

廃棄物焼却炉に関する数値シミュレーション技術の開発

Numerical Simulation of Combustion Behavior in Stoker-type Incineration System

傳田 知広 DENDA Tomohiro JFE エンジニアリング 総合研究所 熱・燃焼研究グループ 主任研究員
中山 剛 NAKAYAMA Takashi JFE エンジニアリング 総合研究所 熱・燃焼研究グループ 主任研究員
岩崎 敏彦 IWASAKI Toshihiko JFE エンジニアリング 都市環境本部 主席

要旨

JFE エンジニアリングは、ストーカ式廃棄物焼却炉のさらなる高性能化に向けた研究開発および設計ツールとして活用することを目的に、炉内燃焼挙動を正確に把握できる数値シミュレーション技術の開発を進めてきた。まず、二次元モデルを用い、計算時間の短縮が可能な簡略燃焼反応機構を選定した。次に、この燃焼反応機構を汎用熱流体コード (Fluent) に組み込み、対象領域を炉全体とした実機スケールの三次元全体燃焼炉モデルを作成して計算した。炉内温度分布と CO 濃度分布の計算結果は実機測定結果とおおむね一致し、本数値シミュレーション技術の妥当性および有用性が確認された。

Abstract:

To improve the performance of the stoker-type incineration system, JFE Engineering has developed the numerical simulator to understand the combustion behavior in the incinerator. In the first step, the suitable reaction mechanism for combustion was selected. In next step, by using the three-dimensional entire incinerator model, temperature and CO concentration was calculated and compared with measured temperature and CO concentration in actual plant. As a result, calculated values agreed with measured values. It showed that this numerical simulator is appropriate for an analysis of the combustion behavior of the stoker-type incineration system and is useful for a development and design tool.

1. はじめに

東日本大震災以降、再生可能エネルギーのひとつである廃棄物発電への期待が高まっている。これに伴い廃棄物焼却炉の高性能化に対する要求も強まっており、技術開発の重要性が増している。

これまでの廃棄物焼却炉の開発は、主として実験的手法により行なわれてきた。数値解析的手法も試みられてはいたが¹⁾、多くは一次元や二次元のモデルを用いた基礎的な検討であった。その理由として、焼却対象が廃棄物であるため性状が不均一で、量的な変動も大きく、さらに実機スケールの大規模な三次元モデルで高精度の計算を行なうためには、詳細な燃焼反応機構を組み込む必要があり、膨大な計算時間を要することが課題であった。実機スケールの大規模な三次元モデルを簡易に扱える数値シミュレーション技術が開発されれば、研究開発および設計ツールとして有益であり、その確立が強く望まれている。

そこで、JFE エンジニアリングはこのような数値シミュレーション技術の確立を目指し、当社最新鋭のストーカ式

廃棄物焼却炉である JFE ハイパー 21 ストーカシステムを対象に、開発を進めてきた。まず、汎用熱流体コード (Fluent) を利用し、二次元モデルで炉内のガス燃焼に対して簡略かつ精度のよい燃焼反応機構を選定した。次に、計算領域を炉全体に拡大した実機スケールの三次元全体燃焼炉モデルを作成して、計算を行なった。計算結果と実機測定結果とを比較したところおおむね一致し、本数値シミュレーション技術の妥当性および有用性について確認できたので、ここに報告する。

2. JFE ハイパー 21 ストーカシステムの特徴

まず、当社最新鋭のストーカ式廃棄物焼却炉である JFE ハイパー 21 ストーカシステムについて説明する。

JFE ハイパー 21 ストーカシステムは、当社が従来より独自に採用してきた二回流ガス流れ炉²⁾をベースに、環境負荷の一層の低減と発電効率の大幅向上を実現するため、高温空気燃焼技術 (High-temperature Air Combustion Technology : HiCOT) を適用した次世代型ストーカ式焼却炉である³⁻⁵⁾。プラントフローに関しては既報⁶⁾を参照されたい。

