分析<sup>3)</sup>

炭化装置で使用する木質材料の熱重量分析(写真2-5以下、TG分析)を行った。この分析計はプログラミングされた昇温速度に従って材料を昇温し、その重量変化を連続的に測定する分析装置である。

最初に、木質材料の主な構成成分であるセルロース、ヘミセルロース(ヘミセルロースの中で量が多いのがキシランであるためTG曲線はキシランでヘミセルロースのTG曲線を示す)、リグニンについて分析測定を行う。この時の測定条件を表2-2に、測定結果を図2-6に示す。木質の主な構成成分であるセルロース、ヘミセルロース、リグニンのTG曲線と実験対象である木質材料のTG曲線とを比較すると、リグニン、ヘミセルロースは200°C付近から最初の重量変化が始まっている。これは、熱分解が開始した温度である。また、400°C

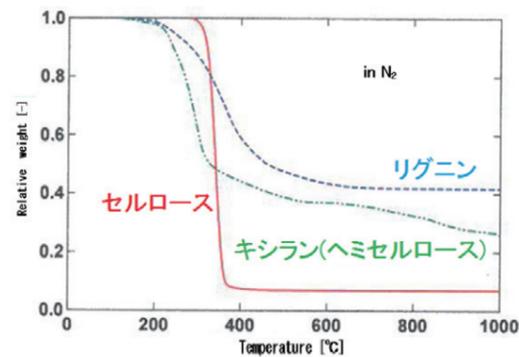


図2-6 木質成分のTG分析結果

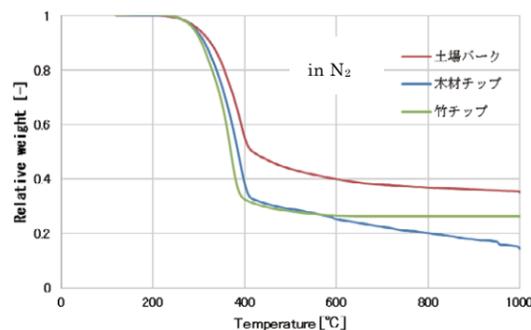


図2-7 使用する木質材料のTG分析結果

付近からの重量減少がセルロースと比較すると緩やかになっている。一方、セルロースは300°C付近から分解を開始するが、温度帯が小さい範囲で急激に重量減少し、セルロースは380°C、リグニンは600°C付近から重量変化がほとんど起こらないのに対し、ヘミセルロースは600°C以上の高温でも緩やかに重量減少が起こっている。

次に本装置で使用する木質材料のTG分析結果を示す。測定条件は、外熱式キルンを想定し表2-2の条件で測定を行った。これらの結果を図2-7に示す。

土場バークは、250~300°Cの範囲では緩やかに重量が減少している。また300~400°C付近でも急激に重量が減少している。400°C以上の温度では重量減少は緩やかに進行している。図2-6と比較すると、リグニンとヘミセルロースによる影響が強いことが確認できる。

木材チップは、300~400°Cで急激に重量が減少している。そして、400°C以上では重量減少は緩やかに進行している。図2-6と比較すると、セルロースとヘミセルロースの影響が確認できる。

竹チップは300°C付近で熱分解が開始し、350°C付近では急激な重量減少が起こり、400°C以上では重量減少が少なくなっている。図2-6と比較するとセルロースのように300~400°C付近で急激な重量減少が見られるためセルロース成分による影響が強いことが確認できる。

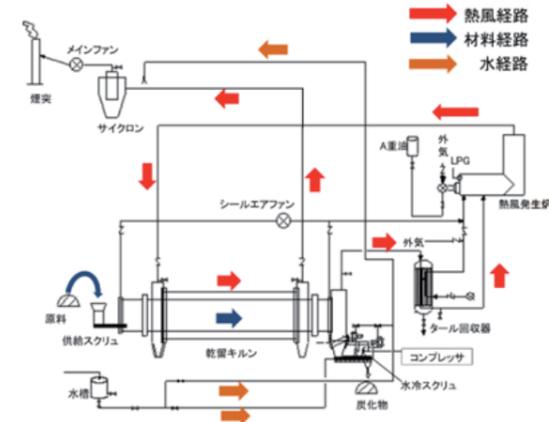


図3-1 炭化装置機器フロー図

このように木質の主な構成成分であるセルロース、ヘミセルロース、リグニンのTG曲線と実験対象である木質材料のTG曲線を比較すると、土場バークは400°C付近において減量率が約50%であるのに対して、木材チップと竹チップの減量率は約70%であることから土場バークの木ガス発生速度は他の2つの材料に比べて遅いことがわかる。一方、木材チップと竹チップはガス量が多く、土場バークに比べてガス化速度も速いことが確認できる。このように、材料のTG分析曲線から材料の熱分解温度特性や主成分を推測することができ、加えて、材料に適した炭化装置の運用を構築することができる。このようにTG分析結果より、炭化物の対象としている木質材料を3種類比較し、それぞれの特徴を把握することができた。

本炭化試験では、バイオマス発電では利用することが困難であり、廃棄物として扱いを受ける可能性が考えられる土場バークで試験を行う。炭化装置のフロー図を図3-1に示す。

### 3. 自立燃焼型バイオマス炭化装置と炭化試験方法

#### 3.1 自立燃焼型バイオマス炭化装置<sup>4)</sup>

##### 3.1.1 乾留キルン

本設備の外熱式乾留キルン(写真3-2)は、外形1000mm、全長7400mmで、熱風と熱交換する有効部分の長さは4000mmである。熱交換は熱風の流れと材料の流れが同じ方向に進む並流方式(パラレルフロー方式)を採用した。熱風は乾留キルンの外筒に850°Cで入り、600°Cで排気される。鋼板を介して伝熱した熱により材料が加熱され、約230°Cから木質ガスが発生し始める。キルン内部には攪拌羽根を取付けることで材料を適度に切り返し、熱交換効率を高めている。また、本試験装置では、キルンの内部に材料温度計を設置し、内部の材料炭化温度を監視しながら、安定した品質で炭化の温度を制御できるようにしている。加えて、乾留キルンの場合には、内部への侵入空気を完全に遮断しなければならないため、シール構造は特殊なものを本試験装置用に開発した。



写真3-2 乾留キルン



写真3-3 熱風発生炉

##### 3.1.2 タール回収器

乾留キルンから発生する木質ガス(可燃性ガス)にはタール分が含まれている。これらのタールをそのまま燃やし熱源にすることもできるが、必要な熱量分のみ燃焼させ余剰分をタール回収器で取除き、タール燃料として利用ができる構造にしている。本タール回収器は異物の通過、付着、メンテナンス性を考慮しチューブ式の多管熱交換器を採用している。熱交換器の放熱側は入口ガス温度550°C、出口ガス温度300°Cで排気されて熱風発生炉内に入り熱源となる。受熱側は20°Cの外気を300°Cの予熱空気として炉内に導入することで廃熱を有効利用している。一方、タールは下部より排出されて燃料として使用することができる。

##### 3.1.3 熱風発生炉

熱風発生炉(写真3-3)は外形1550mm、全長L2500mm(排ガスが滞留する部分)で構成し、助燃バーナの最大出力は490kW(重油49L/h)で設計している。助燃バーナは燃焼室の中心に設置し、木質ガスが流入するとその熱量により使用燃焼量が低くなるため、燃焼利用範囲を広くできる2流体噴霧バーナを採用している。このバーナは、最終的に消火され、

LPGバーナで種火運転を行う。そして、熱風発生炉で供給できる熱量範囲を1:36まで広げて対応できるようにしている(助燃バーナとLGPバーナを組み合わせて使用)。また、木ガスは円筒型燃焼室の接続方向に沿って炉内に入り、旋回流となって燃焼空気と混合し完全燃焼できる構造にしている。

### 3.1.4 水冷スクリュ

乾留キルンから排出された炭化燃料は無酸素状態の550℃で炭化している。この温度を維持したまま大気雰囲気中に晒すと容易に発火する。この発火を防止するため炭化燃料に直接水を噴霧し、調湿しながら排出する。この方法により、発火防止と自然発火を回避し炭化燃料を安全に貯蔵することが可能である。水量は任意に調整ができ、本試験では、排出するときの含水率を50%とし、炭化燃料の安全を確保している。

### 3.2 炭化炉試験方法

本試験に使用する材料は事前にラボテストで管状炉(写真3-2-1)を用いて炭化試験を行った。バーナの燃焼で求められる炭化燃料は、着火し易い固体燃料であることが求められる。そのため、炭化燃料に対する揮発成分割合が20wt%~30wt%で残存している炭化物が求められる。事前テストで炭化目標温度を450℃に設定すれば表3-2-1の物性値の炭化燃料ができることを確認した。本炭化炉試験は、事前テストと同等の物性値のものが製造できるかの確認、この炭化燃料を連続で安定製造することが可能かという確認、そして、発生する木ガスを熱源として連続で炭化燃料を製造できる条件(自立燃焼型バイオマス炭化装置)を見出す3点が目的である。本試験装置では、材料の土場パークを200 kg/h-w.b.供給を目標とし、目標炭化温度450℃で試験を行った。表3-2-2にその試験条件を示す。

表3-2-1 炭化物の工業分析

サンプル	工業分析[wt%(d.b.)]			炭化温度(℃)
	揮発分	固定炭素	灰分	
S-1	25.9	59.6	14.4	450
S-2	23.3	61.8	15.0	450
S-3	19.8	65.0	15.3	450

表3-2-2 炭化炉試験条件

項目	条件
供給量	200kg/h-w.b.
含水率	10~20% (土場パーク)
炭化温度	400℃~500℃ (目標 450℃)
滞留時間	20~100分



写真3-2-1 管状炉

表4-1 一般廃棄物炭化燃料の分析値

	工業分析[wt%(d.b.)]			高位発熱量(kJ/kg)
	揮発分	固定炭素	灰分	
一般廃棄物	24~31	36~37	28~34	18,000
炭化燃料				~19,600

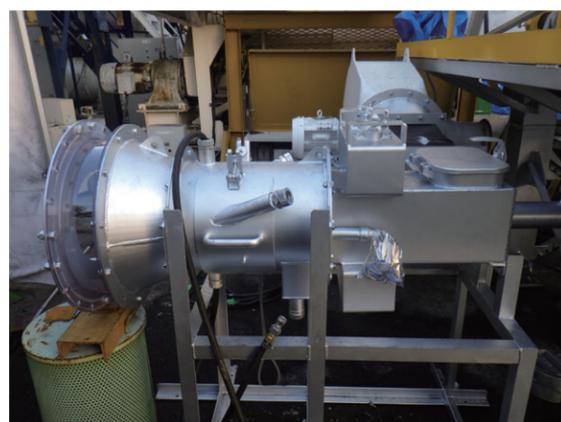


写真4-1 本試験で使用する混焼バーナ

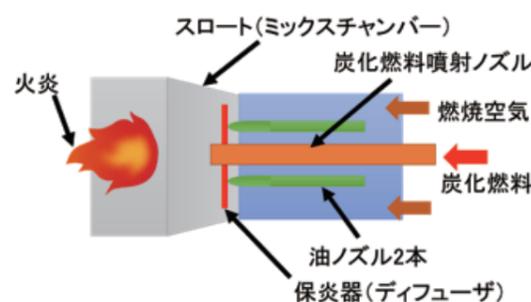


図4-1 混焼バーナ模式図

## 4. 微粉炭バーナと燃焼試験方法

### 4.1 微粉炭バーナ

微粉炭バーナは弊社のAPで使用する重油専焼バーナの基本機器構成をベースとし、微粉炭の混焼バーナを設計開発した(写真4-1)。微粉炭バーナの装置構成はノズルケーシング、重油噴霧ノズル、スパークロッド、保炎器、スロート、そして微粉炭の噴射ノズルで構成されている(図4-1)。重油専焼の場合には、昇圧ポンプにより重油を3.0MPaの圧力にする。重油は、ノズル先端部分のφ2.0mm~φ2.7mmのオリフィスより120μm程度の粒子径で噴霧される。バーナファンから送風された燃焼空気は保炎器の全面で旋回とスロート先端絞りにより強制的に混合され、循環流の火炎を形成する。今回開発した微粉炭バーナは、循環流の火炎内部を微粉炭が通過し、確実に着火できるように噴射ノズルを設置し、さらに噴射した時に広角になるような構造にした。そして、炭化燃料が分散されることで、燃焼空気と接触し易くなり燃焼促進を期待している。本試験で使用した微粉炭バーナはAPの重油専焼300L/hで計画した。但し、社内試験炉が小型であるため最大の重油燃焼量を150L/hとして試験を行う。次に、本燃焼試験で使用する一般廃棄物由来の炭化燃料の工業分析結果を表4-1に示す。これはパーク炭と同様に炭化温度450℃で製造したものである。これらの数値をパーク炭と比較すると、灰分が多く固定炭素が少ない。揮発成分は28~34%とパーク炭と同じような割合である。しかし、含水率が28%~35%であり、灰分28%~34%と多くなっており、高位発熱量もパークよりも20%~30%低い燃料である。よって、パーク炭よりも燃焼が困難であることが分かる。この炭化燃料が燃焼可能であるならば、他の木質材料からの炭化燃料は燃焼可能であると判断できることから、代替燃料として一般廃棄物由来の炭化燃料で微粉炭バーナの燃焼試験を行う。

### 4.2 微粉炭バーナ燃焼試験方法

本燃焼試験は、燃焼室にバーナを設置し燃焼試験を行う。この微粉炭バーナの基本的な構造はバーナと燃焼室を1セットとして考えている。使用した燃焼室はφ1700×L2900で内面に耐火煉瓦(CN-150)を200mm施工している。重油150L/hで燃焼させたときの炉内の熱負荷が416kW/m<sup>3</sup>になる。この時の空気比は重油の燃焼と炭化物の燃焼に必要な空気量に対して1.3~1.4で調整を行う。試験パラメータとして混焼率(混焼率はトータル熱量に対する割合を示す)を20%に固定し、燃焼率に寄与すると考える圧送風量の空気温度(熱風有無)、炭化燃料の粒径(粉碎有無)、噴射角(旋回エア有無)の3条件での燃焼率を比較する。

燃焼率を測定する煤塵のサンプリングは、混焼中に炉内温度が安定してから燃焼室の出口でサンプリングする。炉内温度が1000℃前後の高温であることからサンプリング管の保護と採取したサンプルの燃焼反応を停止させる必要があるため、水冷管は水を流し続ける必要がある。

また、サンプリング時間は、燃焼状態が安定している状態で一定の時間を決めて採取する。そして、ろ紙周辺に排ガス中の水が凝縮しないようにヒーターしながらサンプリングを行う。サンプリング回数は一つの試験条件に対して5回サンプリングを行い、その平均を燃焼率とし評価する。水冷方式で燃焼率を算出する。混焼率はトータル熱量に対する割合を示している。燃焼率は以下の式(1)で算出する。

$$X = \frac{A2 - A1}{A2(1 - A1)} \times 100(\%) \quad \dots (1)$$

ここで、Xは燃焼率(%), A1は燃焼前の炭化燃料中灰分量(g), A2は燃焼後の炭化燃料中灰分量(g)を表している。

## 5. 試験結果

### 5.1 自立燃焼型バイオマス炭化装置

土場パークを受け入れ時の含水率(約30%)のまま使用すると、水分の潜熱に熱が使われ、更に、前述したようにリグニンの特性が強いことから熱分解速度も緩く、乾留キルン内で長い滞留時間が必要になる。

このことから、本試験では、土場パークの含水率を事前に約10%に乾燥させたものを使用した。乾留キルンは図5-1-1-1に示すように内筒部分の内側の鉄皮と雰囲気温度を測定できるように無線温度計を設置し測定を行った。目標温度は材料と鉄皮温度が最も近くなる鉄皮4の温度計で450℃になるように運用試験をした。その運用データを図5-1-1-2に示す。内筒鉄皮4のグラフの推移をみると400℃~450℃で運用しているのが確認できる。

また、外筒入口温度が11:00以降に700℃±100℃で推移しているのは、投入される材料の水分量と発生するガス量が不安定なために熱風発生炉の助燃バーナが着火と停止を繰り返しているからである。但し、排ガスによる温度変化などは不安定に動作しているが、材料の炭化温度は450℃±50℃の範囲で推移しているのが確認できる。本試験では、材料の物性値が不安定であってもバーナを制御することで炭化温度を維持できることが確認できた。

次に、図5-1-3のように材料の供給量を最終目標140 kg/h-d.b.(200kg/h-w.b.,含水率30%)として60kg/h-d.b.,70kg/h-d.b.,80kg/h-d.b.,110kg/h-d.b.と供給量を増やしていく試験を行った(材料自身の影響による評価をするため

乾燥ベースで表記)。その時の、助燃バーナの燃焼量との関係を計測した。110kg/h-d.b.の材料を投入した時には助燃バーナの燃焼量が4L/hの最低燃焼量になった。これ以下の燃焼量はLPGバーナのみでの運用になる。試験では、LPGバーナのみで運用する状況もあったが、熱風の温度変化が±100℃と大きく、熱量を補うためにA重油燃焼との併用運転も確認できた。図5-1-3の破線部分は供給量を変化させたときの運転から得られた予想曲線である。

この結果より、パークの含水率約10%で供給量150kg/h-d.b.にすると、化石燃料の使用量はゼロになり自立燃焼ができる推測値を得ることができた。実際の運転でも助燃の追い炊きは必要であるが、自立燃焼のみで内筒鉄皮温度を400℃～450℃に維持している状況も確認できたことから投入する材料に大きく依存することが明確である。ここで、炭化炉で製造したパーク炭の工業分析値を表5-1-1に示す。これより、本試験で得られた炭化物は、揮発成分が29%～30.1%の範囲で残存し、微粉炭バーナで使用できる炭化燃料が生成できていることが確認できた。(写真5-1-1)

表5-1-1 炭化炉で製造したパーク炭の工業分析値

サンプル	工業分析[wt%(d.b.)]			内筒鉄皮温度 4 (°C)
	揮発分	固定炭素	灰分	
RUN2-1	29.0	63.9	7.1	415
RUN2-2	29.4	62.7	7.9	418
RUN2-3	30.1	62.3	7.9	425

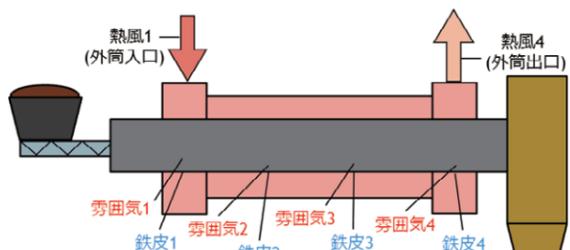


図5-1-1 乾留キルン測定箇所

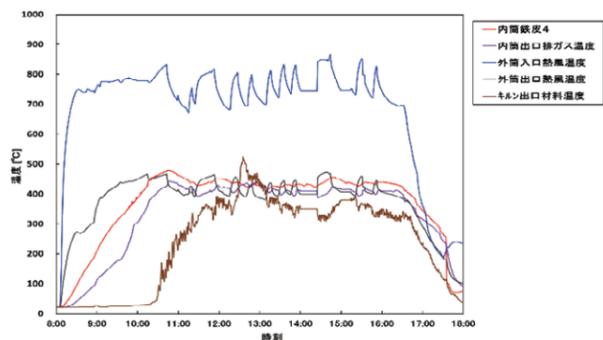


図5-1-2 炭化運転データ(内筒鉄皮4:450℃)

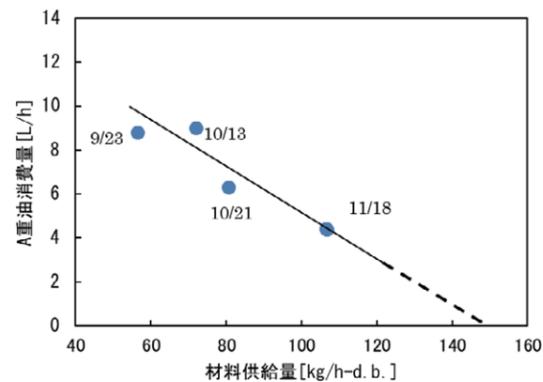


図5-1-3 パークの供給量とA重油消費量



写真5-1-1 製造したパーク炭

表5-2-1 混焼バーナ燃焼条件

	条件 1	条件 2	条件 3	条件 4
熱風	○	×	○	×
粉碎	○	○	×	○
旋回エア	○	○	○	×

○：有，×：無

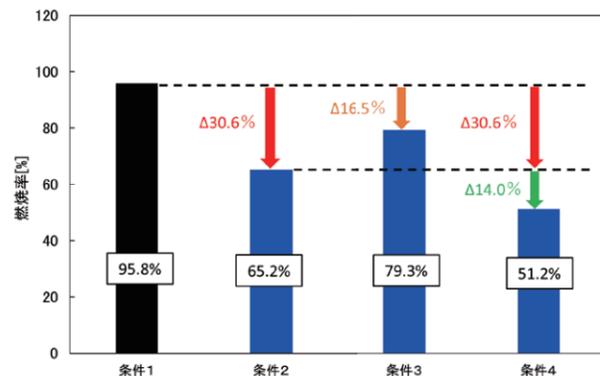


図5-2-1 混焼バーナ条件ごとの燃焼率

## 5.2 微粉炭バーナの燃焼

炭化燃料を表5-2-1の試験条件と混焼率20%で燃焼させた。その時のそれぞれの燃焼率結果を図5-2-1に示す。

この燃焼テスト結果より、条件1で炭化燃料の燃焼率が95.8%で燃焼させることが可能である。条件2, 3, 4を比較すると炭化燃料の圧送空気に熱風を利用しない場合には、条件1の燃焼率に比べ30.6%低くなった。粉碎品の有無では16.5%の低下、旋回エアの有無では14.0%であった。

予備試験では、炭化燃料の含水の影響によって粒子同士が集合体の塊になって400μm以上で存在することが確認でき、1000μmの大きさの塊も稀に確認できている。これら水分により生成している塊は、圧送搬送に熱風を利用することで、解砕していることを確認している。今回の結果より、炭化燃料の燃焼状態にこれらの大きな塊が燃焼状態に影響していることが分かった。

また、未粉碎品を使用しても熱風を利用すれば、79.3%と高い燃焼率であることから、実際に運用するときにはバーナの使用用途により条件1もしくは条件3を使い分けることで運用面に大きく反映できることが想定される。条件4についても燃焼率が51.4%と約半分の燃焼になるが熱量を供給することはできることから、システムによっては有効に炭化燃料を使うことも可能である。

## 5.まとめ

炭化炉でパーク炭を製造する上で、装置の物理的な動作や制御は問題なく操作することができた。しかし、運転中に温度や炉内圧力のハンチングが発生し、安定するまで苦慮した。これらの大きな要因は供給する原料によるものであると考えている。炭化炉で安定した連続運転を行うには、安定した水分、大きさ、ばらつきが少ない成分構成の原料を使用することが一番のポイントである。

炭化炉運用試験では

- ・ラボ試験と同性能の炭化燃料の製造が可能
- ・ラボ試験と同性能の炭化燃料の連続製造が可能
- ・原料を熱源として自立燃焼を条件の確認

の3点を達成することができた。

微粉炭バーナの燃焼試験では燃焼率90%で燃焼できる条件を確認することができた。そして、炭化燃料の燃焼率の改善へ大きく影響を与えているのが圧送空気の熱風であることが確認できた。これらのパラメータを使い分けることで運転のランニング費用や初期設備費用を変えることができる。そして、これらを基に適正な機器選定を行うことでよりユーザーに使い易いバーナになると考えている。

## References

1. 日工株式会社, アスファルトプラントにおける固形燃料燃焼システムの開発, 建設機械施工, Vol166, No1, January (2014)
2. 国立法人京都大学, 平成24年度環境省研究総合推進費「マイクロ波による瓦礫中の有害物質迅速処理—アスベスト飛散とダイオキシン発生防止」による研究委託業務, 委託業務報告書, (2013).
3. 日工株式会社 研究開発センター:平成27年度新たな木材需要創出総合プロジェクト事業 事業報告書, (2016).
4. 日工株式会社 研究開発センター:平成28年度新たな木材需要創出総合プロジェクト事業 事業報告書, (2017).
5. 社団法人 日本エネルギー学会:バイオマスハンドブック 第2版,オーム社, (2009).
6. 橋本健治:反応工学 改訂版,培風館, (1992).
7. 社団法人 化学工学会,日本エネルギー学会:バイオマスプロセスハンドブック,オーム社, (2012).
8. 化学工学会編:化学工学便覧 第7版,丸善出版, (2012).
9. 日本木材学会編:木質科学実験マニュアル,文永堂出版, (2010).
10. Kenji,H.,Isao,H.Junichi,H.Kazuhiro,M, Correlations of kinetic parameters in biomass pyrolysis with solid yield and lignin content,-Fuel90:104-112 (2011).
11. 林潤,寺島幸二,赤松史光,徳岡直静,粒度分布が燃料噴霧の着火性に与える影響,日本機械学会論文集(B編),74巻,741号:1161 (2008).

## 筆者紹介



KONTA Yuji  
今田 雄司  
2002年入社  
開発部



MUNAKATA Hajime  
宗像 元  
2019年入社  
開発部



KITANO Yuuki  
北野 裕樹  
2015年入社  
開発部



UYAMA Nobuhiro  
宇山 伸宏  
2014年入社  
開発部



HIMEJI Yoshitaka  
姫路 佳孝  
2015年入社  
開発部



KISHITA Ryo  
木下 亮  
2019年入社  
開発部

## Abstract

The medium-term goal of reducing greenhouse gases in Japan is to set a 26% reduction in 2030 from 2013 levels. According to the Ministry of the Environment's greenhouse gas emissions (fiscal 2018) survey, we are working to reduce greenhouse gases steadily toward our target of 3.6% reduction from the previous year and 11.8% of the total emission in 2013.

We can expect to reach the target reduction value by continuing these measures in the future. However, Japan's energy self-sufficiency rate is very low at 8.3%, according to a 2016 survey. Even now, oil and coal account for more than half of the country's energy composition, and their dependence on fossil fuels is high.

Therefore, it is necessary to further actively introduce technologies that can reduce greenhouse gases. This development focused on the reduction of greenhouse gases at asphalt plants, which emit the largest amount of greenhouse gases in the construction industry, and developed a carbonization furnace and pulverized coal burner using woody biomass.

We have developed a self-supporting combustion type carbonization furnace that uses flammable gas generated from wood material to carbonize as a heat source and carbonizes without using fossil fuel. We have developed a pulverized coal burner that is carbon neutral and can be used in asphalt plants.

# アスファルト合材プラントイノベーション(現代編)

## Asphalt Mixtrre Plant Inovation

藤嶋 勘 FUJISHIMA Kan (日工(株)AP技術センターAP設計課)  
 田中隼人 TANAKA Hayato (日工(株)統括営業部販売課第一グループリーダー)

### 1. はじめに

道路資材であるアスファルト合材を製造する装置であるアスファルトプラントは、時代と共に進化を続けている。

アスファルトプラントとは、骨材(碎石、砂等)を乾燥加熱し、粒度毎に篩い分け、配合通りに計量を行い、石粉等とアスファルトと共に混練する設備である。この機構は国産アスファルトプラントができた昭和の時代から変わっていない。

しかしながら、アスファルトプラントを取り巻く環境が変わるに従い、合材サイロやリサイクルユニット、脱臭炉等の附帯設備を増設しており、今日の図-1に示すようなアスファルトプラントのシステムフローとなった。以下に、どのような過程でアスファルトプラントが変化していったかを紹介する。

### 2.アスファルトプラントの取り巻く環境の変化

- 1967年 公害対策基本法 公布
- 1968年 大気汚染防止法、騒音規制法、都市計画法 施行
- 1977年 建設廃棄物実態調査
- 1978年 東京都再生アスコン採用
- 1979年 横浜市・川崎市再生アスコン採用
- 1979年 省エネルギー法 制定
- 1981年 再生合材技術指針(案)
- 1991年 リサイクル法 制定
- 1997年 京都議定書 発行
- 2008年 改正省エネルギー法 施行

### 3.アスファルトプラントイノベーション

#### ①BonDシステム アスファルトプラント

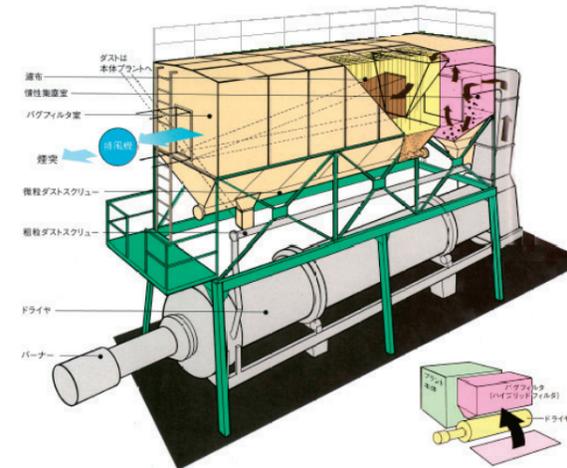


図-2 BonDシステム(Bag onDryer)

従来からの一次集塵機である乾式サイクロンを慣性集塵機に変更し、それをバグフィルタと一体構造としてドライヤの上に設置したアスファルトプラントである

- メリットとして、
1. 煙道の短縮により放散熱の低減
  2. バグフィルタ迄の温度低下を防ぎ、結露防止
  3. ドライヤの放散熱をバグフィルタの保温に利用
  4. 従来バグフィルタ設置スペースの有効活用
  5. ダスト圧送装置からスクルーへのメンテナンス低減があげられる



写真-1 BonDシステム アスファルトプラント

#### ②TOPシリーズ リサイクルユニット



写真-2 TOPシリーズ

1970年代より舗装廃材の再生利用に関する研究、技術開発が本格的に行われ、再生合材を加熱し、ミキサに投入・混練する併設タイプのリサイクルユニット(NRU)が開発される。

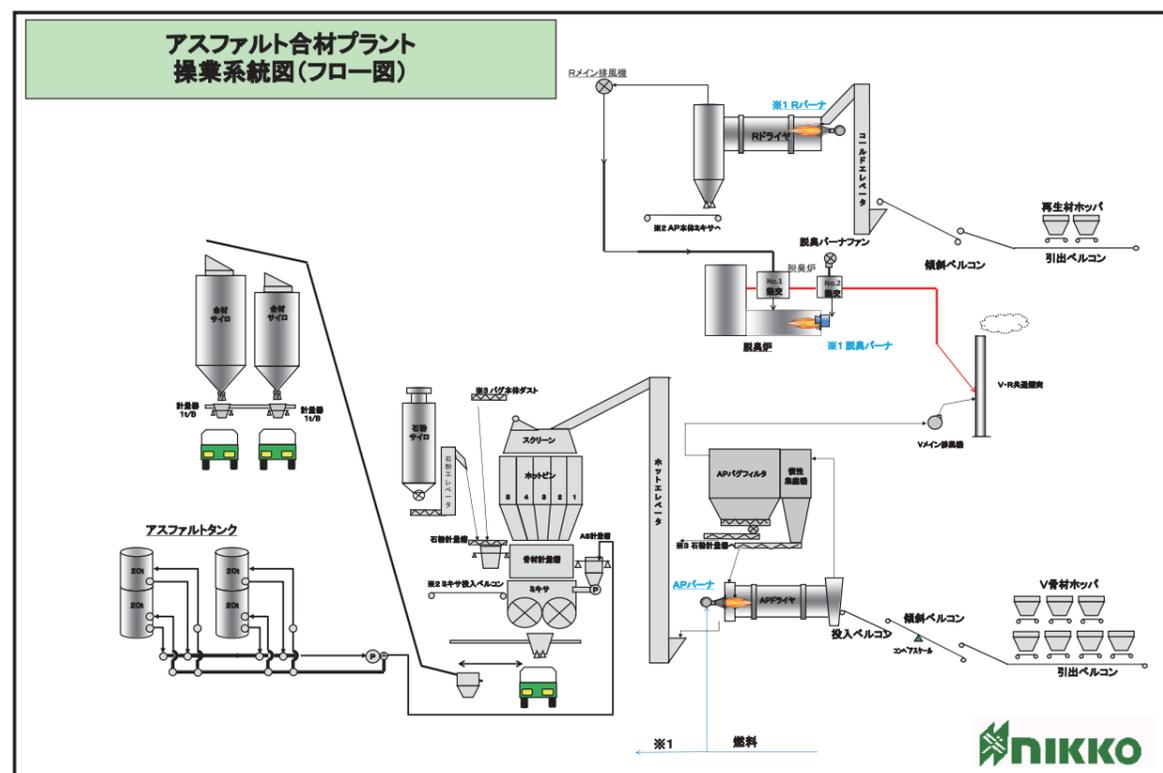


図-1 アスファルトプラント フローシート

1991年のリサイクル法により、アスファルト合材の再生処理と利用が全国に急激に広まり、「狭い敷地に高機能のリサイクルプラントを」のニーズに応えTOPシリーズを開発。

従来のリサイクルユニットはドライヤで乾燥加熱した再生材をスキップエレベータにて、サージビンに貯蔵していたが、TOPシリーズは、ドライヤを上部に設置することで、乾燥加熱した再生材をそのままサージビンに貯蔵することが可能となった。



メリットとして、

- ・省スペース  
リサイクルドライヤをダンプ通路の空間で、ユニットの最上部(TOP)に設置  
排風機等 各装置をユニット内に配置
- ・省メンテナンス & セーフティ  
スキップエレベータの無いシンプル構造  
ユニット内にメンテナンススペースを確保
- ・省エネルギー  
スキップレスによる使用電力の削減があげられる



写真-4 NRU.TOP-α60

排気室一体型のサージビンもユニット内に配置し、加熱したリサイクル材を一時貯蔵、固定式のR材計量器でサージビンから計量、ミキサ投入ベルトコンベヤでミキサに投入し、新規骨材と混練するフローとなる。



写真-3 NRU.TOP-α45

さらに改良を重ね、燃焼室や排ガスリターン装置を排除し、バーナをドラムに直接接続して、再生材を過熱するα型(ダイレクト加熱式)リサイクルユニットへと発展していく。付着の低減、より長く能力を維持する為のパイプフライト、滞留リングを採用、ドラムの膨張を吸収する板バネ形状クラを採用している。燃焼室等、装置の減少、ドライヤ及び煙道の付着低減により低メンテナンスとなる。また、リサイクルの排ガスをVドライヤに導入する事により、バグフィルタ濾布へのアスファルトミスト分が炉布に直接当たるのを防いでいると共に廃熱を有効利用するフローを採用して省エネにも配慮している。

### ③ユーロタワー アスファルトプラント

今までのBonD、TOPシリーズで培った技術を用い、プラント占有面積の省スペース化をコンセプトに、敷地の

有効利用、狭小地での建て替えを可能にしたアスファルトプラントである。数基の貯蔵用合材ビンの上部にAPミキサ、本体ユニットとリサイクルユニットを配置した高層タワー型のアスファルトプラントで、同規模の従来型プラントに対して約半分程度の設置面積となり、敷地の有効利用が可能となる。プラント全体の材料の流れは、上方から下方へ下降しながら合材となり、貯蔵、出荷する様、材料の流れの効率化を図っている。また、スキップエレベータを使用しない為、ワイヤ切れ、事故等の緊急トラブルの減少、安全性が向上している。



