微粉炭燃焼場におけるすす計測技術

泰中 一樹^{1*}, 橋本 望², 梅本 賢¹, 中塚 記章³, 林 潤⁴, 渡邊 裕章⁵, 赤松 史光³, 牧野 尚夫¹

Measurement Techniques for Soot in Pulverized Coal Combustion Fields

Kazuki Tainaka^{1*}, Nozomu Hashimoto², Satoshi Umemoto¹, Noriaki Nakatsuka³, Jun Hayashi⁴, Hiroaki Watanabe⁵,
Fumiteru Akamatsu³ and Hisao Makino¹

In this paper, results of experiments that authors carried out to investigate soot formation in pulverized coal combustion fields were summarized. Soot particles form at the local spatial and temporal scales. Hence, laser induced incandescence (LII), which has high spatial and temporal resolution, was applied to the measurement of soot volume fraction. Firstly, details of LII in the present study is described. Secondly, soot formation from pulverized coal were measured by LII measurement and simultaneous measurements of Mie scattering and Laser induced fluorescence (LIF). Finally, soot growth, agglomeration, and oxidation processes were investigated through Time-Resolved LII (TiRe-LII).

Keywords: Pulverized coal combustion, Soot, Laser induced incandescence (LII), Laser induced fluorescence (LIF), Time-resolved laser induced incandescence (TiRe-LII).

1. 緒 言

石炭は、火力発電に使用されているほかの化石燃料と比べて、発電量あたりの単価が安く、埋蔵量が豊富であり、世界に広く分布していることから、電力の安定供給に欠かすことのできない重要なエネルギー源の一つである。

石炭火力発電では、石炭の比表面積を増やし燃焼効率を向上させるために、体積中位径 40 μm 程度まで粉碎する微粉炭燃焼方式を用いることが一般的である。微粉炭燃焼場では、空気搬送された微粉炭粒子が、火炎からの

ふく射および高温の気体からの熱伝達によって加熱され揮発分を放出し、その揮発分と固定炭素分がそれぞれ燃焼している。これらの素過程は、互いに影響をおよぼしながら同時に進行するため、微粉炭燃焼現象をさらに複雑にしている。

筆者らは、微粉炭燃焼現象の解明を目指して、さまざまな研究を行ってきた[1–5]。本稿では、それらの中から、すす生成過程の解明を目指した研究とその成果[4,5]を紹介する。すすは、揮発分が気相反応で重合することで生じる粒子状の固体であり、PM_{2.5}の原因の一つでもある環境負荷物質である。一方で、ふく射を介した熱輸送によってボイラへの伝熱や微粉炭粒子の着火、燃え切りに対して、影響をおよぼす物質でもある。そのため、すす生成過程の解明とその知見に基づくすす生成の制御技術が求められる。従来、すすに対してよく用いられているプローブによるサンプリング計測といった接触計測では、計測器が流れ場を乱すだけでなく、接触部分への微粉炭粒子やすすの付着によって、高精度に現象を把握することは困難である。加えて、すすの生成は時間的・空間的に局所で生成されるため、高い時間分解能が必要となる。そこで、筆者らは、微粉炭燃焼場に適した非接触すす体積分率計測技術を新たに確立した。本稿では、非接触すす体積分率計測技術の開発と、その技術をすす生成特性の解明に応用した結果を紹介する。

2. 実験方法

2.1 実験装置

Fig. 1 に、微粉炭ジェットバーナ実験装置の概略図を示す。本装置は、気体燃料を保炎用に用いて、微粉炭乱

2018 年 1 月 15 日受付
粉体工学会 2017 年度秋期研究発表会技術賞受賞研究
1 電力中央研究所
(〒 240-0196 神奈川県横須賀市長坂 2-6-1)
Central Research Institute of Electric Power Industry
(2-6-1 Nagasaka, Yokosuka, Kanagawa 240-0196, Japan)
2 北海道大学 大学院 宇宙工学部門
(〒 060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)
Division of Mechanical and Space Engineering, Hokkaido University
(Nishi 8, Kita13, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido 060-8628, Japan)
3 大阪大学 大学院 工学研究科
(〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)
Graduate School of Engineering, Osaka University
(2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan)
4 京都大学 大学院 エネルギー科学研究科
(〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)
Graduate School of Energy Science, Kyoto University
(Yoshida-Honmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501, Japan)
5 九州大学 大学院工学研究院 機械工学部門
(〒 819-0395 福岡市西区元岡 744)
Faculty of Engineering, Kyushu University
(744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan)
*Corresponding Author tainaka@criepi.denken.or.jp