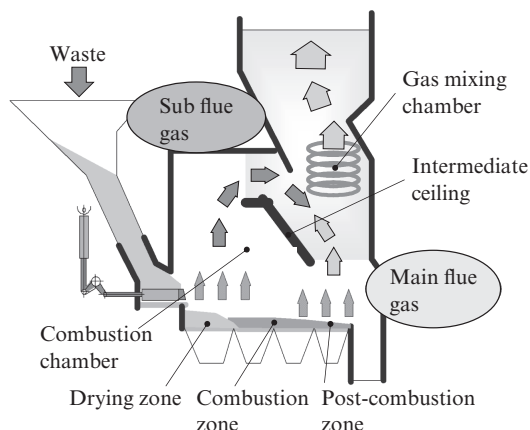


図1 二回流ガス流れ炉

Fig. 1 Two way gas flow incinerator

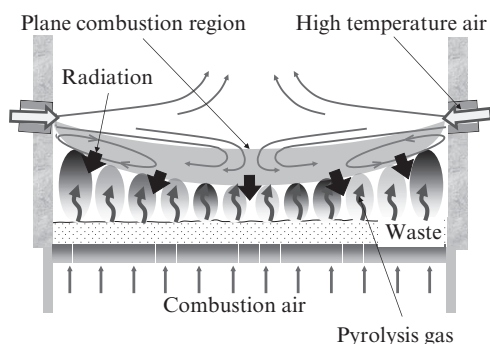


図2 燃焼開始領域における燃焼安定化イメージ

Fig. 2 Flame stabilization image in cross section at combustion beginning area

二回流ガス流れ炉の構造を図1に示す。燃焼室に中間天井と呼ぶ仕切りを配することにより、炉内流れを副煙道ガスと主煙道ガスに二分する。未燃成分を含む副煙道ガスと比較的酸素が多い主煙道ガスは、ガス混合室にて正面衝突し効果的に混合攪拌される。

この他の技術として、JFE ハイパー 21 ストーカシステムはHiCOTを適用している。図2は炉内横断面図であり、HiCOTを適用した場合の燃焼挙動を模式的に示したものである。炉内の廃棄物が乾燥され燃焼し始める燃焼開始領域に、炉の左右側壁からごみ層直上に向けて高温空気を吹込むことにより、高温空気とごみ層からの熱分解ガスを衝突させ、対向流場を形成させる。対向流場中の低流速領域では、対向流拡散火災が定在しやすくなるため、この火災からごみ層に達する輻射熱の効果が増大し、ごみの熱分解が促進され、非常に安定した燃焼場が形成される。以上により、従来型ストーカ式焼却炉では達成困難な低空気比安定燃焼が実現可能となる。

写真1は安定稼動中であるJFE ハイパー 21 ストーカシステムの実機において、炉の下流側から炉内を撮影した写真である。ごみ層直上に輝炎を含む火災が定在している様子

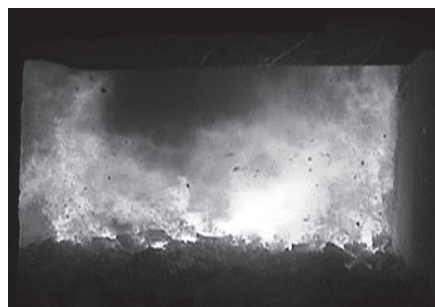


写真1 炉内直接写真

Photo 1 Photograph of flame in incinerator

が見られ、図2に示した対向流場が形成されている。

3. 簡略燃焼反応機構の選定

3.1 燃焼反応機構の概要

本開発では、廃棄物焼却炉に対して実機スケールの大規模な三次元モデルを簡易に扱える数値シミュレーション技術の開発を目標とした。この観点から、計算負荷が必要以上に大きくならない簡略燃焼反応機構を選定することが望ましいものと考えた。

