

NIKKO TECHNICAL REPORT

NO.006
2025.04

*n*からはじまる未来創造



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
NIKKO
TECHNICAL REPORT
NO.006
2025.04



沿革

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

NIKKO TECHNICAL REPORT 2025.04

NO.006



巻頭言

- 5 …… 社会インフラを支えるインフラ
京都大学経営管理大学院 特定教授
瀬尾 彰

論文

- 9 …… 常温空気による砂乾燥のメカニズム
[出典]オリジナル
星加 竜平 他
- 15 …… アスファルトプラントにおけるベテランオペレータのバーナ運転を模倣する
運転支援システムの開発
[出典]オリジナル
浜辺 拓真
- 21 …… 排ガスに含まれる水蒸気の凝縮潜熱を利用した砂乾燥システム
[出典]オリジナル
蓬萊 秀人
- 35 …… 高強度コンクリートの練混ぜ過程における条件および
アルミネート相の増量がスランプフローに与える影響
[出典]コンクリート工学年次論文集,Vol.46,No.1,pp.1009-1014,2024
坂本 恭裕 他
- 41 …… AP用水素バーナによるアンモニア熱分解ガスの燃焼
[出典]オリジナル
宗像 元 他
- 45 …… Hydro H2eat(ハイドロヒート)の開発 ～温風ヒーターへの水素燃料の利用～
[出典]オリジナル
長谷川 修磨 他

製品紹介

- 53 …… remoop ～3D活用における工場のIoT化～
- 55 …… 日工電子製「remoop」を活用したDX工場遠隔監視システム
- 57 …… 前川工業所製 シングルロールクラッシャー
- 61 …… 斜面ノリダー
- 65 …… アスファルトプラントのグローバル戦略機種 ACE-130
- 67 …… KLEEMANN製自走式インパクトクラッシャ「MR100i NEO」

製造設備紹介

- 73 …… BWライン付帯設備更新

編集後記

- 76 …… 企業理念
- 77 …… 編集後記

巻頭言

INTRODUCTION

社会インフラを支えるインフラ

京都大学 経営管理大学院
インフラ物性産学共同講座 特定教授
瀬尾 彰



創業から100年を超える歴史をもつ貴社の、テクニカルレポートに対する巻頭言のご依頼をいただき大変光栄に存じます。また日頃は社会インフラの新設や維持修繕が滞りなく行えるよう、まさに社会インフラを支えるインフラとしてご尽力いただいておりますこと、さらに国内で災害が発生した際や海外の紛争当事国への支援など、陰日向に復旧、復興にご尽力いただいておりますことに、この場を借りて感謝申し上げます。私は、昨年5月より「インフラ物性研究」という新しい学際分野の研究を行うため、京都大学に赴任いたしました。それまでは石油精製会社の技術者として、おもに舗装用資材であるアスファルトにかかわる技術開発、製品事業化等を経験してまいりました。この度の巻頭言のご依頼にあたり、アスファルト舗装にかかわる課題ならびに今後について寄稿いたします。特に維持修繕の課題とインフラ物性研究のねらい、低炭素・循環型社会に向けた課題、加えて耐久性、品質保証に関して所感を述べたく思います。

まず第1に、アスファルト舗装の維持修繕においては、損傷の程度を、路面に現れたひび割れ等の損傷や耐荷重の低下を計測し、過去の同様の損傷程度と比較することで判定したうえで、補修、修繕を実施しています。劣化過程をモデル化、予測することが試みられておりますが、多くは事後保全により健全性を担保しているのが実情です。この方法は舗装構成、使用材料、交通荷重などを含めた条件が同様の場合には、きわめて有効に機能すると考えられるものの、新材料や新工法の適用など、従前と条件が異なる場合には損傷程度の判定は困難となり、結果として新技術適用の阻害要因となる可能性もあります。また我が国においては、国土強靱化を実現しつつ、低炭素社会の実現や少子高齢化による労働人口減少等に対応するためには、舗装分野においても新技術の開発および社会実装が必須となると考えます。

このため、これらの維持修繕における課題解決を一つの目的として、インフラを構成する素材ごとの相互作用を、分子や原子のレベルで計測することとおして、インフラの損傷、破壊発現の仕方と、その進展メカニズムを現象論での理解に留まらず、本質的に明らかにすることを目指す研究を開始いたしました。本研究は、インフラを素材の分子、原子といったミクロの物性レベルの研究を行うことから、インフラ物性研究と名付け、さらに現実の構造物におけるマクロの損傷抑制対策に資する新技術の開発を実施、推進を目指すとともに、社会実装、すなわち公共調達の実現のための制度上の必要条件をも考察、提案することも試みる予定です。その先には、劣化過程モデルの精度向上、すなわち予防保全の実現をも目指します。

アスファルト舗装分野におけるインフラ物性研究においては、アスファルト混合物を構成する骨材、フィラー、アスファルト等の素材の相互作用を、兵庫県佐用郡佐用町にある大型放射光施設SPring-8を活用するなどして分子、原子レベルの微視的計測およびデータ解析をおこない、その知見を基に新規混合物および再生混合物の損傷機構を明らかにすることを試みます。すなわち現在、ひび割れ、はく離やわだち掘れといった舗装の損傷として観測される事象の、本質的な発生要因を明らかにすることを試みます。さらに要因を十分に考慮した寿命延長に資する新素材や新工法を提案することで、従来よりも適材適所において長寿命なアスファルト混合物を社会実装することを目的としています。

なお新工法の研究ならびに社会実装に際しては、アスファルトプラントのトップメーカーである貴社のご知見が必ず必要になると考えております。

第2に、低炭素・循環型社会に向けた施策として、前述の長寿命化にくわえ、特に道路舗装分野においては供用後の道路舗装材料の有効活用、すなわち再生骨材の利用推進、アスファルト混合物製造時の温度を低下させる中温化、さらには炭化水素燃料代替燃料などが研究され、一部は社会実装されています。

再生混合物については、中温化と組み合わせた再生中温化混合物の本格的な社会実装が求められており、昨年12月25日には、国土交通省 社会資本整備審議会 道路分科会 道路技術小委員会において「舗装の技術基準見直しに向けた検討」として、「循環型社会に向けた再生As合材の更なる再生利用」と「脱炭素社会に向けた舗装の低炭素材料の導入促進」を行うことが示されました¹⁾ことは周知の通りです。すなわち、実験室内での試験結果はもとより、実際の施工環境および供用環境において、舗装としての要求性能を満足する工法、材料ならびに適用条件に関する研究の、より一層の進展が求められており、筆者も微力ながら協力させていただく所存です。

なお中温化においては、骨材中や表面の水の蒸発、乾燥に必要なエネルギーの削減によるメリットと、水が残留することによるデメリットを十分考慮することが肝要と考えます。場合によっては、骨材表面に水が残留することを前提とした、新たなアスファルト混合物の製造方法も、社会実装する際の課題と対策を明らかにしながら、検討する余地があると考えております。

また炭化水素燃料代替燃料の分野においては、水素やアンモニアを燃料とした研究が進められており、貴社においても社会実装に資する研究成果を公表されています。ここでアスファルト舗装資材の加熱を考える場合、ぜひとも温度(ケルビン)のみでなく熱量(カロリー、ジュール)を加味したご検討を実施いただけますと幸いです。たとえば骨材加熱においては、骨材の表面温度の計測にとどまらず、骨材中央部との温度差(表面と内部の温度ムラ)を考慮いただけますと幸いです。また燃料の化学組成や種類により、火炎の特性が変わり、資材加熱にかかわる方法が変化する可能性があると考えております。

これらの再生中温化ならびに熱管理における新技術の研究ならびに社会実装に際しても、貴社のご知見が必ず必要になると考えております。

最後に品質保証に関して所感を述べさせていただきます。近年、我が国の製造業における複数の不正行為が報道され、製品品質に対する不安、さらには国民の安心安全な社会生活を棄損する可能性も指摘されています。またアスファルト舗装事業においても、昨年、一部において不正行為が報道されるに至りました。アスファルト舗装事業にかかわる技術開発およびその事業に携わる者すべてが、公共財の製造、維持修繕に関わっているという自覚のもとに今日の所作を振り返り、あらためて現在の基準および価値観をもって自らの行いの適正さを判断し、行動することとおして、社会からの信頼を回復することが必要と考えます。

貴社は、アスファルト舗装事業において、その製造設備を開発、設計、製造し社会実装されるという極めて重要な役割を担われ、さらに自社内にいづれも高度な混練技術、加熱技術、制御技術、搬送技術、くわえて計測技術を保有し、それを具体化し社会実装されていらっしゃると思います。

アスファルト舗装としての要求性能は、これから再定義される状況ではありますが、貴社の持つ豊かな知識および経験を深化され、出来形の品質管理に留まらず、公共財としての耐久性をも考慮した技術開発を含む事業活動に発展いただきたく思います。これは品質保証活動、すなわち耐用年数を定め製品・サービスの性能や機能を保証する活動にほかなりません。

アスファルト舗装は、製造する際に使用する材料の特定や、供用条件を限定することは事実上難しく、このため耐用年数を一意に決めることも困難と思われます。そのうえで耐久性を議論するためには、前述のインフラ物性研究における主要な損傷要因の解明とその寄与度に関する知見も必要となると考えております。

以上、アスファルト舗装にかかわる、維持修繕、低炭素、循環型社会に向けた課題、加えて品質保証、耐久性に関して、インフラ物性研究のねらいを交えて所感を述べました。これらが何らかの示唆となり、貴社の今後の研究開発が、ますます発展されますことを祈念して巻頭言とさせていただきます。

“Observe carefully, and don’ t forget your sense of wonder.”

1)<https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001854518.pdf>(2025年1月31日閲覧)

MEMO

Lined area for writing the memo.



論文
PAPER



常温空気による砂乾燥のメカニズム

星加 竜平・堀口 諒

HOSHIKA Ryuhei, HORIGUCHI Ryo

日工株式会社 開発部 開発4課

概要

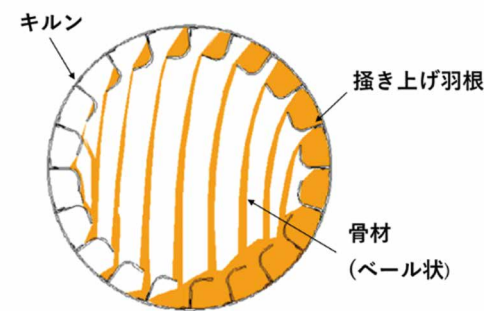
我が国は、2030年までに温室効果ガスの排出量を2013年比で46%削減、さらに2050年までに実質的にゼロとする、カーボンニュートラルを表明した。無論のこと、アスファルトプラント(以下、AP)の業界においても低炭素化に資する取り組みが促進されている。その一環として、当社では、常温のキルンを用いた攪拌と送風によって、砂の水分をアスファルト合材の製造工程に入る前に削減することで、化石燃料由来のCO₂排出量削減を目指している。本稿では、常温のキルン内において、キルンの回転によりキルン内部に取付されたJ型断面を有する羽根からボール状で落下する砂と、取り込んだ空気が接触することで、砂に含まれる水分が蒸発するメカニズムについて理論検討、そして実機試験の両面から検討し、砂の水分蒸発量を精度良く推定する手法を構築した。

1. 緒言

アスファルト合材の製造工程におけるCO₂排出量は、年間約150万t-CO₂である。この内訳は、化石燃料由来79%、電力量由来19%、その他2%となっている。この大部分を占める化石燃料由来のCO₂排出量に限定すると、砂利や砂などの骨材を加熱、乾燥させるために使用されるエネルギーの割合は、骨材の加熱に37%、水の除去に42%、排ガスの加熱に15%、放熱に5%、水蒸気の加熱に1%となっている¹⁾。したがって、化石燃料を燃焼させて得たエネルギーの半分近くは、骨材の水分除去で消費している。本来の目的からすると、この消費するエネルギーは、骨材加熱の副次的に発生するものであり、削減可能なエネルギーである。これを踏まえると、化石燃料から非化石燃料への転換はさることながら、骨材を乾燥させるプロセスの省エネルギー化を図ることが、APにおける低炭素化に大きく寄与すると考える。

前述した背景から、化石燃料由来のCO₂排出量を低減するためには、骨材の水分をアスファルト合材の製造プロセスに入る前に削減することが重要である。現在に至るまで、ストックヤードの雨水対策や、そのほかにも骨材を貯蔵ホッパへ投入するときは、貯蔵された骨材の上層部といった、含水比が比較的低いものを優先的に使用する等の対策が講じられてきた。しかしながら、コルゲートサイロを採用している場合や、更なる水分除去を目指すためには、機械設備を活用した効果的な乾燥方法を検討する必要がある。そこで、APの既存設備を活かし、一定の効果が期待できるキルンを用いた乾燥方法に着目した。通常、バーナの燃焼により生成した熱風と、**図－1**で示すキルンの回転によって、ボール状で落下する骨材を接触させるこ

とで熱交換を行う。本稿では、骨材の中でも比較的含水比が高い砂を対象とし、キルン内に送風する常温の空気(以下、常温送風空気)を、熱交換させる媒体とする。この場合、砂の表面と空気の対流熱伝達、およびキルン内に滞留している常温送風空気と接触する分散された砂の総表面積が、砂の水分蒸発量を変化させる重要な要素となる。今回、対象とした常温のキルン内における砂の定率乾燥速度と乾燥表面積を求め、砂の水分蒸発量を推定するシミュレーションモデルを作成した。また実機試験より得た数値と比較することで、このモデル精度に関して考察を行った。



図－1 キルン内部の骨材分散形態

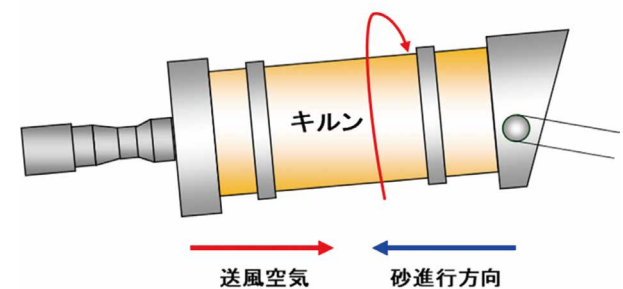
2. 常温の送風による砂乾燥メカニズム

キルンは、**図－2**に示す送風空気と砂が対向して流れるカウンターフロー方式と送風空気と砂が同一方向に流れるパラレルフロー方式に分かれる。理論上、カウンターフロー方式は、パラレルフロー方式に比べて熱効率が優れていることから、本稿ではカウンターフロー方式を採用する。したがって、キルン内に

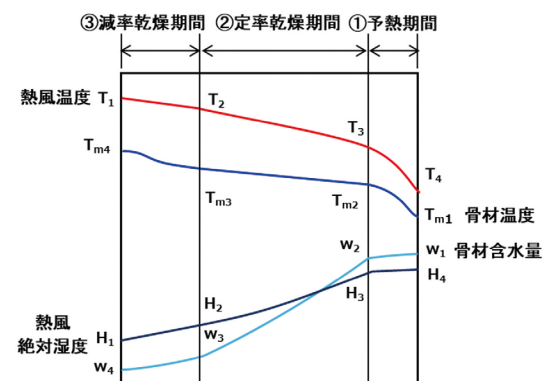
投入された砂は、砂の進行方向に傾斜したキルンの回転により、上昇と落下を繰り返しながら前進し、送風空気と接触する。

図－3に、カウンターフロー方式のキルン内における熱風と骨材の状態を示す。ここで、熱風温度をT、骨材温度をT_m、骨材含水量をw、熱風の絶対湿度をHとする。一般的に、キルン内に投入された骨材は、熱風と熱交換することで予熱期間、定率乾燥期間、減率乾燥期間のプロセスを経て乾燥する。すなわち、骨材の水分蒸発は、骨材温度がT_{m1}からT_{m2}まで上昇する予熱期間終了時から開始する。

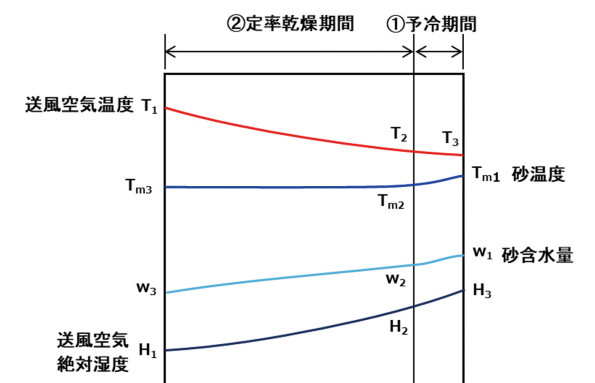
一方、常温送風空気により砂を乾燥させる場合における送風空気と砂の状態を**図－4**に示す。**図－3**と同様に、常温送風空気温度をT、砂温度をT_m、砂含水量をw、常温送風空気の絶対湿度をHとする。この場合、キルン内に投入された砂は、互いの温度差によって移動する熱量が少ないため、排出されるまで定率乾燥期間が継続する。また、砂表面の水分が気化熱を奪うことで砂温度は、キルン投入時のT_{m1}から砂の湿球温度T_{m2}まで低下すると予測した。この期間を、**図－3**の予熱期間に対して、予冷期間と定義する。以下では、予冷期間終了後の定率乾燥期間について記述する。



図－2 キルンのイメージ



図－3 熱風におけるキルン内の状態²⁾



図－4 常温の送風におけるキルン内の状態

2.1 定率乾燥期間

2.1.1 定率乾燥期間における熱交換

予冷期間において、砂表面の温度が湿球温度まで低下すると、やがて平衡状態となる。このことから、常温送風空気から対流熱伝達により砂に伝わる熱量、および砂表面の水分蒸発に消費される熱量は、[砂表面が常温送風空気から対流熱伝達によって受ける熱量]＝[砂表面の水分蒸発に消費される熱量]の関係が成り立ち、**式－1**で表される³⁾。この中で、代表的な物性値の算出方法は、次節にて述べる。

$$a \times h_c \times (T_2 - T_w) = a \times k_H \times (H_w - H_2) \times (\Delta h_v)_w \dots [\text{式－1}]$$

a: 常温送風空気と接触する砂の表面積 (m²)

h_c: 対流熱伝達率 (W/(m²・K))

T₂: 予冷期間終了時の送風空気温度 (K)

T_w: 砂の湿球温度 (K)

k_H: 物質移動係数 (kg-water/(m²・s・ΔH))

H_w: T_wにおける飽和絶対湿度 (kg/kg)

H₂: T₂における絶対湿度 (kg/kg)

(Δh_v)_w: T_wでの蒸発潜熱量 (J/kg)

2.1.2 定率乾燥速度

前項で述べた平衡状態においては、供給される熱量が一定である。したがって、砂の水分もそれに伴って一定の速度で蒸発する。これが定率乾燥速度J_cであり、**式－1**を変形すると**式－2**で表すことができる⁴⁾。

$$J_c = \frac{h_c \times (T_2 - T_w)}{(\Delta h_v)_w} \dots [\text{式－2}]$$

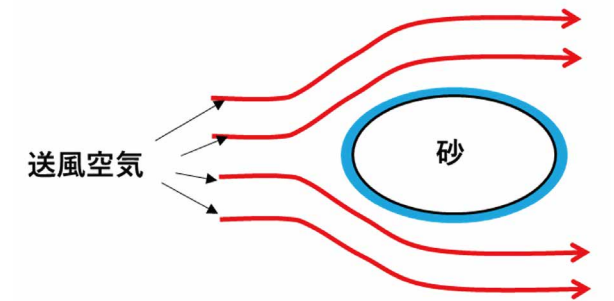
J_c: 定率乾燥速度 (kg/(s・m²))

2.2 物性値

ここで、前節で述べた定率乾燥期間の算出式に使用する代表的な物性値とその算出方法を以下で述べる。

(1) 対流熱伝達率

砂表面の熱交換は、キルン内を通過する常温送風空気と接触することで生じる、強制対流によって行われる。ここで、掻き上げ羽根からバール状に落下する砂は、分散した状態で流れる空気と接触するものとし、**図－５**に示すように球形の砂1粒に流速を持った空気が接触する。したがって、対流熱伝達率は、キルン内を通過する空気の流速と砂の表面形状により変動する。



図－５ 接触イメージ

このときの対流熱伝達率は、**式－３**を使用し、ヌセルト数から求めた。なお、ヌセルト数を算出する式は、以下の**式－４**を使用する⁵⁾。

$$h_c = \frac{(Nu \times \lambda)}{D} \dots [\text{式－３}]$$

Nu:ヌセルト数(m/m)

λ : 空気の熱伝導率(W/(m・K))

D:砂の粒径(m)

$$Nu = (2.7 + 0.12 \times Re^{0.66}) \times Pr^{0.5} \times \left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{\frac{1}{4}} \dots [\text{式－４}]$$

Re:レイノルズ数(m/m)

Pr:プラントル数(m/m)

μ : 空気の粘性係数(Pa・s)

μ_s : 砂の粘性係数(Pa・s)

λ 、 μ 、 μ_s は空気温度の依存性を考慮⁶⁾

(2) 物質移動係数

ルイスの関係により、**式－５**を使用する⁷⁾。

$$k_H = \frac{h_c}{C_H} \quad : \quad C_H = C_{pg} + C_{pv} \times H \dots [\text{式－５}]$$

CH: 湿り比熱容量(kJ /kg・K)

Cpg: 空気の定圧比熱量(kJ/kg・K)

Cpv: 蒸気の定圧比熱量(kJ/kg・K)

H: 絶対湿度 (kg/kg)

(3) 蒸発潜熱

予冷期間終了時における砂の湿球温度Twを水の温度と蒸発潜熱の関係を示す**式－６**に代入することで、蒸発潜熱(Δh_v)wを算出する⁸⁾。

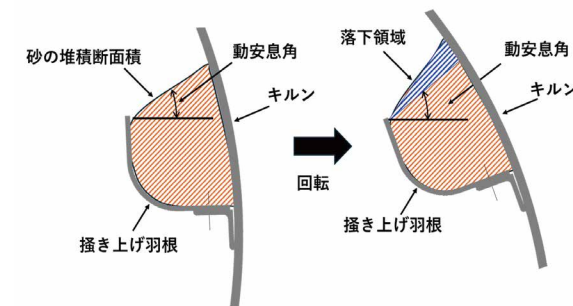
$$[(\Delta h_v)_w] = -2450 \times T_w + 3170072 \dots [\text{式－６}]$$

2.3 キルン内における砂落下範囲と表面積

式－１より、砂の水分蒸発量は、砂をキルンに投入し、排出されるまでに常温送風空気と接触する砂の総表面積に比例して増加する。したがって、この面積は水分蒸発量を求める上で重要な要素となる。以下に砂の落下範囲とバール状で落下する砂の表面積について記載する。

2.3.1 砂の落下範囲

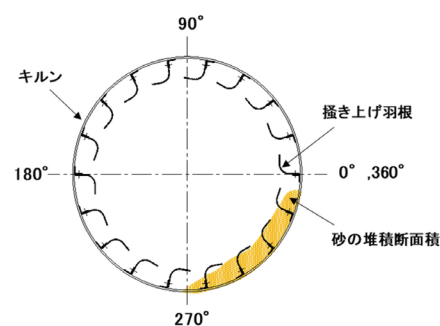
図－６に、砂の堆積断面積と落下領域を示す。砂はキルンの回転によって、掻き上げ羽根の砂堆積断面が、動安息角を超える領域から滑りが生じて掻き上げ羽根から落下し始める。



図－６ 砂の落下領域①

図－７にキルン内部の砂堆積断面を示す。この断面積は、通風時におけるキルンの保有率から算出する。保有率は、キルン内部の滞留量が関係しており、砂の挙動がFlight action、またはKiln actionであるかによって値が異なるため、これらを判定する必要がある。これは、保有率が掻き上げ羽根の最適保有率と比較して小さい場合は、Flight action、大きい場合はKiln actionとなる⁹⁾。

この保有率を用いると、砂の堆積断面積は、以下の**式－７**で表すことができる。ここで、砂の堆積断面は、**図－７**のキルン270°～360°範囲に位置すると仮定した。



図－７ キルン内部の砂堆積断面

$$A_s = \frac{(S \times X)}{\left(n \times \frac{1}{4}\right)} \dots [\text{式－７}]$$

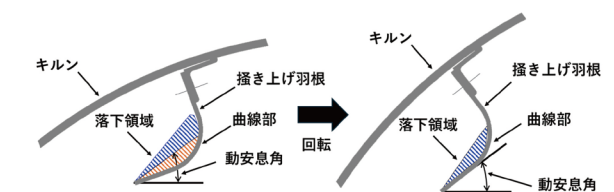
As: 砂の堆積断面積(m²)

S: キルンの断面積(m²)

X: 通風時におけるキルンの保有率(%)

n: 掻き上げ羽根の枚数(-)

落下し始めた砂は、キルンの回転によって掻き上げ羽根がさらに傾くことで、砂の動安息角を超えた領域で滑りが生じる。これが繰り返されると、砂の堆積断面は小さくなり、**図－８**に示すように砂の動安息角と掻き上げ羽根先端から曲線部にかけての直線の角度が等しくなる。この時点で掻き上げ羽根から砂の落下が終了し、ここまですが砂の落下範囲となる。



図－８ 砂の落下領域②

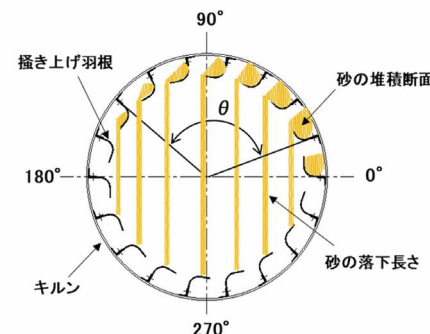
2.3.2 落下する砂の表面積

図－９に砂の落下範囲を示す。ここで、掻き上げ羽根から砂の落下が始まり、砂の落下が終了までの範囲を θ とする。そうすると、その間に配置される掻き上げ羽根の枚数は合計n枚である。また、**図－１０**に示す羽根1カ所あたりにバール状で落下する砂の片側表面積を a_i とすると、掻き上げ羽根からバール状に落下する砂の総表面積Aagtは、**式－８**で表すことができる。

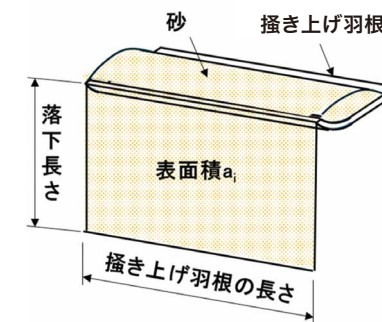
$$A_{agt} = 2 \times \sum_{i=1}^n a_i \dots [\text{式－８}]$$

Aagt: 落下する砂の総表面積(m²)

a_i : 掻き上げ羽根1枚で落下する砂の片側表面積(m²)



図－９ 砂の落下範囲



図－１０ 砂の表面積

3. シミュレーションモデル

ここでは、2章で定義した式を使用して砂の水分蒸発量を推定する。まずは、後述する試験条件から対流熱伝達率と蒸発潜熱を算出し、この数値を**式－２**に代入することで定率乾燥速度を求める。これにより、単位時間、単位表面積あたりの水分蒸発量が計算できる。

次に、掻き上げ羽根設置領域において、配置された羽根の枚数に応じた砂の落下範囲を判定し、**式－８**により落下する砂の乾燥面積を求めて、その滞留時間を乗じる。さらに、定率乾燥速度を乗じることで、水分蒸発量が推定できる。

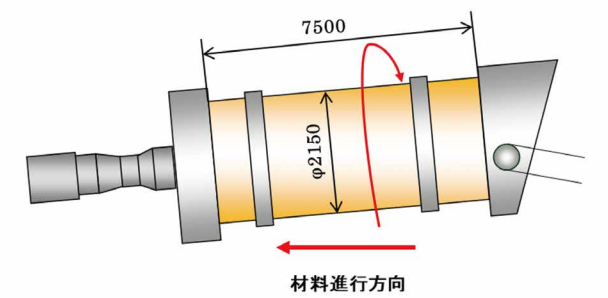
3.1 シミュレーション条件

本シミュレーションは、後述する実機試験の試験条件を適用して行った。試験条件を表－１に示す。

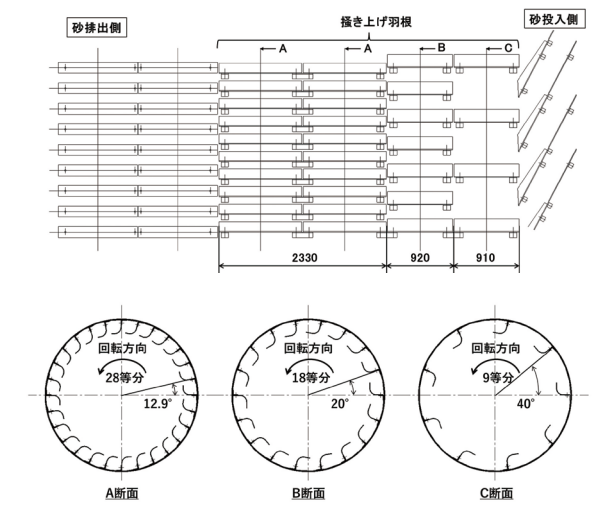
表－１ 試験条件

試験日	2024/11/6
天候	晴
外気温度	25℃
外気湿度	67%
砂温度	20℃
砂粒径	0.0006m
含水比	2.37%
供給量	15t/h
試験時間	20min
キルン内風量	412Nm ³ /min
キルン鉄皮温度	23℃
キルン回転数	6.7rpm

本シミュレーションで対象としたキルンの概要を図－11に示す。キルンは板厚16mm、外形φ2150mm、長さ7500mmの大きさであり、砂の進行方向に4°傾斜している。次に、掻き上げ羽根の配置を図－12に示す。ここで、砂乾燥面積の対象領域は、Jカップ型を有した掻き上げ羽根に限定する。掻き上げ羽根は、砂投入側から、40°間隔(9等分)、20°間隔(18等分)、12.9°間隔(28等分)で配置されており、掻き上げ羽根の長さは、それぞれ910mm、920mm、2330mmである。



