



都市ごみ焼却炉ボイラ付着灰等の高温熱物性値*

篠 靖夫**, 鈴木敏夫**, 久保顕一**, 基 昭夫**

** 東京二十三区清掃一部事務組合

High-temperature Thermophysical Properties of the Flyash and Other Substances Adhered to the Surface of Boiler Tubes of MSW Incinerator*

Yasuo Shino**, Toshio Suzuki**, Kenichi Kubo** and Akio Motoi**

** Clean Authority of Tokyo

Boiler steam conditions of MSW incinerators have recently been shifting to higher temperature and pressure to attain more efficient energy recovery from the waste. Consequently, boiler tubes are now exposed to more harmful environment than before. Flyash comprising particulate matters in the hot gas stream, part of which finally accumulates on the surface of boiler tubes, plays a crucial role in erosion and corrosion mechanism of boiler materials. However, the thermophysical properties of these substances at actual gas temperatures are not well reported. Test samples were collected from several MSW incinerators in order to clarify high temperature thermal conductivities of flyash adhered to boiler tubes, outer surface scale formed on riser tubes, and incinerated ash. Results from the measurement showed flyash adhered to riser tubes and that to superheater have respective high-temperature thermal conductivities and the thermal conductivity of outer surface scale on riser tubes has a decreasing tendency with increasing temperature. Besides, two thermal conductivity values obtained from laser flash and hot wire measurements of the identical powdered test sample presented a fairly good agreement if the difference in bulk density was taken into consideration.

Key words : high-temperature thermophysical properties, thermal conductivity, flyash, riser tubes, superheater tubes, bulky density, laser flash, hot wire

1. 緒 言

近年, 地球温暖化防止対策の推進に合わせて都市ごみ処理施設の廃熱回収効率向上が要請されるようになり, ボイラ蒸気条件の高温・高圧化が進んでいる.¹⁾ これに伴い, ボイラ伝熱管(ボイラ(昇)水管及びボイラ過熱器管)を健全に維持するために管材の置かれている熱環境をより詳しく把握する必要性が高まった. ボイラ伝熱管がさらされる特定部位の温度に関しては, 作動流体や燃焼ガスの温度から推定した報告²⁾ や実測した報告³⁾ がある. しかし, 都市ごみ焼却炉においてはボイラ伝熱管表面における灰の付着やスケール生成などが著しく, これらの物質のボイラ稼働時の温度における熱伝導率(thermal conductivity) k [W/(m·K)] や比熱(specific heat) C_p [J/(kg·K)] などを正確に知った上で伝熱管の減肉や腐食機構を議論しなければならない.

これらの物質, とりわけ付着灰は, 燃焼ガスの組成や流速, 重力やそのほかの条件によって不均一なかさ密度(bulk density) ρ [kg/m³] で伝熱管表面に存在しているため, 現実の物性値の評価に際してこの事情をどのように取り扱うかについても整理しておく必要がある.

本稿は, 上記の視点に立って都市ごみ焼却炉から採取したボイラ伝熱管付着灰, 焼却主灰, 水管表面スケールを試料として高温熱物性値を測定し, 考察した結果を報告する.

2. ボイラ伝熱管付着灰とその影響

都市ごみ焼却炉ボイラ伝熱管への灰の付着状況とその影響の概要は以下のとおりである. 燃焼ガス中に浮遊するばいじんは, 表面の一部が溶融した状態でボイラ伝熱管表面と接触すると, その箇所容易に付着・堆積することになる. Fig.1 に, 二次燃焼室水管表面における灰の付着例を示す. 同図(a)は, 燃焼ガス温度約 900°C の雰囲気下で生成した付着灰で, やわらかく容易に除去できる. 同図(b)は, 同温度約 1000°C において水管表面に固着した灰であり, 除去作業に機械力を要するほど硬い. Fig.2 に, 過熱器管表面の灰の付着例を示す. 一般に, 過熱器管群入口における燃焼ガス温度が 550°C 以下の場合, 灰は管表面に薄く固着する程度である. しかし, 同温度が 600°C 以上の場合, 同図(a)に示すように厚く堆積すると同図(b)に示すようにガス流路の一部に閉塞箇所を生じることもある.