そこで、精度が高いCH₄用詳細燃焼反応機構GRI1.2⁷⁾(32化学種, 177反応式)を基準とし、実用的と考えられる二種類の簡略燃焼反応機構を比較・検討した。これら二種類は、GRI1.2を基にしたスケルタル反応機構であるDRM19⁸⁾(21化学種, 84反応式)と、CO/H₂用反応機構のYetter⁹⁾(13化学種, 35反応式)である。

ここで重要となるのは、ごみの熱分解ガス組成である。ごみの熱分解ガスの主成分はH₂, COであり、CH₄, C₂H₄などの炭化水素も含まれていることが分かっている³⁾。DRM19⁸⁾は、ごみの熱分解ガス中の成分として考えられるほとんどの化学種を考慮できるものの、元来CH₄用に作成された反応機構であることから、COおよびH₂濃度が大きい熱分解ガス組成で計算したときの燃焼特性を把握する必要がある。一方、Yetter⁹⁾は、CO/H₂用の反応機構であることから、CH₄やC₂H₄などは考慮できず、可燃成分がCO, H₂のみの模擬熱分解ガスを設定し、計算する必要がある。

3.2 二次元モデルによる燃焼反応機構の比較・検討

燃焼反応機構の比較・検討には、汎用熱流体コード(Fluent)を用い、解析領域は図3に示す二次元噴流場とした。対称面と断熱壁に囲まれた領域であり、内側には熱分解ガス供給部を、外側には高温酸化剤ガス供給部を設けた。

表1に計算条件を示す。熱分解ガス温度は1000℃とし、酸化剤温度は実機と同じ250℃とした。Case AおよびCase Bは実験で得られた熱分解ガス組成³⁾を使用し、Case CおよびCase Dは模擬熱分解ガス組成を使用した。ここで、模

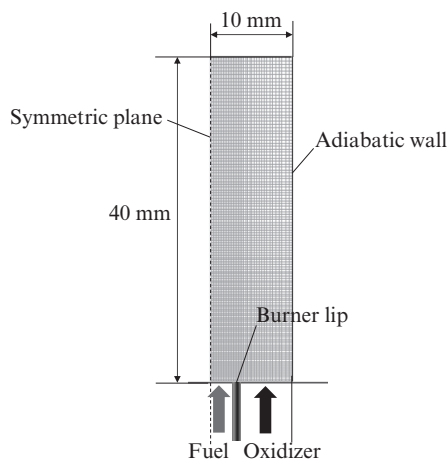


図3 二次元モデルの計算領域
Fig. 3 Two-dimensional domain of calculation

表1 計算条件
Table 1 Calculation conditions

Case		Case A	Case B	Case C	Case D	
Reaction model		GRI1.2 ⁷⁾	DRM19 ⁸⁾	DRM19 ⁸⁾	Yetter ⁹⁾	
Number of species		32	21	21	13	
Number of elementary reactions		177	84	84	35	
Mesh size	X (m)	0.01	0.01	0.01	0.01	
	Y (m)	0.04	0.04	0.04	0.04	
Number of meshes		5 054	5 054	5 054	5 054	
Pyrolysis gas	Velocity (m/s)	0.5	0.5	0.5	0.5	
	Temperature (°C)	1 000	1 000	1 000	1 000	
	Mass fraction	H ₂	0.003	0.003	0.009 35	0.009 35
		CH ₄	0.017	0.017	0	0
		C ₂ H ₄	0.017	0.017	0	0
		CO	0.13	0.13	0.187 04	0.187 04
		CHO	0	0	0	0
		CO ₂	0.239	0.239	0.230 61	0.230 61
		H ₂ O	0.20	0.20	0.192 81	0.192 81
	N ₂	0.394	0.394	0.380 18	0.380 18	
Oxidizer	Velocity (m/s)	1.0	1.0	1.0	1.0	
	Temperature (°C)	250	250	250	250	
	Mass fraction	O ₂	0.16	0.16	0.16	0.16
		CO ₂	0.09	0.09	0.09	0.09
		H ₂ O	0.08	0.08	0.08	0.08
		N ₂	0.67	0.67	0.67	0.67