図－11 キルンの概要



図－12 掻き上げ羽根配列

3.2 シミュレーション結果

実機試験の試験条件を適用させて算出した結果を表－2に示す。

表－2 算出結果

熱伝達率	79.5W/m ² K
湿球温度	289.15K
蒸発潜熱	2461655J/kg
定率乾燥速度	0.00029kg/(s・m ³)
乾燥面積	44.34m ²
蒸発量	0.0129kg/s
削減含水比	0.25%

シミュレーションモデルにより予測した砂の定率乾燥速度と乾燥面積から得られた削減含水比は、0.25%であった。

4. 実機試験結果とシミュレーション評価

表－1の試験条件において、常温状態のキルンに砂を投入し、キルン出口の抜き取り機構によって排出された砂の温度と含水比を測定した。その結果を表－3に示す。

表－3 試験結果

含水比		削減含水比	砂温度
投入前	乾燥後		
2.37%	2.10%	0.27%	20℃

表－3より、常温のキルンを用いて削減できた含水比は0.27%であった。シミュレーションモデルによる予測値との差は0.02%である。この誤差を割合で表すと6.9%であり、得られた数値からシミュレーションモデルは、高精度であると評価する。また、キルンから排出された砂の温度は、キルン投入前と同じ20℃であった。

5.考察

実機試験とシミュレーションモデルによる予測値を比較することで、シミュレーションモデルの精度は高いことが検証できた。これは、砂の水分蒸発量を求める過程で導出した砂の定率乾燥速度や乾燥面積が妥当な数値であることを示している。この要因としては、常温状態のキルン内で砂が乾燥する現象を理論式に当てはめて複数組み合わせることによって、結果再現性の高い予測ができたと考える。また、キルン出口から排出された砂の温度は、投入前と同じ20℃を示しており、予測した16℃よりも4℃高い温度であった。これは、キルン出口の抜き取り機構から排出された後、測定までに時間が生じたこと、また測定誤差が要因として考えられる。

6.今後の展開

APでの低炭素化を実現するためには、骨材乾燥プロセスにおいて、省エネルギー化を図ることが合理的である。本稿では、キルン内において、常温空気により砂に含まれる水分が蒸発するメカニズムを検討し、定義した式を組み合わせ、水分蒸発量が推定できるシミュレーションモデルを作成した。また、実機試験と比較することで、このシミュレーションモデルの予測精度を検証した。その結果、誤差は6.9%であり、高い精度で予測可能なシミュレーションを構築することができた。一方で、削減含水比は0.3%未満であり、乾燥効果に寄与する熱量は得られなかった。これを受けて、期待する乾燥効果を得るためには、より大きな熱量が必要不可欠であることがわかった。

今後は、砂の乾燥効果増大を図るべく、アスファルト合材製造運転直後のキルン蓄熱を利用した検証に取り組んでいく。運転直後のキルン鉄皮温度は100℃以上であり、この熱量の活用が可能である。一方で、砂の水分蒸発量の増加に伴い、キルン内の絶対湿度が高くなり、集塵機器の結露が懸念されるため、プラント運用を担保するという側面も念頭に置いて進めていく所存である。

【参考文献】

- 1) 道路建設：アスファルトプラントにおける低炭素化への取り組み, No.788, pp.50-51, 2021.
- 2) 立元雄治, 中村正秋. 初歩から学ぶ乾燥技術-基礎と実践-, 第2版, 丸善出版, 2013, pp.139
- 3) 立元雄治, 中村正秋. 初歩から学ぶ乾燥技術-基礎と実践-, 第2版, 丸善出版, 2013, pp.32
- 4) 立元雄治, 中村正秋. 初歩から学ぶ乾燥技術-基礎と実践-, 第2版, 丸善出版, 2013. pp.37
- 5) Heat Transfer Principles and Application 2020 [ACADEMIC PRESS] pp.214
- 6) Properties of Dry Air at One Atmosphere [Microelectronics Hear Transfer Lab 1984] pp.1
- 7) 立元雄治, 中村正秋. 初歩から学ぶ乾燥技術-基礎と実践-, 第2版, 丸善出版, 2013. pp.33
- 8) 高知大学：地球環境化学系研究室, 谷水雅治先生HP 水の飽和蒸気圧 (kochi-u.ac.jp) アスセス日：2024年12月26日
- 9) 桐栄良三, 乾燥装置, 日刊工業新聞, 1966, pp.142-144

筆者紹介



HOSHIKA Ryuhei
星加 竜平
2019年入社
開発部
開発4課



HORIGUCHI Ryo
堀口 諒
2011年入社
開発部
開発4課

アスファルトプラントにおける ベテランオペレータのバーナ運転を模倣する 運転支援システムの開発

浜辺拓真

HAMABE Takuma

日工株式会社 開発部 開発3課

要旨

製造業全体の課題として、次世代への技能継承という課題がある。本開発ではアスファルトプラント(以下、プラント)に関する技術継承を補助するために、AI技術を活用してベテランオペレータの運転技術を見える化し、プラント運転の専門知識を持たない新人オペレータでもベテランオペレータと同等の運転を可能とする運転支援システム(以下、運転支援システム)の開発に取り組んでいる。

具体的には、プラント装置のバーナに着目し、ベテランオペレータの運転を様々な条件下でAIに学習させて、バーナ開度の予測モデルを作成している。そして、各条件におけるバーナ開度の実測値と、予測モデルによる予測値とを比較し、平均絶対誤差を確認することで予測モデル作成の最適な条件について検証を行っている。

1. 背景

製造業全体の課題として、次世代への技能継承の成功率が低いという課題が存在している¹⁾。この原因の1つとして、ベテランオペレータの技術に暗黙知の要素が含まれており、勘所を見える化することが困難であるということが挙げられる。

そこで本開発では、アスファルトプラントの技術継承を補助するために、AI技術を活用してベテランオペレータの運転技術を見える化し、プラント運転の専門知識を持たない新人オペレータでもベテランオペレータと同等のプラント運転を実現できる運転支援システムの開発に取り組んだ。

2. 目的

本稿では、運転支援システムの中でも特に重要な機能である、ベテランオペレータのバーナ運転を模倣するための予測機能に焦点を当て、訓練データの適切な条件を明らかにし、バーナを着火してから骨材温度が設定温度に到達するまでの立ち上げ運転(以下、立ち上げ運転)において、本機能の実現可能性を検証することを目的としている。検証の対象とするバーナは、骨材の供給量や供給する骨材の種類と比率(供給配合)が変化する新規骨材の加熱乾燥用に用いるバーナ(以下、Vバーナ)とした。筆者は、検証結果を基にベテランオペレータの模倣を実現することで、プラント運転の専門知識を持たない新人オペレータであっても、予測モデルのガイダンスによりベテランオペレータと同等の運転が可能な運転支援システムの実現を目指している。さらに、プラントを制御する操作盤において骨材の加熱乾燥時に用いられているPID制御²⁾の改良を含めたプラントの完全自動化や、プ

ラントのリモート操作による運転サービスの実現に向けた取り組みを予定している。

ベテランオペレータの運転を模倣するための予測機能の実現可能性の検証は、プラントの専門知識を持たない新人オペレータがベテランオペレータと同等のプラント運転を実現するために必要であり、この予測機能は、当社が目指しているプラントの完全自動化に向けた重要な基礎技術となる。

3 試験内容

3.1 試験に用いるアルゴリズム

バーナ運転の模倣に使用する予測モデルは、LSTM(Long Short-Term Memory)およびCNN(Convolutional Neural Network:畳み込みニューラルネットワーク)を使用した。

LSTMは時系列データを処理できるニューラルネットワーク構造である。これはRNN(Recurrent Neural Network:再帰型ニューラルネットワーク)の一種であり、長期の記憶を保持できる記憶セル(memory cell)の導入によって、RNNが直面していた「長期記憶の消失」の問題を解決している。LSTMは、通常のRNNの隠れ状態の代わりに、再帰的に「記憶セルブロック」を使用する構造を採用しており、これによって長期および短期の記憶を同時に利用することができる。記憶セル内では、「全結合層 + 活性化関数」の出力値を重み付け係数として使用し、他の経路の値を調整するゲート機構(gating mechanism)を学習する³⁾。

CNNは、局所的な特徴の抽出に特化したニューラルネットワーク構造である。このネットワークは入力データから局所的な特徴を抽出し、それらを畳み込み演算によって集約し

て最終的な出力を生成する。一般的にCNNは2次元の空間的特徴を抽出するために画像処理に使用されるが、1次元の時系列データにも適用することが可能である。この場合、固定時間幅の履歴情報に基づいて予測を行うことができる⁴⁾。

3.2 検証項目と試験結果

予測精度の高い予測モデルを作成するための適切な条件を評価することを目的に、以下の検証を実施した。

- 学習期間の検証
- 季節性の検証
- 入力パラメータの検証
- 立ち上げ運転のみを抽出した検証
- 手動立ち上げ運転の検証
- 入力パラメータに温度パラメータを追加した検証
- 学習データを絞った検証

検証5.は検証4.と同様に学習データとして立ち上げ運転のみを抽出した検証となっている。検証4.は手動運転と自動運転の両方を学習対象とし、検証5.は手動運転のみを対象としている。なお、自動運転は操作盤によるバーナ開度の操作を、手動運転はベテランオペレータによるバーナ開度の操作を意味する。

3.2.1 学習期間の検証

適切な学習期間の条件を明らかにするため、予測モデルの学習期間(訓練データおよび検証データの期間)を変化させ、平均絶対誤差(MAE:Mean Absolute Error)の挙動を確認した。MAEは真の値と予測値の差の絶対値の平均を表し、予測がどれだけずれているかを評価できる。通常、MAEは誤差をできるだけ小さくしたいときに利用され、MAEが小さくなるほど真値と予測値の差が小さくなる。今回はバーナ開度に関する予測精度を検証するため、予測されたバーナ開度とベテランオペレータの操作の差を表す指標としてMAEを採用した。各検証で得られるMAEの平均を平均MAEと呼称して、予測モデルの性能評価値として使用した。

学習期間と平均MAEの関係を**表3.1**に示す。表から、全体の傾向として、学習期間が長いほど平均MAEが低くなることが確認できた。すなわち、予測モデルの性能が向上することが示された。

学習期間が2週間から1か月の間では平均MAEの改善が顕著であるが、1か月以上の学習期間では改善幅が緩やかとなった。この結果より、導入までの時間を短くするため、6か月の改善幅の84%に1か月の学習期間で到達できることを根拠として、学習期間は1か月とするのが適切であると判断した。

図3-1に学習期間が2週間および1か月の予測モデルでバーナ開度を予測したトレンドグラフを示す。実線は予測値、破線は実測値を示している。グラフからも、1か月の予測モデルの方が実測値との誤差が少なくなり、学習期間が2週間の予測モデルよりも優れた予測結果を出力していることが確認

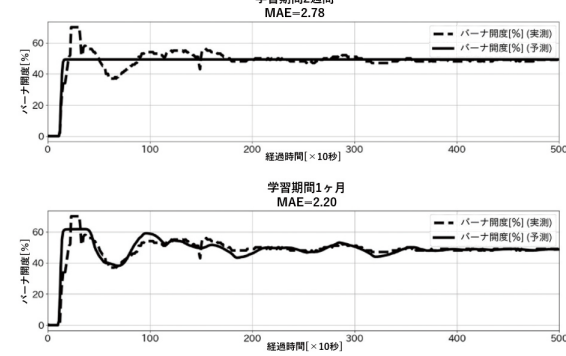


図3-1 学習期間2週間と1か月のモデルで比較したバーナ開度のトレンドグラフ

表3.1 学習期間と平均MAEの関係

学習期間	2 週間	1 か月	2 か月	3 か月	6 か月
平均 MAE [%]	10.5	5.93	5.87	5.44	4.99

3.2.2 季節性の検証

予測モデル作成に使用したデータの外気温と検証に使用したデータの外気温が乖離することにより予測精度が変化すると考え、予測モデル作成に使用するデータの取得時期(以下、学習時期)と予測モデルの精度検証に使用するデータの取得時期(以下、検証時期)を変化させて予測精度について検証を実施した。本検証は学習時期を2021年4月1日～2021年4月30日で固定し、検証時期を変化させることでMAEの挙動を確認した。

学習時期と検証時期のズレと平均MAEの関係を**表3.2**に示す。表より、学習時期とテスト時期のズレが1週間から3か月であれば、時期のズレが大きくなるほど平均MAEが大きくなる傾向があるが、1年および2年では平均MAEが1週間と同等もしくはそれ以下となっている。

以上より、1年ごとの周期性が現れており、予測精度は予測モデル作成に使用したデータと検証に使用したデータの外気温に強い相関があることが示唆された。以上の結果より、季節ごとに予測モデルを更新する必要があることが分かった。

3.2.3 入力パラメータの検証

予測精度を向上させるため、予測モデルの作成に使用する骨材温度をはじめとするパラメータ(以下、入力パラメータ)を変化させることで、予測精度が向上するか検証を行った。

表3.2 学習～検証時期のズレと平均MAEの関係

	1 週間	2 週間	1 か月	2 か月	3 か月	1 年	2 年
学習時期と 検証時期のズレ (検証データの取得時期)	(2021/ 5/6~12)	(2021/ 5/6~18)	(2021/ 5/6~31)	(2021/ 6/1~30)	(2021/ 7/1~31)	(2022/ 4/1~30)	(2023/ 4/1~28)
平均 MAE [%]	7. 80	8. 54	9. 48	8. 73	9. 11	7. 67	6. 51

入力パラメータと平均MAEの関係を表3.3に示す。これまでの検証では、骨材温度、設定温度、供給量合計値の3つを入力パラメータとして使用していたため、この3つのパラメータをデフォルト条件とし、条件Aと呼称した。条件Aに、各フィーダの供給量を追加した場合、砂のフィーダ供給量のみを追加した場合、条件Aから供給量合計値を除いて砂のフィーダの供給量を追加した場合をそれぞれ条件B～Dと名付け、それぞれの平均MAEを導出した。

表より、条件Aの入力パラメータにおける平均MAEが最も低く、入力パラメータを増加させると予測精度が悪化する傾向にあるといえる。例として、条件AおよびBの予測モデルでバーナ開度を予測したトレンドグラフを図3-2に示す。実測値は破線で、予測値は実線で表現している。グラフからも、条件Aの予測モデルの方が実測値に適合する予測結果を出力し

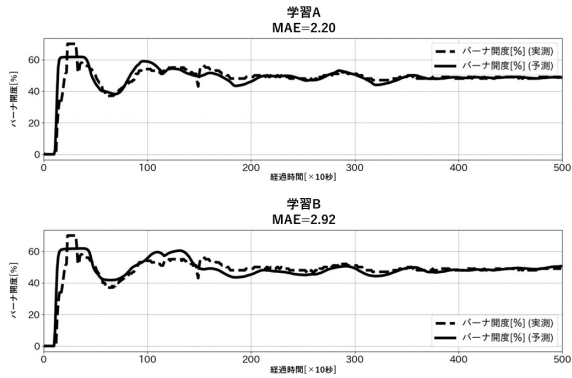


図3-2 条件A、Bのモデルで比較したバーナ開度のトレンドグラフ

表3.3 入力パラメータと平均MAEの関係

条件名	A	B	C	D
入力パラメータ	・骨材温度[℃] ・設定温度[℃] ・供給量合計値 [×0.1 t/h]	・骨材温度[℃] ・設定温度[℃] ・供給量合計値 [×0.1 t/h] ・各フィーダ (No.1～10) の供 給量 [×0.1 t/h]	・骨材温度[℃] ・設定温度[℃] ・供給量合計値 [×0.1 t/h] ・砂フィーダの供 給量[×0.1 t/h]	・骨材温度[℃] ・設定温度[℃] ・砂フィーダの供 給量[×0.1 t/h]
平均 MAE [%]	5. 93	7. 16	6. 54	8. 90

ていることが確認できる。しかし、バーナ開度の制御には供給している砂に含まれる水分量の影響が大きいと考えられるため、入力パラメータに関しては引き続き検証を行うこととした。

3.2.4 立ち上げ運転のみを抽出した検証

これまでの検証ではバーナを着火してから消火するまで（以下、バーナ運転全体）を学習していたが、本開発ではバーナの立ち上げ運転に焦点を当てているため、立ち上げ運転のみを抽出した検証を行い、予測モデルの性能が向上するか確認した。なお、本検証では立ち上げ時の運転が自動運転であっても手動運転であっても学習の対象とした。立ち上がりの運転範囲はバーナが着火してから骨材温度が収束するまでとし、収束条件は「極値が3回連続で設定温度±8℃の範囲内（以下、整定範囲内）に入った時点、または6分間整定範囲内に収まった時点」とした。収束条件の説明図を図3-3に示す。図3-3の例では、灰色着色部を骨材温度が収束しているものとして扱っている。この収束条件は運転の再現性・品質や運転データ数の確保が十分にできると判断したものを筆者が設定して、検証を行った。

バーナ運転全体の学習と、骨材温度が収束した立ち上げ運転のみの学習を行った際の平均MAEの関係を表3.4に示す。表より、骨材温度が収束した立ち上げ運転のみの学習をすることで、平均MAEは高くなり、予測精度が低下していることがわかる。さらに、バーナ運転全体を使用した予測モデルと、骨材温度が収束した立ち上げ運転のみを使用した予

測モデルでバーナ開度を予測したトレンドグラフを図3-4に示す。グラフの破線は実測値、実線は予測値である。トレンドグラフからも、バーナ運転全体を使用した予測モデルの方が実測値に適合する予測結果を出力していることが確認できる。一般的に、訓練データの数が少ないと予測精度が低下する傾向がある。今回、対象を立ち上げ運転に絞ることで訓練

データ数が74%減少した。このデータ数の大幅な減少が予測精度低下の原因と考えられる。さらに、立ち上げ運転のみを評価対象としたことにより、予測しやすい骨材温度が収束したあとの予測部分がなくなったことで、MAEが低下したと考えられる。本検証では立ち上げ運転に焦点を当てているため、立ち上げ運転の予測精度を上げる方法について、引き続

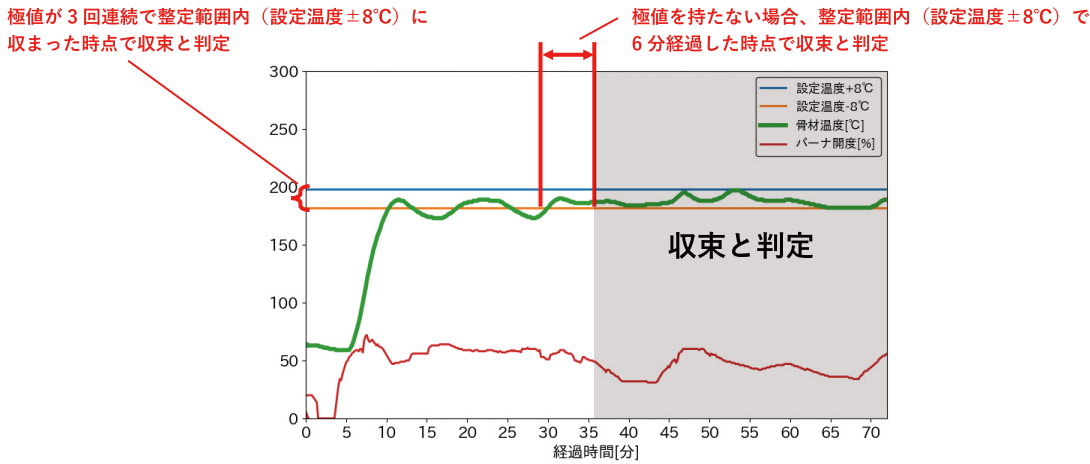


図3-3 収束条件の説明図

表3.4 立ち上げ運転抽出前後で比較した平均MAE

学習範囲	平均MAE [%]	データ数
バーナ運転全体	5. 93	81
骨材温度が収束した立ち上げ運転のみ	9. 99	21

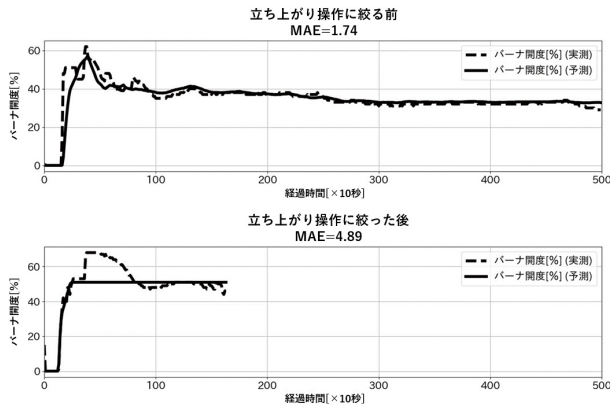


図3-4 立ち上げ運転抽出前後で比較したトレンドグラフ

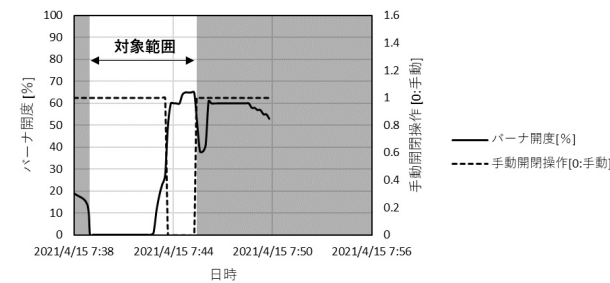


図3-5 手動立ち上げ運転の対象範囲

3.2.5 手動立ち上げ運転の検証

これまでの検証では立ち上げ時の運転が自動運転であっても手動運転であっても学習の対象としていたが、自動運転部はベテランオペレータの意思が介在していない。運転支援システムが目指しているベテランオペレータの運転を模倣するため、立ち上げ時の自動運転部と手動運転部の両方を含む予測モデルと、ベテランオペレータの意思が介在する立ち上げ時の手動運転部のみを抽出した予測モデルを比較し、性能が向上するかどうかを検証した。具体的な立ち上げ時の手動運転の対象範囲を図3-5に示す。対象範囲は運転を開始後、手動運転から自動運転に切り替えるまでとした。なお、本検証は同一データを使用し、学習する範囲を変化させる検証のため、データ数に変更はない。

学習範囲を立ち上げ時の手動運転のみに変更する前後で比較した平均MAEを表3.5に示す。

さらに、自動運転と手動運転を含む予測モデルと、手動運転のみを抽出した予測モデルでバーナ開度を予測したトレンドグラフを図3-6に示す。実線が予測値、破線が実測値である。

表と図より、手動立ち上げ運転のみを抽出した運転データを学習することで平均MAEが低くなっており、予測モデルの性能が向上していることを確認できた。この結果から、予測モデルの予測精度を上げるためには模倣したい運転のみを学習し、訓練データの質を向上させる必要があることがわかった。

表3.5 手動立ち上げ運転抽出前後で比較した平均MAE

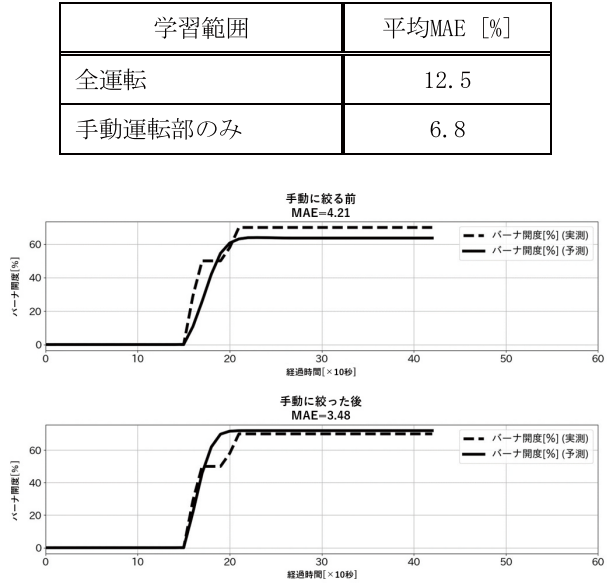


図3-6 手動立ち上げ運転抽出前後で比較したバーナ開度のトレンドグラフ

3.2.6 入力パラメータに温度パラメータを追加した検証

予測精度向上を図るため、外気温を入力パラメータに追加することを考えた。しかし、既存のプラントでは外気温を測定していないため、バグ入口温度、煙道温度（以下、温度パラメータ）を入力パラメータに用いることで、間接的に外気温を入力パラメータとし、予測モデルの性能が向上するかどうかを確認した。温度パラメータはプラントの運転状況に大きく依存し、骨材供給が終了してから十分な冷却時間の経過により外気温と同等の温度に近づくと考えられる。しかし、データ数を確保するため、十分に冷却時間を確保しているデータを抽出した検証は行わず、入力パラメータに追加するという方法で検証を行った。

入力パラメータに温度パラメータを追加する前後で比較した平均MAEの関係を表3.6に示す。表より、入力パラメータに温度パラメータを追加することで、平均MAEは低くなっていることから予測モデルの性能が向上したことが確認できた。

表3.6 温度パラメータを追加する前後で比較した平均MAEの関係

学習範囲	平均MAE [%]
温度パラメータ追加前	7. 31
温度パラメータ追加後	6. 69

温度パラメータを入力パラメータに追加した予測モデルと、温度パラメータを追加しない予測モデルでバーナ開度を予測したトレンドグラフを図3-7に示す。実線は予測値、破線は実測値を表す。グラフからも、温度パラメータを追加した方が、実測値に適合する予測結果を出力していることが確認できる。さらに、十分に冷却時間を確保したデータのみを抽出した予測モデルは、訓練データの質が上がることにより予測精度が向上することが示唆された。

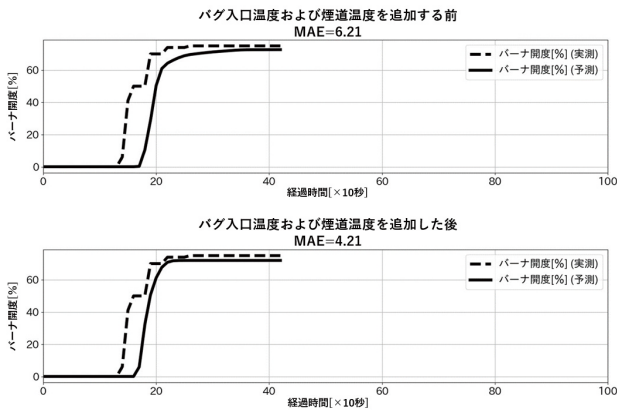


図3-7 温度パラメータを追加する前後で比較したバーナ開度のトレンドグラフ

3.2.7 学習データを絞った検証

季節変化による外気温の変化が予測モデルの性能に影響を及ぼすと考えられるため、気温の変動が小さい期間において学習およびテストを行い、予測モデルの性能向上に関する検証を行った。2020年11月～2021年3月の気温変動を図3-8に示す。11月から12月では気温の差が大きく、12月から2月では気温の変動が小さくなることから運転データの対象期間を2020年12月～2021年2月とした。学習期間は2021年1月の2週間、テストに用いたデータは2020年の12月と2021年2月のデータとなる。

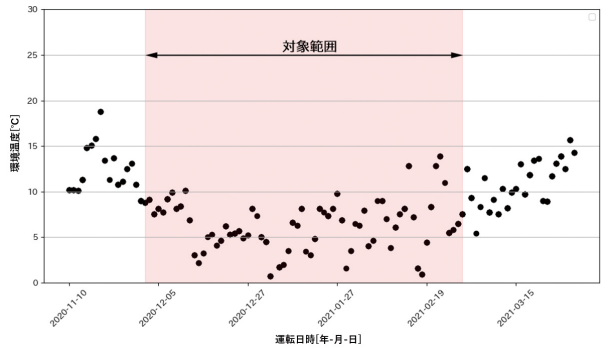


図3-8 2020年11月～2021年3月の気温変動

バーナを着火してからバーナ開度を手動で最初に操作した時間（以下、バーナ開度を最初に操作した時間）に関して

は、人為的な変動が予想され、予測モデルの性能に悪影響を及ぼす可能性がある。そこで、バーナ開度を最初に操作した時間の変動による悪影響を排除するために、バーナ開度を最初に操作した時間に着目して、図3-9の模式図における着色部が示すようにデータ全体の80%を選択して、学習データを絞ることで予測モデルの性能が向上するか検証を行った。なお、使用したデータの割合は運転データ数の確保が十分にできると判断したものを筆者が設定して、検証を行った。実際に検証に使用したデータにおけるバーナ開度を

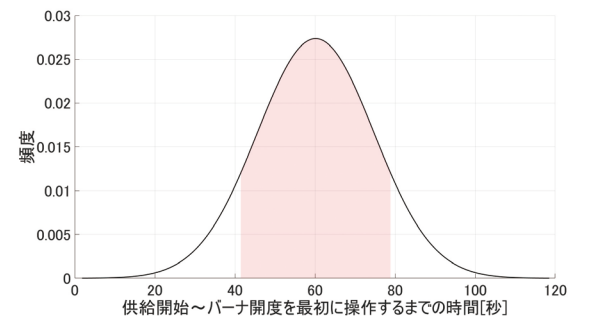


図3-9 検証に使用したデータの模式図

学習データを絞る前後と平均MAEの関係を表3.7に示す。表より、気温の変動が小さく、かつバーナ開度を最初に操作した時間が近いデータに絞って学習することで、平均MAEが低くなっており、予測モデルの性能が向上していることが確認できた。

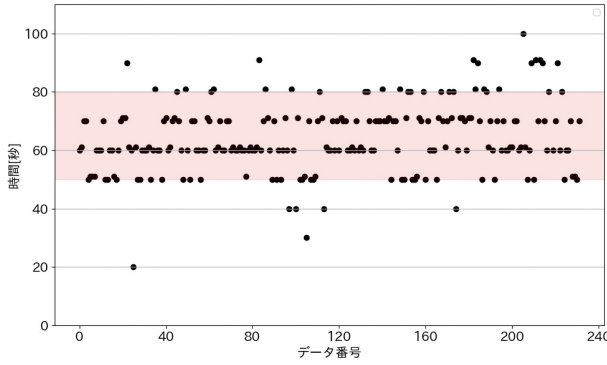


図3-10 2020年12月～2021年2月の供給開始からバーナ開度を最初に操作するまでの時間

表3.7 学習データを絞る前後と平均MAEの関係

学習範囲	平均MAE [%]
データを絞る前	6. 80
データを絞った後	4. 13

学習データを絞る前後の予測モデルでバーナ開度を予測したトレンドグラフを図3-11に示す。実線が予測値、破線が実測値を表す。グラフからも、学習データを絞った後の方が実測値に適合する予測結果を出力していることが確認できる。

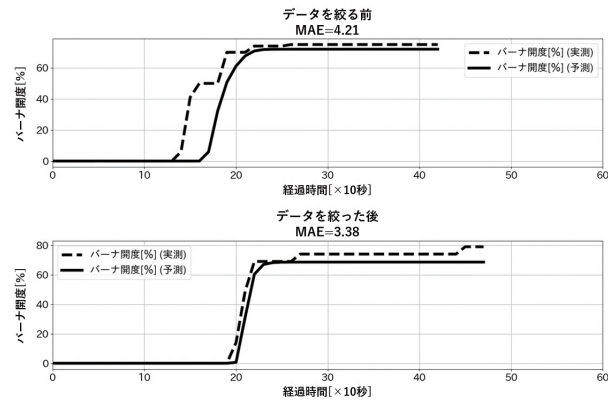


図3-11 学習データを絞る前後で比較したバーナ開度のトレンドグラフ

4 まとめ

本稿では、ベテランプラントオペレータのバーナ運転を基にVバーナ開度予測モデルを作成し、訓練データの適切な条件を評価した。

試験により得られた適切な条件は、手動立ち上げ運転に焦点を当て、気温の変動が小さい条件のもと、バーナ開度を最初に操作するタイミングが近いデータを選別することである。一方で、気温変動が大きい季節に関する予測や、作成した予測モデルと異なる季節における予測精度に課題が残っているため、今後課題解決に向けて取り組む必要がある。

5 今後の展望

今後の展望としては、作成した予測モデルの精度をフィールドテストにて検証する。さらに、予測モデルが季節の変化に伴う外気温の変化に対応できるような予測モデルの改良に取り組むことで、運転支援システムに必要なデータ数削減を実現して、早期に社会実装するための手法について検証を行う。

参考案件

- 1) 経済産業省 2023年版ものづくり白書(ものづくり基盤技術振興基本法第8条に基づく年次報告) 2023/6/2 pp.51-57
<https://www.meti.go.jp/report/whitepaper/mono/2023/pdf/all.pdf>
- 2) 熊谷秀樹，基礎からの自動制御と実装テクニック，pp125-127,2011.
- 3) S. Hochreiter and J. Schmidhuber. “Long short-term memory.” Neural computation 9.8 (1997): 1735-1780.
- 4) Y. LeCun, L. Bottou, Y. Bengio, and P. Haffner. Gradient-based learning applied to document recognition. Proceedings of the IEEE, 86 (11):2278–2323, 1998.