Fig. 1 Schematic diagram of the pulverized coal jet burner and the supply system

Table 1 Properties of coal

Proximate analysis	Volatile matter	[mass% db]	26.9
	Fixed carbon	[mass% db]	57.9
	Ash	[mass% db]	15.2
Ultimate Analysis	Carbon	[mass% db]	71.9
	Hydrogen	[mass% db]	4.4
	Oxygen	[mass% db]	6.5
	Nitrogen	[mass% db]	1.5
	Sulfur	[mass% db]	0.4
Moisture		[mass%]	2.6
Lower heating value		[MJ/kg]	28.1

db: dry basis

流火炎を形成する装置である。おもに、コンプレッサ、マスフローコントローラ、スクリーフィーダ、バーナ、および排ガス処理系で構成されている。

バーナは、内径 6.0 mm の主流流路と保炎用スリット（幅 0.5 mm）を有する同軸二重管である。燃料には微粉炭、酸化剤には空気を使用する。空気は除湿フィルタおよび除じんフィルタを通った後、コンプレッサからマスフローコントローラを用いて定量供給され、微粉炭は空気流路に設置されたエジェクタにスクリーフィーダを用いて定量供給される。微粉炭と空気の混合気は、主流流路から鉛直上向きに噴出される。保炎用の気体燃料にはメタン（CH₄）を使用し、ボンベからマスフローコントローラを用いて、保炎用スリットに定量供給される。燃焼後の排ガスは、バグフィルタで除じんされた後、ファンによって大気に放出される。

2.2 実験条件

燃料にはニューランズ炭（豪州瀝青炭）、酸化剤には空気、保炎用燃料にはメタンを用いた。Table 1, Fig. 2 に、使用したニューランズ炭の性状および粒子径分布をそれぞれ示す。微粉炭の体積中位径は 53.7 μm で、200 メッシュパス 80% 以上の実際の発電所で使用されている粒子径分布に近いものを用いた。Table 2 に、実験条件を示す。保炎用燃料であるメタンの供給量は、メタン燃焼が微粉炭火炎におよぼす影響を極力抑えるために、火炎が安定的に形成される範囲で最低の供給量とした。形成される火炎の長さは、時間的な変動はあるが、およそ 350 mm である。

3. すす体積分率計測技術の選定と最適化[4]

すすは局所的な反応で生成されるため、その現象解明

Fig. 2 Particle-size distribution of coal

Table 2 Experimental condition

Coal feed rate	[g/h]	536.4
Air flow rate	[L _N /min]@20°C	10.8
CH ₄ flow rate	[L _N /min]@20°C	1.4
Coal heat input	[kW]@LHV	4.19
CH ₄ heat input	[kW]@LHV	0.83
Reynolds number (only center flow)	[-]	2544
Equivalence ratio (only coal)	[-]	6.09

には、高い時空間分解能の計測技術が要求される。そこで、すす体積分率計測に、ナノ秒オーダの高い時間分解能を持ち、レーザシート内の 2 次元分布を一度に取得可能なレーザ誘起赤熱法（LII: Laser Induced Incandescence）を選定した。LII 計測は、レーザ照射で加熱されたすすからの赤熱光強度（LII 信号強度）がすす体積分率にほぼ比例する性質から、すす体積分率を計測する手法である。その計測原理は、Melton が行った理論解析の結果[6]を基としている。

Melton は、おもに以下の仮定を用いて、1 つのすす粒子のふく射強度から、計測箇所が存在するすべてのすす粒子に対して積分することで、LII 信号強度の式である Eq. (1) を得た。