ボイラ伝熱管の付着灰は, 定期点検補修時に除去されて伝熱管表面は清浄化される. しかし, 炉立上げ後, 二次燃焼室部や燃焼ガス流路部への灰の付着と堆積は徐々

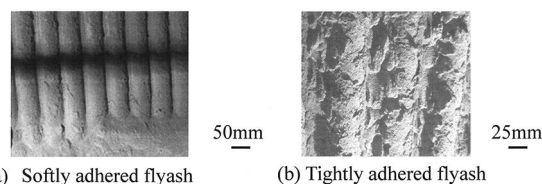


Fig. 1 Flyash adhered to the surface of riser tubes

* 材料と環境 2016(つくば, 2016年)で発表

** 〒150-0011 東京都渋谷区東 1-35-1(1-35-1, Higashi, Shibuya-ku, Tokyo, 150-0011 Japan)

に進行し、ボイラ伝熱面における熱通過率の分布状況を変化させる。Fig.3は、過熱器管群入口における燃焼ガス温度の経時変化例を示す。この事例では、定点温度が約100℃上昇している。

このような付着灰生成による燃焼ガス温度の変化は、ボイラ管材の損傷防止対策に大きな影響を及ぼす。したがって、ボイラ付着灰の化学的性質に加えて熱物性も調べておく必要がある。

3. 試料及び測定方法

3.1 試料

Table 1に、試料の測定方法と測定番号を示す。同表において、測定番号の英大文字はレーザーフラッシュ法の試料、英小文字は熱線法の試料であることを示し、同一数字は、共通の採取試料から作成された試料であることを示す。試料調整に際し、表面スケールと溶融固化していた付着灰は微粉碎した。同表の試料3A及び5aは、異

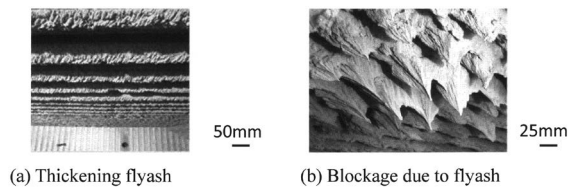


Fig. 2 Flyash adhered to the surface of superheater tubes

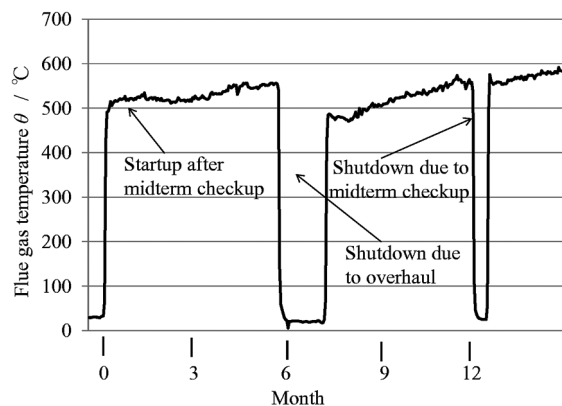


Fig. 3 Flue gas temperature variation at the inlet of superheater

Table 1 Testing Methods and Test Numbers

Test Sample	Testing Methods		Testing Temperature $\theta / ^\circ\text{C}$				
	Laser Flash	Hot wire	250	350	400	450	600
Flyash on riser tubes	X		1A		1C		
		x	2a	2b	2c		
Flyash on S.H. tubes	X		3A		3C		
		x		4b			
		x	5a		5c		
		x		7b		6d	7d
Incinerated Ash		x		8b ¹⁾			
		x		9b ²⁾			9e ²⁾
Scale on riser tubes	X		10A				10D

Note 1) Bottom ash collected from a moving grate furnace
 Note 2) Incinerated ash collected from a fluidized-bed furnace

Table 2 Chemical Compositions of the analyzed Flyash Samples / wt%

Sample №	Ca	Na	K	Zn	Pb	T-S	Cl
1A, 1C	19.4	7.8	6.08	1.25	0.03	2.23	22.6
7b, 7d	28.3	2.6	2.2	0.47	0.02	2.6	6.5

なる2種類の測定法の関係性をみるため同一付着灰を用いた。また、試料8b及び9b, 9eは、それぞれストーカ炉、流動床炉から採取した焼却主灰である。

Table 2に、測定に用いた水管付着灰と過熱器管付着灰の化学組成分析結果を例示する。同表は、一般的に腐食に関与するとされる元素に関する分析結果であるが、付着灰にはこれらのほかにSi十数%とAl数%, Fe数%が主要元素として含まれている。