写真-5 NAP EBD-1606-625

各階には広いメンテナンスフロアを確保、掃除用ダストシュートの設置による高層タワー型プラントのメンテナンスに配慮している。スキップエレベータによる合材の移し替えが不要になり、品質の向上及び省電力を可能にしている。油煙、臭気、粉塵等の周囲環境の対応としてオール外装を標準とし、合わせて景観にも配慮がなされ、各種省エネ装置を装備するプラントとなる。



写真-6 NAP EBD-1608-9351D

### 仕様

- アスファルトプラント：96 t/h
- リサイクルプラント：80 t/h
- サージビン：50 ton×1基
- 合材サイロ：90 ton×3基

### ④ミッドシップタイプ アスファルトプラント (R材主体のアスファルトプラント)



図-4 MBDシリーズ

再生骨材の混入率が高まる中、従来からのアスファルトプラントにリサイクルプラントを併設する発想を転換した、リサイクルプラントをメインに配置したプラントである。

リサイクルプラントのドライヤ・サージビン・計量器・APミキサを一連でプラントの中心に配置し、その横に新規骨材用スクリーン、偏芯させた形状のホットビン、計量器をミキサ上部に配置させ、再生材の高混入率化に対応する。また、ミキサとR材計量器、骨材計量器を密閉カバーで接続する事が可能となり、材料のこぼれ、粉塵・油煙の飛散防止にもつながり、労働環境の改善となった。



写真-7 MBD-1600+TOPα80+360型サイロ

従来からのR材投入コンベヤ、R材投入シュートの設置が不要となり、材料、付着防止剤のこぼれ、飛散による機器周辺の汚れも抑制出来、メンテナンス箇所の削減にもつながる。計量器設置フロア、ミキサ設置フロアとも広いフラットフロアを確保し、メンテナンス時の作業性を重視したプラントとなっている。



写真-8 MBD-1600+TOPα8

**仕様**

アスファルトプラント：96 t/h  
 リサイクルプラント：80 t/h  
 サージビン：50 ton×1基  
 合材サイロ付

**④Value Pack アスファルトプラント  
 (R材主体で更なる省スペースを実現)**

各装置をプラントフロア中心に配置する事でメンテナンススペースを確保、R材計量器をメンテ移動式にし、ミキサ上部の開口を大型化する事でミキサのメンテナンスを容易にする。R材ミキサ投入コンベヤ、移動計量器とR材投入シュートの再生材運搬装置を廃止する事により、事故の撲滅、メンテナンス時間を削減している。加えて脱気ファンをスクリーン用、ミキサ・計量器用の2基設置して粉塵、臭気対策を行う。プラント全体では、省スペース設計により、小さい敷地、形が複雑な敷地で敷地内の運用効率を高め、ダンプ、ショベルの動線を分離して、敷地内の重機の安全運用を推進する事が出来る。

再生骨材主体のミッドシップタイプからさらに安全性能の向上、メンテナンス等の労働環境の改善、工場敷地の有効利用工場設置全般の設備投資費削減を掲げ、新たに進化させたアスファルトプラントである。



写真-9 Value Pack

**仕様**

アスファルトプラント：60 t/h  
 リサイクルプラント：45 t/h  
 サージビン：30 ton×1基

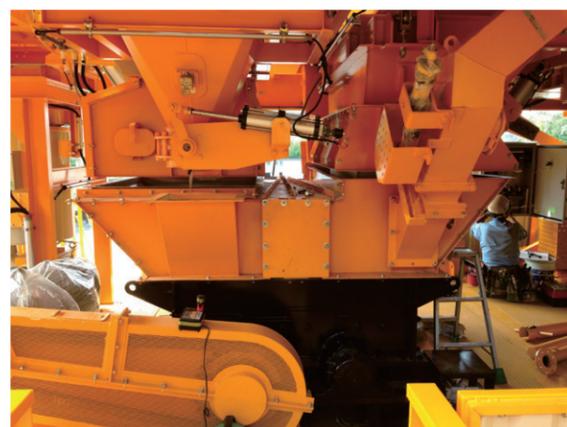


写真-10 Value Packミキサ、計量器周辺

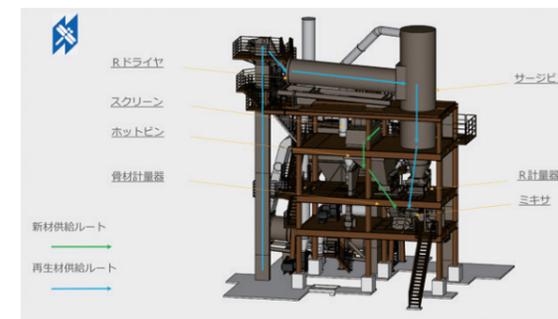


図-5 Value Pack 構造図

各装置の仕様を統一、本体タワー、リサイクルユニットを1つのフレームに集約する事で現地工事作業効率の向上、基礎施工面積の削減が可能となる。また、独立煙突を廃し、フレーム内に排気ダクトとしてユニット化、石粉サイロ、ASタンクの容量最適化により工作物申請関連業務等の削減も可能となる。このように、製品納入過程でのトータルコスト削減を実現したプラントとなっている。

**4. おわりに**

日本のアスファルトプラント台数は、平成27年度末時点で稼働工場1140台であり、これは減少傾向にある。

また、合材総量も減少傾向にある中、我々アスファルトプラントメーカーの責務として、より省エネルギー、より省メンテナンスで行える物を開発・提案を行い、ソリューションパートナーとして各道路会社様と共に日本の将来への道を担っていきたい。

**参考文献**

社団法人 日本アスファルト合材協会 統計資料

**出典**

「藤嶋勘(日工), 田中隼人(日工), 『アスファルト合材プラントイノベーション(現代編)』, アスファルト合材, No.123, PP.18-23, 2017/07. (一社)日本アスファルト合材協会」より許諾を得て転載。

**筆者紹介**



FUJISHIMA Kan  
 藤嶋 勘  
 1993年入社  
 エンジニアリング部



TANAKA Hayato  
 田中 隼人  
 2004年入社  
 国内営業部

# 半水石膏およびⅡ型無水石膏の製造システムの開発

Development of Manufacturing System for Hemihydrate Gypsum and Type II Anhydrous Gypsum

蓬萊秀人<sup>1</sup>・神尾昌宏<sup>2</sup>・藤戸幹大<sup>3</sup>

- 1 技術本部 テクノセンター 副テクノセンター長
- 2 技術本部 テクノセンター エンジニアリング部 EG3課 担当課長
- 3 技術本部 テクノセンター エンジニアリング部 EG3課

## 概要

石膏ボードは、耐火性、経済性、加工性等に優れていることから、建物の内装材として広く普及しているが、その生産量を反映して、建築物や住宅の解体によって発生する廃石膏ボードの量は近年増加傾向に転じている。このような社会情勢から、最終処分場の容量不足に起因する廃石膏ボードの処分費の高騰や不法投棄などの問題が指摘されていることから、廃石膏ボードのリサイクル技術の確立と用途開発の早期実現が急務である。筆者らは、廃石膏ボードから半水石膏を製造するシステムを先行開発し市場に投入している。さらに、そのリサイクル用途の拡大をはかるべくⅡ型無水石膏を製造するシステムを開発している。本稿では、これらの製造システムの概要とその特徴を報告する。

キーワード: 廃石膏ボード, 半水石膏, Ⅱ型無水石膏, ロータリーキルン, 加熱焼成

## 1. はじめに

「循環型社会形成推進基本法」が2000年(平成12年)に施行され、これに基づく関連の法律が順次改正される。なかでも、「資源の有効な利用の促進に関する法律」いわゆる改正リサイクル法は、資源の少ない我が国が限りある資源の3R, Reduce(減らす), Reuse(再利用), Recycle(再資源化)を推進し、循環型社会をいち早く構築することにより、国民経済の健全な発展に寄与することを目的としている。

また、「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は、全産業廃棄物に占める建設廃棄物の割合が2割程度であるのに対し、全廃棄物の不法投棄量に占める建設廃棄物の割合が9割にのぼるなどの実情を鑑みて制定している。この不法投棄を削減するための法律は、コンクリート塊、アスファルト・コンクリート塊、建設発生木材を特定建設資材として指定し、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。

さらに、建設廃棄物の発生の抑制と、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進し、適正な処理が行われていることを行政が監督指導する仕組みとなっている。ただし、分別解体の結果、最終的に残される建設混合廃棄物に関しては、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入されているのか、統計的にその実態が整理されていないのが実情である。

日本の一般家屋の平均耐用年数は、欧米の約100年にくらべて30年程度と極めて短い。しかも、木造建築が中心となることから耐用年数が過ぎた家屋の解体時には、大量の廃木材が発生することになる。さらに、内壁や天井の建築資材として昭和の高度経済成長期から普及し始めた石膏ボードに関しても、これら家屋の解体に伴い発生する石膏ボードの廃棄物(以下、廃石膏ボードと記載)が増加してきている。

石膏ボードは、今やほとんどの建築物の内装材として使用されている。これは石膏ボードが安価で安全、しかも耐火性に優れ、日本古来の土壁にくらべて施工性が良いなどの特徴があるからである。このことから、年間の石膏ボード生産量は500万トンを超えている。なかでも、石膏ボード生産量の半数に当たる約250万トンが、化学石膏と呼ばれる排煙脱硫石膏を原料として供給されており、残りの半数は、石膏鉱石として、タイ、メキシコ、オーストラリア、などの海外から輸入されている。

排煙脱硫石膏は、もっぱら火力発電所や重化学工業の工場、化石燃料を燃焼させたときに発生する有害な硫酸化物(一酸化硫黄:SO、二酸化硫黄:SO<sub>2</sub>、三酸化硫黄:SO<sub>3</sub>など)を除去するために、消石灰(水酸化カルシウム:Ca(OH)<sub>2</sub>)や炭酸カルシウム:CaCO<sub>3</sub>などが排煙中に吹き込まれ、式(1)と(2)に示す化学反応(石灰-石膏法)で生成することが知られている。



このようにして、石膏ボードが急速に家屋の内装材として普及してきた背景には、副産物として生成する排煙脱硫石膏が、石膏ボードの原材料として安価で大量に供給されていることなどが挙げられる。逆に、このことがコスト面で、廃石膏ボードから再び石膏ボードへのリサイクル化を阻害している要因の一つであると考えられる。

廃石膏ボードは、建設リサイクル法の特定建設資材廃棄物として指定を受けていないことから、再利用や再資源化などのリサイクルがほとんど進んでいないのが実情である。このことは、廃石膏ボードの発生量が、コンクリート塊の3,500万トン、アスファルト・コンクリート塊の2,500万トン、建設廃木材の500万トンにくらべると、120万トンと少ないために、行政の対応が遅れていることに起因している。

廃石膏ボードを廃棄処分する場合は、管理型の最終処分場に処分することが法律で厳しく規定されている。このことは、石膏(二水石膏:CaSO<sub>4</sub>・2H<sub>2</sub>O)の組成から、硫酸塩を含んでいることが明らかであるが、土中などに生息している硫酸塩還元菌が石膏の硫酸塩を分解して、有害な硫化水素(H<sub>2</sub>S)を発生させる恐れがあるためである。また、排煙脱硫石膏が原材料として使用されていることから、微量のフッ化カルシウム(CaF<sub>2</sub>)が混入しており、これが水に溶出して土壌の環境基準を超過する場合が想定されるなどの理由がある。

このように、廃石膏ボードを管理型の最終処分場に処分することが義務付けられたことにより、廃石膏ボードの処分費の高騰を招くとともに、各自治体の管理型最終処分場の容量が逼迫していることなどの社会問題に発展してきている。このことから、廃石膏ボードのリサイクル技術の確立および用途開発の早期実現が求められている。

一方、筆者らは、建築資材の有効利用、循環型社会の構築などの観点より、廃石膏ボードを紙と石膏とに分別し、粉碎した石膏(以下、リサイクル石膏と記載)を加熱処理することで、水硬性の特徴をもつ半水石膏を効率よく安定して生産するシステムを開発している。そして、このシステムで製造した中性で安全な半水石膏の大量消費が見込まれる軟弱地盤などの改良材としての有効性を検討している<sup>1)~11)</sup>。

さらに、半水石膏製造システムから発展させて、セメントの原材料またはセメント系固化剤として有用なⅡ型無水石膏の製造システムを開発している。

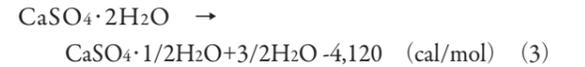
本稿では、これらの半水石膏製造システムとⅡ型無水石膏製造システムの概要とその特徴を報告する。

## 2. 石膏の特性

石膏は、結晶水の数により二水石膏(CaSO<sub>4</sub>・2H<sub>2</sub>O:硫酸カルシウム2水和物)、半水石膏(CaSO<sub>4</sub>・1/2H<sub>2</sub>O:硫酸カルシウム1/2水和物)、無水石膏(CaSO<sub>4</sub>:硫酸カルシウム)の3種類が存在する。さらに、半水石膏は、結晶構造の違いによりα型とβ型に、無水石膏は、Ⅲ型、Ⅱ型、Ⅰ型に

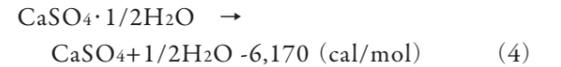
分類することができ、Ⅲ型無水石膏にもα型とβ型とが存在することが確認されている。したがって、石膏は結晶水の数ならびに結晶構造の違いから、7種類に分類することができる<sup>12)</sup>。

二水石膏は、自然界では極めて安定で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)が生成する。式(3)にこのときの熱化学反応式を示す。式中の熱量にマイナス符号があるのは、吸熱反応であることを示している。



半水石膏には、α型とβ型が存在することは前述したが、半水石膏のα型は緻密な構造で密度が大きく、水硬時の強度がβ型よりも大きいことなどから医療用などに用いられている。このα型半水石膏を製造するには、加圧水蒸気環境下で焼成する必要があり、加圧釜(オートクレーブ)などが使用される。

一方のβ型半水石膏は、ポーラス状の空隙があることから密度は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。このβ型半水石膏の製造には、連続式のロータリーキルンなどが使用される。この半水石膏を180℃以上で加熱処理(脱水反応)することにより式(4)に示す結晶水の取れた無水石膏が生成する。



無水石膏には、その結晶構造の違いからⅢ型、Ⅱ型、Ⅰ型が存在し、Ⅲ型の無水石膏はさらにα型とβ型に分類することができることは既に述べている。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。Ⅱ型無水石膏は、350~1,000℃の範囲で加熱することにより得られ、加水しても半水石膏に戻らない、別名硬石膏と呼ばれている。

筆者らが開発した半水石膏製造システムは、リサイクル石膏である二水石膏を加熱処理することにより、β型半水石膏やⅢ型無水石膏に相転移して行くプロセスを応用したものである。

## 3. 半水石膏製造システム

### 3.1 基本原理

#### 3.1.1 連続処理方式とバッチ処理方式

加熱処理方式には、被加熱物を連続的に処理する連続処理方式と、バッチ処理するバッチ処理方式とに分類することができる。

連続処理方式は、リサイクル石膏を連続的に加熱装置に投入し、かつ、加熱装置から連続的に半水石膏を排出する方式である。したがって、本稿の半水石膏とⅡ型無水石膏の製造システムに採用したロータリーキルンは連続処

理方式に属する。この他に、ベルトコンベア上に載せた被加熱物を周囲から加熱して、被加熱物を搬送しながら加熱する方式などがある。連続加熱方式は、被加熱物を大量に処理する場合に優れている。

一方、バッチ処理方式には、ケトル釜やオートクレーブなどを挙げることができる。α型半水石膏を製造するケトル釜は、一定量のリサイクル石膏を釜に投入し、所定の時間水蒸気雰囲気中で加熱処理を施してα型半水石膏を製造し、それを一括して釜から排出するバッチ処理方式を採っている。

### 3.1.2 電気加熱方式と燃料燃焼加熱方式

リサイクル石膏を加熱処理する熱源として、電気エネルギーを利用する場合と、化石燃料の化学反応である燃焼熱を利用する場合によりシステムの構成が大きく異なる。

#### (1) 電気加熱方式

電気エネルギーを利用した加熱方式には、抵抗加熱、誘導加熱、マイクロ波加熱、ヒートポンプ加熱などが挙げられる。

抵抗加熱は、発熱体に電流を流すことによって生じるジュール熱を利用した加熱である。このジュール熱を直接的、間接的に熱伝導、熱対流、熱輻射の熱伝達形態を経て被加熱物を加熱する方式である。

誘導加熱は、発熱体(導電体に限る)に磁界をかけて渦電流を生じさせ、これによるジュール熱を利用した加熱方式である。抵抗加熱と同様に、直接的、間接的に3つの熱伝達形態を経て被加熱物を加熱する方式である。

マイクロ波加熱は、被加熱物の内部より分子を磁界で振動させて摩擦熱を発生させる原理で、唯一の内部加熱方式となる。ただし、被加熱物に水などの極性分子が含まれていることが条件となる。

また、最近では周囲の空気などから熱エネルギーを集めてくる高効率のヒートポンプが、家屋の冷暖房用空調機や温水器として普及している。これによると、投入した電気エネルギーの数倍(成績係数:COP=3~6)の熱エネルギーを得ることが可能であり、ガスや灯油焚き温水給湯器よりも省エネルギー性能と経済性に優れている。しかしながら、半水石膏の第一次沸点である130℃にまで加熱するヒートポンプの実用化には至っていない。

電気加熱方式には、この他にもアーク加熱や輻射加熱などを挙げることができるが、ヒートポンプ加熱方式を除き電気エネルギーを熱に変換する原理は、エネルギー保存則により、1kwh=3.60 MJ(860 kcal)が熱変換の基本原則である。

以上のことより、電気加熱は排ガスが発生せずクリーンで加熱デバイスがコンパクトに設計できるなど極めて有用であるが、次項で述べるように熱エネルギーコストの観点から化石燃料に大きく劣る。

以下では、上記のことを鑑みて燃料の燃焼による加熱について検討する。

#### (2) 燃料燃焼加熱方式

燃焼熱は、燃料が燃焼(酸化反応)することにより発生する化学エネルギーを熱エネルギーとして利用する方法である。

化石燃料による加熱方式には、燃料を空気と混合して燃焼させるバーナ燃焼方式や触媒を介して燃焼させる触媒燃焼方式などがある。いずれも空気中の酸素により燃料を酸化させたときに生じる熱や光を利用している。

バーナ燃焼は、燃料(固体、液体、気体)と空気とを所定の割合で混合させて燃料を燃焼させる方式である。発熱量は、燃料の供給量を可変して調整する。ただし、化石燃料の燃焼に伴い地球温室効果ガスである二酸化炭素は元より、水蒸気ならびに公害の原因物質である硫黄酸化物や窒素酸化物を排出することは否めない。

触媒燃焼は、白金などの触媒作用により比較的低温度で燃料を燃焼させる方式である。燃料の酸化反応が300℃程度の低温でも進行するために、光を放たない緩慢燃焼となる。このように、燃料燃焼加熱方式は、空気が存在する場所であれば燃料と各種燃焼機器を用いて容易に熱エネルギーを取り出すことができる。

一方、電気加熱方式と燃料燃焼加熱方式で発生する単位熱量当たりのコストで比較すると、燃料燃焼加熱方式が優位である。たとえば、前述のように1kwhの電力は3.60 MJ(860 kcal)の熱エネルギーに変換でき、A重油1リットルは36.0 MJ(8,600 kcal)の低位発熱量がある。したがって、これらの単位熱量当たりのコストは、A重油:電力=1:3.6となり、化石燃料がコスト的に有利であることが明らかである。(電力:18円/kWh, A重油:50円/リットルで計算。)

さらに、化石燃料の場合、燃焼ガスをそのまま熱媒体として利用することができる加熱プロセスの場合には、エネルギーロスが少なくなるが、電気加熱方式にくらべて燃焼ガスが大量に発生するので、排ガス処理装置が大型化する傾向にある。また、加熱プロセスが間接加熱となる場合には、熱媒体である燃焼ガスからの熱伝達ロスが生じ、電気加熱方式が優れる場合もある。

本稿の半水石膏とII型無水石膏の製造システムは、単位エネルギー当たりのコストが安価な化石燃料(重油、灯油、ガス)を熱エネルギー源としている。

#### 3.1.3 直接加熱方式と間接加熱方式

熱は、温度の高い物質から温度の低い物質に流れ、接触伝熱の場合には温度差に比例し、輻射伝熱の場合は温度差の4乗に比例して伝わる。このことは、ジョセフ・フェーリエの法則とステファン・ボルツマンの法則として知られている。

また、加熱方式として、被加熱物と熱媒体(気体や液体)とを直接接触させる直接加熱方式と、熱媒体で隔壁を加熱して、この隔壁から被加熱物に伝熱する間接加熱方式に分類される。例えば、網に乗せた焼き肉は、直接加熱方式であり、フライパンによる焼き肉は間接加熱方式である。

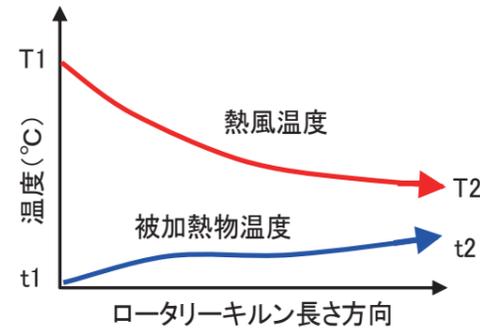


図-1 パラレルフロー方式の概念

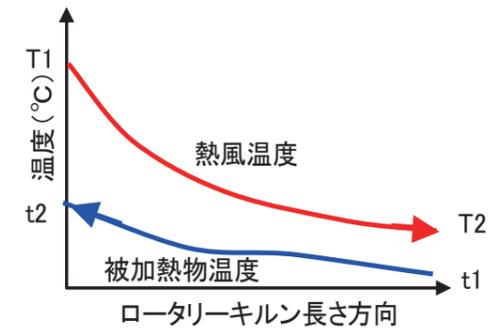


図-2 カウンターフロー方式の概念

表-1 半水石膏製造装置・NPRシリーズ仕様一覧

機種	NPR-100	NPR-200	NPR-400	NPR-600	NPR-800	NPR-1000
タイプ	移動式	←	定置式	←	←	←
処理能力 (t/h)	1.0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0
ドライヤ径 (mm)	900	1,100	1,300	1,300	1,550	1,750
ドライヤ長 (mm)	3,000	3,500	5,000	6,000	6,500	7,000
ドライヤ容積 (m³)	1.91	3.33	6.64	7.96	12.26	16.84
バーナ最大燃焼量 (L/h)	40	80	150	225	300	375
バーナファン動力 (kw)	1.5	2.2	3.7	5.5	7.5	7.5
バグフィルタ濾過面積 (m²)	40	75	150	200	250	300
排風機処理風量 (m³/min)	40	75	150	200	250	300
排風機動力 (kw)	5.5	11	18.5	22	30	37

直接加熱方式には、赤外線ヒータなどに代表される熱媒体を介さない輻射加熱も含まれる。直接加熱方式の熱媒体としては、空気や燃焼ガスを用いることが多く、間接的な伝熱面を介さないで熱の伝達ロスが生じない。

一方、間接加熱方式には、被加熱物と熱媒体との間に隔壁が存在し、隔壁に伝熱する段階で放散熱などによる伝達ロスが生じる。さらに、両方式とも熱媒体の熱エネルギー全てを被加熱物に伝熱することはできない。

本稿の半水石膏とII型無水石膏の製造システムは、バーナ燃焼ガスを熱媒体としてリサイクル石膏と直接接触させ伝熱を行う直接加熱方式である。

#### 3.1.4 パラレルフロー方式とカウンターフロー方式

ロータリーキルンには、被加熱物とバーナ燃焼ガス(熱風)などの熱媒体とが、同一方向に流れるパラレルフロー方式と、被加熱物と熱媒体とが対向して流れるカウンターフロー方式とがある。それぞれの概念を図-1と図-2に示す。両図において、T<sub>1</sub>は熱風入口温度、T<sub>2</sub>は熱風出口温度、t<sub>1</sub>は被加熱物入口温度、t<sub>2</sub>は被加熱物出口温度を表す。熱風が流れる方向は、T<sub>1</sub>→T<sub>2</sub>へ、被加熱物が流れる方向は、t<sub>1</sub>→t<sub>2</sub>となる。

図-2に示すカウンターフロー方式は、理論上、熱風出口温度T<sub>2</sub>を被加熱物出口温度t<sub>2</sub>以下にまで下げることができる。このことは、図-1に示すパラレルフロー方式の熱風出口温度

T<sub>2</sub>が被加熱物出口温度t<sub>2</sub>以上となることに比較すると、カウンターフロー方式が熱効率に優れていることがわかる。しかしながら、熱効率を追求し過ぎると、被加熱物投入側のロータリーキルン壁面温度が低下することにより、被加熱物の水分による付着が成長することや、ロータリーキルンや排ガス処理装置の低温腐食を招く恐れがある。

本稿の半水石膏製造システムは、図-1に示すパラレルフロー方式を採用している。この方式は、被加熱物出口温度t<sub>2</sub>および熱風出口温度T<sub>2</sub>の制御性に優れている。さらに、熱風出口温度T<sub>2</sub>を制御することにより被加熱物が水分の影響によってロータリーキルン内壁や掻き揚げフライトへ付着成長するのを抑制する効果がある。

一方、II型無水石膏製造システムは、図-2に示すカウンターフロー方式を採っている。この方式は、熱風出口温度T<sub>2</sub>よりも被加熱物出口温度t<sub>2</sub>を高くすることが可能で、パラレルフロー方式よりも熱効率に優れている。

### 3.2 半水石膏製造システムの特徴

#### 3.2.1 NPRシステムの概要

表-1に半水石膏製造装置・NPRシリーズの概要を示す。NPR:Nikko Plaster Reactorは、二水石膏であるリサイクル石膏を加熱処理することにより、半水石膏を製造する装置である。表より、NPRシリーズとして、リサイクル石膏の処理能力が毎時1トンから10トンまでの処理能力に応じて6機種を

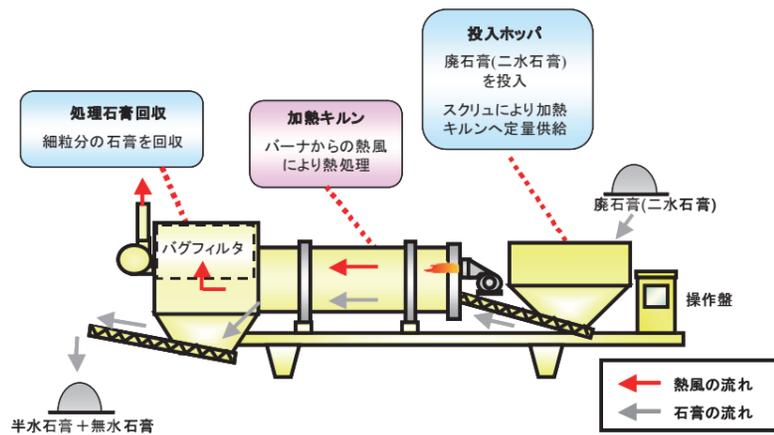


図-3 移動式半水石膏製造システムNPR-100のフロー<sup>13)</sup>

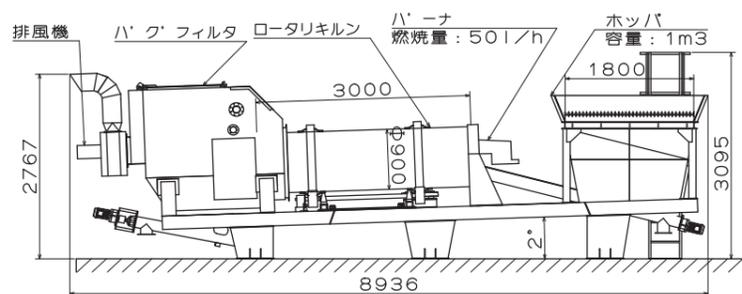


図-4 移動式半水石膏製造システムNPR-100の外観



写真-1 移動式半水石膏製造システムNPR-100の全景<sup>8)</sup>

取り揃えている。また、NPR-100とNPR-200の2機種は、小型の移動式で、NPR-400からNPR-1000の4機種は、大型の定置式となっている。

処理能力が毎時1トンである移動式半水石膏製造システムNPR-100のフローと外観を図-3<sup>13)</sup>と図-4に、その全景を写真-1<sup>8)</sup>に示す。図と写真より、供給ホッパーフィーダ、加熱バーナ、ロータリーキルン、バグフィルタ、排風機などを一体構造とし、全長9,000mm、全幅2,000mm、全高2,800mmの寸法に抑えて10トン積みのトラック1台での輸送を可能としている。このことにより、比較的小規模な廃石膏ボードの中間処理業者の間で本装置を融通することにより、必要な時に必要なだけ半水石膏の製造を行うことができる。

また、加熱バーナの最大燃焼量を毎時40リットルとすることで、大気汚染防止法のばい煙発生施設(燃焼量が毎時50リットル以上に届出義務)に該当せず届出が不要となる。さらに、燃料タンク容量を危険物の指定数量の1/5未満である390リットルとすることで、届出を不要としている(A重油:第4類第3石油類の場合)。ただし、本装置を用いて作業するためには、労働安全衛生法における乾燥設備主任の講習を受ける必要がある。

一方、定置式である処理能力が毎時4トンの定置式半水石膏製造システムNPR-400のフローと外観を図-5<sup>2)</sup>と図-6に、その全景を写真-2に示す。図と写真より、供給ホッパー

フィーダ、加熱バーナ、ロータリーキルン、バグフィルタ、排風機などが大型になり、個々の装置が独立していることがわかる。また、ロータリーキルンや排風機などの回転機器を据え付けるための頑丈なコンクリート基礎が必要となり、特に燃焼排ガスを大気に放出する煙突に関しては、建築基準法の工作物の適応を受けることから、構造指針に準拠した強度とコンクリート基礎が必要となる。さらに、大型であるがために、消防法、大気汚染防止法、騒音規制法、振動規制法、労働安全衛生法などとの関係する法令に基づき申請や届出が必要となる。

なお、移動式および定置式の両者とも熱源である燃料は、A重油と灯油を基本としており、都市ガス13Aやバイオマス燃料などの対応も可能である。

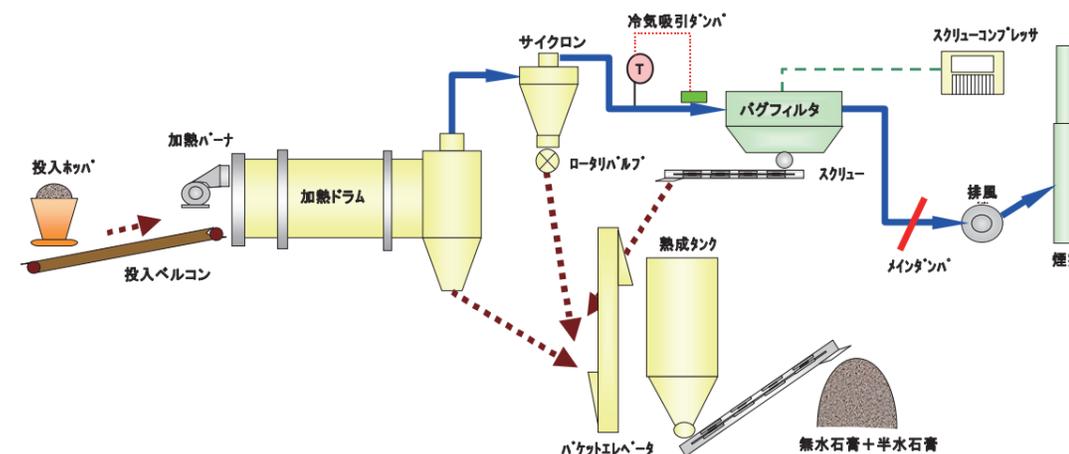


図-5 定置式半水石膏製造システムNPR-400のフロー<sup>2)</sup>

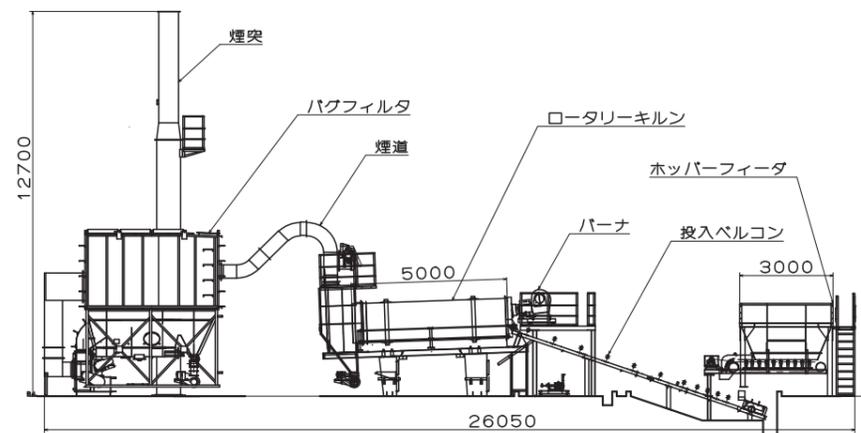


図-6 定置式半水石膏製造システムNPR-400の外観

以下では、半水石膏製造装置であるNPRシリーズの構成装置毎の特徴について詳細を述べる。

### 3.2.2 供給ホッパーフィーダ

供給ホッパーフィーダは、ロータリーキルンにリサイクル石膏を定量供給するための装置で、リサイクル石膏の供給量を連続的に可変することができる。

移動式の半水石膏製造装置は、コンパクト化をはかるために供給ホッパーを図-3<sup>13)</sup>と図-4および写真-1<sup>8)</sup>のように、本体フレームと一体構造とし、その容量を1m<sup>3</sup>としている。さらに、供給ホッパー下部のリサイクル石膏の供給量を調整するフィーダと、ロータリーキルンへリサイクル石膏を投入するコンベアとの機能を兼ね備えた一体型のスクリーコンベアを搭載している。このことにより、コンパクト化とコストダウンをはかっている。なお、リサイクル石膏の供給量は、スクリーコンベアの回転数を可変することにより、自在に制御できるようにしている。

写真-3は、定置式の供給ホッパーフィーダを示している。図-5<sup>2)</sup>および図-6のように、容量が5m<sup>3</sup>の供給ホッパーと、その下部に設けたベルトフィーダと、ロータリーキルンにリサイク



写真-2 定置式半水石膏製造システムNPR-400の全景

ル石膏を投入する投入ベルコンから構成されている。あらかじめベルトフィーダの回転数とリサイクル石膏の供給量との関係を測定しておき、リサイクル石膏の含水比や半水石膏の品質に応じて、供給量を自在に可変することができる。

両者とも供給ホッパーへのリサイクル石膏投入は、ショベルローダもしくはフォークリフトによるフレコンパック投入に対応している。そして、異物の混入や人の転落を防止するために、上部にグリズリーバーを備えている。



