

バイオマス燃焼炉内の燃焼ガス流動の数値シミュレーション

菊地正憲¹⁾・平野公孝¹⁾・諸岩広大²⁾,Numerical Simulation of Combustion Gas Flows
in a Combustion Furnace for Bio-mass Fuel

Masanori KIKUCHI, Kimitaka HIRANO, Koudai MOROIWA

Abstract

The combustion furnace is the central part of the combustion system for unutilized biomass such as high-water swine excrement and low-grade wood (Japanese cedar) charcoal. In the furnace, distributions of flow velocity and temperature of combustion gas are numerically simulated with the FLUENT software (ANSYS Inc.) based on the Finite Volume Method. From this CFD results including thermal radiation effect from the surface wall of the furnace, velocity distributions of magnitude and direction of combustion gas flows and temperature distributions in the furnace are shown with detailed data. Furthermore, the CFD results are verified to compare to the experimental data of combustion. The passing time of combustion gas particles through the high temperature region is sufficient to the countermeasures against dioxin.

Key words:

Numerical Simulation, Combustion Gas Flow, Velocity, Temperature, Combustion Furnace, Bio-mass, FLUENT

1. はじめに

バイオマス燃焼炉は、文部科学省産学連携促進事業都城盆地エリアプロジェクト(2004年度～2006年度)の中核的な実験施設である。このパイロットプラント燃焼システムが、宮崎県畜産試験場(宮崎県高原町)に設置され、2005年10月から稼動を始めた。このシステムの全体概要は、本プロジェクトの第1年度成果報告書⁽¹⁾に示されている。また、このパイロットプラントを用いたバイオマスの燃焼および乾燥の実験結果も、別途報告されている⁽²⁾⁽³⁾。燃焼/乾燥実験では、多くの測定項目についてデータを収集している。しかし、それでも最も重要な燃焼炉内の測定については、温度について6ヶ所、炉内圧力1ヶ所が計測箇所となっている。このため、燃焼炉内

の温度や圧力等の実測箇所は限定されている。一方、実際に燃焼が生じている場合の詳細な流速測定は、フライアッシュを含め多種の浮遊物が存在し、かつ、1,120K(850℃)を越える高温となっている燃焼炉内中心部では、実際上不可能である。

更に、燃焼炉内の流動状況も、高含水率の豚糞と粉炭の練り込み燃料を予備乾燥させる過程で発生する水蒸気や悪臭等を含んだ気流が、燃焼炉内に旋回を伴って吹き込まれる(以下、吹き込み流と称する)。これに加えて、燃料をかく拌するために回転しているレーキからも燃焼用空気が炉内周方向に噴出しており、大変複雑な流れとなっている。

このように燃焼実験から得られるデータは、限定的にならざるを得ない。しかし、燃焼炉内の状況を把握し、ダイオキシン対策の条件を検討することが、特に必要となっている。

従って、本研究では、燃焼炉内の燃焼ガスの流動状況や温度分布等に関する数値シミュレーション

1)機械システム工学科教授

2)機械システム工学専攻大学院生

を実施する。この数値解析と燃焼実験の結果を互いに補完させ、全体として燃焼炉内の状況を把握することを目的とし、具体的には、下記の項目について解析し、これらが、燃焼炉内の速度分布、温度分布および燃焼による化学反応生成物の濃度分布等に及ぼす効果を明らかにする。

- (1) 燃焼炉内に吹き込み流を流入させるノズル位置の影響
- (2) 燃焼炉壁面からの放熱効果の影響
- (3) 吹き込み流に含まれている水蒸気量の影響

2. 解析方法と解析条件

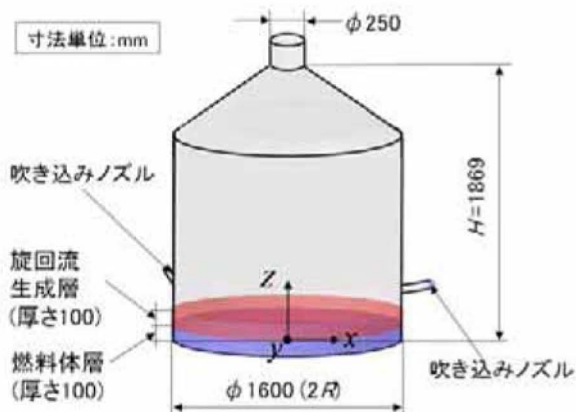
2.1 熱流体解析ソフトウェア

流れの場および化学反応場の解析は、以下に記されるさまざまなモデル化を行い、数値計算が実行される。このためのツールは、有限体積法に基づく熱流体解析ソフト FLUENT (Fluent Inc., Ver.6.1) が用いられた。支配方程式は、連続の式、運動量輸送方程式、標準 $k-\varepsilon$ モデルの輸送方程式及び化学種の輸送方程式である。この解析アルゴリズムとして、分離型ソルバーが採用されている。更なる数値計算上の詳細な情報は、マニュアル“FLUENT User's Guide”に記載されている⁽⁴⁾。

