

TED Plaza

微粉炭噴流火炎におけるすす生成特性のレーザー応用計測



林 潤

京都大学 大学院 准教授
 エネルギー科学研究科 エネルギー変換科学専攻
 hayashi@energy.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

微粉炭燃焼は、世界のエネルギー需要の八割を担う化石燃料の燃焼技術の中でも重要なエネルギー取得の手段である。一方で、石炭は石油や天然ガスに比べて炭素含有率が高く、さらに灰分・窒素分などの不純物も多く含まれることから、微粉炭燃焼の理解に基づいた二酸化炭素の排出量抑制や有害な燃焼排出物の低減が求められている。微粉炭火炎中のすす生成は、微粉炭火炎の一次燃焼領域における気相温度場に影響を与えるだけでなく、揮発成分の放出過程、微粉炭火炎の火炎構造に及ぶことから重要な検討項目である。微粉炭火炎中のすす生成特性を実験的に明らかにする事を目的として、簡素な流れ場を持つ微粉炭燃焼場（微粉炭ジェットバーナ）に対して、二次元レーザー誘起赤熱法(Laser Induced Incandescence; LII)を始めとするレーザー応用計測を適用した。本稿では、これらのレーザー応用計測によって得られた微粉炭火炎中のすす生成特性について紹介する。

2. 微粉炭ジェットバーナ

図1に、本研究で対象とした実験装置の流路図、微粉炭バーナの概念図およびバーナ上に形成される微粉炭火炎のバーナ出口近傍の模式図を示す。微粉炭バーナは、内径6.0 mmの主流流路と保炎用スリット流路(幅0.5 mm)を有する同軸二重管構造を持つ。燃料となる微粉炭粒子は、ニューランズ炭(オーストラリア瀝青炭)であり、酸化剤には空気を用いた。実験に用いた微粉炭粒子は、微粉炭火力発電所で用いられている石炭と同程度の粒子径分布を有している。酸化剤である空気は、コンプレッサからマスフローコントローラで流量を制御した後にエゼクタへと導かれる。次に、エゼクタにおいてスクリーフィーダによって定量供給される微粉炭粒子が吸引・混合されて、微粉炭粒子と空気の固気混相流として主流流路から鉛直上向きに噴出される。微粉炭粒子の供給量は、 1.49×10^{-4} kg/s、酸化剤用の空気流量は 2.07×10^{-4} m³/sであり、微粉炭専焼の場合の当量比φは、6.09である。

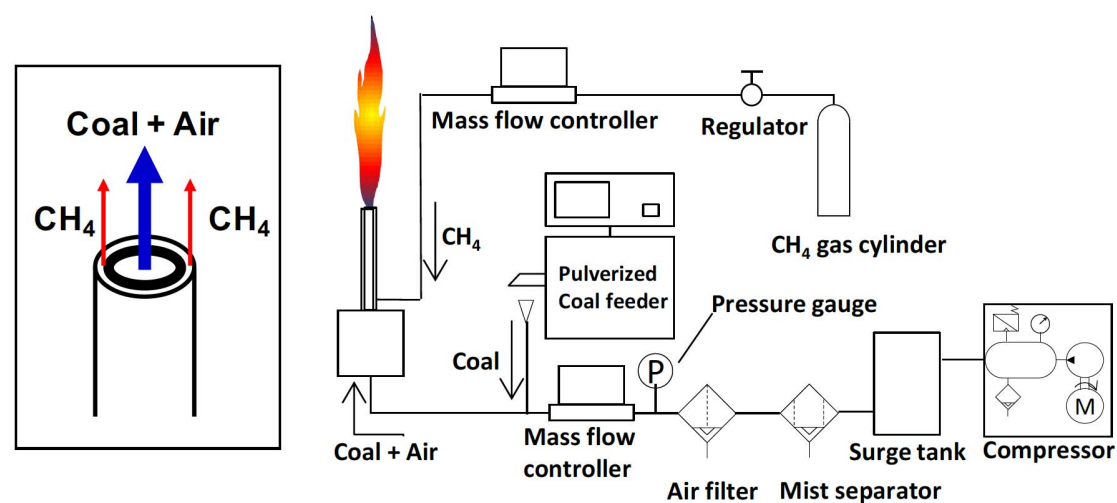


Fig. 1 Schematic illustration of experimental apparatus and burner nozzle

ここで本研究では、保炎用スリット流路からメタンを供給することで拡散火炎を形成し、微粉炭火炎の着火源とすることにより、光学計測を適用する間、安定した微粉炭火炎を形成した。メタンの流量は微粉炭火炎を安定化させるための最小流量とした。