写真-3 定置式の供給ホッパーフィーダ

### 3.2.3 加熱バーナ

移動式および定置式の両者とも、ロータリーキルン用の加熱バーナとして専用に開発した油圧戻り油式の比例制御バーナを搭載している。写真-4に定置式の加熱バーナを示す。このバーナは、燃焼量の可変幅を大きくするためにノズル内部に渦巻き室を設け、ここに実際の燃焼量よりも多い燃料を供給することによって得られる高速の回転力を油の霧化に利用している。さらに、この渦巻き室から余分な燃料をリターンさせることにより、燃焼量を連続的に可変することができるようにしている。本システムに採用した加熱バーナの燃焼幅は1:5(最少燃焼量:最大燃料量)である。

また、これらの加熱バーナは、省エネルギー化と温室効果ガスである二酸化炭素の排出量を削減することを目的に低空気比燃焼をはかっている。1リットルの燃料を完全燃焼させるのに必要な空気を理論空気量というが、実際のバーナでは燃焼効率を高めるために、この理論空気量より過剰の空気で燃焼させている。理論空気量の何倍の空気で燃焼させているかを示す指標として空気過剰係数が用いられる。本システムに採用した加熱バーナの空気過剰係数は1.1~1.2の範囲にある。このように、加熱バーナの低空気比化をはかることにより、無効エネルギーとして排出する排ガス量を削減している。

加熱バーナの使用燃料は、一般産業用に流通している重油、灯油、ガスなどに対応しており、カーボンニュートラルな植物由来(メタノール、BDF、木質タール、廃グリセリンなど)の燃料にも適応させることも可能である。

### 3.2.4 ロータリーキルン

写真-5<sup>2)</sup>は、定置式のロータリーキルンを示している。写真より、本ロータリーキルンは、移動式および定置式の両者とも被加熱物が流れる方向に2°傾斜している。また、加熱バーナの燃焼ガスと、被加熱物のリサイクル石膏とが同じ方向に流れるパラレルフロー方式を採用している。さらに、後段で詳しく述べる



写真-4 定置式の加熱バーナ



写真-5 定置式のロータリーキルン<sup>2)</sup>

が、バーナ火炎がロータリーキルン内部に導入されるので、被加熱物であるリサイクル石膏とバーナ火炎とが直接接触しないようにするため、ロータリーキルン内部の掻き揚げフライトの形状を工夫している。

つぎに、石膏の性状変化(粒度や含水比)に対応するため、ロータリーキルンをインバータによる回転数制御とし、その回転数を2~8 m<sup>-1</sup>の範囲で調整が可能としている。このことより、リサイクル石膏のロータリーキルン内部での滞留時間が5~20分の範囲で調整することができ、石膏の性状に応じたコントロールを可能にしている。

一方、省エネルギー化と作業環境への配慮から、ロータリーキルンの内部圧力(静圧)を大気圧より僅かに低い、マイナス圧(-40Pa)にする静圧コントロールシステムを導入している。これにより、燃費の削減とリサイクル石膏の微粒子がロータリーキルン外部に噴出しないクリーンな作業環境を実現している。

### 3.2.5 バグフィルタ

写真-6<sup>2)</sup>は、定置式のバグフィルタを示している。移動式および定置式の両者とも、ロータリーキルンから排ガスに伴って飛散する半水石膏と未反応の二水石膏とを捕捉回収すると



写真-6 定置式のバグフィルタ<sup>2)</sup>

ともに、バグフィルタの濾布表面で未反応の二水石膏を半水石膏へ相転移させる機能を有している。

また、バグフィルタの濾布表面で捕捉された半水石膏の一部は、さらに脱水反応を経て、水を加えると硬化するⅢ型無水石膏に相転移している。両者のシステムとも排ガス温度の設定を自在に変更することにより、二水石膏、半水石膏、Ⅲ型無水石膏それぞれの割合を任意に管理できるようにしている。

一方、定置式のバグフィルタは、写真-6<sup>2)</sup>のように独立型としているのに対して、移動式のバグフィルタは、写真-1<sup>8)</sup>のように本体フレームと一体構造とすることでコンパクト化をはかっている。

### 3.2.6 熟成タンク

排ガスに伴ってバグフィルタで捕捉されたりサイクル石膏の微粒子は限りなく排ガス温度に近づいていることから、半水石膏またはⅢ型の無水石膏に相転移している。逆にロータリーキルンから排出されるリサイクル石膏の中で、比較的大きな粒子は内部まで十分に加熱されておらず、二水石膏の状態で排出されるものも含まれている。

図-5<sup>2)</sup>に示すように、熟成タンクにこれらが混在した石膏を投入することにより、温度の高いⅢ型無水石膏が温度の低い二水石膏を加熱し、二水石膏の結晶水が脱離して半水石膏となる。さらに、二水石膏から脱離した結晶水をⅢ型無水石膏が吸収して半水石膏となる。具体的な時間として、60分程度の熟成をはかることにより、半水石膏の収率を上げることが可能となる。

一方、小型の移動式は、バグフィルタ下部の排出ホッパーが熟成タンクとしての機能を有しており、コンパクト化をはかっている。

## 3.3 半水石膏製造メカニズム

### 3.3.1 ロータリーキルンでの加熱原理

以下では、移動式および定置式の半水石膏製造システム

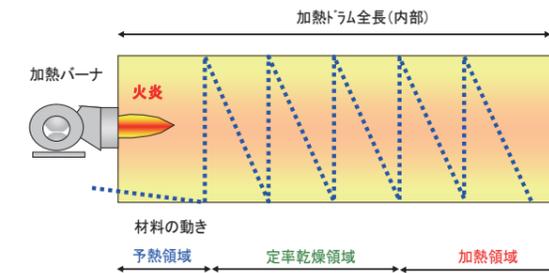


図-7 ロータリーキルン内部の流れ方向の材料の動き<sup>13)</sup>

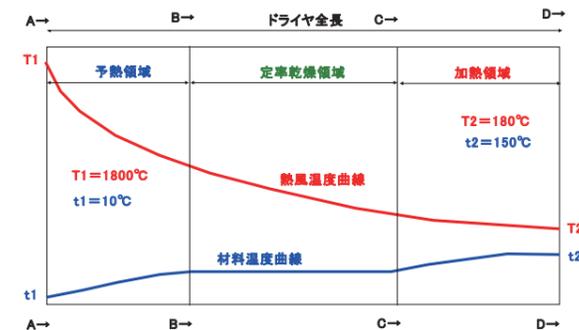


図-8 ロータリーキルン内部の温度分布<sup>13)</sup>

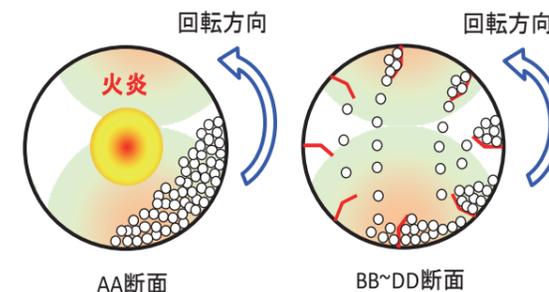


図-9 ロータリーキルンの断面<sup>13)</sup>

におけるロータリーキルンでの加熱原理について、被加熱物であるリサイクル石膏の挙動を(1)予熱領域、(2)定率乾燥領域、(3)加熱領域に分けて詳述する。なお、図-7<sup>13)</sup>は、ロータリーキルン内部の流れ方向の材料の動きを、図-8<sup>13)</sup>は、内部流れ方向の材料と熱風の温度分布を、図-9<sup>13)</sup>は図-8<sup>13)</sup>の各断面における材料の分散の状態を示している。

#### (1) 予熱領域

移動式および定置式の両者とも、図-7<sup>13)</sup>に示すように加熱バーナの火炎を直接ロータリーキルン内部に導入している。加熱バーナの火炎長さは、移動式で0.5~1.5m、定置式で1.0~3.0mである。この火炎は、加熱バーナ先端部よりロータリーキルンの中央部に向かって水平方向に形成される。

したがって、図-7<sup>13)</sup>の予熱領域ならびに図-9<sup>13)</sup>のAA断面に示すように加熱バーナの火炎とリサイクル石膏とが直接接触するのを防ぐために、火炎が形成される領域ではリサイクル石膏を分散させないよう掻き揚げフライトの構造を工夫している。

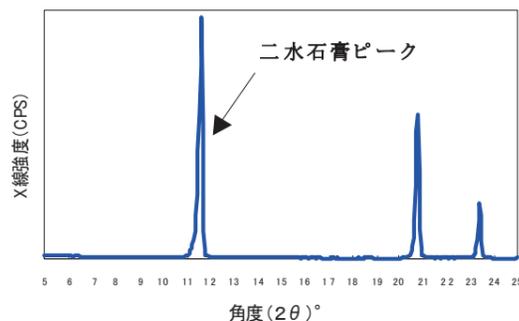


図-10 加熱処理前のリサイクル石膏のX線回折結果<sup>2)</sup>

また、この予熱領域では、リサイクル石膏がロータリーキルンの底部を滑りながら排出方向に向かって進んで行くが、図-8<sup>13)</sup>に示すとおり熱風温度 $T_1$ と材料温度 $t_1$ の温度差が最も大きい領域となる。熱エネルギーは温度差に比例して流れることやバーナ火炎からの輻射伝熱を受けることにより、材料を積極的に分散させなくても加熱することが可能である。このように、リサイクル石膏は予熱されながら定率乾燥領域へ進んで行く。

(2)定率乾燥領域

図-7<sup>13)</sup>に示す定率乾燥領域は、加熱バーナの火炎が直接材料に届かない領域であるため、図-9<sup>13)</sup>のBB~DD断面に示す掻き揚げフライトを円周上に複数枚取り付けしている。そして、ロータリーキルンの回転に伴い掻き揚げフライトでリサイクル石膏を持ち上げて自由落下させ均一に分散させている。このようにして、リサイクル石膏を積極的に分散させることにより熱風との接触面積を大きくして熱交換効率を高めている。

また、この定率乾燥領域は、石膏に供給される熱エネルギーと石膏の表面水が蒸発するときに吸収する気化熱とがバランスする領域である。図-8<sup>13)</sup>に示す定率乾燥領域の材料温度のように温度の変化が生じない湿球温度と呼ばれる温度で安定すると考えられる。水の気化熱は、温度によっても異なるが、熱風中の水蒸気量(蒸気圧)により湿球温度が決定され、これにより水の気化熱も定まる。本稿で報告する半水石膏製造装置のロータリーキルンにおける湿球温度は概ね75℃で、その時の気化熱は2.31 MJ/kg (553 kcal/kg)である。

(3)加熱領域

加熱領域では、リサイクル石膏の表面水が蒸発して減少したところで熱エネルギーの授受バランスが崩れてリサイクル石膏の温度が上昇して行く。結晶水が脱離して二水石膏から半水石膏になるときの水和熱は17.25 MJ/kmol (4,120 kcal/kmol)で、130℃が石膏の一次沸点であることは既に述べた通りである。

水が常圧の下で100℃以上に温度が上昇しないのと同様に、二水石膏が存在する場合は130℃以上に温度は上

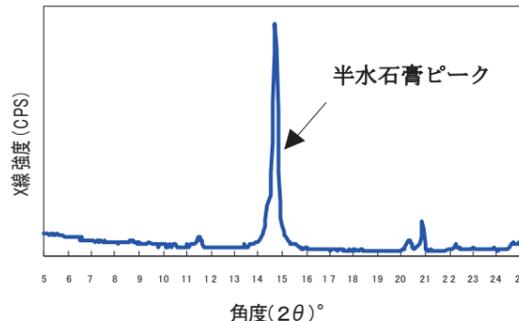


図-11 加熱処理後のリサイクル石膏のX線回折結果<sup>2)</sup>

昇しない。このため、ロータリーキルン出口の石膏温度を管理して、半水石膏の収率をコントロールすることは難しい。

したがって、本稿で報告する半水石膏製造システムでは、ロータリーキルン出口の排ガス温度を加熱バーナの燃焼量で比例制御する排ガス温度のフィードバック制御方式を採用している。

これにより、ロータリーキルン出口排ガス温度を80~200℃の任意の値に設定することで、二水石膏と半水石膏の割合を自在にコントロールすることを可能としている。たとえば、加熱処理した石膏中の半水石膏の割合が少ない場合には、排ガス温度の設定値を上げ、逆に半水石膏の割合が多い場合には、排ガス設定温度を下げるように調節を行う。

一方、パラレルフロー方式のロータリーキルンでは、図-8<sup>13)</sup>に示すように加熱処理後の材料温度 $t_2$ よりも排ガス温度 $T_2$ の方が高くなることから、ロータリーキルン内部で飛散したりリサイクル石膏の微粒子は、排ガス温度に近づきながらバグフィルタに導入され捕捉される。

石膏は、130℃の一次沸点を超えると、さらに結晶水が脱離してⅢ型の無水石膏となる。このときの水和熱は25.83 MJ/kmol (6,170 kcal/kmol)で、二水石膏から半水石膏になるときの水和熱よりも大きい値を示す。このことは、石膏の二次沸点が180℃と一次沸点よりも高い値を示すことで明らかである。また、二次沸点が存在する限り、一次沸点における半水石膏の収率と同様に、石膏の温度管理のみによりⅢ型無水石膏の収率を管理することは難しい。

これらのことから、本半水石膏製造装置は排ガス温度のコントロールにより、バグフィルタで捕捉される石膏の半水石膏とⅢ型無水石膏との比率を任意に管理することを可能にしている。

3.3.2 半水石膏製造装置の性能評価

(1)半水石膏の収率

石膏を加熱処理して生成する半水石膏の収率を評価する方法として、熱質量分析法、示差熱分析法、粉末X線回折法などがある。

熱質量分析法は、石膏を加熱して結晶水を脱離させ、質量が減少した差分で半水石膏の収率を求める方法である。この方法では、二水石膏、半水石膏、無水石膏の構成割合

表-2 移動式で製造した半水石膏のX線回折結果<sup>13)</sup>

種類	加熱処理前①		加熱処理後②		増減(②-①)	
	質量%	mol%	質量%	mol%	質量%	mol%
二水石膏	98.30	97.94	11.90	10.14	-86.40	-87.80
半水石膏	1.00	1.18	75.30	76.08	74.30	74.89
無水石膏	0.70	0.88	12.80	13.79	12.10	12.91

までを求めることはできない。また、表面水(付着水)の影響や加熱温度の管理が難しく、誤差が大きくなる傾向にある。

示差熱分析法は、石膏の結晶水が脱離する場合は吸熱反応、水和する場合は発熱反応になることから、熱エネルギーの授受(吸熱反応と発熱反応)をDTG曲線(示差熱質量分析:Differential Thermo-gravimetry)として表す。このDTG曲線の変曲点を特定して、二水石膏、半水石膏、無水石膏の割合を求めるが、変曲点の見極めが難しい。

これらのことから、粉末X線回折法を用いることで、二水石膏、半水石膏、無水石膏の割合を明確にすることが可能である。粉末X線回折分析から得られた加熱処理前のリサイクル石膏のX線回折パターンを図-10<sup>2)</sup>に、加熱処理後のリサイクル石膏のX線回折パターンを図-11<sup>2)</sup>に示す。図-10<sup>2)</sup>に現れたX線回折パターンは、二水石膏のパターンとほぼ一致しており、特に角度(2θ)が11°~12°付近で明瞭なピークを示している。この(2θ)が11°~12°付近のピークは二水石膏に特有のものである。

一方、図-11<sup>2)</sup>では、半水石膏のX線回折パターンで特有のピークが得られる角度(2θ = 14°~15°)付近において、明瞭なピークが認められる。これらX線回折パターンより、加熱処理の前後でピーク値が二水石膏から半水石膏へと相転移していることがわかる。さらに、これらX線回折パターンの面積を求め、それを用いて計算された加熱処理前と加熱処理後の構成割合を表-2<sup>13)</sup>と表-3<sup>2)</sup>に示す。

表-2<sup>13)</sup>は、移動式のX線回折結果であり、表-3<sup>2)</sup>は、定置式のX線回折結果である。なお、無水石膏の特有のピークは半水石膏と同程度の角度(2θ)で得られるので、その他のピークの値なども考慮して二水石膏と半水石膏に分類されなかった量として計算から求めている。

以上の結果から、水硬性の半水石膏とⅢ型無水石膏との質量%の合計は、移動式で1.7%から88.1%まで、定置式で1.7%から87.5%まで増加し、移動式の半水石膏収率に関して定置式とほぼ同等であることが明らかとなった。このことは、システムの大小を問わず半水石膏の品質が排ガス温度に極めて密接な関係にあることを裏付けている。

(2)熱効率

今回のX線回折結果に基づいて、移動式と定置式の熱効率を検討する。なお、熱効率は、有効熱量/入熱で定義される。有効熱量は水和熱、結晶水のエンタルピー変化、表面水のエンタルピー変化および石膏の顕熱の和で表される。

表-3 定置式で製造した半水石膏のX線回折結果<sup>2)</sup>

種類	加熱処理前①		加熱処理後②		増減(②-①)	
	質量%	mol%	質量%	mol%	質量%	mol%
二水石膏	98.30	97.94	12.50	10.67	-85.80	-87.27
半水石膏	1.00	1.18	76.50	77.46	75.50	76.27
無水石膏	0.70	0.88	11.0	11.87	10.30	10.99

表-4 移動式と定置式の熱効率と燃費比較<sup>13)</sup>

タイプ	熱効率 (%)	燃費 (t/トン)
定置式	82.6	24.7
移動式	80.8	25.3

まず、移動式は、1トン当たりのリサイクル石膏の処理に25.3リットルの重油を消費したことより、その燃費は25.3リットル/トン(A重油使用:低発熱量36.00 MJ/リットル(8,600 kcal/リットル))であった。したがって、その入熱は900.0 MJ (215,000 kcal)となる。

つぎに、有効熱量を計算する。加熱処理前のリサイクル石膏1トン当りの総mol数を、表-2<sup>13)</sup>を用いて計算すると、5,836 kmolとなる。前述した二水石膏および半水石膏を脱水する際の熱化学式(2)、(3)より、脱水反応に要する水和熱は、104.2 MJ (24,900 kcal)となる。

また、結晶水の脱離に要するエンタルピー変化は、38.51 MJ (92,000 kcal)となる。また、リサイクル石膏の含水比(表面水)を5.0%、表面水のロータリーキルン内部での湿球温度を75℃とすると、表面水の温度上昇に要するエンタルピー変化量は129.3 MJ (30,900 kcal)となる。

さらに、石膏を150℃まで加熱するのに要する顕熱は117.2 MJ (28,000 kcal)程度となることから、有効熱量は735.9 MJ (175,800 kcal)程度となる。このことから、熱効率は80.8%となる。

一方、移動式と定置式の熱効率と燃費の比較を表-4<sup>8)</sup>に示すが、定置式の熱効率が82.6%であったことから、本移動式から得られた熱効率80.8%の結果は、定置式より僅かに低い値となったが、十分満足な値であると考えられる。同様に、半水石膏を1トン当たり生産するのに必要な燃費を計算すると表-4のように定置式で24.7リットル/トン、移動式で25.3リットル/トンとなった。

なお、移動式の熱効率が僅かに低下した要因は、系全体の放散熱量やロータリーキルンへの侵入空気およびバーナ燃焼の過剰空気などが無効熱量となったことが考えられる。

(3)ばい煙

ばい煙とは、燃料を燃焼させたときに生じる燃焼ガス中の硫酸酸化物、窒素酸化物、ばい塵、その他政令で定める有害物質を意味し、大気汚染防止法でその排出量や排出濃

図-5 移動式と定置式のばい煙排出濃度

タイプ	硫黄 酸化物 (ppm)	窒素 酸化物 (ppm)	ばい塵 (g/Nm <sup>3</sup> )
定置式	3.2	26.3	0.01
移動式	3.1	25.0	0.01

度が厳しく規制されている。ばい煙の各項目を移動式と定置式とで比較した値を表-5に示す。

硫黄酸化物は、燃料に含有している硫黄分が燃料の燃焼に伴い酸化されて生成し、一酸化硫黄：SO、二酸化硫黄：SO<sub>2</sub>、三酸化硫黄：SO<sub>3</sub>などの硫黄酸化物として燃焼排ガス中に含まれる。これら硫黄酸化物は、酸性雨や大気汚染の原因物質であることから大気汚染防止法によりその排出量が厳しく規制されている。この硫黄酸化物の排出量や濃度は、燃料中の硫黄含有量により決定される。このため定置式ならびに移動式ともに同様の燃料を使用した場合、表-5に示すとおり硫黄酸化物の排出濃度に差は生じない。

硫黄酸化物の排出規制に関しては、地方自治体ごとにさらに厳しい上乗せ基準が存在することから設置場所によって異なる。ただし、硫黄酸化物の排出量は使用する燃料に含まれる硫黄成分により依存されることから、規制値の厳しい自治体で運用する場合は硫黄の含有量が少ない白灯油や都市ガスを使用することで規制値をクリアすることが可能である。なお、移動式は加熱バーナの燃焼量を毎時40リットル以下としていることから、大気汚染防止法のばい煙発生施設の届出義務の要件には該当しない。

窒素酸化物は、その生成プロセスの違いから2つに分けることができる。1つ目は、燃料由来で発生する窒素酸化物でFuel NO<sub>x</sub>と呼び、2つ目は、高温雰囲気中で空気中の窒素：N<sub>2</sub>と酸素：O<sub>2</sub>とが結合して生成する窒素酸化物でThermal NO<sub>x</sub>という。

Fuel NO<sub>x</sub>は、窒素分を含まない良質の燃料を使用する場合生成することはない。一方のThermal NO<sub>x</sub>は、空気中に含まれている79%の窒素と21%の酸素とが1,000℃以上の高温で結合し、一酸化窒素：NO、二酸化窒素：NO<sub>2</sub>などを生成する。

これらの窒素酸化物は酸性雨や高化学スモッグの原因物質の1つとしてその排出量や濃度が大気汚染防止法で厳しく規制されている。また、窒素酸化物の排出基準は硫黄酸化物同様地方自治体ごとに定める上乗せ基準が存在することから設置場所によってその規制値が異なる。定置式ならびに移動式の両者とも、表-5に示すとおり同等の低い値を示している。これは、燃焼ガスを自己再循環させる構造のバーナを採用したことによる。

技術的には、EGR(Exhaust Gas Recirculation:燃焼排ガスの再循環)システムを導入することにより、さらに厳しい規制

図-6 移動式と定置式の騒音と二酸化炭素排出量

タイプ	騒音 (dB)	二酸化炭素排出量 (kg-CO <sub>2</sub> /トン)
定置式	85.3	66.7
移動式	79.8	68.3

値(酸素濃度16%換算基準で16ppm)までの対応が可能である。なお、移動式に関しては、硫黄酸化物同様加熱バーナの燃焼量が毎時40リットルであることから届出の義務はない。

ばい塵濃度は、本システムの場合ロータリーキルンから排ガスに伴って飛散するリサイクル石膏の微粒子をバグフィルタで捕捉している。バグフィルタを吹き抜けてくる粒子状物質の濃度が規制対象なる。

移動式と定置式の両者ともバグフィルタを装備しており、バグフィルタに使用している濾布も同仕様のものを採用している。表-5に示すとおり規制値の0.5g/Nm<sup>3</sup>に対して0.01g/Nm<sup>3</sup>と1/20倍の値に収まっていることから、最も厳しい上乗せ基準が適応される地域でも対応が可能である。

(4)騒音

表-6に移動式と定置式の騒音に関する比較を示す。騒音の発生源としては、加熱バーナと排風機を挙げることができる。加熱バーナに関しては、移動式および定置式においてインバータ制御方式の送風機を採用していることから、本システムの側面1mの距離で80(dB)を下回っている。

定置式で最も騒音の発生源となるのが排風気である。定置式は、排風気の制御にインバータ制御を取り入れていないことから、85dBを超える騒音となっている。一般的に、定置式においては、建屋内部に設置されることや設置される敷地が広いことなどにより音圧レベルが減衰し、敷地境界での騒音は規制値をクリアしている。

一方、移動式の排風気制御にはインバータ制御方式を採用しているので全体の騒音を低下させるのに寄与している。移動式の側面1mにおいて80(dB)を下回っていることから、騒音規制における特段の対策は必要ないと考えられる。

(5)二酸化炭素排出量

表-6に示す二酸化炭素排出量は、システムの熱効率と使用する燃料の炭素含有量で決定される。表-4<sup>13)</sup>より、移動式の燃費が25.3リットル/トン、定置式の燃費が24.7リットル/トンであることより、A重油の二酸化炭素排出係数を2.7 kg-CO<sub>2</sub>/リットルとすると、半水石膏を1トン生産するのに、定置式では66.7kg-CO<sub>2</sub>/トン、移動式では68.3 kg-CO<sub>2</sub>/トンの二酸化炭素を排出することになる。

地球温室効果ガスである二酸化炭素の排出量は、このように炭素を含んだ化石燃料を燃焼させることにより発生するが、

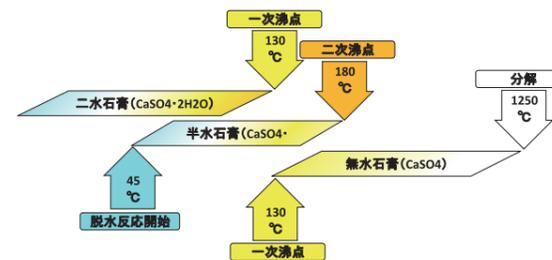


図-12 常圧下における石膏の相転移温度

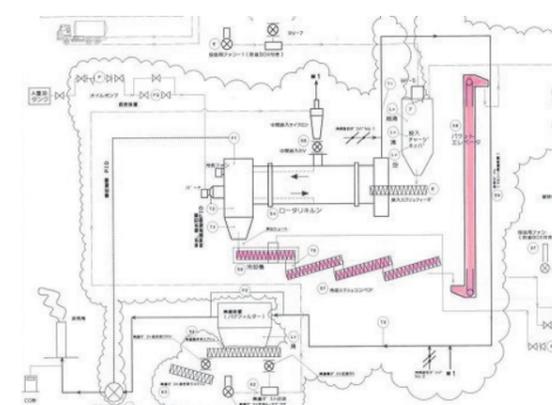


図-13 II型無水石膏製造装置のシステムフロー

システムの効率を上げることにより削減することができる。さらに、使用する燃料に関して、炭素含有量の少ない天然ガスなどを使用することにより単位発熱量当たり約25%の二酸化炭素排出量を削減することができる。

今後の課題として、さらに二酸化炭素の排出量を削減させるべくシステムの効率を改善させることが挙げられる。

4. II型無水石膏製造システム

4.1 概要

リサイクル石膏から製造した半水石膏の水硬性を利用して、軟弱地盤や土壌の改良材として有効活用する実施例が増加している<sup>1-11)</sup>。ただ、半水石膏は、空気中の湿気を吸収して二水石膏に相転移してしまうため、半水石膏の水硬性を活用する用途に対しては、その品質管理が難しい側面がある。

即ち、半水石膏を製造してから実際の現場で土壌の改良材として適用するまでの貯蔵期間が限定的となり、前以て半水石膏の作り置きをして、その取率を一定に管理することが難しくなる。このことから、半水石膏やIII型無水石膏を貯蔵する場合には、大気との接触を断つ必要があることから、セメントと同様の扱いが余儀なくされる。

さらに、石膏の一次沸点が130℃に存在するために石膏の加熱温度を制御して、半水石膏の取率を管理することが原理上できない。このことは、この一次沸点で石膏の加熱を続けても二水石膏が存在する限り温度が上昇せず、温度と半水石膏の取率との間に相関が取れないことを意味してい

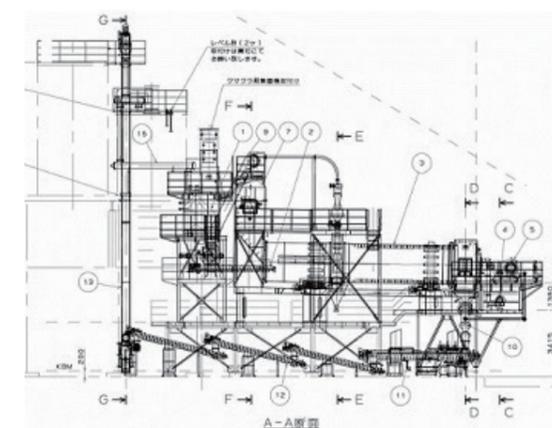


図-14 II型無水石膏製造装置の外観



写真-7 II型無水石膏製造装置の全景



写真-8 II型無水石膏製造装置のロータリーキルン

る。このような半水石膏が有している短所に鑑み、水和反応が極めて遅効性であるII型無水石膏を製造し、セメントとブレンドして土壌の改良材とする用途が増加の傾向にある。

II型無水石膏は、空気中の湿気を吸収して二水石膏に相転移することがほとんどないことから作り置きが可能となり、必要量に応じて計画的な製造が可能となる。また、石膏の二次沸点である180℃を大きく超えた350℃以上の領域で



写真-9 ロータリーキルンの内部(乾燥加熱領域)

Ⅲ型無水石膏からⅡ型無水石膏に相転移を起こすが、このとき潜熱が介在しないので石膏の温度管理によりⅡ型無水石膏の収率をコントロールすることが可能となる。

ここで、常圧下における石膏の相転移温度を図-12に示す。図より、二水石膏(CaSO<sub>4</sub>・2H<sub>2</sub>O)の沸点(一次沸点)が130℃に存在し、これ以上の温度域では二水石膏は存在することはできない。また、二水石膏は45℃から脱水反応が始まり半水石膏(CaSO<sub>4</sub>・1/2H<sub>2</sub>O)を生成するが、この半水石膏の沸点(二次沸点)が180℃に存在し、これ以上の温度域では半水石膏は存在することができない。

このようにして、半水石膏は45℃から180℃の温度域で存在することができる。さらに、半水石膏は、一次沸点である130℃から脱水が始まり無水石膏(CaSO<sub>4</sub>)を生成する。そして、二次沸点である180℃以上の温度域では、無水石膏のみが存在することができ、1,250℃で無水石膏が分解して酸化カルシウム(CaO)と三酸化硫黄(SO<sub>3</sub>)を生成する。加えて、無水石膏は、130～350℃の範囲でⅢ型無水石膏、350～1,000℃の範囲でⅡ型無水石膏、1,000～1,250℃でⅠ型無水石膏へと相転移して行く。

一方、今回新たに開発したⅡ型無水石膏製造装置の初号機は、設置上のレイアウトや排ガス温度などの制約により、カウンターフロー方式のロータリーキルンとしている。そのシステムフローを図-13に、その外観を図-14に、その全景を写真-7に示す。

図より、このシステムは、省エネルギー化をはかることと、耐熱温度に制約があるバグフィルタで排ガスに伴って来る微細石膏を回収するために、乾燥加熱領域と焼成領域を併せ持つカウンターフロー方式のロータリーキルンを採用して排ガス温度を低下させていることが特徴である。

#### 4.2 Ⅱ型無水石膏製造システムの特徴

写真-8は、カウンターフロー方式のロータリーキルンの全景を示している。なお、本ロータリーキルンは、写真右手側のリサイクル石膏投入部から、写真左手側の排出部に向かって2°傾斜させることにより、材料の流れを促進させている。

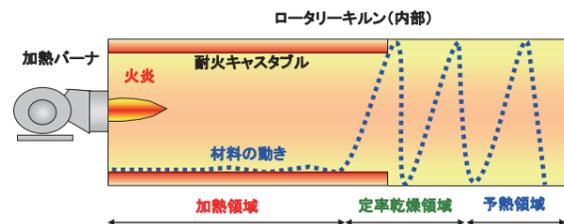


図-15 ロータリーキルン内部の材料の動き

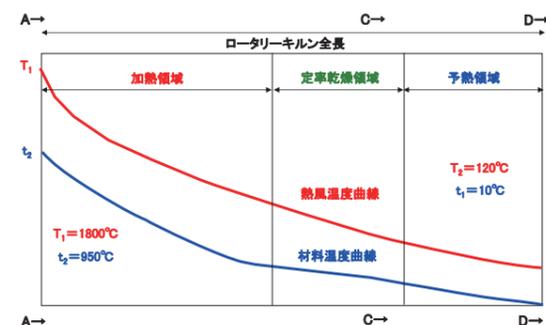


図-16 ロータリーキルンの内部の熱風温度と材料温度分布

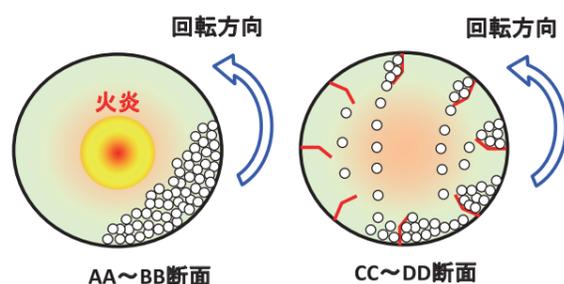


図-17 ロータリーキルンの内部断面

以下では、本ロータリーキルンの乾燥加熱領域と焼成領域ならびにⅡ型無水石膏製造装置の性能評価について詳細を述べる。

##### 4.2.1 乾燥加熱領域

写真-9は、奥手のリサイクル石膏投入スクリューから、手前のキルン中央部に至る乾燥加熱領域の内部を示している。写真より、キルンの回転方向は時計回りであり、リサイクル石膏を掻き上げて分散させるためのリフターを取り付けている。このリフターにより持ち上げたりサイクル石膏をシャワー状に分散して落下させ、熱風との熱交換を促進させている。

図-15は、ロータリーキルン内部の材料の動きを示しており、図の右手側から投入されたりサイクル石膏は、リフターで掻き上げられて分散落下しながら左手側へ進んで行く。そして、耐火キャスタブルの領域では、掻き上げられることなく、キルン底部を滑って左手側へ進んで行く様子を表している。

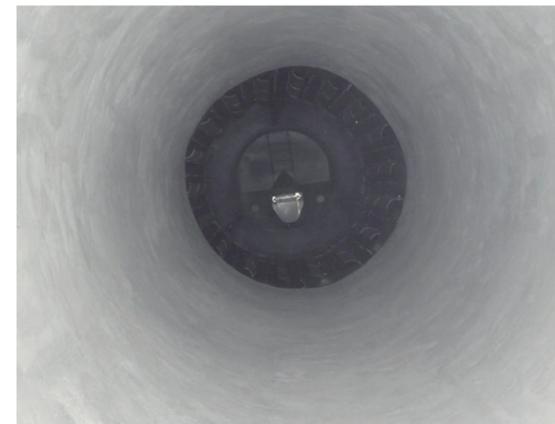


写真-10 ロータリーキルンの内部(焼成領域)

また、図の右手側より、材料の予熱領域、定率乾燥領域、加熱領域を示している。予熱領域は、材料ならびに表面水の温度が上昇する領域で顕熱が支配的な領域である。定率乾燥領域は、表面水の気化熱ならびに結晶水の脱離に熱エネルギーが消費される潜熱が支配的となり、温度変化が極めて緩慢な領域である。加熱領域は、石膏の一次沸点ならびに二次沸点以上の温度域で、受熱量に比例して温度が上昇する顕熱が支配的となる領域である。