- ・すす粒子のふく射強度は、プランクの法則および Mie 理論の吸収係数に従う。
- ・すすの粒子径が光の吸収長さより小さい。
- ・レーザによる入熱が、すべてすすの昇華熱となる。
- ・すすはレーザ加熱によって昇華温度となっており、温度の時間変化はない。

$$J = C_1 \int_0^\infty a^{3 + \frac{1.54 \times 10^{-7}}{\lambda}} N p(a) da \quad (1)$$

ここで、 C_1 は定数、 J は LII 信号強度[W]、 a はすす粒子の半径[m]、 λ はレーザ波長および検出波長[m]、 N はすす粒子数、 $p(a)$ は粒子径分布を示す。Eq. (1) より、 λ の値が可視光の波長域である 400 nm から 700 nm の間にある場合、信号強度はすす粒子径の 3.22 乗から 3.39 乗に比例し、すす体積分率にほぼ比例していることが分かる。LII 計測を、気体燃料や液体燃料を用いた火炎に対して、実際に適用した研究は多くなされており[たとえば 7-16]、ほかのすす体積分率計測技術と同様の結果を得ることができたと報告されている[たとえば 7,9]。

Fig. 3 Schematic diagram of LII measurement

燃焼場に LII 計測を適用する際、レーザエネルギー密度はすすからの LII 信号強度に大きな影響をおよぼす。Ni らは、エタン-空気層流拡散火炎を対象に、レーザエネルギー密度と固定した高さでの LII 信号強度半径方向分布における最大値の関係を計測し、レーザエネルギー密度の増加に応じて、LII 信号強度が増加し、レーザエネルギー密度が 0.27 J/cm^2 以上に達すると、LII 信号強度が減少していくことを明らかにした[8]。彼らは、この理由として、Tait らの数値解析の結果[16]に基づいて、高いレーザエネルギー密度によってすすが昇華し消滅したためであると考察を行っている。以上のことから、レーザエネルギー密度を高く設定すると、正確にすす体積分率を計測することが難しい点に注意して計測を行う必要がある。加えて、微粉炭燃焼場では、微粉炭粒子も赤熱して LII 信号を発するため、正確なすす体積分率を計測できない懸念がある。そこで、微粉炭粒子の熱容量がすす粒子の熱容量よりも大きいことから、すすのみが赤熱するレーザエネルギー密度があるとの想定の下に、適切な計測条件を検討した。

Fig. 3 に、LII 計測系の概略図を示す。光源には、Nd:YAG レーザの第 2 高調波（波長：532 nm）を使用し、シリンドリカルレンズ群によって、シート光として火炎の中心軸に照射した。信号強度の 2 次元分布の取得には、CMOS カメラ（Vision Research 社製、Phantom V5.0）を使用した。LII 信号強度の計測には、中心波長 400 nm、半値幅 60 nm のバンドパスフィルタを使用した。レーザ照射から計測までに 100 ns 遅れさせることで、レーザが揮発分を励起し発生してしまう蛍光の影響を取り除いた。

Fig. 4 に、レーザシートのエネルギー密度分布を示す。一般的にレーザ光はエネルギー密度分布を持っており、その影響を LII 信号強度も受ける。Fig. 4 (a) より、レーザエネルギー密度は、厚さ方向におよそ 0.1 mm のガウシアン分布となっている。本研究では、レーザエネルギー密度の高さ方向について、エネルギー密度が下がる領域も含めて用いるガウシアンプロファイル（Fig. 4 (b)）とレーザシートの中でもエネルギー密度が一定の箇所絞って用いる均一プロファイル（Fig. 4 (c)）を対象に、レーザシートプロファイルによる影響を調べた。Fig. 5 に、バーナ先端から高さ 135 mm における、レーザエネルギー密度と燃焼場、非燃焼場からの LII 信号強度の関

Fig. 4 Laser sheet profile; (a) Width of the laser sheet, (b) Height of the Gaussian laser sheet, (c) Height of the homogeneous laser sheet [4]

Fig. 5 LII signal intensity normalized by the value at 0.1 J/cm^2 (Gaussian) as a function of the laser fluence [4]

