

（第13回）2017年度・研究助成報告

研究題名	粉体反応プロセスの離散要素解析モデル開発
研究期間	2017年4月1日～2019年3月31日
研究機関・所属 研究者名	東北大学 多元物質科学研究所 埜上 洋

1. 2017（2018）年度研究成果の概要

本研究ではロータリーキルンを対象として、内部の個別粒子の運動を追跡する離散要素法と連結する伝熱モデルの開発を行った。モデルは計算時間短縮のため、キルン内で支配的な伝熱機構を抽出して運動解析と連結して構成した。

実験室レベルの小型の低温キルン装置を構築し、粒子の昇温実験を行った。実験では、装置内部の個別粒子の運動の観察を行うとともに、複数の粒子の温度変化を追跡して粒子の平均昇温速度やばらつき、粒子混合と温度履歴の関係を明らかにした。低温キルン装置内の粒子挙動を上記伝熱モデルで解析した。その結果、上記モデルはキルン内での粒子の昇温挙動を再現できており、モデルの妥当性を確認した。

2. 助成期間内での研究成果の概要

1. はじめに

セメント製造、石灰焼成やペレット熱処理などに用いられるロータリーキルンは傾斜した横型回転炉で、キルン上端から装入された原料粒子は回転する炉体内を移動する間に昇温、反応、混合され、下端から排出される。粒子の炉内滞在時間、加熱や反応の履歴にはばらつきがあり、品質保証の観点から熱源量や滞在時間を過剰に設定しているのが現状である。プロセスの省エネルギー・省コスト化のためにはキルン内部の粒子運動および伝熱を定量的に把握する必要がある。そこで本研究では離散要素法による粒子運動と伝熱の追跡連成したキルンプロセスの伝熱解析モデル開発を行い、また研究室レベルの低温キルン装置を作成して内部の粒子の昇温実験を行った。

2. 低温キルン装置を用いた粒子昇温挙動測定

ロータリーキルン内の粒子の温度変化を定量的に評価するため、キルンを模擬した冷間モデルを作製し、粒子温度測定実験を行った。熱媒体に温水を使用し、加熱時の粒子温度の変化を、粒子内に設置した温度計測素子を用いて計測し、また外部から粒子の運動を測定し、粒子の層内位置と熱の授受の関係等を評価した。

2.1 実験装置

ロータリーキルンを模擬した冷間モデルの構成図を Fig. 1 に示す。実験装置はロータリーキルン、貯水槽 (200 L)、温水循環装置 (東京理科機械製, HS-8, 8kWh)、ポンプ、10 L 流量計および K 型熱電対から構成される。温水循環装置で常温水を 65 °C に加熱し、貯水槽に貯水した水と循環させて温水を連続的にキルン内に供給した。K 型熱電対を Fig. 2 に示すキルンの入口、中央、出口の 3 か所に設置した。測温点はバツ印で示し、温度計測装置で 3 か所の温度の出力および記録を行った。また温度計測素子を金属棒の先端に取り付けて流入口、流出口の 2 か所に設置した。K 型熱電対はキルン中央温度を測定可能な点とより精度の高い温度測定が可能な点の 2 点を考慮して設置し、温度測定素子の金属棒は測定粒子と同様の温度計測機器でキルン内温度を測定する目的で設置した。スチールウールはキルンの入口に導入し、温水をキルン長手方向に均一に流通させた。