本研究で用いる微粉炭バーナは、微粉炭火炎に対する光学計測を可能とするために、レーザーの入射、出射、LII 信号および Mie 散乱信号の取得が可能で、アクリルダクト内に設置されており、外乱とともに微粉炭粒子の外部への飛散が防がれている。また微粉炭バーナは、三次元トラバーサに取り付けられており、計測領域を自由に選択することができる。排気ガス中の微粉炭粒子はバグフィルタによって捕集され、捕集後の排気ガスは、ベンチレータを通して大気解放される。本研究で用いた微粉炭粒子の物性値の詳細に関しては、他の文献 (Hwang, et al., 2005, Hayashi, et al., 2013) を参照されたい。

3. 微粉炭火炎に対するレーザー計測装置

レーザー誘起赤熱法 (Laser Induced Incandescence; LII) は、火炎内に高強度のパルスレーザーを照射し、火炎中に存在するすす一次粒子の温度が昇華温度 (約 4000 K) まで達した際に起こすふく射を計測する手法である。この加熱されたすす一次粒子からのふく射を LII 信号と呼び、その強度を LII 信号強度と呼ぶ。本手法は、レーザーによって昇華温度に達したすす一次粒子から得られる LII 信号強度が、すす一次粒子の体積分率に比例するという理論解析 (Melton, 1984) を基にしている。本計測手法は、すす生成量やすすの粒子径を定量化するためには他の計測法との組み合わせを行うなどの工夫を要するが、すす生成領域や体積分率を二次元かつ非接触で可視化計測することが可能である。LII 計測を行うためには、一般的に高輝度のパルスレーザーが必要になる。本研究では、Nd:YAG レーザーの第二高調波 (波長: 532 nm, パルス幅: 8 ns) を光源として採用した。

図 2 に本研究で用いた LII 計測装置の概念図を示す。レーザーの時間・空間プロファイルを変更せずに入射レーザーのエネルギー密度を調整するために、1/2 波長板および偏光ビームスプリッターを用いた。レーザーは、四枚のシリンドリカルレンズ (焦点距離はそれぞれ、 $f = 2000$ mm, 25 mm, -300 mm, 700 mm) によってシート状に整形されて、微粉炭火炎へと照射される。LII 信号は、パルスディレイジェネレータ (DG535, Stanford Research 製) によって、信号取得時刻を制御されたイメージインテンシファイア (Image Intensifier; I.I.) (C4273MOD, 浜松ホトニクス社製) および高速度 CMOS カメラ (Phantom V5.0, Vision Research 製) によって取得される。レンズには UV Nikkor ($f = 105$ mm, Nikon 製), バンドパスフィルタ (Band pass filter; BPF) (中心波長 400 nm, 半値幅 30 nm) を用いた。また、すす生成特性の計測と同時に微粉炭粒子の存在位置を明らかにすることを目的として、Mie 散乱法、すす粒子径の空間分布を計測することを目的として、Time-Resolved LII (TiRe-LII) 法を適用した。これらの複合計測では、カメラの直前にハーフミラーを設置して発光を二経路に分けた (図 2 参照)。Mie 散乱の計測には、二経路に分けた光路の片方に BPF (中心波長 532 nm, 半値幅 30 nm) を取り付けた UV Nikkor レンズ、および LII 計測と同機種の高速度 CMOS カメラを用いた。TiRe-LII の計測には、LII 計測に用いるバンドパス光干渉フィルタ, I. I., 高速度 CMOS カメラをもう一組用いて LII 信号取得時間に時間差を設けた。