係を示す。Fig. 5 より、ガウシアンプロファイルおよび均一プロファイルともに、燃焼場ではレーザエネルギー密度の上昇に伴って、LII 信号強度は上昇し、一度低下した後、再度上昇する。LII 信号強度の低下は、エネルギー密度の増加によって、すす粒子が昇華したためであると考えられる。また、LII 信号強度の再上昇は、非燃焼場での LII 信号強度も上昇していることから、微粉炭からの LII 信号強度が重畳したためであると考えられる。以上より、昇華が生じず、LII 信号強度の大きい 0.1 J/cm^2 を用いることで、微粉炭燃焼場に適用可能な LII 計測手法を確立した。以降の節において、LII 計測には、このレーザエネルギー密度でガウシアンプロファイルのレーザシートを用いた。

4. 微粉炭粒子からのすす生成過程の解明[4]

微粉炭粒子が高温場において揮発分を放出し、その揮発分からすすが生成される過程を解明するために、微粉炭粒子、すすおよび高温場の 2 次元分布を計測した。粒

Fig. 6 Schematic diagram of simultaneous measurements of Mie scattering and OH-LIF

子表面でのレーザ散乱光である Mie 散乱を用いて微粉炭粒子の 2 次元分布を、LII を用いてすすの 2 次元分布を、OH ラジカルへのレーザ誘起蛍光法（LIF：Laser Induced Fluorescence）を用いて高温場の 2 次元分布を計測した。LIF 計測は、化学種固有の励起しやすい波長のレーザを照射することで、特定の化学種を励起し、その発光強度によって、分子の濃度や分布を計測する手法である。OH ラジカルは、燃焼反応の中間生成物として生成される活性化学種であり、高温場においてほかの活性化学種と比べて多く存在する。

Fig. 6 に、Mie 散乱および OH-LIF 同時計測系の概略図を示す。光源には、Nd:YAG レーザの第 2 高調波および第 3 高調波、（波長：532, 355 nm）を用いた。波長 355 nm のレーザ光は、OPO（Optical Parametric Oscillation, Spectra-Physics 社製、MOPO-730）によって、OH ラジカルを励起させるために波長 285.586 nm に変換した。その後、ダイクロイックミラーによって、波長 532 nm のレーザ光と合流し、シリンドリカルレンズ群によって、シート光に成形され、バーナ中心軸へと入射される。信号強度の 2 次元分布の取得には、Mie 散乱計測用に CMOS カメラ（Vision Research 社製、Phantom V5）、OH-LIF 計測用にイメージインテンシファイアおよび CCD カメラ（Roper 社製、Model EEV 02-06-202）を使用し、火炎を挟んで対向させることで同じ画角の画像を取得した。カメラ先端部には、光学フィルタを設置した。光学フィルタは、Mie 散乱計測用に中心波長 532 nm、半値幅 1 nm のバンドパスフィルタ、OH-LIF 計測用に中心波長 320 nm、半値幅 20 nm のバンドパスフィルタを用いた。

Fig. 7 に、LII 計測および Mie 散乱-OH-LIF 同時計測の結果を示す。2 次元分布は、バーナ先端から高さ 15～45 mm、45～75 mm、75～105 mm、105～135 mm、135～165 mm、165～195 mm の結果を示す。Fig. 7 より、Mie 散乱光強度と OH-LIF 信号強度の 2 次元分布を比較すると、上流において微粉炭粒子群を囲むように高温領域が分布し、バーナ先端からの高さの増加に伴って、バーナ中心軸付近の微粉炭粒子群にも高温領域が現れる。これは、下流に行くにしたがって、外周に存在する高温のメタンの既燃ガスと微粉炭粒子の混合が進み、高温場によって微粉炭粒子から揮発分が放出され、揮発分が燃焼したためであると考えられる。LII 信号強度の 2 次元分布よ

Fig. 7 Two-dimensional distributions of (a) Mie scattering, (b) LII, and (c) OH-LIF [4]