2.2 流れ場のモデル化

2.2.1 燃焼炉の形状と吹き込みノズルの設定

解析対象のパイロットプラント燃焼炉は、図1に示すように固定床型小型炉である。その直径は、1,600mm (半径800mm) であり、高さ H は、1,869mm である。炉の直径は、高さ1,500mm以上でロート状に細くなり、出口直径は250mmとなる。



高含水率の豚糞と粉炭の練り込み燃料は、ロータリーキルン乾燥機を用いて予備乾燥される。その際に発生する水蒸気及び悪臭等は、燃焼炉直径に関し相対する炉壁位置の2ヶ所に設けられた吹き込みノズルを通して燃焼炉内に吹き込まれ、旋回流を作る。この吹き込みノズルは、直径51mmであり、炉内内向きに 17.5° 、下向き(炉床面向き)に 10° 傾いている。また、その取り付け位置は、燃焼炉底面から365mm(下段ノズル)、または845mm(上段ノズル)の二つの場合を選択できる。

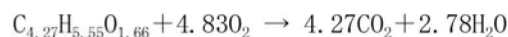
吹き込み流の流量は、含まれる水蒸気量によって異なるが、水蒸気を含まない乾燥空気質量流量 \dot{M}_{nozzle} は、 0.063kg/s ($=227\text{kg/h}$) である。

2.2.2 燃料層と旋回流生成層のモデル化

燃焼が生じている流れ場のモデル化として、図1に示すように、燃焼炉の底部にそれぞれ厚さ100mmの燃料層および旋回流生成層を導入している。

燃料層は、豚糞と粉炭の練り込み燃料と粒炭を混合させて燃焼炉に投入されたバイオマス燃料が堆積している層をモデル化したものである。固体燃料は全て気体になったものと仮定し、燃料層は、燃料化学種を供給するソース項として機能する。

供給される燃料は、含水率約10%の乾燥豚糞、含水率約5%の木炭の混合物である。ただし、含水率は、全重量に対する水分重量の割合(%表示)で定義される。これらバイオマスの元素分析の結果は、乾燥豚糞 (C 42%, H 6%, O 31%) と木炭 (C 87%, H 2%, O 10%) の組成となっている。燃料は、この元素分析を基に、乾燥豚糞と木炭を重量比8:2で混ぜ合わせた等価的な燃料化学種を設定する。従って、この等価燃料の元素分析は、C 51%, H 6%, O 27%となり、これを各原子量で割ることにより等価燃料の分子式が決まる。また、この分子量は83.35となり、低位発熱量は21.3MJ/kgとなる。燃焼の際の気体の化学反応は、次の一段総括反応による体積反応を仮定する。



等価燃料の比熱、温度伝導率、粘性係数等の物性値として、近似的にメタンガスのデータが用いられた。また、燃焼ガスの成分は複雑であるが、主要な気体による混合系物質として物性値が定義された。

燃焼実験⁽²⁾⁽³⁾では、乾燥豚糞と木炭の混合割合として重量比6:4の燃料を主に対象にしている。この場合の等価燃料の低位発熱量は23.2MJ/kgであり、重量比8:2の燃料よりも高い発熱量となる。このため、実験での燃焼炉内温度はより高温となることが予想され、ダイオキシン対策の観点からはより安全側に作用すると考えられる。従って、本論文では、低い発熱量となる重量比8:2の燃料を対象とする。

数値計算に対しては、燃焼実験のデータから、燃料の投入量 \dot{M}_{fuel} を50kg/hとし、燃料層単位体積あたりの投入量 \dot{m}_{fuel} は0.0543 kg/m³sとする。また、燃料層には、直径5mmの均一な粒子が一樣に堆積しているとして、空隙率0.4の多孔質媒体の流動抵抗を設定している。

一方、投入された燃料をかく拌するための冷却用かく拌レーキは、ゆっくりと回転している。このレーキからは、燃料を燃焼させるために、空気が供給される。この供給空気は、レーキの回転方向とは反対方向に噴出し、吹き込み流と同じ方向の旋回流を作っている。旋回流生成層は、このレーキから噴出する旋回流効果をモデル化したものである。供給される乾燥空気の質量流量 \dot{M}_{air} は、実験データより0.018 kg/sであり、旋回流生成層の単位体積あたりの空気質量 \dot{m}_{air} が、連続の式のソース項として0.0895 kg/m³sと与えられる。

2.2.3 流れの設定と燃焼の化学反応モデル

流れ場は、燃焼現象を伴う化学反応流として解析される。流れに関する設定は、三次元定常流れとし、乱流モデルには、標準 $k-\epsilon$ モデルを用いる。化学反応モデルには、使用上の制約の少ない一般有限反応速度モデルを用いる。また、反応速度式には、乱流の混合作用により燃焼反応が制御される渦消散モデルを使用している。