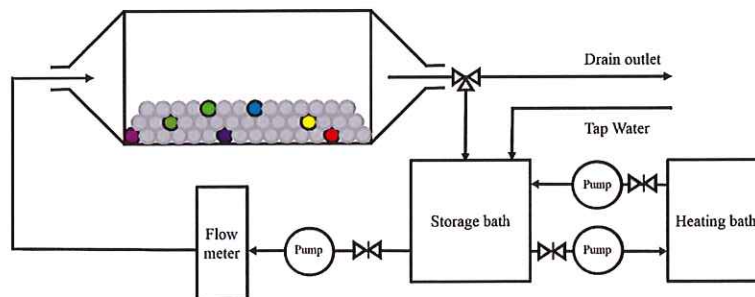


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

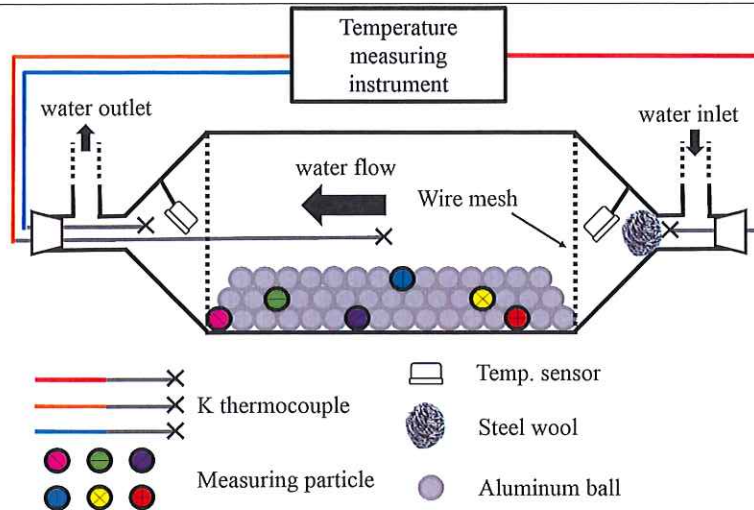


Fig. 2 Schematic diagram of rotary kiln

本実験ではキルン内に充填する非加熱粒子は直径 20 mm のアルミニウム球とした。昇温実験においてはこのアルミニウム球に測温粒子を混入して粒子の温度変化を測定した。この測温粒子はアルミニウム球に温度ロガー (サーモクロン, KN ラボラトリーズ製) 挿入したものである。温度ロガーは直径 16 mm×厚さ 6 mm、重さ 3.3 g で、内部に温度センサー、メモリーおよびバッテリーが内蔵されており、外部から給電・配線なしに単独で任意の間隔で温度記録が可能なのである。昇温実験終了後に測温粒子をキルンから取り出し、接続ケーブルでパーソナルコンピューターと接続して測定した温度履歴を抽出した。

2.2 実験結果

結果の一例として直径 20 mm のアルミ球 255 個および測定粒子 45 個の計 300 個をキルン内に装入し、キルン内に室温の水を満たした状態から 65°C の温水を 8.0 L/min の流量で流通させた際の、測温粒子 45 個の平均温度の経時変化を Fig. 3 に、45 個の測温粒子から任意に抽出した 4 つの粒子の個別の温度経時変化を Fig. 4 に示す。なお、ロータリーキルン回転数は 3.0 rpm である。Fig. 3 に示した平均温度は滑らかに上昇し、温水温度に向かって漸近していくのに対し、任意に抽出した 4 粒子の温度はそれぞれ異なる温度上昇挙動を示した。平均温度の立ち上がりが遅い理由は長さ 32 cm のキルン内を温水が約 4 cm/s で流れており、キルン内部が完全に常温水から温水に切り替わるには一定時間がかかるためである。粒子 P1 は他の粒子に比べて初期の温度立ち上がりが早い、その後の温度上昇は小さかった。一方、粒子 P4 は他の粒子と比較して立ち上がりは遅いものの、150 s 付近で急激な温度上昇を示し、4 粒子の中で最も高温となる時間帯も存在した。このような粒子毎の温度上昇挙動に違いが生じる理由は粒子の層内位置やキルン長手方向の位置の違いが