り、下流に行くにしたがって、すす体積分率が増加している。これは、下流において微粉炭粒子群に高温領域が見られることから、揮発分の放出が進むことで、揮発分の濃度が上昇しすす生成が活発に行われたためであると考えられる。揮発分濃度だけでなく、すす生成には、揮発分の体積分率だけでなく温度や酸素濃度といったほかの要因も影響をおよぼすことが推察される。本実験を対象とした数値解析結果から、すす体積分率の高い箇所では、温度が高く酸素濃度が低いという結果が示されている[17]。

5. すすの成長、凝集、酸化過程の解明[6]

すすの成長、凝集、酸化過程を解明するために、すす粒子径計測が可能な時間分解 LII（TiRe-LII：Time-Resolved LII）を適用した。TiRe-LII は、レーザ加熱後、時間差をつけ LII 信号強度計測を行う手法であり、粒子径が小さいほど比表面積が大きく放熱量が大きくなるため、LII 信号強度（赤熱光強度）の減衰も大きいという性質を利用して、粒子径を算出する計測技術である。

Fig. 8 に、TiRe-LII 計測系の概略図を示す。光源には、Nd:YAG レーザの第 2 高調波（波長：532 nm）を用いた。発振されたレーザ光は、シリンドリカルレンズ群によって、シート光に成形され、バーナ中心軸へと入射される。1/2 波長板と偏光ビームスプリッタの使用により、レーザエネルギー密度分布の形状を変化させずに、レーザシート光強度の調整を行えるようにした。LII 信号強度の 2

Fig. 8 Schematic diagram of TiRe-LII measurement

次元分布の取得には、2 台の CMOS カメラ（Vision Research 社製、Phantom V12）を使用し、ハーフミラーにより同じ画角の画像を取得した。LII 信号以外の光を除去するため、カメラ先端部には、イメージインテンシファイア（I.I.、浜松ホトニクス社製、C9016-23MOD）および光学フィルタを設置した。光学フィルタは、中心波長 400 nm、半値幅 60 nm のバンドパスフィルタを用いた。1 台目のカメラは、レーザ照射開始時刻より 100 ns 遅延したタイミングから 20 ns 間撮影し、2 台目のカメラは、レーザ照射開始時刻より 550 ns 遅延したタイミングから 20 ns 間撮影した。1 台目に対して 2 台目のカメラの撮影タイミングを 450 ns 遅らせることにより、LII 信号強度の減衰量を検知し、粒子径分布に関する情報を取得した。

Fig. 9 に、本研究で使用した熱泳動サンプリング（TS：Thermophoretic Sampling）システムの概略図を示す。すす粒子のサンプリングは、透過型電子顕微鏡（TEM：Transmission Electron Microscope）用のグリッドを火炎の中に直接挿入し、熱泳動原理により TEM グリッドの表

Fig. 9 Schematic diagram of TS system

面に堆積させることにより行った。熱泳動は、温度勾配のある場において粒子が非常に小さい場合に、粒子が高温側の気体から受ける運動量が低温側の気体から受ける運動量よりも十分になることで、粒子が高温側から低温側に向けて力を受け移動する現象である。TS システムでは、高温部は燃焼場、低温部は TEM グリッドとして温度勾配を生じさせ、すす粒子を TEM グリッドにサンプリングする。TEM グリッドの火炎への挿入時間は、空気駆動シリンダとシーケンサを組み合わせたシステムにより、160 ms に制御した。サンプリングされたすすは、走査型電子顕微鏡（SEM：Scanning Electron Microscope）を用いて撮影し、その SEM 画像から粒子径分布を算出した。

Fig. 10 に、TS システムによるすす粒子径分布の計測結果を示す。Fig. 10 (a), (b), および (c) は、火炎の直接撮影と LII 計測結果を重ね合わせた画像、TS システムでサンプリングしたすすの SEM 画像、および SEM 画像から計測した体積基準のすすの粒子径累積分布をそれぞれ示す。Fig. 9 (c) 中の実線は以下の式で示す対数正規累積分布関数により計測結果を近似したものである。

Fig. 10 Experimental results of TS system; (a) Direct photograph and results of LII, (b) SEM image, (c) Particle-size distribution of soot [5]

Table 3 Fitting parameter of TiRe-LII measurement [5]