擬熱分解ガス組成は、実験で得られた熱分解ガスと等しい生成エンタルピーおよびC, H原子数となるよう決定した。

表2にそれぞれの燃焼反応機構を用いたときの計算時間を示す。GRI1.2⁷⁾と比較していずれも計算時間は短縮し、特にYetter⁹⁾は約1/4となった。Yetter⁹⁾の採用により、計算負荷の大幅な低減が可能であることを確認した。

図4に温度分布および最高火炎温度の比較を示す。DRM19⁸⁾の計算結果(Case B)は、GRI1.2⁷⁾の計算結果(Case A)と非常に良い一致を示すことから、DRM19⁸⁾は適用可

表2 計算時間の比較
Table 2 Comparison of calculation time

Reaction model	CPU time/Iteration	40 000 Iteration
GRI 1.2 ⁷⁾	1.77 s	19 h
DRM 19 ⁸⁾	0.81 s	9 h
Yetter ⁹⁾	0.45 s	5 h

CPU: Xeon5355 (2.66 GHz) × 2
Fluent: Parallel × 4

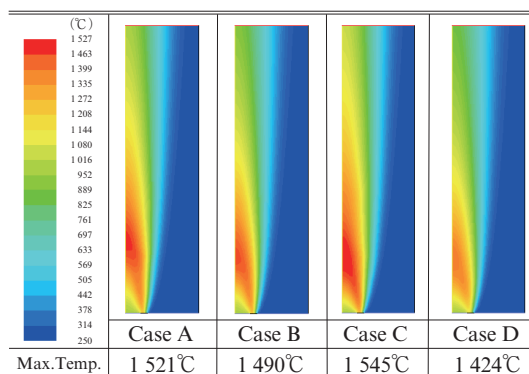


図4 温度分布および最高火炎温度の比較
Fig. 4 Comparison of temperature distributions and maximum flame temperature

能であると考えられる。一方、Case CおよびCase D (Yetterの計算結果)は、模擬熱分解ガス組成を使用した場合であるが、Case Aと比べて最高火炎温度が若干異なるものの、燃焼特性を把握する上で最も重要となる温度分布はおおむね良い一致を示している。このことから、可燃成分をH₂, COのみに置き換えた模擬熱分解ガス組成を使用しても大きな支障はなく、この組成で簡略燃焼反応機構が適用可能であると考えられる。

以上より、各燃焼モデルの特徴を踏まえた上で、今回は計算時間を最優先に考え、簡略燃焼反応機構としてYetter⁹⁾を選定し、以降の数値シミュレーションに用いることとした。

4. 三次元全体燃焼炉モデルによる燃焼解析

4.1 計算条件

次に、実機スケールの三次元全体燃焼炉モデルに対して、本数値シミュレーション技術の妥当性および有用性を検討した。

図5(a)に三次元全体燃焼炉モデルのメッシュ形状を示す。スケールは、実機(処理量:120 t/d規模)と同等の炉高13 000 mm, 炉長9 000 mm, 炉幅4 000 mmとした。メッシュ数は約85 000である。

燃焼反応機構には前項で選定したYetter燃焼反応機構⁹⁾を適用した。燃焼には有限速度モデル¹⁰⁾を、乱流にはk-εモデル¹¹⁾を、輻射にはDOモデル¹²⁾をそれぞれ使用した。

