

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バ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、バ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。

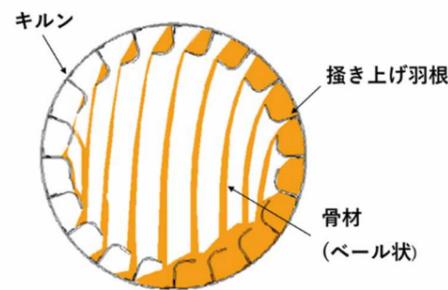


図-1 キルン内部の骨材分散形態

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。

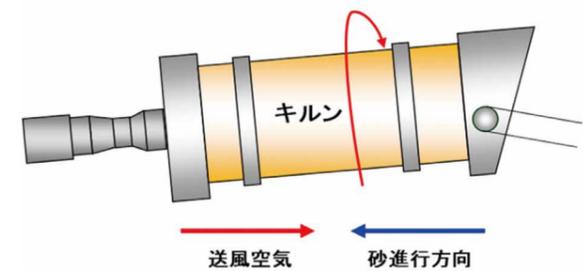


図-2 キルンのイメージ

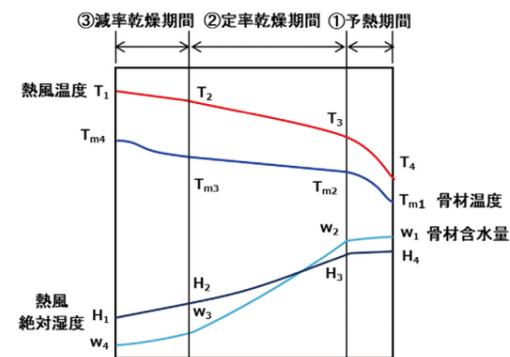


図-3 熱風におけるキルン内の状態²⁾

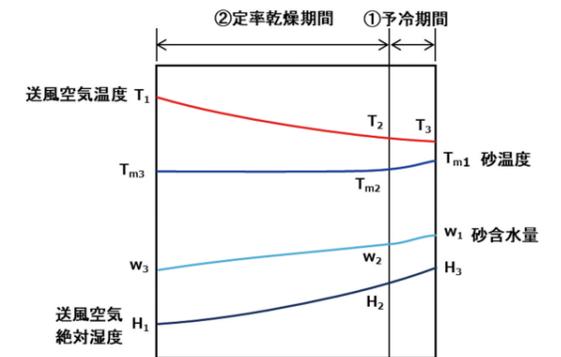


図-4 常温の送風におけるキルン内の状態

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、掻き上げ羽根からボ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。

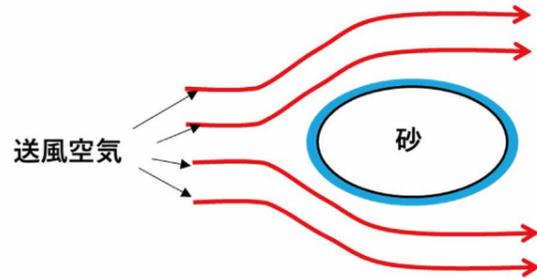


図-5 接触イメージ

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ボ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。

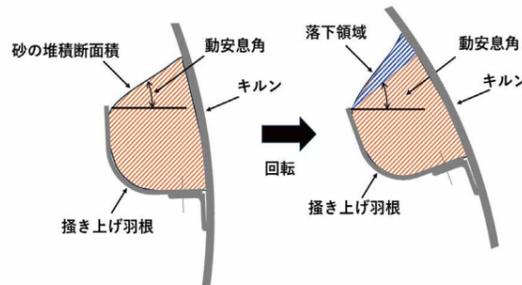


図-6 砂の落下領域①

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。

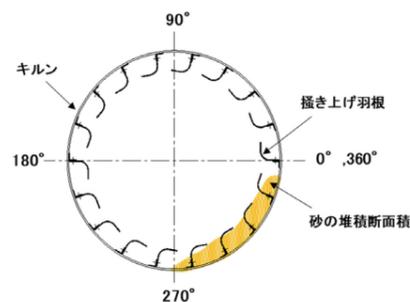


図-7 キルン内部の砂堆積断面

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

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。

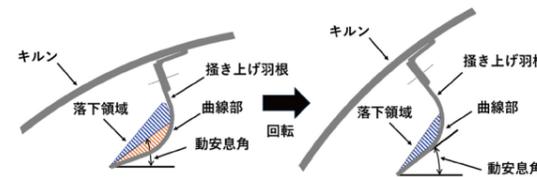


図-8 砂の落下領域②

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枚あたりにボール状で落下する砂の片側表面積を a_i とすると、掻き上げ羽根からボ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)

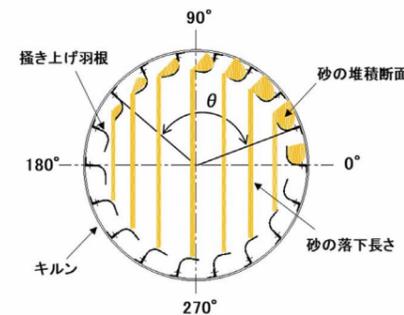


図-9 砂の落下範囲

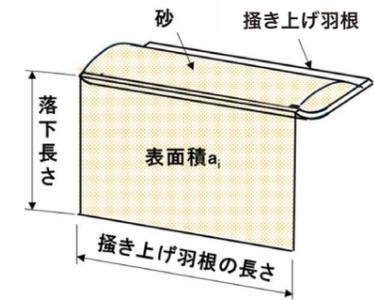


図-10 砂の表面積

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。

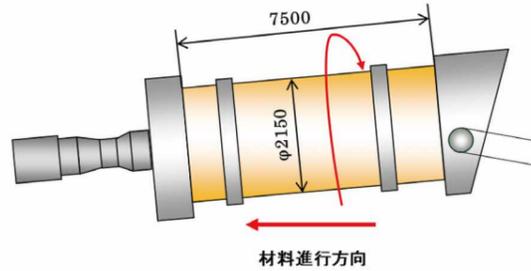


図-11 キルンの概要

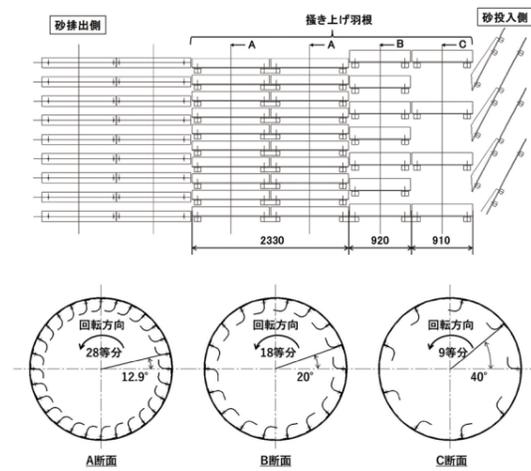


図-12 掻き上げ羽根配列

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 ²)
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ことと考える。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 Heat 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