H [mm]	k_1	k_2	k_3
35	80.7	1.054	19.7
95	118.6	0.996	40.9

$$F(D_p) = \Phi \left\{ \frac{\ln(D_p) - \mu}{\sigma} \right\} \quad (2)$$

ここで、 D_p はすす粒子径、 Φ は標準正規分布の累積分布関数、 μ 、 σ はフィッティングパラメータである。Fig. 9 (c) 中の点線は、Eq. (2) で近似したすす粒子径累積分布を以下のすす粒子径分布に変換したものである。

$$f(D_p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma D_p} \exp \left[-\frac{\{\ln(D_p) - \mu\}^2}{2\sigma^2} \right] \quad (3)$$

Eq. (2) で得られたすす粒子径累積分布と TiRe-LII 計測で得られた LII 信号強度減衰比から算出するすす粒子径累積分布が一致するように、LII 信号強度減衰比とすす粒子径の関係を示す関数を以下の式で定義した。

$$D_p = k_1 S^{k_2} + k_3 \quad (4)$$

ここで、 S は LII 信号強度比、 k_1 、 k_2 、 k_3 はフィッティングパラメータである。Table 3 に、Eq. (4) のフィッティング結果を示す。Fig. 10 に、TiRe-LII 計測で得られた LII 信号強度比の画像から、Eq. (4) により求めたバーナ中心からの各半径方向位置におけるすす粒子径分布を示す。各粒子径分布は、画像から得られる粒径分布を 500 枚分から平均化したものである。

Fig. 10 (c) から、バーナ先端からの高さ $H = 35$ mm に比べ、 $H = 95$ mm のすす粒子径は増加している。これは、滞留時間の増加に伴ってすすの凝集・成長が進んだためであると考えられる。Fig. 11 から、バーナ中心からの半径方向距離 $R = 4 \sim 5$ mm の位置にすすの体積分率のピークが現れている。また、バーナ出口からの距離が短い $H = 35$ mm と比較して $H = 95$ mm では、すすの体積分率が増加するとともに、すすの存在する半径方向範囲が広がり、すす粒子径が大きくなっている。一方で、バーナ中心からの半径方向距離に対するすす粒子径分布形状の差異は小さい。その原因として、本研究で用いている火炎が乱流火炎であるため、乱流混合によりすす粒子が生成される場所が半径方向に広く分布している可能性が考えられる。

6. 結 言

基礎的な微粉炭ジェットバーナを対象として、微粉炭燃焼場に適した新たな計測手法を確立し、すす生成特性の解明のためにその技術を応用した検討を行った。以下に、それらの結果をまとめる。

(a) $H=35$ mm

(b) $H=95$ mm

Fig. 11 Particle-size distribution of soot obtained by TiRe-LII for radial direction [5]

- ・微粉炭とすすの熱容量の違いから微粉炭燃焼場におけるすす体積分率の計測手法を新たに確立した。
- ・バーナ先端からの高さの増加に伴って、バーナ中心軸付近の微粉炭粒子群にも高温の領域が現れる。高温の領域では、揮発分の燃焼が行われることですす体積分率も増加する。数値解析結果との比較によって、すす体積分率が高い箇所は温度が高く酸素濃度が低いという結果が示された。
- ・すす粒子径分布は、半径方向にしたがって形状は変化せず、下流方向にしたがってすすの成長・凝集で粒子径が大きくなる。

以上のように、微粉炭燃焼場においても光学計測を適用することで、すすの挙動をある程度把握することが可能となっている。しかしながら、より詳細に現象を解明するためには、素過程が影響をおよぼし合っている複雑な場の状態を把握する必要があり、関係する多くの物理量を同時把握することは実験だけでは困難であると考えられる。そのため、今後、本研究のような詳細な実験と多くの物理量を把握可能な数値解析が互いを補いながら現象解明を進めていくことが重要であると考えられる。

