

汚泥焼却炉の不具合発生原因解明に向けた 数値解析的アプローチ

石井 直紀

茨城県 鹿島下水道事務所 施設管理課 (〒314-0101 茨城県神栖市北浜9)

下水処理で発生した下水汚泥は脱水、焼却等を経て減容化・安定化される。近年、焼却炉内に発生した「クリンカ」と呼ばれる焼結体が燃料口等を閉塞させ、焼却炉が機能停止する不具合が発生している。本稿においては不具合解消に向けた取組みとして、本県所有の焼却炉について、「クリンカ」の発生状況と規則性の有無について整理した。次に「クリンカ」の発生原因について、焼却炉内の熱流体現象に着目した。焼却炉内は本来不可視であり、熱流体現象を把握することは現実的に困難であるが、3次元数値流体解析を実施することにより、空間的な熱流体の挙動を数値解析的に把握し、熱流体現象に起因する「クリンカ」の発生原因について検討した。

キーワード 下水道, 汚泥焼却炉, クリンカ, 熱流体解析, 3次元数値解析

1. はじめに

下水処理は汚水の汚れを除去する水処理と、水処理で発生した汚泥を脱水・焼却等を経て産業廃棄物として処理する汚泥処理とに分類され、安定した水処理を行うためには発生汚泥を適切かつ安定的に処理することが必要である。近年、汚泥焼却炉内で発生する「クリンカ」と呼ばれる物質が壁面や排気ダクト等に溶融固化する現象が発生している。焼却炉の燃料噴出口や空気吹込口、排気ダクト等をクリンカが閉塞すれば、炉内温度や圧力の管理が阻害され、焼却炉を機能停止させることになるため、その発生原因解明が課題となっている。

これまで他自治体等において「クリンカ」の成分や融点の分析等、発生原因の解明に向けた化学的視点の取組みが行われてきた¹⁾。しかし、実際の焼却炉において先行研究の発生条件を満たす空間的な温度分布や流速分布が形成されるか、又、焼却炉の構造に起因する発生原因の検討等、熱流体力学的視点の知見は得られていない。これらの空間的な知見を得るためには3次元熱流体現象を把握する必要があるが、実際の焼却炉は熱電対を用いて代表点の温度を計測するのみで、空間的な温度分布や流速分布等を把握することは現実的に難しい。

そこで本稿において、先ず本県における汚泥焼却炉のクリンカ発生状況を整理し、クリンカの具体的な発生状況について述べる。次に、焼却炉の3次元熱流体現象を把握する為、スーパーコンピュータを用いて3次元数値流体解析を実施し、汚泥粒子、及び流体の時間的・空間的な運動、及び熱化学反応過程を解析することで汚泥粒子の挙動、熱化学反応の進行過程、ガス温度分布、流速分布等を把握・考察し、「クリンカ」の熱流体力学的な発生原因について数値解析的に検討する。

2. 本県のクリンカ発生状況について

本県では7流域下水道+1特定公共下水道事業を実施しており、処理水量が80,000m³/日程度を超える比較的処理水量の多い4処理場において、計7基の汚泥焼却炉を運用している。各焼却炉における過去5年のクリンカ発生状況を調査したところ、毎年発生する処理場がある一方で、全く発生しない処理場も見られる。これは流入汚水の性状や下水処理方式の差異等（汚水に含まれる窒素・リンの積極的な除去等）に起因すると考えられる¹⁾。Fig. 2.1に本県の焼却炉に採用している流動床式汚泥焼却炉

