B103 透明模型を用いた焼却炉廃熱ボイラの PTV 解析

渡辺正彦, 黒石 智, 川島 勝[○], 寶正史樹 (株式会社クボタ)
西尾 茂 (神戸商船大学)

Flow Visualization in a Boiler of a Waste Incinerator Model

Masahiko Watanabe, Satoshi Kuroishi, Masaru Kawashima,
Fumiki Houshou, Shigeru Nishio

ABSTRACT

The super-heater (SH) tubes in an incinerator have been locally corroded by non-uniform partially accelerated gas flow. It effects maintenance and cost performance. In order to level the gas velocity at the super-heater entrance, putting a baffle in a boiler may be effective.

The leveling effect of a baffle was studied by using a three-dimension model and employing PTV (Particle Tracking Velocimetry) analysis. After some trial and error, a baffle configuration was found to give the reduction of maximum velocity and standard deviation of the gas flow.

Key words: Corrosion, Waste, Incinerator boiler, Visualization, PTV

1. 緒言

近年、エネルギーの有効利用という観点から、ゴミ焼却炉の廃熱を利用したゴミ発電が盛んであり、発電効率を上げるために蒸気の高温高圧化が図られている。しかしながら、熱交換に用いる排ガスが腐食性ガスであるため伝熱管が腐食するという問題を抱えている。Fig.1 は管壁温度と腐食速度の関係を示した図である。管壁温度が 320℃以上で腐食が急速に進むことが分かる。また Fig.2 に示すように、腐食の激しい過熱器 (SH) では排ガス流れが偏流することで局部的に腐食が進行するとされている。これらのことから、廃熱ボイラの蒸気条件はこれまで約 300℃, 30ata が上限とされ、発電効率は 10~15%と低く抑えられていた。この対策として、蒸気の高温高圧化 (400℃, 40ata 以上) には耐腐食性材料の開発および設計による局部腐食の回避方法が検討されている。

Fig.1 Relation between tube surface temperature and corrosion rate ⁽¹⁾

本研究では設計による腐食回避に着目した。すなわち、SH

の局部腐食を軽減するために排ガスの偏流を抑制する整流板を設ける方法である。この整流板の最適条件に関して、透明模型を用いた流れの可視化実験ならびに PTV 解析を行った。

Fig.2 Effect of a baffle on leveling the gas flow in an incinerator boiler

2. 目的

著者らは、これまでに2次元開放系水路を用いた流れの可視化実験を行い、整流板の位置・形状・大きさを決定してきた。しかしながら、2次元模型を用いた実験では基準ゴミ (平均的なゴミ質) を模擬した実験であったため、装置の制約上、排ガス量が多い高質ゴミ (発熱量が高い) の場合のデータが採取できていなかった。そこで今回は、3次元模型を製作し、高質ゴミを模擬して実験を行い整流板の効果を確認するとともに2次元可視化実験結果との比較を行うこととした。

3. 方法

Fig. 3 に実験概略図を示す。ポンプを用いて模型内に水およびトレーサ（ダイイオン： $\phi 0.1\text{mm}$ ）を循環させ、側面または正面よりレーザーを照射する。この様子をハイスピードカメラ（コマ数：240fps）にて撮影し、市販のソフトにより PTV 解析（2/3 時刻パターンマッチング法）を行った。

Fig. 3 Schematic of experimental apparatus

Table1 に高質ゴミを模擬した実験条件を示す。本実験では SH 直前でのレイノルズ数 9.4×10^4 を実機と合わせた。

Table 1 Condition of experiment

材質	アクリル -
模型スケール	1/20 -
流路幅	155 mm
奥行き	178 mm
SH 入口流速	0.32 m/s
流量	530 l/min
水温	54 °C
レイノルズ数	9.4×10^4 -

Table2 に解析条件を示す。平均した流れが得られるよう計測回数を増やして実験を行った。また、PTV 解析に相応しい条件を検討の上⁽²⁾、市販のソフトにより PTV 解析（3 時刻パターンマッチング法）を行った。

Table 2 Condition of PTV analysis

計測時間	5/8s × 16 回 = 10s
画像枚数	240fps × 10s = 2400f
粒子移動距離	~ 25pix
解析領域	600 × 130 pix
粒子数	40 程度
平均粒子間距離	44pix

なお、側面から撮影した分については流れがレーザーシートを横切るため、精度は落ちるが、2 時刻パターンマッチングにより解析した。撮影断面は Fig. 4 に示す通りであり、断面 A, B は正面から、断面 C は側面から撮影を行った。図中着色部に解析領域を示す。

Fig. 4 Cross-sections formed by laser sheet

4. 結果

4.1 SH 入口流速ベクトル

Fig. 5 に PTV 解析により得られた速度ベクトルを示す。(a) (b) は断面 A の速度ベクトルである。(a) 整流板なしの場合、流路内側に大きな渦が形成されており、主流に対して内側（図中左側）は逆流、外側（図中右側）は速い流れになっていることが分かる。(b) 整流板挿入時の場合、(a) に比べて渦の中心位置が上方内側へ寄っていると見ることができる。

(a) Cross-section A / high calorie waste / without baffle

(b) Cross-section A / high calorie waste / with baffle

Fig. 5 Velocity vectors at the super-heater entrance

(c) Cross-section C / high calorie waste
/ without baffle

(d) Cross-section C / high calorie waste
/ with baffle

Fig.5 Velocity vectors at the super-heater entrance
(continued)