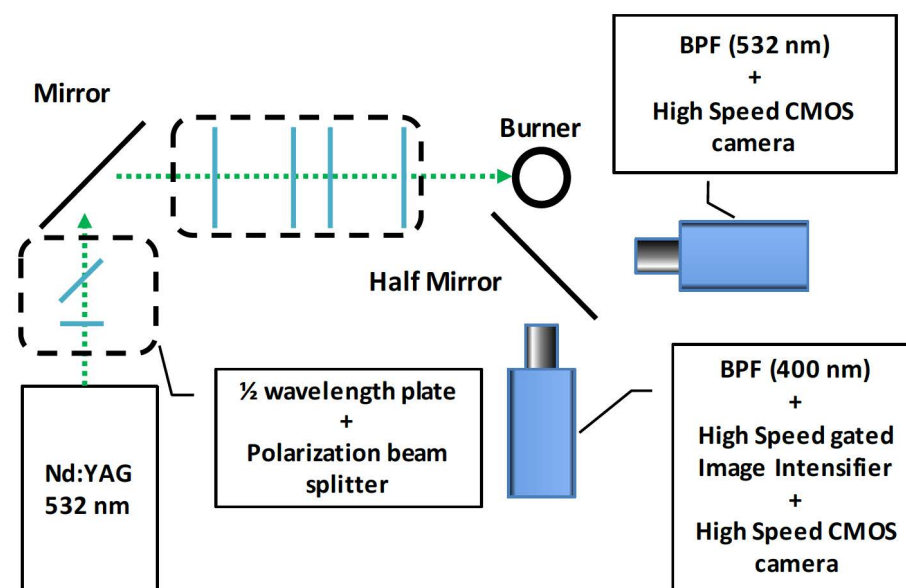


Fig. 2 Illustration of the optical setup

4. 微粉炭噴流火炎におけるすす生成特性

4.1 レーザーの入射エネルギー密度の影響

LII 計測は、気相燃焼場だけでなく混相燃焼場である噴霧燃焼場に対してもすす生成特性の強力な評価手法として用いられている。しかしながら、微粉炭火炎中には、すすと同時に燃料となる微粉炭粒子が存在するために、気相燃焼場や噴霧燃焼場と同様に LII 計測を行うことができない。本研究では、微粉炭火炎中に存在する微粉炭粒子が LII 計測の計測結果に与える影響について検討した。

図 3 に、本研究で対象とする微粉炭火炎の直接写真および二次元 LII 信号分布を示す。図 3(a) は LII 計測結果であり、すすの体積分率がグレースケールで表示されている（白色へ向かってすすの体積分率が上昇する）。図 3 より、バーナノズル近傍ではすす生成が離散的でありまたバーナ外縁部の軸方向下流に生成されていることが分かる。バーナポートからの距離の増加に伴い、すす生成領域は、離散的な点状から線を引く形状へと分布が変化しており、バーナ中心軸下流にも現れ始めることがわかる。ここで、本研究ではパルスレーザーを光源としているため、図 3 に示した結果は、瞬間画像であり LII 信号の取得時刻によって形状が異なる。そのため、定性的な比較を行うために、複数回の LII 計測結果の平均の値を定性的な分布として扱う。

図 4 にバーナ出口から高さ 135 mm の位置における LII 信号強度と入射レーザーのエネルギー密度の関係を示す。図 4 に示した結果の縦軸は、500 回の LII 計測結果のアンサンブル平均値であり入射レーザーのエネルギー密度が 0.1 J/cm^2 の条件で得られる LII 信号強度で正規化を行っている。図 4 中の凡例は、燃焼場および非燃焼場で得られる LII 信号強度である。両条件ともに、レーザーシート全域から得られる LII 信号強度を用いて解析した。図 4 に示した通り、LII 信号強度には、入射レーザーのエネルギー密度に依存して 3 つの特徴的な領域が現れることが分かる。

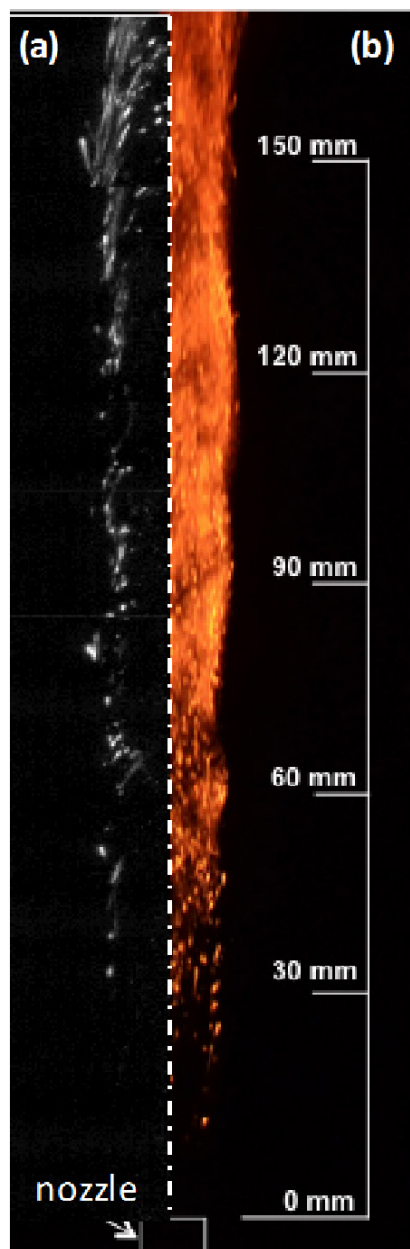


Fig. 3 Direct photograph of the pulverized coal flame and two-dimensional distribution of LII signal. (a: Distribution of the LII signal intensity, b: Direct photograph)