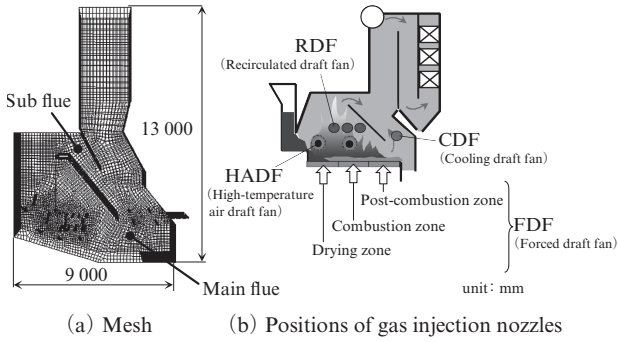


図5 三次元全体焼却炉モデルの計算領域

Fig. 5 Three-dimensional domain of entire incinerator model

表3 計算条件

Table 3 Calculation conditions

	FDF (Pyrolysis gas)		FDF (Air)			RDF	HADF	CDF
	Drying	Comb.	Drying	Comb.	Post			
Flow rate (Nm ³ /h)	5 250	5 250	1 828	2 614	786	3 100	2 100	2 710
Temp. (°C)	600	600	60	60	60	154	220	20
H ₂ (vol%)	11.4	11.4	0	0	0	0	0	0
CO (vol%)	16.3	16.3	0	0	0	0	0	0
CO ₂ (vol%)	12.8	12.8	0	0	0	11.9	6.3	0
H ₂ O (vol%)	26.2	26.2	0	0	0	21.0	11.1	0
O ₂ (vol%)	0	0	21.0	21.0	21.0	4.0	12.0	21.0
N ₂ (vol%)	33.3	33.3	79.0	79.0	79.0	63.0	70.5	79.0

FDF : Forced draft fan
 HADF : High-temperature air draft fan
 Drying : Drying zone
 Post : Post-combustion zone
 CDF : Cooling draft Fan
 RDF : Recirculated draft Fan
 Comb. : Combustion zone

さらに、壁面条件として一様の温度(1000°C)を与え、壁面を介した熱損失を考慮した。実機と同様に、燃焼用空気(FDF)、二次燃焼用空気(CDF)、高温空気(HADF)および再循環ガス(RDF)を図5(b)に示した各ノズルから供給した。

表3に計算条件を示す。本モデルでは、燃料としてごみの熱分解ガスを与える必要がある。熱分解ガスの量と組成は実機のごみ投入量および組成から推算し、FDFから供給した。FDF吹込み口は実機の火格子に近い構造とするため、乾燥段、燃焼段および後燃焼段をスリット状に分割し、燃焼用空気と熱分解ガスが交互に供給されるような構造とした。

4.2 炉内燃焼挙動の解析

図6に炉長方向垂直断面の温度分布を示す。図6から主煙道よりも副煙道に高温領域が存在していることが分かる。これは、FDFから供給される熱分解ガスが乾燥段および燃焼段上で燃焼し、その高温燃焼ガスの大部分が副煙道を経由して後流へと流れていくためである。

この燃焼ガスの流れは、図7の炉長方向垂直断面のCO

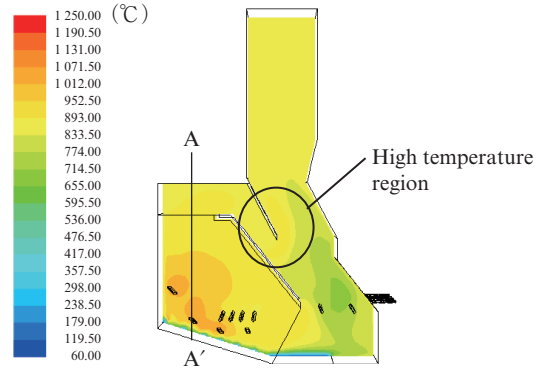


図6 炉長方向垂直断面の温度分布

Fig. 6 Temperature distribution

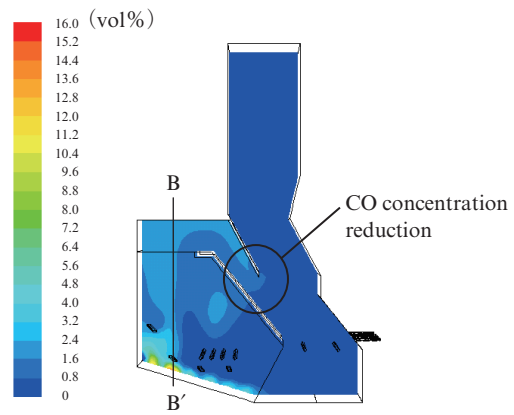


図7 炉長方向垂直断面のCO濃度分布

Fig. 7 CO concentration distribution

濃度分布からも確認できる。すなわち、COの高濃度領域は副煙道に分布しており、火格子直上の燃焼領域から発生した高濃度のCOを含む燃焼ガスが、副煙道を通過している。副煙道を通過したCOガスは、主煙道側からの比較的酸素が多いガスと衝突して燃焼しており、それによる温度上昇およびCO濃度低減の様子が図6, 7から認められる。これらは二回流ガス流れ炉の特徴であり、実機で観察される現象と合致している。