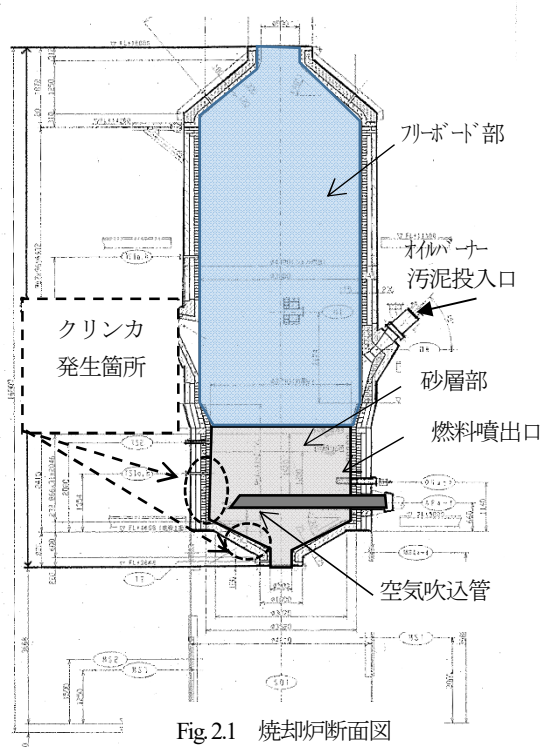


Fig. 2.1 焼却炉断面図

の断面図を示す。焼却炉は底部の砂層部、及び上部のフリーボード部から構成されており、ここに汚泥投入口、オイルバーナー、燃料噴出口、空気吹込管等を設置する。汚泥の焼却工程は①燃料噴出口から噴出させた A 重油、及びオイルバーナーを用いて焼却炉低層部（砂層部）に充填した流動媒体（珪砂）を 850℃程度まで加熱し、②加熱された流動媒体を空気吹込管から吹出した流動空気によって舞上げ、③フリーボード中部より投入した汚泥と流動媒体とを混焼させる。なお、この焼却炉の構造、及び焼却工程は全国的に採用されている。

各焼却炉におけるクリンカの発生箇所は Fig. 2.1 に破線で示すように、砂層部壁面、及び底部等に集中していた。

Fig. 2.2 にクリンカ発生状況を示す。この事例では、燃料噴出口付近に 1,000 mm×1,000 mm 程度のクリンカが発生しており、燃料噴出口の閉塞リスクも懸念される。

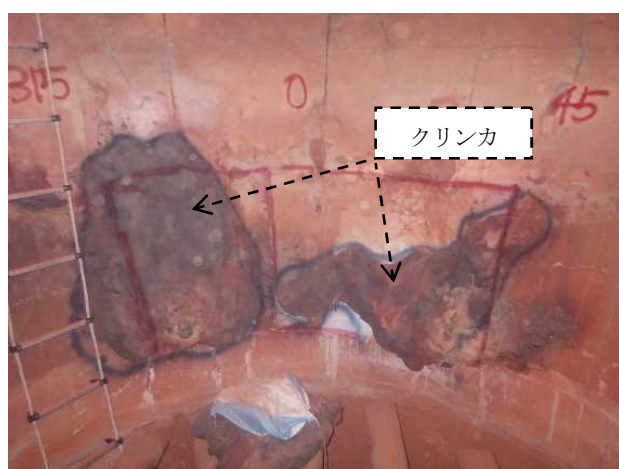


Fig. 2.2 クリンカ発生状況

3. 3次元数値流体解析について

(1) 数値解析モデル

Fig. 3.1に汚泥焼却炉の数値解析モデルを示す。モデルに採用した焼却炉は、本県の既設焼却炉である。低層部から流動媒体を充填した砂層部、中層～高層にかけて汚泥を焼却するフリーボード部となっている。

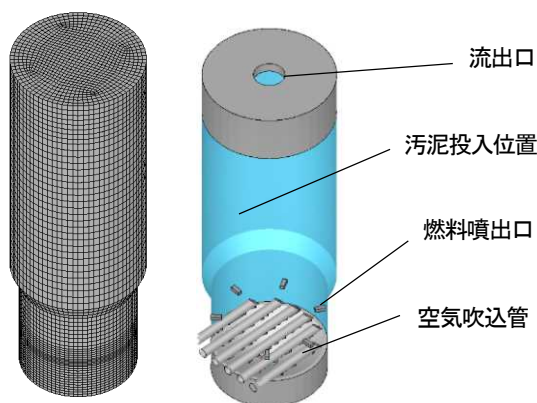


Fig. 3.1 数値解析モデル

本解析は汚泥粒子の運動を解析する粒子粉体解析、汚泥の乾燥・熱分解反応等を解析する燃焼解析、及び流動ガスの流体解析を連成して解いた²⁾。

汚泥粒子の運動、及び燃焼解析においては直径50 mmの代表汚泥粒子を4×4×8個並べた立方体上の結合粒子（汚泥塊）として投入時の汚泥形状を模擬。汚泥含水率78%、高位発熱量16.5 MJ/kgとして汚泥の乾燥、熱分解、チャー燃焼の各燃焼過程について時間的・空間的に解析を行った。