あるためと考えられる。

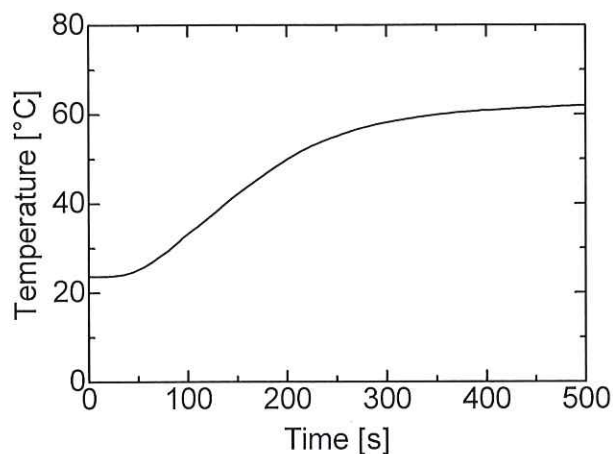


Fig. 3 Average particle temperature at 3 rpm

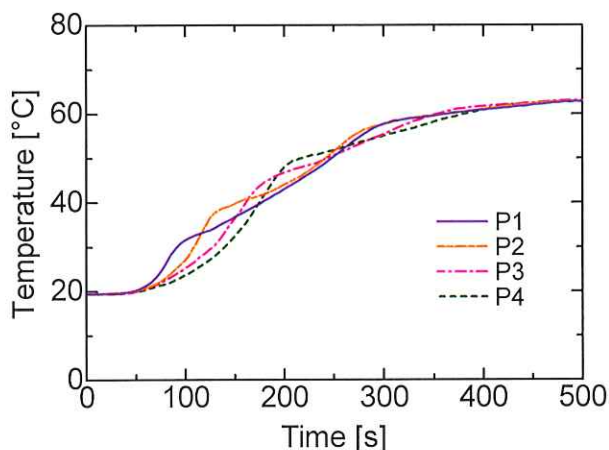


Fig. 4 Individual particle temperature

粒子の平均温度、最大温度、最小温度、最大温度差および標準偏差の経時変化を Fig. 5 に示す。図示された最小温度は平均温度同様に滑らかに上昇していくのに対し、最大温度は不規則な変化となっている。最大温度差は 50 s 付近から急激に上昇し、120 s 時に最大値 13.5°C に達し、その後は緩やかに小さくなっていく。この傾向は標準偏差も同様で 50 s 付近から急激に上昇し、120 s 時にピークの約 3.5°C となり、その後は緩やかに小さくなっていく。初期には室温で一様な温度だった測温粒子が温水から熱を受け取ることで温度が上昇していく。しかし粒子充填層の底部の温水流量は小さく、この領域に位置する温度の上昇幅は非常に小さい。一方、粒子層表層の粒子はキルン内を流通する高温の水流から熱を受け取るため、昇温が速い。キルン本体の回転により、粒子は粒子層内の一を変化させるため、粒子間で温度のばらつきが生じるようになる。しかし時間の経過とともに測温粒子は次第に温水温度に近づいていくため、測温粒子と温水温度の差は 120 s 時のピークを過ぎた

後、徐々に小さくなり、最終的に 0°C に収束する。

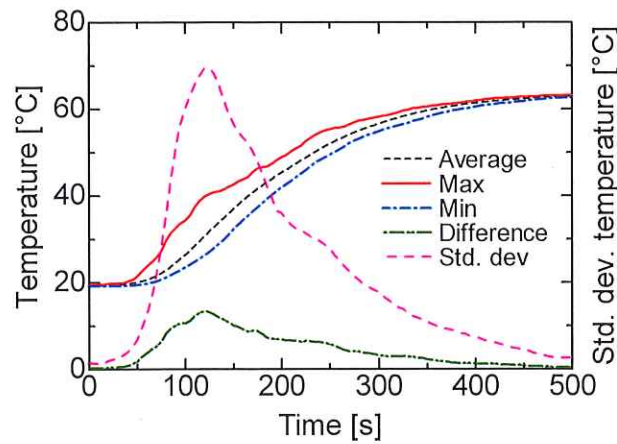


Fig. 5 Change in average temperature of particles, maximum temperature, and minimum temperature

Fig. 6 に粒子温度分布の経時変化を示す。時刻 0 s ではすべての粒子の温度は 19.5°C 付近でほぼ均一となっているが、時間経過とともに分布幅が大きくなっている。100 および 150 s で温度幅が大きくなっており、Fig. 5 で示したように 120 s 付近でばらつきが最大になることと一致する。全体の傾向としては温度の分布幅は時間経過にともなって拡大、縮小し、最終的に温水温度に収束する。

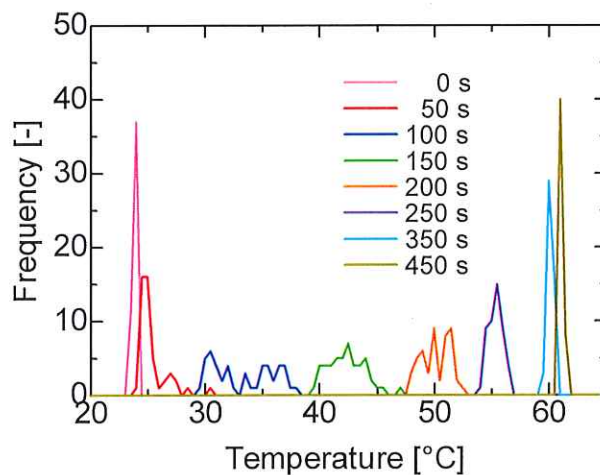


Fig. 6 Changes in temperature distribution of particles with time

Fig. 7 に各回転速度における粒子の平均温度の変化を示す。回転速度が速いほど、昇温速度は速く、温水温度に到達する時間が短いことが確認できる。これは回転速度が大きいくほど、内部の粒子の混合がより活発になり、粒子が表面に露出する頻度が高くなり、温水からの熱を効率よく受け取るためと考えられる。また 4.0 rpm 以上は同じような傾向を示した。