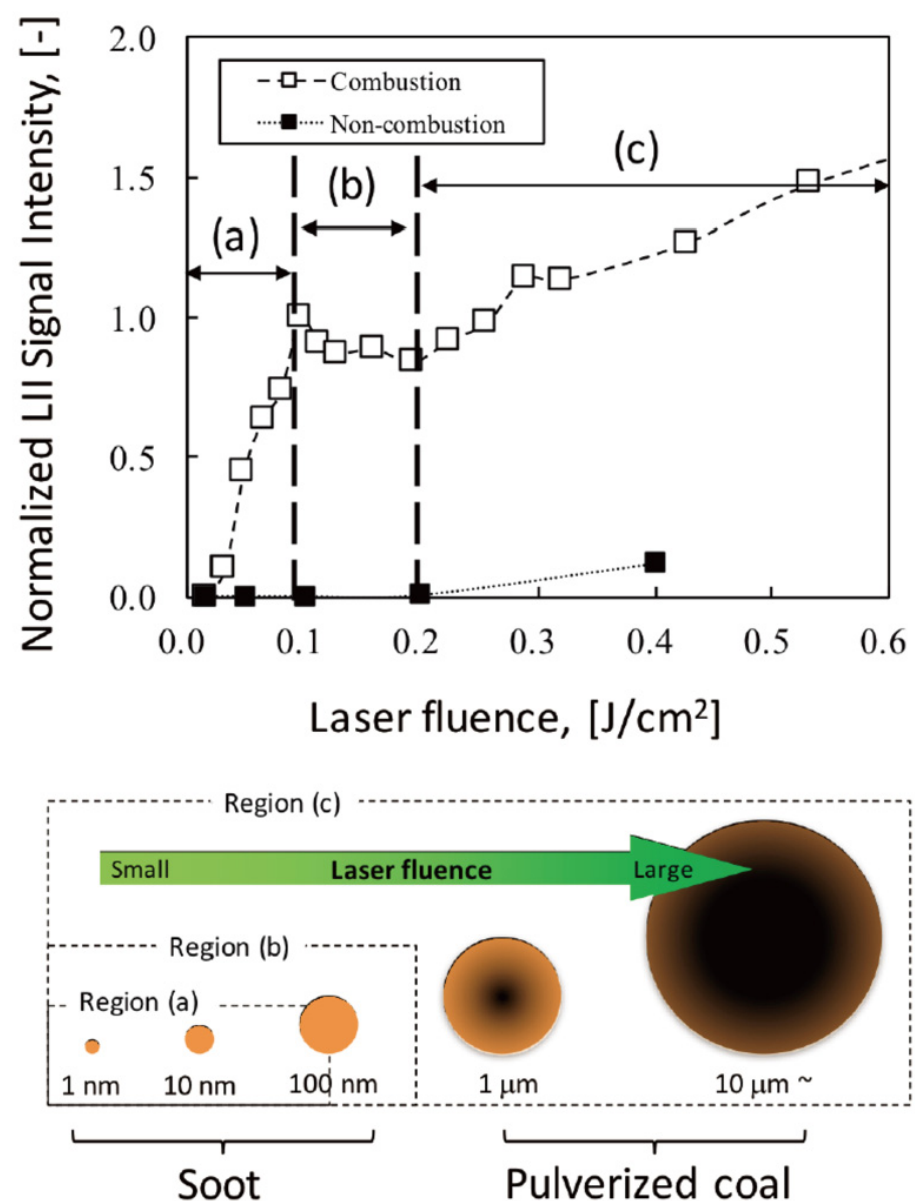


Fig. 4 LII signal intensity as a function of incident laser fluence and schematic illustration of heated particle