又、流動ガスの流体解析は3次元における粘性・圧縮性流体の挙動を把握するため、3次元圧縮性ナビエ・ストークス方程式を始めとした運動量・質量・エネルギーの各保存方程式等を用いてスーパーコンピュータによる3次元数値流体解析を実施した。なお、乱流を考慮する為、エネルギー保存方程式に乱流拡散項を導入し、連続の式に汚泥粒子に起因するソース項、運動量保存方程式に粒子・流体間の運動量交換項をそれぞれ導入している。

(2) 数値解析結果

Fig. 3.2に汚泥粒子の3次元熱分解分布を示す。汚泥投入側壁面、及び砂層中心部では汚泥粒子温度は600℃～800℃程度で粒子の舞上がりはさほど見られない。これは、汚泥粒子の乾燥反応が支配的であり、汚泥塊の分解、及び粒子の熱分解がさほど進行していないことが原因であると考えられる。又、汚泥投入位置反対側壁面近傍においては900℃～1,000℃程度に加熱・分解された粒子の舞上がりが見られる。これは、粒子の熱分解反応が支配的であり、砂層中心部で乾燥反応が終了し、汚泥投入位置の反対側壁面近傍において汚泥塊の分解が概ね完了し、粒子の熱分解反応に移行した為と考えられる。以上より汚泥投入側、及び砂層中心部に乾燥反応ゾーンが形成され、汚泥投入位置の反対側壁面近傍において熱分解反応ゾーンが形成されることが示唆された。

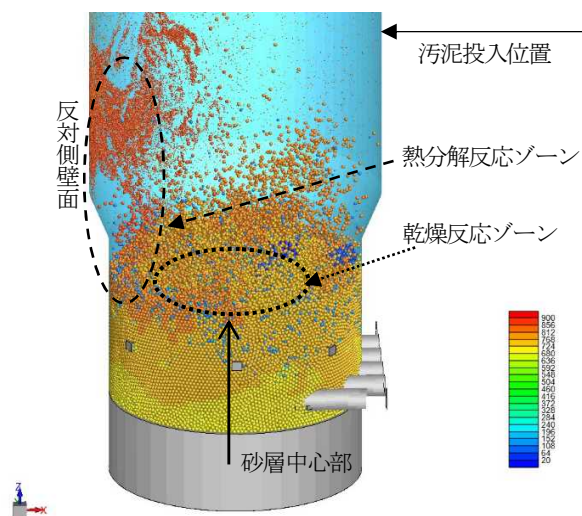


Fig. 3.2 3次元熱分解分布

Fig. 3.3 に 2 次元ガス流速分布を示す。砂層中心部付近でガスの滞留が発生し、汚泥投入位置反対側壁面において相対的に流速の大きい分布が形成されている。これは、砂層中心部では汚泥の乾燥反応が支配的で汚泥塊の分解が進行せず、反対側壁面にて分解が概ね完了して汚泥粒子が舞上がった為と考えられる。又、汚泥粒子の舞上がりが発生している箇所より下部の砂層部壁面近傍においては相対的に低流速の分布が形成されているが、これは空気吹込管の配置によるものの他、壁面近傍における剥離現象に起因するものと考えられる。

Fig. 3.4 に 2 次元ガス温度分布を示す。汚泥投入位置の反対側壁面近傍において 900°C ～ $1,000^{\circ}\text{C}$ 程度の局所的な高温域が形成されている。これは Fig. 3.2 に示すように、汚泥投入位置反対側壁面近傍において熱分解反応ゾーンが形成されることに起因するものと考えられる。又、局所的な高温域下部の砂層部壁面近傍に相対的な低温部が形成されている。これは、熱分解反応による加熱を受ける前のガスが砂層部に滞留しているためと考えられる。

これらにより実際の焼却炉におけるクリンカの発生箇所（砂層部底部）について考察すれば、汚泥投入位置反対側の壁面近傍における局所的な高温域でクリンカ成分が生成・熔融され、その直下の流速が低い砂層部底部へ