図-16は、ロータリーキルン内部の熱風温度と材料温度の分布を示しており、それぞれの領域は図-15に対応している。図より、本ロータリーキルンは、カウンターフロー方式としていることから、排ガス温度T<sub>2</sub>を材料加熱温度のt<sub>2</sub>よりも下げることができ、対数平均温度差をパラレルフロー方式に比べて大きく採ることが可能で、熱効率に優れている。

図-17は、ロータリーキルンの断面を示しており、AA～BB断面は耐火キャスタブルを施工した焼成領域を、CC～DD断面は写真-9に示すリフターを取り付けた乾燥加熱領域を示している。

一方、写真-9の手前に見える長方形のボックスは、乾燥加熱領域の終端部に設けた石膏の中間投入口であり、バグフィルタで捕捉回収した半水石膏をここから再投入し焼成領域に送り込んでいる。

本ロータリーキルンは、カウンターフロー方式を基本原理として採用していることから、内部のリフターで掻き上げられて分散するリサイクル石膏は、その一部の微細石膏が排ガスに伴ってロータリーキルンから飛び出しバグフィルタで捕捉回収される。このときの排ガス温度が120～150℃で管理されていることから、図-12から明らかのように、これらの微細石膏には半水石膏とⅢ型無水石膏とが共存しており、二水石膏はほとんど含まれていないと考えられる。

また、バグフィルタで回収した微細石膏は、そのまま取り出すと一部Ⅲ型無水石膏を含んでいるが、半水石膏として有効利用することが可能である。このことは、Ⅲ型無水石膏の水和熱が半水石膏のそれを上回ることから、空気中の湿気などを優先的に吸収して半水石膏に相転移するためである。した

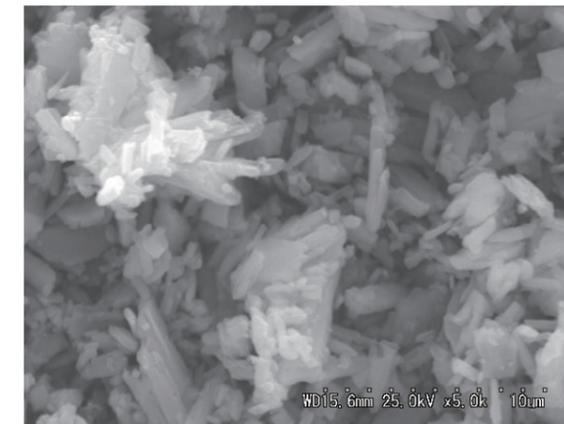


写真-11 二水石膏のSEM ×5,000倍



写真-12 Ⅱ型無水石膏のSEM ×5,000倍

がって、図-12でも示すように、Ⅲ型無水石膏が混在している半水石膏には、二水石膏がほとんど存在し得ない。

##### 4.2.2 焼成領域と冷却

写真-10は、キルンの中央部から排出側に至る焼成領域の内部を示している。写真奥手の乾燥加熱領域を通過してきた比較的粒度の大きなリサイクル石膏は、耐火キャスタブルを施工した写真手前の焼成領域に流れ込んでくる。また、繰り返しになるが排ガスに伴って飛散した微細石膏の一部は、バグフィルタで捕捉回収されて、ロータリーキルンの中央部から再びロータリーキルンに投入され、焼成領域に流れ込んでくる。

なお、この焼成領域は、耐火キャスタブルを施工して分散用のリフターを設けていないことから、飛散する微細石膏は極めて少なくなる。このことは、ロータリーキルン内部を流れる熱風の速度分布が、キルンの中心部が最も速く、キルン中心部から耐火キャスタブルに近づくにつれ、その風速は低下し、耐火キャスタブル表面では限りなくゼロに近づいているためである。

焼成領域における石膏の加熱のメカニズムは、図-17の

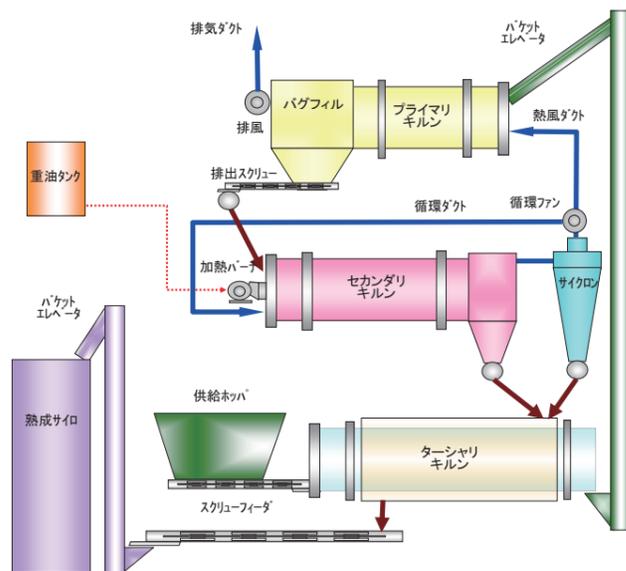


図-18 省エネルギー型のII型無水石膏製造システム

AA～BB断面に示すように、バーナ燃焼により発生する熱風および火炎からの輻射熱を耐火キャスタブルが受けて蓄熱する。そして、高温に蓄熱した耐火キャスタブルからの接触伝熱およびバーナ火炎と蓄熱した耐火キャスタブルから輻射する赤外線や遠赤外線を受けて、石膏が加熱され温度が上昇して行く。なお、高温領域においては、接触伝熱よりも輻射伝熱が支配的となる。このことは、ステファン・ボルツマンの法則によると、輻射伝熱は温度差の4乗に比例することは既に述べた通りである。

焼成領域で950～1,000℃に加熱したII型無水石膏は、ロータリーキルンから冷却装置に送られる。この冷却装置は、ウォータージャケットを備えたスクリー方式である。スクリーの軸を中空とし、ここに冷却用の水を通して。そして、熱を吸収して昇温した冷却水を、高温のII型無水石膏に直接噴霧し冷却効率を高めている。間接加熱方式の冷却器の性能は、熱伝達率とその接触面積に支配され、大きな熱交換面積を必要とする。

一方の水の直接噴霧は、この伝熱面積が石膏の表面積に相当することから、桁違いの熱交換面積を有することになる。さらに、水の潜熱を利用することから、そのエネルギー密度は極めて大きい。

#### 4.2.3 II型無水石膏製造装置の性能評価

##### (1) II型無水石膏の品質

セメントやセメント系固化剤の原材料として適用するII型無水石膏の物理特性として、1.0 g/cm<sup>3</sup>以上の密度が要求される。このことは、セメントの比重に近づけてブレンド性能を高めるためである。

写真-11は、焼成前のリサイクル石膏(二水石膏)のSEM(5,000倍)を示す。写真より、円柱状の二水石膏の結晶が絡まっている様子がわかる。また、二水石膏およびβ型の半水石膏の密度は、両者とも0.8～0.9 g/cm<sup>3</sup>を示している。

石膏は、常圧下で加熱処理を受けるとβ型の半水石膏を経てβ型のIII型無水石膏となり、350℃以上の温度でII型無水石膏となる。β型半水石膏は、3/2結晶水が離脱することから、これら結晶水が抜けた所が欠損となり密度が低下するものと考えられる。この密度を上げるためには、350℃からさらに温度を上昇させて950～1,000℃の焼結領域まで加熱する必要がある。

写真-12は、950～1,000℃で焼成したII型無水石膏のSEM(5,000倍)を示す。写真より、III型無水石膏の結晶が球状を帯びていることがわかる。この焼結は、石膏が完全に溶融するのではなく、半個体状態で結晶が成長して行く領域である。この温度領域で結晶が成長し、その密度が増大して行く。実際の運用では、1.1～1.2 g/cm<sup>3</sup>の密度範囲で管理している。

なお、石膏を1,050℃以上の高温にすると、I型無水石膏へ相転移を起し、1,250℃以上に加熱することで分解が始まり、酸化カルシウム(CaO)と三酸化硫黄(SO<sub>3</sub>)が生成する。この硫黄酸化物は、大気汚染防止法での規制対象物質である。

##### (2) 燃費性能

燃料消費量に関して、カウンターフロー方式の乾燥加熱領域を設けたことにより、熱風が有している熱エネルギーを効率よく石膏の予熱として吸収することができる。排ガス温度が、120～150℃の範囲でコントロールが出来ることから、その熱効率率は80%近くを達成している。ただ、石膏の加熱温度が1,000℃前後となることから、燃料消費量ならびに二酸化炭素発生量は、半水石膏製造装置の2倍近くになることは否めない。

##### (3) エミッション

リサイクル石膏を極度に加熱し過ぎると、石膏が分解して

硫黄酸化物(三酸化硫黄:SO<sub>3</sub>)が生成する。これは、本II型無水石膏製造装置が、カウンターフロー方式を採用していることから、最も温度が高いバーナ火炎の近傍に、950～1,000℃に加熱されたりサイクル石膏が近づいてくるためである。このことから、局部的に石膏の分解温度である1,250℃以上に加熱され易くなり、分解して硫黄酸化物が生成する。したがって、II型無水石膏の密度を高めること、硫黄酸化物の発生量を抑えることが最も重要な運用ノウハウとなる。

#### 5. 半水石膏とII型無水石膏の製造システムの将来展望

廃石膏ボードから製造したりサイクル石膏から、半水石膏とII型無水石膏を製造するための省エネルギー型の製造システムの構想を図-18に示す。図より、プライマリキルン、セカンダリキルン、ターシャリキルンの3基のキルンを備えている。

プライマリキルンは、熱風と被加熱物が同一方向に流れるパラレルフロー方式とし、メタリック構造で内部にリフターを設けて被加熱物の分散を改善している。このことにより、熱風との接触面積が増大し、効率よく熱交換を行うことが可能である。

まず、ターシャリキルンで予熱したりサイクル石膏をバケットエレベータで搬送し、プライマリキルンに投入している。そして、プライマリキルンの熱風は、セカンダリキルンの排ガスを熱源として導入している。ここで、二水石膏であるリサイクル石膏を、約130℃まで加熱して半水石膏を製造している。この半水石膏は、単独で取り出すことも可能であるが、II型無水石膏を製造する場合は、これをセカンダリキルンに導入する。

セカンダリキルンは、プライマリキルン同様に熱風と被加熱物が同一方向に流れるパラレルフロー方式とし、内面に耐火キャスタブルを施工した構造としている。バーナの燃焼により発生した熱風を導入し、熱風からの接触伝熱とバーナ火炎からの輻射伝熱により、耐火キャスタブルを蓄熱し、石膏を加熱する。

特に、接触伝熱は温度差に比例するが、輻射伝熱は温度差の4乗に比例することから、500℃を超える高温領域では、接触伝熱よりも輻射伝熱が支配的となる。このようにして、半水石膏を950～1,000℃に加熱してII型無水石膏を得るようにしている。

ターシャリキルンは、メタリック構造とし、外面に高温のII型無水石膏を導入してターシャリキルンを加熱する。接触面積を大きく取るためにキルン外周に伝熱フィンを設け、II型無水石膏からの熱回収を促進している。キルン内部にリサイクル石膏を投入し、それを攪拌して熱伝達を促進するためのリフターを設けている。このとき、外部のII型無水石膏と内部のリサイクル石膏の流れ方向は、互いに向かい合うカウンターフロー方式としている。これにより、温度効率を大きく取ることができる。

以上のように、II型無水石膏の顕熱を利用してリサイクル石膏の予熱を行うためのターシャリキルンを備えることにより、リサイクル石膏の表面水5%に相当する熱エネルギーの省エネルギー化をはかることが可能となり、従来システムのII型無水石膏製造装置にくらべて約15%の省エネルギー化が可能となる。

#### 6. おわりに

石灰石は、資源の乏しい我が国において、国内で数少ない自給可能な鉱物資源である。我が国には、高品位の石灰岩が各地に大量に賦存する。明治の時代、殖産興業として発足した八幡製鉄所や宇部セメントで、これらの石灰石による不純物の除去や原材料としての使用が始まっている。今では、製鉄やセメントは元より、電力、ガラス、製紙、建築、土木、食品、医療など、ありとあらゆる製品や製造プロセスで直接的または間接的に石灰が使用されている。

これも、賦存量が豊富な国内鉱物資源であるがため、早くより各地で採掘され、その流通網が整備されたことによるものと考えられる。また、石灰は、石灰石(炭酸カルシウム:CaCO<sub>3</sub>)を焼成して生石灰(CaO)を生成し、水を添加して消石灰(Ca(OH)<sub>2</sub>)とするなど、その種類と用途は多様である。

中でも、炭酸カルシウム、生石灰、消石灰などは、化石燃料の燃焼により生成する酸性ガスの中和剤として利用されている。化石燃料の多くは硫黄を含有しており、これが燃焼することにより硫黄酸化物が生成し、光化学スモッグや酸性雨などの公害の原因となる。このことから、大気汚染防止法で厳しく硫黄酸化物の排出濃度や排出量が規制されている。特に、化石燃料を多用する火力発電や重化学工業の脱硫剤としてこれら石灰が用いられ、副産物として排煙脱硫石膏または化学石膏と呼ばれる石膏を得ている。

これら化学石膏の用途として、筆記具のチョーク、運動場の白線、農業用肥料などとして一部有効利用されているが、その生成量が莫大であることから建築資材である石膏ボードの原材料として、その多くがリサイクルされている。

また、建築物を解体した時に発生する廃石膏ボードを、再び石膏ボードとしてリサイクルする動きもあるが、これが増大すると排煙脱硫石膏の用途がたちまち逼迫してしまう。このように、各種石灰の需要と供給のバランスをはかりながら、これら石灰資源をカスケード利用することが環境的にも経済的にも最も合理的な利用方法であると考えられる。

即ち、地中から採掘した石灰を燃焼排ガスの中和剤として利用し、得られた石膏から石膏ボードを製造して建築資材としての役割を一定年数担った後に、その廃石膏ボードを土壌の改良材として再び地中に戻すことで石灰を3度有効利用することができる。

一方、国は、廃石膏ボードのリサイクル技術の確立が未熟

であるとの立場から、建設リサイクル法における特定建設資材としての廃石膏ボードの指定を見送っている。しかしながら、民間レベルで廃石膏ボードのリサイクルに関する研究会が各地で立ち上がり、情報交換や研究報告などが精力的に行われている。そして、行政や大学を巻き込んだ産官学連携の形で、そのリサイクル用途の開発や実証試験が絶え間なく行われている。

廃石膏ボードの発生量は、特定建設資材に指定されているコンクリート塊やアスファルト・コンクリート塊に比べその発生量が1/20程度の120万トンに過ぎない。コンクリート塊は約3,500万トン、アスファルト・コンクリート塊は約2,500万トンに発生している。

しかしながら、廃石膏ボードの特殊性から、その最終処分場が管理型となり、その処分費用は1～3万円とコンクリート塊やアスファルト・コンクリート塊にくらべて約20倍の価格となっている。このことから、その市場規模は、コンクリート塊やアスファルト・コンクリート塊と同等の300～400億円規模と見なすことができ、今後そのリサイクル技術が確立することにより、有望なリサイクル市場となり得る可能性が示唆される。

#### 参考文献

- 1) 蓬萊秀人：廃石膏ボードの加熱リサイクルシステム 廃石膏ボード粉砕粉からの半水石膏製造プロセスについて、環境浄化技術, Vol.6, No.9, pp.58-64, 2007.
- 2) 蓬萊秀人, 亀井健史：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.
- 3) 蓬萊秀人：廃石膏ボード再資源化への道 各社の廃石膏ボード再資源化技術と取り組み 廃石膏ボードの加熱リサイクルシステム 日工(株), いんだすと, Vol.3, No.10, pp.38-39, 2008.
- 4) 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.
- 5) 亀井健史, 蓬萊秀人：半水石膏・石灰・高炉セメントB種を用いた安定処理度中のフッ素・六価クロム・ホウ素の不溶化-廃石膏ボードのリサイクル化-, 地盤工学ジャーナル, Vol.5, No.3, pp.449-461, 2010.
- 6) 蓬萊秀人, 亀井健史, 松田哲夫：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, 2011.

- 7) 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.
- 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, pp.29-36, 2014.
- 9) KAMEI Takeshi, HORAI Hideto: A novel solidification technique for fluorine-contaminated bassanite using waste materials in ground improvement applications, J Mater Cycl Waste Manag, Vol.17, No.2, pp.380-390, 2015.
- 10) 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.
- 11) 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壌への適用性, 地盤と建設, Vol.36, No.1, pp.31-38, 2018.
- 12) 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.138-143, 1996.
- 13) 蓬萊秀人, 亀井健史, 鶴飼恵三：半水石膏生産システムの小型化・その能力と地盤改良材としての可能性, 土木構造・材料論文集, Vol.28, No.1, pp.104-114, 2012.

#### 筆者紹介



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



KAMIO Masahiro  
神尾 昌宏  
博士(工学)  
1998年入社  
エンジニアリング部



FUJITO Yoshihiro  
藤戸 幹大  
2005年入社  
エンジニアリング部

## Development of Manufacturing System for Hemihydrate Gypsum and Type II Anhydrous Gypsum

Hideto HORAI<sup>1</sup>, Masahiro KAMIO<sup>1</sup>, Yoshihiro FUJITO<sup>1</sup>

1 Nikko Co. Ltd. Engineering Division

### Abstract

Plaster boards have been widely used as building materials because of their excellent fire resistance, economy, workability, etc. However, the amount of waste plaster board generated by dismantling of buildings and houses, reflecting the production volume has turned to an increasing trend in recent years. Because of this social background, problems such as soaring disposal cost of waste plaster board due to insufficient capacity of the final disposal site and illegal dumping are pointed out, so development of recycling technology for waste plaster board is an urgent issue. The authors have developed a system for manufacturing bassanite from waste plaster boards in advance and put them on the market. In addition, we are developing a system for manufacturing type II anhydrous gypsum to expand its recycling application. We report the outline and characteristics of these manufacturing systems.

Key words: waste gypsum board, bassanite, type II anhydrous gypsum, rotary kiln, heat sintering

# 油汚染土壌に対する熱処理修復技術の応用

Application of the Thermal Remediation Technique for the Oil Contaminated Soil

神尾昌宏 KAMIO Masahiro (日工(株)技術本部研究開発センター)  
 蓬萊秀人 HORAI Hideto (日工(株)技術本部研究開発センター)  
 亀井健史 KAMEI Takeshi (宮崎大学工学部社会環境システム工学科)

表-2 発癌性の高い多環芳香族炭化水素の毒性換算係数と沸点(一部追加)<sup>5)</sup>

化合物名 (-)	化学式 (-)	分子量 (g/mol)	毒性換算係数 (WHO) (TEF)	沸点 (°C)
Benz(a)-anthracene	C <sub>18</sub> H <sub>12</sub>	228.3	0.045	438
Benzo(b)-fluoranthene	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	252.3	0.120	481
Benzo(k)-fluoranthene	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	252.3	0.032	480
Benzo(a)-pyrene	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	252.3	1.000	495
Dibenz(a,h)-anthracene	C <sub>22</sub> H <sub>14</sub>	278.4	2.100	524
Indeno(1,2,3-cd)-pyrene	C <sub>22</sub> H <sub>12</sub>	276.3	0.120	536

一般に、油汚染土壌を修復する技術は、微生物処理・洗浄処理及び熱処理の三つに大きく分類される。その中で熱処理による方法は、他の工法と比較して短期間で浄化が可能であり、浄化能力が高いことがわかっている。しかしながら、加熱処理を行う工程において、多量のエネルギーを消費するため高い環境負荷が生じる。本研究では、従来開発されてきたシステムに土壌の加熱温度を高めることで浄化能力を改善し、さらに、高温の排気ガスから熱を回収することで省エネルギー化を推進した新たなシステムを開発した。また、本システムの実地盤への適用性を検討するため、実際の汚染土壌地盤に対して本土壌浄化システムを適用することにより、その工学的有用性を検討した。

キーワード: 油汚染土壌, 熱処理, 酸化分解, 修復, 省エネルギー (IGC:T14)

## 1. 諸言

一般に、油汚染土壌の浄化方法としては、微生物処理、洗浄処理、加熱処理などが主に実際の浄化工事で適用されている。各手法は、油汚染の種類や濃度、汚染サイトの大きさや周辺環境によってその適用範囲が異なる<sup>1)</sup>。表-1に各種浄化方法を比較した結果を示す。

微生物処理は、微生物によって油分を二酸化炭素と水に分解を行い無害化する方法である<sup>2)</sup>。この方法においては、浄化コストが低いが微生物の活性や油分分解能力が浄化に大きく影響するため、浄化工期や浄化の確実性は他の工法に比べて劣る<sup>1)</sup>。また、洗浄処理は汚染土壌を洗浄プラントで分級することにより土壌の浄化を行う。このシステムでは、加熱処理と同様に短期間で浄化処理することが可能であるが、シルト分が多く含まれている土壌に対しては、洗浄残渣(汚染物質が濃縮された土壌の細粒分)が多く排出さ

れるため、その二次処理が必要不可欠となる。

一方、加熱処理については、洗浄処理と異なり汚染物質をすべて装置の系内において浄化処理ができることや短期間で確実に浄化できること等の特長がある。土壌の加熱温度を高温にすると浄化が困難と言われている重質油の汚染まで対応することが可能となるが、その反面多くのエネルギーを消費し、環境側面において課題が残る<sup>3)</sup>。

我が国では、土壌汚染の対策として2003年に土壌汚染対策法が施行された。その中で油に対する環境基準値は、ベンゼン(C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>: 溶出基準0.01mg/L)のみが第一種特定有害物質として規定されているが、その他の炭化水素の基準値は設けられていない。一方、「油汚染対策ガイドライン」は、生活環境の保全を目的としているため、油臭や油膜の有無で汚染の判断を行っている<sup>4)</sup>。

大気汚染については、自動車や様々な燃焼設備から排出される多環芳香族炭化水素(Polycyclic Aromatic Hydrocarbon: PAHs)が存在するが、これらのヒトへの健康に対する影響が注目されている<sup>5)</sup>。多環芳香族炭化水素は非常に多くの種類があり、発癌性を示す可能性が高いものがある<sup>6)</sup>。表-2に特に発癌性の可能性の高い多環芳香族炭化水素の化学式、分子量、世界保健機構(WHO)による毒性換算係数、沸点の一覧を示す。我が国においては、ベンゾ(a)ピレンは大気汚染防止法の「有害大気汚染物質」の「優先取り組み物質」の一つに指定されており、多環芳香族炭化水素の中で最も有害性が懸念されている。

多環芳香族炭化水素は、元来原油に含まれていることから石油や石炭の残渣物による油汚染土壌にもこれらの汚染物質を含んでいる。土壌汚染対策法における他の特定有害物質と同様に、これらの物質を口や肌などから直接摂取することで、ヒトの健康へ悪影響をおよぼす恐れがある。種々の油汚染の中でも、発癌性の高いこれらの物質を浄化することは極めて重要である。また、沸点が高い多環芳香族炭化水素を浄化するためには、土壌の加熱温度を高める必要がある。

本研究では、土壌の処理温度を高めることにより浄化可能な油汚染の種類を拡大し、省エネルギー化を推進した新たな土壌浄化システムの開発を行った。さらに、実地盤の汚染土壌浄化に対して、その新たなシステムを適用し、浄化性能と有用性の検討を行った。



写真-1 本研究で開発した油汚染土壌浄化システム

う工事に適したシステムである。軽質油・重質油・タール・ピッチ等の多くの種類の油汚染があるが、200~400℃の加熱温度でこれらの汚染を浄化することができる。しかし、土質や油の種類さらには汚染濃度によって、十分な浄化性能が得られないことがある。従来のシステム<sup>7)</sup>では、土壌を処理温度まで加熱する一次処理キルンの排気ガスと混合して飛散する微細土粒子に関しては、加熱温度が低いために浄化状態が悪く、残留油分が多い傾向が認められた。従来のシステムではその対策として細粒分のみを再度集め、温度を高めて処理する微細土粒子キルンを用いることで、浄化能力を改善することが可能となった。

一方、上記したように油汚染土壌に含まれている多環芳香族炭化水素には沸点が400℃以上のものが多くあり、400℃以下の加熱温度で十分な浄化性能を期待することはできない。そのため、本システムではより高温条件下で汚染土壌の処理を可能とすることを目標とした。これが実現すれば、沸点の高い炭化水素まで浄化範囲が広がり、本システムの浄化性能をさらに高めることができる。

本研究で開発した油汚染土壌浄化システムを写真-1に示す。本システムの大きな特徴は、上記した浄化性能の向上に加えて、土壌予備乾燥装置と大型の熱交換器を新たに設けることで高温排気ガスからの熱回収を行う省エネルギー化である。土壌の高温処理による浄化性能の向上に

## 2. 本研究で開発した油汚染土壌浄化システム

### 2.1 概要

本土壌浄化システムは、土壌を加熱することにより汚染油を揮発させ、土壌から汚染油を脱着する工法である。土壌から揮発した油分を含む排気ガスは、二次燃焼室で800℃以上に加熱することで、熱分解し無害化する。

これまで筆者らが開発した従来の土壌浄化システム<sup>7)</sup>は、土壌の加熱温度が200~400℃の比較的低温度で処理を行うものであり、重油相当までの汚染を大量に浄化を行

表-1 各種浄化方法の比較

浄化方法	原位置処理		掘削後場内処理 (オンサイト処理)				掘削後場外処理 (オフサイト処理)
	ガス吸引	微生物処理	微生物処理	洗浄処理	揮発処理	加熱処理	場外搬出
浄化性能	△	△	△	○	○	◎	◎
浄化工期	△	△	△	○	○	◎	◎
浄化コスト	◎	◎	○	△	○	△	×
環境負荷	◎	◎	○	△	○	△	×
後処理	吸引したガスの処理	無し	無し	洗浄残渣の処理	揮発したガスの処理	無し	オフサイトでの処理、産業廃棄物処分場での処理が必要
特徴	吸引したガスの処理が必要になる	微生物の油分解能力で浄化性能が支配される	微生物の油分解能力で浄化性能が支配される	シルト質の土壌においては多量の残渣が発生する	揮発性の高い汚染物質のみ処理可能である	土壌を加熱し汚染物質を強制的に脱着するので、浄化が確実に行える	最も確実に処理が可能であるが、浄化コストが最も高くなる

◎:非常に良好, ○:良好, △:普通, ×:不良

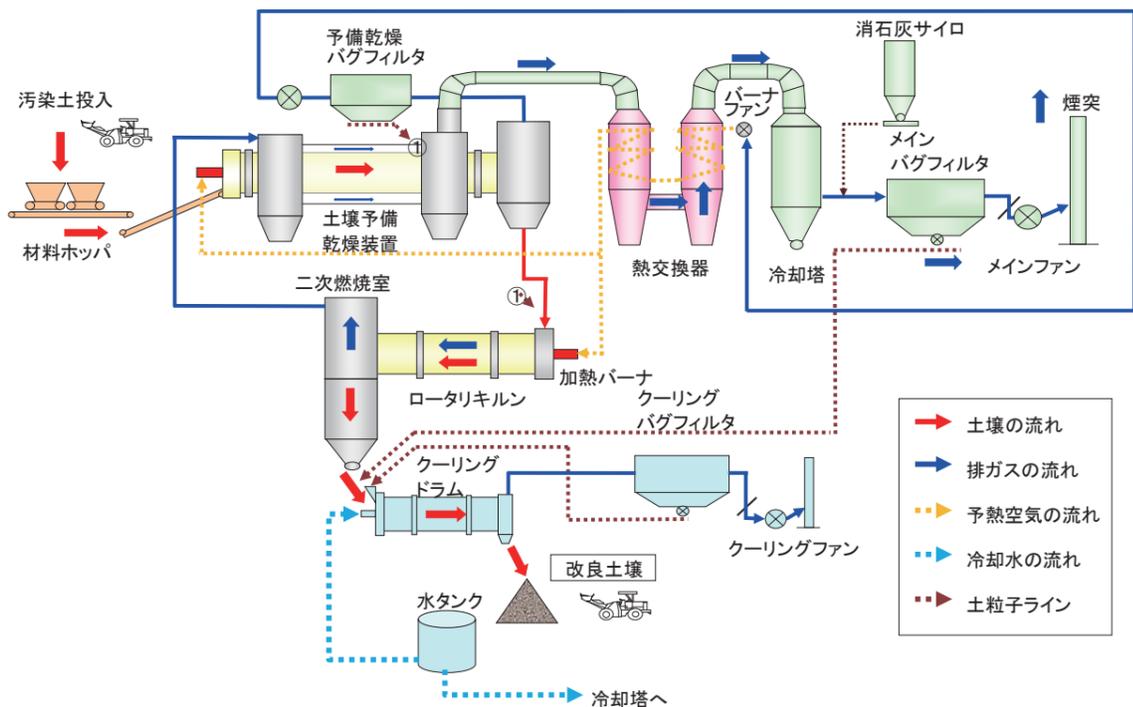


図-1 本研究で開発した油汚染土壌浄化システム

よって、加熱に必要なエネルギーの使用量は増加するが、高温の排気ガスから熱回収を行うことでこれを改善し、浄化性能の向上と省エネルギー化の両立化を図っている。

本研究で開発した新たな省エネルギー機器を備えた油汚染土壌浄化システムを図-1に示す。これまでに筆者らが開発してきたシステム<sup>7)</sup>の場合、土壌を加熱する一次処理キルンは、内部を鋼板製で断熱二重構造としていた。この場合400℃まで土壌を加熱することができるが、それ以上の加熱温度になると鋼板製の装置では対応できなかった。そのため、今回のシステムではロータリキルンの内部に耐火材を施工することで、土壌の加熱温度を600℃以上まで高めることを可能とした。さらに、土壌の加熱温度が高まることで、加熱した土壌の搬送を行う装置に耐熱性を持たせる必要がある。これについては、装置の材質を耐熱性の高いものに変更することや、水冷式の構造とすることで対処した。

## 2.2 土壌処理の流れ

### 2.2.1 土壌予備乾燥装置(予備乾燥, 排気ガス熱回収)

油汚染土壌は、重機によって材料ホッパに投入された後ホッパ下部に設けられたベルトフィーダによって、土壌予備乾燥装置に定量的に供給される。土壌予備乾燥装置は、間接加熱式のロータリキルン方式を採用しており、内筒の外側に

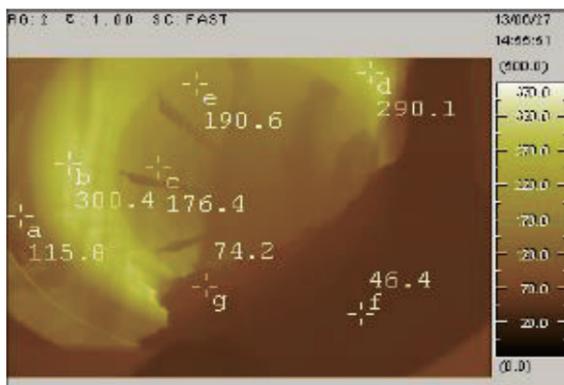


写真-2 土壌予備乾燥装置内部の熱画像(土壌入口側)

通過する約800℃の排気ガスと内側を移動する土壌を鋼板製のシェルを介して熱交換を行う。処理前における土壌の自然含水比は通常30%近くあるが、間接加熱キルンの出口では本装置で乾燥されて10%近くまで低下する。また、沸点の低い揮発性の高いVOC等の汚染物質は、ここで土壌から熱脱着される。土壌予備乾燥装置において発生するオフガスは、汚染物質を含むため加熱バーナの燃焼用の空気として利用し、ロータリキルン・二次燃焼室において熱分解処理を行う。土壌予備乾燥装置内部の熱画像を写真-2に示す。内筒の表面温度は高いところで300℃を示していることが確認できる。

### 2.2.2 ロータリキルン(土壌の乾燥・加熱・分級)

ロータリキルンにおいてはバーナで発生させた熱エネルギーと土壌を熱交換し、所定の処理温度まで加熱する。従来のシステム<sup>7)</sup>では、鋼板製のロータリキルンに羽根を設けて、土壌を掻き上げてペールを形成することで、熱風と土壌の熱交換を行っていた。本システムにおいては土壌の加熱温度が400℃以上になるため、上記したようにキルン内部に耐火材を施工し耐熱性を高めている。また、バーナ火炎による輻射によって耐火材を加熱し、土壌と耐火材の接触伝熱で土壌の加熱処理を行う。加熱バーナの燃焼量は、二次燃焼室が設定温度(820℃)になるように制御を行うが、土壌の加熱温度は、ロータリキルンの回転数を変化させることでコントロールする。土壌に含まれる微細土粒子は、排気ガスの流れに乗って飛散し、土壌予備乾燥装置の排気ガスが通過する滞留室や熱交換器、バグフィルタにおいて回収される。微細土粒子は150μm以下の粒径の土粒子であることから熱容量が小さい。そのため、二次燃焼室の排気ガス温度付近まで短時間で上昇し高温で加熱処理される。

### 2.2.3 クーリングドラム(土壌の冷却・調湿)

加熱された土壌は400℃以上の高温であるため、クーリングドラムにおいて水を噴霧することで冷却する。また、粉じんの発生を防止する目的で、冷却と同時に調湿も行う。装置の各所で回収された微細土粒子は、クーリングドラムへ供給されて土壌と一緒に混合を行ってから排出する。

## 2.3 排気ガス処理の流れ

### 2.3.1 二次燃焼室(汚染物質の熱分解)

二次燃焼室においては、ロータリキルンから排出された排気ガスの処理を行う。具体的には、排気ガスを800℃以上で2秒間滞留させて、揮発した汚染物質やダイオキシン等を熱分解する。

汚染土壌に含まれる油分の大半は、土粒子の表面に付着して存在しており、微細土粒子は粗粒土粒子に比較して単位重量当たりの表面積(比表面積)が大きいことから、油による汚染濃度が高い<sup>8)</sup>。微細土粒子は、ロータリキルンから排出される排気ガスの流れに乗って飛散するため、二次燃焼室において排気ガスと一緒に滞留し、800℃以上の高温雰囲気中で加熱処理される。

### 2.3.2 土壌予備乾燥装置(排気ガスからの熱回収)

本装置においては、排気ガスの熱エネルギーを利用することで、土壌の予備乾燥を間接的に行う。二次燃焼室で

800℃に加熱された排気ガスは、600℃程度まで本装置で熱回収される。土壌予備乾燥装置内部で発生した水蒸気や揮発した汚染物質を含むオフガスは、予備乾燥バグフィルタで微細土粒子を集塵した後に熱交換器に導入される。このオフガスは、ロータリキルンの加熱バーナの燃焼用空気として用いられる。

### 2.3.3 熱交換器(排気ガスからの熱回収)

土壌予備乾燥装置からの排気ガスは600℃程度あり、さらに熱エネルギーを回収することが可能である。そのため、熱交換器において排気ガスと加熱バーナ用の燃焼空気の熱交換を行う。熱交換後の排気ガスは400℃程度になる。一方、バーナ燃焼用空気は80℃から350℃程度に昇温される。