筆者紹介



HAMABE Takuma
 浜辺 拓真
 2015年入社
 開発部
 開発3課

排ガスに含まれる水蒸気の凝縮潜熱を利用した 砂乾燥システム

The sand drying system utilizing the latent heat of condensation of water vapor contained in exhaust gases

蓬萊秀人

HORAI Hideto

日工株式会社 技術本部

概 要

道路舗装資材の加熱アスファルト混合物を製造するアスファルトプラントは、その進化の過程において省エネルギー化技術を積極的に取り入れて来たことから、今では実に**85%**を超える熱効率を達成している。反面、このことは、アスファルトプラントの省エネルギー化の限界が近付いていることをも示唆している。また、同加熱アスファルト混合物は、そのワーカビリティが低下しない熱い状態で舗装を施工する必要があることからダンプトラックによる輸送時間が限定的となり、このことを補完するようにして全国に**1,000**基以上のアスファルトプラントが分散立地している。そして、このことが、アスファルトプラントの稼働率を引き下げ、生産性、引いては省エネルギー化の足枷となっている。一方で、同加熱アスファルト混合物を製造するときの熱源として化石燃料を消費するアスファルトプラントは、全国で年間**103**万吨にも及ぶCO₂を排出しており、その中でも、骨材の水分を除去する乾燥プロセスでその過半数を排出している。とりわけ、比表面積が大きい砂が骨材全体の**70%**以上の水分を保持していることから、廃熱などを有効利用してこの水分を事前に除去することができれば省エネルギー化とCO₂削減に極めて有効な手段となる。

本稿では、稼働率が極めて低いアスファルトプラントの運用上の制約から影響を受けることがない砂のサプライチェーンにおいて、従来、骨材の乾燥に有効利用することができず廃熱として捨てていた排ガスに含まれる水蒸気の凝縮潜熱を回収利用することにより、実に**150%**を超える熱効率で砂を乾燥することができる砂乾燥システムの概要と、この乾燥砂を用いることによってアスファルトプラントで期待される燃費並びにCO₂排出量の削減効果について検討を行っている。

キーワード: CO₂排出量削減、水蒸気の凝縮潜熱、砂乾燥、凝縮塔

1. はじめに

今世紀末までの気温上昇を産業革命前に比べて**1.5℃**未満に抑えることを目標に、国際社会が大きく動いている。2021年11月にイギリスのグラスゴーで**194**ヵ国の代表が一堂に会し開催されたCOP26(国連気候変動枠組条約第26回締約国会議)において、我が国を始めとする先進7ヵ国は、温室効果ガス(Green House Gas以下、GHGと記述)の排出量を2050年までに実質ゼロにする野心的な目標を掲げている。そして、我が国は、その中間時点にあたる2030年に2013年比でGHG排出量を**46%**削減し、さらに、**50%**の高みを目指して行くことを国際社会に向けて約束している。

加えて、2025年2月に国連への提出期限を迎えた2035年に向けてのGHG削減目標を、2013年比で**60%**とすることを、我が国はNDC:Nationally Determined Contributionとして表明している。そして、このことを裏付ける根拠として第7次エネルギー基本計画を新たに作成し閣議決定している。その方法論としては、CO₂を始めとするGHGを排出しない再生可能エネルギー並びに原子力エネ

ルギーへの転換比率を以前までも増して高めて行くことと、今まで以上の省エネルギー化の推進を図ることに帰結する。

再生可能エネルギーへの移行に関しては、そのコストの削減が課題となる。化石燃料に比べてエネルギー密度が極めて低い再生可能エネルギーは、電気エネルギーなどへの変換設備が巨大化する傾向にある。さらに、気象や天候の影響を大きく受ける不確実性を伴うことから蓄電池や送配電などへの巨額な設備投資が必要となる。

原子力エネルギーに関しては、2011年の福島第一原発事故の教訓と猛省の下、世界一安全基準が厳しい原子力規制委員会の承認と地元住民との合意形成が再稼働に向けてのハードルとして立塞がる。さらに、2050年のカーボンニュートラル達成に向け、老朽化して行く原子炉のリプレイスや新規建設並びに原子力産業としての技術者や従事者の育成などの課題が残る。

省エネルギー化に関しては、2度に渡る石油危機の影響を強く受けて我が国は産業界を上げて世界に誇れる省エネルギー化を推進してきた。これ以上の省エネルギー化を図るには乾いた雑巾を絞るようなものであると比喻されるが如く限界に近付いていることが課題である。ただし、省エネ

ギー化は、それを推進するほどCO₂排出量とそのコストを削減することが可能で、しかも、再生可能エネルギーや原子力エネルギーなど全てのエネルギー資源を対象として有効に働く。

一方、このような社会の趨勢の下、交通インフラの要である道路に目を転じると、道路の新規建設やメンテナンスなどの維持管理に必要となる舗装資材の加熱アスファルト混合物(以下、合材と記述)は、国内で年間**3,800**万吨余りが製造されている¹⁾。そして、これを製造するアスファルトプラント(以下、APと記述)からは、年間**103**万吨に上るCO₂を排出していると推定される。APにおいても、過去2度に渡るオイルショックの境遇の下、早くから省エネルギー化技術を積極的に取り入れており、今では実に**85%**を超える熱効率(LHV:Lower Heating Value)にまで達している。逆に、このことは、APの省エネルギー化が限界に近付いていることをも示唆している。

また、同合材は、そのワーカビリティ(作業性)が低下しない熱い状態で輸送し舗装を施工する必要があることから、ダンプトラックによる搬送可能時間(距離)が限定的となる。そのために、このことを補完するようにして全国に**1,000**基以上のAPが分散して立地している。そして、このことが、APの稼働率を引き下げ生産性、引いては省エネルギー化の足枷となっていることは否めない。

次に、同合材を製造するときにAPで消費する化石燃料に着目すると、骨材の水分を除去する乾燥プロセスでその過半数を消費している。とりわけ、比表面積が大きい砂が骨材全体の**70%**以上の水分を保持していることから、廃熱などを有効に利用してこの水分を予め除去することができれば省エネルギー化による燃費とCO₂の削減に極めて大きく寄与することができる。

本稿では、稼働率が極めて低いAPの運用上の制約から影響を受けることがない砂のサプライチェーンにおいて、従来、骨材の乾燥に有効利用することができず廃熱として捨てていた排ガスに含まれる水蒸気の凝縮潜熱を回収利用することにより、実に**150%**を超える熱効率(LHV)で砂を乾燥することができる砂乾燥システムの概要と、この乾燥砂を合材の骨材として供給することによりAPで期待される燃費とCO₂の削減効果を検討している。

2.APの課題

第2章では、「**2.1 APの概要**」において、APの特徴を概観した上で、2050年のGHG排出量を実質ゼロに、引いては2030年に**46%**、2035年に**60%**の削減目標を目指して行くために、今現在のAPが抱えている課題を「**2.2 省エネルギー化の限界**」と「**2.3 稼働率向上の限界**」にフォーカスし掘り下げている。

2.1 APの概要

APは、質量割合で約**90%**の碎石と砂などのバージン(新規)骨材(以下、V骨材と記述)を乾燥加熱し、それに原油の残渣であるアスファルトをバインダーとして約**5%**、石粉(炭酸カルシウム)をフィラーとして約**5%**添加混合して、道路舗装資材である合材を製造する装置である。

代表的なAPの全景を写真-1と写真-2に、そのフローを図-1²⁾に示す。図より、V骨材を乾燥加熱する新材用ドライヤ(以下、Vドライヤと記述)、乾燥加熱した骨材を各粒度に篩い分けるスクリーン、ホットビンに貯蔵された各粒度の骨材を配合設計に応じて計量する計量器、計量したV骨材と所定のアスファルトとフィラーを添加して熱い状態で混合する2軸のパグミルミキサなどで構成されている。



写真-1 最近のAPの事例 ①

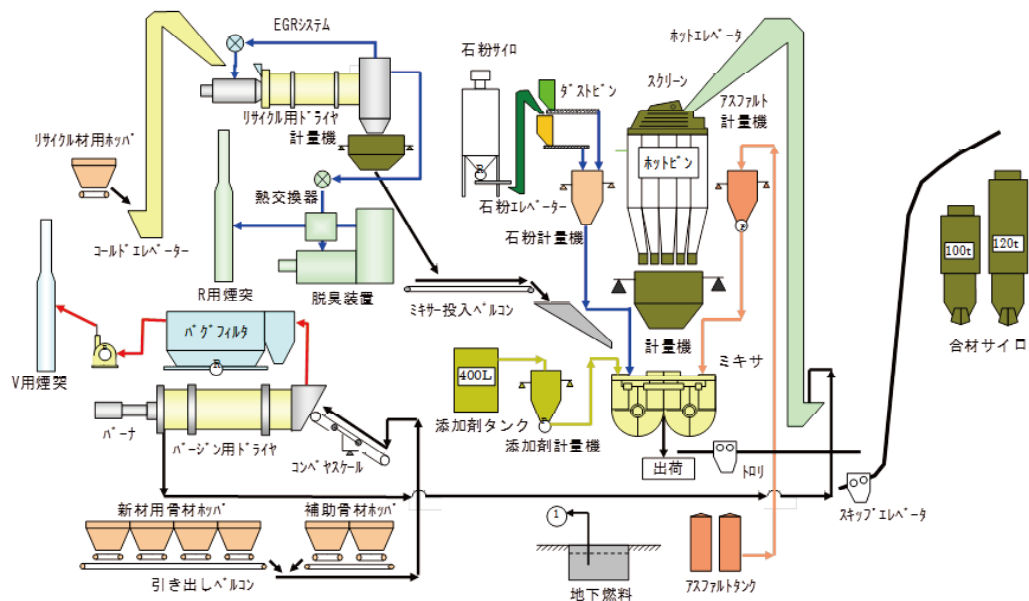
出典:日工株式会社発行 2024.7 NAPニュースNo.364



写真-2 最新APの事例 ②

出典:日工株式会社発行 2022.4 NAPニュースNo.355

さらに、循環型社会形成の観点より、老朽化したアスファルト舗装を打ち換える時に発生する舗装発生材であるアスファルト・コンクリート塊(以下、アスコンガラと記述)を破碎して粒度調整したものをリサイクル材(以下、R材と記述)と称し、これを骨材の一部として一定割合、V骨材に添加混合してリサイクル合材(以下、R合材と記述)を製造する設備を国

図-1 一般的なAPの合材製造プロセス²⁾

内の殆どのAPが併設している。その主要な装置として、R材を乾燥加熱するリサイクルドライヤ（以下、Rドライヤと記述）、加熱したR材を一旦貯蔵するサージビン、サージビンから切り出した加熱R材を所定の割合で2軸バグミルミキサに計量添加する計量装置、Rドライヤで生成する悪臭を帯びた排ガスを浄化する脱臭装置などで構成されている。

加えて、ダンプへの合材積み込み作業に影響を受けることなくAPを連続的に稼働して、省エネルギー化を図り生産性を向上させるための合材サイロなども普及している。今現在では、国内で出荷される合材全体の7割近くをR合材が占めており、これに対して、R材を混合しない合材をバージン合材（以下、V合材と記述）と呼んで区別している。以下、単に「合材」と表記する場合は、両者の合材を示す。

熱い状態の合材は、流動性を呈し、道路に打設転圧後に温度が低下してバインダーであるアスファルトが硬化することにより道路舗装としての強度を発現する。そして、このようなワーカビリティや締固め度などの所定の品質を有する合材をAPで製造するためには、水分を含む碎石や砂などの骨材を常温から170℃前後まで乾燥加熱するプロセスを経る必要がある。とりわけ、このプロセスが、APにおける燃料消費とCO₂発生の主要原因である。

骨材の乾燥加熱は、重油や天然ガスなどの化石燃料をバーナで燃焼させることにより生成する熱風（燃焼ガス）を熱媒体とし、これを直接骨材と接触させて熱交換（乾燥加熱）を行っている。これらの熱交換（乾燥加熱）の場を担う装置がドライヤである。写真-3²⁾にドライヤの全景と図-2²⁾にドライヤの内部イメージを示す。写真と図より、APのドライヤは、骨材の流れ方向に傾斜させた円筒回転式のドラムに骨材と熱

風とを連続的に導入し、ドラムの回転により流動分散する骨材に熱風を直接接触させる仕組みを基本としている。特に、骨材と熱風との接触面積を増大させて熱交換を促すために、ドライヤ内部に多数のリフターを設け、ドライヤの回転に応じて骨材を持ち上げて均一に分散できるように工夫している。

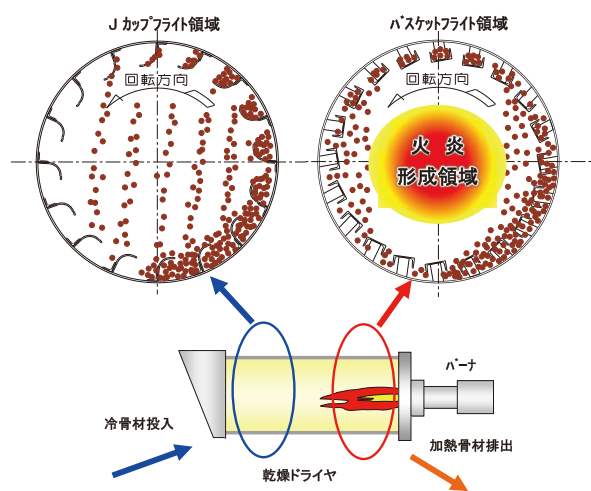
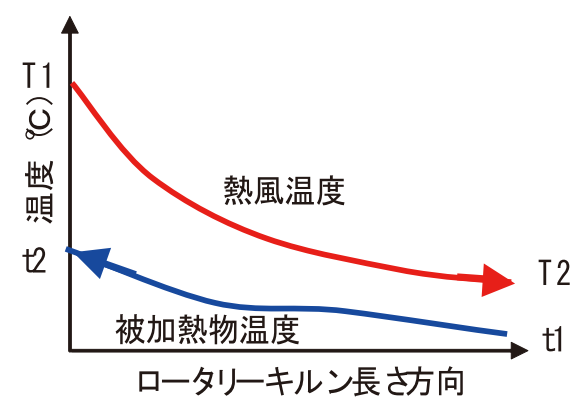
写真-3 ドライヤの全景²⁾図-2 ドライヤ内部のイメージ²⁾

図-3 カウンターフローにおけるガス温度と骨材温度の関係

V合材を製造するプロセスで用いるVドライヤは、熱風と骨材とが向かい合って連続的に流れるカウンターフロー（向流）方式としている。この方式は、図-3に示す通りドライヤ内部全域において骨材と熱風との対数平均温度差を最も大きく採ることができ、加熱骨材温度よりも排ガス温度を低く設計することができる熱交換効率に極めて優れた方式である。

一方で、熱風と骨材とが同一方向に流れる平行フロー（並流）方式は、主としてR合材を製造するプロセスで用いられる。このことは、図-4に示す通り熱風とR材との対数平均温度差をVドライヤよりも小さく採ることができるので、R材が含有するアスファルトの劣化の進行を抑制することや、温度上昇により粘着性を呈した加熱R材で上流から飛来してくる微粒分を捕捉する効果などを狙っている。そして、そのRドライヤの原理上の制約から排ガス温度を加熱R材温度よりも下げることができないため、熱交換効率はカウンターフロー方式よりも劣る。

2.2 省エネルギー化の限界

前節で説明したことを前提とするAPのドライヤは、一般的な産業用乾燥設備と同様に、乾燥と加熱に主眼を置いている。このことから、有効エネルギーを水蒸気潜熱（乾燥）と骨材顕熱（加熱）とし、無効エネルギーを放散熱と排ガスの顕熱およびその他不明熱と定義している。このために、カウンターフロー方式を採用するVドライヤの熱効率（LHV）は、実に85%を優に超える域にまで達しており、極めて優れた乾燥設備であると言える。この背景には、APに及んでも過去2度に渡るオイルショックの影響を強く受け、燃費の削減を図るために低空気比バーナや高効率ドライヤなどの省エネルギー機器を早く開発し順次市場に投入してきたことに起因している^{3)~16)}。とりわけ、無効エネルギーの大半を占めている排ガスの削減と、そこからの顕熱回収に積極的に取り組んでいる。このことから、排ガス温度は既に100℃を下回る状態となっており、包含する水蒸気が飽和状態に至る寸前まで骨

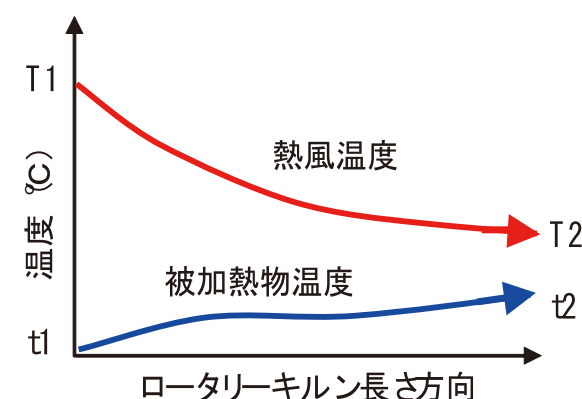


図-4 平行フローにおけるガス温度とR材温度の関係

材の乾燥加熱に熱エネルギーを有効利用している。そして、このことが一因で、集塵機などの排ガス処理装置の低温腐食を助長する事態にまで至っているケースもある。

以上のことから、APの省エネルギー化の余地は殆ど残されておらず「省エネルギー化の限界」の状況にあると言える。

2.3 稼働率向上の限界

合材は、前述の通り温度低下によるワーカビリティや締固め度などの施工品質の悪化を防ぐために、熱い状態でAPから舗装現場に搬送して道路に打設転圧する必要がある。このため、熱い合材を冷やせずにダンプで輸送することが可能な時間は1.5時間程度であると言われている。APは、このような合材の特殊性から、APを全国に分散して設置することにより、その輸送時間の制約を補完するような進化の過程を辿ってきている。即ち、全国津々浦々の道路舗装現場に1.5時間以内で合材を搬送することが可能な立地場所にAPが配備されているのである。

一方で、一般社団法人日本道路建設業協会の最新の統計によると、1990年代のバブル期においては、全国に2,000基余りのAPが稼働し、年間8,000万トンを上回る合材製造量を誇っていた。しかしながら、バブル崩壊による道路建設の抑制圧力の影響を受け、合材製造量が半減すると共に、APの合理化の勢いが加速し、その設置数が1,100基にまで半減している¹⁾。

さらに、合材製造量の半減とは裏腹に、R合材の製造を担うRドライヤの併設やダンプへの合材積み込み時間の短縮（瞬発力向上）などの要請に答える形で、合材製造能力を高めた大型化の方向でAPは進化を遂げている。これらのことが、APの稼働率を40%以下にまで押し下げている大きな要因であると考えられる。ここでのAP稼働率(%)の定義は、合材製造量(t/年)/APの合材製造能力(t/年)×100とし、合材製造能力(トン/年)=AP総数の公称能力(トン/時間)

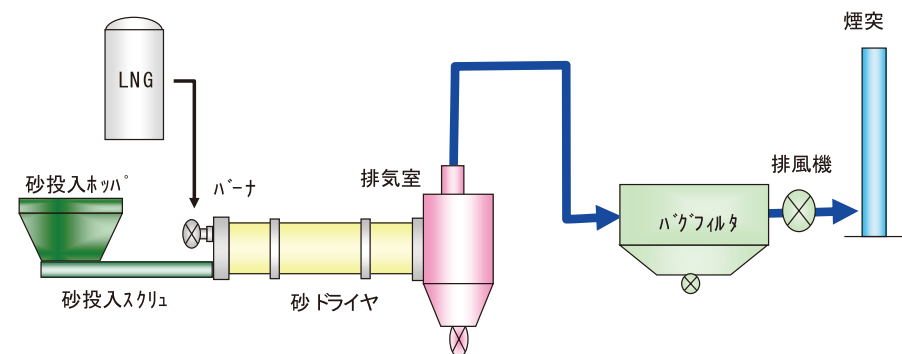


図-5 従来の砂乾燥システム全体フロー

×5 時間/日×20日/月×12月/年としている。このことから、年間稼働時間は、1,200時間/年らずで製造設備としては極めて少ない。年間7,200時間稼働する一般的な製造設備と比較すると、APの稼働率は実に1/6($1,200/7,200 \times 40\% = 16.7\%$)を下回る低調振りとなり、このことがAPの特殊性を浮き彫りにしているとも言える。

このような背景から、全国津々浦々の道路へ合材を滞りなく供給するためには、APの稼働率がいくら下がろうとも、現状の立地場所にAPを存続させておくことが必須条件となる。これらのことから、APをさらに集約して稼働率を高めて合材の生産性を向上させ、省エネルギー化とCO₂削減とを推し進めることは、合材の輸送時間およびダンプへの積載時間などの制約から、もはやAPは「稼働率向上の限界」を迎えていると言わざるを得ない。

3.砂乾燥システムの概要と特徴

第3章では、本砂乾燥システムを構成する「**3.1 主要な装置構成**」及び「**3.2 熱効率向上の基本原則**」を確認した上で、先進的な省エネルギー技術の要である「**3.3 凝縮塔による廃熱回収と砂乾燥メカニズム**」の各論に触れる。そして、水蒸気の露点温度を上昇させて凝縮潜熱の回収量を増大させるための要素技術である「**3.4 不凝縮ガス濃度の低減(侵入空気削減)**」並びに、砂を昇温することなく供給する熱エネルギーを水分蒸発のみに利用するための重要な技術となる「**3.5 乾燥砂の残留水分**」についての詳細に触れる。

3.1 主要な装置構成

まず、本砂乾燥システムとのベンチマークとすべく、排ガスが包含する水蒸気の凝縮潜熱を回収する装置（以下、凝縮塔と記述）を備えない従来の砂乾燥システム（以下、従来システムと記述）のフローを図-5に示す。図より、従来システムは、砂供給装置、熱風発生用バーナ、パラレルフロー（並流）方式のドライヤ、集塵装置であるバグフィルタ、排風機、煙突

などの装置で構成している。詳細は後述するが、砂乾燥システムのドライヤには敢えてパラレルフロー方式を採用している。そして、前章でも触れた通りAPのドライヤは、熱効率が既に85%以上に達しており、このことにより排ガス温度が100℃を下回り、包含する水蒸気が飽和の状態でもはや、「省エネルギー化の限界」を迎えている。

次に、この従来システムを基本ベースとして、凝縮塔を備えた本砂乾燥システムのフローを図-6に示す。図より、本砂乾燥システムは、熱風発生用バーナを搭載する**Primary**砂ドライヤ（以下、**Pr**砂ドライヤと記述）と同バーナを搭載しない**Secondary**砂ドライヤ（以下、**Se**砂ドライヤと記述）の2基のドライヤを備えている。それぞれのドライヤに関しては、従来システムと同様のパラレルフロー方式とし、排ガスを除塵するためのバグフィルタおよび排風機その他の付帯設備を備えている。そして、**Pr**砂ドライヤ用バグフィルタの後段には、本砂乾燥システムの特徴でもある凝縮塔を装備している。この凝縮塔では、排ガスに直接散水を施すことにより、排ガスが含有する水蒸気を凝縮させると共に、その時の凝縮潜熱を温水として回収している。

その上で、この温水を温風生成用の熱交換器へと導き、常温の外気と熱交換を行って温風を生成し、これを熱媒体としてSe砂ドライヤで新たな砂を乾燥するように工夫している。即ち、Se砂ドライヤで砂を乾燥するために供給される熱エネルギーは、従来システムでは利用されずに廃熱として捨てていた水蒸気の凝縮潜熱で賄っており、Se砂ドライヤで砂乾燥に利用する熱エネルギーの全てが省エネルギー化とCO₂削減とに寄与することになる。

なお、各機器を低温腐食から保護するために、同バーナの燃料には、酸性ガスである硫黄酸化物の析出要因となる硫黄成分を含まない白灯油もしくは都市ガスやLNG (Liquefied Natural Gas)などを想定している。

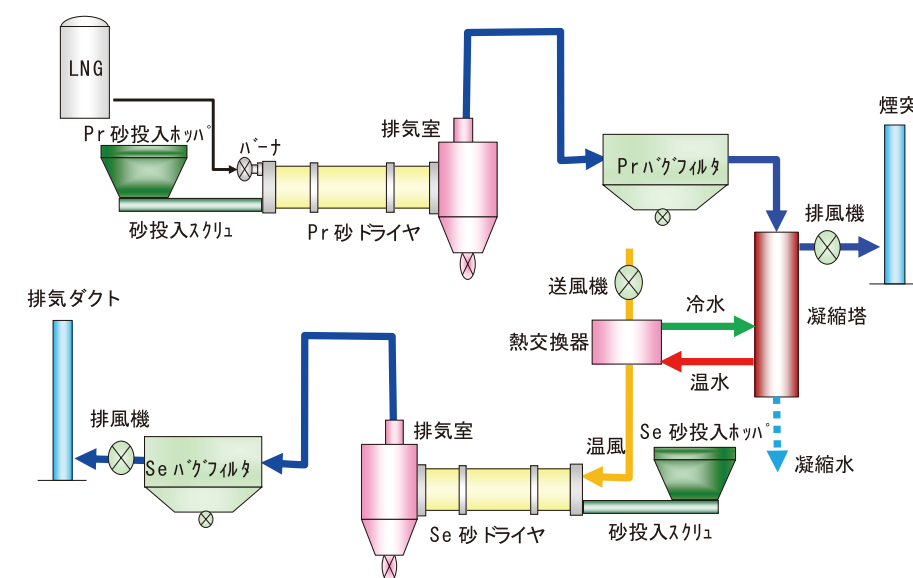


図-6 本砂乾燥システム全体フロー

3.2 熱効率向上の基本原則

第2章で述べた通り、骨材の乾燥と加熱プロセスに主眼を置いたAPにおける熱効率の定義は、有効エネルギーを骨材の顕熱(加熱)と水分の潜熱(蒸発)としている。そして、骨材の乾燥加熱に利用することができない無効エネルギーは、放散熱、水蒸気を含む排ガスの顕熱、不明熱などとし、その内の大半を排ガスの顕熱が占めている。いずれにしても、これらAPで定義される有効エネルギーの総和が入熱全体(燃焼熱)の85%以上に達していることから、同熱効率の定義においては優れた乾燥システムであると評価することができる。