2.3 メッシュ分割

流れ場は六面体要素でメッシュ分割される。乱流境界層の壁面近傍における速度分布には、Prandtlの壁法則を適用することにより、きわめて薄い層流底層や遷移層の内部までメッシュ分割を行うことは不必要となる。ただし、壁面近傍でのメッシュ分割が適切になるように、即ち、壁面に隣接するメッシュの壁面垂直方向の無次元高さ y^+ が30~500となるように、調整する必要がある。ここで、 $y^+ = yv_\tau/\nu$

であり、 y は壁面垂直距離、 v_τ はまさつ速度、 ν は流体の動粘性係数である。

メッシュの調整の結果、本計算ではおおよそ $y^+ \approx 67$ となっている。

吹き込みノズルの太さや位置により、メッシュ分割数は異なるが、代表的なメッシュ分割数は、約87,000である。

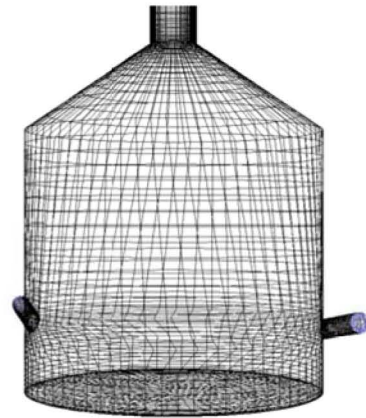


図2 メッシュ分割

2.4 計算条件

2.4.1 流入条件

(1)燃焼炉床面：2.2.2で示した燃焼層における燃料化学種の供給(流入)を、化学種の輸送方程式のソース項として与える。同様に、旋回流生成層における燃焼用空気の供給(流入)も、連続の式のソース項として与える。

(2)炉壁面上の吹き込みノズル断面：水蒸気を含む空気について、旋回方向及び半径方向の流入速度を与える。

2.4.2 壁面条件

流れについては滑りなし条件が、また温度分布については断熱または放熱の条件が課せられる。

2.3.3 流出条件

燃焼炉の出口においては、圧力が0Pa(基準圧)となる条件を与える。

3. 解析結果

3.1 ノズル位置が燃焼炉内の速度分布および温度分布に及ぼす影響

図3は吹き込みノズルを含む子午面断面内の旋回方向速度成分、図4は子午面内二次流れの速度成分、

図5はその拡大図, 更に, 図6は炉内温度分布を示す. 各図中の図(a)は下段ノズルの場合であり, 一方, 図(b)は上段ノズルの場合である. 計算条件として, 炉壁面は断熱であり, ノズルからの吹き込み流は全て水蒸気と仮定している.

図3(a)(b)より, 燃焼炉内の旋回流は, 炉壁近傍で速い旋回速度成分を持ち, 全体として剛体回転に近い旋回流(一次流れ)となっている. 一方, 図4(a)(b)は, 炉内の全体的な子午面内の二次流れを示す. 炉内直径に基づく断面積がノズル断面に比して大きいため, 炉の子午面内の流れは吹き込み速度に比して大変遅くなる. この燃焼炉軸方向上向きの二次流れは, 燃焼ガスが燃焼炉から流出するまでの炉内通過時間を支配しており, 遅い二次流れは長い通過時間を意味する. 図5(a)(b)は, 子午面内二次流れである. 図5(a)より, 下段ノズルから供給された流れは, 直ちに炉床面に向けて下方に流れ, その後床面に沿って炉中心に向かい, 炉中心部の狭い範囲からまとまって上昇している. これは, 悪臭を含む流れの多くが炉中心部の高温域を通過することを示す. 一方, 図5(b)より, 上部ノズルから供給された流れは, 下部ノズルの場合(図5(a))と同じであるが, 炉壁面と炉床面が交差する角領域に生じたコーナー渦に誘起されて, 一部の流れは炉中心に達する前に上昇してしまう. これは, 悪臭等の一部が高温域を通過しない可能性を示唆する.

図6(a)(b)は, 炉内温度分布を示している. 下段

ノズルの場合(図6(a))には, 炉中心部の広い範囲で高温領域が形成されている. 一方, 上段ノズルの場合(図6(b))では, 炉中心部の高温領域は狭まっている. 吹き込み流は全て水蒸気と仮定しているのので, 炉内の最高温度は1,000K程である.