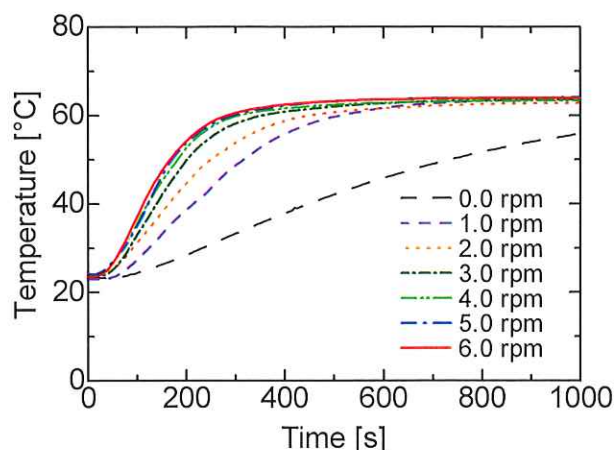


Fig. 7 Temperature variation of particles in each rotational speed

粒子温度の標準偏差の経時変化を Fig. 8 に示す。回転速度増加に伴い、ばらつき、すなわち標準偏差が減少している。これは前述のとおり、回転速度が大きいほど粒子混合が激しくなり、温水と接触する表層粒子が効率よく更新、すなわち最適な熱交換が行われるためばらつきが小さくなると考えられる。また 4-6 rpm ではいずれも標準偏差の最大値は約 1.8°C で、標準偏差の違いはほとんどないことが改めて確認できた。そして全く回転させない 0 rpm と 4 rpm 以上を比較すると、標準偏差は約 5 分の 1 まで減少することが明らかになった。

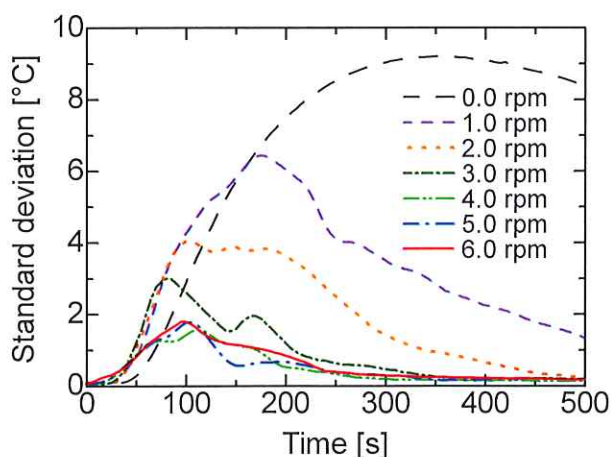


Fig. 8 Standard deviation of particle temperature at each rotational speed

3. 数値解析

3.1 粒子運動および伝熱モデル

ロータリーキルン内の粒子運動は DEM を用いて計算した。DEM はキルン内に存在するすべての粒子の運動を、粒子相互およびキルン壁との接触力を考慮して同時

に追跡する手法であり、すべての粒子に対して並進および回転運動の運動方程式を適用して、これらを連立して同時解析する。粒子の並進方向および回転方向の運動方程式は次式で表される。

$$\text{並進運動：} \quad m_p \frac{d\vec{u}_p}{dt} = \sum \vec{F}_n + m_p \vec{g} \quad (1)$$

$$\text{回転運動：} \quad I_p \frac{d\vec{\omega}_p}{dt} = r_p \sum (\vec{F}_s - \vec{M}_r) \quad (2)$$

粒子間の接触力は Voigt model により近似し、回転方向では滑りを考慮した。

粒子の伝熱解析に用いる熱収支式には粒子の温度変化、対流伝熱および輻射伝熱を考慮した。

$$m_p C_p \frac{dT_p}{dt} = \alpha_c h_p A_{gp} (T_g - T_p) + \alpha_r \varepsilon \sigma F A (T_w^4 - T_p^4) \quad (3)$$