また、ボイラ伝熱管付着灰の融点を測定した。水管付着灰は、大気中で常温から1000℃まで昇温速度300℃/hで測定した結果、506, 591, 691℃に吸熱ピークが認められた。過熱器管付着灰は、常温から1000℃まで昇温して測定したが吸熱ピークが認められなかったため、試料を改めて大気中で常温から700℃まで昇温した後、400℃までの降温測定を行った。昇・降温速度350℃/hで測定した結果、降温時に635℃と629℃に発熱ピークと推定されるものが認められた。

3.2 測定方法

試料のkを求めるのにレーザーフラッシュ法と熱線法の2種類の測定法を採用した。両者の測定原理は以下のとおりである。

3.2.1 レーザーフラッシュ法

Fig.4に、レーザーフラッシュ法の模式図を示す。本測定では、一定温度に保たれた平板状試料の表面がレーザーパルス光により一様に加熱される。その結果、瞬間的に昇温した試料表面から裏面に向かって一次元的に熱が拡散し、最終的には試料全体が均一温度となる。試料裏面の温度変化の速さは熱拡散率(thermal diffusivity) α [m²/s]に比例し、試料の厚さの2乗に反比例するので、試料の厚さと熱拡散に要する時間から熱拡散率が算出される。

付着灰試料は粉体に加工してから外径10mm、厚さ0.6mmの円盤状で測定に支障がない性状(自壊しない、固定支持可能)に成形し、120℃で加熱処理した。表面スケール試料は外径5mm、厚さ0.4mmの円盤状に加工後、110℃で加熱処理した。また、いずれの試料もエネルギーの吸収及び放射率を良くするために前処理としてカーボ

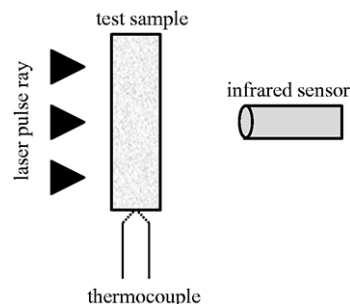


Fig. 4 Schematic of laser flash method

ンスプレーによる黒化処理を行った。

なお、熱損失補正は、カーブフィッティング法(JIS R1611に規定されている等面積法に相当)に依った。

熱伝導率 k は、(1) 式から算出する。

$$k = C_p \times \alpha \times \rho \quad [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})] \quad (1)$$

3.2.2 熱線法

Fig.5 に、熱線法の模式図を示す。本測定では、内寸 h 90, w 90, l 200 mm と h 50, w 85, l 85 mm のアルミナ製容器を用いた。まず、容器の深さの半ばまで附着灰試料を充填し、その上面の中央部に熱電対の温接点が溶接された熱線を長手方向に沿って敷いた。次に、その上部に全体の深さが90%程度となるように試料をさらに充填した。Fig.6 に装置外観を示す。

測定は、熱線と試料を密着させたまま熱線に定電流を流して行く。その際、熱電対に生じる熱起電力を記録し、経過時間の対数と熱線温度とを Fig.7 のようにグラフ化する。両変数間の線形性を確認した上で、その勾配 a を用い (2) 式から k を算出する。

$$k = \frac{I^2 R}{4\pi} \cdot \frac{\ln(t_2/t_1)}{\theta_2 - \theta_1} \quad [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})] \quad (2)$$

I : 熱線に流した電流値 [A]

t_1, t_2 : 熱線に通電後の経過時間 [s]

R : 熱線の単位長さ当たり電気抵抗 [Ω/m]

θ_1, θ_2 : t_1, t_2 における熱線の温度 [$^{\circ}\text{C}$]

4. 結果及び考察

4.1 測定結果

各試料におけるレーザーフラッシュ法及び熱線法による高温熱伝導率測定結果を Table 3, Table 4 にそれぞれ示す。Table 3 の 1A, 1C と 3A, 3C は、ほぼ同一の ρ で試料片が作成されているが k の値には差が認められる。