図7(a)(b)は, 下段ノズルの場合における炉中心軸(Z軸)上の上昇速度 W 及び温度 T の分布を示す. 即ち, 図7(a)は, 図4(a)の二次流れの炉中心軸上に沿う W の分布を示している. 図1に示される炉形状のように, Z が1.5mを越えると燃焼炉の形状はロート状に絞られるため, 上昇速度 W は急増している. また, $Z < 1.5$ mである燃焼炉下部の円筒状となっている範囲では, W がほぼ0.6m/sで一定である. 従って, 燃焼ガスの粒子が炉中心軸に沿って高温領域の1.5m高さまで到達するに要する通過時間は, 約2.5秒である. また, 図7(b)の温度 T の分布は, 図6(a)の三次元温度分布の炉中心軸上のデータに対応している. ◆は実験結果⁽²⁾を示す. 計算条件では, 炉壁表面からの放熱や吹き込み流の水蒸気を無視したモデルであるため, 得られた計算値は, 実験値よりも高目となっているが, ほぼ一致している. 燃焼炉の軸上温度は1,120K(850°C)を越えており, 温度に関する解析結果は, 通過時間と共にダイオキシン対策の条件が満たされることを示す.

3.2 吹き込み流の水蒸気量の影響

高含水率の豚糞を予備乾燥させた際に発生する

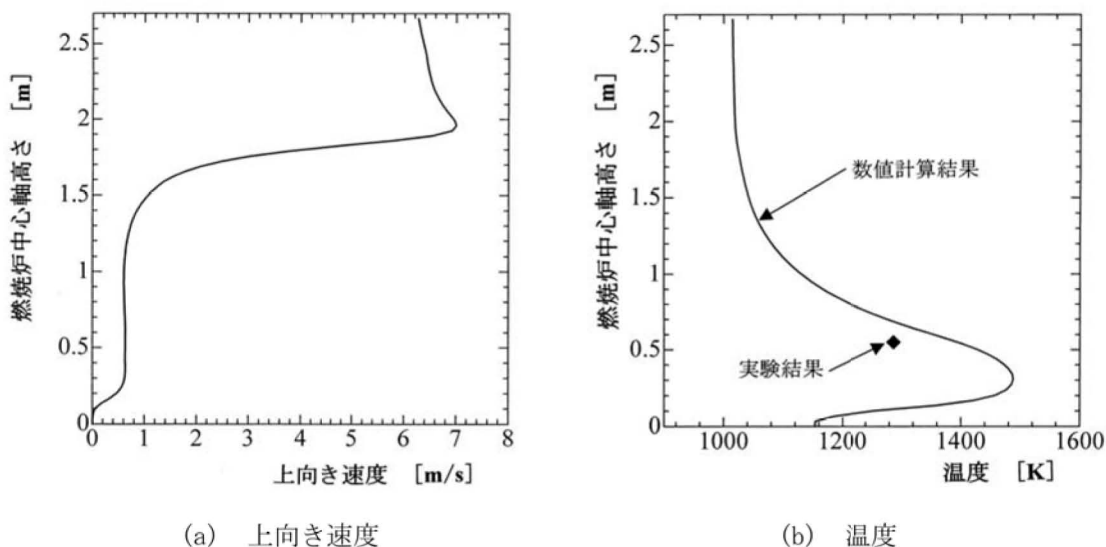


図7 燃焼炉中心軸に沿う上向き速度と温度の分布

水蒸気や悪臭を含んだ空気は、吹き込み流としてノズルから燃焼炉に送られる。この吹き込み流が持つ水蒸気量は、炉内温度分布に大きな影響を与える。

図8(a) (b) (c) (d)は、燃焼炉内温度 T の分布に及ぼす水蒸気量の影響を示す。ただし、水蒸気 M と乾燥空気 A との質量の割合は、(a)0:1(乾燥空気のみ)、(b)0.5:1, (c)1:1, (d)1:0.5である。ただし、炉壁からの放熱の効果はない(断熱壁)と設定されている。更に、図9には、図8に対応した水蒸気 M と乾燥空気 A の質量割合において、燃焼炉中心軸上の温度 T の分布に及ぼす水蒸気量の影響を示す。

吹き込み流の水蒸気は、燃焼炉に流入する時の温度から、図3及び図4の流れに乗って移動し、最終的には1,040K(770°C)程度の出口温度まで加熱され流出する。従って、水蒸気量が多くなるにつれて、燃焼ガスから水蒸気の加熱に必要なエネルギーが奪われるため、炉内温度全体が大きく低下すると共に、燃焼炉内の最高温度も非常に低くなることを示している。

また、図9の中の破線は、燃焼実験⁽²⁾における条件(水蒸気量:空気量=0.17:1)の場合の計算結果である。破線の温度分布は、炉中心軸上のいたるところ、1,120K(850°C)を越えることを示している。

3.3 燃焼炉壁の表面からの放熱の影響

図10(a) (b) (c) (d)は、炉壁表面からの放熱量 Q が、それぞれ $Q=0, 500, 1,000, 1,500 \text{ W/m}^2$ の場合における燃焼炉内の温度分布を示す。ただし、吹き込み

