



アグロメレーションを用いた バイオマスボイラの炉内温度 推定方法

Tauch Nozomi

田内 希^{*1}

Miyashita Kazuhiro

宮下 和大^{*1}

Shigeta Jun-ich

茂田 潤一^{*2}

循環流動層（CFB）ボイラでは、熱電対計測だけでは炉内の局所温度を把握しにくいという課題がある。本研究では、実機ボイラから回収したアグロメレーション^{*1}を対象に、蛍光X線分析（XRF）で得た化学組成を入力条件として熱力学平衡計算を行い、各結晶相の理論生成温度および理論分解温度を求めた。さらに、X線回折（XRD）によりアグロメ中の結晶相を同定し、計算結果と整合する結晶相について、それぞれの生成・分解温度域の重なりを評価することで、アグロメ形成時の炉内局所温度帯を推定した。その結果、連続運転時には940℃以下、流動不良時には1100℃級の局所高温領域が存在していたと推定された。本手法により、アグロメ情報から炉内局所温度履歴を間接的に評価できることが確認され、流動不良発生メカニズムの解明や運転条件の最適化への活用が期待される。

※1 アグロメレーション：流動媒体となる珪砂とバイオマス灰に含まれるアルカリ成分が高温下で反応して生成した塊状の焼結体。

キーワード： バイオマス、火力発電ボイラ、循環流動層ボイラ、
アグロメレーション、熱力学平衡計算

1. はじめに

従来、循環流動層ボイラにおける炉内温度の把握には、ボイラ側壁等に設置された熱電対による温度計測データが用いられてきた⁽¹⁾。これらの温度情報を基に、炉内の温度分布や局所的な温度状態を推定し、運転条件の管理やアグロメレーション（以降、アグロメ）発生有無の評価が行われていた。

しかし、熱電対は主として炉内側壁等の限られた位置に設置されるため、実際にアグロメが発生する炉内局所領域の温度を直接的に把握すること

は困難である⁽²⁾。そのため、炉内には局所的な温度勾配やホットスポットが生じ得るが、点計測のみでは、これらの温度履歴を十分に捉えることができない⁽³⁾。さらに、異常高温領域の特定や流動不良発生の根本原因の把握も難しく、実機循環流動層ボイラでは燃焼条件および流動状態が複雑に変化することから、現象の解釈には不確実性が伴うという課題がある^{(4)・(5)}。

そこで本研究では、循環流動層ボイラ内で実際に生成されたアグロメに着目し（図1）、回収し

*1：研究開発センター 研究開発グループ

*2：元フェロー 博士（学術） 環境計量士（濃度関係）

たアグロメの分析結果と熱力学平衡計算を組み合わせることで、炉内局所温度を推定する手法を提案する。

この手法により、従来の熱電対による点計測では把握が困難であった炉内の局所的な温度履歴を、焼結体の分析結果から間接的に評価することが可能となる。得られた評価は、アグロメ発生の根本原因の解明や流動不良トラブルの予防、さらには運転条件の最適化に資する知見を提供し、循環流動層ボイラの安定運用および運転効率向上に寄与し得る。

2. 評価方法

2.1 分析方法

アグロメサンプルの元素組成の定量には蛍光 X 線分析 (XRF) を用いた。試料は粉碎後、ガラスビード法により測定を行った。得られた分析結果は酸化物換算値 (wt%) として整理し、熱力学平衡計算の入力条件として用いた。測定には株式会社島津製作所製の蛍光 X 線分析装置 (XRF-1800) を使用した。

アグロメサンプルの結晶相同定には X 線回折 (XRD) 分析を用いた。試料を粉末化し、Cu-K α 線を線源として回折パターンを取得した。得られた回折データについて回折ピークを同定し、既知データベースとの照合により試料中の結晶相を評価した。測定には株式会社リガク製の多目的試料水平型 X 線解析装置 (SmartLab SE) を使用した。

2.2 熱力学平衡計算

バイオマスの燃焼は多くのパラメータが関与する複雑な化学反応プロセスであるが、熱力学平衡計算では、系が化学平衡状態であると仮定して計算を行うのが一般的である。熱力学平衡計算ソフトウェア「FactSage8.1」⁽⁶⁾ は、組成、温度、雰囲気、圧力等の条件から熔融挙動や温度ごとの生成化合物情報を得ることができる。本手法における計算条件を表 1 に示す。