壁面を伝って熔融されたクリンカ成分が流れ落ち、 800°C 未満の相対的な低温域で固化したものと推察される。以上により、実際の汚泥焼却炉におけるクリンカ発生箇所の特徴（砂層部壁面、及び底部）について、数値解析的にその発生原因の一つが示唆された。

これらの結果より、汚泥の投入位置、方法、及び空気の吹込み位置の変更等による焼却炉の構造的な見直しにより局所的な高温域の発生を抑制させることができれば、クリンカ発生原因の熱流体力学的な原因を解消できる可能性がある。

4. 結論

汚泥焼却炉における不具合の一つとされるクリンカの発生原因について、本県の所有する汚泥焼却炉 7 基について過去 5 年分のクリンカ発生状況を整理すると共に、熱流体力学的な視点でのクリンカ発生原因を検討するために 3 次元数値流体解析を実施した。結果として、本県所有の汚泥焼却炉砂層部壁面、及び底部にクリンカが発生する傾向が見られた。又、数値解析によって砂層部近傍でクリンカの生成・熔融に必要な高温域が局所的に形成されることが示唆され、又、流速分布から高温域直下の相対的な低温部にクリンカ成分が流れ落ち、固化する可能性が示唆された。以上より、焼却炉内のクリンカについて、数値解析的な取組みにより熱流体力学的な発生原因の一つが示唆された。

今回の解析結果を基に汚泥焼却炉の構造等を検討することで、クリンカの発生原因を根本的に解消できる可能性があることから、今後も引き続き本研究を進め、焼却炉の不具合解消に向けた構造設計等に知見を与えるよう取り組む。

謝辞： 本論文の執筆にあたり、汚泥焼却炉の構造や燃焼現象等、多岐にわたり様々なご助言を賜ったメタウォーター株式会社の皆様、焼却炉の運転、維持管理状況等についてご助言を賜った当事務所深芝処理場の指定管理者である鹿島都市開発株式会社の皆様、データ提供のほか様々なご助言を賜った茨城県流域下水道事務所各浄化センターの皆様、論文執筆の他、研究活動全般、及び通常業務について日頃より様々なご助言と多大なるご協力を賜っている当事務所 萩谷靖事務所長様を始め、事務所職員の皆様にこの場を借りて厚く御礼申し上げます。

- 1) (株) 日水コン：下水汚泥焼却炉の焼却炉閉塞防止技術
- 2) (株) アールフロー：R-FLOWによるごみ等の燃焼解析

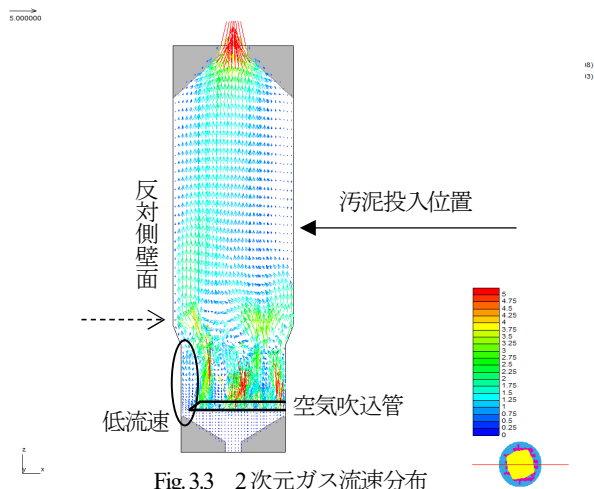


Fig. 3.3 2次元ガス流速分布

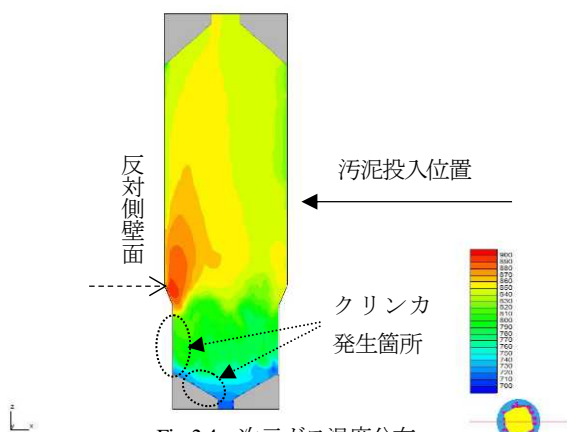


Fig. 3.4 次元ガス温度分布