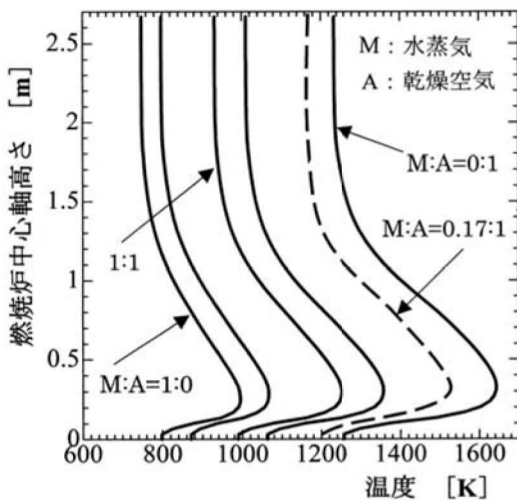


図9 燃焼炉中心軸上の温度分布に及ぼす水蒸気量の影響

流は、全て乾燥空気(水蒸気量は0)と設定されている。放熱量 Q が大きくなると共に、炉中心部の高温領域が狭められてくる。

図11は、図10(a) (b) (c) (d)に対応した燃焼炉中心軸上の温度分布を示す。放熱量の増大は、炉床面に近い領域の最高温度には大きな影響を与えず、むしろ炉出口にかけての温度分布を低下させる。燃焼炉に対する放熱量の推定値は、 $Q \sim 1,000 \text{ W/m}^2$ と想定されるので、この場合の炉中心軸上の温度は、炉出口で約1,120Kであり、炉内部ではこれよりも高温となっている。

3.4 燃焼ガス成分の質量分率

図12(a) (b) (c)には、等価燃料($\text{C}_{4.27}\text{H}_{5.55}\text{O}_{1.66}$)、二酸化炭素(CO_2)、水蒸気(H_2O)の質量分率の等値線を、それぞれ示す。ただし、計算条件は、炉壁からの放熱量 $1,000 \text{ W/m}^2$ 、吹き込み流中の水蒸気量は水蒸気量:空気量=0.17:1のように燃焼実験⁽²⁾の条件に近い場合に対応している。等値線の間隔 Δ は、図(a)が $\Delta=0.1$ 、図(b) (c)が $\Delta=0.01$ となっている。燃料層の中では、等価燃料の質量分率が高く、二酸化炭素や水蒸気の質量分率は低くなっている。燃料層上部の燃焼炉内の質量分率の分布状況は、以下である。図(a)より、等価燃料は、燃焼が行われている炉中心部以外には燃焼されてしまっておりほとんど存在していない。同様に、図(b)は、燃焼の化学反応により二酸化炭素は炉床より上部の炉中心部で生成され、その位置での CO_2 濃度は高く、炉中心部から炉周

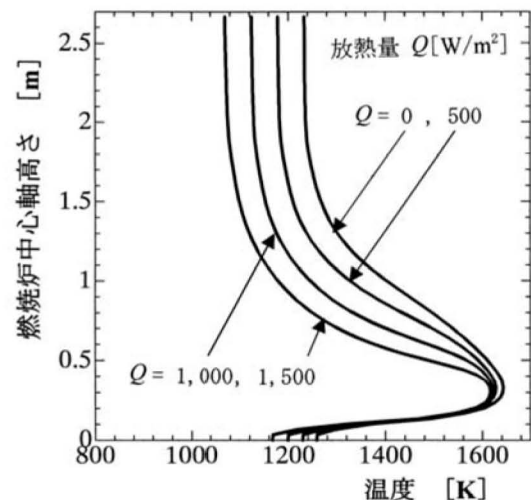


図11 燃焼炉中心軸上の温度分布に及ぼす炉壁放熱量の影響

辺部にかけてCO₂濃度は減少している。一方、図(c)の水蒸気は、燃焼の化学反応により生成された水蒸気に加えて、予備乾燥機で作られた水蒸気が吹き込みノズルから燃焼炉内に送り込まれるために、二酸化炭素の分布状況とは異なった分布を示しており、炉中心部から周辺部にかけてわずかではあるが増加している。

4. まとめ

有限体積法に基づく数値解析により、豚糞及び木炭のバイオマス燃料の燃焼に伴う燃焼炉内の速度場、温度場、燃焼ガスの成分濃度等の分布特性を明らかにした。得られた主な結果は、以下のとおりである。

- (1) 豚糞と粉炭の練り込み燃料の予備乾燥キルン炉から発生する吹き込み流れを燃焼炉に導入するためのノズル位置は、流れの状況から炉床面に近い下段位置が望ましい。
- (2) 炉中心軸上の上昇速度分布及び温度分布から、1, 120K (850°C) 以上の高温領域の通過時間は、2.5秒を越えている。
- (3) 予備乾燥キルン炉から発生する吹き込み流に含まれる水蒸気量は、炉全体に渡る温度分布を低下させる。しかし、燃焼実験から得られる水蒸気量の場合 (水蒸気量: 空気量=0.17:1) であっても、炉中心軸上の温度分布は、1, 120K (850°C) を越えている。