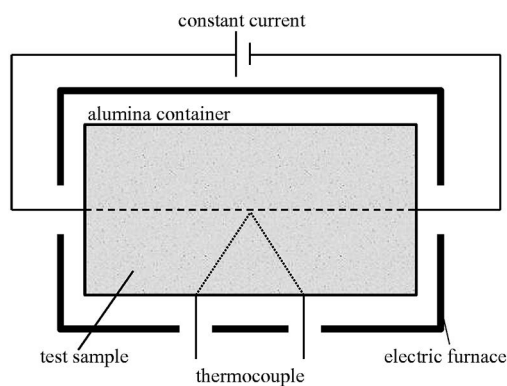


Fig. 5 Schematic of hot wire method

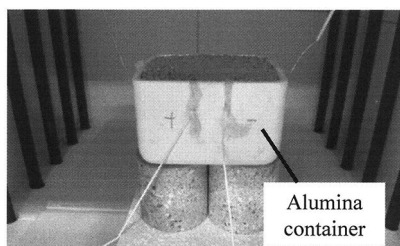


Fig. 6 Hot wire testing equipment

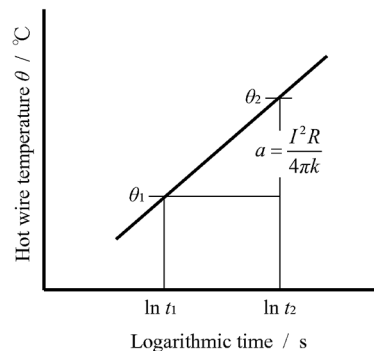


Fig. 7 Correlation between passing time and hot wire temperature

Table 3 Thermal Conductivity at High Temperature measured by Laser Flash

Test Sample	Test №	θ $^{\circ}\text{C}$	α $10^{-7}\text{m}^2/\text{s}$	c_p $10^3\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	ρ $10^3\text{kg}/\text{m}^3$	k $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
Flyash on riser tubes	1A	250	4.2	9.34	1.94 ³⁾	0.8
	1C	400	3.4	9.94	"	0.7
Flyash on S.H. tubes	3A	250	2.0	9.7	1.93 ³⁾	0.4
	3C	400	2.1	12.5	"	0.5
Scale on riser tubes	10A	249	5.4	8.23	4.95 ⁴⁾	2.2
	10D	451	3.6	9.14	"	1.6

Note 3) Bulk density at room temperature calculated from the volume ($\phi 10, t 0.6\text{mm}$ or $\phi 5, t 0.4\text{mm}$) and the mass of the fabricated test piece for thermal diffusivity measurement

Note 4) Density at room temperature measured by gas replacement method

Note 5) Specific heat capacity measurements were performed based on the adiabatic method and DSC for flyash and scale, respectively.

Table 4 Thermal Conductivity at High Temperature measured by Hot Wire

Test Sample	Test №	θ $^{\circ}\text{C}$	ρ ⁵⁾ $10^3\text{kg}/\text{m}^3$	k $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
Flyash on riser tubes	2a	250	1.235	0.37
	2b	350	"	0.35
	2c	400	"	0.35
Flyash on S.H. tubes	4b	350	0.723	0.16
	5a	250	0.890	0.20
	5c	400	"	0.21
	6d	450	0.878	0.24
	7b	350	1.038	0.21
Incinerated Ash	7d	450	"	0.22
	8b	350	1.099	0.26
	9b	350	1.436	0.31
	9e	600	"	0.38

Note 6) Bulk density calculated from inside measurements ($h 90, w 90, l 200\text{mm}$ or $h 50, w 80, l 85\text{mm}$) of the alumina container under a natural packing condition in the absence of any additional pressure

また、鉄分主体の化合物である水管表面スケール 10A, 10D は、温度上昇に伴い k の値は低下している。この傾向は、炭素鋼の k の温度依存性と類似している。⁴⁾

同様に、水管附着灰の 1A, 1C 及び Table 4 の 2a, 2b, 2c は、温度上昇に伴い k の値は低下傾向を示している。反対に、過熱器管附着灰 3A, 3C; 5a, 5c 及び 7b, 7d 並びに焼却主灰 9b, 9e は、温度上昇に伴い k の値は上昇傾向を示している。これらの k の温度依存性には成分中の低融点金属の存在が影響しているものとも考えられるが、附着灰については k の変化率が小さいことからさらに調査を続ける必要がある。

4.2 測定方法の妥当性

ボイラ伝熱管に付着する灰などのような不均質かつ多孔質な不定形物質については、現実類似した条件のもとで熱物性値を特定することは容易ではない。ボイラ内のガス圧は大気圧で近似できるものの、物質の雰囲気温度は室温とは大きく異なる。また、ボイラ停止直後に採取された付着灰は湿分を含んでいることが多く、常温における測定ではその影響についての補正も必要となる。本測定では、試料を実機のボイラ伝熱管表面の想定温度に近似させて高温熱伝導率 k を求めた。3.1 で言及したように付着灰試料は 500°C を超えると腐食を促進させる化合物が溶融する徴候が観察されるが、本測定の温度においてはその影響は及んでいないようである。