すなわち、入射レーザーエネルギー密度の増加に伴って、LII 信号強度が増加する領域(a)、最大値を持った後に LII 信号強度が低下する領域(b)、ふたたび LII 信号が増加する領域(c)である。領域(a)および領域(b)は、それぞれ、入射レーザーのエネルギー密度が不十分であり計測領域に含まれるすすの全量を十分に加熱することができないために体積分率を過小評価する領域、入射レーザーのエネルギー密度が必要以上に大きく、昇華によってすすの体積分率を過小評価する領域である。これらの二つの領域は、気相燃焼に対する LII 計測でも観察される。

微粉炭火炎において特徴的な傾向は、3つ目の領域（領域(c)）に現れる。気相燃焼や噴霧燃焼では、領域(b)よりも入射レーザーのエネルギー密度を上昇させても LII 信号強度は変化せず (Ni, et al., 1995), このような傾向は現れない。微粉炭火炎において領域(c)が現れる理由を明らかにするために、非燃焼条件（微粉炭粒子と酸化剤の空気のみが存在するが燃焼していない条件）において LII 計測を行った。図 4 に示した非燃焼条件の結果より、領域(c)における入射レーザーのエネルギー密度で LII 計測を行った場合、非燃焼の微粉炭粒子から LII 信号が得られていることが明らかとなった。これは、レーザー光によって微粉炭粒子が加熱された結果、計測された LII 信号である。このことから、燃焼条件における領域(c)の LII 信号は、すす粒子からの LII 信号に、微粉炭粒子からの LII 信号が重畳していることが考えられる。この結果から、気相燃焼や噴霧燃焼と異なり、微粉炭火炎に LII 計測を適用した場合には、入射レーザーのエネルギー密度によらず LII 信号が一定値となる領域がない（図 4 参照）ことから、領域(a)と領域(b)の境界値となる入射レーザーのエネルギー密度を用いて、火炎中に存在するすす粒子を過小評価することなく計測を行う必要があることが明らかとなった。

4・2 微粉炭火炎中における燃焼反応とすす生成領域の関係

微粉炭火炎中における燃焼反応とすす生成特性の関係を明らかにすることを目的として、同一バーナに対して行われた Hwang らによる OH-LIF 計測の半径方向分布 (Hwang, et al., 2005), および Hashimoto らによる数値解析結果から得られる温度および酸素濃度の半径方向分布 (Hashimoto, et al., 2012) との比較を行った。図 5 にバーナ出口から 120 mm の位置における LII 信号, Mie 散乱光, OH-LIF 信号の半径方向分布および数値解析によって得られた気相温度と酸素濃度の半径方向分布を示す。ここで、図 5 に示した LII 信号, Mie 散乱光の半径方向分布は 500 回の計測のアンサンブル平均であり、OH-LIF の半径方向分布は 30 回の計測のアンサンブル平均である。図 5(a) の縦軸の値は、各計測の結果得られる最大値で正規化されている。図 5(a)より、LII 信号強度, Mie 散乱光強度の信号が重畳して現れることがわかる。これは、燃焼反応による温度上昇、およびバーナポートからの距離の増加に伴う混合に起因すると考えられる。OH-LIF の信号は、LII 信号よりも外側に最大値を持つが、これは微粉炭火炎を保炎するために用いたメタン火炎に起因する。ここで、図 5(a)より、Mie 散乱光, OH-LIF 信号がバーナ中心軸上で計測されていることがわかる。OH-LIF の信号は、燃焼反応領域で計測されることを考えると、微粉炭粒子から放出された揮発分がバーナ中心軸上で燃焼していると考えられることができる。しかしながら図 5(b)より、バーナ出口からの高さが 120 mm の位置においても、中心軸上の気相温度は 1500 K を下回っている。