- (4) 燃焼炉壁面からの放熱効果は、炉中心部の高温領域の最高温度には影響を与えない。一方、放熱量の増大は、燃焼炉出口付近や炉壁近傍の温度を低下させる。
- (5) 以上の数値シミュレーションで得られたデータを総合すると、燃焼炉から発生する燃焼ガスは、ダイオキシン対策条件を満たしていることが示され、燃焼実験を補完する基礎的データが与えられた。

参考文献

- (1) 平野, 菊地, 他, パイロットスケール燃焼システムの基本設計, バイオマスの高度徹底活用による環境調和型産業の創出(第1年度成果報告書), 宮崎県産業支援財団, pp. 21-24, 2005.
- (2) 菊地, 平野, 守田, 諸岩, 森田, バイオマス燃料(豚糞と木炭の混合体)のパイロットスケール燃焼システムの特性解析実験, 宮崎大学工学部紀要, 38, pp. 233-239, 2009.
- (3) 菊地, 平野, 瀬田, 森田, 豚糞と木炭の混合バイオマス燃料の燃焼特性と改良された燃焼システムの熱バランス, 宮崎大学工学部紀要, 38, pp. 241-248, 2009.
- (4) FLUENT 6.1 User's Guide, Fluent Inc., 2003.

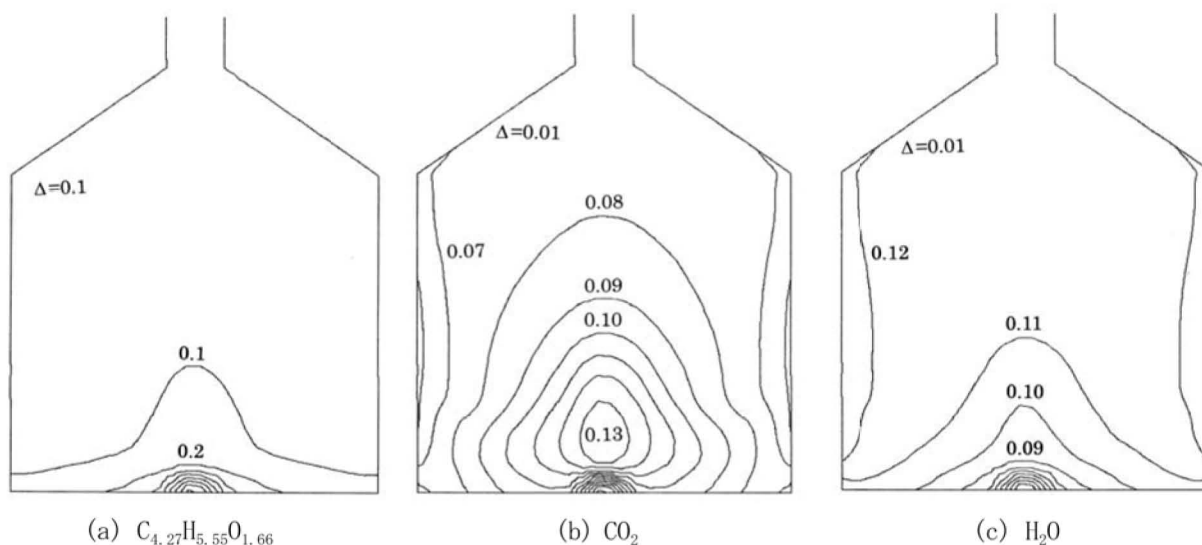


図12 化学種の質量分率の等値線

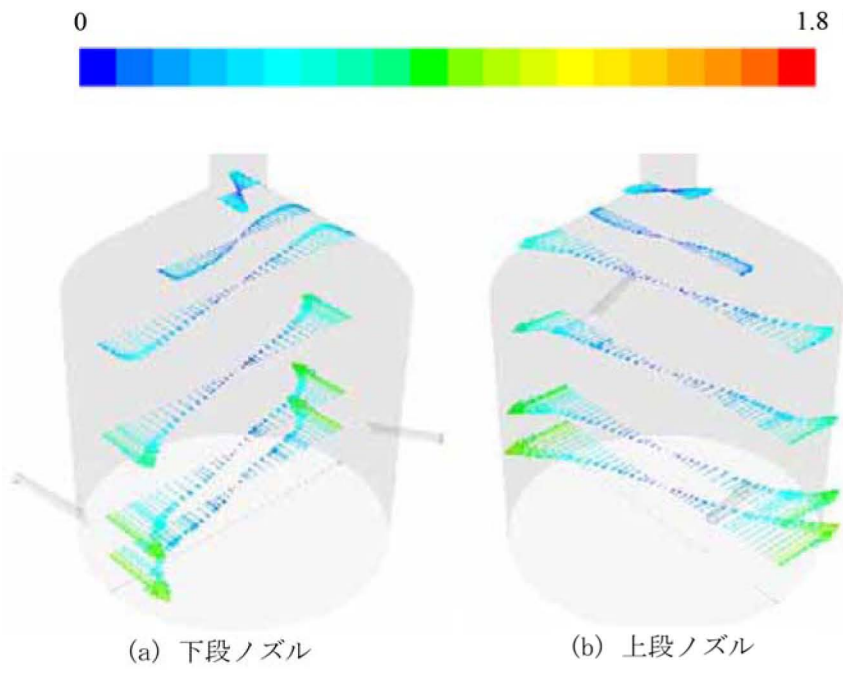


図3 燃焼炉内の旋回速度分布

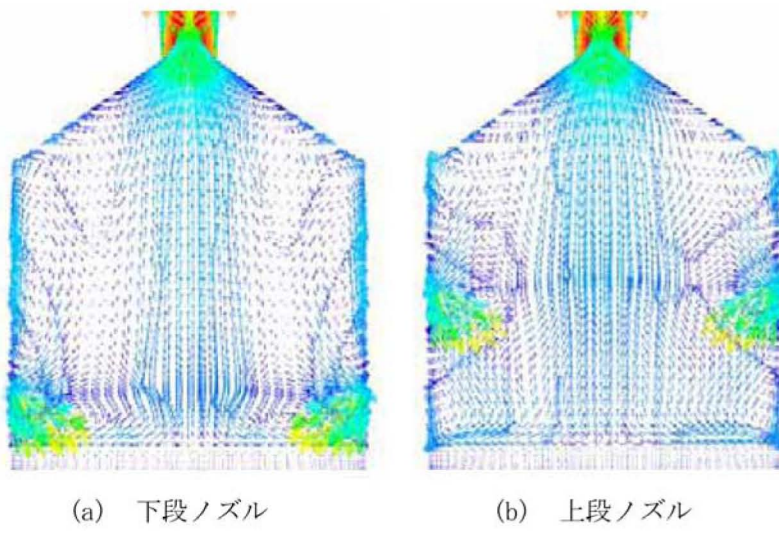


図4 燃焼炉子午面内の二次流れ

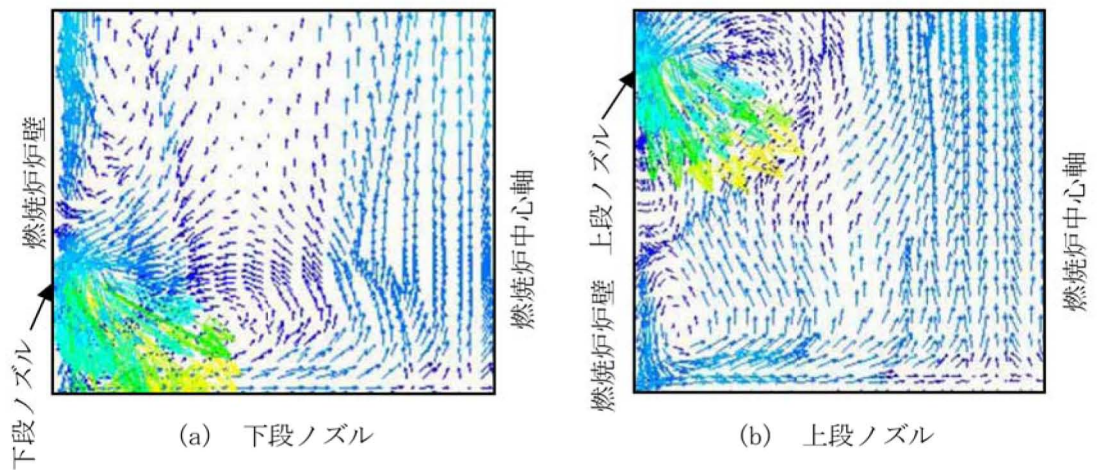


図5 燃焼炉の床面と側壁面とのコーナー部における子午面断面内速度分布(拡大図)