以上のことを数式で表わすと、

$$(\text{入熱}) = (\text{有効熱}) + (\text{無効熱})$$

$$(\text{熱効率}) = (\text{有効熱}) / (\text{入熱})$$

ここで、

$$(\text{有効熱}) = (\text{骨材の顕熱}) + (\text{水分の潜熱})$$

$$(\text{無効熱}) = (\text{放散熱}) + (\text{排ガスの顕熱}) + (\text{不明熱})$$

となる。

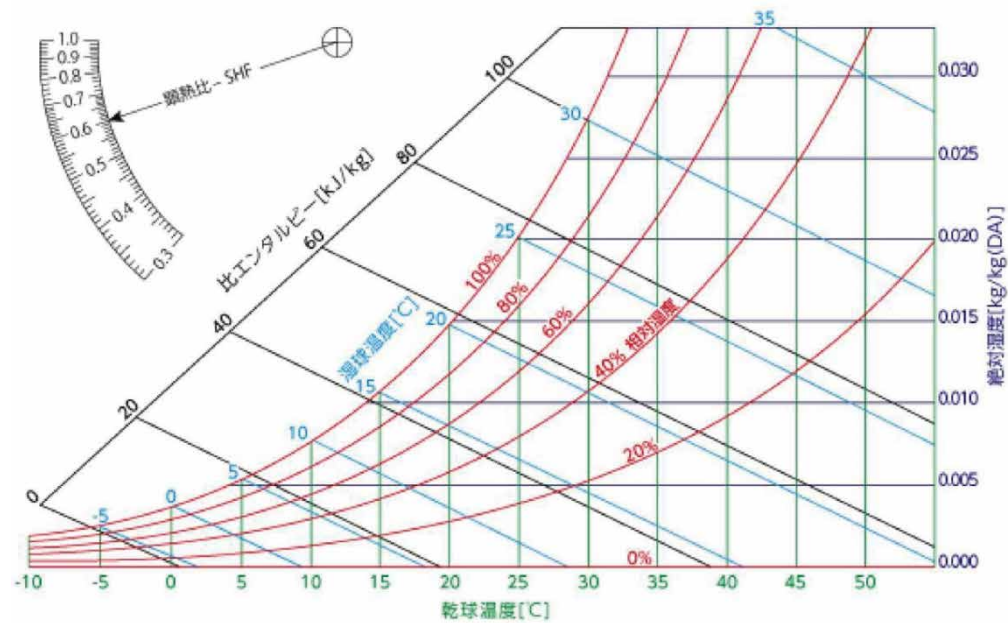
しかしながら、視点を骨材の乾燥後に転じると、骨材に蓄熱している有効エネルギーは入熱全体の**38%**足らずの顕熱のみで、残りの**47%**以上の潜熱は水蒸気のエンタルピーとして排ガスに随伴して排気している。このことから、エネルギー保存則が担保されている限り、水蒸気を大量に含む排ガスは、エネルギーの質（エクセルギー）が低く利用価値が限定的ではあるものの、秘めたる熱エネルギーを多く保持していることになる。このように、排ガスを顕熱のみで評価した場合、その無効エネルギーは、入熱全体の**10～15%**足らずであるが、水蒸気のエンタルピー（顕熱＋潜熱）を考慮に入れた場合、実に入熱全体のおよそ**60%**以上を排ガスとして廃棄していることになる。

カウンターフロー方式のVドライヤにおいては、排ガス温度

が100℃を下回って水蒸気の凝縮が起こる「**省エネルギー化の限界**」に達していることは既に触れた。ただ、10℃常温の骨材と100℃を少し下回る排ガスとの温度差は、90℃近く採ることができ熱交換の余地が十分に残されている。しかしながら、飽和水蒸気を大量に包含した100℃以下の排ガスと常温骨材との直接的な熱交換においては、熱移動と物質移動（水蒸気の凝縮）とが同じ空間で同時に起こることが熱交換、とりわけ、水分乾燥の阻害要因となっている。即ち、常温の骨材に排ガスからの熱移動が始まると同時に水蒸気の凝縮が始まって骨材の含水比が上昇することが熱効率の向上に大きな障壁となり、APの「**省エネルギー化の限界**」を招いているのである。

この骨材の含水比が上昇する現象は、カウンターフロー方式のVドライヤの骨材投入近傍で局部的に起こっている。排ガスの水蒸気分圧が大きくその露点温度が骨材温度よりも高い場合に骨材に付随するシルトや粘土などの比表面積が大きい細粒分から凝縮水で湿潤して行き、これらがドライヤ内壁へ付着成長して行くと言う弊害が実際のAPでも生じている。この付着の対策として、省エネルギー化とは逆行するものの排ガス温度を上昇させてドライヤ内壁温度を高めることが有効である。即ち、ドライヤ内壁温度が露点温度よりも高く、表面が凝縮水で濡れない限り付着が成長しないためである。

ここで、思考実験として、カウンターフロー方式のドライヤに関して、その長さを無限に伸ばした場合を考える。すると、ドライヤ内部の長手方向のどこかの位置で、排ガス温度、骨材温度、ドライヤ壁面温度、露点温度が同一温度となる平衡状態に至り、その温度は限りなく水蒸気分圧の飽和温度（常圧では100℃以下）に近づいて行くものと容易に推察することができる。排ガスと骨材との温度差がおよそ90℃近く採れるにも拘らず水蒸気の凝縮の影響を受けて、これ以上

図-7 湿り空気線図¹⁷⁾

の乾燥が進まなくなる主因である。

以上の思考実験から、骨材への熱移動と物質移動（水蒸気の凝縮）とが同一空間で同時に起こらないように、熱（顕熱＋凝縮潜熱）と凝縮水とを分離することが本砂乾燥システムの本質となる。言い換えると、水蒸気の凝縮潜熱により骨材を昇温するも、その含水比が増大しないように凝縮水を骨材から分離することが熱効率を向上させる上で最も重要な技術となる。

3.3 凝縮塔による廃熱回収と砂乾燥メカニズム

本砂乾燥システムは、水そのものを熱回収の媒体として利用する凝縮塔を装備している。同凝縮塔では、水を微粒化して極めて大きな熱交換面積を形成させると共に、これを排ガスと直に接触させることにより排ガスに含まれる水蒸気の凝縮潜熱を温水として回収している。

具体的には、凝縮塔に100℃を下回り飽和水蒸気を包含した排ガスを導入している。ただし、この排ガスは、図-6に示すPr砂ドライヤからの排ガスを集塵処理したものである。そして、排ガスを凝縮塔の上部の中心部から導入して下部で外周部に折り返して上方へ流すアップドラフト方式としている。上昇する排ガスに15℃前後の冷水を下部に向かって散水を行っている。この場合、上昇する排ガスと落下する水滴とは直交するカウンターフローとなる。

凝縮塔の内部では、雨の生成メカニズムと同じように、散水した水滴を核として排ガス中の水蒸気が凝縮しながら水滴が大きく成長し温度が上昇して行く。ここで、熱交換面積を増大させるために水滴の粒径を小さくする程、比表面積が増大して行くが、逆に水滴粒径が小さいと排ガスに随伴して飛散する割合が多くなる。このため、排ガスの密度、温度、速度

などに対して最適な水滴粒径の範囲が存在する。このようにして、水を熱交換の媒体として利用することで従来の課題であった熱移動と物質移動（水蒸気の凝縮）が同空間で同時に起こることを回避している。

次に、凝縮塔で回収した約80℃の温水を温風生成用の熱交換器に導入し、15℃、相対湿度50%RHの空気を70℃の温風にまで昇温している。このことにより、温風の相対湿度は2.7%RHまで低下し、ヘアードライヤや衣類乾燥機と同様の乾燥能力を有することになる。

ここで、規模感を把握するために具体例を挙げると、本砂乾燥システムでPr砂ドライヤに毎時30トンの湿潤砂を供給し、その排ガスから回収する凝縮潜熱を利用して、Se砂ドライヤで毎時20トンの湿潤砂を乾燥することを想定する。ここで、1 Nm³の70℃、湿度2.7%RHの温風が砂と熱交換を行い30℃の排ガスに至るまでの温度差40℃で利用することができる熱エネルギーは、水20gを蒸発させる程度に過ぎない。そして、30℃排ガスの湿度は、およそ80%RHまで上昇することになる。このことから、Se砂ドライヤの乾燥能力を毎時20トン、含水比の低減を10%とすると、時間当たり2,000kg/h（33.3 kg/min）の水を蒸発させる温風が必要となり、その量は10万Nm³/h（1,667 Nm³/min）となる。

このようにして、本砂乾燥システムでは、APで熱移動と物質移動とが同時に進行するために乾燥に有効利用することができなかった水蒸気の凝縮潜熱を回収利用することにより、従来比で投入エネルギー当たり1.67倍の乾燥能力を有する砂乾燥システムを構築することが可能となる。

3.4 不凝縮ガスの低減（侵入空気の削減）

水蒸気の凝縮潜熱を凝縮塔で温水として回収する場合、その露点温度は図-7¹⁷⁾に示す通り排ガス中の水蒸気分圧（右側縦軸：絶対湿度）と相対湿度100%の交点の乾球温度（横軸）で決定される。即ち、排ガスは、不凝縮ガスの窒素（N₂）、酸素（O₂）、二酸化炭素（CO₂）などを含んでおり、これらの不凝縮ガスの分圧と水蒸気分圧との比率により、常圧下における水蒸気の露点温度が決定するのである。このことから、水蒸気分圧を高めるほど露点温度が上昇して高い温度の温水を回収することができ、凝縮潜熱の回収効率が向上する。

仮に、不凝縮ガスの混入がゼロであれば、常圧下での水蒸気の露点温度が100℃まで上昇し、凝縮潜熱を高効率で回収することができる。因みに、火力発電所などにおける蒸気タービンを駆動する水蒸気は、不凝縮ガスを含まない水蒸気が100%の状態 で用いられており、この水蒸気を復水器で100℃以下に冷却することで大気圧を下回る圧力（負圧）となり、蒸気タービンの背圧を下げた発電効率を高めることに有効利用されている。

以上のことを踏まえた上で、この露点温度を上昇させるために図-4に示すPr砂ドライヤの侵入空気量とバーナ燃焼の過剰空気量とを徹底的に削減して、不凝縮ガスであるN₂、O₂、CO₂の分圧を減じることと、次節の「3.5 乾燥砂の残留水分」で詳細に触れるが、砂の水分蒸発のみに熱エネルギーを消費することが重要な技術要件となる。

バーナ燃焼空気の削減に関しては、温度や圧力に応じて空気密度が変動することから、燃焼空気の温度補正と圧力補正を加味した上で燃焼量に応じた燃焼空気量の制御が重要となる。本砂乾燥システムでは、燃油流量と燃焼空気流量とを常時フィードバック制御することにより、バーナの最適な低空気比燃焼を実現している。因みに、コンベンショナルなバーナでは、夏季と冬季とで外気温が30℃以上異なるが、夏季の空気量で燃焼空気比を調整するのが一般的である。このために、冬季で外気温が下がると空気密度が高まり過剰の燃焼空気量で燃焼することになる。夏季と冬季とで外気に30℃の温度差があると、空気密度は約10%冬季が大きく、過剰空気量が10%増大することになる。このことから、排ガス量が増大することとなり、熱効率と水蒸気分圧とが低下する。さらに、バーナ燃焼に予熱空気を利用することにより、燃焼温度を高めて燃焼排ガス量を減じること、熱効率と水蒸気分圧とを高める有効な手段となる。

ドライヤからの侵入空気の削減に関しては、ドライヤの前後に位置する摺動部のシール機構を工夫して密閉性を高めていることと、ドライヤ内部圧力（静圧）と外気圧との差圧をゼロに近づける静圧コントロールにより行っている。Pr砂ドライヤのバルクヘッドに微差圧計を装備し、ドライヤ内部の静圧と外

気との差圧がゼロに近づくように、排風機の誘引量をフィードバック制御している。

以上の技術を採用することにより、本砂乾燥システムのPr砂ドライヤの排ガス中の水蒸気分圧をおよそ50%以上に高めて凝縮塔では、およそ80℃の温水を回収している。このことに対して、一般的なAPの排ガス中の水蒸気分圧は、10～15%と低い。これは、ドライヤからの侵入空気、バーナ燃焼の過剰空気、水の蒸発以外に骨材の加熱に必要な熱エネルギーを供給する必要があるため、その熱量に相当する燃料を燃焼させることにより、燃焼排ガス量が増大し水蒸気分圧が低下することに起因している。即ち、骨材の乾燥加熱過程で水の蒸発が完了した骨材を加熱する場合の燃焼排ガスは、水蒸気量が不変でN₂、O₂、CO₂などの不凝縮ガスのみが増加して行くことになる。

具体的には、ドライヤへの侵入空気量、バーナの空気比、砂からの水蒸気量が一定である場合、水の蒸発を伴わない乾燥した骨材の加熱（顕熱）では、化石燃料の水素含有量に応じて燃焼排ガス中の水蒸気が供給されるのみである。即ち、燃焼空気には、燃焼に関与しない窒素（N₂）が79%を占めており、メタン（CH₄）を1 Nm³燃焼させた場合、空気中の2 Nm³の酸素（O₂）を消費し、1 Nm³の二酸化炭素（CO₂）と2 Nm³の水（H₂O）が生成する。このとき、燃焼に関与しない7.5 Nm³の窒素（N₂）が介在する。したがって、理論上10.5 Nm³の燃焼ガスが生じ、CO₂濃度は、9.5%、水蒸気濃度は、19%となる。そして、この理論燃焼ガスに過剰燃焼空気や侵入空気が加わることで水蒸気分圧はさらに低下するのである。

3.5 乾燥砂の残留水分

凝縮潜熱の回収効率を引き上げるためには、排ガス中の水蒸気分圧を最大限に高めることが重要であり、そのためにも侵入空気やバーナ燃焼の過剰空気を削減して不凝縮ガス濃度（分圧）を低減することが重要であることは前節で触れた通りである。その上で、本砂乾燥システムの乾燥プロセスで砂の水分を残留させることが省エネルギー化と稼働率の向上に大きな意味を持つ。即ち、APでの乾燥加熱プロセスと同様に、砂を100℃以上に加熱して絶乾状態にするのではなく、砂ドライヤから排出する乾燥砂の残留水分を取って5%程度とすることにより、以下に述べる三つの効果を狙う。

1つ目は、前節でも触れた通り、水分の蒸発のみに熱エネルギーを消費することが重要となる。排ガスの水蒸気分圧は、砂から蒸発した水蒸気が排ガスの一部として取り込まれることにより上昇する。そして、砂の水分を残留させることにより、ドライヤ内部では砂に供給される熱エネルギーと水の蒸発で消費される熱エネルギーとがバランスして砂の温度変化を伴わない定率乾燥の状態となる。このようにして、供給される熱

エネルギー全てを水の蒸発のみに利用することで排ガスの水蒸気分圧を高めることが可能となる。

ただし、水の蒸発を伴わない乾いた砂の加熱に熱エネルギーを消費する場合には、燃焼ガスの水蒸気分圧は燃料と空気比とに依存しその値は小さくなる。このことは、バーナで燃料が燃焼する場合に生成する燃焼ガスの水蒸気分圧が燃焼量には関係なく燃料の種類と空気比（過剰燃焼空気量）とで決定されるためである。そして、燃料の種類は、炭素と水素の構成比率で水蒸気分圧が決定され、メタンガスである天然ガスが最も水蒸気分圧が高くなる。

3.1節でも触れたが、Pr、Se砂ドライヤ共にカウンターフローよりも熱効率に劣るパラレルフロー方式を取えて採用している。これは、両者の砂ドライヤ共に砂の排出側で水分を残留させるためである。同排出側では、砂と排ガスとの温度差が最も小さく、かつ、排ガスの湿度が高まっていることから砂からの水分蒸発が緩慢となり、カウンターフロー方式よりも残留水分のコントロールが容易となる。

2つ目は、ドライヤから排出した砂を外気に晒すことにより、残留水分を蒸発させて砂の温度を外気温よりも低い湿球温度にまで下げることができる。例えば、砂の比熱を**0.837 kJ/kg℃**、水の潜熱を**2.629 MJ/kg**とすると、砂の顕熱変化が**30℃**に相当する熱エネルギー（**30℃×0.837 kJ/kg℃=25.116 kcal/kg**）と含水比1%の気化潜熱（**0.01×2.629 MJ/kg=26.288 kJ/kg**）にはほぼ匹敵する。このことから、ドライヤ内部での定率乾燥における砂の温度が外気温度よりも上昇していたとしても、湿度の低い外気に晒すことで、残留水分の蒸発潜熱により速やかに砂の含水比が低下し、その結果として、砂の温度を外気の湿球温度にまで下げることができる。例えば、**15℃、50%RH**の空気の湿球温度は**10℃**であるので、この温度まで砂が保有していた顕熱を水の蒸発に利用して、含水比を低減することができるのである。このことに反して、乾燥状態の砂を外気温よりも高温でドライヤから排出すると、無駄に熱を放散して外気温度まで低下するだけである。

3つ目は、砂の残留水分を**5%程度**とすることで、防塵対策として有効となる。往々にして、合材の原材料である砂を始めとする骨材は、ショベルローダー、ダンプ、ベルコン等で搬送するのが一般的で、ダンプへの積み替えやベルコンの交点で粉塵の発生が伴う。このことから、砂に水分を残留させることは作業環境を含めた環境負荷低減に寄与することができる。

以上のことから、ドライヤから排出した砂の残留水分を**5%程度**にコントロールすることにより、排ガスの水蒸気分圧を上昇させること、砂の顕熱を水分の蒸発で消費して残留水分を低減させること、防塵対策としての有効性などの効果が期待される。さらに、雨養生が必要ではあるが乾燥砂を長

期にわたり貯留することができるので、APの運用に影響を受けることなく連続して本砂乾燥システムを運用することが可能となる。

4.砂乾燥システムのビジネスモデルとその効果

4.1 マクロ的視座

一般社団法人日本アスファルト合材協会の統計によると、全国の合材製造量はピークのバブル期から半減し**3,800**万トン前後を推移していることは第1章でも触れている¹⁾。その一方で、道路のリプレースにおいて、老朽化したアスファルト舗装を打ち換えるときに発生するアスコンガラは、建設リサイクル法により特定建設廃棄物の指定を受けている。そして、一定要件を満たすアスコンガラはこの法律に基づいてリサイクルすることが義務付けられている。国土交通省の令和4年度の統計資料によると、年間発生しているアスコンガラの総量は約**2,128**万トンに上り、この内の約**7割**に相当する**1,500**万トンがR合材として再利用されており、残りの**630**万トンは、路盤材として有効利用さている。このように、アスコンガラは、そのリサイクル率が近年では安定して**99.5%**以上を推移しており、資源の有効利用並びに循環型社会の構築に最も則した建設資源であると言える¹⁸⁾。

以上のことから、合材製造量全体に占めるR材混入率は平均して**39%強**（**1,500**万トン／**3,800**万トン）であると推定される。このことを前提として新規骨材に視点を転じると、年間合材製造量**3,800**万トンの内、**61%**の約**2,300**万トンは新規骨材を使用しているものと推測される。そして、この内の約**30%**が細骨材の砂であると見積もられ、その量は**690**万トンに上る。

一方、経済産業省の統計資料によると、全国に碎石工場が約**2,400**ヶ所存在し、コンクリート用および合材用の骨材を供給しており、その総製造量は、**1億6,000**万トンに上っている¹⁹⁾。特に、自然由来の川砂や海砂などは、環境保護の観点から調達が極めて困難となっており、碎石工場で人工的に製造される砕砂がその主流を占めるようになっている。これらの砂は、比表面積が大きいことから高含水比であり、所定の品質を担保するためにシルトや粘土を水洗で除去していることがその主因である。そして、これらの砂の含水比が**12～15%**であることから、マクロ的に**82.8～103.5**万トンの水を除去するためにAPで化石燃料を消費していることになる。加えて、APの熱効率が**80%**とすると、水**1kg**を蒸発させるのに**0.1**リットルのA重油を消費し**0.25 kg**のCO₂を発生させている。ことから、マクロ的には**8.28～10.35**万キロリットルのA重油を消費し、**20.7～25.9**万トンのCO₂を発生させている計算となる。

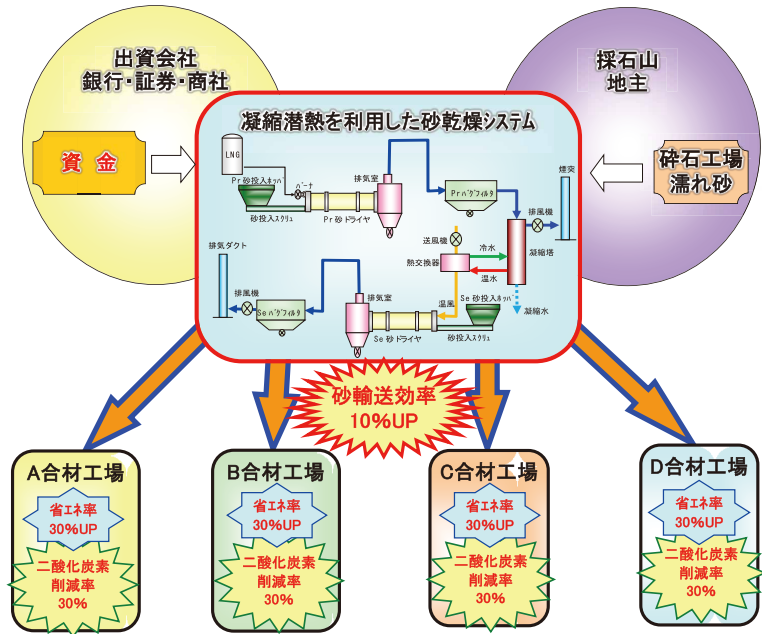


図-8 砂乾燥ビジネスモデル¹⁾

4.2 ビジネスモデル

APの省エネルギー化とCO₂削減の障壁となっている「**省エネルギー化の限界**」と「**稼働率向上の限界**」を解決する手段として、今まで述べてきた砂乾燥システムを砂サプライチェーンである碎石工場に導入し、乾燥砂を製造して複数のAPに供給する仕組みを新たなビジネスモデルとして検討する。

たとえば、図-8¹⁾に示すように本砂乾燥システムを碎石工場内に設置し、APの間欠運転に影響を受けることなく安定的に連続稼働させることによって生産性を向上させると共に、上記で述べた排ガス中水蒸気の凝縮潜熱を砂の乾燥に有効利用することにより、極めて大きな省エネルギー化とCO₂削減効果を達成することが可能となる。加えて、乾燥砂を碎石工場から複数のAPに供給する輸送効率に関しても、10%の水分除去によりダンプ輸送効率が単純に10%改善され、生産性とCO₂削減に相乗的に寄与することが期待される。

具体的な砂乾燥システムのビジネスモデルとしては、年間**30**万トン規模の乾燥砂を製造する砂乾燥システム（含水比**10%**低減、稼働**6,000**時間/年、乾燥能力**50**トン/h、CO₂削減**4,000t-CO₂/年**、熱効率**150%**（LHV）、重油換算**1,400kL**削減）を、全国**10**ヶ所の碎石工場へ導入し、年間の乾燥砂製造量**300**万トンを目指す。このことにより、**4万t-CO₂/年**のCO₂削減効果と省エネルギー化による燃料費削減効果**14,000kL**（経済合理性）が創出される。

さらに、本砂乾燥システムで含水比を**10%**低減した乾燥砂を年間**300**万トン製造することで、この乾燥砂の輸送に携

わる延べ**30**万台に上るダンプの輸送効率を**10%**改善できることが見込まれる。即ち、従来はダンプ**3**万台分（**30**万トン）に相当する水を余分に運んでいたことになり、この分と引き換えに**30万t**の砂を多く運ぶことが可能となる。ダンプの燃費を**3.0L/km**、砂の輸送距離を平均**20km/台**と仮定すると、**3.0L/km×20km/台×3万台/年=1,800 kL/年**の燃料である軽油を削減し、軽油のCO₂排出係数を**2.6kg-CO₂/L**とすると、年間のCO₂削減量は、**1,800kL/年×2.6 kg-CO₂/L=4,680t-CO₂/年**と見積もられる。ところで、本砂乾燥システムを個々のAPに併設して、骨材の予備乾燥を行うことも可能であるが、水蒸気分圧が**10～15%**と低いAPの排ガスでは、露点温度が**50～60℃**と低くなり、常温空気と熱交換すると**40～50℃**の温風しか取り出すことができないことや、APの年間稼働時間が**1,000～1,500**時間/年と極めて低く間欠運転が多用されることなどから、その経済合理性を見出すのが極めて困難となる。

ゆえに、個々のAPに本砂乾燥システムを増設するのではなく、骨材のサプライチェーンの上流側である碎石工場内に本砂乾燥システムを設置し、稼働時間を**6,000**時間/年まで高めることで経済合理性と環境適応性との最適化をはかることが可能であると考えられる。

以上のように、稼働率が極めて低く、省エネルギー化の改善の余地が殆ど残されていないAPに対して、本砂乾燥システムで製造した乾燥砂を供給することにより、APの稼働率の改善や省エネルギー化に必要な設備増設（投資）を行わずして、**30%**近くの省エネルギー化とCO₂削減の効果を飛躍的に高めることを可能としている。

表-1 省エネルギー化とCO₂削減効果の比較

方 式	従来システム	本砂乾燥システム
砂乾燥能力 Primary ドライヤ	50.0 t/h	30.0 t/t
砂乾燥能力 Secondary ドライヤ	-	20.0 t/h
TOTAL 砂乾燥能力 ※含水比 10%削減	50.0 t/h	50.0 t/h
燃料消費量 LNG	471.3 Nm ³ /h	250.8 Nm ³ /h
総合熱効率 ※LHV 基準	80.0 %	150.6 %
省エネルギー化率 ※ベンチマーク基準	0 %	88 %
燃料由来 CO ₂ 発生量	923.7 kg/h	491.6 kg/h
電力由来 CO ₂ 発生量	35.0 kg/h	80.0 kg/h
TOTAL CO ₂ 発生量	958.7 kg/h	571.6 kg/h
CO ₂ 削減率 ※ベンチマーク基準	0 %	40 %

4.3 稼働率の向上

APは、合材の製造能力とその出荷量や出荷タイミングのミスマッチ等により間欠運転が多用されている。そして、起動時の予熱に多くの熱エネルギーを消費し、多くのCO₂を排出している。予熱は、ドライヤを始めとする煙道やバグフィルタへの水蒸気の凝縮を未然に防ぎ腐食の進行を抑制すると共に、一早く加熱骨材温度の安定化をはかるためには必要不可欠なプロセスである。このようにして、APの間欠運転が繰り返されることにより、折角ドライヤやバグフィルタに蓄熱された熱エネルギーが無駄に大気放散していることは否めない。APで間欠運転が多用されるのは、合材の温度が低下しない時間内にダンプ輸送し舗装施工を完了させる必要があり、APはこのことを補完する形で全国に分散配置されてきたこと、さらには、ダンプへの積載時間短縮の要請に答えるためにAPを大型化し、合材の製造能力を増大することにより瞬発力を求めたことなどがAPの稼働率を大きく引き下げている要因であることは第2章でも触れた通りである。

このため、骨材で最も高含水比でエネルギーを多く消費する砂の乾燥においても、従来システムでは稼働率が極めて低調なAPでそのプロセスが行われている。いくら定常運転時における熱効率が85%を上回っていたとしても、間欠運転が多用されることによりエネルギーロスが多くなり総合的な熱効率が大きく阻害されていることは否めない。

このことから脱却するために、高含水比な砂の乾燥をAPから切り離しサプライチェーンで砂を単独で乾燥することにフォーカスしている。そして、少量の水分を残留させた乾燥砂を製造することで、砂の顕熱が残留水分の蒸発に消費され外気温よりも低い湿球温度まで低下する。この原理により、砂の顕熱放散によるエネルギーロスを削減し、雨養生は必要であるものの乾燥砂の長期貯蔵、長距離輸送を可能としている。

このようにして、稼働率向上の阻害要因を取り除くことによ

り本砂乾燥システムを連続運転することが可能となり、最もエネルギーを消費する砂の乾燥プロセスをAPの間欠運転の影響を受けることなく遂行でき、間欠運用によるエネルギーロスと生産性の低下を回避させている。

そして、本砂乾燥システムで製造した乾燥砂を複数のAPに供給することにより、たとえ、合材製造量が少ない閑散期においてAPの間欠運用が多用されたとしても、間接的に省エネルギー化とCO₂削減を実現することを可能としている。

4.4 省エネルギー化とCO₂削減

本砂乾燥システムを砂のサプライチェーン途上に組み込み、APの「**省エネルギー化の限界**」と「**稼働率向上の限界**」に対峙して行く必要があることは既に述べた通りである。

省エネルギー化に関しては、APの従来技術（経済合理性、法規制、社会通念、既成概念などによる制約）で踏み込むことができなかった排ガスからの水蒸気潜熱の回収にフォーカスしアプローチしている。繰り返しになるが、排ガス中の水蒸気分圧を増大させて水蒸気潜熱の回収効率を高めるために、高含水比な砂の乾燥に特化すると共に、燃焼空気と侵入空気を厳格に管理して不凝縮ガスの分圧を下げている。さらに、乾燥後の砂からの放散熱によるエネルギーロスをなくすために、水分を少し残した状態で砂を乾燥している。このことにより、砂に供給された熱エネルギーの殆どを水分蒸発で消費することができる。そして、回収した水蒸気潜熱を新たな熱媒体である常温空気に移動させて温風を生成し、これを新たな砂乾燥に利用している。

表-1は、従来システムをベンチマークとし、本砂乾燥システムとの比較を行ったものである。ここで、砂の乾燥能力を50トン/h、含水比の削減幅を10%、ベンチマークの熱効率を80%としている。表より、省エネルギー化に関しては、その熱効率がベンチマークの70%増である150%（LHV）となっている。これは、Pr砂ドライヤで発生した水蒸気を回収して温風を生成し、Se砂ドライヤで新たな砂を乾燥していること

に起因している。言い換えると、砂30トン/hの含水比を10%削減するのに必要な燃料（熱エネルギー）で、砂20トン/hを乾燥することを可能にしている。

つぎに、本砂乾燥システムのCO₂削減効果に関しては、ベンチマークである従来システムの40%のCO₂削減を達成している。加えて、表-1に示す全てのシステムでLNGを燃料としたときのCO₂排出量を示している。APで最も多く使用されているA重油での比較を行うと、ベンチマークで19%、本砂乾燥システムでは実に52%のCO₂を削減していることになる。

5. おわりに

18世紀の中期にあたる1750年ごろからイギリスで始まった産業革命までは、人類はバイオマス燃料である薪などを燃料として利用していた。現在と比べれば決して生産性は高くないが、自然との調和が保たれ、必要なものを必要な時に必要な量だけ使用する地産地消に即した生産活動を行っていた。このことにより、大気中のCO₂濃度は280ppm前後でバランスしていたことが知られている。

やがて、産業革命を経て蒸気機関などが普及することにより、国内の森林資源を燃料として使い果たしてしまった人類は、これまでは採掘や燃焼が困難であった化石燃料の石炭を新たな燃料として合理的に利用する技術を開発するに至る。薪に比べてエネルギー密度が格段に高い石炭を燃料として使用することにより、産業活動が加速度的に向上して行くと共に、CO₂の排出量も急激に増大して行った。また、1906年のハーバーボッシュ法によるアンモニアの工業生産の開始により、これを原料とする化学肥料の生産量が増大し食糧事情が大きく改善して行く。1800年に10億人足らずであった世界人口が2000年までの200年間で8倍の80億人へと人口爆発をもたらしたことも大気中CO₂濃度の増大要因として挙げることができる。

さらに、追い打ちを掛けるようにして、1914～1918年と1939～1945年の二度に渡る世界大戦を経ることにより、より便利でエネルギー密度の高い安価な液体燃料である石油を求めて油田探索と油井開発が大手石油メジャーの手により精力的に進められた。そして、石油を原料とする石油製品や石油化学製品の開発が進み、これを湯水の如く使用して、一握りの先進国の人々が豊かな生活を求めて、大量生産、大量消費、大量廃棄の時代を容認し続けたあげくの果てに、大気中のCO₂濃度を420ppmまで高めてしまった。このことにより、地球温暖化に伴う異常気象、生態系への影響による種の絶滅などの弊害が起りつつある。我々人類が、このままのペースで化石燃料の使用を続けて経済発展を続けると、今世紀末には大気中のCO₂濃度が800ppmを超え、地球の平均気温が4.8℃上昇するとIPCCが警鐘を鳴らしている。さらに、石油製

品であるプラスチックごみが海洋に流れ出し、マイクロプラスチックとして生態系に影響を与え国際問題にまで発展してきている。

一方、エネルギー資源を持たない我が国は、高度経済成長を経て1973年と1979年の二度に渡るオイル危機を経験している。このオイル危機が発端になり、10倍以上に跳ね上がった原油価格の影響を緩和させるべく省エネルギー化の波が一気に押し寄せてきた。特に、産業部門における省エネルギー化の躍進には目を見張るものがあり鉄鋼やガラス産業においては、エネルギー消費量を増大させることなくその生産性の拡大を達成している。国を上げてこれらの省エネルギー化に取り組んできたことにより、先進国の中で我が国はGDPに占めるエネルギー消費量が世界最小を達成している。

同様にしてAPにおいても、新たな省エネルギー技術を積極的に取り入れて経済合理性の追求とCO₂排出量削減との両立に取り組んでいる。そして当社は、AP製造メーカーとして、地球環境の変化、社会の趨勢、経済動向などに敏感に反応し、タイムリーに新技術の開発を行うと共に、お客様にご提案を行える風土と文化を育んで行きたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) アスファルト合材協会：アスファルト合材製造数量推移(全国), http://www.jam-a.or.jp/images/activity/act02/act02_suii_202408.pdf
- 2) 蓬萊秀人：アスファルトプラントにおける二酸化炭素排出量削減技術の変遷と展望, NIKKO TECHNICAL REPORT 2022, No.3, pp.7-32, 2022.
- 3) 西川辰男：アスファルトプラントにおける新しい計量システムと低公害システム, 産業機械, No.304, pp.39-41, 1976.
- 4) 西川辰男：これからの合材販売用アスファルトプラント, 産業機械, No.333, pp.29-32, 1998.
- 5) 岸田正男：ヨーロッパ輸出アスファルトプラント, 産業機械, No.385, pp.11-13, 1982.
- 6) 田島 修：最新のバッチ式アスファルトプラント, 建設機械, Vol.20, No.5, pp.24-30, 1984.
- 7) 西尾勝彦：小型アスファルトプラント ATOMシリーズ, 産業機械, No.429, pp.30-32, 1986.
- 8) 高井照治：アスファルトプラント, 産業機械, No.467, pp.49-51, 1989.
- 9) 高山 清：アスファルトプラントからの舗装の品質管理への取り組み, 舗装, Vol.28, No.7, pp.33-36, 1993.
- 10) 西川辰男, 井手上宏：アスファルトプラント専用合材サイロ, 産業機械, No.335, pp.54-56, 1978.
- 11) 井手上宏：アスファルト貯蔵供給システム, 産業機械, No.359, pp.8-10, 1980.