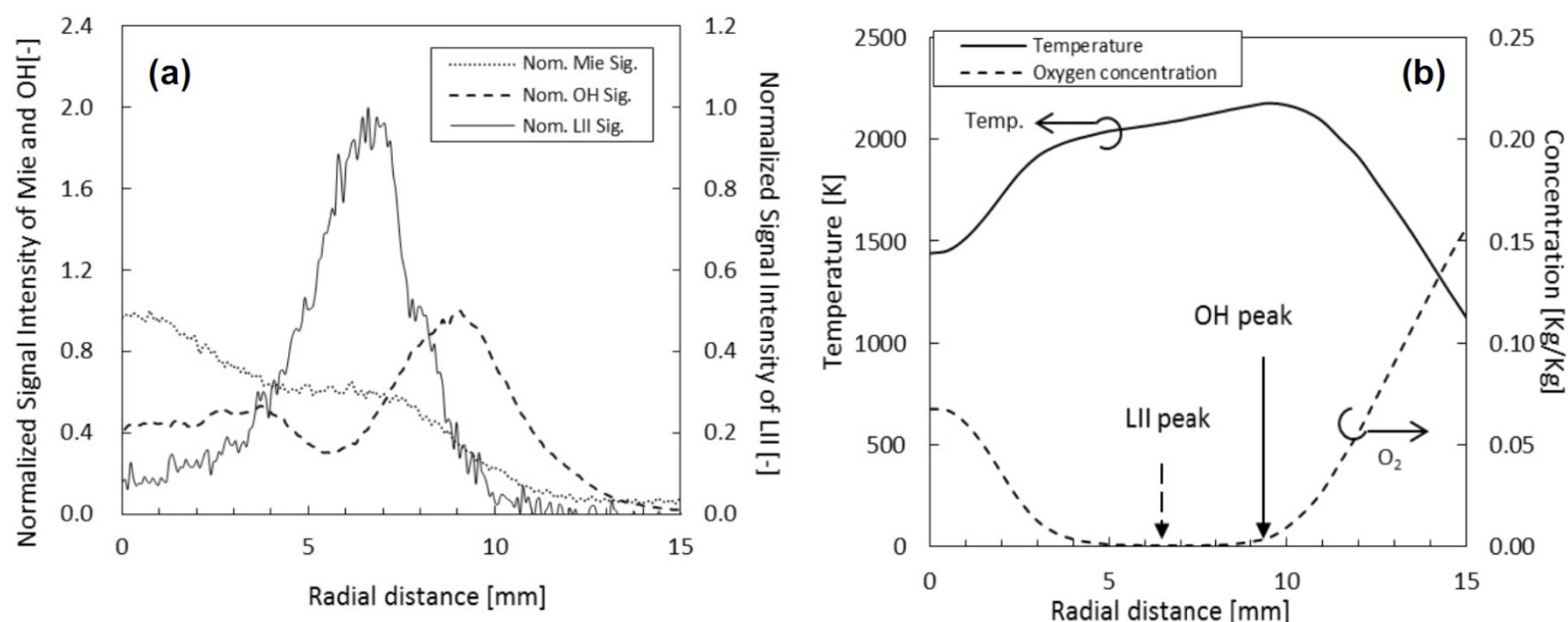


Fig. 5 (a) The ensemble-averaged radial distributions of the Mie signal, LII signal and OH radical normalized by the maximum value at 120 mm, (b) Radial distribution of temperature and the O₂ concentration (Hashimoto, et al., 2012) at 120 mm (Hayashi, et al., 2013)

また、中心軸上における LII 信号強度は低い。このことから、本研究で対象としたバーナの中心軸上では、燃焼反応は生じているが気相温度が低いためにすす生成には至らないと考えることができる。

4・3 時間分解レーザー誘起赤熱法 (TiRe-LII) によるすす一次粒子分布計測

微粉炭火炎中におけるすす粒子の成長過程を明らかにするために、火炎内の 2 次元のすす一次粒子径分布が得られる時間分解レーザー誘起赤熱法 (TiRe-LII) を行った。TiRe-LII では、レーザー照射後の異なる時刻で LII 画像を取得することにより、LII 信号の減衰率からすすの粒子径の二次元分布を求めることができる。図 6 に、バーナポートからの高さ 35, 65, 95 mm の位置におけるすす一次粒子径分布の半径方向分布を示す (Hashimoto, et al., 2016)。別途実施した、すす粒子の熱泳動サンプリングによる粒子径分布を基に、500 セットの LII 画像から算出した LII 信号の減衰率が一致するように、フィッティング関数を定義して、すす一次粒子径分布を算出した。結果から、半径方向位置に関わらず、バーナポートからの距離の増加に伴って、粒子径が増大することが明らかとなった。一方で、各高さにおけるすす一次粒子径分布の半径方向に対する変化はあまり大きくないことが示された。

この傾向を評価するために、バーナポートからの高さ 35, 65, 95 mm の各半径位置における TiRe-LII 計測結果から算出した体積基準のすす一次粒子径累積分布を図 7 に示す。バーナポートからの高さ 35 mm の位置では、バーナ中心軸から外側に向かうにつれて、小さな粒径のすす一次粒子の割合が減少していることが分かる。しかし、計測位置とバーナポートの距離の増加に伴って、半径方向に対するすす一次粒子径分布の変化は小さくなっている。これは、バーナポートからの距離の増加に伴い、すす生成領域がバーナ中心軸付近でも生じ始めること、および混合が進むことで場が均質化した結果であると考えられる。