図8, 9に炉幅方向垂直断面(図6のA-A'断面および図7のB-B'断面)の温度分布およびCO濃度分布を示す。図8からは、HADFから供給される高温空気とFDFから供給される熱分解ガスとが炉中央で衝突し、炉底(ごみ層表面を想定)直上にて燃焼領域を形成していることが確認できる。また、図9から、炉側壁下部付近にCOの高濃度領域が存在していることが分かる。これは、側壁から供給されるHADFの影響で炉内に循環流が形成され、炉中央で発生した燃焼ガスの一部が滞留しているためである。これらはHiCOTを適用したJFEハイパー21ストーカシステムの平面状燃焼領域が定在する特徴を表している。

以上のとおり、対象領域を炉全体に拡大した三次元全体

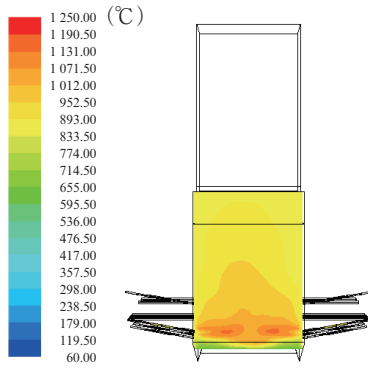


図8 炉幅方向垂直断面の温度分布

Fig. 8 Temperature distribution (A-A' Cross section in Fig. 6)

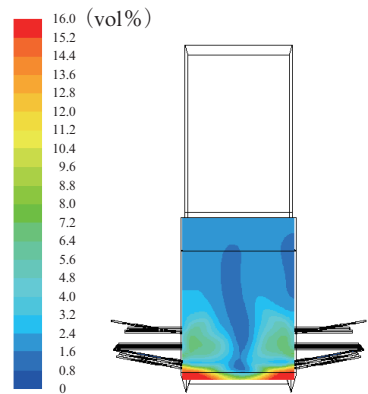


図9 炉幅方向垂直断面のCO濃度分布

Fig. 9 CO concentration distribution (B-B' cross section in Fig. 7)

燃焼炉モデルにおいて、二回流ガス流れ炉およびHiCOTのいずれの特徴も良好に再現可能であることが分かった。これにより、本数値シミュレーション技術の炉内燃焼挙動を解析する上での妥当性が確認された。

4.3 実機測定結果との比較

次に、定量的評価を行なうため、計算結果と実機測定結果との比較を行なった。実機における測定点は、燃焼室およびガス混合室に設け、温度に関しては5ヶ所、CO濃度に関しては3ヶ所である。図10、11に温度およびCO濃度についての実機測定結果と計算結果との比較を示す。実機測定結果と計算結果の差は温度については±50℃以内となり、CO濃度については±1.5 vol.%以内となった。Yetter 燃焼反応機構⁹⁾を組み込んだことで温度およびCO濃度がより正確に計算され、実機測定結果とおおむね近い値を得ることができた。

以上は三次元全体燃焼炉モデルが実機炉内燃焼挙動を定量的にも再現できることを示しており、本数値シミュレーション技術の研究開発および設計ツールとしての有用性を示すものである。