### 2.3.4 冷却塔(排気ガスの急冷却)

二次燃焼室において排気ガスは800℃以上で2秒間滞留し、ダイオキシンを熱分解する。ダイオキシンは、200~400℃の温度域で再合成するため、この温度域を冷却塔で急冷却し再合成を抑制する。排気ガス中に直接、2流体ノズルを用いて水を微粒化して散水し180℃まで冷却を行う。

### 2.3.5 バグフィルタ(微細土粒子の捕捉・排気ガスの中和)

冷却塔において冷却された排気ガスは、バグフィルタに導入されて、排気ガス中に含まれた微細土粒子を集塵した後に排気される。また、バグフィルタ入口側の煙道に消石灰と活性炭を吹き込み、乾式で酸性ガスの中和を行う。

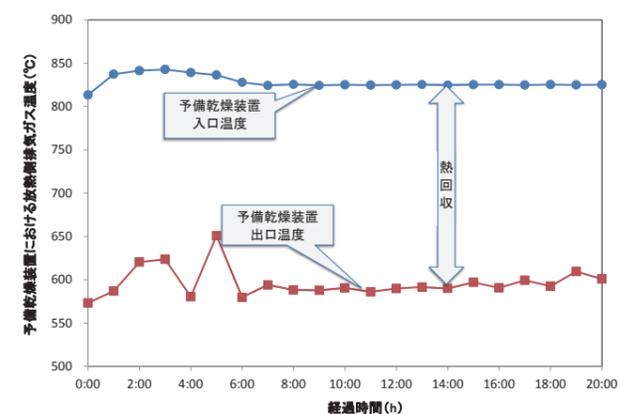


図-2 土壌予備乾燥装置における放熱側ガス温度の経時変化

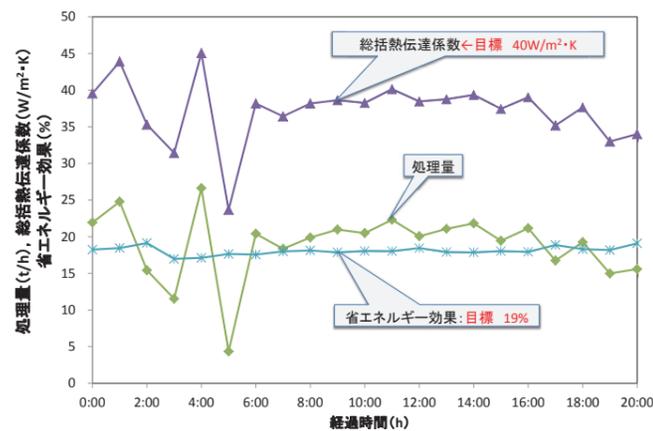


図-3 土壌予備乾燥装置における省エネルギー効果の経時変化

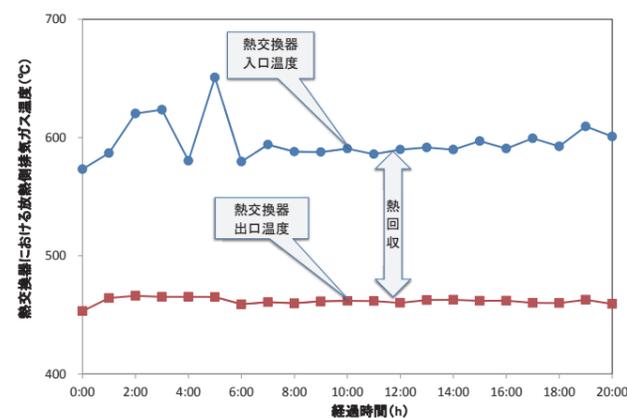


図-4 熱交換器における放熱側排気ガス温度の経時変化

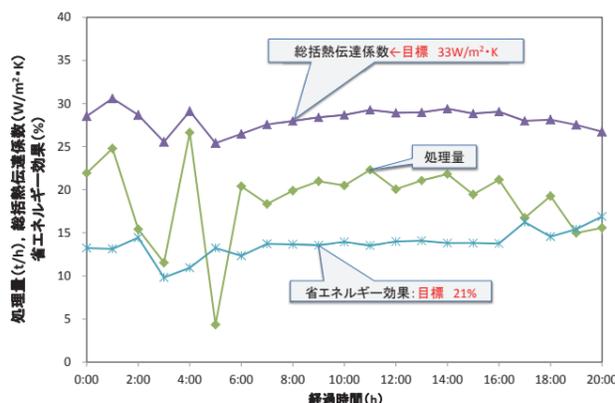


図-5 熱交換器における省エネルギー効果の経時変化

### 3. 油汚染土壌浄化システムの性能評価と考察

#### 3.1 省エネルギー性能

本システムでは、土壌予備乾燥装置と熱交換器によって、排気ガスから熱回収を行った。以下に各々の装置の性能について記す。

##### 3.1.1 土壌予備乾燥装置

土壌予備乾燥装置における放熱側排気ガス温度の経時変化を図-2に示す。土壌予備乾燥装置入口温度は820℃であり、土壌予備乾燥装置による排熱回収後には600℃まで低下している。この排気ガスの温度低下分が本装置で熱回収されたことになる。また、図-3には同じ処理工程における経過時間当たりの処理量と省エネルギー効果を示しており、定格能力の25t/hに対して若干少ない時間当たりの処理量ではあるが、目標値の19%に近い省エネルギー効果の達成が確認できる。単位面積当たりの熱交換能力を示す総括熱伝達係数は、40W/m<sup>2</sup>・Kを設計の基準目標値としていたが、ほぼ想定していた能力が得られていることが分かる。ここでの総括熱伝達係数は、キルン内部の土壌と伝熱面が接している部分を熱交換面積とするのではなく、キルン全体の表面積を熱交換面積として評価を行っている。土壌の加熱には、キルン内筒から土壌へ伝わる熱伝導以外に、土壌と接触していない高温になったキルン内筒からの輻射伝熱や、内筒内部を通過する蒸発ガスによる対流伝熱によっても熱交換が行われるためである。この総括熱伝達係数は、キルンの熱交換面積を決定する重要な値であり、土壌の状態やキルン内部の材料の滞留状態に大きく影響を受ける。

##### 3.1.2 熱交換器

熱交換器における放熱側排気ガス温度の経時変化を図-4に示す。熱交換器の放熱側排気ガスの入口温度は590℃であり、熱交換器の出口で約460℃になっている。この排気ガスの温度低下分が本装置で熱回収されたことになる。熱交換器で回収した後に400℃以上を維持しており、ダイオキシンのデノボ再合成温度以上であることが確認できる。

図-5には同じ処理工程における経過時間当たりの処理量と省エネルギー効果を示している。定格能力に対して少ない処理条件であるが、省エネルギー効果が目標値の21%に比較して、実績値が14%程度の低い結果に留まっていることが確認できる。総括熱伝達係数は、33W/m<sup>2</sup>・Kを基準目標値としていたが、平均でみると29W/m<sup>2</sup>・K程度であることが読み取れる。これは受熱側の予熱空気の流れが放熱側に比較して少なく、その対策として熱交換器の内部にバブルプレート(流れ阻止板)を設けることにより受熱側の風速を高め、温度境界層を薄くすることで熱伝達率を向上する構

造としていたが、その効果が不十分であったことが要因として考えられる。

### 3.2 土壌の浄化性能

#### 3.2.1 浄化性能評価方法

本研究で開発した土壌浄化システムを適用して浄化した土壌は、関東におけるガス工場跡地の実汚染土壌である。関東ロームの土壌であるためシルトおよび粘土の割合が高く、洗浄処理や加熱処理においては、浄化が難しい土壌である。

油分濃度に関する浄化性能の評価には、HORIBA製の油分濃度分析装置OC355と、その溶媒としてF997を用い、全石油系炭化水素(TPH)の測定を行った。また、多環芳香族炭化水素に関する浄化性能の評価には、ヘキサン/アセトン(1:1)溶媒を用いて試料土壌から多環芳香族炭化水素を抽出し、高速液体クロマトグラフ(HPLC)にて定量測定を行った。

指標として、処理前の汚染物質の濃度に対する処理後の低下濃度の割合を浄化率として評価した。

#### 3.2.2 従来の加熱システムと本システムの比較

従来のシステム<sup>7)</sup>は一次処理キルンの排気ガス温度が約200℃と低く、排気ガスと一緒に飛散する微細土粒子の処理温度が排気ガス温度と同程度になる。一次処理キルンから排出される揮発した油分を含む排気ガスは、バグフィルタで微細土粒子を集塵した後に、二次処理装置において750℃の高温雰囲気中で酸化分解される。そのため、土壌の比表面積の関係上、油分濃度が高い微細土粒子は処理温度が低いため、十分な浄化性能が期待できない。この課題を改善する目的で、微細土粒子を集めて再度処理を行う微細土粒子キルンを設けて浄化性能を高めた<sup>7)</sup>。従来システム

の各装置の処理途中・処理後における油分濃度を表-3に示す。表に示すバグフィルタ微細土粒子の汚染濃度が処理前以上に高くなっている理由は、上記したように微細土粒子は比表面積が大きく粒径が大きいものよりも一次処理キルン処理後においても残留油分を多く含んでいるが、排気ガスをバグフィルタで集塵することによる分級操作によって、油分を多く含む微細土粒子が集積し、油分濃度が処理前より高くなったためである。

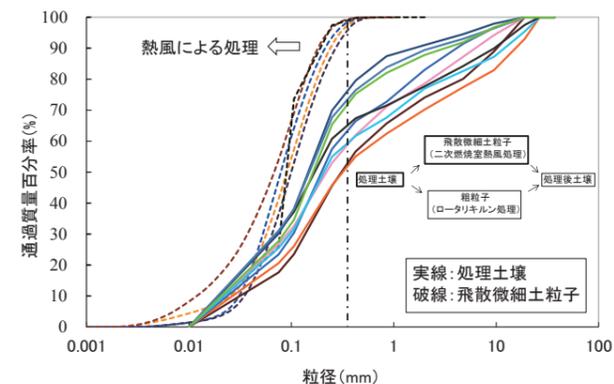


図-6 江東区における処理土壌と飛散微細土粒子の粒度の比較

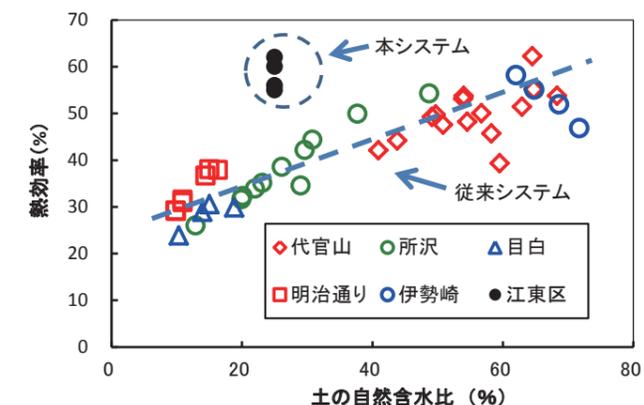


図-7 本システムと従来システムの熱効率の比較<sup>3)</sup>

表-3 従来システムの各装置の処理途中・処理後における油分濃度<sup>7)</sup>

土の種類	処理前		バグフィルタ微細土粒子			微細土粒子キルン処理後		
	油分濃度 (ppm)	含水率 (%)	油分濃度 (ppm)	油分濃度 (ppm)	浄化率 (%)	油分濃度 (ppm)	浄化率 (%)	含水率 (%)
横浜①	7,300	22.2	30,000	40	99	1,300	82	15.6
横浜②	6,800	21.3	27,000	690	90	1,100	84	10.7
大阪	4,300	13.8	23,000	250	94	570	87	8.5

表-4 新たなシステムの処理途中・処理後における油分濃度

土の種類	処理前		予備乾燥機出口		バグフィルタ微細土粒子			処理後		
	油分濃度 (ppm)	含水率 (%)	油分濃度 (ppm)	含水率 (%)	油分濃度 (ppm)	浄化率 (%)	含水率 (%)	油分濃度 (ppm)	浄化率 (%)	含水率 (%)
A	277	19.8	311	11.6	18	94	0	22	92	21.5
B	344	23.5	403	5.0	4	99	0	11	97	24.0
C	336	23.2	411	14.8	158	53	0	21	94	25.7

これに比較して新たなシステムの処理途中・処理後における油分濃度の一例を表-4に示す。この表の土の種類A・B・Cは、同一の汚染サイトにおける汚染土壌であるが、掘削位置が異なることから処理前の油分濃度や汚染油の状態に違いがある。全ての汚染土壌においてバグフィルタ微細土粒子の浄化率は高く、従来システムに比較して油分濃度が大きく低下しており、C土壌を除いては処理後の浄化率近くまで浄化できていることがわかる。各掘削位置によって浄化性能に差がある一つの要因としては、各汚染場所において油分の変質度合いが異なり浄化の難易度に相違があることが挙げられる。しかし、C土壌においても従来システムと比較すると大きく低下しており、十分な浄化性能が得られている。これは、ロータリキルンの出口側に二次燃焼室があり、排気ガスと一緒に飛散する微細土粒子を、まず800℃以上で2秒間滞留させて高温で処理するためである。従来のシステムにおいては、一次処理キルンの排気ガス温度が低く、飛散する微細土粒子の加熱温度も同等となり、その状態でバグフィルタにて微細土粒子を捕捉するため、微細土粒子の浄化性能は期待出来なかった。そのため、微細土粒子キルンを設けて微細土粒子の追加処理を行っていた。新たなシステムにおいては追加処理を行うことなく、微細土粒子の浄化率を高めることができていたことがこの結果から確認できる。従来に対して新たなシステムにおいて処理後の含水率が高くなっ

ている理由については、最終的に土壌を粉塵が出ない程度の湿潤状態に調湿を行ってから排出を行うが、新たなシステムで処理した土壌の方がシルトの割合が高く前処理において土壌の含水調整を行ったことや、処理後に最適な湿潤状態になるまでより多くの水分を含む必要性があったこと等が挙げられる。

図-6に今回処理を行った実汚染土壌の処理土壌と排気ガスの流れに乗って処理される飛散微粒子の粒度分布を示す。土壌の種類によって異なるが、シルト分と粘土分が20～30%程度の割合の土壌である。図中の一点鎖線付近の0.5mm以下の粒度のものが、排気ガスと一緒に飛散し微細土粒子として処理されるが、重量割合では50～70%程度の量になる。これは、ロータリキルンから排出される土壌よりも、排気ガスと一緒に飛散する微細土粒子の割合が高いことを示している。

従来のシステムにおいては、このような0.5mm以下の粒径が多い土壌の場合は、上記した理由から浄化性能を高めることが難しかった。新たなシステムにおいては、細かい粒度のものが排気ガスと同じ高温雰囲気中で処理を行うことが可能なため、シルトや粘土の割合が高く粒径が細かい土壌に対しても十分な浄化性能を得ることができる。排気ガスが800℃以上の温度で維持される時間は2秒間と短い、微細土粒子は比表面積が大きいため熱風により熱交換されや

すく、また、熱容量も小さいため短時間で高温まで加熱処理することが可能である。さらに、実汚染土壌における多量の浄化処理についても、本システムの浄化性能が安定していることを確認している。

一方、洗浄処理の場合、シルトや粘土の割合が高い細かい粒径の土壌については、分級操作によって回収される微細土粒子の集合体である洗浄残渣を多く排出する。また、この洗浄残渣については残留油分を多く含むために二次処理が必要となり、洗浄処理の課題となっている。このような観点から、細かい粒径の土壌に対しては、他の工法に比較して今回のシステムは極めて有効であると言える。

図-7に熱回収機器を装備しない従来のシステム<sup>3)</sup>と今回の省エネルギー化を図ったシステムの実運用上における熱効率の比較を示す。今回のシステムで処理を行った土壌は、土壌浄化システムの供給前に生石灰を用いて前処理を行っており、土壌の含水比は25%前後である。この含水比における今回のシステムの熱効率は約60%であるが、それに対して従来のシステムにおいては38%の低い値に留まっていることがわかる。この結果から、今回新たに設けた土壌予備乾燥装置と熱交換器の省エネルギー効果が実運用上においても明確に確認できる。

### 3.2.3 多環芳香族炭化水素の浄化

従来のシステムでは、土壌の加熱温度が最大400℃までの加熱処理であるためタール・ピッチや高沸点の多環芳香族炭化水素の浄化性能を期待できなかった。今回のシステムでは、加熱装置であるロータリキルンに耐火材を施工することで土壌の加熱温度を600℃以上に加熱することが可能となり、それらの浄化にも対応することができる。

図-8は、本システムにおける多環芳香族炭化水素の浄化性能を示している。評価方法は処理前後の実汚染土壌を5gサンプリングし、その土壌から汚染物質をヘキサン/アセトン(1:1)溶媒に溶出させて高速液体クロマトグラフ(HPLC)で定量分析することで行った。土壌D、Eの2種類の土壌に対して、浄化性能の評価を行ったが、それぞれの土壌加熱平均処理温度は、土壌D:522℃、土壌E:460℃である。上記したように多環芳香族炭化水素は100以上の多くの種類があるが、本研究では、18種類に絞って分析を行った。特に発癌性を示す可能性が高く有害な物質に関しては、図中の名称の前に星印を付けている。浄化後の溶出濃度は18種類の物質のすべてが、10mg/kg以下であることがわかる。その中で比較的、残留した炭化水素濃度が高かった物質は、ピレン、ジベンズ(a,h)アントラセン、インデノ(1,2,3-cd)ピレンである。それぞれの浄化率を図中に示しているが、土壌

の加熱処理温度が低い土壌Eの方が、浄化率が低くなっていることが確認できる。

多環芳香族炭化水素の沸点と浄化率の関係を図-9に示す。上記したように発癌性を示す可能性が高い物質は、多環芳香族炭化水素の中でも沸点が高く400℃以上のものである。522℃で処理した土壌Aは500℃以上の沸点の物質においても100%近い浄化率を達成できている。一方、処理温度が低い460℃で処理した土壌Eに関しては、470℃以上の沸点の物質においては、浄化率が低下し55～95%の値を示していることが確認できる。また、この中で536℃の沸点を持つIndeno-(1,2,3-cd)-pyreneにおいては、浄化率が57%と際立って低くなっているが、この要因としては本物質の加熱前の汚染濃度が元々低いために、処理後に残った低濃度の残存(2.26mg/kg)においても除去率の値としては悪くなったことが挙げられる。

加熱処理による土壌の浄化においては、汚染物質を加熱し蒸気圧を高めて土壌から揮発させて行う。浄化性能には、加熱温度と加熱時間が大きく影響し、必ずしも物質の沸点以上の温度まで加熱処理する必要はない。今回の結果においては、加熱温度を高めると浄化性能が高まる傾向が確認でき、多環芳香族炭化水素の沸点温度域まで処理温度を上昇すると浄化率が100%近くまで上昇する結果が得られた。

## 4. 結言

本研究では、従来のシステムに比較して土壌の加熱温度を高めることにより浄化性能を改善し、更に高温の排気ガスから熱を回収し省エネルギー化を図った新たな土壌浄化システムの開発を行った。また、実地盤の汚染土壌浄化に対して、本システムを適用し、土壌の浄化性能とその有用性を明らかにした。以下に本研究で得られた主要な結果を列記する。

- (1) 土壌の予備乾燥を高温の排気ガスから間接加熱方式で行う土壌予備乾燥装置を新たに開発し、本装置において19%程度の省エネルギー化を実証した。
- (2) 新たに開発した熱交換器を用いて、微細土粒子が多く含まれた高温の排気ガスからバーナ燃焼用空気を予熱することで、熱エネルギーの回収を行った。この結果、本システムによって14%程度の省エネルギー化を実現した。

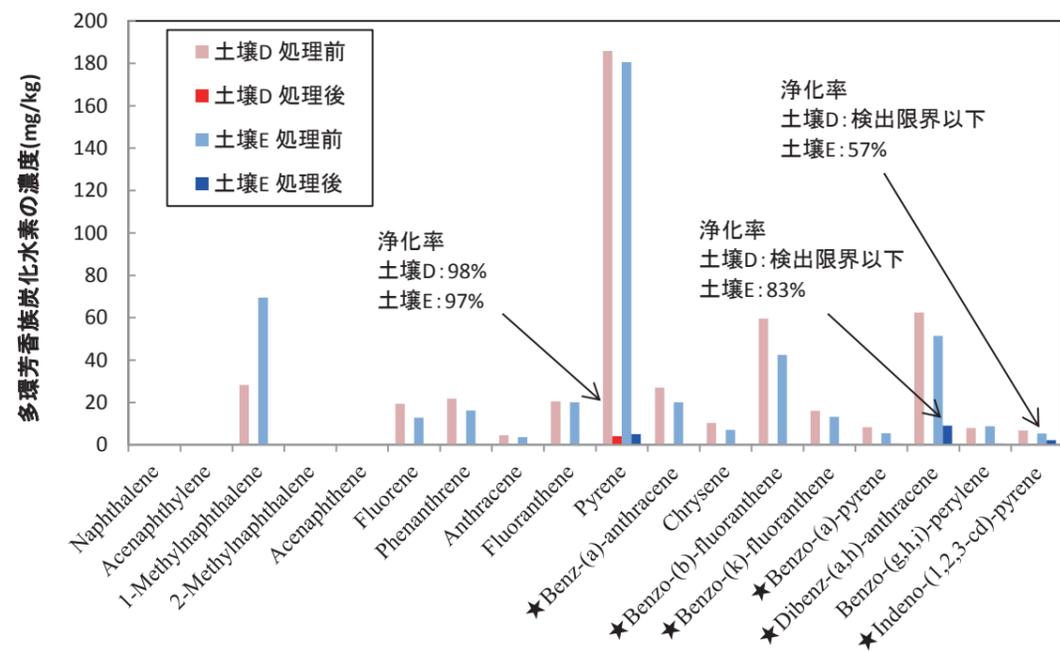


図-8 多環芳香族炭化水素の浄化性能

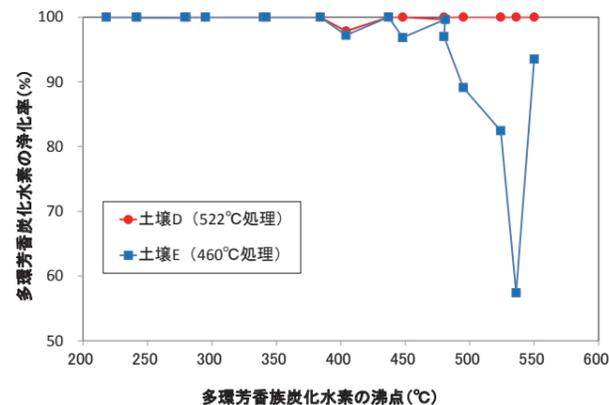


図-9 多環芳香族炭化水素の沸点と浄化率の関係

- (3) 従来のシステムから土壌浄化システムの処理フローを見直し、土壌加熱用のロータリキルンの排出側に二次燃焼装置を設けた。この改良によって、微細土粒子の加熱処理温度が高まり、浄化性能が向上した。このシステムにおいては、粘土・シルトの割合が多い汚染土壌に対して、他の工法に比較して浄化性能に優位性がある。
- (4) 本システムでは、油汚染土壌に含まれた400℃以上の沸点を持つ発癌性の可能性がある多環芳香族炭化水素を浄化処理できる。また、浄化対象物質をその物質の沸点近くの温度で処理すると、十分な浄化性能が得られることが確認できた。

今後については、異なる手法と浄化性能や浄化期間、浄化機構などの比較研究を行うことにより、本手法の適用範囲を工学的知見から検証を行う予定である。

参考文献

- 1) 橋本久義, 須藤孝一, 井上千弘, 千田信: 油汚染土壌のオンサイト修復技術, 石油技術協会誌, Vol.71, No.1, pp.131-138, 2006.
- 2) 須藤孝一, 平川貴也, 中川勇樹, 関野聡, 橋本久義, 井上千弘・千田信: 生石灰混合処理による油汚染土壌浄化と浄化処理の汚染サイトに棲息する油分解微生物に及ぼす影響, 石油技術協会誌, 第71巻, 第5号, pp.513-521, 2006.
- 3) 蓬萊秀人, 神尾昌宏, 亀井健史: 加熱による汚染土壌の修復技術, 地盤工学ジャーナル, Vol.8, No.2, pp.297-310, 2013.
- 4) 中央環境審議会土壌農薬部会, 土壌汚染技術基準等専門委員会, 油汚染対策ガイドライン- 鉱油を含む土壌に起因する油臭・油膜問題への土地所有者等による対策の考え方 -, pp.1~21, 2006.

- 5) 久保隆, 小野敏路, 浦野紘平, : 多環芳香族炭化水素類による大気汚染特性, 大気環境学会誌, Vol.37, No.2, pp.131-140, 2002.
- 6) 川辺能成, 西脇淳子, 坂本靖英, 原淳子, 駒井武: 地球環境における鉱物油のヒトのリスク評価に関する研究, 石油技術協会誌, Vol.73, No.3, pp.225-231, 2008.
- 7) 神尾昌宏, 蓬萊秀人, 亀井健史: 熱処理による油汚染地盤の修復, 地盤と建設, Vol.31, No.1, pp.29-36, 2013.
- 8) 大北康治, 伊藤克彦, 鈴木重孝, 久保孔明: 土壌洗浄法の概要とその適用について, 廃棄物学会誌, Vol.5, No.1, pp.79-86, 1994.

(2014年6月23日 受付)

出典

「神尾昌宏(日工), 蓬萊秀人(日工), 亀井健史(宮崎大), 『油汚染土壌に対する熱処理修復技術の応用』, 地盤と建設, Vol.32, No.1, PP.87-95, 2014/12/26, (公社)地盤工学会 中国支部」より許諾を得て転載。

筆者紹介



KAMIO Masahiro  
神尾 昌宏  
博士(工学)  
1998年入社  
エンジニアリング部



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

# 2軸強制練りミキサのブレード形状が 超高強度コンクリートの練混ぜ時間の短縮化に与える影響

MIXING OF ULTRA-HIGH PERFORMANCE CONCRETE(UHPC): EFFECT OF BLADE SHAPE ON MIXING TIME OF BI-AXIAL FORCED-MIXING TYPE MIXER

吉田 元昭\*1・橋本 親典\*2・渡邊 健\*3・水口 裕之\*2

**要旨:** 超高強度コンクリートの練混ぜ時間の短縮化を図るためには、練混ぜ初期における粗骨材粒子の分散を高め、粗骨材粒子群の回転・衝突による練混ぜ効果を向上させることが重要である。全体循環流動が卓越するパドル角度45度のブレードに連続性を有する局部交錯流動の重要な要素であるせん断流を活発化させた2軸強制練りミキサを考案し、練混ぜ初期の練混ぜ性能の高性能化を可視化実験により定量的に評価した。さらに、ブレードの連続性による練混ぜ時間の短縮化を実機ミキサによる練混ぜ性能試験により検証した。

**キーワード:** 超高強度コンクリート, 2軸強制練りミキサ, 練混ぜ時間, 可視化モデル, 練混ぜ性能試験

## 1. はじめに

コンクリート製造設備において、コンクリートミキサは、コンクリートを「練り混ぜる」作用が必要で、最も重要な要素である。図-1に2軸強制練りミキサの練混ぜに寄与する2つの流動機構の概念を示す<sup>1)</sup>。投入された粒度が大きく異なる各種粉体材料を均一に混合する「全体循環流動」と、セメントの水和反応を活発にするために、セメント粒子と水の接触頻度を高めるための「局部交錯流動」から成る。

既往の研究<sup>2),3)</sup>では、1相系の粘性流体モデルにおける練混ぜ性能の違いから「ミクロの練混ぜ性能」が良好なミキサの条件として、局部交錯部の領域が大きくかつ連続性を持つパドル配列を有するものであるとの結果が得られている。また、固液2相系の粘性流体モデルにおけるブレード周辺のせん断流の圧力変動から算出した仕事量により、局部交錯流動により発生するせん断流の定量化を行い、せん断流が活発に発生するミキサ形状、モデルモルタルの粘性、骨材濃度の条件を明らかにしている。これらの研究により、通常の有スランプコンクリートを対象とした2軸強制練りミキサの練混ぜ性能の高性能化を図ってきた。

一方、100N/mm<sup>2</sup>を超える超高強度コンクリートの練混ぜ時間は、通常120秒以上を必要とする。レディーミクストコンクリート工場では、出荷量の低下が問題となっている。この原因は、高粉体量でかつ単位粗骨材量が850kg/m<sup>3</sup>前後で極端に粗骨材量が少ないことによる。粗骨材粒子群の回転・衝突により高粘性モルタルの練混ぜが期待できないためである。

本研究では、極端に粉体量が多く骨材量が少ない超高強度コンクリートの練混ぜ時間の短縮化を図るミキサの開発を目的とし、著者らが開発してきた可視化実験手法を用いて、新たなミキサの可能性を追究した。

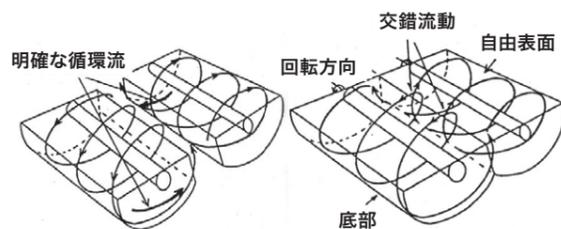


図-1 2軸強制練りミキサの流動構成<sup>1)</sup>

## 2. 超高強度コンクリート対応ミキサに求められる性能

超高強度コンクリートの練混ぜは、「材料投入」→「練混ぜ初期の低粘性モルタルの製造」→「練混ぜ中期の低粘性から高粘性モルタルへの移行」→「練混ぜ終期の安定した高粘性モルタルの製造」→「練上り」の過程をたどる。

超高強度コンクリートの練混ぜ状況を詳細に目視観察した結果、「高粉体量によるモルタルの高粘性化に到達するまでの練混ぜ時間の長期化」と「低粗骨材濃度による粗骨材粒子群の練混ぜエネルギーの低下」があいまって練混ぜの進行が進まないことが明らかになった。特に、材料投入直後の練混ぜ初期の粗骨材粒子群の分散度の低い練混ぜ時間帯でのモルタルの練混ぜの高性能化が必要であるという考えに至った。これを実現するためには、練混ぜ初期における粗骨材粒子の分散を高め、粗骨材粒子群の回転・衝突による練混ぜ効果を向上させることが重要である。

本研究では、超高強度コンクリートの低粗骨材濃度配合における、粗骨材の練混ぜ効果を最大限に発揮すべく「練混ぜ初期領域」即ち5回転程度までの粗骨材粒子群の早期分散による練混ぜ性能の向上に着目した。

## 3. 可視化ミキサによる練混ぜ性能実験

### 3.1 可視化ミキサの容器形状

既往の研究では、2軸強制練りミキサの練混ぜ性能のうちミクロの練混ぜに有効と考えられている局部交錯流動により発生するせん断流は、局部交錯部の領域の大きさにより変化する。実験に用いたモデルミキサの容器形状は、市販されている2軸強制練りミキサにおいて、局部交錯部の領域が最も大きい実機ミキサの1/65の縮尺の物を透明アクリルで製作した。モデルミキサの容器形状を図-2、諸元を表-1に示す。

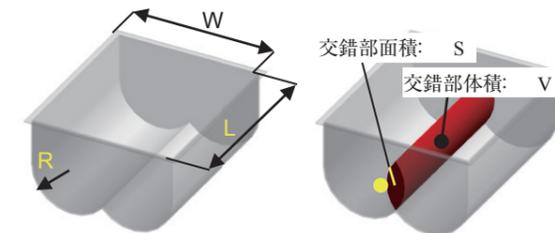


図-2 モデルミキサの容器形状

表-1 モデルミキサの容器形状に関する諸元表

練り混ぜ容量	(リットル)	34.5
容器長さ	L (mm)	536
容器幅	W (mm)	474
容器半径	R (mm)	135
交錯部面積	S (mm <sup>2</sup> )	7995
交錯部体積	V (mm <sup>3</sup> )	4285320

※交錯部領域とは、2軸ミキサのブレード回転領域における交錯領域を意味する。

### 3.2 モデルミキサのブレード形状

#### (1) 従来タイプモデルミキサのブレード形状

従来タイプモデルミキサのブレード形状は、現在市販されている2軸強制練りミキサにおいて、最も練混ぜ性能の高いミキサを忠実に1/65としたモデルを鋼にて製作した。従来タイプモデルミキサのブレード形状を図-3に示す。

#### (2) 新タイプモデルミキサのブレード形状

既往の研究では、「ミクロの練混ぜ性能」が良好なミキサの条件として、局部交錯部の領域が大きくかつ連続性を持つパドル配列を有するものである。また、局部交錯部の領域が大きい場合、局部交錯流動領域で発生するせん断流によってなされる仕事量が大きくなり、練混ぜ性能に優れている。更に、同一ミキサ形状では、モデルモルタルの粘性が高く、かつ骨材濃度が大きくなるほど、せん断流によってなされる仕事量が増加することが明らかになっている。よって、新タイプミキサのブレードは、連続性を持つブレード形状が必要条件となる。

そこで、市販されている2軸強制練りミキサにおいて最も練混ぜ性能が高く全体循環流動の発生が活発なパドル角度45度のミキサである従来タイプミキサのブレードに連続性を持たせ不要なパドルを取り除いたブレード、パドル形状を新タイプミキサと定義した。

新タイプミキサのブレード形状を図-3に示す。

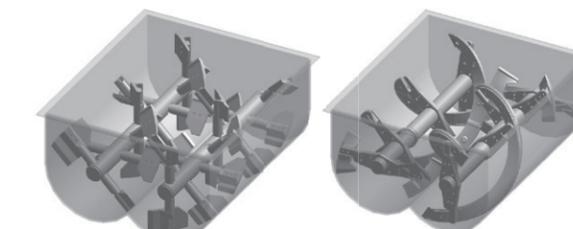


図-3 モデルミキサのブレード形状

表-2 モデル骨材の物性値

色	粒径 (mm)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	材料
白	6	1.85	ユリア
緑	10	1.45	樹脂球

表-3 モデルコンクリートの配合

配合名	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
	モルタル	白球骨材	緑球骨材	
Vg/Vm	50%	667	308	252
	65%	606	364	286
	80%	556	411	322

可視化モデルコンクリートの配合は、骨材とモルタルの容積比のみとした。骨材とモルタルの容積比 (Vg/Vm) を、50%、65%および80%の3種類とした。50%は、超高強度コンクリートや高流動コンクリートの骨材濃度を想定し、単位粗骨材量が少ない配合である。一方、80%は、スランプ8cm以下の一般的な土木用コンクリートの骨材濃度に近く、単位粗骨材量の多い配合である。65%は、スランプ12cm程度の一般的な建築用コンクリートの単位粗骨材量の配合を想定した。実験に用いたモデルコンクリートの配合を表-3に示す。

### 3.3 使用材料

実験では、コンクリートを固液2相系の粘性流体と仮定しモデルモルタル、モデル骨材を用いた。モデル骨材は、樹脂球を使用した。使用した樹脂球の粒径および色を表-2に示す。