(c) (d)は断面 C の速度ベクトルである。(c) (d)両者ともほぼ左右対称の流れになっており、(d) 整流板挿入時の場合、(c) 整流板なしに比べて流速が小さくなっていることがわかる。

4.2 流速分布

Fig.6 に断面 A における SH 直前部の流速分布を示す。

a) Cross-section A / high calorie waste
/ without baffle

b) Cross-section A / high calorie waste
/ with baffle

Fig.6 Velocity profile at the super-heater entrance

流速は無次元流速すなわち計算上の平均流速で除したもので表している。(a) 整流板がない場合、グラフ右側（流れの外側）で流速が大きく、グラフ左側（流れの内側）で流れの向きが主流と逆向きになっている。(b) 整流板がある場合、(a) に比べてグラフ右側（流速が大きい部分）の流速が低減されていることがわかる。

4.3 バッフルの整流効果

Table3 に SH 直前部流速分布から得られた最大流速および流速分布の標準偏差に関する結果を示す。整流板の挿入により、最大流速は少なくとも約 20%低減されることがわかる。

Table 3 Effect of a baffle on leveling the gas velocity
at the super-heater entrance

整流板	断面	高質ゴミ		基準ゴミ	
		最大流速	標準偏差	最大流速	標準偏差
なし	A	3.04	1.06	3.16	1.07
あり	A	2.49	0.81	2.54	0.92
低減率	%	18.2	23.9	19.8	14.0
なし	B	2.87	0.94	2.80	0.86
あり	B	1.68	0.54	1.74	0.48
低減率	%	41.4	42.6	37.7	44.2
なし	C	3.24	1.04	2.92	0.89
あり	C	2.21	0.67	2.14	0.69
低減率	%	31.7	35.4	26.7	22.3

4.4 渦度

Fig.7 に断面 A における SH 直前部の渦度を示す。色の濃い部分が渦度の大きい部分である。(a) 整流板がない場合に比べて、(b) 整流板を設けた場合、渦度の大きい部分が流れの内側（図中左側）に寄っていることがわかる。

a) Cross-section A / high calorie waste
/ without baffle

b) Cross-section A / high calorie waste
/ with baffle

Fig.7 Vorticity at the super-heater entrance

5. 考察

5.1 データの信頼性

本実験では異なる 2 方向から撮影してそれぞれ速度場を得ているが、Fig.8 に示すようにこれを元に解析した流速ベクトルに重なる部分つまり交線ができる。模型正面から撮影した中央断面 A は、模型が対称であるため、奥行き (Y) 方向の流速が 0 と近似でき、2 次元計測ではあるが断面 A・C の Z

軸方向流速を比較することができる（通常、2次元計測では奥行き方向の流速は計測できない）。すなわち、2方向から計測した流速が一致することを確認できる。

Fig. 8 Intersection of cross-section A and C

Fig. 9 は上述した考え方のもとに整流板なし/高質ゴミの場合に断面 A および断面 C における交線上の Z 軸方向流速を比較した図である。2方向から計測した流速の誤差はせいぜい 5%程度であった。同様に、他の条件でも比較したところ流速の誤差は Table 4 に示す結果となった。整流板を挿入した場合は誤差が 15%程度となったが、これは 0 と近似した Y 軸方向流速が、整流板による乱れの影響で大きさを持ったため、あるいは計測線上では整流板の影響で速度勾配が大きくなり測定誤差に敏感になっているためであると考えられる。

Fig. 9 Velocity profiles on the intersecting line observed from different directions

Table 4 Error of measurement in the two directions

	高質ゴミ	基準ゴミ
整流板なし	4.7 %	7.5 %
整流板あり	12.3 %	16.6 %

計測誤差や測定位置による誤差、解析誤差などを考慮すれば異なる 2 方向から計測した流速は十分一致していると言え、

信頼性のあるデータが得られていると判断できる。

5.2 2次元実験との比較

本研究では、3次元模型での実験を行う前に、2次元開放系水路での実験で整流板の位置・形状・大きさを決定した。整流効果について、同一条件の下で両者を比較検討する。Fig. 10 は 2次元・3次元それぞれの基準ゴミを模擬した整流効果について比較した図である。この図から 2次元での実験結果の方が整流効果が大きいことがわかる。これは、2次元の実験に開放系水路を用いたため、整流板による流れの変化が深さ方向に逃げてしまい、その結果、各低減率の値が大きくあらわれたものと考えられる。したがって、3次元模型を用いた実験の方がより現実に近い状態を現していると考えられる。ただし、本研究のように整流板の最適条件をおおまかに把握するという意味において 2次元開放系水路を用いた実験は有効な手段であると考えられる。

Fig. 10 Comparison of the leveling effect of 2-D and 3-D model

6. 結言

本研究の結果、高質ゴミを模擬した場合、整流板を挿入することにより SH 直前部の流速分布から最大流速・標準偏差はそれぞれ 18%・24%低減され、基準ゴミを模擬した場合でも SH 直前部の最大流速・標準偏差はそれぞれ 20%・14%低減されており、整流板挿入による整流効果が確認された。また、PTV 解析を行うことで得られた定量的データは整流板の効果を比較する上で非常に有効であると考えられる。

今後、実機において流速を計測することで整流効果の確認を、また腐食量を測定することで整流化と腐食量の関係を把握していく予定である。

参考文献

- 1) 湯川憲一：ボイラチューブの腐食対策技術について、ごみ発電の技術開発動向と実用化, pp151-173 (1995)
- 2) (社) 可視化情報学会：PTV の要点, 可視化情報学会講習会テキスト