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

高強度コンクリートの練混ぜ過程における条件 およびアルミネート相の増量がスランブフローに与える影響

小林 皆也¹・川崎 佑磨²・坂本 恭裕³・福山 智子⁴

要旨:我が国における高強度コンクリートの施工事例の増加が見込まれており、製造技術も対応していく必要がある。高強度コンクリートの流動性は、同一配合・同一環境でも、練混ぜ条件によって大きく異なる場合がある。既往研究では、練混ぜ過程において、表面水を持つ細骨材とセメントを練混ぜ初期に混練する空練りに着目し、空練りによって流動性に差異が生じることを確認している。本研究ではその練混ぜ過程の中でも、セメント成分の違いに着目し、流動性への影響について確認した。その結果、混和剤を先行吸着するアルミネート相の見掛け上の比表面積が空練りにより減少し、スランブフローに差が生じることを確認した。

キーワード:高強度コンクリート、空練り、混和剤、先行吸着、アルミネート相

1. はじめに

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

その中で、近年の自然災害の激甚化・頻発化等を踏まえ、防災・減災やインフラ老朽化対策等の国土強靱化といった政策から、今後、高強度コンクリートの施工は増加すると考えられる。また、日本全体の人口減少や建設業界における担い手不足といった問題から、工期削減などに伴い、プレキャストコンクリート製品の利用が促進されると予想する。さらに、**JIS A 5308**の改正(2019)における趣旨にも、高強度コンクリートの利用を推進するためと明記されている¹⁾。

このような背景から、高強度コンクリートの施工数はさらに増加し、施工技術だけではなく、パッチャープラントでの製造においても、その対応が求められる。一方で、練混ぜ条件がコンクリートの流動性に影響を与えることも知られており、その原因の一つとしてセメントに対する混和剤の吸着が挙げられている^{2), 3)}。セメント量が多くなる高強度コンクリートでは、通常のコンクリートよりもその影響が大きくなる。しかし、高強度コンクリートを対象とした配合において、上記影響の程度やメカニズムの解明を試みた事例は少ない。練混ぜ条件に伴う流動性の相違の解明は、今後の高強度コンクリートの安定的な供給に寄与できると考える。

既報として、空練り(練混ぜ初期における表面水を持つ細骨材とセメントの練混ぜ)を行うことで、スランブフローに差異が生じることが報告されている^{2), 3)}。また、練混ぜ過程で空練りを行うことでスランブフローが変化する現象に対して、セメントと表面水の水和反応で生じるセメント粒子のフロック形成や液相中に残存する混和剤量という要因が影響していることも報告されている。しかし、セメントの種類によっては比表面積や化学成分が異なるため、スランブフローに対して空練りが及ぼす影響はすべてのセメントで一様であるかは不明である。

そこで本報では、異なるセメントで複数の実験を実施し、空練りによるスランブフロー、混和剤残存量への影響を検討した。また、既往の研究でも重要な指標であった細骨材の表面水や混和剤に着目し、混和剤吸着の化学的考察も加えて、空練りでスランブフローに差異が生じる過程について考察した。

2. 既往研究における練混ぜ過程

既往研究の高強度コンクリート配合において、表面水を持つ細骨材を用いる際、空練りを行うことで、スランブフローが増加することを確認している^{2), 3)}。

また、空練りによるスランブフローの増加は、セメント粒子のフロック形成が要因であると推定されている。**図－1**に現状考えられる練混ぜ過程を示す。本研究で想定している空練りによる流動性向上の仕組みは以下の順序で説明される。

A) 空練り段階

細骨材の持つ表面水とセメント粒子が水和反応を開始する。水和反応が始まったセメント粒子は電荷が不安定となり、電氣的に安定した状態になるために粒子同士が凝集し、フロックが形成される。

B) モルタル練り段階

混和剤を含む水を投入するとフロックの表面に混和剤が吸着する(以後、先行吸着)が、それ以外の混和剤は液相中に残存する。

C) コンクリート練り段階

投入された粗骨材との接触によってフロックが崩壊し、未水和のセメント面が暴露する。**B**でも少なからず細骨材接触による吸着面の露呈が起こっているが、**C**では粗骨材接触のせん断力で顕著化する。

D) 練混ぜ完了時

崩壊したフロックの未水和セメント部に液相中に残存した混和剤が吸着する(以後、後吸着)。

練混ぜ後の流動性を維持するには、**D**で十分な混和剤が残存し、後吸着時点で未水和のセメント表面に新たに吸着できる余剰混和剤が必要である。また、空練り時間が長くなるほどセメント粒子が凝集し、**A**で形成されるフロック比表面積は小さくなる。したがって空練り時間が長いほど**B**で先行吸着する混和剤が少なくなり、**D**で後吸着する混和剤が十分残存するためスランブフローが増加する傾向を得ている(以後、空練り効果)²⁾

しかし、**1**章でも述べたように現状の練混ぜ過程ではセメントの比表面積、セメント成分の影響などによる差が考慮できないため以降の章で検討した。

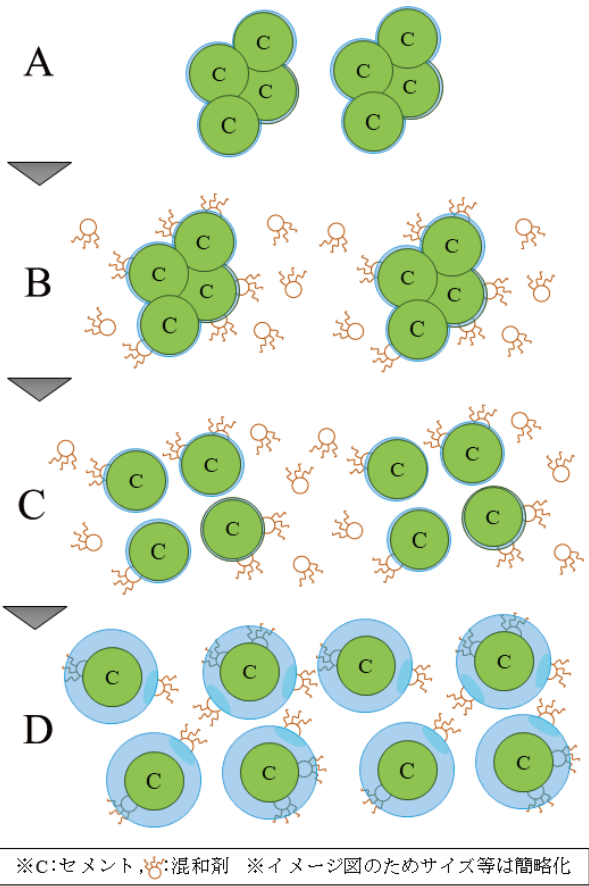
3. 実験概要

3.1 使用材料

本研究において対象とした設計基準強度80N/mm²の高強度コンクリート配合の一例を**表－1**に示す。混和剤添加量は各試験日当日に、コンクリート配合で行った予備試験の結果から、配合調整を行った値に設定した。使用材料を**表－2**に示す。セメントは低熱セメント(**L**)、中庸熱セメント(**M**)、普通セメント(**N**)、早強セメント(**H**)の**4**種類を使用した。各セメントの化学成分と比表面積を**表－3**に示す。混和剤は単位セメント量に対して添加した。空練り効果は細骨材が持つ表面水とセメント粒子の反応によって引き起こされるものと考えるため、本研究では既往研究^{2), 3)}と同様に、細骨材の表面水率を**3%**に統一して実験を行った。

表－1 高強度コンクリート(80-60-20L)の配合

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



図－1 考えられる練混ぜ過程

表－2 使用材料

材料	種類及び品質
細骨材 <i>S</i>	砕砂 岩種：安山岩 表乾密度：2.54g/cm ³
粗骨材 <i>G</i>	碎石 岩種：安山岩 表乾密度：2.67g/cm ³
混和剤 <i>Pc</i>	高性能減水剤 主成分：ポリカルボン酸系化合物

*1 立命館大学 理工学研究科 環境都市専攻 (学生会員)
 *2 立命館大学 理工学部 環境都市工学科 准教授 博士(工学) (正会員)
 *3 日工(株) 技術本部 開発部 (正会員)
 *4 立命館大学 理工学部 建築都市デザイン学科 准教授 博士(工学) (正会員)

表－3 各セメントの化学成分と比表面積

セメント種類	化学成分(%)				比表面積(cm²/g)
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	
低熱ポルトランドセメント (L)	27	55	2	9	3130
中庸熱ポルトランドセメント (M)	43	36	4	13	3120
普通ポルトランドセメント (N)	56	18	9	9	3320
早強ポルトランドセメント (H)	63	12	9	8	4350

3.2 練混ぜ手順

練混ぜには二軸強制練りミキサ(容量**60L**)を使用し、練り量は**36L**とした。図－2に練混ぜ手順を示す。練り時間は細骨材、セメント、水、混和剤までのモルタル練りを**7分**、粗骨材投入後のコンクリート練りを**3分**、計**10分**間の練混ぜを行った。モルタル練り後にモルタルフローを測定、コンクリート練り後にスランプフローを測定した。各練混ぜにおいて、空練りの時間は**0s**、**30s**、**90s**のいずれかで行うが、空練り時間はモルタル練りの時間を含むため、合計の練混ぜ時間は変化しないものとした。試験環境については温度**20±2℃**、湿度**50%**以上の一定環境下の室内で実験を行った。

3.3 混和剤残存量の測定

5章では、図－1Bの後(粗骨材投入前)に、モルタル試料の混和剤残存量の測定を行った。測定は遠心分離機を用いてモルタル試料を液相と固相に分離し、抽出した液相を熱分析(TG/DTA)にかけ、混和剤の有効成分が燃焼する温度帯での重量変化から液相中の混和剤残存量を算出した。測定は**6**回行い、平均値を比較した。

4. セメント種類が空練り効果に及ぼす影響

2章の既往研究では、セメント粒子の物理的特性に着目し、ブロック形成による比表面積の減少から空練りによる流動性向上の過程を示した。そこで本章では、化学的特性として、セメント種類が空練り効果に対してどのような影響を及ぼすかについての実験を行った。材料や練混ぜ手順については前項で示した実験条件で実施した。

4.1 セメント比表面積の影響

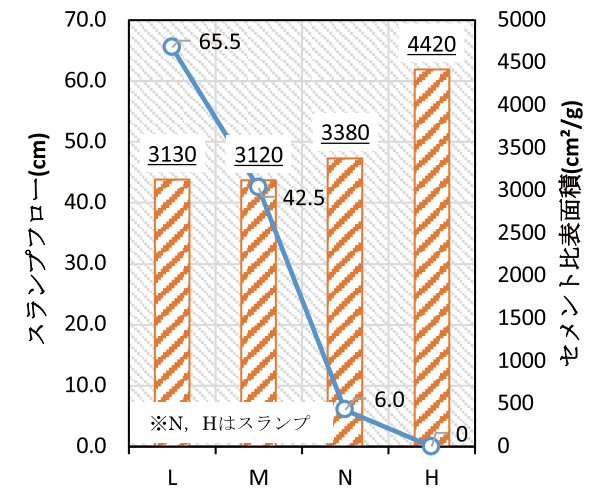
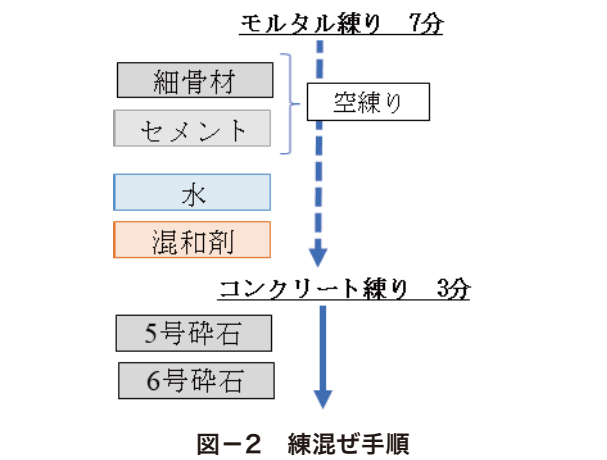
(1) 実験の概要

比表面積の異なるセメント**4種(L, M, N, H)**を用いて、各種セメントのスランプフローと比表面積の関係を検討した。セメント比表面積の影響を確認するため、混和剤添加量**0.65%**、空練り時間**30s**に統一し実施した。また、セメントの種類ごとに密度が異なるため、総容積が変動するが**L, M, N**については影響が小さいと考え、容積変動は考慮しないこととした。

(2) 結果と考察

各セメントにおけるスランプフローの結果を図－3に示す。低熱セメント(**L**)、中庸熱セメント(**M**)、普通セメント(**N**)は比表面積が同等だが、スランプフローは、低熱セメント(**L**)を基準とすると中庸熱セメント(**M**)は**23.0cm**減、普通セメント(**N**)はスランプフローが測定できず、スランプ**6cm**となった。比表面積が同等でもフローが大きく違うことから、セメント成分にも影響を大きく受けることが想定される。

また、早強セメント(**H**)は比表面積が他のセメントと比べて約**1000cm²/g**大きいため、先行吸着で多くの混和剤が使用され、後吸着のための混和剤が不足しスランプが生じなかったと考えられる。



図－3 スランプフローとセメント比表面積

4.2 セメント成分の影響

(1) 実験の概要

4.1節において、セメント比表面積が同等でもフローが大きく異なることから、流動性はセメント成分にも影響を受けることが想定された。そこで各セメントのスランプフローとセメント成分の関係を検討した。

(2) 結果と考察

セメント成分の中でも、アルミン酸三カルシウム(以下、**C₃A**)の含有量とスランプフローついて、おおよそ相関がみられた。そのため、スランプフローと**C₃A**の関係を図－4に示す。セメント比表面積が同等の低熱、中庸熱、普通において**C₃A**の含有量は、低熱セメント(**L**)<中庸熱セメント(**M**)<普通セメント(**N**)の順に多く、スランプフローは低熱セメント(**L**)>中庸熱セメント(**M**)>普通セメント(**N**)の順で小さい。**C₃A**の含有量が増加するとスランプフローは減少することが確認できる。**C₃A**含有量が多いセメントのスランプフローが減少する原因として、**C₃A**の初期水和による混和剤の先行吸着があげられる^{4), 5), 6)}。混和剤は**C₃A**に先行的に吸着するため、**C₃A**含有量が多いセメントでは図－1Bでの先行吸着量が増加し、液相中に残存する混和剤量が少なくなる。そのため、図－1Dで後吸着する混和剤量が少なくなり、練混ぜ完了時点で混和剤が不足するため、スランプフローが小さくなると考えられる。したがって、比表面積が同等のセメントにおいてもスランプフローに差が生じたと考えられる。

4.3 セメント種類の空練り効果に対する影響

(1) 実験の概要

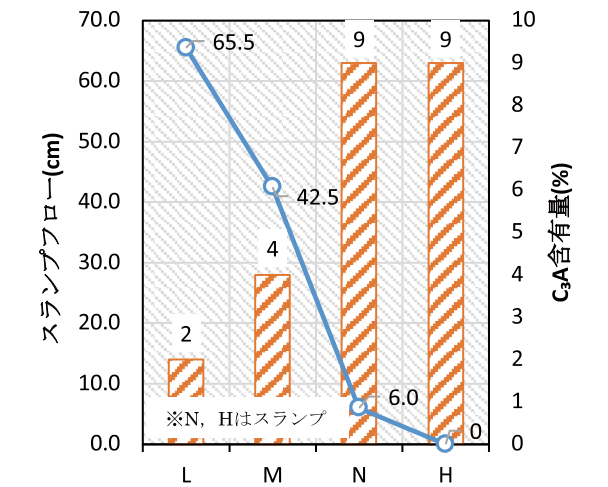
4.1, 4.2節において、各種セメントのスランプフローは**C₃A**含有量に大きく影響を受けることを確認した。そこで、**C₃A**含有量が異なると空練り効果も異なると考えて、**C₃A**含有量が異なる際の空練り時間の影響について検討した。セメントは、混和剤添加量一定でスランプフローが測定可能であった低熱セメント、中庸熱セメントとした。

(2) 結果と考察

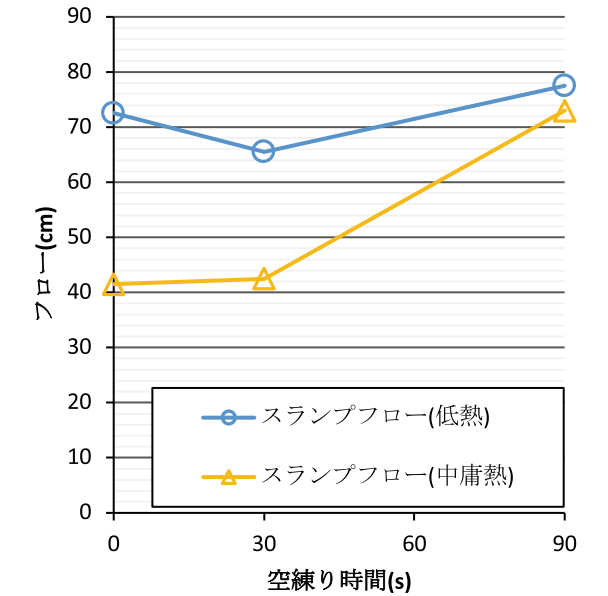
空練り時間とスランプフローの関係を図－5に示す。低熱セメント、中庸熱セメントともに空練り時間**90s**でスランプフローが最大となった。**C₃A**の含有量が異なるセメントでも、空練り時間の増加によるスランプフローの増加が確認できた。

また、空練り時間**0s**、**30s**においては低熱セメントと中庸熱セメントの間に**20~30cm**のスランプフロー差が確認できた。一方、空練り時間**90s**では低熱セメント、中庸熱セメントの間にスランプフロー差はほとんど存在しない結果となった。セメント比表面積が同等のセメントにおいて、空練り時間によるスランプフローの増加率に差が存在することから、空練りによって**C₃A**への混和剤吸着量に差が生じていると想定できる。

C₃Aの含有量は低熱セメント<中庸熱セメントであるため、空練り時間が短い(**0s**、**30s**)場合において、図－1Bでの混和剤の先行吸着量が低熱セメント<中庸熱セメントとなり、中庸熱セメントは図－1Dで混和剤の後吸着量が不足し、スランプフローが低熱セメントに比べて小さくなったと考えられる。一方、空練り時間が長い(**90s**)場合、図－1Aでのブロック形成により**C₃A**が吸着するための見掛け上の比表面積が減少すると推測される。そのため図－1Bで混和剤の先行吸着量が減少し、図－1Dにおいて低熱セメント、中庸熱セメントともに後吸着に必要な混和剤量が十分に残存しており、同等のスランプフローが得られたと推測した。



図－4 スランプフローとC₃A含有量



図－5 空練り時間とスランプフロー

5. アルミネート相増量のスランブフローへの影響

(1) 実験の概要

4章において、セメント種類が異なると空練り効果に差があることが確認できた。また、空練りを長く行うことで**C₃A**に対する混和剤の先行吸着量を抑えることが可能であるとの推察を得た。しかし、セメント種類が異なるため**C₃A**以外の成分が影響した可能性を除去できない。そこで本章では、混和剤を先行吸着すると考えられる**C₃A**のみに着目するため、低熱セメントの一部を酸化アルミニウム粉末（以下、アルミナ粉末）に置換して実験を行った。低熱セメントに対するアルミナ粉末の置換率はセメント量から**C×1%**分を置換した。パターンは以下に示す**3**タイプで比較した。

1. 空練り30s

2. 空練り30s(アルミナ1%)

3. 空練り90s(アルミナ1%)

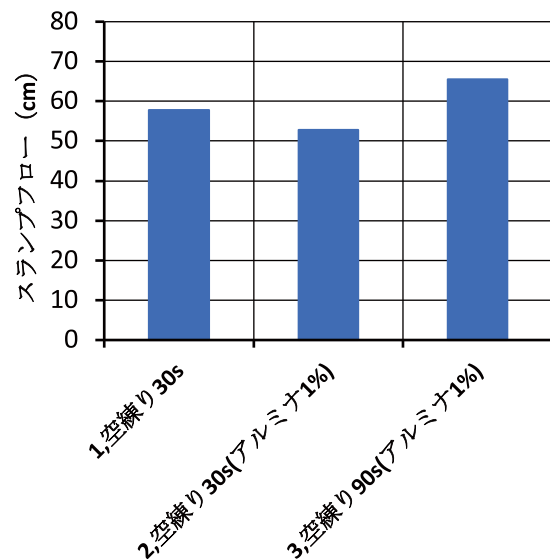
材料や練混ぜ手順については4章と同様の条件で実施した。また、置換率が**1%**と小さいため比表面積に対する影響は小さいと考えて、置換後の比表面積差については考慮しないものとした。

(2) 結果と考察

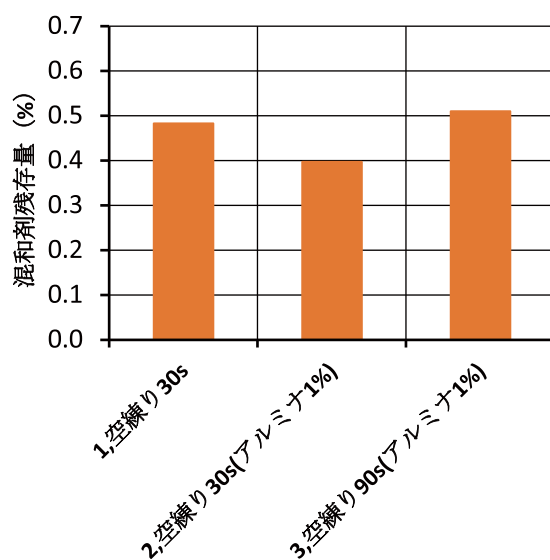
図－6に各パターンのスランブフロー、図－7に各パターンの混和剤残存量の結果を示す。図－6から空練り時間**30s**と空練り時間**30s**(アルミナ**1%**)を比較すると、スランブフローの減少が確認できた。図－7でも混和剤残存量が同様に減少していることがわかる。混和剤残存量は、図－1Bの後(粗骨材投入前)に測定しているため、アルミナ粉末が増えると混和剤の先行吸着量が増加して、混和剤の後吸着量が少なくなりスランブフローが減少したと推察できる。

また、空練り時間**30s**(アルミナ**1%**)と空練り時間**90s**(アルミナ**1%**)を比較すると、空練り時間の増加に伴うスランブフローの増加が確認できた。空練り時間の増加で、混和剤残存量も増加していることから、空練りによって酸化アルミニウムに対する混和剤の先行吸着量を抑制できていることがわかる。すなわち、空練り時間が長くなることで、図－1Aにおいてセメント粒子が形成するブロックによりアルミナ粉末の比表面積が減少し、混和剤の先行吸着量の減少につながっていると想定できる。

空練り**30s**と比較すると、空練り時間**90s**(アルミナ**1%**)の方がスランブフロー、混和剤残存量が大きいことも確認できた。したがって、アルミナ**1%**に対する混和剤の先行吸着によるスランブフローの減少より、空練りを**90s**行うことによるスランブフローの増加の方が大きいことがわかった。



図－6 空練り時間とフロー



図－7 空練り時間と混和剤残存量

6. 実験の結果から想定される練混ぜ過程

4章、5章で検討したセメント成分の影響を考慮して空練り時間も踏まえた練混ぜ過程を図－8に示す。今回の検討を踏まえると空練りによる流動性向上の仕組みは以下の順序で説明される。

A) 空練り段階

細骨材の持つ表面水とセメント粒子が水和反応を開始する。水和反応が始まったセメント粒子は電荷が不安定となり、電気的に安定した状態になるために粒子同士が凝集し、ブロックが形成される。空練り時間が長くなると、ブロックは大きくなると推察され、混和剤が吸着するためのセメントの比表面積（特に**C₃A**）は減少する。

B) モルタル練り段階

混和剤を投入するとブロックの表面に混和剤が吸着する。特に**C₃A**に対して先行的に吸着する。

C) コンクリート練り段階

投入された粗骨材との練混ぜによってブロックが崩壊する。

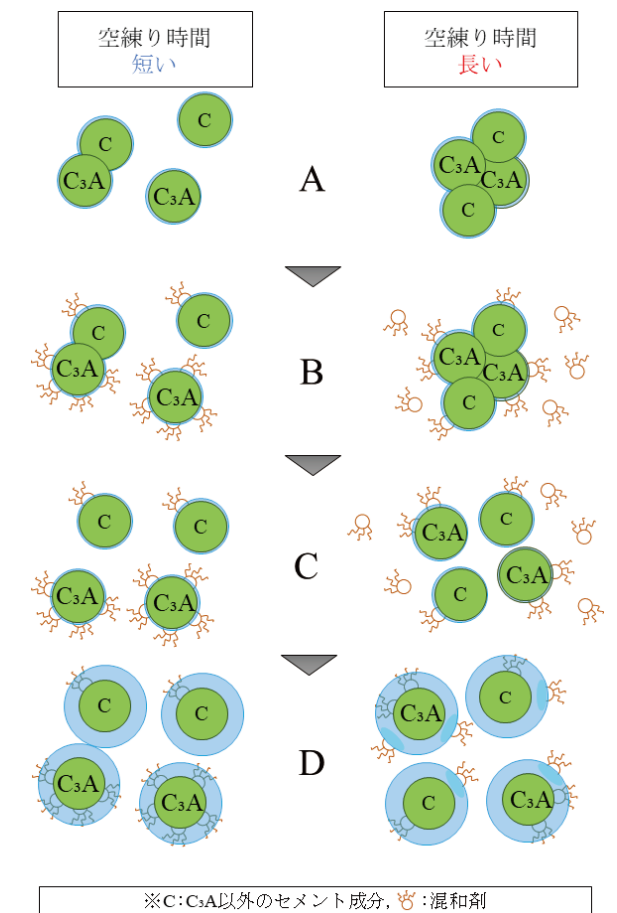
D) 練り混ぜ完了時

崩壊したブロックの未水和セメント部に液相中に残存した混和剤が後吸着する。

図－1の練混ぜ過程では、空練りの効果はAでのセメント粒子ブロック形成によるブロック比表面積の減少、Bでの混和剤先行吸着量の減少、によってDで後吸着する混和剤の量が増加し、スランブフローが増加すると推察していた。