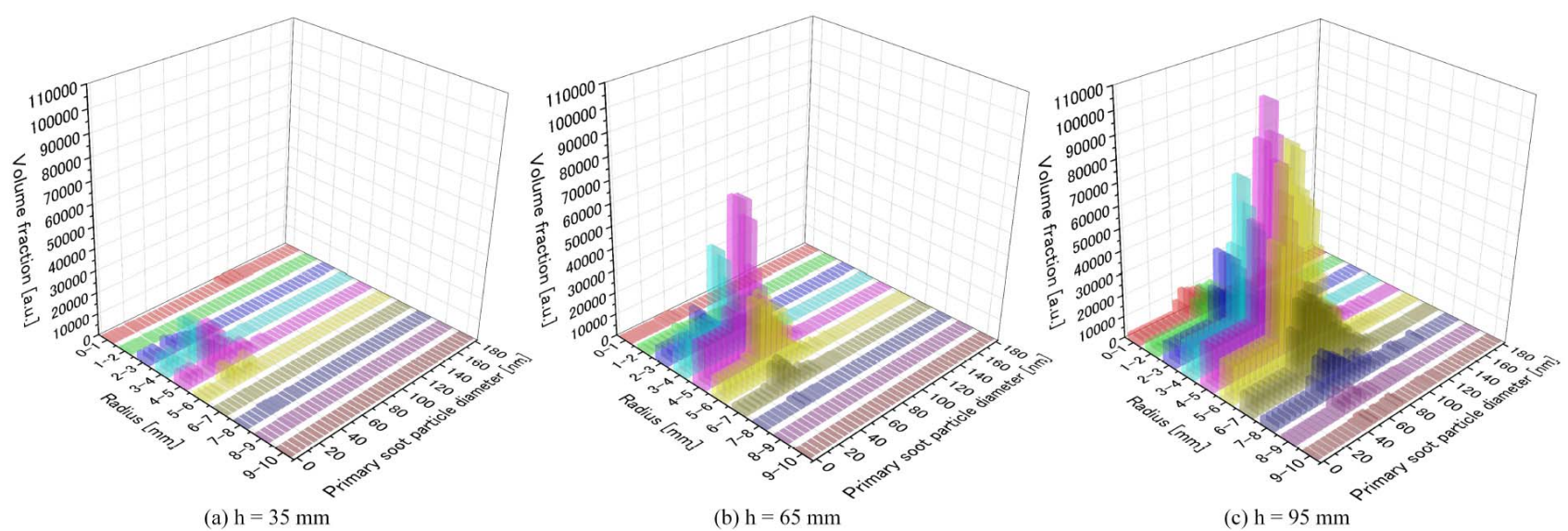


Fig. 6 Primary soot particle diameter distribution obtained by TiRe-LII for radial direction at height above the burner (a) 35 mm, (b) 65 mm, (c) 95 mm (Hashimoto, et al., 2016)