2.3 実施アプローチ

本技術は、バイオマス燃料を用いた循環流動層ボイラにおいて運転中に生成したアグロメを対象とし、その組成および結晶相の解析結果から、ア



図 1 実際に採取されたアグロメ例

表 1 熱力学平衡計算の計算条件

サンプル分析値	XRF 分析値
計算温度	500 ~ 1500℃ (10℃刻み)
圧力	大気圧
ガス雰囲気	空気雰囲気
データベース	FactPS, FToxid-SLAGA, FTSalt-SALTF

グロメ形成時の炉内局所温度履歴を推定する手法である。

本手法によるアグロメ形成温度推定フローを図 2 に示す。まず、炉内から採取したアグロメ試料について XRF により化学組成を定量する。得られた化学組成を入力条件として熱力学平衡計算を実施し、生成し得る結晶相および各相の理論生成温度・分解温度を算出する。その後、同じアグロメ試料に対して XRD を行い、実際に存在する結晶相を同定する。これらの結果を比較し、熱力学計算でも生成が示される結晶相（共通相）のみを対象として評価を行う。

図 3 に炉内温度推定の概念図を示す。各結晶相は、それぞれ生成温度以上かつ分解温度未満の範囲で安定に存在する。これらの存在可能温度範囲が重複する領域を、アグロメ形成時の炉内局所

温度帯として推定する。

3. 実機アグロメサンプルを用いた炉内温度推定検証結果

3.1 アグロメサンプル

今回は、それぞれ生成環境が異なる 3 種類のアグロメを対象に炉内温度を推定した。アグロメ①は、連続運転時に定期的に排出されたサンプルで、アグロメ②と③は、どちらも流動不良時に別箇所から採取されたサンプルである。これらの構成組成を表 2 に示す。連続運転状態時に回収されたアグロメは 1cm 以下のものが多く、全体として小粒径である傾向が認められた。一方、流動不良発生時に採取されたアグロメはいずれも粒径が大きく、多くが 10cm 以上であった。