炉内の粒子群は積層状態で存在し、層内の存在位置により伝熱機構が異なる。表層では対流伝熱と空間を挟んで対面する炉壁からの輻射伝熱、粒子に囲まれた中間層は隣接粒子との輻射および伝導、底層では接触炉壁との輻射と伝導伝熱がそれぞれ支配的となる。本モデルでは、中間層粒子は平均的に同程度の温度で存在すると仮定し粒子間の熱移動がなく簡易的に断熱状態として扱い、底面層に存在する粒子に対しては炉壁との輻射伝熱による熱移動のみ考慮した。

キルン内を流通する流体の温度分布については、キルン回転軸方向の1次元熱収支式により算出した。

$$\frac{d}{dx} (\rho_g u_g H_g) = A_{gp} h_p (T_p - T_g) + A_{gw} h_w (T_w - T_g) - \Delta H_c \quad (4)$$

本解析では、高温キルンで燃料の燃焼を考慮する必要がある場合には燃料の軸方向の燃焼率分布を与え、これを基にガス組成および発熱量分布を算出した。また燃焼ガスから炉壁および粒子への対流熱伝達を考慮した。

実用キルン内において炉壁とブリケット粒子の間の輻射伝熱は最も重要な伝熱機構の一つであり、炉内壁の温度を推定する必要がある。キルンの炉体は中空円筒状であることから、本解析では三次元円筒座標系の熱伝導方程式を用いた。

$$\rho_w C_w \frac{\partial T_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_w \frac{\partial T_w}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_w \frac{\partial T_w}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\lambda_w \frac{\partial T_w}{\partial \theta} \right) \quad (5)$$

キルン内面の境界条件として炉内粒子との輻射による熱交換および燃焼ガスとの対流伝熱、また外面では自然対流による熱放散を考慮した。

3.2 解析結果

45個の測温粒子から任意に抽出した4個の粒子の温度変化を Fig. 9 に示す。実験同様に粒子平均温度の変化は滑らかに上昇するのに対し、個別粒子の温度変化は不

規則に変化しており、昇温速度にばらつきが生じている。

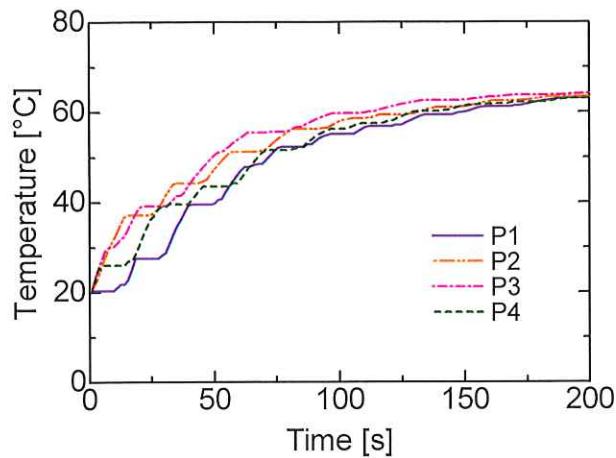


Fig. 9 Comparison of temperature changes

Fig. 10 に粒子温度分布の経時変化を示す。温度の分布幅は拡大、縮小、そして最終的に一定温度に収束する傾向を示している。これは実験の傾向と一致する。

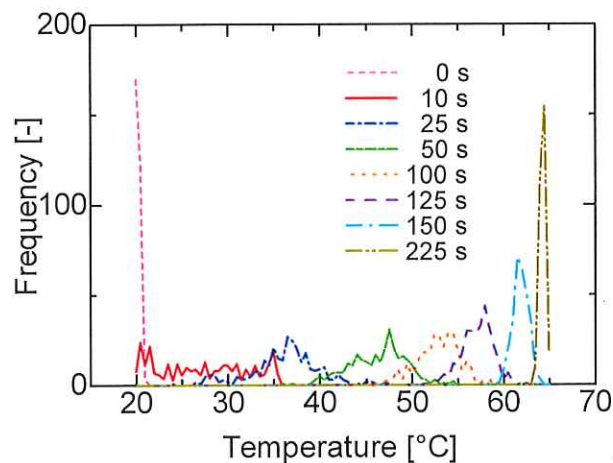


Fig. 10 Change in temperature distribution of particles with time at Ranz-Marshall