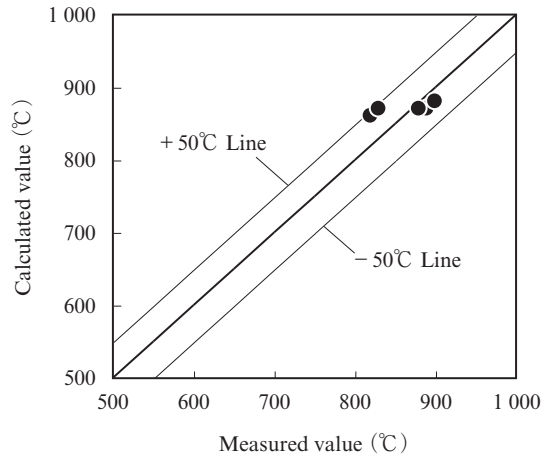


図10 温度の計算結果と実機測定結果の比較

Fig. 10 Comparison between calculated temperature and measured temperature

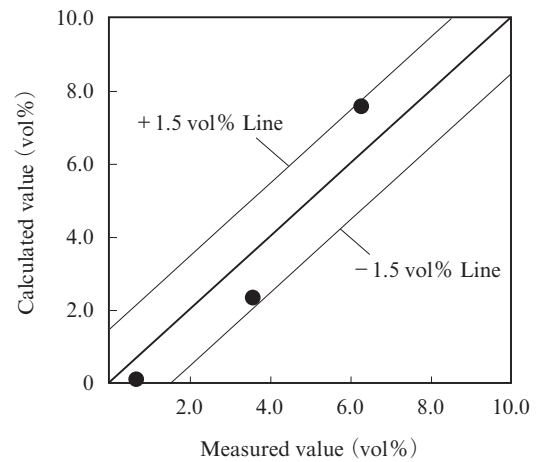


図11 CO濃度の計算結果と実機測定結果の比較

Fig. 11 Comparison between calculated CO concentration and measured CO concentration

5. おわりに

廃棄物発電に対して普及促進の必要性が高まっている中で、JFE エンジニアリングはさらに高性能なストーカ式廃棄物焼却炉の開発に向け、研究開発および設計ツールとして有用となる数値シミュレーション技術の開発に取り組んでいる。

本報では、まず、実機スケールの大規模な三次元モデルでも簡易に扱える燃焼反応機構としてYetter 燃焼反応機構⁹⁾を選定した。そして、実機スケールの三次元全体燃焼炉モデルを作成し、定量的評価から本数値シミュレーション技術の研究開発および設計ツールとしての有用性を明らかにした。

今後も、本数値シミュレーション技術のさらなる高度化に向け、精力的に取り組んでいく所存である。

本開発にあたって、東北大学流体科学研究所の小林教授に多大なるご指導、ご助言をいただいた。ここに記し、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 安田俊彦, 重政祥子, 古林通孝, 富山茂男. 第42回燃焼シンポジウム講演論文集. 2004, p. 417-418.
- 2) 岩崎敏彦, 中山剛, 傳田知広, 木ノ下誠二, 中川知紀, 鮎川将. 日本燃焼学会誌. 2011, vol. 53, no. 164, p. 85-90.
- 3) NEDO. 平成11年度高温空気燃焼制御技術研究開発成果報告書. 1999, p. 213-240.
- 4) NEDO. 平成12年度高温空気燃焼制御技術研究開発成果報告書. 2000, p. 253-292.
- 5) NEDO. 平成13年度高温空気燃焼制御技術研究開発成果報告書. 2001, p. 235-295.
- 6) 傳田知広, 中山剛, 木ノ下誠二, 中川知紀, 鮎川将. 第21回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集. 2010, p. 351-352.
- 7) <http://www.me.berkeley.edu/gri-mech/>
- 8) <http://www.me.berkeley.edu/drm/>
- 9) Yetter, R.A.; Dryer, F. L.; Rabitz, H.; Combustion Science and Technology. 1991, vol. 79, p. 97-128.
- 10) ANSYS FLUENT 12.0 理論ガイド. 第7章.
- 11) ANSYS FLUENT 12.0 理論ガイド. 第4章.
- 12) ANSYS FLUENT 12.0 理論ガイド. 第5章.



傳田 知広



中山 剛



岩崎 敏彦