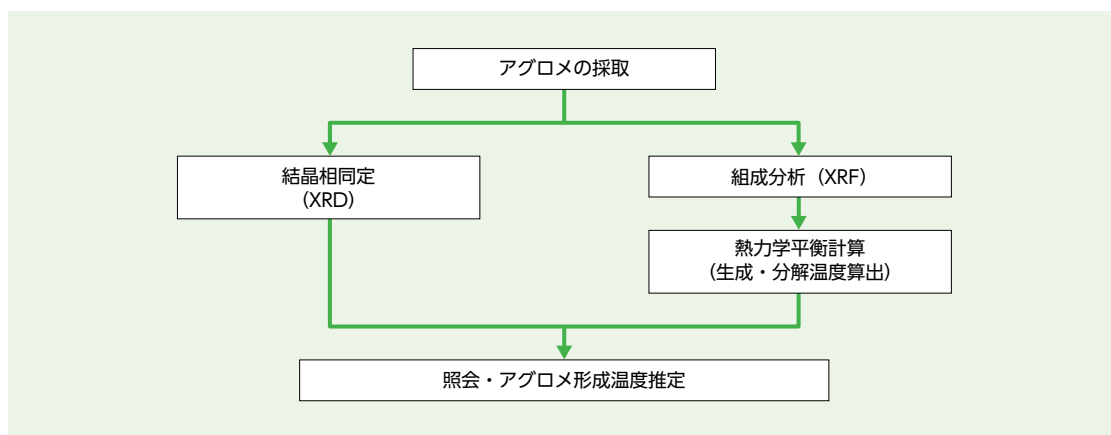


図 2 本手法によるアグロメ形成温度推定フロー

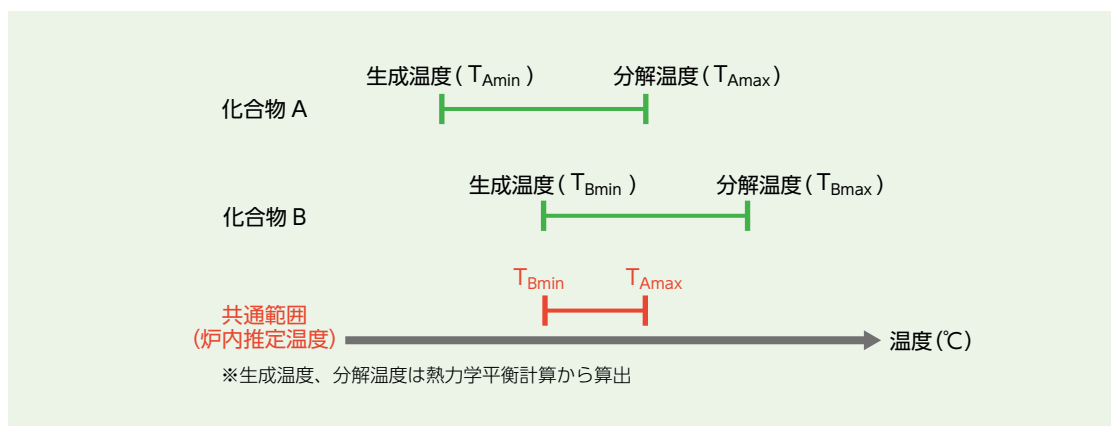


図 3 炉内温度推定の概念図

3.2 実機アグロメの相同定と熱力学計算に基づく炉内局所温度帯の推定

本節では、2.3 節で示した推定手法に基づき、実機ボイラから回収したアグロメ 3 検体について、炉内局所温度帯の推定を行った。具体的には、XRF による組成分析結果（表 2）を入力とした熱力学平衡計算を行い、各結晶相の理論生成温度・分解温度を求めた。その後、XRD によりアグロメ中の結晶相を同定し、計算結果と整合する結晶相について評価を行った。熱力学平衡計算結果および XRD 同定結果を表 3 に示す。

以下では、連続運転時に採取されたアグロメ①と、流動不良発生時に採取されたアグロメ②、③を比較し、炉内環境（特に局所温度）の差異を検証する。なお、XRD 同定相と熱力学計算結果の間に一部不一致が見られた場合には、両方で共通して確認された結晶相を基準として温度帯を推定した。

3.2.1 連続運転時のアグロメ①の推定温度帯

連続運転時に採取されたアグロメ①では、Na 系ケイ酸塩相（例：NaAlSi₂O₈）および Ca 系ケイ

酸塩相（例：CaAl₂Si₂O₈）が XRD 分析および熱力学平衡計算の双方で共通して確認された。Na 系ケイ酸塩相の理論生成温度および理論分解温度はそれぞれ 50℃および 940℃であり、Ca 系ケイ酸塩相については 300℃および 1200℃である。これらの結晶相は、Na 系ケイ酸塩相は 50～940℃、Ca 系ケイ酸塩相は 300～1200℃の範囲で安定に存在する。これらの温度範囲を重ね合わせると、両相が同時に存在可能な温度範囲は 300～940℃となる。したがって、連続運転時アグロメ①が形成・存在した環境温度は、940℃以下であったと推定される。

3.2.2 流動不良発生時アグロメ②の推定温度帯

流動不良発生時に採取されたアグロメ②では、K-Al 系ケイ酸塩相（例：KAlSi₃O₈）が XRD 分析および熱力学平衡計算の双方で共通して確認された。KAlSi₃O₈の理論生成温度および理論分解温度はそれぞれ 100℃および 1090℃である。また、同時期に採取されたアグロメ③において、

表 2 アグロメサンプルの組成分析結果

		アグロメ①	アグロメ②	アグロメ③
SiO ₂	wt%	62.75	65.82	61.42
Al ₂ O ₃	wt%	24.47	9.98	9.69
TiO ₂	wt%	0.49	0.33	0.33
Fe ₂ O ₃	wt%	3.53	2.29	2.43
CaO	wt%	1.98	7.88	9.7
MgO	wt%	1.16	2.81	3.56
Na ₂ O	wt%	2.19	1.41	1.37
K ₂ O	wt%	3.09	7.98	9.49
P ₂ O ₅	wt%	0.12	1.04	1.41
MnO	wt%	0.06	0.2	0.24
SO ₃	wt%	0.05	0.05	0.1
CuO	wt%	<0.01	0.01	0.01