3.3 高温キルンの解析

内径 300 mm のキルンの長手方向の一部 (長さ 300 mm の) を取り出し、その内部における粒子の伝熱状況を Figs. 11 および 12 に示す。この領域内には直径 20 mm の粒子を 575 個装填している。尚、気流の流速および温度はそれぞれ 4.0 m/s および 1100°C とした。Fig. 11 は昇温開始 50 および 150 s 後のキルン内粒子位置と温度を示す。昇温開始 50 s 後ではほとんどの粒子は緑色を呈しており、粒子の温度分布が狭くなっていることを示している。これに対して 150 s 後では、粒子は緑から赤色まで幅広い色を示しており、また赤色の粒子のごく近傍に緑色の粒子が存在する様子も示されている。これはキルン内では粒子混合により、粒子の昇温履歴が異なる

り、このため粒子の温度分布が広がっていることを示している。Fig. 12 はキルン内に存在する粒子の温度分布の経時変化を示す。加熱開始時には全ての粒子は室温となっており、加熱初期には粒子温度の分布幅は狭くなっている。時間の進行とともに、混合に伴う粒子毎の昇温履歴の差異が顕著となり、粒子温度の分布幅は広がっていく。昇温開始 150 および 250 s では分布幅は 200°C に達している。その後、全ての粒子温度は燃焼ガス温度に漸近していくため、粒子温度の分布幅は狭くなっていく。

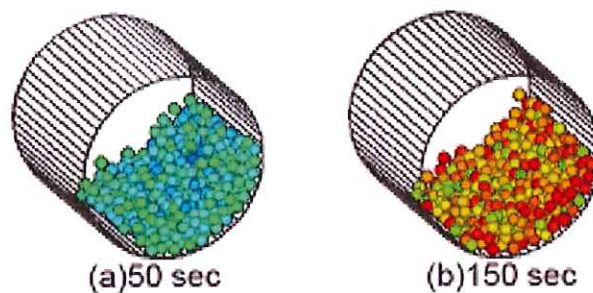


Fig. 11 Calculated particle location and temperature.

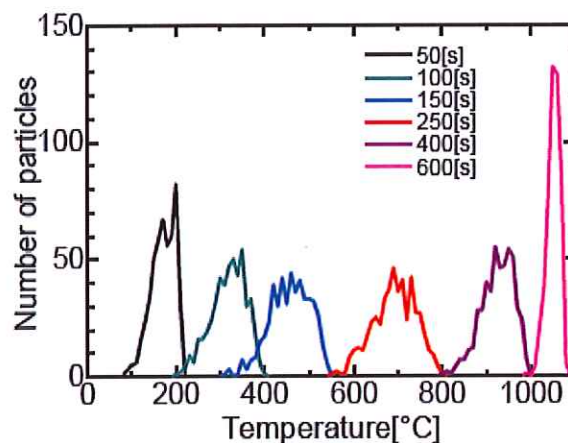


Fig. 12 Variation of temperature distribution.

Fig. 13 に加熱開始 400 s 後における炉壁の温度分布を示す。この解析ではキルン全体ではなく少量の粒子を装入してある。キルンの炉壁は、高温のガスにより内部から加熱が進行しているが、粒子が存在する部分の下側では、粒子の存在により気流からの熱供給が阻害され、他の部分と比較して加熱が遅れが出ている様子が示されている。

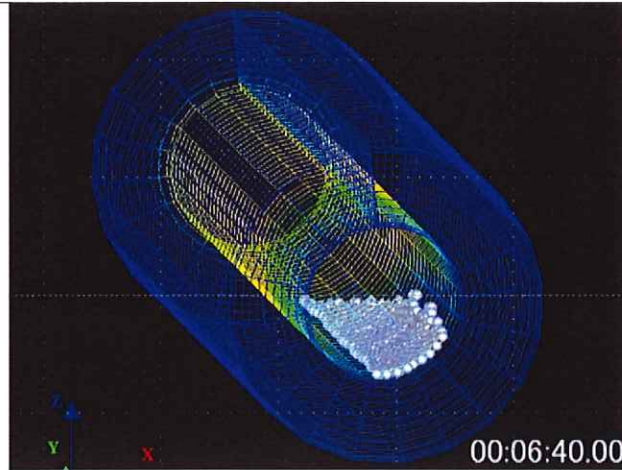


Fig. 13 Snapshot of wall temperature.

4. まとめ

本研究ではロータリーキルンを対象として内部の粒子運動および伝熱を定量的に把握することを目的として、離散要素法による粒子運動と伝熱の追跡を連成したキルンプロセスのモデルを開発した。本モデルは今後のキルンプロセスの設計・最適化に寄与するものと考えている。

3. 研究発表

今後随時発表予定