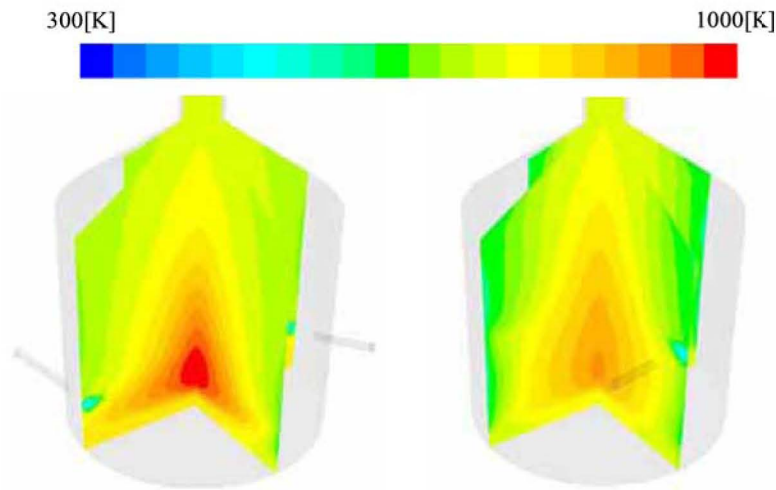
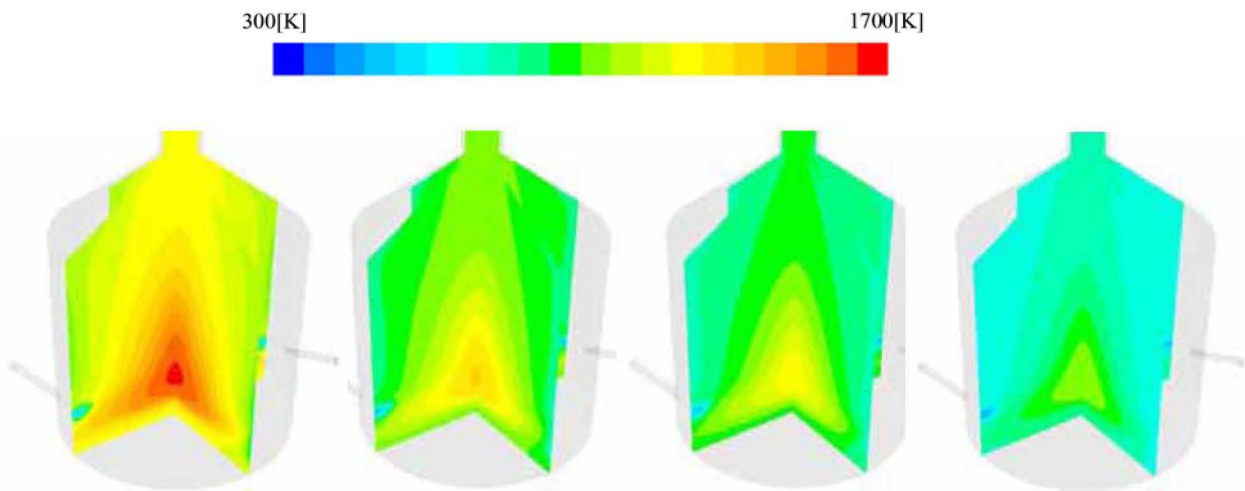


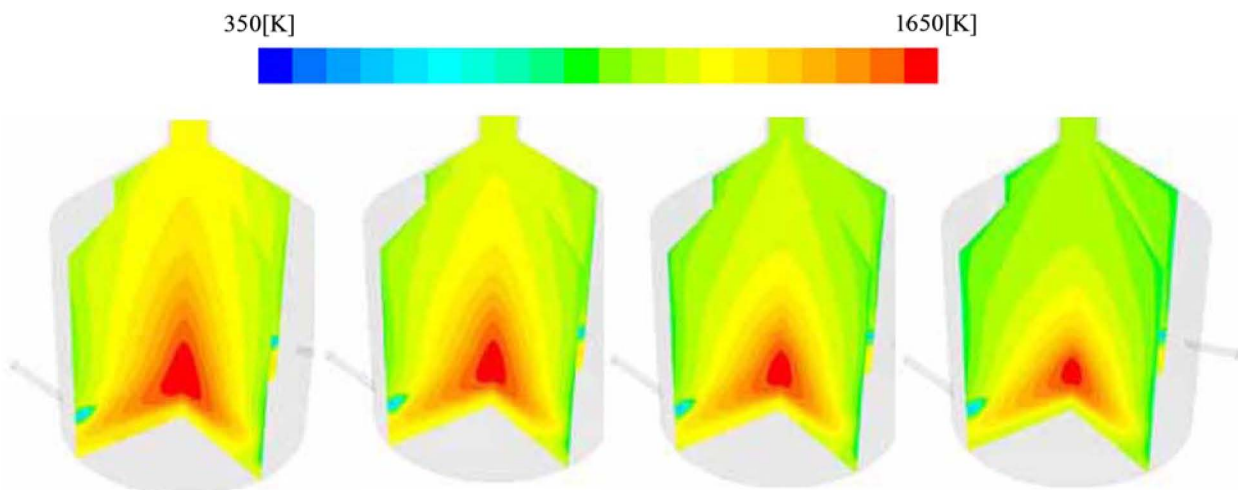
図6 燃焼炉内の温度分布

- (a) 下段ノズル (左)
- (b) 上段ノズル (右)



- (a) $M:A=0:100$
- (b) $M:A=0.5:1$
- (c) $M:A=1:1$
- (d) $M:A=1:0.5$

図8 燃焼炉内温度分布に及ぼす水蒸気量の影響 ($M:A$ = 水蒸気量:乾燥空気量)



- (a) $Q=0 \text{ W/m}^2$
- (b) $Q=500 \text{ W/m}^2$
- (c) $Q=1,000 \text{ W/m}^2$
- (d) $Q=1,500 \text{ W/m}^2$

図10 燃焼炉内温度分布に及ぼす炉壁面の放熱量の影響 (Q =放熱量 $[\text{W/m}^2]$)