しかし、今回の検討ではセメント成分に着目し、セメントの比表面積が同等でも、**C₃A**の含有量によって混和剤残存量に差が生じていることを確認した。そのため、空練りを行うことで、Aでセメント粒子のブロック形成により**C₃A**の比表面積が減少し、Bで**C₃A**に対する混和剤の先行吸着量が減少することで、Dで後吸着する混和剤量が増加し、スランブフローが増加すると推察した。

したがって空練りによるスランブフローの増加は、セメント粒子のブロック形成による混和剤が吸着可能な面積の減少、**C₃A**の見掛け上の比表面積減少による混和剤の先行吸着量の減少、の**2**点が大きな要因であると考えた。



図－8 今回の検討から考えられる練混ぜ過程

7. まとめ

本研究で得られた知見について、以下にまとめる。

- (1) 本研究で使用した配合において、低熱セメント、中庸熱セメント、アルミナ置換低熱セメントのすべてで、空練り時間増加によるスランブフローの増加が確認できた。
- (2) 空練り時間一定、セメントの比表面積同等であっても、セメント成分の違いによりスランブフローは異なった。これは、**C₃A**に対する混和剤の先行吸着量の影響であり、空練り時間が長くなると、セメント成分が異なるセメントでも、後吸着用の混和剤が十分残存し、同等のスランブフローが得られた。
- (3) 「セメント粒子の比表面積が減少し混和剤の吸着量が減少する」、「**C₃A**に対する混和剤の先行吸着量が減少する」、この**2**つの作用により、後吸着用の混和剤が残存してスランブフローの増加につながるという練混ぜ過程の推察を得た。

これらの結果は、本研究の高強度コンクリート配合で得られたものである。今後は、他配合の高強度コンクリート、普通コンクリートでも同様の結果が得られるか、本研究で推察した練混ぜ過程の一般性について詳細な検討を進める。

参考文献

- 1) JIS A 5308:2019レディーミストコンクリート
- 2) 坂本恭裕, 川崎佑磨, 福山智子, 金侖美: 高強度コンクリートを対象とした空練りがモルタルフローに与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.1, pp.850-855, 2022
- 3) 坂本恭裕, 川崎佑磨, 福山智子, 金侖美: 空練りによるブロック形成が高強度コンクリートのスランブフローに与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, pp.826-831, 2023
- 4) 丸屋英二, 一瀬龍太郎, 坂井悦郎: 混和剤を添加したアルミネート高含有セメントの流動性と水和特性, Cement Science Concrete Technology, No.64, 2010
- 5) 中口歩香, 森泰一郎, 松澤一輝, 黒川大亮: 少量混合成分とアルミネート相を増量したセメントの設計開発～その1セメントの品質評価～, Cement Science Concrete Technology, Vol.73, No.1, pp.429-435, 2019
- 6) 太田晃, 魚本健人: 微粉末粒子に対するポリカルボン酸系分散剤の分散効果に関する検討, コンクリート工学論文集, Vol.10, No.2, pp.131-136, 1999

筆者紹介



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

AP用水素バーナによる アンモニア熱分解ガスの燃焼

宗像 元・田中 翔太・今田 雄司

MUNAKATA Hajime, TANAKA Shota, KONTA Yuji

日工株式会社 開発部 開発1課

概 要

日工株式会社では、アスファルトプラントからの2030年の温室効果ガス50%削減(2013年比)、2050年の実質ゼロを目指し、アンモニアおよび水素を燃料とするバーナの開発を行ってきた。アンモニアの燃料利用方法の1例として、アンモニアを直接燃焼する代わりに、アンモニアを熱分解した水素と窒素の混合ガスを燃焼するアプローチが考えられる。本稿では、大阪大学との共同研究で開発した100kW級アンモニアバーナに、水素と窒素を混合した熱分解模擬ガスの燃焼試験の結果と、市販の熱分解ガス発生装置により生成した熱分解ガスを燃料とした、東京ガス株式会社と共同開発した500kW級水素バーナの燃焼試験の結果を紹介する。

1. 緒言

日工株式会社では日工製アスファルトプラントからの2030年の温室効果ガス50%削減(2013年比)、2050年の排出量実質ゼロに向けて、水素系燃料(水素およびアンモニア)を利用するアスファルトプラント(以下APと略す)向けバーナの開発を行っている¹⁾。中でも水素バーナは、小型の試験用APにて、骨材乾燥・合材製造試験を行い、良好な結果を得ている²⁾。

水素バーナをAPに適用する場合、ガス配管による供給が可能な地域では、天然ガスを配管から供給し、利用しているプラントと同様の運用が期待できる。一方で、プラントの立地によってはガス配管による供給が、困難な場合が想定される。水素ガスを搬送により利用する場合は、液化水素をローリー車で輸送を行い、貯蔵施設を建てることになるが、水素は-253℃と沸点が低く、非常に高価になる。^{3,4)}

アンモニアは水素キャリアーとして機能する化合物であるが、常温では約0.8MPaで液化し、加温することで気化することができる。このため、アンモニアは、プロパンと同様に液体として貯蔵搬送が可能で、温和な条件で加温することで気体として取り出すことが可能であり、液化水素と比較して貯蔵と搬送は安価な機器を利用できるのでコストの観点では優位と考えられる。^{4,5)}

アンモニアをバーナの燃料として利用する場合は、直接燃焼させる方式の他に、アンモニアを分解した水素を燃焼させる方式が考えられる。水素に分解して利用するアプローチは、タンカーによる長距離輸送と水素ステーション等のハブでのアンモニアからの水素生産^{3,6)}や、冶金用の雰囲気ガスの生成方法⁷⁾として知られている。

APにおける燃料利用という観点で見ると、アンモニアを熱分解したガスを燃焼させるアプローチは、直接燃焼方式と比較

して、水素の燃焼性の高さから外乱の激しい場における広いターndダウンや急激な出力の変動といった要請に対して優位な可能性がある。

また、APのドライヤは直接加熱方式のため、火災と熱風がドライヤ内部にて、骨材の乾燥に使われるが、アンモニアを熱分解したガスに含まれる窒素は、バーナファンから供給される空気中の窒素と同様の働きを考えると考えられるため、熱分解ガスから窒素と水素を分離することなく燃料として使用できると考えられる。

従って、アンモニアをオンサイトで熱分解したガスは、水素を窒素と分離することなく、より簡素な装置構成で、アンモニアを水素キャリアーとして燃料利用をすることができる可能性がある。

本稿では、水素バーナにアンモニア熱分解ガスを燃料として適用することが可能であるかを調査するために行った、2つの試験の結果を紹介する。

1つ目の試験は、大阪大学との共同研究で使用した、100kW級の試験用アンモニアバーナを用いて模擬ガス及び水素ガスによる燃焼試験である。2つ目の試験は、東京ガス株式会社と共同開発をした500kW級の水素バーナを用いた、市販の熱分解装置により製造したアンモニア熱分解ガスの燃焼試験である。

2. 100kW級バーナによるNH₃熱分解模擬ガス燃焼試験

500kW級の水素バーナを用いた水素専焼試験では、NO_xの濃度は、約20ppm-16%O₂eqであり、純粋な水素ガスを燃料とする場合、thermal NO_xは極めて低い燃焼が可能であることが確認されている。

アンモニアを熱分解したガスは、水素75mol%と窒素25mol%の混合ガスであるが、分解や処理の条件により数1000ppm-数100ppm程度の未反応のアンモニアが含まれると予想される。³⁾

この熱分解ガス中に含まれるアンモニアはfuel NO_xの原因となると考えられるが、燃料利用を主眼とする際に、NO_xの生成が無視できる許容可能なNH₃の濃度については知見が無かった。

そこで燃料組成に対するNO_xの生成量や燃焼性の違いや傾向を確認するため、100kW級の試験バーナを用いて、水素および水素と窒素を3:1の組成で混合した熱分解模擬ガスに、アンモニアを混合したガスを燃焼させる試験を行った。

2.1 試験方法

図1は試験に用いた100kW級のバーナである。試験は、大阪大学吹田キャンパスの中央機械棟にて実施した。水素およびアンモニアの流量は、azbil製マスフローにて測定し調整を行った。窒素の流量はキーエンス製超音波流量計にて測定し調整を行った。これらのガスはバーナノズルに至る前に合流しライン混合を行って燃焼させた。排ガスの分析には、ホダカ製のポータブル燃焼排ガス分析計とヤナコ製窒素酸化物自動計測機、CO/CO₂/O₂自動計測機、および堀場製作所製排ガス測定装置MEXAを用いた。



図1 試験に用いた100kW級バーナ

試験フローや機器等は、アンモニアの試験と同様のため、詳細については既報を参照のこと⁸⁾。

2.2 試験結果

図2および図3は、水素ガスおよび水素と窒素を3:1の組成で混合したガスおよび、これらのガスに、熱量ベースで0.5%および5%のアンモニアを混合したガスの、100kWの燃焼火災の画像である。ここで混焼率0.5%および5%は、アンモニア濃度としてそれぞれ0.28%および2.9%に相当する。図から、純粋な水素、およびアンモニアを加えていない水素と窒素の混合ガスでは、燃焼火炎は無色であり、アンモニアが加わることで白っぽい色がつくことが分かる。また、火炎形状から窒素混合ガスの火炎は、水素ガスの火炎と比較すると、窒素が含まれている分だけ流量が増え、前方へ突出した火炎になっていることが分かる。

また、排ガス分析の結果からは10%以下のアンモニアの混焼率であれば、一般的なAPの排ガス基準値である230ppm-16%O₂eqを満たしていることが確認された。

従ってアンモニアの熱分解ガスに数1000ppm-数100ppm程度の未反応アンモニアが含まれているとしても、燃料利用時にfuel-NO_xは問題にならない可能性が高いと考えられる。

また、アンモニアを加えていない水素ガスと水素と窒素の混合ガスを比較するとNO_xの濃度は、後者の方が低かった。これは水素が窒素によって希釈されているために、燃焼が緩慢になり、局所的なガス温度が低くthermal-NO_xの生成が起これにくかったからと考えられる。このことは、熱分解ガス中のアンモニア濃度によっては、水素専焼よりも低いNO_x濃度になることも期待できると考えられる。

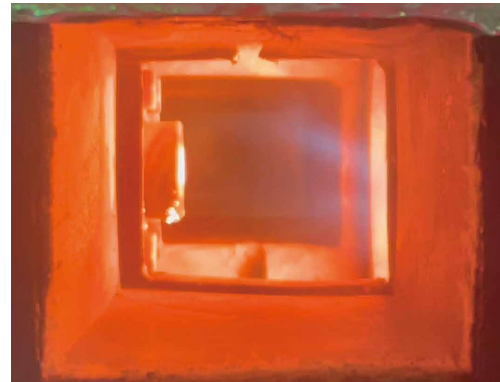
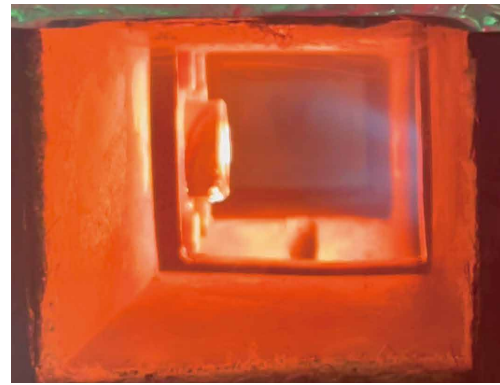


図2 水素アンモニア混合ガスの火災
(アンモニア混焼率: 上0%、中0.5%、下5%)

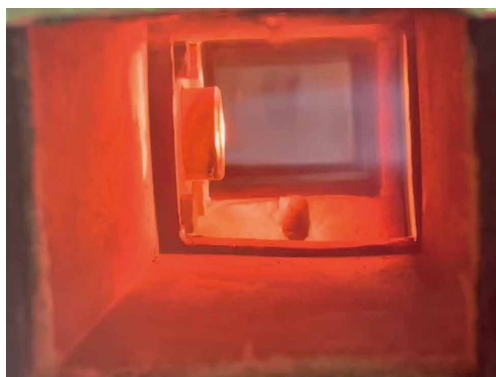


図3 水素窒素アンモニア混合ガスの火炎
(水素:窒素=3:1、アンモニア混焼率:上0%、
中0.5%、下5%)

3. 500kW級バーナによるNH₃熱分解模擬ガス燃焼試験

100kWバーナによるアンモニア分解模擬ガスの燃焼試験により、微量の未反応アンモニアが含まれる分解ガスでも、NO_xの観点からは、アンモニア除去装置を使用せずに、水素ガスと同様にバーナの燃料として利用可能である見込みがあることが分かった。そこで、市販の熱分解装置を用いてアンモニアガスを熱分解し、500kWバーナを用いて分解ガスの燃焼試験を実施し、プロパンガスの場合と比較した。

3.1 試験方法

燃焼試験は、日工社内の試験用燃焼炉に500kW水素バーナを接続し、熱分解ガスの燃焼を実施した。アンモニア熱分解ガスは市販の熱分解装置を用いて製造した。燃料として用いたプロパンの流量はキーエンス製超音波流量計により測定し、既定の流量になるように調整を行った。アンモニア熱分解ガス

については、熱分解装置に供給する前に、アンモニアの流量をプロパンと同様の方法で調整することで、流量調整を行った。熱分解ガス中の未反応アンモニアおよび燃焼排ガス中の未燃のアンモニアとNO、N₂O、NO₂は配管のサンプリングポートからアルミバックに採取し、MEXAを用いて分析を行った。排ガス中のO₂、CO、NO_x濃度は炉出口のサンプリングポートから採取したものを、ホダカ製のポータブル燃焼排ガス分析計を用いて測定を行った。

3.2 試験結果

図5は500kW級水素バーナを用いて燃焼させた出力約500kWのプロパン及び熱分解ガスの専焼火炎である。熱分解ガスの火炎はオレンジ色であるのが分かる。以前の試験で、水素を燃焼させた際にはこのような色は確認されておらず、微量の未反応アンモニアに起因している可能性がある。

ガス分析の結果から、熱分解ガス中のアンモニア濃度は200ppm以下であった。また、プロパン専焼及び熱分解ガス専焼時のNO_x濃度は、ほとんど変わらず、どちらも20ppm-16%O₂eq.以下であった。また、N₂Oやアンモニアは、未検出であった。以上から、アンモニア熱分解ガスは、水素や天然ガス、プロパン等と同様に、燃料利用可能なことが期待できると考えられる。

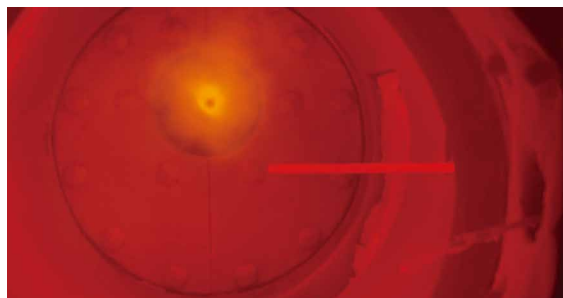
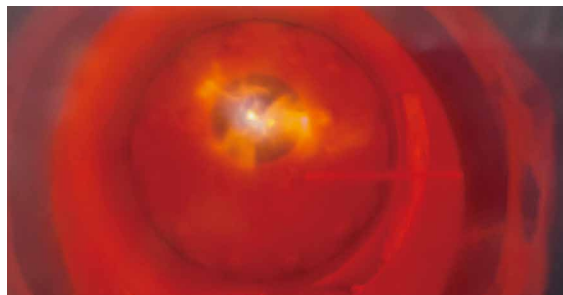


図4 500kW水素バーナによるプロパン専焼
および熱分解ガス専焼時の火炎写真
(出力 約500kW、空気比約2、
上:プロパン専焼、下:熱分解ガス専焼)

4. AP導入に向けた今後の課題と将来展望

東京ガス株式会社と共同開発を行った500kW水素バーナは、炉内燃焼においては、熱分解ガスが燃焼できること、および、分解ガス中の微量なアンモニアの存在は、NO_x生成に問題を及ぼさないことが、確認された。

今後の課題としては、ドライヤ内での燃焼においても排ガス中のNO_xやアンモニアが基準値を満たすかどうか、および、合材の品質に問題が無いかを確認することである。また、実機プラントに導入する際には、アンモニアの熱分解のための反応装置が必要になるが、APに特徴的な間欠運転や、運転中の激しい出力変動に対応しており、反応装置の熱マネジメントと排熱利用等が可能なのが求められる。今回は500kW級のバーナによる試験を実施したが、APで使用するバーナの出力は5-12MW程度が主流であるため、日本国内での、カーボンフリーアンモニアの供給体制整備に歩調を合わせて、よりスケールの大きなバーナ及びプラントシステムの開発を進めていく予定である。

5. 総括

アンモニアを燃料利用する方法として、アンモニアを直接燃焼する代わりに、熱分解ガスへと変換して燃焼するアプローチが考えられる。このような方法がAP向けのバーナに有効であるかを検討するために100kWバーナを用いて水素と窒素およびアンモニアを混合した熱分解模擬ガスの燃焼試験と500kW級水素バーナを用いたプロパン専焼と熱分解ガス専焼の比較試験を行った。

熱分解ガスは水素ガスと同様に水素バーナで燃焼することができ、熱分解ガス中のアンモニアの濃度が200ppm以下時は、NO_xの濃度も水素を燃料とする時と同等の水準であることが確認できた。

今後は、カーボンフリーアンモニアの普及に合わせて、より出力の大きなバーナへの適用、合材の製造試験によるプラントへの適合性と合材の性能確認、プラントシステムの開発等を進めていく予定である。

謝辞

100kWバーナの試験は大阪大学赤松研究室との共同研究として実施された。また、試験で使用された500kW水素バーナは日工株式会社と東京ガス株式会社の共同開発で作成されたものである。燃焼試験の排ガスと熱分解ガスの分析には、大阪大学赤松研究室の協力を得て実施された。ここに厚くお礼を申し上げます。

References

- 1) 日工株式会社 :Nikko Corporate Report 2023
- 2) 長谷川修磨, 北野裕樹, 今田雄司 :水素バーナの開発～Phase2 アスファルト混合物製造試験～, NIKKO TECHNICAL REPORT, No.005, pp.45-50, 2024.
- 3) 小島由継 :アンモニアによる水素貯蔵と運搬, 表面化学,

- 4) Vol.36, No.11, pp.583-588, 2015.

Nadia Mohd Adli, Hao Zhang, Shreya Mukherjee and Gang Wu :Review—Ammonia Oxidation Electrocatalysis for Hydrogen Generation and Fuel Cells, Journal of The Electrochemical Society,

- 5) Vol.165, J3130-J3147, 2018.

A. Valera-Medina, F. Amer-Hatem, A. K. Azad, I. C. Dedoussi, M. de Joannon, R. X. Fernandes, P. Glarborg, H. Hashemi, X. He, S. Mashruk, J. McGowan, C. Mounaim-Rouselle, A. Ortiz-Prado, A. Ortiz-Valera, I. Rossetti, B. Shu, M. Yehia, H. Xiao, M. Costa :Review on Ammonia as a Potential Fuel: From Synthesis to Economics, Energy Fuels,

- 6) Vol.35, pp. 6964–7029, 2021.

Elvira Spatolisano, Laura A. Pellegrini, Alberto R. de Angelis, Simone Cattaneo, Ernesto Roccaro :Ammonia as a Carbon-Free Energy Carrier: NH₃ Cracking to H₂, Industrial & Engineering Chemistry

- 7) Research, Vol.62, pp.10813-10827, 2023.

田輝一 :熱処理雰囲気, ぷらすとす(日本塑性加工学会

- 8) 会報誌), Vol.4, No.38, pp.75-89, 2021.

田中翔太, 宗像元, 今田雄司 :アスファルトプラントにおける二酸化炭素削減と日工におけるアンモニアバーナ開発

筆者紹介



MUNAKATA Hajime
宗像 元
2019年入社
開発部
開発1課



TANAKA Shota
田中 翔太
2015年入社
開発部
開発1課



KONTA Yuji
今田 雄司
2002年入社
開発部
開発1課

Hydro H₂eat(ハイドロヒート)の開発 ～温風ヒーターへの水素燃料の利用～

長谷川 修磨・今田 雄司

HASEGAWA Shuma, KONTA Yuji

日工株式会社 開発部 開発1課

概 要

世界の平均気温は産業革命前と比べて約1.1℃上昇している。2015年にパリ協定が採択され、日本は2050年にカーボンニュートラル実現を目指す表明をしている。そして、次世代エネルギーとして注目される水素の社会実装に対して、法の制定など様々な取り組みが進められている。とりわけ、道路舗装業界においても水素を燃料として使用できるバーナの開発が待ち望まれている。当社は、東京ガス株式会社と共同で水素バーナの開発に着手し、2023年3月には出力500kW級の水素バーナを完成させている¹⁾。さらに、これらの習得した水素燃焼技術をアスファルトプラント(以下、APと記述)以外の分野への展開として、水素ジェットヒーターの開発に着手している。本稿では、開発した水素ジェットヒーター試作機を用いて行った寒冷地での実証実験について報告する。

1. 緒言

18世紀後半の産業革命以降、人類は化石燃料を大量に消費しながら熱や電気エネルギーの恩恵を受けてきた。その結果、世界の平均気温は2020年時点で、産業革命前と比べ、既に約1.1℃上昇しており、このままの状況が続けば、更なる気温上昇が予測される。気候変動と気象災害の関係は明確ではないが、気候変動に伴い、豪雨や猛暑、南極海水減少のリスクが更に高まることが予想される。

この状況を受け、2015年にパリ協定が第21回気候変動枠組条約締約国会議(COP21)で採択され、世界各国がカーボンニュートラルに向けて取り組みを進めている²⁾。その最中、2025年1月20日にドナルド・トランプ氏がアメリカ第47代大統領に就任し、世界第2位の温室効果ガスの排出国であるアメリカはパリ協定からの脱退を表明した。今後、化石燃料産業の規制緩和や石油・天然ガスの生産拡大が見込まれ、地球温暖化対策は滞ると思われる。このように、温暖化の抑制に対して排出量上位の米国が不在の状況になるが、地球全体での温室効果ガス排出抑制への取り組みは継続して高い意識の状態で維持して行く必要がある。そのため、日本は2050年ネットゼロに向けた脱炭素と経済成長との同時実現を目指した取り組みを、国を挙げて進めている。

企業としては、ネットゼロを目指す上でサプライチェーンの温室効果ガス排出量の指標として「スコープ1・2・3」がある。スコープ1・2は自社の活動を通じて排出している温室効果ガスを対象としている。そして、スコープ3は原材料仕入れから販売後に排出される温室効果ガスを対象としている。スコープ1・2への対策はもちろんのこと、スコープ3に対する改善を行う必要があり、製品開発を行う上では「項目11:販売した製品の使

用」に対する対策までを行うことが責務となる。

ネットゼロの実現に向けて、次世代エネルギー資源として水素が注目されている。水素は、酸素と反応することで電気エネルギーまたは熱エネルギーを取り出すことが可能で、その際にCO₂を排出しない特徴を有している。また、水素は電気分解により、水から生成することが一般的に知られるが、化石燃料やメタノール、下水汚泥、廃プラスチックなど、さまざまな資源や廃棄物からも生成することができ、方法によってはカーボンフリーなエネルギーとなる。

このような状況を踏まえて、当社はこれまで使用されてきた化石燃料の代替燃料として、期待されている水素燃料を使用できるバーナの開発を行っている。APへの水素バーナの導入は水素インフラとのバランスを合わせて進めることが合理的であると言える。そのため、現状で運搬可能な水素インフラ設備として圧縮水素や液化水素が挙げられるが、より身近に使用できるものとしては圧縮水素が実用的である。圧縮水素での現実的な運用が可能な製品として、温風ヒーターは需要があると考えられ、特に需要が高いであろう北海道には家畜ふん尿から水素を製造する施設があり、水素への取り組みが盛んに行われている。中でも、冬期の建設現場で必需品ともいえるジェットヒーター(温風ヒーターの1種)は、防寒やコンクリート養生時の凍結による品質低下を防ぐために使用されている。そして、水素燃料を利用した場合、CO₂やCOを発生させないため利用者の安全性の向上にも貢献できると考え、水素ジェットヒーターの開発に踏み切った³⁾。

本試験では、開発した水素ジェットヒーター(商標名:ハイドロヒート)の用途として、従来機と同様に寒冷地におけるコンクリート養生テント内で運用が可能かの確認を行った。水素の燃

焼により発生する水蒸気が、テント内の湿度に影響を与えることが考えられる。そのため、従来から使用している灯油ジェットヒーターを同条件で設置し、テント内の温度や湿度の変化を確認した。ジェットヒーターがもっとも稼働率が高くなる極寒の時期にテスト期間を設け、水素ジェットヒーターを寒冷地での実運用を模擬した試験を実施した³⁾。

本稿では、開発した水素ジェットヒーター試作機の特徴と試作機を用いた寒冷地での実証試験について報告する。

2. 水素ジェットヒーター

「Hydro H₂eat(ハイドロヒート)」の開発

2.1 水素燃焼技術の開発

道路舗装業界においても温室効果ガス排出量の削減に積極的に取り組んでいる。APにおいて発生しているCO₂の約8割が、化石燃料の燃焼によるものであり、最もバーナを用いた骨材の乾燥加熱で発生している。そのため、次世代エネルギーである水素を燃料として使用できるバーナの開発に着手し、2050年にはAPで水素専焼を実現できるようにバーナ開発を進めている。

水素をバーナの燃料として活用した場合に、カーボンニュートラルを実現できるメリットはあるが、重油や都市ガスと比較すると次のような懸念事項が考えられる³⁾。

- ①燃焼速度がメタンと比較すると約6.6倍速いため⁵⁾、バックファイアを起こす可能性が高い。
- ②局所的に燃焼温度が非常に高温になることがあるため、サーマルNO_x(窒素酸化物)の生成量が多くなる。
- ③バーナ近傍での熱負荷が高くなるため、バーナや燃焼室などの燃焼機器に熱的損傷を与えるおそれがある。

これらの懸念事項を考慮し、バーナでの水素燃焼試験を行った。AP用の500kW加熱バーナを用いて水素を燃焼させることで、想定される熱出力が得られることを確認し、生成するNO_x濃度と各種パラメータとの相関関係を明らかにした。500kW級の水素バーナは東京ガス株式会社と2023年に共同で開発を完了した⁴⁾。この水素バーナを小型APに設置してアスファルト混合物製造試験を行い、懸念された水素の燃焼における水蒸気が及ぼすプラントへの影響とアスファルト混合物の品質において、当社従来のガスバーナと同様の運用ができることを確認した¹⁾。

2.2 Hydro H₂eat(ハイドロヒート)試作機

加熱用バーナの熱風温度は1000℃以上を求められるが、温風ヒーターの場合にはストーブの様に、気温より20～30℃程度上昇した温風が求められる。

500kW水素バーナで習得した技術を用いて、水素を燃料とするジェットヒーター「Hydro H₂eat(ハイドロヒート)」の開発を行っている。開発したハイドロヒート試作機を写真1に示す。

そして、ハイドロヒートでの温風発生方法は、燃焼ガスと冷気をミックスチャンバー内で混合する構造となっている。



写真-1 ハイドロヒート試験機



写真-2 実証試験の様子(陸別町)

3. ハイドロヒート燃焼試験

3.1 試験条件

ハイドロヒートの実用性や操作性の確認に加えて、寒冷地での耐久テストを兼ねて試験するため、日本で一番寒いまちとも言われる最低気温がマイナス30℃以下になることもある陸別町⁶⁾の山間部と、幕別町の川辺の2か所で実証試験を行った。陸別町は車やエアコンなどの寒冷地試験が行われている。写真2に陸別町での実証試験の様子を示す。

ジェットヒーターが多く使用される寒冷地でのコンクリート養生現場を想定し、それぞれの防寒囲いの中でハイドロヒートと、灯油を燃料とする従来ジェットヒーターを24時間稼働させて運転状況を比較した。今回の試験では、防寒囲い内の温度15℃程度に保つために、ハイドロヒートはマフラーコントローラで水素の燃焼量の調整を行い、一定出力の従来機はサーモスタットを用いて機器をON-OFF制御することで灯油の燃焼量を制御して運転を行った。

3.2 試験設備

3.2.1 防寒囲い

図1に試験に使用した防寒囲いの外形図を示す。北海道開発局の令和6年度北海道開発局道路設計要領から寒中コンクリートについて日平均気温が4℃以下になることが予想される場合には、寒中コンクリートとしての施工を行わなければならない⁷⁾と規定がある。そして、厳しい気象作用を受けるコンクリートは、初期凍害を防止できる強度が得られるまで、コンクリートの温度を5℃以上に保ち、さらに2日間は0℃以上に保つことを標準としている。そのため、防寒囲い内の温度を一定期間5℃以上に保つ必要がある⁷⁾。実際に寒冷地で行っている寒中コンクリート施工は写真2の様な防寒囲いで施工箇所を覆い、養生を行う際にジェットヒーターを用いて囲い内温度を一定に保っている。

3.2.2 ハイドロヒート水素供給ライン

今回の試験では、水素カードル(ポンペをまとめて枠組みし、ガスの取り出し口を集約したもの)を用いて水素の供給を行った。水素カードルから19.6 MPaの水素が供給され、減圧弁により0.2 MPaまで減圧した水素を燃焼装置に供給した。ハイドロヒートに高圧のまま水素を供給すると機器の損傷や急激な圧力変動で失火などの要因となるため、減圧してから燃焼装置に供給している¹⁾。