モルタルモデルには密度が1.0g/cm<sup>3</sup>で、でん粉とアクリル酸ソーダの高分子共重合体である高吸水性高分子樹脂溶液を用いた。モデルモルタルは、無色透明な粘性流体である。本モデルモルタルの粘性は高分子樹脂の添加量によって変化させることが可能である。本実験では3.0g/lで一定とした。添加量3.0g/lでは、ミニスランプコーン(φ50mm×φ100mm×h150mm)を用いたスランプフロー試験で170~180mm程度のフローとなる。

\*1 徳島大学大学院 先端技術科学教育部 知的力学システム工学専攻 博士後期課程3年 (正会員)

\*2 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門教授 工博(正会員)

\*3 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門助教 博士(工)(正会員)

実験及び解析手順を以下に示す。

**(1) モデルモルタルの作成**

正確に計量した高吸水性高分子樹脂と水をダマが発生しないように注意し均質となるように混合する。

高吸水性高分子樹脂溶液のスランブフローが安定した状態にて規定のスランブフローが得られているかを確認し、必要量を正確に計量する。

**(2) 粒径別モデルコンクリートの作製**

正確に計量したモデル骨材である白球、緑球 各々とモデルモルタルの半量を均等質となるように混合する。

**(3) 容器への充填**

白球を用いたモデルコンクリートと緑球を用いたモデルコンクリートを、容器を軸方向に2分割し両モデルコンクリートが混ざらないように慎重に充填する。

モデルコンクリートを充填したモデルミキサを写真-4に示す。

**(4) 混合実験**

容器底面が画面一杯となるようにビデオをセットし録画を行うと同時にミキサシャフトを回転させる。この時ミキサシャフトの回転速度を実機ミキサの回転速度と同じ $36\text{min}^{-1}$ とする。実験での回転回数は、一般的なコンクリートを実機ミキサで練り混ぜた場合に練混ぜ性能試験で充分合格可能な20回転までとした。

**(5) 混合度の算出**

得られた動画より、各回転回数毎に静止画を切出し、各静止面に撮影されたモデルミキサ底面を正確に4つのウインドに分割し、対角の2つのウインドを更に4つのウインドに分割する。

静止画のウインド分割例を写真-6に示す。

各ウインド内に存在する白球、緑球の個数を計数する。

次に、8ウインドの白球の数 $x_i (i=1\sim 8)$ より分散を求め、練混ぜ開始時の分散と完了時の分散と任意の回転数の分散を用いて混合度Mを式(1)にて求める。

$$\text{混合度: } M = \left(1 - \frac{\sigma^2}{\sigma_0^2}\right) \times 100 \text{ (\%)} \quad (1)$$

ここで、 $\sigma_0^2$  = 練混ぜ開始時の分散

$\sigma^2$  = 任意の回転数における分散

$$\text{分散: } \sigma^2 = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 (x_i - \bar{x})^2, \quad \bar{x} : 8\text{ウインドの白玉の数の平均値である。}$$

練混ぜが進行するほど、混合度Mが100%に漸近し平衡状態となる。この混合度Mが100%に漸近する度合いによって、練混ぜ性能を評価する。なお、式(1)は、完全混合度を最終時の分散として、完全混合時の分散を零とした。よって、回転数が100回転程度では、完全混合までに達しない。

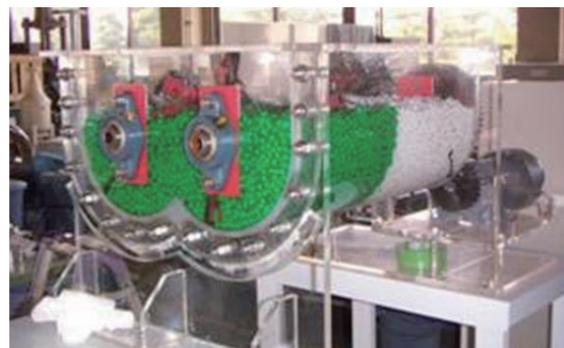


写真-4 モデルコンクリートを充填したモデルミキサ

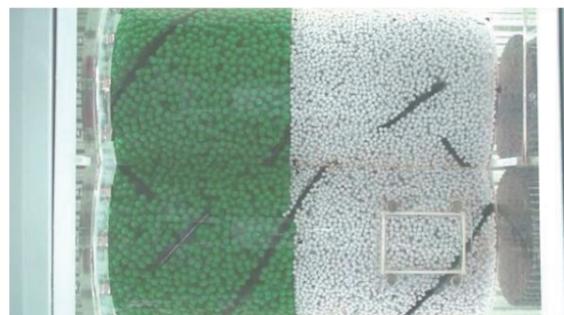


写真-5 モデルミキサ底面

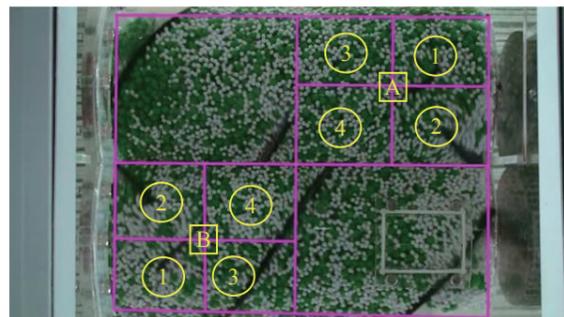


写真-6 ウインドの分割例

**3.4 実験結果**

**(1) 従来タイプミキサの実験結果**

従来タイプミキサを用いた練混ぜ性能実験結果を図-7に示す。

全ての骨材濃度において、ミキサ回転開始直後では、混合度が0%であり、3回転目から6回転目までに急激に混合度が上昇し、10回転程度で定常状態となる。骨材濃度(Vg/Vm)65%が最も早く定常状態に到達し、骨材濃度50%, 80%の順で定常状態となる。

従来タイプミキサは、各骨材濃度の実験結果に大差はないが、練混ぜ初期領域に着目すると、骨材濃度65%が最も練混ぜ性能が高く、次いで骨材濃度50%, 80%の順である。

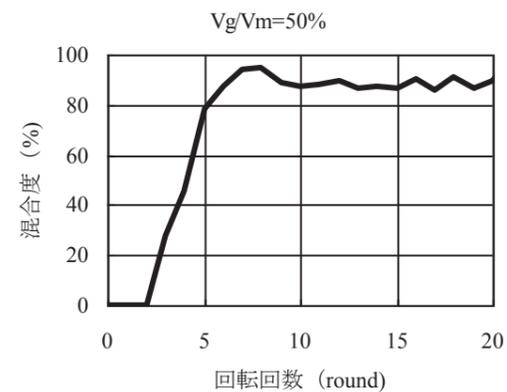
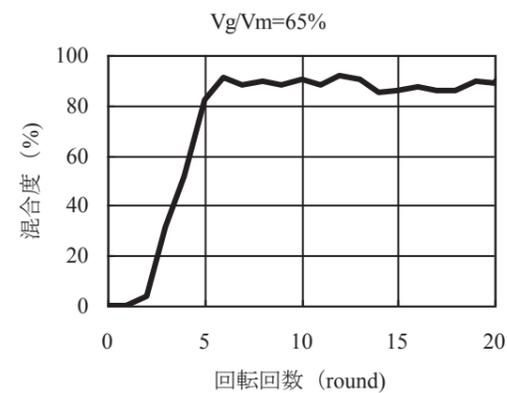
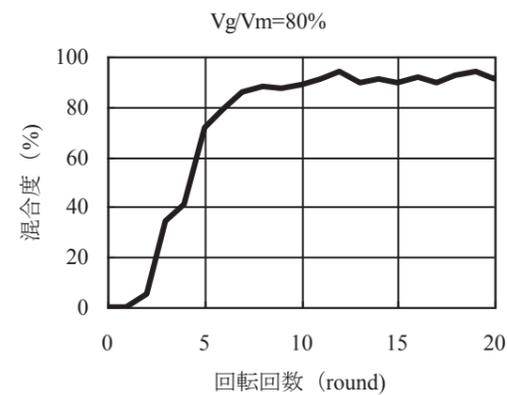


図-7 従来タイプミキサの混合度の推移

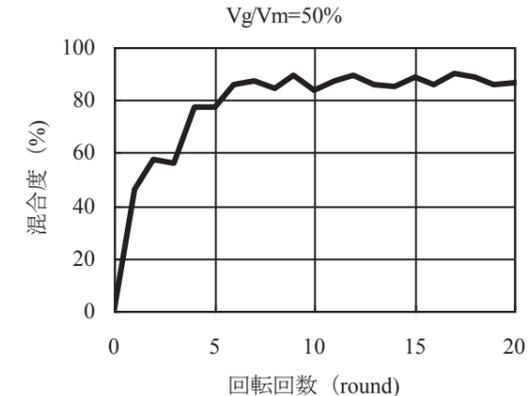
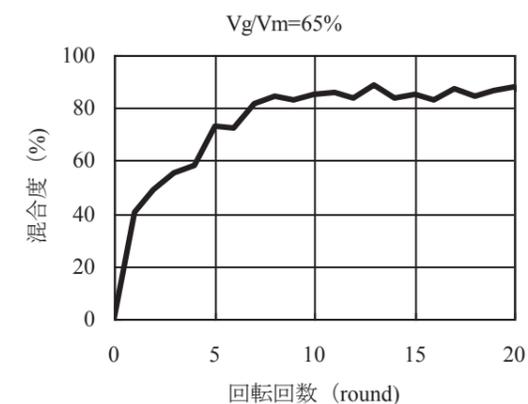
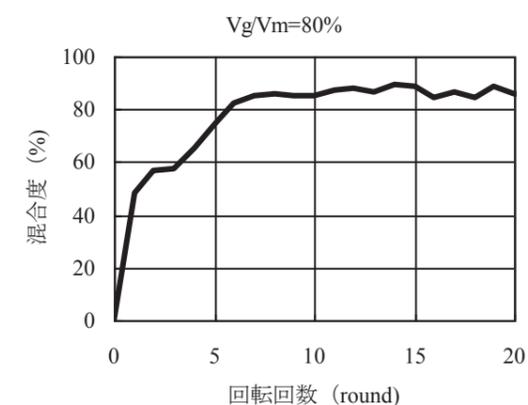


図-8 新タイプミキサの混合度の推移

**(2) 新タイプミキサの実験結果**

新タイプミキサを用いた練混ぜ性能実験結果を図-8に示す。

全ての骨材濃度において、ミキサ回転開始直後より混合度が急激に上昇し、10回転程度で定常状態となる。各骨材濃度により混合度が定常状態となるまでの回転回数に大差は見られないが、骨材濃度(Vg/Vm)50%が最も早く定常状態に到達し、骨材濃度80%, 65%の順で定常状態となる。

新タイプミキサは、パドル角度45度の従来タイプミキサのブレードに連続性を持たせた構造である。既往の研究<sup>2)</sup>よりブレードの連続性は、ミクロ的な練混ぜ性能に寄与する局部

交錯流動が活発化し、パドル角度45度より全体循環流動も活発化する構造であることが知られている。また、骨材濃度50%は、骨材の回転による練混ぜが最も弱くミキサによる練混ぜ性能が低下することが知られている。

新タイプミキサは、連続的なブレードを採用していること、骨材濃度50%の混合度が最も早く定常状態となること、ミキサ回転開始直後より混合度が急激に上昇していることより、練混ぜ初期での骨材分散効果が高く、ミキサ単体での練混ぜ性能が高いことが明らかとなった。よって、単位粗骨材量が少ない超高強度コンクリート等において練混ぜ性能の向上が期待できる。

表-4 示方配合

配合	粗骨材の最大寸法 G max (mm)	スランブの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	水セメント比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
						水 W	セメント C	混和材 P z	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 SP
W/B20%-60-20	20	60±10	1.5±1.5	20.0	40.7	160	680	120	605	873	12.00

4. 実機ミキサによる高強度コンクリート練混ぜ実験

4.1 練混ぜ実験の目的

局部交錯流動と全体循環流動を高める構造のミキサでは、可視化実験にて高性能な結果が得られたミキサは、実機ミキサの練混ぜ性能でも高性能であることが過去の実験より明らかになっている。

本可視化実験では、超高強度コンクリートに代表される骨材濃度の低い配合の練混ぜ性能実験結果が最も良好であった。そこで、新タイプミキサの実機実験が可能な簡易プラントを製作し骨材濃度の低い呼び強度100N/mm<sup>2</sup>以上の超高強度コンクリートを対象に、練混ぜ性能実験を実施し、本可視化実験の妥当性を証明することとした。

4.2 練混ぜ実験の概要

新タイプ実機ミキサを写真-9に、簡易プラントを写真-10に示す。



写真-9 新タイプ実機ミキサ(練混ぜ容量1.67m<sup>3</sup>)



写真-10 簡易テストプラント

材料	種類および産地	密度 g/cm <sup>3</sup>	吸水率 %	実積率 %	粗粒率
セメント	普通ポルトランドセメント	3.16	-	-	-
混和材	高強度混和材	1.17	-	-	-
細骨材	福岡県北九州産石灰砕砂	2.68	0.51	54.9	2.48
	兵庫県飾磨郡産砕砂	2.57	1.53	56.7	2.77
粗骨材	兵庫県飾磨郡産砕石	2.60	1.02	58.0	6.69
混和剤	ポリカルボン酸系高性能減水剤	2.64	-	-	-

表-5 使用材料

図-11 試料採取位置

実験は、表-4に示す示方配合にて、表-5の材料を用い練混ぜ容量1.67m<sup>3</sup>のミキサをもちいて1バッチの練混ぜ容量を1.125m<sup>3</sup>として実施した。練混ぜ手順は一般的な普通コンクリートを練混ぜる場合の手順を用いた。すなわち、細骨材・水を投入した後、セメントを投入し直ぐに粗骨材を投入する手順である。実験に用いた試料は、材料投入開始から90秒間練り混ぜた後、ミキサを停止しミキサ内対角位置より採取した。試料採取位置を図-11に示す。次に、採取後直ぐにミキサを起動し20秒毎練り混ぜた後(合計110秒、130秒)ミキサを停止し採取した。採取した試料を用いて、「コンクリートミキサ(JIS A 8603:1994)」に規定されている試験である「ミキサで練り混ぜたコンクリートの中のモルタルの差および粗骨材量の差の試験方法(JIS A 1119:2005)」に従って練混ぜ性能試験を実施した。

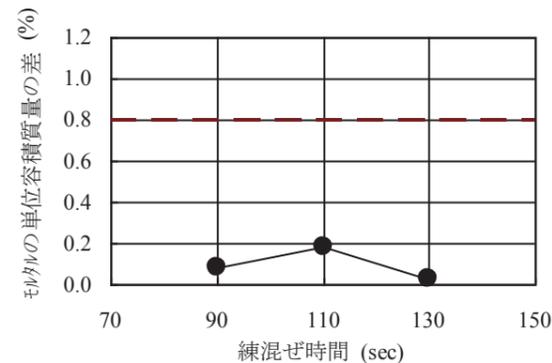


図-12 モルタルの単位容積質量の差

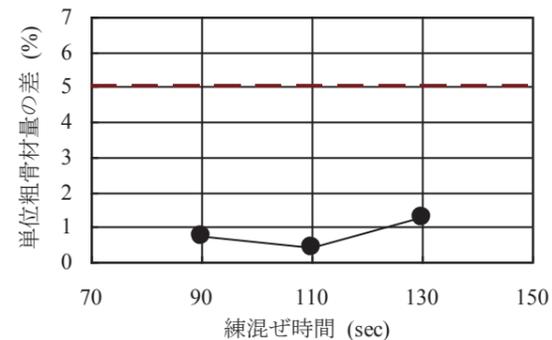


図-13 単位粗骨材量の差

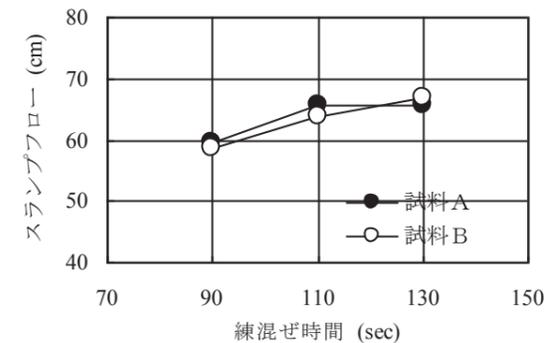


図-14 スランブフロー測定結果

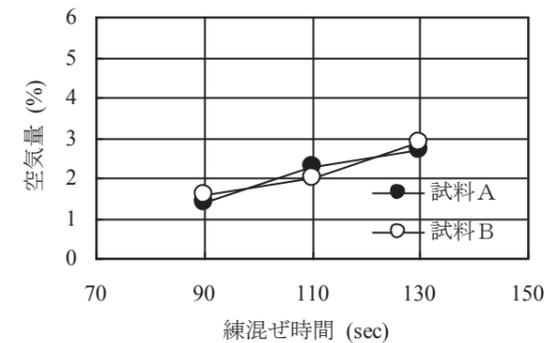


図-15 空気量測定結果

4.3 練混ぜ実験結果

練混ぜ性能実験の結果として、モルタルの単位容積質量の差を図-12に、単位粗骨材量の差を図-13に、スランブフロー測定結果を図-14に、空気量測定結果を図-15に、圧縮強度測定結果を図-16に示す。なお、図-14, 15, 16内試料A, 試料Bは採取位置を示す。実機ミキサによる練混ぜ性能実験結果では、全ての項目において、「コンクリートミキサ(JIS A 8603-1994)」に規定さ

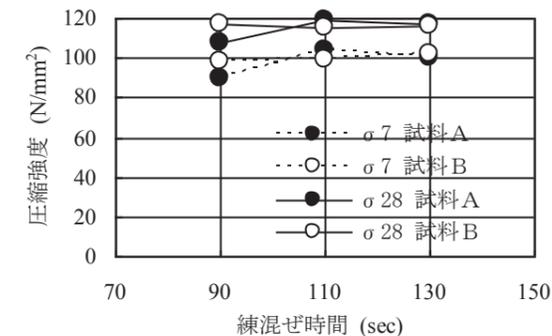


図-16 圧縮強度測定結果

れている値より充分小さい値で合格した。また、圧縮強度の測定結果より練混ぜ時間90秒でも圧縮強度差4.4%、供試体6本(試料①3本、試料②3本の計6本)の変動係数が5.17%と低いことより、練混ぜ時間90秒で充分練り混ぜられていることが明らかになり、練混ぜ時間の短縮化が図られた。

これらのことにより、局部交錯部の領域が大きい容器を用い、全体循環流動が卓越するパドル角度45度のブレードを繋ぎ連続性を持たせたブレードを採用することにより、練混ぜ初期における骨材分散性能が向上した結果、低骨材濃度配合である高強度コンクリートの練混ぜが短時間で完了することが可能である。

5. まとめ

低骨材濃度配合において、練混ぜ初期における粗骨材粒子群の分散性能に優れたミキサ即ち局部交錯部の領域が大きい容器を採用し、全体循環流動が卓越するアーム角度45度のブレードを繋ぎ連続性を持たせた形状とした2軸強制練りミキサが有効であることが判明した。

参考文献

- 1) 橋本 親典, 辻 幸和, 杉山 隆文: 練混ぜ時間が2軸強制練りミキサの練混ぜ性能に与える影響, セメント・コンクリート論文集, No.51, pp. 582-587, 1997.1
- 2) 橋本 親典, 吉田 元昭, 渡辺 健, 石丸 啓輔: 可視化モデルを用いた2軸強制練りミキサの局部交錯部のせん断流の定量化, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.2, pp.49-54, 2007.7
- 3) 福嶋 慎吾, 吉田 元昭, 渡辺 健, 橋本 親典: 固液2相系コンクリートモデルによる2軸強制練りミキサ内のブレード表面に発生するせん断流の定量化, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp. 199-204, 2008.7

出典

「吉田元昭(日工), 橋本親典(徳島大), 『2軸強制練りミキサのブレード形状が超高強度コンクリートの練混ぜ時間の短縮化に与える影響』, コンクリート工学年次論文集(CD-ROM), Vol.31, ROMBUNNo.1267, 2009/06/15, (公社)日本コンクリート工学会」より許諾を得て転載。

筆者紹介



YOSHIDA Motoaki  
吉田 元昭  
博士(工学)  
1987年入社  
開発部

# 新型アスファルトプラント VPⅢ (Value Pack Ⅲ)

## 1. 開発背景

従来の合材工場は、アスファルトプラントをメインの設備とし、その付帯設備としてリサイクルプラントが配置されてきた。しかし、1991年にリサイクル法が施行されたことにより、アスファルト合材の再生処理と利用が全国的に広まり、再生合材の出荷量は飛躍的に増加した。近年では再生合材が合材工場の出荷の大半を占める環境となり、再生材の高混入率は新しいアスファルトプラントを開発する上で必須事項となった。そこで日工では従来の発想を転換してリサイクルプラントをメイン設備として配した新型アスファルトプラントを開発した。これによりプラントの設置スペースの削減や、再生骨材を使用するにあたってのデメリットを抑制する技術を確立することが可能となった。

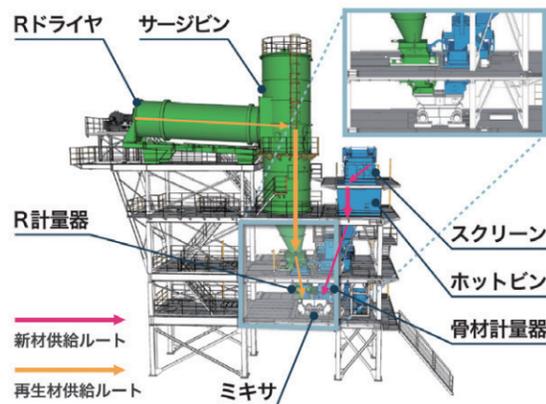
本稿では日工独自の再生材主体型プラント「VP-Series」の最新型であるVP-Ⅲが開発されるまでの経緯と、その特徴について紹介する。

## 2. Midship BonD(MBD)タイプの開発

VP-Seriesの先駆けとして開発されたこのMBDタイププラントの特徴はアスファルトプラントと付帯装置であったリサイクルユニットを一体架台としたことにある。ミキサ直上にホットピンとサージピンを配置し、Rドライヤ・サージピン・計量器・AP ミキサの装置を一連で接続することによって、再生材の高混入率に対応することが可能となった。その機構によって加熱した再生材の使用時の問題となっていた、輸送経路上での粉塵、油煙、臭気、材料の飛散を抑制することができた。また、一体型架台となったことで、計量器設置フロア、ミキサ設置フロアとも広いフラットフロアとなり、メンテナンス時の作業性も向上した。



資料A「ミキサ、サージピン一接続の様子」



資料B「Midship BonDタイプのイメージ図」

## 3. VP-Series VP-I・VP-IIの開発

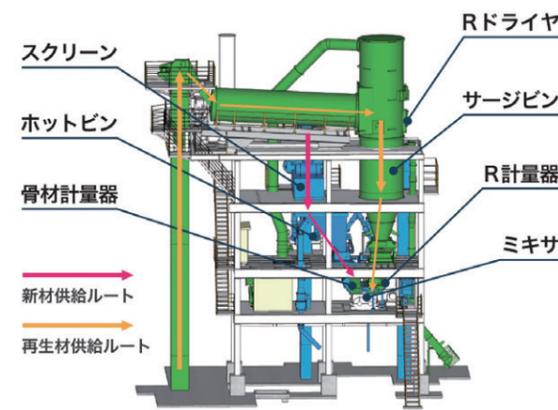
今までの合材工場はアスファルトプラントのみの設置が多かったが、破碎施設がセットで設置されるようになり、敷地の有効活用が必要となった。工場停止期間削減のため、プラント建替時に既設プラントを稼働しながらの建設という条件も多く、省スペースなアスファルトプラントのニーズが増加した。

上記のニーズに対応するため、リサイクルプラントをメインとする思想はそのままに、よりコンパクトで尚且つメンテナンススペースを確保したプラント「VP-I」を開発した。リサイクルユニットの架台の中にアスファルトプラントの本体タワーを収めることで、プラントの設置面積を従来型と比較し15%の削減することに成功した。従来よりも省スペースながらMidship BonDタイプ同様にミキサまでの装置を一連で接続する機構も搭載しているため、粉塵、油煙、臭気、材料の飛散防止の対策もとられている。

その後、都市部での狭小配置を想定した、VP-Iの大型タイプとしてVP-IIを開発した。



資料C「実機写真 右:VP-I、左VP-II」



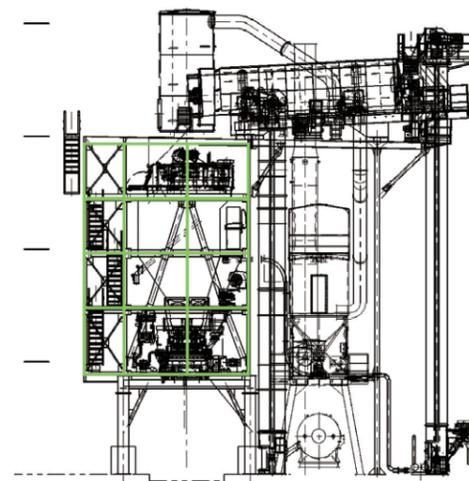
資料D「VP-I・VP-II イメージ図」

## 4. 更なる進化 VP-Series VP-Ⅲ

設計から見直し省スペース化を図ったVP-I、VP-IIだったが、その特徴を受け継ぎつつ、工期短縮と省スペース化を図ったのがVP-Ⅲである。

各フロアをトレーラーで運搬できる最大寸法のブロックに分け、ブロック毎に機械装置と配線を据え付けた状態まで製作する手法を取ることで、現地工事での組立工数を低減し、約15日の組立工事期間の短縮が可能となった。

また、AP本体とR計量ラインも同様にブロック化し、ドライヤユニットに関してもよりコンパクトになるよう設計を行った。従来タイプでもVドライヤの直上にバグフィルタを設置する方式はあったが、さらにその上部にRドライヤを設置することによってプラントのコンパクト化を図った。従来のアスファルトプラントと比べて約26%の平面面積の低減につながった。また、それに伴い基礎面積も低減するため、建設工事コスト削減が期待できる。



資料E「ブロック分けのイメージ図」



資料F「VP-Ⅲの組立方法」



資料G「VP-Ⅲ 社内仮組時の写真」

## 5. 今後の課題

作業者の作業効率や安全性を向上させるには、省スペース化においても、メンテナンススペースの確保が重要になると考えられる。

### 筆者紹介



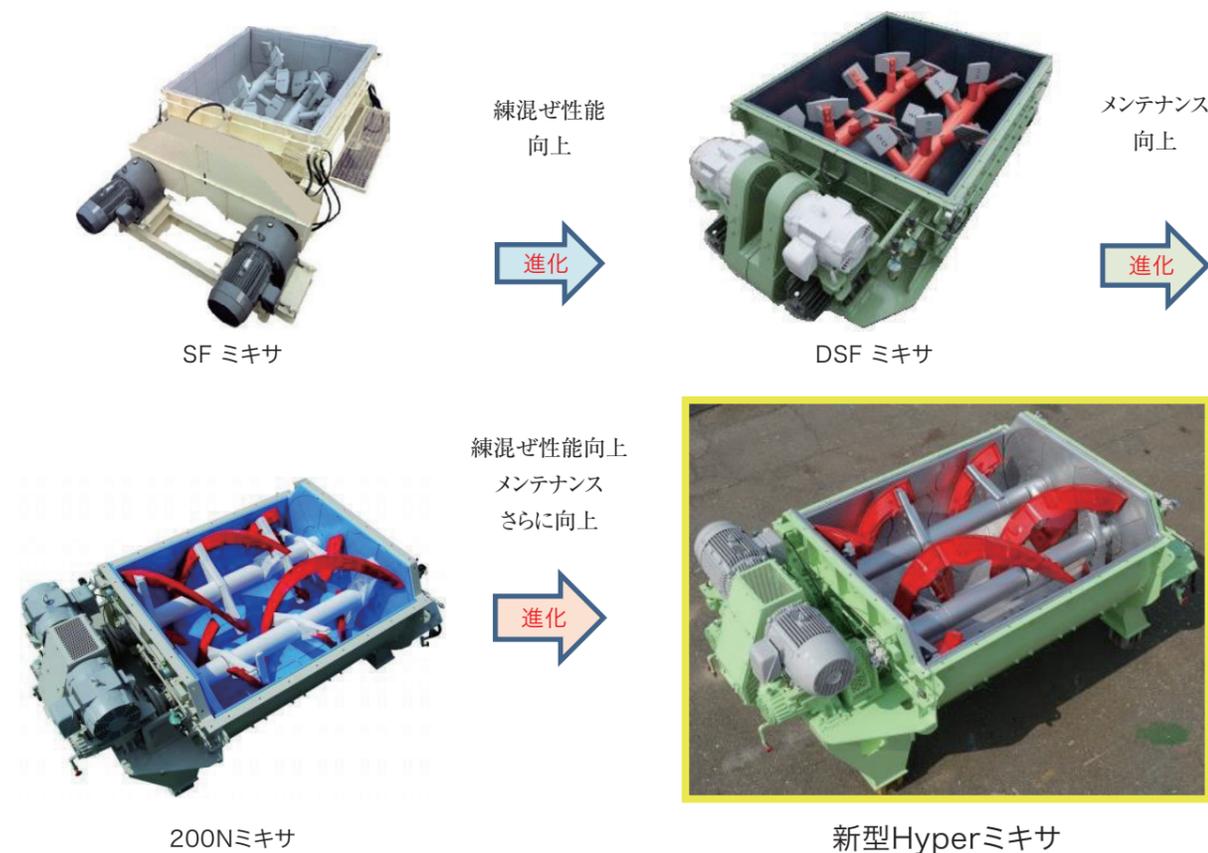
OKADA Takahiro  
岡田 崇弘  
2014年入社  
国内営業部

# — 製品紹介 — Hyperミキサ

はじめに

弊社では昭和26年からミキサの製造を開始。スミス式ミキサ、タービン式ミキサを開発し、昭和55年に現ミキサの元となる、2軸強練式ミキサのSFミキサ(スパイラル・フローミキサ)を開発、その後DSFミキサ(ダブルスパイラル・フローミキサ)、200Nミキサと順次モデルチェンジを行い、コンクリートの練混ぜ性能の向上、及び、メンテナンス向上への対応を行ってきた。

## 1. コンクリート用2軸ミキサの進化



日工の練混ぜ理論のベースとなる「RUN AROUND SPIRAL」すなわち、「らせん流動」「全体循環流動」「交錯流動」を継承しつつ、練混ぜ性能、メンテナンス性を向上させた。

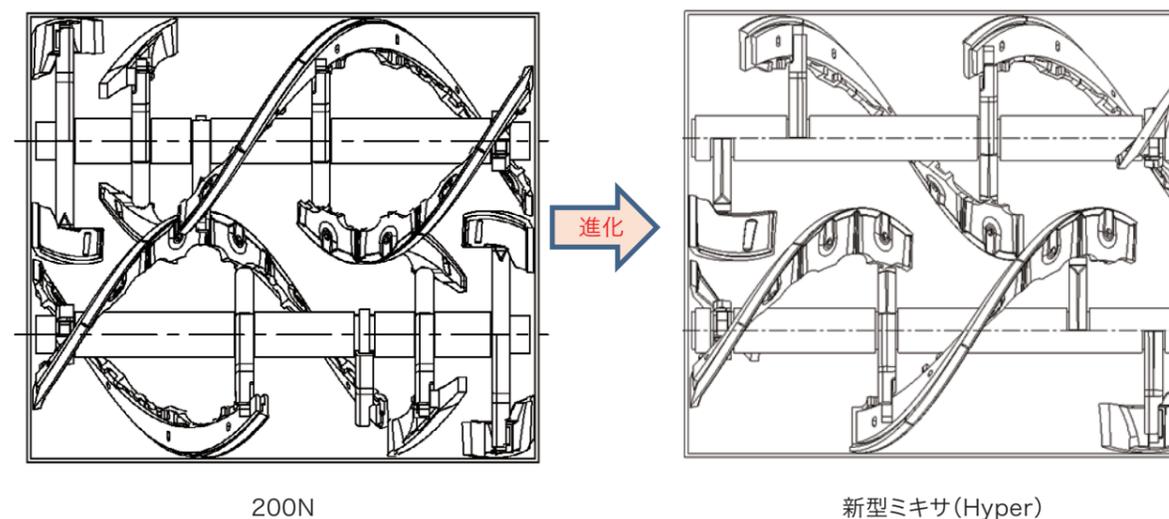
2. 今回新たに開発した新型ミキサ(Hyperミキサ)の開発コンセプトは以下を基本とした。

- ① 従来の日工ミキサ(DSF、200N)と同等以上の練混ぜ性能を確保
- ② メンテナンス性の向上
- ③ 80mm骨材配合コンクリートの練混ぜが可能なミキサ

3. また開発コンセプトによる構造上の基本的な考え方は以下の通りとした。

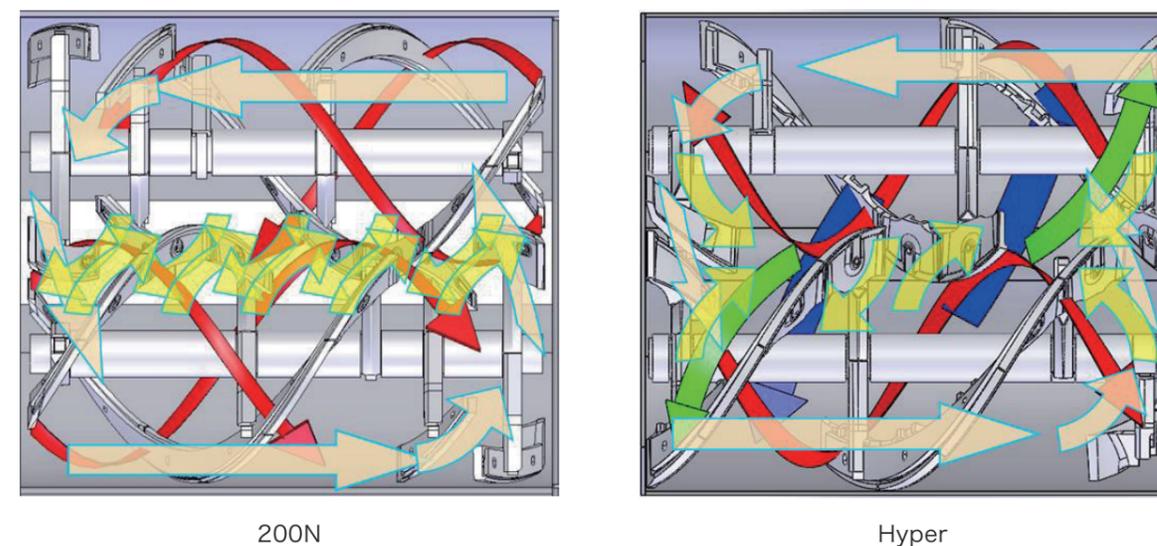
- ① 羽根はシングルスパイラルとし、羽根高さをアップ(羽根総面積は200Nと同等確保)
- ② 羽根枚数、アーム本数を少なくし、構造をシンプルに
- ③ 80mm骨材練混ぜ対応⇒羽根間隙間80mm以上確保 80mm仕様