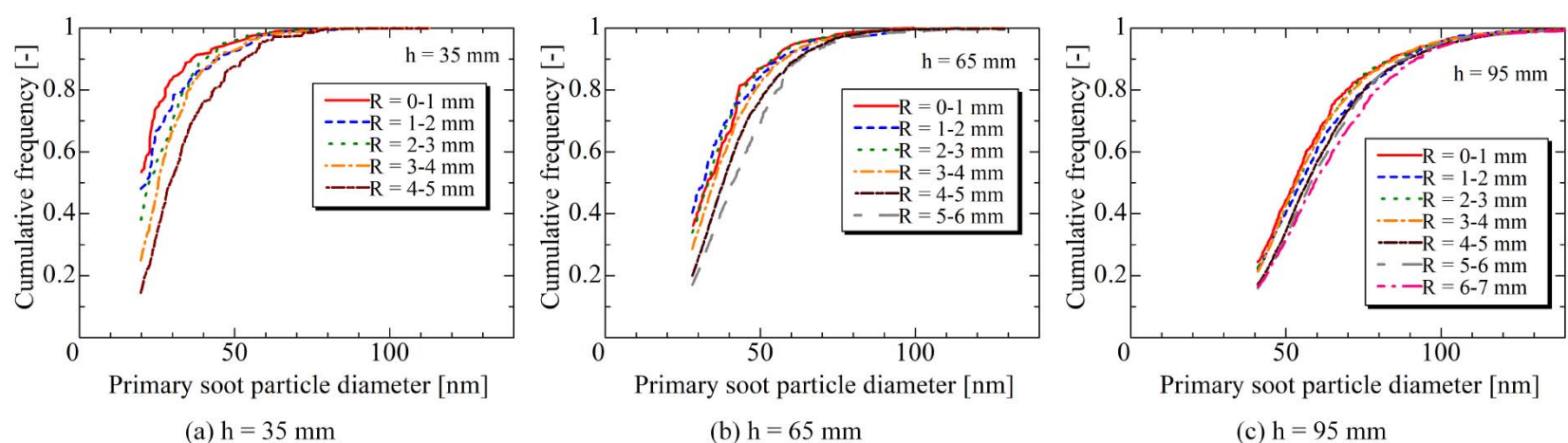


Fig. 7 Cumulative curves of soot particle diameter obtained by TiRe-LII for radial direction at height above the burner (a) 35 mm, (b) 65 mm, and (c) 95 mm (Hashimoto, et al., 2016)

5. おわりに

本研究では、微粉炭火炎中のすす生成過程を明らかにすることを目的として、二次元レーザー応用計測（レーザー誘起赤熱法 (Laser Induced Incandescence; LII)、時間分解 LII 法 (TiRe-LII)、および Mie 散乱法）を実施した。その結果、微粉炭火炎中に対して LII 計測を適用するためには、計測領域に分布するすす一次粒子の生成量を過小評価しないレーザーのエネルギー密度を選定する必要があること、高温かつ酸素濃度が低い領域に微粉炭粒子が存在する条件を満たす場合にすす生成が起こることが示された。また、本研究で対象とした場では、粒子径がバーナポートからの距離の増加に伴って成長する一方で、半径方向への粒子径分布の変化は大きくないことが明らかとなった。

これらの結果は、微粉炭火炎中におけるすす生成の一端であり数値解析に用いるすす生成モデルの検証用のデータとなり得ると考えられる。今後、微粉炭火炎中のすす生成を検討する上では、燃焼場において“生成された”すすだけでなく、燃焼反応によって多環芳香族炭化水素 (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons; PAHs) を経て、すす生成へと至る過程を明らかにすることが必要となる。

謝辞

本研究は、大阪大学 赤松史光教授、中塚記章助教、北海道大学 橋本望准教授、九州大学 渡邊裕章准教授、電力中央研究所 泰中一樹様、辻博文様、牧野尚夫様との一連の共同研究の結果の抜粋であり、ここに示して謝意を表す。また、当時、大阪大学 燃焼工学研究室の学生であった石原暢之君に実験実施および結果解析にご協力いただいた。ここに記して謝意を表す。

文献

- (1) Hashimoto, N., Kurose, R. and Shirai, H., Numerical simulation of pulverized coal jet flame employing the TDP model, *Fuel*, 97 (2012), pp.277-287.
- (2) Hashimoto, N., Hayashi, J., Nakatsuka, N., Tainaka, K., Umezu, S., Watanabe, H., Akamatsu F. and Makino, H., Primary soot particle distributions in a combustion field of 4 kW pulverized coal jet burner measured by time resolved laser induced incandescence (TiRe-LII), *Journal of Thermal Science and Technology*, 3(2016), JTST0049.
- (3) Hayashi, J., Hashimoto, N., Nakatsuka, N., Tsuji, H., Watanabe, H., Makino, H. and Akamatsu, F., 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, *Proceedings of the Combustion Institute*, 34-2 (2013), pp.2435-2443.
- (4) Hwang, S-M., Kurose, R., Akamatsu, F., Tsuji, H., Makino, H. and Katsuki, M., Application of optical diagnostics techniques to a laboratory-scale turbulent pulverized coal flame, *Energy and Fuels*, 19 (2005), pp.383-392.
- (5) Melton, L.A., Soot diagnostics based on laser heating, *Applied Optics*, 23 (1984), pp.2201-2208.
- (6) Ni, T., Pinson, J.A., Gupta, S. and Santoro, R.J., Two-dimensional imaging of soot volume fraction by the use of laser-induced incandescence, *Applied Optics*, 34 (1995), pp.7083-7091.