ボイラ伝熱管表面に付着した灰は、ふわふわしたものからクリンカ状のものまであり、密度 ρ の値に大きな開きがある。Table 3 に掲載したレーザーフラッシュ法における ρ は、測定試料片成形後のかさ密度である。この測定法では、試料片に一定程度以上の密度が要求される。一方、Table 4 に掲載した熱線法における ρ は、試料と熱線との密着性を確保しつつできるだけ自然のままのかさ密度となるようにして算出した値である。熱線法では試料密度の均一性が確保できれば低密度の対象でも測定可能である。レーザーフラッシュ法による対照試料 3A の $k: 0.4$ を 5a の $\rho: 0.890$ を用いて形式的に変換すれば、(3) 式のように 0.18 となり、対照試料 5a の $k: 0.20$ と近似している。

$$0.4 \times 0.890 / 1.93 = 0.18 \text{ [W/(m} \cdot \text{K)]} \quad (3)$$

この例は、飛灰などの粉体試料に関する高温熱伝導率測定は、かさ密度を注意深く取り扱えば、レーザーフラッシュ法によっても熱線法によっても相互に近似した結果が得られることを示す。この結果から、それぞれの試験方法による測定結果の間に実務的水準では整合性を認めることができるものと考えられる。しかし、両測定方法に關与する比熱や熱拡散率の温度依存性などの検証を含

めてさらに多角的に精査しないと両者の測定結果の相関関係については確かなことは言えない。

5. 結 言

都市ごみ処理施設の廃熱回収効率向上に伴い、ボイラ伝熱管を健全に維持するために管材の置かれている熱環境をより詳しく把握することが求められている。

都市ごみ焼却炉から採取したボイラ伝熱管付着灰、焼却主灰、水管表面スケールの試料を対象とした高温熱物性値の測定・解析の結果、以下のことが明らかとなった。

- ①水管付着灰と過熱器管付着灰は、生成環境とその結果としての化学組成の差異を反映してそれぞれ固有の高温熱物性値をもつ。
- ②鉄分主体の化合物である水管表面スケールは、温度上昇に伴い高温熱伝導率が低下する。
- ③飛灰などの粉体試料に関する高温熱伝導率測定は、かさ密度を注意深く取り扱えば、レーザーフラッシュ法によっても熱線法によっても実務的水準では相互に近似した結果が得られる。

本測定では、ごく限られた数の試料しか取り扱うことができなかったが、今後も工夫とデータを積み重ねることによってより高い精度の情報が得られることを期待している。

参 考 文 献

- 1) Y. Shino, *Seisou Gihou*, pp.109-119 (2016).
- 2) Y. Shino, *Seisou Gihou*, pp.120-129 (2016).
- 3) A. Motoi, Y. Shino, T. Suzuki, K. Kubo, T. Noda and H. Kimura, Proc. 26th Annual Conf., JSME, pp.295-296, (2015).
- 4) Nippon Netubusei Gakkai, *Thermophysical Properties Handbook*, Yohkendo, p.29 (2008).

(Manuscript received June 27, 2016;
in final form August 25, 2016)

要 旨

都市ごみ焼却炉のボイラ蒸気条件は、近年、ごみからのエネルギー回収効率向上に向けて高温・高圧化へと進んできた。その結果、今日、ボイラ伝熱管は以前に増して過酷な環境にさらされている。燃焼ガスの高温の下で、その一部がボイラ伝熱管に積もる浮遊微粒子から成る飛灰は、ボイラ材料の摩耗、孔食・腐食機構に決定的な役割を果たしている。しかしながら、これらの物質の現実のガス温度における熱物性値に関しては十分報告されていない。ボイラ伝熱管の付着灰、ボイラ水管表面スケール及び焼却灰の高温熱伝導率を明らかにするためにいくつかの都市ごみ焼却炉から試料を収集した。測定結果は、ボイラ水管付着灰と過熱器管付着灰はそれぞれ固有の高温熱伝導率を有することとボイラ水管表面スケールは温度上昇に伴い高温熱伝導率が低下することを示した。加えて、同一粉体試料から得られたレーザーフラッシュ法と熱線法の二つの高温熱伝導率は、かさ密度を考慮に入ればおおむね一致していた。

キーワード 高温熱物性値, 熱伝導率, 飛灰, ボイラ水管, 過熱器管, かさ密度, レーザフラッシュ法, 熱線法