表 3 アグロメサンプルの化合物分析結果と熱力学平衡計算による計算結果

鉱物	化合物	理論生成温度(℃)	理論分解温度(℃)	アグロメ①		アグロメ②		アグロメ③	
				平衡計算値	XRD 結果	平衡計算値	XRD 結果	平衡計算値	XRD 結果
Leucite	KAlSi ₂ O ₆	1100	1140				○	○	○
Microcline	KAlSi ₃ O ₈	100	1090	○		○	○	○	○
Diopside	CaMgSi ₂ O ₆	100	1190			○		○	○
Albite	NaAlSi ₃ O ₈	50	940	○	○				
Anorthite	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	300	1200	○	○				

1100℃級を示す相 (KAlSi_2O_6) が観測されていることから、アグロメ②についても高温域を経験していたと考えられる。以上より、アグロメ②の炉内環境は約 1090℃付近の高温域であったと推定される。

3.2.3 流動不良発生時アグロメ③ 推定温度帯

流動不良発生時にアグロメ②とは別箇所から採取されたアグロメ③では、XRD 分析により K-Al 系および Ca-Mg 系の複数のケイ酸塩相が同定され、熱力学平衡計算とも一致した。特に、 KAlSi_2O_6 は理論生成温度 1100℃、理論分解温度 1140℃を有することから、炉内局所温度は少なくとも 1100℃以上に達していたと考えられる。また、1140℃を超える温度では安定に存在しない。一方、 KAlSi_3O_8 (100 ~ 1090℃) も確認されている。このことは、炉内に 1100℃以上に到達した領域と 1100℃未満の領域が共存していたこと、あるいは冷却過程を経た温度履歴を反映していることを示している。以上の結果から、アグロメ③の炉内局所温度帯は、1100 ~ 1140℃に達する高温域を含んでいたと推定される。

4. まとめ

XRD による結晶相同定結果と XRF による組成分析結果を基に熱力学平衡計算を行うことで、アグロメ形成時の炉内局所温度帯を推定できた。特に、同一ボイラ内で採取されたアグロメ間に明確な推

定温度帯の差異が確認され、本手法により炉内局所温度場の違いを識別可能であることが示された。

連続運転時に採取されたアグロメ①では、主として低融点の Na 系ケイ酸塩相が確認され、炉内温度は 940℃以下であったと推定された。一方、流動不良発生時に採取されたアグロメ②および③では、高融点の Al 系ケイ酸塩相が共通して確認され、1100℃級の局所高温領域が形成されていたと推定された。

以上より、本手法は従来の熱電対による点計測では把握が困難であった炉内の局所高温領域を、アグロメの情報から推定することを可能とするものであり、流動不良発生メカニズムの解明や運転条件の最適化に有効な評価手法である。

5. 参考文献

- (1) Basu P : Circulating Fluidized Bed Boilers: Design, Operation and Maintenance, Springer, 2015
- (2) Jia Z, Zhang C, Cai D, Blair E, Qian W, Wei F: The analysis of hot spots in large scale fluidized bed reactors, RSC Advances, 7, pp.20186-20191, 2017
- (3) Abdelmotalib HM, Im IT : A study on the particle temperature in a conical fluidized bed using infrared thermography, Journal of Mechanical Science and Technology, Vol.32, No.9, 2018, pp.4529-4534
- (4) Fang M, Yang L, Chen G, Shi Z, Luo Z, Cen K: Experimental Study on Rice Husk Combustion in a Circulating Fluidized Bed, Fuel Processing Technology, Vol.85, No.11, 2004, pp.1273-1282
- (5) Scala F. : Characterization and early detection of bed agglomeration during the fluidized bed combustion of biomass fuels, 66th IEA-FBC Meeting, 2013
- (6) 株式会社計算力学研究センターホームページ : <https://www.rccm.co.jp/product/thermodynamics/factsage/>



研究開発センター 研究開発グループ
田内 希

TEL 045-791-3522



研究開発センター 研究開発グループ
宮下 和太

TEL 045-791-3522



元フェロー
博士 (学術) 環境計量士 (濃度関係)
茂田 潤一

TEL 045-791-3516