以下のミキサの羽根の図面で違いをご確認ください。



## 4. 材料の動きによる練混ぜ理論(200Nとの比較)

以下に練混ぜ性能に影響を及ぼすミキサ内での材料の動きについて解説する。



練混ぜ性能に影響を及ぼす材料の動き	200N	Hyper
<b>赤色矢印</b> 2本の軸にからむ材料の軸方向の流れ ⇒らせん流動	ダブルスパイラルにより、らせん流動が大きい。	シングルスパイラルであるが羽根面積を大きくし、らせん流動を確保している。(DASH-200Nと変わらず)
<b>桃色矢印</b> 各種らせん流動による軸方向の全体的流れ ⇒全体循環流動	らせん流動が大きい為、軸方向の材料の移動と、返し羽根による相対する軸への材料の移動により、平面的な全体循環流動が大きい。	同左
<b>黄色矢印</b> 各種のらせん流動によって、2軸間で材料がせん断される流れ。2軸間(中央部)のせん断ポイント ⇒局部交錯流動	2軸間での連続交錯流動を優先している為、大きなせん断力が発生する。大きなポイントは3ヶ所。ダブルスパイラルの為、1回転につき6ヶ所発生。	シングルスパイラルの為、2軸間の連続交錯流動は限定されるが、大きな流れによる大きな局部交錯流動が発生する。せん断ポイントは3ヶ所。
<b>緑色矢印</b> かき上げられた材料が相対する軸側へのオーバーフローと巻き込まれる流れ ⇒卓越流動	ダブルスパイラルの為、相対する軸側への大きなオーバーフローは制限される。	シングルスパイラルの為、かき上げられた材料は相対する軸側への大きなオーバーフローと巻き込まれる流れがある。
<b>青色矢印</b> 相対する軸の底部空間に材料を送り込む流れ ⇒押し込み流動	ダブルスパイラルの為、相対する軸の底部空間は少なく、そこへの材料の送りこみは少ない。	シングルスパイラルの為、かき上げられた材料は相対する軸側への大きなオーバーフローと巻き込まれる流れがある。
<b>特徴まとめ</b>	ダブルスパイラルによる2軸間中央部での材料のせん断を優先する連続交錯流動と、ダイナミック且つハードな材料の動きを特徴とするミキサ。	らせん流動、全体循環流動、交錯流動がバランスよく設計され、且つ相対する軸の底部空間や上部空間を利用した卓越流動と押し込み流動によりダイナミックな材料の動きを特徴とするミキサ。

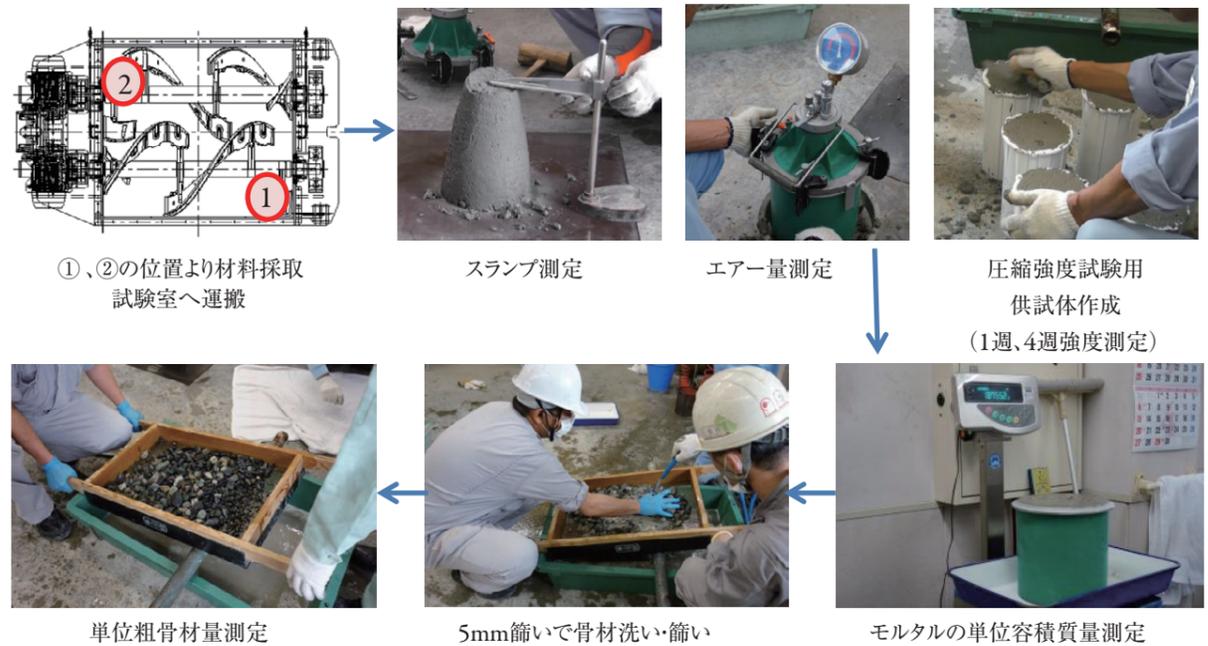
5. 練混ぜ性能の確認(客先練混ぜ性能試験結果)

練混ぜ性能試験実施配合と条件

配合	練混ぜ量	練混ぜ時間 = (投入所要時間+ミキシングタイム)
建築用コンクリート (24-18-25)	2.5m <sup>3</sup>	30秒 = (15秒+15秒)
	2.75m <sup>3</sup>	35秒 = (15秒+20秒)
	2.75m <sup>3</sup>	45秒 = (15秒+30秒)
土木用コンクリート (24-8-25)	2.5m <sup>3</sup>	35秒 = (15秒+20秒)
	2.75m <sup>3</sup>	40秒 = (15秒+25秒)
	2.75m <sup>3</sup>	50秒 = (15秒+35秒)
80mm 骨材コンクリート (21-5-80)	2.0m <sup>3</sup>	40秒 = (20秒+20秒)
		50秒 = (20秒+30秒)

練混ぜ時間は投入所要時間とミキシングタイムの合計時間で示した

練混ぜ性能試験方法の手順を以下に示す。



サンプリング位置①、②に対してそれぞれ試験を行い、①、②との差を確認する。

① 建築用コンクリート(24-18-25)2.5m<sup>3</sup>、2.75m<sup>3</sup>混練試験結果

以下に試験結果を示す。

練混ぜ量 (m <sup>3</sup> )	練混ぜ時間 (秒)	試料採取位置	スラン プ S (cm)	空気量 A (%)	モルタルの単位容積質量 M (kg/m <sup>3</sup> )	単位粗骨材量 G (kg/m <sup>3</sup> )	モルタルの単位容積質量の差 M' (%)	単位粗骨材量の差 G' (%)	空気量の偏差率 ΔA (%)	スラン プの偏差率 ΔS (%)
2.5	30 = 15+15	①	17.5	5.2	2267	979	0.09	0.05	0.95	0.00
		②	17.5	5.3	2271	978				
2.75	35 = 15+20	①	17.5	4.8	2267	987	0.02	0.40	2.13	0.00
		②	17.5	4.6	2268	995				
	45 = 15+30	①	18.5	4.7	2243	943	0.16	0.43	5.62	0.00
		②	18.5	4.2	2236	935				

練混ぜ時間は材料投入開始からコンクリート排出開始までの時間を表し、下段に投入所要時間とミキシングタイムの値を示す。これらの結果より、すべてJISの規格に納まり、またその値も非常に小さいことから、良好な結果が得られたことがわかる。

② 土木用コンクリート(24-8-25)2.5m<sup>3</sup>、2.75m<sup>3</sup>混練試験結果

以下に試験結果を示す。

練混ぜ量 (m <sup>3</sup> )	練混ぜ時間 (秒)	試料採取位置	スラン プ S (cm)	空気量 A (%)	モルタル の単位容 積質量 M (kg/m <sup>3</sup> )	単位粗骨 材量 G (kg/m <sup>3</sup> )	モルタルの 単位容 積質量 の差 M' (%)	単位粗 骨材量 の差 G' (%)	空気量 の偏差 率 △A (%)	スラン プの偏 差率 △S (%)	JIS 規格			
											≦0.8	≦5	≦10	≦15
2.5	35= 15+20	①	10.0	4.9	2282	1072	0.07	0.47	1.03	0.00				
		②	10.0	4.8	2279	1062								
2.75	40= 15+25	①	8.0	4.2	2283	1061	0.20	1.12	8.70	8.57				
		②	9.5	5.0	2274	1085								
	50= 15+35	①	9.5	4.5	2276	1084	0.20	0.98	3.23	2.70				
		②	9.0	4.8	2267	1063								

練混ぜ時間は材料投入開始からコンクリート排出開始までの時間を表し、下段に投入所要時間とミキシングタイムの値を示す。

これらの結果より、すべてJISの規格に納まり、またその値も非常に小さいことから、良好な結果が得られたことがわかる。

③ 80mm骨材コンクリート(21-5-80)2.0m<sup>3</sup>混練試験結果

以下に試験結果を示す。

練混ぜ量 (m <sup>3</sup> )	練混ぜ時間 (秒)	試料採取位置	スラン プ S (cm)	空気量 A (%)	モルタル の単位容 積質量 M (kg/m <sup>3</sup> )	単位粗骨 材量 G (kg/m <sup>3</sup> )	モルタルの 単位容 積質量 の差 M' (%)	単位粗 骨材量 の差 G' (%)	空気量 の差 △A (%)	スラン プの差 △S (%)	JIS 規格			
											≦0.8	≦5	≦10	≦15
2.0	40= 20+20	①	6.0	4.4	2243	1257	0.18	0.12	1.12	4.00				
		②	6.5	4.5	2235	1254								
	50= 20+30	①	5.5	3.7	2271	1233	0.29	0.37	2.78	4.76				
		②	5.0	3.5	2258	1224								

練混ぜ時間は材料投入開始からコンクリート排出開始までの時間を表し、下段に投入所要時間とミキシングタイムの値を示す。

これらの結果より、すべてJISの規格に納まり、またその値も非常に小さいことから、良好な結果が得られたことがわかる。

以下に圧縮強度結果一覧を示す。

配 合	練 混 ぜ量 (m <sup>3</sup> )	練混ぜ 時間 (秒)	試料 採取 位置	材 齢 7 日			圧縮強 度の偏 差率 △σ	材 齢 28 日						
				圧 縮 強 度				平均 値 (N/mm <sup>2</sup> )	標 準 偏差 σ (N/mm <sup>2</sup> )	変 動 係数 (%)	平均 値 (N/mm <sup>2</sup> )	標 準 偏差 σ (N/mm <sup>2</sup> )	変 動 係数 (%)	圧縮強 度の偏 差率 △σ
				平均 値 (N/mm <sup>2</sup> )	標 準 偏差 σ (N/mm <sup>2</sup> )	変 動 係数 (%)								
建築用 コンクリート (24-18-25)	2.5	30= 15+15	①	24.3	0.34	1.40	0.6	31.3	0.29	0.92	1.3			
			②	24.0	0.22	0.90		32.1	0.51	1.59				
	2.75	35= 15+20	①	23.9	0.22	0.90	1.0	32.4	0.29	0.91	1.2			
			②	24.4	0.25	1.02		33.2	0.33	0.98				
		45= 15+30	①	23.3	0.24	1.05	0.7	30.5	0.25	0.82	0.4			
			②	23.6	0.17	0.72		30.8	0.29	0.96				
土木用 コンクリート (24-8-25)	2.5	35= 15+20	①	22.5	0.29	1.27	1.3	31.3	0.12	0.40	0.6			
			②	23.1	0.31	1.34		31.7	0.25	0.79				
	2.75	40= 15+25	①	24.7	0.33	1.33	1.6	32.0	0.45	1.42	0.5			
			②	23.9	0.61	2.56		31.7	0.29	0.91				
		50= 15+35	①	25.0	0.21	0.82	0.5	32.0	0.40	1.26	1.2			
			②	24.8	0.37	1.51		31.2	0.37	1.20				
80mm 骨材 コンクリート (21-5-80)	2.0	40= 20+20	①	14.5	0.16	1.13	0.0	26.4	0.29	1.08	0.7			
			②	14.5	0.16	1.13		26.8	0.22	0.81				
		50= 20+30	①	17.7	0.22	1.22	0.7	26.6	0.22	0.81	0.5			
			②	18.0	0.12	0.69		26.9	0.21	0.76				

圧縮強度偏差率△σは、JIS規格値7.5%以下

練混ぜ時間は材料投入開始からコンクリート排出開始までの時間を表し、下段に投入所要時間とミキシングタイムの値を示す。

全ての配合においてJIS規格の範囲7.5%以下内に収まり良好な結果が得られた。

6. メンテナンスについて(200Nに対しての機能改善)

① 底ライナに雲形ライナを採用

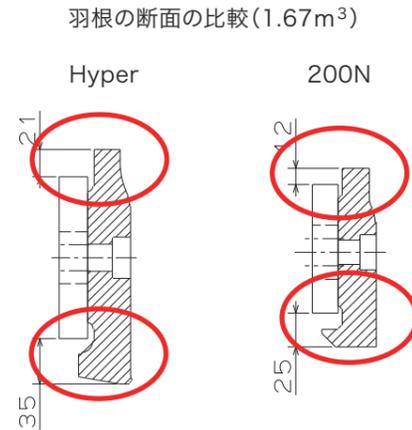
羽根と底ライナの偏摩耗の抑制と寿命延長の目的で、底ライナに雲形ライナを採用した。

四角形の底ライナでは、ライナとライナの継ぎ目で羽根が骨材を噛み込みやすくそこを通過する羽根のところで、羽根に部分的に偏摩耗が発生していた。ライナ形状を下の写真のようにRをつけた形に変更することにより、噛み込みが減少し、偏摩耗を抑制することができた。



② 羽根形状の変更

羽根、羽根取付けスパイラ、ライナの寿命延長の目的で羽根の形状を変更した。下図の赤で囲んだ部分のように羽根先端(下端)、上端の摩耗代を増やす

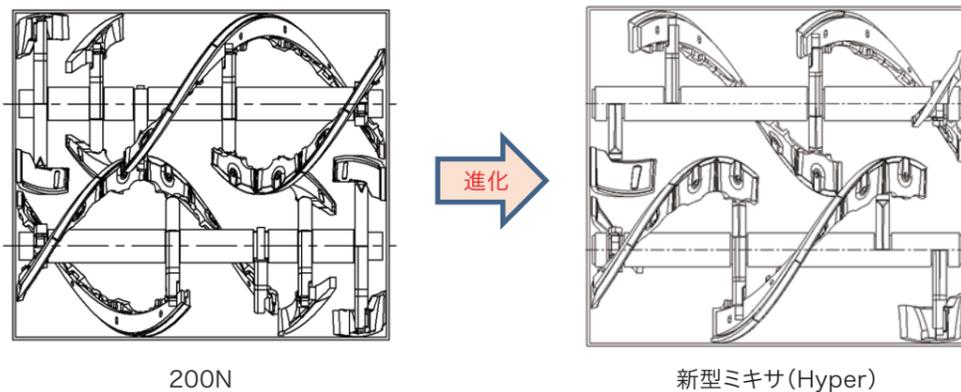


200Nのダブルスパイラル羽根からシングルスパイラル羽根に構造変更し、羽根とライナの接触回数を減らし、ライナの寿命延長を図った。

③ 羽根、ライナ、アームプロテクタの交換作業時間、洗浄時間の短縮

ダブルスパイラル羽根からシングルスパイラル羽根に構造変更し、羽根枚数を1軸あたり14枚から11枚に減少させた。それに伴い、アームプロテクタ個数も1軸あたり9セットから6セットに減った。

これにより、ミキサ内の作業空間が増え、交換作業の効率が上がった。また、羽根、アーム本数が減ったことによりミキサ内の洗浄時間も短縮できた。

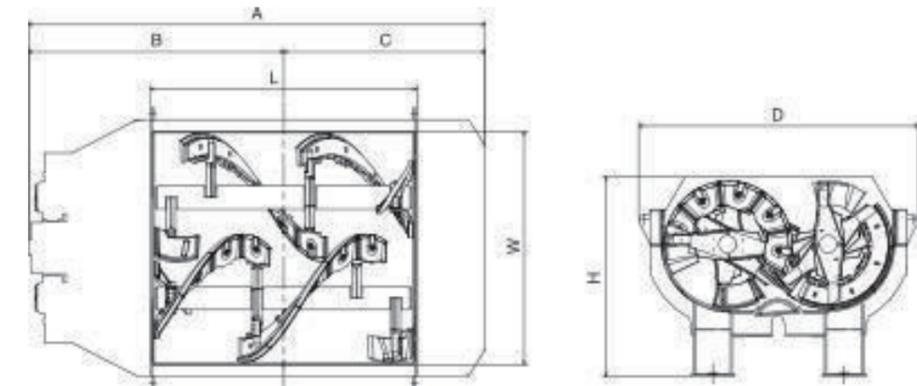


シングルスパイラル羽根と返し羽根の位置見直すことにより、ミキサカバー内のコンクリートの飛散も減少した。

7. ミキサのラインナップ、主要諸元

型式	DSH-50	DSH-130	DSH-167	DSH-225	DSH-275	DSH-330	DSH-600
練混ぜ容量 [m³]	0.5	1.3	1.67	2.25	2.75	3.3	6.0
電動機 [kW]	22×1台	22×2台	30×2台	37×2台	45×2台	55×2台	110×2台
寸法 [mm]	A	3157	3070	3480	3900	4000	5560
	B	1988	1730	1945	2220	2270	2430
	C	1169	1340	1535	1680	1730	1830
	D	1600	2130	2130	2290	2475	2608
	H	1150	1520	1520	1650	1675	1800
	L	1340	1660	2030	2300	2400	2600
	W	1250	1800	1800	1960	2145	2250
質量 [kg]	3300	6000	6500	8500	10000	11000	24000

※上記仕様、寸法等は、改良のため予告なく変更する場合がありますのでご了承ください。



9. おわりに

このように、Hyperは200Nに比べ、混練性能、メンテナンス性両方にすぐれたミキサとなっていることがおわかりいただけたと思います。コンクリートは日々進化しており、高強度コンクリートはさらに、その強度を増している。その進化するコンクリートに必要なミキサも日々進化が要求されている。今後もこれらの市場のニーズに対応したミキサ開発に貢献しようと努力しているところである。

筆者紹介



WATANABE Masayasu  
渡辺 真康  
1980年入社  
開発部

— 製品紹介 —

# PETボトル選別機「PETRIS」

## 1. 開発背景

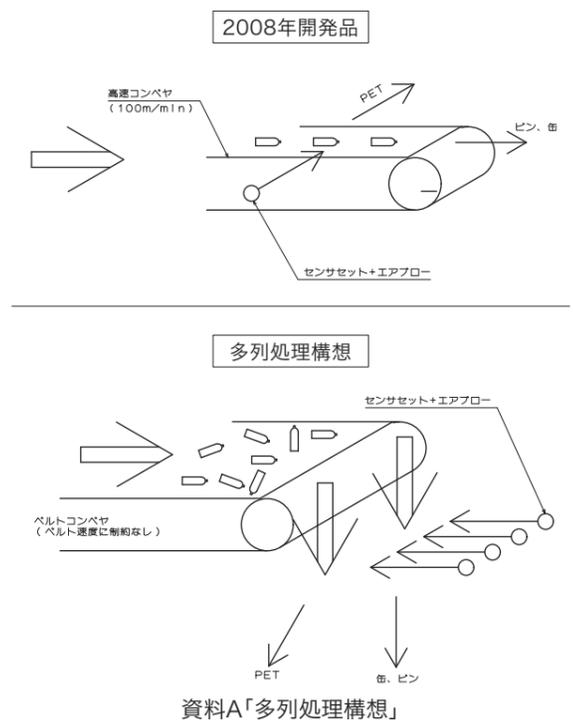
飲料容器(缶・びん・ペットボトル)に占めるペットボトルの割合が年々増えている。ペットボトルは、ほぼ手作業にて選別されているが、都市部においては作業員の確保が難しい状況が見受けられる。

ペットボトルの自動選別機の需要が充分に見込まれるとして、当社は2008年にベルトコンベヤ上に一列に整列された材料からペットボトルをエアで吹き飛ばす選別機を開発した。展示会では好評であったが整列の技術的問題があり、市場には受け入れられなかった。が、この選別機でセンサ2種類でペットボトルを認識しエアで吹き飛ばして選別するという技術を確立した。

本稿ではベルトコンベヤから落下する材料からペットボトルを選別するシステム(多列処理)を考案し、製品化が可能かどうかの実証テストを行い実記納入に至った経緯を紹介する。

尚、製品紹介に便利のため機械装置名を「ペットボトル選別機」としているが、実態は「透明ボトル選別機」である。(PVC、PP、PEボトルもPETボトルと同様に選別される)

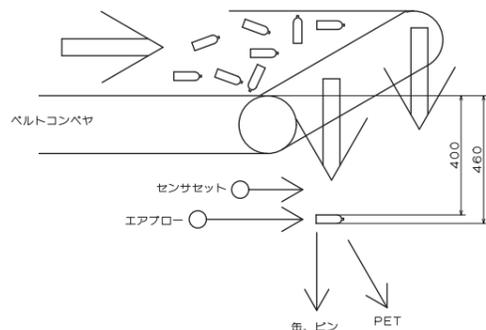
### 1.1 多列処理構想



ベルトコンベヤ上のワークは単層を条件としている。エアブローの向きはベルト進行方向に対し、正・逆どちらも考えられる。テスト機、実機は正方向とした。

### 1.2 懸念事項

- ・センサ、電磁弁の応答速度
- ・ワークから飛んでくる汚れ(しぶき)の影響



ワークの大きさをφ60mm×150mmとし、落下中のワークがある一点を通過する時間を計算する。

ベルトコンベヤから400mm下方にセンサセット、エアブローを設置とする。

ワークがベルト面から400mm落下するまでの時間t1は

$$0.4 = 1/2gt^2 \quad (gは重力加速度: g=9.8)$$

$$t1 = 0.286(sec)$$

$$0.46 = 1/2gt^2$$

$$t2 = 0.306(sec)$$

従って60mmのワークがセンサセット位置、エアブロー位置を通過する時間Δtは

$$\Delta t = t2 - t1$$

= 0.02(sec) つまり2/100秒間しかセンサは出力を出さないし、エアブローの時間も2/100秒しか(チャンスがない)。センサはタイムラグがあるし、エアブローも信号を受けてからボトルを吹き飛ばすまでの圧力上昇とOFF時の下降タイムラグがある。

この点が実用化できるかどうかの鍵になることは明白であり、社内テストは必須であった。

尚、参考までに460mm落下位置でのワークの落下速度v2は

$$V2 = gt^2$$

$$= 3.0(m/sec) = 180(m/min)$$

(註) 上記計算は空気抵抗を無視している

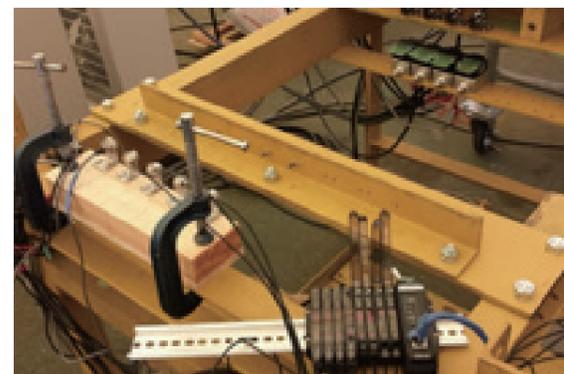
## 2. 開発経過

### 2.1 2017年5月、開発稟議が承認され開発スタート

- ・要求基本性能、仕様
- 目標選別率: 90% 目標純度: 95%
- 処理能力: 17m<sup>3</sup>/h

(最終的な要求性能についてはフィールドテストにて見極める)

- ・社内テスト: 2017年5月~2018年2月



・最初はセンサ・ノズルを1setで動作確認を行った。当初構想どおり動作することを確認後、センサ・ノズルを4setとした。

・4setでのテスト時には想定外の問題が発生した。この程度(40~60mm)の間隔でセンサを配置するとセンサ同士の干渉現象が起きた。

(センサーメーカーのキーエンス殿は干渉しないとしていたが実際には発生)

・詳細は省くが干渉の問題には、センサ透過力、応答速度等との相関関係があり、解決にいたるまでにキーエンス殿の多大なご協力(テスト品・データ収集ソフト等の提供)があったことを記しておく



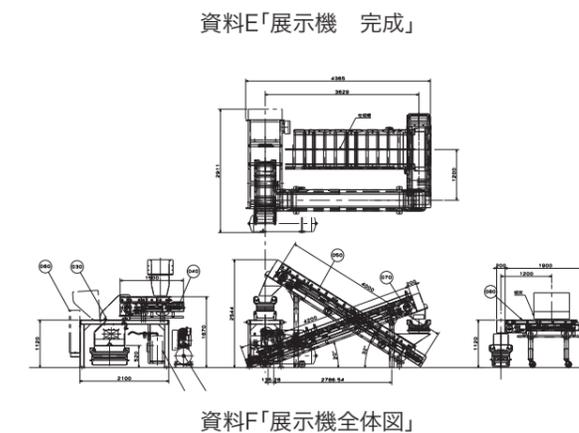
干渉問題の解決後、ベルトコンベヤで連続的にワークを投入し能力確認を行った。

この時点で選別率、純度は共に約90%

能力は約20m<sup>3</sup>/hを確認した。

ほぼ要求性能を満たすことがわかり、展示機の製作に取りかかった。

### 2.2 2018年4月 展示機製作



ベルトコンベヤでループを組み、連続運転の展示を可能とした。

展示機PETRIS主仕様

- ・処理能力: 20m<sup>3</sup>/h
- ・ベルト巾: 350mm
- ・動力: 5.5kW(エアコンプレッサ)
- 0.4kW(エアドライヤ)
- 1.0kW(ベルトコンベヤ)

展示機(PETRIS以外)主仕様

- ・供給コンベヤ: 350mm巾段付きベルト、1.5kW SM35
- ・No.1リターンコンベヤ: 750mm巾中寄ベルト、1.5kW、SM75
- ・No.2リターンコンベヤ: 400mm巾、0.4kW SM40

2.3 2018年5月 2018NEW環境展に出席



資料G「2018NEW環境展」

引き続き2018年11月「NIKKO MESSE」で展示を行った。

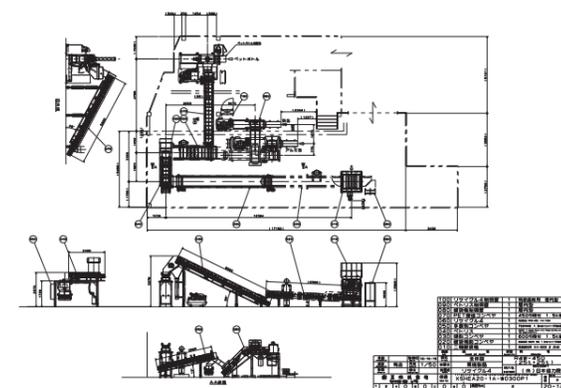
2.4 2018年12月 初号機を(東京)日本協力株式に納入(既設リサイクル4にPETRISライン増設)

3.日本協力株式向けPETRIS

3.1 仕様

- ・処理能力 : 25m<sup>3</sup>/h
- ・ベルト巾 : 400mm
- ・動力 : 3.7kW(エアコンプレッサ)  
0.4kW(エアドライヤ)  
1.0kW(ベルトコンベヤ)

3.2全体図



資料H 「日本協力株式 全体図」

- ・主要既設品: 破袋機(KH-900)  
破袋補助コンベヤ(SM60)  
リサイクル4(R4W-450)

- ・新作納入品: PETRIS(コンベヤSM40)  
傾斜コンベヤ(SM60)  
手選別コンベヤ(SM75)  
PET搬送コンベヤ(SM45)  
PET梱包機(日工範囲外)

3.3日本協力株式 納入写真



資料I 「傾斜コンベヤ、PETRIS、手選別コンベヤ」



資料J 「破袋機、破袋補助コンベヤ、傾斜コンベヤ」  
破袋機、破袋補助コンベヤは2012年3月納入



資料K 「リサイクル4(R4W-450)」

リサイクル4は2012年3月納入  
今回、鉄缶プレス機を配置変更  
鉄缶プレス機上ホッパは新作品に取替  
右奥にPET梱包機

3.2日本協力株式で発生した問題点

- ・材料から吹き飛ばされる汚れがセンサに付着し、誤動作が発生。その都度清掃が必要(1~2時間毎)
- ・仕様以上に材料が供給される場面では選別が悪くなる。コスト面の余裕があればPETRISの能力選定は余裕を持たせるべき。

・汚れ対策としてはセンサの前に穴を開けた板を設置した。又、この穴開き板は差し込み式とし、容易に取り外して清掃できるようにした。

この対策により丸一日の運転を行っても誤動作の発生はほぼなくなった。



資料L 「センサ汚れ対策」

3.3 日本協力株式向けPETRIS評価

- ・処理能力は瞬間的に30m<sup>3</sup>/hの場合があり、設計能力の25m<sup>3</sup>/hを満足した。  
供給量が30m<sup>3</sup>/hを超えると選別性能が悪くなる。
- ・選別率、純度はどちらも90%程度
- ・客先からは「プラント全体の処理能力が上がった」との評価を頂いた。

4.今後の課題

- ・センサの干渉、応答速度、透過力の関係で、今回開発した製品は、濃い着色ラベルの付いたペットボトルの選別は苦手

となっている。通常のボトルであっても何とか90%程度を選別できるぎりぎりの性能のものである。今後、透過力が強く応答速度が速く、干渉のないセンサが入手できれば、さらに性能UPが期待できる。

筆者紹介



ARIYOSHI Syojiro  
有吉 章二郎  
1980年入社  
設計部

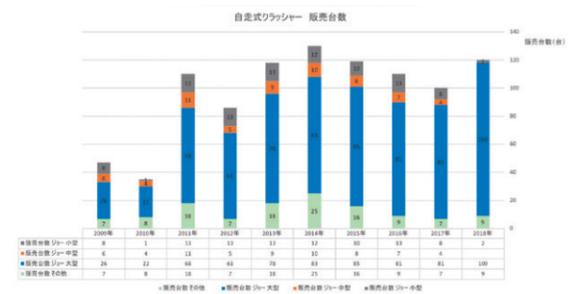
# 自走式破砕機 MC100Ri

## 1. はじめに

近年、生コンクリートの生産量やアスファルト舗装材の出荷量が減少傾向にあり、それらの主材料を占める骨材は減少傾向にある。しかし、社会のインフラ構築に不可欠となる骨材は、東京オリンピックの開催やリニア中央新幹線の新設計画や老朽化したインフラの再構築などで中長期的には堅実な需要が見込まれると考えられております。当社はそうした社会変化に順応に対応すべく、骨材生産の重要な役割を果たす破砕機に注目しておりました。そして、創業100年となる2019年にモバイルプラント事業部が発足し、世界的な自走式破砕機メーカーKLEMMANN社の日本総代理店となり、自走式破砕機や自走式スクリーンを主力製品として販売しております。

従来、日本では定置式破砕プラントが主流でした。しかし、定置式プラントは更新や新設のインシヤルコストが大きいため、変化する需要に対応することに不向きな点や自走式では用途に合わせて組合せることが可能な点から、近年は大型の自走式破砕プラントの需要が非常に高まっている。(資料A「国内の自走式破砕機 販売台数推移」)

本稿では弊社が取り扱う「KLEMMANN社製自走式破砕機」について紹介します。



資料A「国内の自走式破砕機 販売台数推移」

## 2. 自走式破砕機の構造

自走式の大きなメリットは本体シャーシの上に搭載された機械設備を本体ごとクローラで自走可能なことがあります。MC100Riの場合、ホッパーや破砕機、コンベア、制御装置等のさまざまな機械設備が搭載されております。(資料B「MC100Ri 外観」)また、自走可能な機械は破砕現場へ



資料B「MC100Ri外観」

移動させ破砕することが可能なため、定置式に比べダンプトラックなどの運搬費用を抑え、低ランニングコストが実現可能な点も人気の要因となっております。

## 3. 破砕方式(ジョークラッシャ)

骨材に適した破砕方式は3種(ジョークラッシャ、インパクトクラッシャ、コーンクラッシャ)あります。それぞれに特徴がありますが、本稿ではジョークラッシャを紹介します。(資料C「ジョークラッシャ 外観」)

ジョークラッシャは固定された固定歯に対して、振幅する動歯が動き、まるで人間の顎で噛むように砕石を噛み砕く方式です。これによりジョークラッシャの前後で材料を破砕し、材料は破砕を実現します。生産材料のサイズ調整は動歯後部の過負荷プレートに油圧で調整し、動歯と固定歯間の距離を変化させることで材料サイズを容易に調整可能です。

また、弊社のMC100Riでは破砕機内のセンサにより破砕室内の負荷を常時監視しており、異常負荷を検出すると動歯を開き、破砕室が自動で保護されます。



資料C「ジョークラッシャ 外観」

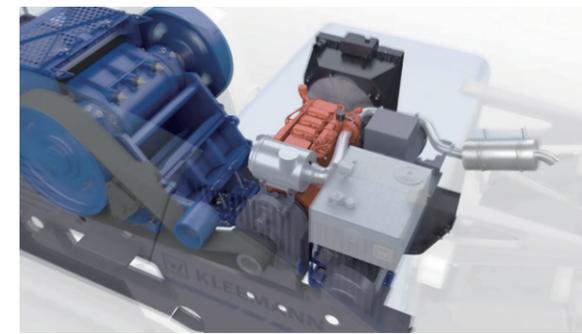
## 4. 製品紹介

本稿では、当社の人気自走式破砕機のMC100Riの主機能をご紹介します。

### 4. 1. ハイブリッド駆動方式

破砕機は流体クラッチを介したディーゼルエンジンとダイレクト駆動です。(資料D「ハイブリッド駆動方式」)そのため、フィーダや磁選機およびコンベアは電気モータを併用したハイブリッド駆動方式で圧倒的な低燃費を実現しております。

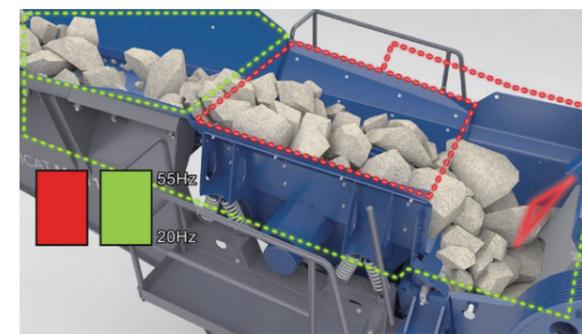
当社調べによると、破砕材料にも依存するが、当社MC100Riの燃費約13L/hに対し、同等機種は約28L/hとなっており、この低ランニングコストが好評です。



資料D「ハイブリッド駆動方式」

### 4. 2. CFS搬送制御システム

CFSシステムとは破砕室へ材料を効率良く、継続的に供給する独自の材料搬送制御システムです。(資料E「CFS搬送制御システム」)破砕室上部の超音波センサの満量レベルを常時監視し、センサが破砕室内の満量レベルを感知すると自動的にフィーダの振幅を減少させ、材料搬送量を常に適量に調整します。これにより高効率な破砕を実現させるとともに、破砕室からの材料溢れを防ぎます。