3.3 試験測定項目

本試験では、外気温と囲い内の温度、湿度の測定に加え、ハイドロヒート側のみ安全のため、囲い内の水素濃度を常時監視した。

図2に防寒囲い内における各種測定位置とハイドロヒートの設置位置を示す。換気口は防寒囲い天井に用意した。

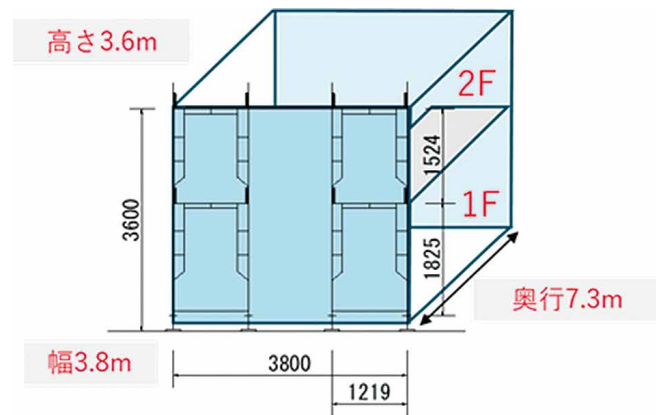


図1 防寒囲い外形図³⁾

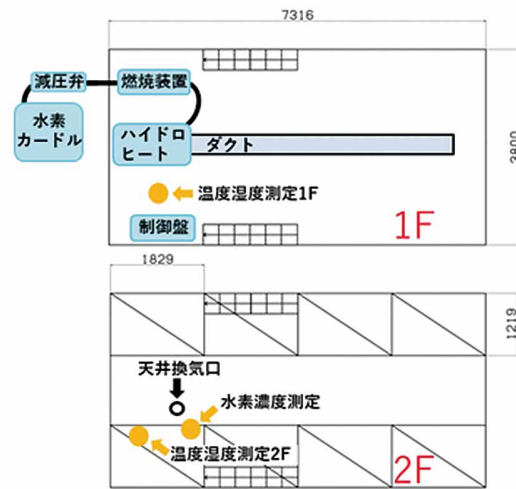


図2 ハイドロヒート機器設置、測定箇所

3.4 試験結果

3.4.1 囲い内温度測定結果

陸別町の試験では、外気温度と灯油ジェットヒーター囲い内温度、ハイドロヒート囲い内温度を測定した。その結果を図3・4に示す。2024年2月に行った陸別町での試験日は外気温が最高温度-0.2℃、最低気温-22℃を記録し、日中との寒暖差が20℃以上あった³⁾。

図3に示す陸別町で測定した灯油ジェットヒーター囲い内の温度グラフで高低差が短時間で大きくなっている。これは、サーモスタットを用いて灯油ジェットヒーターをON-OFF制御で着火と消火のインターバルを変えることで自動的に温度を一定範囲に保持しているためである。ただし、温度の制御幅を小さくすると、頻繁にON-OFFを繰り返すことになる。対して、ハイドロヒートは出力の調整により温風温度の調整が容易にできるため、図4に示すように、灯油ジェットヒーターと比べ、急激な温度変化を起こすことなく連続運転ができた。しかし、水素流量がマスフローコントローラによる手動操作であるために、自動での温度制御ができない。そのため、防寒囲いテントは外部の気温変化の影響を受けるため、日中は可能な限り流量を下げたが囲い内温度が高くなった。今回の試験でハイドロヒートは、灯油ジェットヒーターの囲い内温度制御域内で囲い内温度を維持することができた。測定温度は幕別町でも同様の傾向が見られた³⁾。

3.4.2 囲い内湿度測定結果

図5にハイドロヒートと灯油ジェットヒーターの囲い内容積絶対湿度の結果を示す。ハイドロヒートと灯油ジェットヒーターの囲い内温度に大きく差はないが、絶対湿度は3~4g/m³程度ハイドロヒート囲い内が高い値となった。写真3に示すようにハイドロヒート囲い内で目視確認でも明らかに多く結露した水が確認できた。これは、水素は燃焼すると水のみが発生するため、灯油と比べて排ガス中の水分量に大きな違いがあり、壁面の結露水の量が大きく異なったと考えられる。

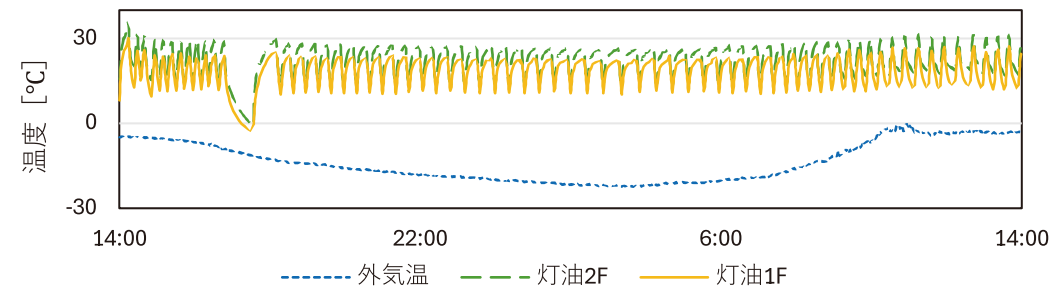


図3 灯油ジェットヒーター囲い内温度(陸別町)

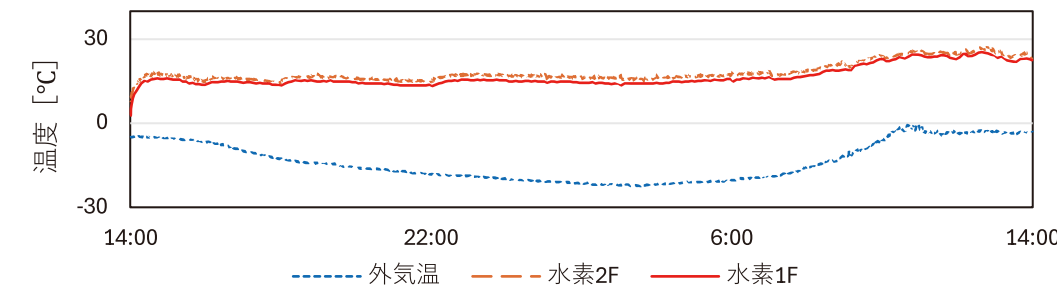


図4 ハイドロヒート囲い内温度(陸別町)

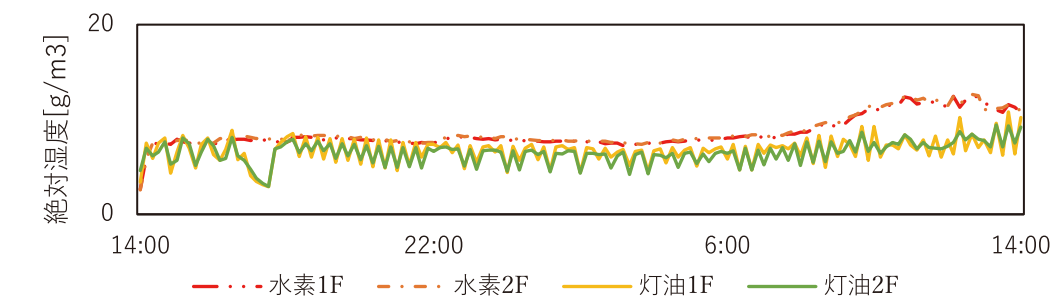


図5 囲い内湿度(陸別町)

結果より、ハイドロヒートはテント内を高い湿度に保つことができるため、コンクリートの表面の急激な乾燥が防げることから、コンクリート養生時に好条件の環境が作り出せると考えられる³⁾。

3.4.3 燃料使用量に関する試算結果

今回の実証試験での灯油ジェットヒーターのCO₂排出量は陸別町試験:115.8kg、幕別町試験:91.4kgとなった。ハイド

ロヒートは燃焼によりCO₂を排出していないため、カーボンニュートラル水素を使用する場合にはCO₂排出量を削減することが出来る。

表1に試験での燃料使用量を示す。燃料から得た熱量は、灯油ジェットヒーターは1605MJ、ハイドロヒートは1389MJであった。ハイドロヒートの総熱量が少なくなった考察として、下記の点が挙げられる。

1) 囲い内温度

図3と図4の囲い内温度グラフから、灯油ジェットヒーターの方が総じて高い温度を推移しており、ON-OFF制御と常時運転による流量制御の違いから灯油ジェットヒーターの燃焼量が増加したと考えられる。

2) 燃焼効率

囲い内臭気から、着火と消火を繰り返す灯油ジェットヒーターから灯油の未燃分による臭気(アセトアルデヒド臭)が発生していると考えられ、完全燃焼を行えていないと推測される。ハイドロヒートは囲い内水素濃度が常時0ppmを示しており、高い効率で燃焼していると考えられる。

3) 壁面の凝縮水

ハイドロヒートの方が壁面への凝縮水が多いことから、凝縮潜熱に囲い内温度への寄与の可能性が考えられる。



写真3 ハイドロヒート囲い内壁面

現状、灯油に対してグレー水素は熱量あたり約10倍、グレー水素に対してカーボンニュートラル水素は熱量あたり約4倍の価格差がある。この価格差により運用の安定を確保しても水素燃料が現状優位になることはないと言える。水素の燃料利用に対する政府・行政の支援などが、今後どのように推進されるか注目していく必要がある³⁾。

表1 燃料使用量

燃料（試験場）	使用量	総熱量	CO ₂ 排出量
灯油（陸別）	46.5 L	1605 MJ	115.8 kg
水素（陸別）	129 m ³	1389 MJ	0 kg

4. ハイドロヒートの特徴

- 従来の灯油ジェットヒーターとは異なり、開発した水素燃料を使用するハイドロヒートの特徴は下記の点が挙げられる³⁾。
- ①燃焼排ガスの水蒸気により高湿度環境を維持。急激な乾燥を緩和するため、コンクリート養生などの急に乾燥した時に問題になるものにおいては好条件の環境を作り出せる。
 - ②燃焼排ガスが無臭である。生成する排ガスが水蒸気のため無臭であり、異臭での不快感などがなく、暖房空間の快適性が向上する。
 - ③環境への負荷低減。灯油などの液体燃料とは違い、燃料の漏洩による河川、土壌などへの環境汚染への懸念がない。
 - ④温室効果ガス排出量の削減。燃焼によりCO₂が発生しないため、カーボンニュートラルを実現することができる。
 - ⑤排出ガスの安全性の向上。囲い内で採暖しながらの作業中に一酸化炭素中毒の危険性が無く安全性が向上する。

5. ハイドロヒートの改良

今回実施した寒冷地実証試験からハイドロヒート試作機の移動や設置、操作等の運用のしやすさに対する面から課題が見られた。試験に用いたハイドロヒート試作機を稼働させる



写真4 ハイドロヒート改良機

ためには、ハイドロヒート本体のほかに、制御装置、燃焼装置等が必要になる。そのため、機器設置スペースが必要なこと、重量があり設置に労力を要するため利便性が悪いことなどを改善する必要があると明確になった。

その後、試作機から再設計を行った改良機を**写真4**に示す。本体、燃焼装置、制御装置の一体化を行い、試作機と比べて小型・軽量化に成功した。

6. 結言

今回実施した寒冷地実証試験結果から、ハイドロヒート試作機は従来の灯油ジェットヒーターと同様に防寒囲い内の温度維持は行えることが確認できた。また、寒冷地特有の水が多く発生することによる結露や凍結問題の懸念もあったが、コンクリート養生テント内では問題ないことが確認できた。ハイドロヒートでカーボンニュートラル水素を使用すると温室効果ガスの削減ができるが、運用面での課題も見えてきた。試作機から改良機の開発を行い、機器の重量やサイズの縮小を可能とした。今後、製品化に向けて使い勝手や耐久性の改良を行う予定である。

そして、水素燃料の価格は灯油などの化石燃料と比べて、現状高価であるが2030年、2050年に向けて水素が利用し易くなるように支援、補助金などの体制づくりがされはじめている。カーボンニュートラルとネットゼロまでを踏まえて製品開発をおこない、水素社会の実現に貢献するため、ハイドロヒートの早期実用化を目指し、水素エネルギーの利用拡大を促進していく。

References

- 1) 長谷川 修磨,北野 裕樹,今田 雄司. 水素バーナの開発～Phase2 アスファルト混合物製造試験～, NIKKO TECHNICAL REPORT 2024, No.005,pp.45-50.
- 2) 経済産業省 資源エネルギー庁 “第1節 温暖化をめぐる動き” <https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2020html/1-3-1.html> (参照日2025年1月30日)
- 3) 長谷川 修磨,今田 雄司,稲船 晃. ジェットヒーターへの水素燃料利用,クリーンエネルギー 2024,第33巻,第7号, pp.5-9
- 4) 北野 裕樹,今田 雄司. 水素バーナの開発～Phase 1～,NIKKO TECHNICAL REPORT 2023, No.004,pp.39-44.
- 5) 井上 雅弘. 水素の安全利用,電気設備学会誌,

- 6) 北海道 陸別町 “陸別町を知る” <https://www.rikubetsu.jp/iju/shiru/> (参照日2025年1月30日)
- 7) 国土交通省北海道開発局 令和6年度 北海道開発局 道路設計要領 “寒中コンクリート” https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/kn/dou_ken/ud49g70000001tos-att/splaat0000003wap.pdf (参照日2025年1月30日)

筆者紹介



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



KONTA Yuji
今田 雄司
2002年入社
開発部
開発1課

MEMO

Lined area for notes.



製品紹介
PRODUCT
INTRODUCTION



— 製品紹介 —

remoop
～3D活用における工場のIoT化～

1. はじめに

今回はスモールスタートで始められる拡張性に優れた遠隔監視システム「remoop(リムーブ)」についてご紹介させていただきます。



2. 製品概要

remoopはRemote Monitoring Operationの略称で、現場から収集したデータやネットワークカメラの映像をクラウド上に収集・蓄積し、スマートフォンやPC、タブレットからブラウザを介して遠隔監視と遠隔操作が行えるハード・ソフトウェアのIoTシステムです。

3. 構成

図1はremoopの構成を表しており、各種センサーの情報やネットワークカメラの映像をIoTデバイスやLTEルーターを通じてクラウドサーバーへ送信・データ処理を行う事でブラウザを介して表示します。

IoTデバイスはクラウドサーバーとの連携の為に弊社が開発したデバイスで、各種センサー、機械・装置へのデジタル/アナログの入出力を行います。



図1 remoop構成図

4. 基本機能

remoopの基本となる機能は「遠隔監視」、「遠隔操作」、「データ収集」の3点になります。

① 遠隔監視

図2のダッシュボードと呼ばれる画面からセンサー情報や機械・装置の状況のリアルタイム表示の他に、カメラ映像のライブ再生や録画再生が可能です。



図2 ダッシュボード イメージ図

② 遠隔操作

ダッシュボードからデジタル/アナログ信号の出力やカメラの操作(ZOOMなど)が行えます。また、ダッシュボードからの直接操作に加えて、しきい値制御やタイマー制御などの自動制御も組み合わせることが可能です。

③ データ収集

remoopが取り込んだセンサーなどの各種データはクラウドサーバーに最大3年間保存可能です。また、ダッシュボード上で集計・グラフ化したデータを使って推移や傾向の見える化を行うことで設備の保守・運用の際の判断材料として活用できます。

5. 拡張機能

基本機能と合わせて以下の拡張機能を組み合わせることでスモールスタートしたremoopの導入効果を確認しながらシステムを拡張することができます。

① 通知機能

監視状況の通知としてメールやLINEによる通知が行えるため、ダッシュボードを見ていなくても現場の変化に気付くことができます。

② PLCとの連携

工場や生産ラインなどで稼働している装置には制御機器としてPLCが広く採用されています。PLCは装置の制御や設定に関わる各種データ(例:温度、電流、アラーム情報など)を保持しています。これをremoopと連携させることによって内部の詳細なデータの見える化が可能です。また、連携可能なPLCは三菱電機 / キーエンス / オムロンなど主要なメーカーに対応しています。

③ 無線センサーの活用

長距離通信が可能な無線通信規格「LoRaWAN」を用いた無線センサーとの連携が可能です。通信範囲は見通しの良い環境において受信機(ゲートウェイ)を中心に半径5kmで、無線化により設置工事の費用を抑えることができます。

6. 新機能 3D表示

近年のWebフロントエンド技術の発展は著しく、とりわけWeb上で3Dを描画する技術である「WebGL」は写真やイラストでは表現が困難な動的な視覚効果の提供方法として急速に普及しています。

本機能ではWebGLを用いて工場や建物、各種装置を立体化することで、従来のダッシュボードと比較して情報量の増加と見やすさを向上させた視覚的に分かりやすいユーザーエクスペリエンスを実現します。

●機能・特徴

図3のように3D化した建物に各種データやカメラ映像などの情報を立体的に配置する事でダッシュボードに表示できる情報量を増やしつつ、センサーやカメラの具体的な設置箇所が分かるようになります。



図3 従来の表示と3D表示の比較

図4のように個別のエリアを表示する詳細表示を使用することで建物の内部と外部の切替が可能です。これにより各種データと関連する機器・装置が建物の外部または内部にあるかを視覚的に把握できます。

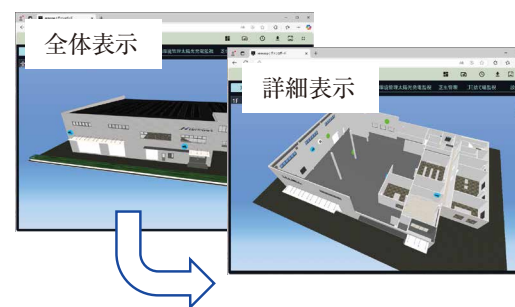


図4 詳細表示 遷移イメージ

異常が発生したエリアは警告表示されるため、一目で異常箇所が把握できます。図5では温湿度センサーの測定値に異常があった事を表しており、センサーが設置されている1階を警告表示しています。



図5 警告表示イメージ

全体表示では建物全体の監視状況をモニタリングし、詳細表示では建物内部の各種装置の配置を把握するとともに個別のデータを確認することが可能となりました。これによりセンサーやカメラの設置位置、ならびに問題の発生箇所を視覚的に特定できるようになりました。

7. まとめ

“遠隔監視”、“遠隔操作”、“データ収集”を実現したIoTシステム「remoop」に新機能として3D表示機能を追加しました。

3D化した工場や建物、各種装置にセンサーやカメラ映像などを組み合わせることで、どこにセンサーやカメラが設置されていて、どの箇所で問題が発生したかをより視覚的に把握できるようになります。

8. 終わりに

急速に発展しているWeb・クラウド技術をいち早く取り入れ、お客様へ価値あるサービスの提供を行うと共に、日工グループのさらなる発展に寄与できるよう努めてまいります。



remoop紹介動画QRコード

筆者紹介



KIMURA Takuya
貴村 拓哉
2016年入社
日工電子工業株式会社
事業推進部 開発企画課

— 製品紹介 —

日工電子製「remoop」を活用したDX工場遠隔監視システム

1. 開発背景

近年、生コン工場ではプラント本体のオペレーションが操作室（事務所）で一括管理されるようになっている。弊社の最新操作盤「CyberAdvance」も、プラントの稼働状況やアラート情報を即座に確認できる仕様となっている。しかしながら、生コン工場にはプラント本体のほか、受材設備や排水処理設備などの監視対象が多数存在し、すべての設備を一括管理することはできていない。プラント本体以外の設備は、メーカーや設置時期が異なり、多くの場合、現場での確認が必要な状況である。このような状況の中、当社はこれまでプラ

ント本体を主軸とした監視システムを提供してきた。しかしこのたび、他の設備も監視し、工場全体をトータルで監視できるシステムを日工グループである日工電子工業製のIoTプラットフォーム「remoop」を活用し、生コン工場向けパッケージとして2024年4月より販売を開始した。

2. 概要

本システムは、スマートフォン・パソコン・タブレットを使用して、現場の遠隔監視や操作が可能となる次世代のDX工場監視システムである。システムの画面イメージを図1に、特徴4点を図2に示す。

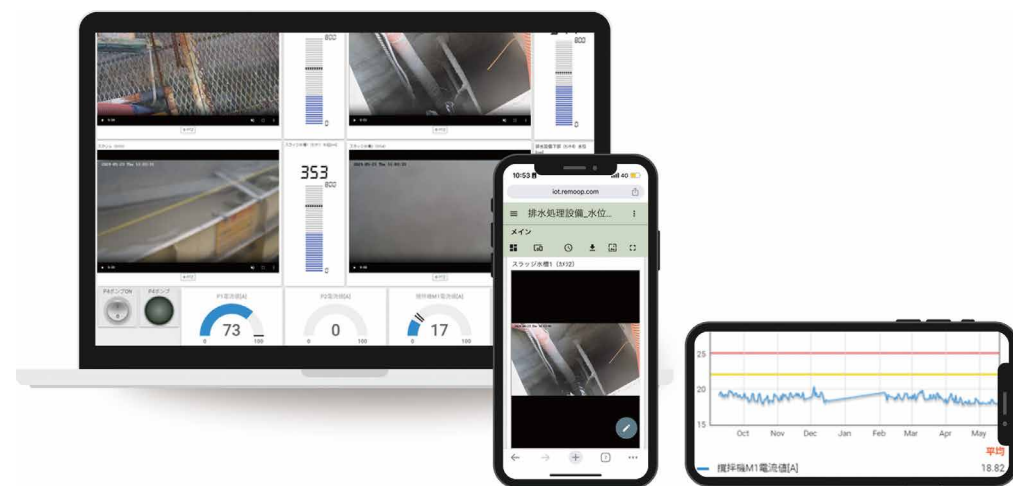


図1. DX工場遠隔監視システム画面イメージ



図2. DX工場遠隔監視システム特徴4点

本システムは、現場に設置したカメラ、センサ、動力盤などの情報を、本体BOXを介してクラウド上のダッシュボードで一元管理する。ダッシュボードは、スマートフォン・PC・タブ

レットのWEBブラウザからIDとパスワードを入力することで閲覧可能である。本システムの構成図を図3に示す。

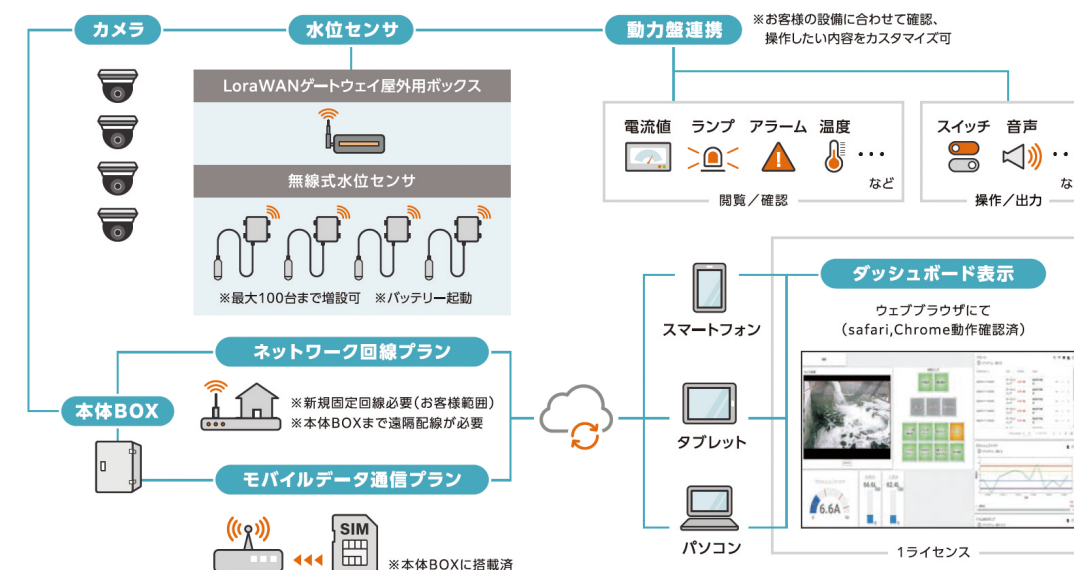


図3.DX工場遠隔監視システム構成図

3. 排水処理パッケージ仕様

標準パッケージは機械設備や水槽の水位、現場にある動力盤の情報が遠隔で監視と操作ができる機器構成となっている。標準パッケージの仕様を表1に示す。※仕様や機器の個数はお客様の要望に応じて変更可能。

表1. 排水処理標準パッケージ仕様

No	機器	個数
1	360° カメラ	4 台
2	電流計取込み	4 点
3	操作・スイッチ出力(ポンプスイッチ等)	4 点
4	非接触型水位センサ	4 個
5	サーマル信号取込み(攪拌機等)	4 点

4. 今後の展開

将来、プラント操作盤の更なる進化と、各種DX工場監視・管理システムを組み合わせることで土木用プラント国内シェアNo.1企業として、「操作盤×データ×IoT×AI」の活用におけるプラットフォーム構築を強化し、お客様の工場におけるスマートファクトリー化に貢献してまいります。スマートファクトリーの構成図を以下図4に示す。

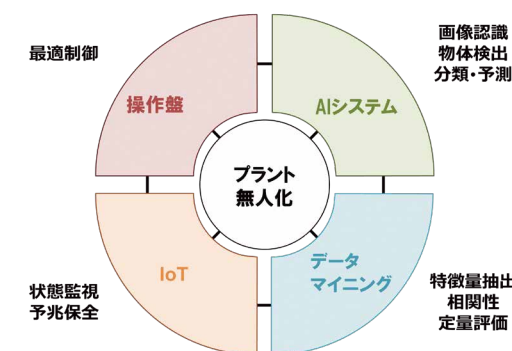


図4.スマートファクトリー構成図

筆者紹介



FUJITANI Raiki
藤谷 来輝
2012年入社
開発部 開発4課

— 製品紹介 —

前川工業所製 シングルロールクラッシャー

1. はじめに

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

その中でシングルロールクラッシャーは回転する突起付ロールと固定された受歯の間で原料を削りながら破碎します。

投入口が大きい為、大塊原料の投入が可能で出口間隙の操作により破碎後サイズの調整が可能です。

今回は、比較的軟らかい大塊原料を1台で小さく破碎することができる「シングルロールクラッシャー」についてご紹介いたします。

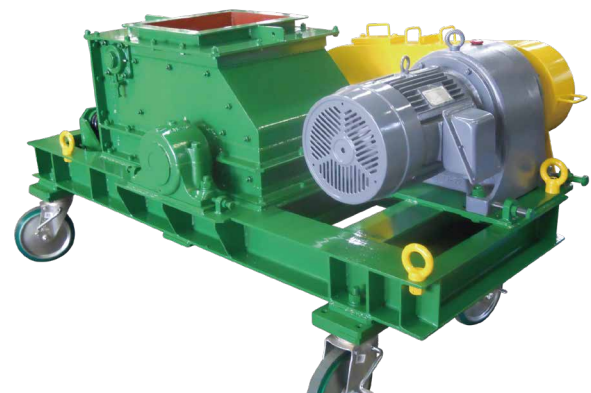


図1 シングルロールクラッシャー
SRL-1818型 外観

2. シングルロールクラッシャーの特徴

2-1 比較的軟らかい原料の破碎に使用

石炭、コークス、焼却灰など、比較的軟らかい原料の破碎に多く使用されています。

2-2 コンパクトで大塊の破碎が可能

投入口が大きく、突起付ロールと受歯の空間も広い為、大塊原料（Max200mm程度）の投入が可能です。そして、投入された原料は突起付ロールで強制的に削りながら破碎します。

2-3 省メンテナンスなシンプル構造

普段のメンテナンスは給油、給脂、各部の摩耗点検のみで省メンテナンスです。

3. 構造

3-1 全体構造

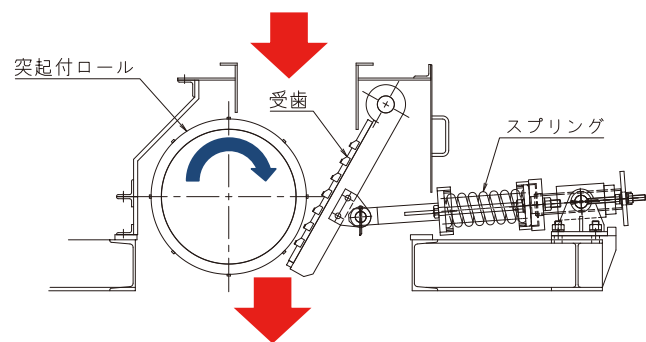


図2 シングルロールクラッシャー構造

- ・上部から投入された原料は、回転する突起付ロールとスプリングで支持された受歯の間で削られて徐々に小さくなりつつ下部の出口隙間より排出されます。
- ・スプリングで支持された受歯は異物混入や過負荷時にスプリングが圧縮し受歯が後退することで出口隙間がひろがり異物を通過させます。
- ・出口隙間により破碎後サイズが決まります。
- ・出口隙間は間隙調整ネジで調整します。

3-2 間隙調整機構

間隙調整ねじを回すことで出口間隙を調整します。

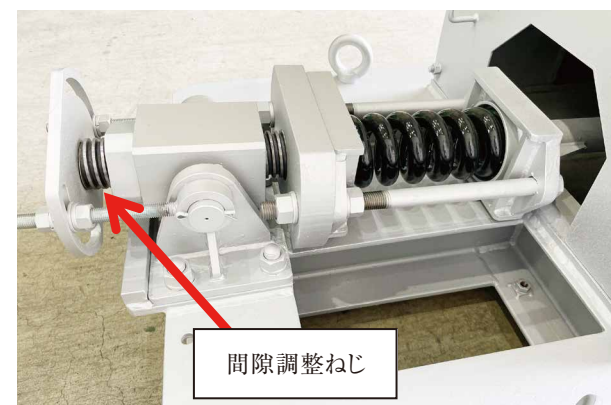


図3 間隙調整機構

4. シリーズ

型式	ロール (mm)	モータ (kW)	破碎後 サイズ(mm)
SRL-1818	φ460*460	11	15~50

※破碎後サイズは目安

5. 破碎対象物

石炭、コークス、焼却灰など、比較的軟らかい原料で、力を加えて変形しなければ破碎可能です。力を加えて曲がる、凹むもの（鉄、銅、軟質プラ、木材、ゴム等）は破碎困難です。また、水分や付着性のある材料も閉塞する為、困難です。