References

- [1] S. M. Hwang, R. Kurose, F. Akamatsu, H. Tsuji, H. Makino, M. Katsuki, Observation of the detailed structure of turbulent pulverized coal flame by optical measurement (1st report, time-averaged measurement of behavior of the pulverized coal particles and the flame structure), *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser. B, Japan* 71 (2005) 2560–2567.
- [2] S. M. Hwang, R. Kurose, F. Akamatsu, H. Tsuji, H. Makino, M. Katsuki, Observation of the detailed structure of turbulent pulverized coal flame by optical measurement (2nd report, instantaneous 2D-measurement of the combustion reaction zone and the pulverized coal particles), *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser. B, Japan* 71 (2005) 2754–2760.
- [3] S. M. Hwang, R. Kurose, F. Akamatsu, H. Tsuji, H. Makino, M. Katsuki, Application of optical diagnostics techniques to a laboratory-scale turbulent pulverized coal flame, *Energy Fuels* 19 (2005) 382–392.
- [4] J. Hayashi, N. Hashimoto, N. Nakatsuka, H. Tsuji, H. Watanabe, H. Makino, F. Akamatsu, Soot formation characteristics in a lab-scale turbulent pulverized coal flame with simultaneous planar measurements of laser induced incandescence of soot and Mie scattering of pulverized coal, *Proc. Combust. Inst.* 34 (2013) 2435–2443.
- [5] N. Hashimoto, J. Hayashi, N. Nakatsuka, K. Tainaka, S. Umemoto, H. Tsuji, F. Akamatsu, H. Watanabe, H. Makino, Primary soot particle distributions in a combustion field of 4 kW pulverized coal jet burner measured by time resolved laser induced incandescence (TiRe-LII), *J. Therm. Sci. Technol.* 11-3 (2016) JTST0049.
- [6] L. A. Melton, Soot diagnostics based on laser heating, *Applied Optics* 23 (1984) 2201–2208.
- [7] B. Quay, T. W. Lee, T. Ni, R. J. Santoro, Spatially resolved measurements of soot volume fraction using laser-induced incandescence, *Combust. Flame* 97 (1994) 384–392.
- [8] T. Ni, J. A. Pinson, S. Gupta, R. J. Santoro, Two-dimensional imaging of soot volume fraction by the use of laser-induced incandescence, *Appl. Opt.* 34 (1995) 7083–7091.
- [9] C. S. Moreau, E. Therssen, X. Mercier, J. F. Pauwels, P. Desgroux, Two-color laser-induced incandescence and cavity ring-down spectroscopy for sensitive and quantitative imaging of soot and PAHs in flames, *Appl. Phys. B* 78 (2004) 485–492.
- [10] L. L. McCrain, W. L. Roberts, Measurements of the soot volume field in laminar diffusion flames at elevated pressures, *Combust. Flame* 140 (2005) 60–69.
- [11] M. D. Smooke, M. B. Long, B. C. Connelly, M. B. Colket, R. J. Hall, *Combust. Flame* 143 (2005) 613–628.
- [12] N. H. Qamar, Z. T. Alwahabi, Q. N. Chan, G. J. Nathan, D. Roekaerts, K. D. King, Soot volume fraction in a piloted turbulent jet non-premixed flame of natural gas, *Combust. Flame* 156 (2009) 1339–1347.
- [13] M. Nakamura, D. Nishioka, J. Hayashi, F. Akamatsu, Soot formation, spray characteristics, and structure of jet spray flames under high pressure, *Combust. Flame* 158 (2011) 1615–1629.
- [14] J. Hayashi, H. Watanabe, R. Kurose, F. Akamatsu, Effects of fuel droplet size on soot formation in spray flames formed in a laminar counterflow, *Combust. Flame* 158 (2011) 2559–2568.
- [15] J. Hayashi, J. Fukui, F. Akamatsu, Effects of droplet size distribution of fuel spray on soot formation in spray flames formed in a laminar counterflow, *Proc. Combust. Inst.* 34 (2013) 1561–1568.
- [16] N. P. Tait, D. A. Greenhalgh, 2D soot field measurements by laser induced incandescence, *Proc. Opt. Methods Data Process. Heat Transf. Fluid Flow Conf. England* (1992) 185–193.
- [17] N. Hashimoto, R. Kurose, H. Shirai, Numerical simulation of pulverized coal jet flame employing the TDP model, *Fuel* 97 (2012) 277–287.