資料E「CFS搬送制御システム」

### 4. 3. MC100Riの主仕様

- 破砕能力
  - 供給口寸法: 950×550mm
  - 破砕機出力: 165kW
  - 破砕能力: 95~105t/h (CSS60mm)
  - 130~150t/h (CSS85mm)

### ●機種サイズ

運搬寸法: 12,950×3,000×3,200mm

重量: 30t

### 5. 関連製品

モバイル事業部は本稿で紹介した自走式破砕機MC100Riの他に様々な能力、用途の製品を多数取り扱っております。その一部を紹介します。

### ●自走式ベルトコンベア

自走式破砕機やスクリーン等に組み込みが可能です。また、輸送が容易なだけでなく、素早いセットアップが可能です。(資料F「自走式ベルトコンベア」)



資料F「自走式ベルトコンベア」

### ●小型破砕機

大容量の処理を求めないお客様に人気の機種です。(資料G「小型破砕機」)コンクリートやレンガや陶器、ガラス、その他骨材の製品化や減容化にお勧めです。



資料G「小型破砕機」

### 筆者紹介



FUNAKOSHI Ryohei  
船越 良平  
2016年入社  
事業企画部

— 製品紹介 —

# 小型ドラム式乾燥機「マルチドライヤー」

## 1.はじめに

世の中には、材料の水分を除去すれば、その性質や、その後の工程を大きく変える事が出来るケースが多く存在します。例えば建築廃材の石膏ボードは水分を飛ばせば、固化材やセメント原料にリサイクル出来たり、牡蠣殻などは、その後の破碎、選別、搬送などが非常にやりやすくなります。日工では、道路舗装に使用するアスファルトプラントで長年培ってきた加熱乾燥技術をプレイクダウンした小型ドライヤーを新たな市場に投入し、各地で活躍しています。



## 2.マルチドライヤーの開発とコンセプト

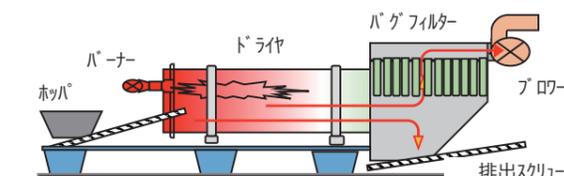
開発のきっかけは、石膏ボードのリサイクルでした。石膏ボードは耐火性が高く、吸排湿性に優れた建材として現在、多くの建築物に使用されています。老朽化や耐震の関係で建て直しが行われる際には産廃としてこの石膏ボードも排出されます。産廃となった石膏ボードは、フッ素の溶出や硫化水素の発生の危険性があることから、管理型の埋立処分場への持込みが必須となります。このような背景の中で石膏ボードの再利用の手法として考えられているのが固化材としての利用です。石膏ボードに使用されている石膏は、一般に二水石膏(CaSO<sub>4</sub>・2H<sub>2</sub>O)と呼ばれています。これを乾燥させて結晶水の1部を飛ばしてやることで半水石膏(CaSO<sub>4</sub>・1/2H<sub>2</sub>O)になります。半水石膏は水を加えると固化する性質があり、土壌改良材や固化材として利用されています。マルチドライヤーはこの半水石膏を製造する装置として開発致しました。さらに本来の性能は当然のことながら、設備をいかにコンパクトに収め、いかに簡単に設置するかも重要な条件と位置付け、投入+加熱乾燥+排出+集塵+制御までも1ユニット化し11トトラック1台で運べるサイズに収めました。



## 3. 構造

加熱乾燥装置として、3000台近くの納入実績のある連続横型ドラム式で、材料温度制御がやりやすい並流タイプ※を採用しています。(※バーナーで発生した熱風と材料が同じ方向に向かって加熱乾燥を行う方法)

内蔵したバグフィルターで捕集された粉塵は、本来は材料の一部で有る為、脱塵後はそのまま材料に還元し、ダストとして外部に排出されない構造になっています。



## 4. 仕様

型式	NMD-100	NMD-200
ドラムサイズ	Φ1100*3.5m	
最大燃焼量	490/h	1000/h
処理量(比重)	1t/h(0.85)	2t/h(0.85)
総動力(kW)	約22kW	約30kW

## 5.他業界への展開

石膏ボードの再生利用として誕生した本装置ですが、展示会やHPなどで紹介させて頂いたところ様々な業界のお客様からお問い合わせを頂きました。前述の通り、乾燥させることにより、その後の工程やメンテナンスに有効な装置であるご好評を頂き、現在では石膏関係以外のお客様へも納入実績を増やしております。

### ①牡蠣殻の乾燥



牡蠣殻を破碎、分級するための事前乾燥として使用

### ②軽石熱乾燥装置



## 6.加熱技術でさらなる市場へ

弊社は、加熱乾燥の市場だけに留まらず、焼却、焼成というエリアにも一部進出しております。加熱乾燥が200℃の領域に対し、焼却、焼成は1000℃の世界。今後、この温度領域の技術を利用した製品開発にも注力して参ります。一部納入事例をご紹介します。

### ①土壌浄化プラント



主に油で汚染された土壌の浄化に使用されました。

### ③無水石膏製造プラント



## 筆者紹介



IWASAKI Tetsuya  
岩崎 哲也  
1994年入社  
開発営業部

# ドライヤ・タンクの自動溶接ライン

## 1. はじめに

合材サイロやDCタンク(アスファルトタンク)などのt3.2のSS材を使用した外径2m以上の大型円筒容器(タンク類)を製作している。漏洩などあってはならない製品のため、内外面の溶接に関して非常に神経を使う作業となる。溶接作業はターニングローラ上で製品を回転させながら行うが、下向き溶接を確保するため、天頂位置で溶接を行う必要がある。厳密な真円は無いため、突き合わせの溶接位置は回転とともに常時微小に変化するため、人が目視で溶接トーチの微妙な位置調整を行いながら溶接作業を行っていた。その場所はフロアから2m以上の高さでの作業である。

今回、無人自動溶接ラインを開発したのでこれを紹介する。

## 2. 開発の目的

下記に開発目的を示す

- 1) 無人溶接が可能であること
- 2) 多層盛溶接の工数削減
- 3) タンク類製品の天井クレーン作業(移動)の削減
- 4) 作業動線の短縮
- 5) 搬出入作業の効率化
- 6) 各作業の安全性の向上

## 3. タンク類(薄板用)自動溶接ラインの紹介

### 3-1 長手方向のレールライン

天井クレーンによる吊り上げ場所移動などを極力減らすために、写真1,2のようなタンク類を長手方向にレール上を移動させて製作を進めていくライン形状に変更した。



図1 新ドライヤ・タンク製造ライン



写真2 タンクの無人自動溶接

### 3-2 回転治具

タンク類の回転速度を制御しながら回転時の躯体溶接部のブレを極力少なくするために、写真3の回転治具でタンク本体を挟み、溶接ロボットと回転治具を連動させた。溶接ロボットに搭載したレーザーセンサーで、溶接線(つなぎ目)の検出と補正を自動制御することにより、無人化を達成した。



図3 回転治具

### 3-3 倣い自動溶接のフロー

倣い自動溶接のフローを下記に示す。

- 1) ワークを回転させながらセンサーで溶接位置を検出
- 2) 検出した溶接位置(軌跡)を自動溶接システムに記録
- 3) 記録した軌跡データ通りに自動溶接を行う

### 3-4 新ラインの特徴と効果

各機器の構成により以下の特徴が得られた。

- 1) 回転治具により躯体のブレが減少
- 2) センサによる溶接線の検出がほぼ100%達成
- 3) 上記2点により無人自動溶接が可能に
- 4) タンク上での高所作業の削減

## 4. ドライヤ(厚板)用自動溶接ラインの紹介

前述のタンクラインと基本思想は同様であるが、t9mm以上の厚板製品のため、タンク類とは異なり、開先の多層盛溶接が対象となる。ドライヤ自動溶接の特徴は下記のとおりである。

- 1) 多層盛(ウェブ)溶接
- 2) 溶接トーチをスライド式伸縮アーム(図4)にて保持
- 3) 開先部のセンサ検出とポジションによる連動制御によるリアルタイムでの追従型自動溶接(図5)



図4 スライド式伸縮アーム



図5 追従型自動溶接

## 5. おわりに

設備はまだ目指している完成形ではないが、さらに品質、効率、安全性の向上に努めていく。

最後になるが、本プロジェクトを遂行する為に、熱心なご指導、ご鞭撻を戴いた上位職の皆様、製造ラインの要望に応えるために熱心な研究と開発、設備設置に尽力してくれた、生産技術の皆様、また、日々の生産で忙しい中、本設備製作に携わって頂いた製造部各課の皆様に厚く御礼申し上げます。

## 筆者紹介



SORA Yasuhiro  
空 泰弘  
1991年入社  
本社工場



KISHIMOTO Tomoya  
岸本 知也  
1994年入社  
本社工場



NISHISAKA Kenta  
西坂 健太  
2010年入社  
生産技術室

# ファイバーレーザー切断加工機の導入

## 1. はじめに

本社工場の鋼板加工は、CO2レーザー切断機3台とプラズマ切断機1台を使用して、鋼板関係で月産約400tの切断加工を行っている。鋼板の切断加工では、薄板から中板はCO2レーザー、中板から厚板はプラズマ、厚板はガス切断がそれぞれ主流であり、当社ではt32mmまで切断しているためCO2レーザーとプラズマを使用している。

鋼板の切断加工機の業界では、30年に1度の技術革新といわれる高速で切断コストが少ないファイバーレーザー加工機がこの1、2年で急速に普及しており、当社でも2020年1月及び2月にファイバーレーザー2台を導入したのでこれを紹介する。

## 2. 従来設備

従来設備の概要を表1に示す。

表1 従来設備

機械名	主仕様	特徴
レーザー2号機 1994年3月設置	日酸 TANAKA 製 LMX-II 30 CO2 レーザ 3kW 10段ストッカ 8'×20'大板1枚	年間 300日以上 1日 20h稼働 主に SS 鋼板 t2.3-12mm
レーザー3号機 1995年4月設置	日酸 TANAKA 製 LMX-II 30 CO2 レーザ 3kW 10段ストッカ 8'×20'大板1枚	年間 300日以上 1日 20h稼働 主に SS 鋼板 t2.3-12mm
レーザー4号機 2009年4月設置	コマツ産機製 TLX-1250C40F(S) CO2 レーザ 4kW 10段ストッカ 8'×20'大板2枚	年間 300日以上 1日 20h稼働 主に SS 及び SUS t3.2-19mm
プラズマ1号機 2012年9月	日酸 TANAKA 製 KP-650PGR プラズマ 500A 8'×20'大板2枚	年間 300日稼働 夜間運転無し 主に SSt6-32mm

当社では、CO2レーザー切断機を普及当初の26年前から導入しており、精密切断や夜間無人運転を行い現在の製造基盤となっている。写真1-3に当社の切断加工機を示す。



写真1 レーザ2号機 (3kW CO2レーザー)



写真2 レーザ4号機 (4kW CO2レーザー)



写真3 プラズマ1号機

## 3. ファイバーレーザー切断加工機

### 3-1 ファイバーレーザー切断の原理

図1にCO2レーザーの原理を、図2にファイバーレーザーの原理を示す。

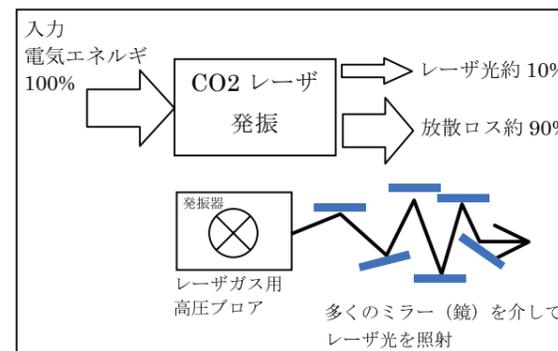


図1 CO2レーザーの原理

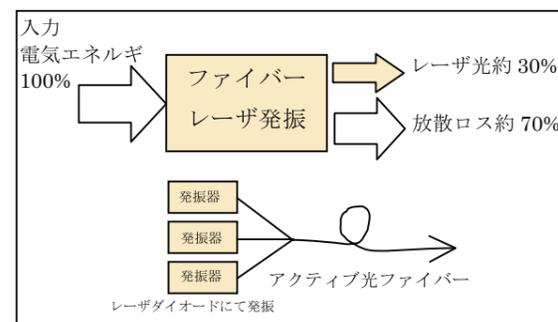


図2 ファイバーレーザーの原理

CO2レーザーの場合、レーザーを発振させるために、レーザーガスを高圧プロアで発振器内で循環させているが、ファイバーレーザーでは、レーザーダイオードによりレーザー発振させているため、高圧プロアとレーザーガスが不要になった。

また、発信したCO2レーザーは、多くのミラー（鏡）やレンズを介して、材料に照射させているが、ファイバーレーザーでは、柔軟なアクティブ光ファイバを通して材料に照射させているため、数多くのミラーは不要になった。

これらの発振原理の違いにより、エネルギー効率はCO2レーザーでは約10%、ファイバーレーザーでは約30%と格段に向上している。

CO2レーザー波長は約10μmで、ファイバーレーザー波長は約1μmである。ファイバーレーザーの約1μm波長は、目の水晶体や網膜に吸収されやすい波長のため、レーザー光が外部に漏れないようにフルカバー構造となっている（写真4）。



写真4 ファイバーレーザー切断加工機

### 3-2 ファイバーレーザー切断機の特徴

従来のCO2レーザーと比較したファイバーレーザーの特徴を示す。

- 1) 電力費低減
  - エネルギー効率向上により電力費約40%低減
- 2) 保守・消耗品の減少
  - 高圧プロアやミラー、レーザーガスを使用しないため、プロア清掃やミラーの光軸調整が不要で保守が容易。
- 3) 切断コスト低減
  - レーザーガスや酸素、電力などのランニング費や保守、消耗品などを含めた材料1m切断するコストは、SS400 t6mmでCO2レーザー30円/mに対しファイバーレーザー19円で、t12mmの場合はそれぞれ42円/mと24円/mで、約40%削減となる。
- 4) ピアシング時間の短縮
  - ビーム照射からビームが材料を貫通するまでのピアシング時間が短縮。SS400 t12mmで6kWの場合、CO2レーザー約12秒、ファイバーレーザー約2秒で、t25mmの場合は、約25秒と5秒となり格段に速くなっている。
- 5) 総合的な切断速度の向上
  - 切断品質を優先する場合と、速度を優先する場合とでは総合的な切断速度は異なるが、およそ約1.5~3倍速い切断速度となる。
- 6) 厚板の切断
  - 当社のCO2レーザーでは板厚19mmが限界で、常用としてはt12mm以下で使用していたが、ファイバーレーザーではSS400でt32mmまで常用で切断可能である。
- 7) 板厚以下の穴切断
  - CO2レーザーでは、板厚以下の穴あけ切断加工は、ドロス発生や品質面からできなかったが、ファイバーレーザーでは板厚の1/2~2/3程度までの穴あけ加工が品質を保持した状態で可能である。

#### 4. 導入したファイバーレーザー切断加工機の仕様

当社が導入したファイバーレーザー加工機は、2台ありそれぞれ紹介する。

##### 4-1 日酸TANAKA製

およそSS400 t12からt32mmまでの中厚板の切断がメインであったプラズマ切断機の後継として、本機を選定した。

型式	FMR II 35-TF6000
メーカー	日酸 TANAKA(株)
レーザー発信器	TF6000 6kW FANUC 製
有効切断幅×切断長	3600×9000mm
多段ストック	5'×10' 12段

8'×20' が切断可能な定盤と夜間運転で威力を発揮する12段のロッカーを併設しており、どちらも連動して運転することが可能である(写真4)。

##### 4-2 アマダ製

SS400 t2.3からt12mmまでを主な対象とし、特にt2.3とt3.2のタレパン切断加工の代替え、切断量の多いt4.5-9mmおよびSUS304 t3-12mmを従来のCO2レーザーの後継として2020年2月下旬に導入する(図3)。

型式	EN3015AJ AJ9000
メーカー	(株)アマダ
レーザー発信器	ENSIS9000 9kW アマダ製
有効切断幅×切断長	1550×3070mm
多段ストック	5'×10' 13段
付属	セカンドステーション
窒素富化装置	HPEZ カット

5'×10' の定尺専用として、薄板の高速切断が得意なアマノ製を採用した。夜間運転に有利な13段ストック、切断後材料の片づけがしやすいセカンドステーション、コンプレッサエアが中空糸膜を通過することで、窒素95~97%の切断アシストエアを生成することができ、切断面の酸化の影響が少なく、より高速で高品質な切断が可能なHPEZカット装置を有している。



写真5 アマダ製ファイバーレーザー切断加工機

#### 5. おわりに

当社が採用したメーカー以外にも多くのメーカーがあり、それぞれに特徴があり、選定に大変苦労した。今後は使用しながらレーザー出力等の微調整を随時行い、より高品質で高速、かつトラブルの少ない安定稼働を目指して、本装置を使いこなしていきたい。

また、ファイバーレーザーがより活躍できる製作図面や材料切断データの書き方、レーザーの運転方法や切断物の仕分け方や人員配置など、付随するあらゆる業務の見直しや改善を行っていく必要がある。

設備投資の計画から機器選定では、材料課や生産技術室、情報センタなど多くの関係者と一緒に、色々なことを想定し、共に悩んで設備導入にまで至ったこれらの経験は財産で、後世にも引き継いでもらいたい。

これからも適宜継続した設備投資を立案計画実行できるような体制や人材育成を継続し、さらなる生産性向上を目指していく。

#### 筆者紹介



YAMADA Kazuhiro  
山田 和寛  
1995年入社  
本社工場



YOSHIDA Masahiro  
吉田 正博  
1993年入社  
本社工場



TANIGUCHI Koji  
谷口 浩二  
1987年入社  
生産技術室

## — 随想 —

## 二酸化炭素

蓬萊秀人

二酸化炭素は、私たち人類を始めとする地球上のあらゆる生物と密接な関わりを持っている。酸素呼吸を行う生命体の多くは、外部より酸素を体内に取り込み、細胞内のミトコンドリアでブドウ糖を二酸化炭素と水とに酸化分解している。このときの酸化反応で生成するエネルギーをATP: Adenosine Triphosphate(アデノシン三リン酸)を介して取り出し、生命活動を維持している。そして、副産物として生成する二酸化炭素を呼吸により体外に排出している。逆に、細胞内に葉緑素を備える植物は、二酸化炭素と水とを体内に取り込み、太陽光をエネルギー源とする光合成を行って糖質やデンプンを合成している。そして、その光合成の副産物として生成する酸素を体外に排出している。夜間など太陽光を吸収できない環境では、光合成により蓄えた糖質やデンプンを体外から取り込んだ酸素により酸化分解し、生命維持に必要なエネルギーを取り出している。このとき、酸素呼吸を行う生物と同様、副産物として二酸化炭素を体外へ排出している。このような観点から、酸素呼吸や光合成を行う生物が生命活動を維持する上で、二酸化炭素は切っても切れない深い関係にあると言える。

また、二酸化炭素は無色透明、無味無臭、人畜無害であることから、私たちの食生活にも密接な関わりを持っている。炭酸水に象徴される炭酸飲料、ビールやスパークリングワインなどの発泡酒、パンなどの発酵食品がその代表例である。炭酸飲料や発泡酒から得られる喉への爽快な刺激は、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)の水への溶解度が大気中の酸素(O<sub>2</sub>)や窒素(N<sub>2</sub>)などに比べて極めて高く、水(H<sub>2</sub>O)に溶けて炭酸(H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)を生成し、これが弱酸性を呈することに起因している。パンの柔軟な食感と豊かな風味は、酵母(イースト菌)がパン生地の糖質を発酵により、二酸化炭素とアルコールとに分解し、これがグルテン組織に入り込みパン生地を膨張させることに由来している。これらの飲料や食品は、麹菌や酵母など微生物の営みを人類が上手く食文化に

取り入れたものであり、二酸化炭素が人類にもたらした恩恵でもある。

一方、私たちの経済活動に目を転じれば、産業ならびに医療用として利用が拡大している炭酸ガスレーザ、金属同士をつなぎ合わせるアーク溶接のシールガス、低温側から高温側へ熱を移動させるヒートポンプの冷媒、食品の保冷剤等々、産業や民生向けとして多くの二酸化炭素が利用されている。なかでも、商標名「エコキュート」で知られる温水器は、二酸化炭素を冷媒として用いたヒートポンプで、2001年から市販が開始され一般家庭に広く普及している。これは、外気から熱を集めて80℃以上のお湯を沸かす仕組みであるため、消費電力が従来の電気式(ジュール熱)温水器の1/3～1/4で賄えることから、極めて効率的な省エネルギー機器である。これらの工業製品は、人類の英知を結集して二酸化炭素の特性を上手く利用した賜物でもある。なお、このような産業用二酸化炭素は、石油化学コンビナートなどで副産物として生成するものを分離回収して製造されており、その年間生産量は100万トンを超えている。

以上のように、二酸化炭素が人類にもたらした恩恵とは逆に、二酸化炭素が温室効果ガスの悪玉の代表格としてマスコミなどから槍玉に挙げられ始めたのは1988年にIPCC: Intergovernmental Panel on Climate Changeが発足してからである。IPCCは、国連気候変動に関する政府間パネルで人為起源の地球温暖化による気候変化、影響、適応、緩和方策等に関し、科学的、技術的、社会経済学的な観点から包括的な評価を行うことを目的に、国連環境計画(UNEP: United Nations Environment Program)と世界気象機関(WMO: World Meteorological Organization)により設立された国際機関である。このIPCCが2013年に公表した第5次評価報告書によれば、人類が二酸化炭素の排出量削減に関して何の手

段をも講じることなく産業活動を続けて行くと、今世紀末には地球の平均気温が0.3～4.8℃、海面水位が0.26～0.82mに上昇し、気象や生態系に悪影響を及ぼすと警鐘を鳴らしている。現に、ここ近年の頻発するゲリラ豪雨、台風の大型化、竜巻の多発化、太平洋側での記録的積雪等々、日本のみならず世界各地で同様の異常気象が観測されている。昨年(2019年)9月と10月に襲来した台風15号および19号は、関東や東北に甚大なる被害の爪痕を深く残し、一昨年(2018年)7月の関西豪雨による災害や、9月の台風21号上陸による関西空港の浸水および連絡橋へのタンカー衝突事故などはまだ記憶に新しい。これらの異常気象に関しても温室効果ガスである二酸化炭素の大気中濃度の上昇による影響であるとIPCCは結論づけている。大気中の二酸化炭素濃度は、1750年ごろから始まった産業革命前は280ppmでバランスしていたが、経済成長に伴う化石燃料の大量消費により、その均衡が急激に崩れて増大し415ppmを超えたことを米国海洋大気庁が2019年5月に報じている。

地球温暖化の緩和策として、温室効果ガスである二酸化炭素の排出量を削減して今世紀末までに地球平均気温の上昇を産業革命前の2℃未満、さらには、1.5℃未満を努力目標とすることが2015年12月にパリで開催されたCOP21(第21回気候変動枠組条約締約国会議)いわゆるパリ協定で決議された。本パリ協定において我が国は、2013年を基準として2030年までにCO<sub>2</sub>の排出量を26%削減することを、2050年までには80%削減することを目標として掲げている。加えて、2019年12月3日から15日に渡りスペインの首都マドリドで開催されたCOP25(第25回気候変動枠組条約締約国会議)では、パリ協定を順守し運用して行くための具体的なルール作りとそのスケジュールの確認が行われたが、合意には至らず2020年11月に開催予定のCOP26に持ち越された。

EDMC: The Energy Data and Modelling Centerのエネルギー・経済統計要覧2019年版によると、世界における二酸化炭素排出量は325億トンで、排出量が多い順番に中国28%、アメリカ15%、インド6.4%、ロシア4.5%、日本は3.5%の5位で、上位3カ国で全体の半分以上を占めている。排出量1位の中国は、主要先進国の仲間入りを果たしていないとの認識か

ら、経済成長が最優先の政策が執られPM2.5や光化学スモッグなどの公害対策を始めとする環境課題が山積の状況で、二酸化炭素の排出量削減は先送りとなっている。排出量2位のアメリカは、トランプ政権のアメリカファーストの愛国精神に基づき、経済活動を優先する政策にシフトしていることから、パリ協定からの脱退通告を2019年11月4日に発表し、2020年11月4日に正式に脱退する運びである。排出量3位のインドは、経済発展の途上にあるとの立場から、中国と同様に経済成長優先の政策を打ち出している。このようにして、経済成長とその裏腹である二酸化炭素の排出量削減との両立は極めて難しい政治判断を迫ることになっている。世界の二酸化炭素排出量の半分以上を占める上位3カ国をパリ協定の枠組みに誘導すると共に、国連加盟139カ国が一致団結し足並みを揃えて温暖化対策に取り組むために、より影響力(罰則規定)のある枠組みの新設が望まれるところである。

先進諸国では、二酸化炭素の排出量削減と経済成長との両立をはかるべく、再生可能エネルギーの活用が注目されている。太陽エネルギーを起源とする、太陽光発電、風力発電、波力発電、バイオマス発電などの技術開発が中心となり、特に、太陽光発電と風力発電とが将来的にも有望視されている。原子力発電は二酸化炭素を排出しない有効な手段であるが、福島第一原子力発電所の事故を契機に先進諸国では脱原発の流れが主流となっている。我が国のエネルギー政策「第5次エネルギー基本計画」によると、2030年に向けてエネルギーミックスの確実な実現をはかることを挙げている。再生可能エネルギーを22～24%、原子力発電を20～22%、従来の化石燃料による火力発電を56%としている。本基本計画において、化石燃料への依存割合が依然として高いことから、我が国は先進各国を先導する立場ではなく、むしろ、立ち遅れている感が拭えない。経済成長と二酸化炭素の排出量削減との両立が極めて難しいことが、このような数字においても如実に表れている。

他方で、化石燃料からの二酸化炭素の排出量を減らすために我が国は、積極的な研究開発を進めている。CCS: Carbon dioxide Capture and Storage(二酸化炭素回収貯留)は、火力発電所などからの燃焼ガスから効率よく二酸化炭素を回収し、これを地中深くに

埋設して固定する技術である。CCUS: Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage (二酸化炭素の回収・有効利用・貯留)は、CCS同様に二酸化炭素を回収し、回収した二酸化炭素に水を添加してメタンなどを合成し、燃料や多量の化学製品の原材料とする技術である。さらに、この技術をカーボンニュートラル(Carbon Neutral)なバイオマス燃料等に適用することで、カーボンポジティブ(Carbon Positive)となり、自ら発生する二酸化炭素の量よりも多くのCO<sub>2</sub>を減らすことができる。加えて、カーボンニュートラルな燃料から発生したCO<sub>2</sub>を、CO<sub>2</sub>フリーな再生可能エネルギーを利用してメタンを合成すること(メタネーション)ができれば、CO<sub>2</sub>は二次エネルギーキャリアーとしての循環型社会構築の一翼を担うことが可能となる。いずれにしても、CCSならびにCCUS共に、コスト面からまだ商用化には至っていない近未来の技術である。

つぎに、二酸化炭素への視座を大きく転換してみると、炭素原子(C)1個に酸素原子(O)2個が共有結合した二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)の起源に纏わる多くの疑問が湧いてくる。太陽系が誕生した46億年前の太古の地球は、高濃度の二酸化炭素で覆われていた。当時の地球は火山活動が極めて活発で、地中から噴き出す水蒸気や亜硫酸ガス(SO<sub>2</sub>)および二酸化炭素を主成分とする高温高压の大気が地球を包み込み、大気中には酸素が存在していなかった。そして、40億年前まで時代が下ると原始生命が海中で誕生し、やがて光合成を行うラン藻(シアノバクテリア)などが現れる。さらに、27億年前まで時代が下ると、海中で光合成を行う多様な生物が大量に増殖することにより大気中の酸素濃度が上昇し、大気圏上空でオゾン(O<sub>3</sub>)層が形成される。このことにより、地表に降り注いでいた紫外線がオゾン層に吸収されて激減するようになる。

一方、地球が冷えて内部のマントル対流が安定することにより、安定した地磁気が形成されて行く。このマントルは、高温に溶融した導電性の鉄が主成分であり、これが対流することにより電磁力が発生する。この電磁力が地球全体を大きく包み込むバンアレン帯を成層圏で形成し、これがバリアとなって今まで直接地表に降り注いでいた太陽風(電磁波や放射能)ならびに宇宙線が激減して行く。

このようにして、生物にとって極めて有害であった紫

外線ならびに放射線である太陽風と宇宙線の地表への到達強度が著しく減少したことにより、海中から陸上に生物(光合成を行う植物)が進出し、陸地を覆い尽くすようになる。やがて、酸素呼吸を行う動物が出現するが、植物の増大と多様な進化の過程を辿りながら、大気中の二酸化炭素は、産業革命前夜の280ppmにまで低下し、逆に、酸素濃度は21%にまで上昇している。このことから、大気中の酸素の起源は二酸化炭素であると言える。また、化石燃料である石炭は、地球上に生物が出現してから40億年もの長い年月を経て大気中の二酸化炭素が植物体内に取り込まれ、太陽光をエネルギー源とする光合成により有機物(セルロースやリグニン等)を合成し、それが地中深く埋もれて高温高压下で変性したものである。

それでは、46億年前の太古の地球に既に存在していた二酸化炭素の起源は、何処まで遡るのであろうか。46億年前、宇宙にさまようチリがその重力の相互作用により凝集し、太陽を始めとする太陽系の惑星を誕生させた。ゆえに、二酸化炭素(炭素と酸素)は、宇宙にさまようチリに含まれていたことになる。宇宙をさまようチリは、超新星爆発によって木端微塵に飛び散った星(恒星)の破片である。さらに、超新星爆発を起こす星(恒星)の誕生は、今から138億年前、この世の始まりである宇宙創造のビッグバンにまで遡る必要がある。このビッグバンは、想像を絶する超高温高压のエネルギーの塊の状態から、インフレーション理論に基づき宇宙が指数関数的に急膨張して行く現象である。そして、このエネルギーの塊から水素の原子核である陽子が合成されて宇宙に拡散して行く。これは、アルベルト・アインシュタインが提唱したエネルギーと質量とは等価 $E=mc^2$ (E:エネルギー=m:質量×C:光速<sup>2</sup>)である特殊相対性理論に裏付けられている。やがて、これらの水素原子(陽子)は、重力の相互作用の影響を受けて凝集して質量が増大して行く。そして、その質量が太陽の8%以上に達すると、自らの重力に耐えきれなくなり水素の原子核の領域にまで相互作用が及び核融合反応が始まる。このときの核融合反応は、原子番号が1である水素(H)4個が核融合して原子番号2のヘリウム(He)1個を生成する。このとき、質量が少し減少する質量欠損が生じ、その質量に等価な $E=mc^2$ に相当する莫大なエネルギーが外部に放出される。これが光り輝く恒星の正

体である。核融合で生成したヘリウム原子は、陽子2個と中性子2個から構成され、その質量は水素原子の4倍であることから、重力の影響を受けて恒星の中心部分に向かって沈んで行く。さらに、宇宙からの水素原子がこの恒星に凝集してその質量を増大させて行くと、やがて中心部分に集積するヘリウムは自らの重力に耐え切れなくなり、ヘリウムの原子核相互が接近して核融合を始める。このとき、ヘリウム(He)とヘリウム(He)とが核融合して原子番号4のベリリウム(Be)となり、加えて、このベリリウムにヘリウムが核融合して原子番号6の炭素(C)が生成する。ここで、二酸化炭素の構成元素の1つである炭素が生まれる。さらに、同様にして恒星の質量が増大して行くと炭素(C)とヘリウム(He)とが核融合して原子番号8の酸素(O)が生成する。ここで、二酸化炭素の構成原子である酸素が創出される。そして、酸素(O)と酸素(O)とが核融合して原子番号14のケイ素(Si)とヘリウム(He)とを生成する。

このようにして、ビッグバンにより宇宙に拡散したエネルギーから生成した水素原子が、恒星の重力で引き寄せられて質量が順次増大し、より原子量の大きい原子へと核融合が進んで行く。ちなみに、太陽の8倍の質量まで成長した恒星は、核融合的に最も安定な原子番号26の鉄(Fe)が生成するとそれ以上核融合が進まなくなり、中心部が鉄である白色矮星となり、恒星としての一生が終わる。そして、太陽の8倍から30倍の質量をもつ恒星は、自らの重力に耐えられなくなり超新星爆発を起こす。このときの高温高压のエネルギーがすさまじく、重金属や貴金属を含む鉄以上の原子番号(原子量)の原子がこのときの核融合により生成し、これらが宇宙のチリとなって拡散し、宇宙をさまよう。前述の通り、これらのチリが凝集して太陽系を形成している。このことより、太陽系の惑星には鉄よりも大きな原子番号(原子量)の原子が多く存在する。さらに、太陽質量の30倍を超える恒星は、その想像を絶する強大な重力が原子核の内部にまでおよび、原子核が重力崩壊してブラックホールとなる。ブラックホールは、自らの極めて強い重力により、光までをも引き寄せられてしまうために直接観察することはできない。因みに、太陽は今から123億年後に輝きを失い白色矮星となってその一生を終えると考えられている。

2019年4月11日付けの日本経済新聞によると、日米

欧などの国際共同研究グループが、おとめ座銀河団の中心に位置する巨大ブラックホールの撮影に初めて成功したことを報じている。地球から5,500万光年の距離にあり、その質量は太陽の65億倍にもおよぶ。ブラックホールは、光をもその強力な重力で吸い込んでしまうために直接見ることはできないが、その背面に光り輝くガスが存在すればブラックホールを影として観察できる。また、2019年9月10日の日本経済新聞に、東大と早稲田の研究チームが約135億年前に誕生した銀河を観測したと発表した。138億年前のビッグバンから3億年後の宇宙の様子を観測したことになる。スペースファースト宇宙望遠鏡と南米チリのアルマ電波望遠鏡を用いて135億光年離れた銀河から届いた光の波長を解析したものである。

このようにして、二酸化炭素は46億年前の地球創生(太陽系創生)以前から存在し、その起源は138億年前のビッグバンにまで遡るのである。そして、我々人類と二酸化炭素との密接な関係は今後も続いて行くのである。

以上

## 編集後記

この度、弊社技報「日工テクニカルレポート」の創刊号を無事発刊することができました。

本技報の製作にご協力・ご尽力頂きました関係者の皆様、特に巻頭言をご執筆頂きました徳島大学大学院教授の橋本親典様には、この場をお借りして深く御礼申し上げます。

弊社は昨年創立100周年を迎えることができましたが、これを機に弊社の保有する技術情報をより多くの方々に知って頂きたい、技報を発行させて頂く運びとなりました。本技報を通じまして皆様にお届けする弊社の技術情報が、皆様が抱えておられます様々な課題や問題の解決のきっかけとなり、少しでもお役に立てることができればと考えております。

なお、「日工テクニカルレポート」は、今後年一回ペースでの発刊を予定しておりますので、どうぞ宜しくお願い致します。

日工株式会社  
会社情報



## 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