シングルロールクラッシャーで実績のある処理物の例を以下に示します。



図4 石炭



図5 石灰石



図6 電炉ダスト



図7 焼却灰



図8 高分子原料



図9 コークス粒塊



図10 ポリマー

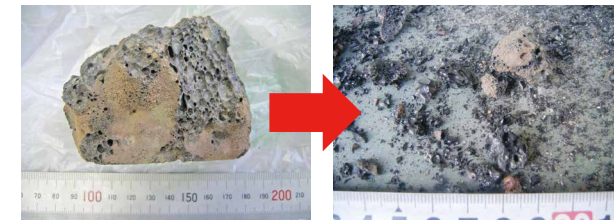


図11 クリンカ

6. 納入先

納入先事例を以下に示します。



図12 石炭



図13 石灰石



図14 電炉ダスト



図15 焼却灰



図16 飛灰

7. おわりに

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

前川工業所ではテスト機20台以上(シングルロールクラッシャーも有)を常設し、テストにて破碎後粒度、処理能力等の確認を行い破碎機の最終仕様を決定しています。



図17 常設テスト機



図18 破碎テスト風景

破碎機のお問合せの際には、下記についてご連絡ください。破碎可否ふくめて検討いたします。

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

筆者紹介



KOZAI Masahiro

小財 昌浩

1996年入社

(株)前川工業所 代表取締役社長

— 製品紹介 —

斜面ノリダー

○ はじめに

弊社の主力商品であるラクラクタラップのNETIS登録が期間終了となりました。土木現場(公共工事)におきましては、NETIS登録商品は非常に優遇されており、NETIS登録商品の有無で使用を左右される事も多々御座いました。現在も人気商品では御座いますが、より販売・レンタル促進の為、ラクラクタラップと併用できる、斜面ノリダーをNETIS登録し、スペック向上と共に新たに販売促進へ試みる運びとなりました。

今回ご紹介させて頂く、斜面ノリダーは主に土木現場での法面で踊り場として活用して頂く商品となっております。従来では足場板、単管パイプ、緊結金具等を構成して踊り場や歩廊を組み立てていました。

従来工法では部材点数が非常に多く、運搬効率や設置する際の組み手間が多くかかっておりました。

従来の組み立て方式からユニット式の一体型商品へ変更することで大幅に部材点数の削減、省人化、省力化を実現できました。また、危険箇所での長時間に及ぶ作業も軽減され安全性も飛躍的に向上することが出来ました。

近年では、人手不足が深刻で職人の確保が難しく、従来の方法では施工に時間がかかり、コスト面や生産性にも大きく影響しておりました。

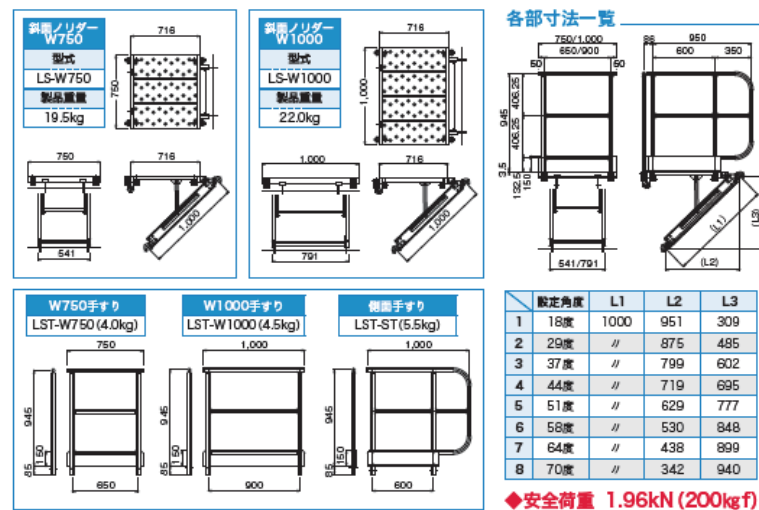
これからは少人数でも安全で時間やコストをかけずに施工できる商品が必要不可欠になっていくと考えられます。

今回の所載では進化した斜面ノリダーをご紹介させていただきます。



○ 製品概要

製品名: アルミ製傾斜自在ステージ 斜面ノリダー
 形式: 本体LS-W750 / LS-W1000 手摺 LST-W750 / LST-W1000 / LST-ST
 寸法: 本体LS-W750 W750mm L716mm / LS-W1000 W1000mm L716mm
 手摺LST-W750 W750mm H945mm / LST-W1000 W1000mm H945mm
 LST-ST W1000mm H945mm
 重量: 本体LS-W750 19.5kg / LS-W1000 22.0kg
 手摺LST-W750 4.0kg / LST-W1000 4.5kg / LST-ST 5.5kg
 安全荷重: 200kg(1.96kN)

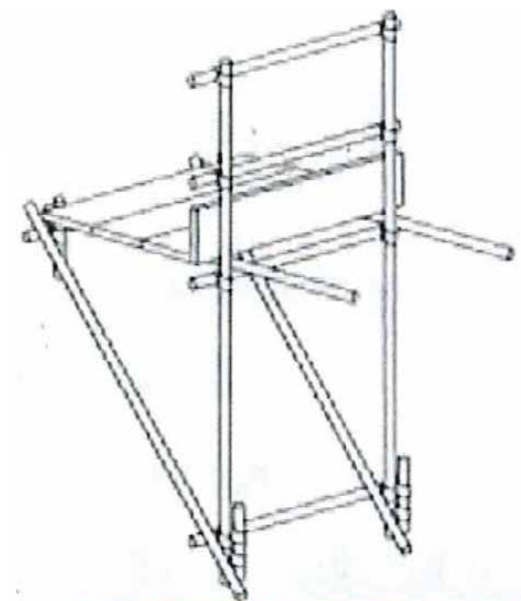


LSW-1000

○ 従来工法との比較

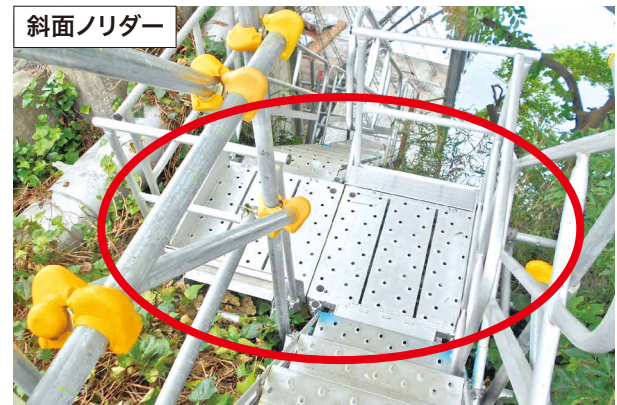


足場板、単管パイプ、緊結金具で構成された踊り場となります。急斜面での作業となり、危険が伴います。また、部材点数が多いので作業時間はかかります。



<必要部材>

単管パイプ(2.5M)×4本
 単管パイプ(1.5M)×2本
 単管パイプ(1.5M)×5本
 幅木×1枚
 緊結金具×18個
 足場(1M)×3枚
 くい単管パイプ×4本



杭と単管パイプで地面に固定し、斜面ノリダーを設置して完成となります。手摺に関しては、ソケットにはめ込むだけで設置が出来るので組み立てる必要がありません。



<必要部材>

斜面ノリダー×1台
 手摺×1本
 単管パイプ(1.5M)×2本
 緊結金具×4個
 くい単管パイプ×4本

— 製品紹介 —

アスファルトプラントのグローバル戦略機種 ACE-130

1. はじめに

2020年タイ王国に販売・メンテナンスを行う現地法人 Nikko Asia (Thailand) Co., Ltd.及び製造を行う現地法人 NIKKO GLOBAL MANUFACTURING (THAILAND) CO.,LTD.(旧Nikko Nilkhosol Co.,Ltd.)が設立され、日工株式会社として日本・中国(上海)・タイと製造拠点が3か所になりました。

タイへの進出は、タイ国内を中心としたASEAN地域への日工製アスファルトプラントの販売拡大を目的としています。2020年はコロナ禍でもあり我々技術部が現地へ入ったのは2022年5月になってからでした。そこから現地プラントの調査、購入品メーカーへの訪問などを行い、これから紹介するグローバル戦略機種 NAP.ACE-130 を設計しました。

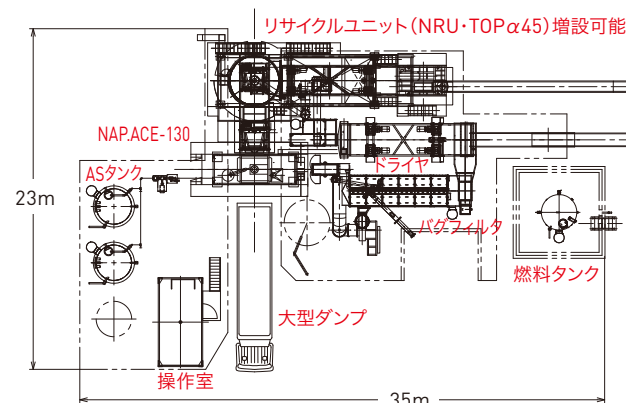
2. 製品概要

- ・プラント最大能力:128t/h
- ・骨材昇温:20℃→170℃(Δ150℃)
- ・骨材含水比:4%
- ・ミキサ容量:1,600kg/B
- ・バッチサイクル:45s/B (80B/h)

プラントレイアウトの見直し

日工の特徴でもあるBonDスタイル (Bag on Dryer)の見直し。重量削減を目的としてバグフィルタの架台を無くしました。また、本体タワーとドライヤユニットを平面上、直角に配置するL型から平行に配置するI型を標準配置としています。

今後、ASEANにおいて道路廃材の再資源化が急激に進んでいくことを予想し、リサイクル設備をコンパクトに増設することが可能となっています。



プラットフォームの見直し

従来、日工には海外戦略機種としてCBDシリーズがあり、60t/h～120t/hのラインナップでした。

今回はまず、グローバル戦略機種として、ACE-130とACE-160、この2機種の共通化を進めながら設計を行いました。

これは、タイ現地工場での標準品先行生産を視野に入れ、共通部分を多くすることで短納期への対応も可能と考えています。

また、フレーム設計に関わる設計条件も現地設計基準やライバルメーカーの仕様なども調査し、グローバル基準として「地震加速度」・「水平震度」・「風荷重」・「積雪荷重」を決定しています。例えば、積雪荷重は0(ゼロ)としています。

これらにより、本体フレームの部材を下げることに成功しています。



初号機のプラント全景(フレーム部材見直し)

購入品の現地調達

NAP.ACE-130では、購入品についても現地調達が出来るよう事前調査を行いました。プロジェクト的に“購入品調達部隊”をつくりタイ国内以外に台湾へも調査を行いました。

主な現地調達品として、集塵機用の排風機は、タイメーカー「Euro Vent (TNグループ)」製を採用。電動機については、汎用モータは「SIEMENS」・ギヤードモータはインドに製造拠点をもちタイに組立工場がある「RADICON (PLB)」というメーカーを採用しました。エア機器については、台湾メーカーである「Air TAC」を採用しタイ代理店より購

入しています。

これにより、日本からの持ち込み費用の削減や現地でのメンテナンスにも対応できるようにしました。



現地調達(Euro Ventの排風機)

新たなチャレンジ

今回、新機種を設計する際に新たにチャレンジしたことを1つ紹介します。

従来のアスファルトプラントでは、約160℃に加熱されたアスファルトを計量器にて計量した後、噴射用のポンプにてミキサ内に投入します。この機種は噴射ポンプを廃止し、計量器から自重落下にてミキサ内へ投入する方式へと変更しました。海外メーカーでは既に採用されていますが、日工では初めての採用のため社内テストを行い、配管径などを決定しプラントのバッチサイクルに影響がない形状としています。

ここでも、噴射ポンプを無くすことによるコストダウンを実現しています。



AS噴射ポンプレス

3. おわりに

今回は機械装置の紹介となりましたが、これ以外に制御設計においても動力盤の現地製作にも取り組んでいます。現地製作会社での製品精度や品質の違いなどから苦勞も多くありますが、完成度を上げるべく日々努力しています。

このプラントは現地法人の協力無くしては完成しなかったものであり大変感謝しています。

これからも日工グループ全体が世界で戦えるグローバル製品の設計・開発に挑戦し続けます!



かぼちゃ畑に建つ初号機(ドローン撮影)

筆者紹介



HAMAGUCHI Junji
濱口 準司
1993年入社
プラント開発部
グローバル戦略課

— 製品紹介 —

KLEEMANN製自走式インパクトクラッシャ 「MR100i NEO」

1. はじめに

当社は、ドイツの世界的な破碎機メーカーであるKLEEMANN社の自走式破碎機を国内総代理店として販売している。今回は、同社のインパクトクラッシャについてご紹介する。

KLEEMANN社のインパクトクラッシャには、代表的な「MR110i EVO2」と新しい小型機種「MR100i NEO」の2種類がある。「MR110i EVO2」は、KLEEMANN社の代表的な機種で、その高い性能と信頼性により、世界中で広く使用されている。一方、近年の市場では、より効率的で小型化された機械へのニーズが高まっている。これに応える形でKLEEMANN社は、新たに小型インパクトクラッシャ「MR100i NEO」を開発した。この新機種は、コンパクトながら高い性能を誇り、2025年5月には日本に初号機が到着予定である。今回は、その「MR100i NEO」について詳しく紹介する。



図1 MR100i NEO(の図)

2. CFS(連続供給システム)

CFS(連続供給システム)とは、破碎機内に安定的に材料を供給するためのシステムである。このシステムは、破碎機内の充填レベルを検知するために、ローターの負荷およびエンジンの負荷を監視している。その結果、振動フィーダの周波数を制御し、供給過多や供給不足を防ぐことが可能である。これにより、クラッシャの使用率を最適化できる。

つまり、CFSは機械が常に一定量の材料を供給するため、オペレーターが供給量を手動で調整する必要がなくなり、作業が容易になる。



図2 CFS(連続供給システム)(の図)

3. 駆動

KLEEMANN製自走式破碎機の特長は、①低燃費、②破碎能力の高さである。本機械も同様の特長を備えており、電気駆動とエンジン駆動の2種類の駆動方式を選択できる。

- ・電気駆動：発電機を搭載しており、フィーダや破碎機などすべての装置は電気で稼働する(走行とセットアップを除く)。また、外部電源からの供給による稼働も可能である。
- ・エンジン駆動：エンジンから流体カップリングを介してVベルトダイレクトで破碎機を稼働させることにより、低燃費を実現する。フィーダや磁選機などは電気駆動である。

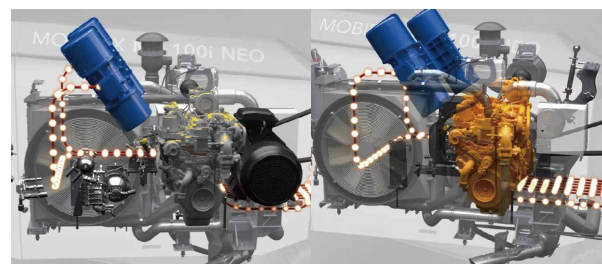


図3 電気駆動、エンジン駆動(の図)

4. 破碎機

4つのローターで構成されており、破碎物に応じて材質や長さを変更することができる。破碎機出口(下部)は広めに設計されており、材料や鉄筋の詰まりを軽減する。

ゼロポイント調整機能が備わっており、毎朝稼働する前に使用することで、摩耗しても常に同じギャップ値に設定できる。これにより、常に同じ大きさに破碎することが可能となる。また、過負荷保護装置により、破碎不可能な異物が混入した場合、インパクトトルグが開き異物を排出する。その後、自動的に元のギャップ値に戻る。

5. セカンドスクリーン

4㎡のスクリーン面積を備えた1床式スクリーンで、最終製品とオーバーサイズを選別する。セカンドスクリーンに付属するリターンコンベアにより、オーバーサイズをホップに戻し、再破碎が可能である。リターンコンベアは180°旋回し、ホップに戻すだけでなく、別の場所へ排出することも可能である。オプションでウィンドシフターを装着することができ、オーバーサイズのゴミを風で飛ばして取り除くことで、人による分別作業を減らし、最終製品の品質を向上させる。

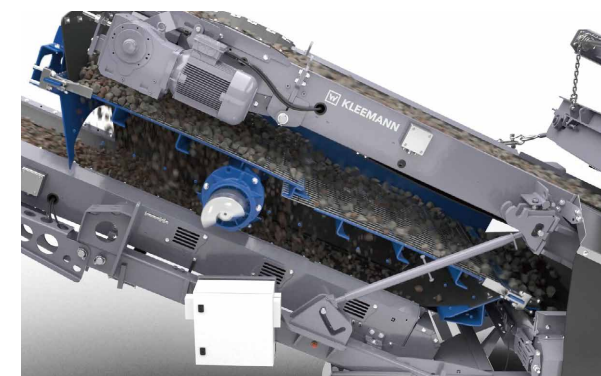


図4 セカンドスクリーン(の図)

6. 安全性

メンテナンスに関連するすべての場所はアクセスが簡単で、迅速かつ安全に点検が可能である。また、機械には安全装置が装備されている。例えば、ローターを交換する際、内部には回転する部品があるため、作業中に誤って稼働ボタンを押すと非常に危険である。そのため、作業手順を1つずつ踏まない限り、破碎機内部は開かないようにロックがかかっており、厳重に管理されている。これにより、安全性は非常に高い。また、機械を稼働させる前には必ず警告音が鳴るなど、安全に関する意識が非常に高い設計となっている。そのため、安全に稼働させることができる。



図5 破碎機開口時の安全装置(の図)

7. 制御

基本的な操作は、機械に付いているパネルで行う。このパネルでは、エンジンの稼働、自動運転、回転数の調整などが可能である。さらに、無線リモコンがあり、走行や機械のセットアップ、破碎機のギャップ調整といった稼働に関する調整が可能である。無線で操作できるため、機械から離れて操作することで安全性が確保される。



図6 操作関連(の図)

8. メンテナンス

メンテナンス体制のさらなる強化を目指し、KLEEMANN社が提供するサービスシステム「WITOS」に加え、独自のアプリケーション「NM LINK」を開発した。

「WITOS」はKLEEMANN社が提供するシステムで、全機種に標準搭載されている先進的なサービスシステムである。このシステムは、機械の状態をリアルタイムで監視し、さまざまなデータを記録・集計・レポートする機能を備えている。これにより、お客様は機械の重要な情報を迅速かつ効率的に把握できる。この先進的なサービスシステムを活用することで、お客様は機械の運用をよりスムーズに行い、長期的なコスト削減と運用効率の向上が期待できる。

また、「より安全で、迅速かつ正確」なメンテナンスサービスの提供を行うため、「NM LINK」の開発・運用を進めている。本サービスには、以下の4つの機能が搭載されている。

1. 映像マニュアル、2. 資料ファイル、3. トラブルシューティング、4. 機体管理。

今後はアプリを利用して、現場での作業効率を向上させるとともに、最新の情報提供を通じてサービスの質を高めていく。



図7 NM LINK(の図)

The cover of the Nikko Technical Report No.006 features a wide-angle photograph of a multi-lane highway stretching towards a dense urban skyline. The skyline is dominated by several tall, modern skyscrapers, including the Burj Khalifa, under a clear blue sky. The road is flanked by greenery and palm trees. A large, semi-transparent purple circle is overlaid on the right side of the image. The title '製造設備紹介' is written in large white Japanese characters, and 'MANUFACTURING EQUIPMENT INTRODUCTION' is written in smaller white English characters below it. At the bottom left, the text 'NIKKO TECHNICAL REPORT NO.006' is displayed in white. At the bottom right, there is a stylized logo consisting of four intersecting lines forming a star-like shape, and the number '72' is printed in the bottom right corner.

製造設備紹介

MANUFACTURING EQUIPMENT
INTRODUCTION

NIKKO TECHNICAL REPORT NO.006

72



— 製造設備紹介 —

BWライン付帯設備更新

1. はじめに

アマダ製ビームワーカー（以降BWと呼ぶ）は、アングル（L）やフラットバー（FB）の穴明け切断を行っており、30年以上前から、日工では大活躍している重要な生産設備です。材料の供給と一次加工はモノづくりの一番初めの工程であり、迅速に安定した材料供給が、一次加工（切断+穴明け）の生産性に影響します。また、材料供給にトラブルが発生すると、一次加工が遅れ、各モノづくり職場への供給が滞り、工場全体の生産に大きく影響することから、短時間でも止めることができない設備です。今回、BWの老朽化更新を機に、BWへの材料供給設備も更新しましたので紹介します。

2. 材料供給の既設設備



図1 既設素材供給装置 図2 既設素材運搬台車

これまで条鋼材料の一次加工であるBWラインは2台体制で、2台のフル稼働で、ギリギリ工場全体への一次加工品の供給が間に合う状態であった。1台のBWがトラブル停止した場合、残りの1台では、到底処理能力は追いつかない状態であり、設置スペース的にも3台設置は出来なかったため、数十年来2台体制で、職場としてはトラブルの度に超過残業をしても追いつかない状態で苦勞していた。この状況を解決する為、BW更新の機に設置レイアウトを工夫し、BW3台体制で円滑に生産できるように、材料供給も含め検討を重ねた。図1の青い設備が既設の2台体制時の素材供給装置であり、定尺材をBWの加工台に乗せるための設備である。図2の設備が、定尺材を素材供給装置の下まで運ぶ運搬台車である。今回この2種の入替をメインとした付帯設備入替工事を行った。

3. 素材供給装置の入替

3.1 解決すべき問題点

- ①3台目のBWの設置スペースの確保
- ②供給装置架台の構造変更
- ③BWの稼働を停めない設備入替
- ④天井双頭クレーン3ton+3tonのペンダント干渉

上記4点が、BW3台体制実現の為に解決しなければならぬ大きなハードルでした。

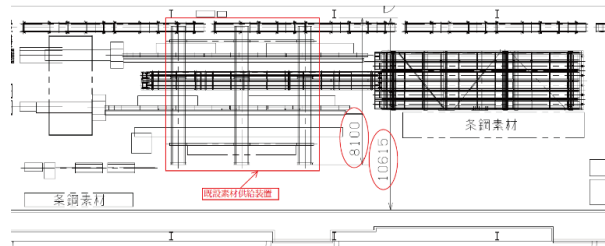


図3 既存供給装置平面図

定尺材の置場を考えると、別工場に置くのは場所を取り過ぎてしまう問題があるので現実的ではなく、現状の場所に置くにしても図3のように2台体制の既設供給装置では3台は到底入らない。

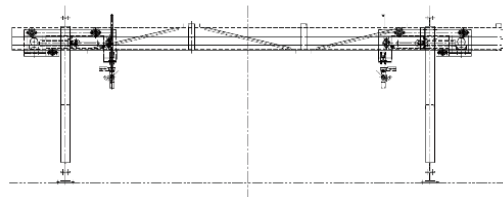


図4 既存供給装置正面図

また、図4のように脚が付いている構造では、これ以上広げると梁部がたわみ折れる危険性が増し、脚を間に増やしてしまうと複数台での材料共有ができなくなる為現実的ではなく、構造の大幅な変更が必要になりました。

3.2 問題の解決方法



図5 新規供給装置架台 図6 無線化天井クレーン

日々どうしようか頭を悩ませながら色んな人に相談する中で、メンバーの「柱を使ったらどうかな?」という一言で方針が決まり、図5のように架台フレームを建物柱に持たせる事で、脚の要らない構造にする事ができ、①②の解決に繋がった。

また、柱に持たせているので任意の高さに設定することが出来、既設設備の上に渡らせることで稼働を停めない入替が実現できた。この架台一つで①②③の問題が解決した。次に、双頭クレーンを無線化するにあたり、3ton+3tonの計6tonを無線化するとクレーン運転士の資格が必要となる為、床上操作式クレーンの資格で作業が出来るよう、2.4ton+2.4tonの計4.8tonにホイストを入れ替え5ton未満のクレーンとする事で無線化を実現。これにより④のペンダント干渉を解決する事が出来た。

3.3 素材吊上マグネット装置

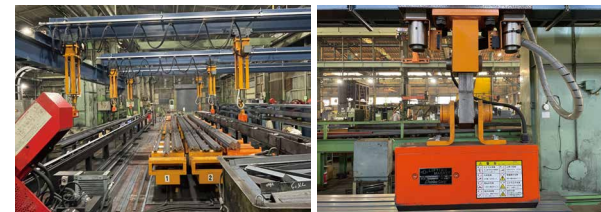


図7 素材吊上装置 図8 素材吊上マグネット

既設に対し架台部が大きく変更した為、素材を1本ずつ吊り上げる装置の構造変更も必要になった。既設は図4のようにシリンダーを横に寝かせてチェーンで上げ下げする方式で、横方向にスペースを取った構造であった。新設備では3台並べる関係上、同じ構造では移動範囲に制限が発生してしまう。新たな架台部の構造において、既設設備の上に渡らせたことで高さ方向のスペースが取れた為、新構造ではシリンダーを上下方向に設置し、マグネットを直接上下させる方式とした。新構造の外観を図7に示す。図8に示すのは素材吊上装置の下部の構造で、電磁マグネット部にあたります。このマグネットは電磁力を変化させ、積み重なった鋼材でも1本だけを吊り上げられる優れたものです。マグネットでの吊り上げは既設でも行っていたが、今回導入した物は停電時でも磁力が継続する安全にも配慮した物を選定しました。

4. 素材運搬台車の入替

4.1 要求事項

既設の運搬台車は、大きな架台の上を台車が走行も横行もする非常に効率的で使い勝手の良い設備でした。しかし、凝っているからこそその弊害でメンテナンス性に難があり、経年劣化で設備に不具合が起こってからは修繕も出来ず走行しか出来ない設備となってしまうていた。そこで、入替にあたり下記のような要求事項が発生した。

- ①メンテナンスしやすい構造であること
- ②現状と変わらない量を運搬できること
- ③架台方式でなく、台車全体が動く構造である事。

これらをクリアした物が図9と図10に示した運搬台車である。設備に何かあった際でも単独で取り外しが出来、メン

テナンスも容易。ガイドレールはありますが高所作業車が侵入する事も可能である。今後運用していく中で改造もしやすいシンプルな構造としました。

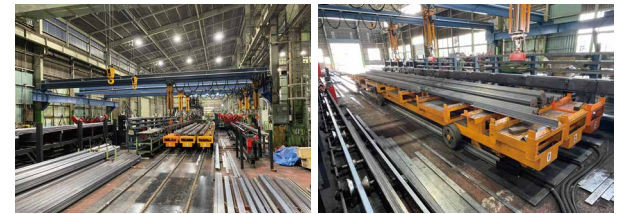


図9 素材運搬台車 図10 素材運搬台車アップ

5. 制御装置

今回の設備入替に伴い、制御装置も一新した。外観を図11と図12に示します。



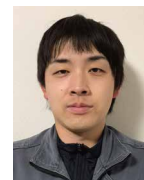
図11 制御盤 図12 手元操作スイッチ

既設の設備では、全てのモータが開閉器直で、急稼働・急停止の制御であった。その為、マグネットの位置調整が難しく積んである条鋼材が崩れる事も稀に発生していた。そこで新制御では、素材供給装置の横行と素材運搬台車の走行をインバータ制御とし、滑らかな動きで微調整をしやすいしました。また、手元スイッチを各BWに配置し、全付帯設備が1つの盤で操作出来るように改善した。

6. 終わりに

BWの納期の都合上、まだ3台目は納入されておらず完成には至っていない為油断は禁物ですが、3台目納入に備えた今回の1期目工事を問題なく完工する事が出来たのは非常に嬉しく思います。今後も製造設備の面で、より良い製品を納期通りにお客様へ提供できるよう尽力していきます。今回設備入替にご協力くださった製造本部の皆様、短納期にご対応頂いた業者の皆様に感謝申し上げます。今後も随時設備更新を行っていきますので、引き続きのご協力をお願い致します。

筆者紹介



TANAKA Takahiro
田中 隆浩
2015年入社
製造本部
本社工場 生産技術室

MEMO

NIKKO 企業理念



VISION

実現したい未来

世界を、
強くやさしい街に。

SLOGAN

合い言葉

*N*からはじまる
未来創造

MISSION

日々果たすべき使命

一歩先ゆくエンジニアリングから、
社会基盤をアップデートする。

VALUE

提供価値

1. 全ての製品サービスで、安全安心を追求します。
2. お客様視点で、真の課題を捉え提案します。
3. 社会や時代の先を見すえ、技術を磨き続けます。
4. お客様に寄り添い、未来までサポートします。
5. エンジニアリング力を結集、期待を超えます。

社是

創業時から変わらぬ価値観

- ・企業を通じて社会に奉仕する。
- ・誠実と責任感を持って繁栄に邁進する。
- ・創意工夫改善に努め適正利潤をあげる。

SPIRIT

大切にすべき精神

1. 仕事をおもしろくする。
2. 目的を意識する。
3. アイデアを出す。
4. 恐れず挑戦する。
5. 最後までやりとげる。
6. 時間を大切にする。
7. 相手を想い対話する。
8. 仲間を助け高め合う。
9. 内外から幅広く学ぶ。
10. 嘘なく真摯に取り組む。
11. 心身のゆとりを持つ。
12. 安全を最優先させる。

編集後記

先ずは、「日工テクニカルレポート Vol. 6」を発刊するにあたりまして、ご多忙中にもかかわらず巻頭言をご執筆頂きました京都大学特定教授の瀬尾様、並びにご協力頂きました関係者の皆様方には、この場をお借りして厚く御礼申し上げます。

日工グループにおきましては、ビジョン（実現したい未来）として『世界を、強くやさしい街に。』掲げており、それを実現するために優先的に取り組むべき重要課題（マテリアリティ）として、例えば「カーボンニュートラルの実現」、「資源循環型社会の確立」、「激甚災害からの早期復興」などを定めております。

日工グループでは、今年度より新中期経営計画（2025～2027年度）がスタート致しますが、上記各重要課題の解決に向け、新規技術の開発および新規製品の社会実装を今以上に推し進めてまいります。

「日工テクニカルレポート Vol. 6」には、上記新規技術・製品等につきまして詳しく掲載しておりますので、是非ご覧頂ければと存じます。

なお、本年度の10月には社内展示会『NIKKO MESSE 2025』を予定しており、そちらでも新規技術・製品等の展示、ご紹介を計画しております。皆様のお越しを心よりお待ちしております。

日工株式会社
会社情報



日工テクニカルレポート 第六号

令和7年4月発行

〈非売品〉

編集兼発行

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

印刷所

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



営業品目

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