

LIBS によるコンクリート含有塩分計測 II —シャドウグラフによるプラズマ進展計測—

Measurement of chloride concentration originated from salt in concrete sample by LIBS (II)
—Measurement of plasma growth by shadowgraph—

山口昌人¹、杉山精博¹、藤井隆²、根本孝七^{1,2}

Masato Yamaguchi¹, Kiyohiro Sugiyama¹, Takashi Fujii², Koshichi Nemoto^{1,2}

¹東京工業大学, ²電力中央研究所

¹Tokyo Institute of Technology, ²Central Research Institute of Electric Power Industry

Abstract: We measured the relation between Cl fluorescence intensity and distance from the axis of the second laser beam to the target surface in double pulse laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS). Shadowgraph images show that the expansion of plasma plume on a concrete sample produced by the first laser pulse well corresponds to the dependence of Cl fluorescence on the irradiation position of the second laser pulse. The plasma plume was trapped in He used for buffer gas.

1. はじめに

コンクリート構造物の耐荷性能は、塩化物イオンを原因とする鉄筋の腐食により低下することが知られている。そのため塩素 (Cl) 濃度の定量測定は構造物の寿命を知る上で重要である。レーザー誘起ブレイクダウン分光 (LIBS) はレーザー光を測定対象物に集光することによりプラズマを発生させ、その分光情報より含有されている元素の種類及び濃度を測定する技術であり、現場での遠隔かつリアルタイム測定が可能である。

これまでの報告では¹⁾、ターゲットに対して垂直に入射するレーザー (レーザー1) によりアブレーションプラズマを生成し、ターゲットに対して水平にもう一つのレーザー (レーザー2) をプラズマ中に照射するダブルパルス LIBS を用いることで Cl の発光強度が増加する結果を得た。今回、ダブルパルス LIBS における最適条件を明らかにするため、レーザー2 の集光位置に対する Cl 発光強度の変化を観測した。また、コンクリート上に発生したプラズマの時間進展をシャドウグラフ法により直接的に測定することにより、レーザー2 の集光位置とアブレーションプラズマの時間進展との関係を明らかにした。

2. 実験方法

実験配置を Fig. 1 に示す。Fig.1(a)はダブルパルス LIBS の実験配置¹⁾、Fig.1(b)はシャドウグラフ計測の実験配置を示す。レーザー1、レーザー2にはパルス繰り返し10HzのNd:YAGレーザー(Continuum, Powerlite8010)の第2高調波(532nm)を用いた。レーザー1はターゲット表面に対して垂直に入射し、 $f=250\text{mm}$ の片凸レンズを用いてターゲット表面上に集光することにより、アブレーションプラズマを発生させた。ターゲットにはコンクリートを微粒子化してプレスしたサンプルを用いた。ターゲットは

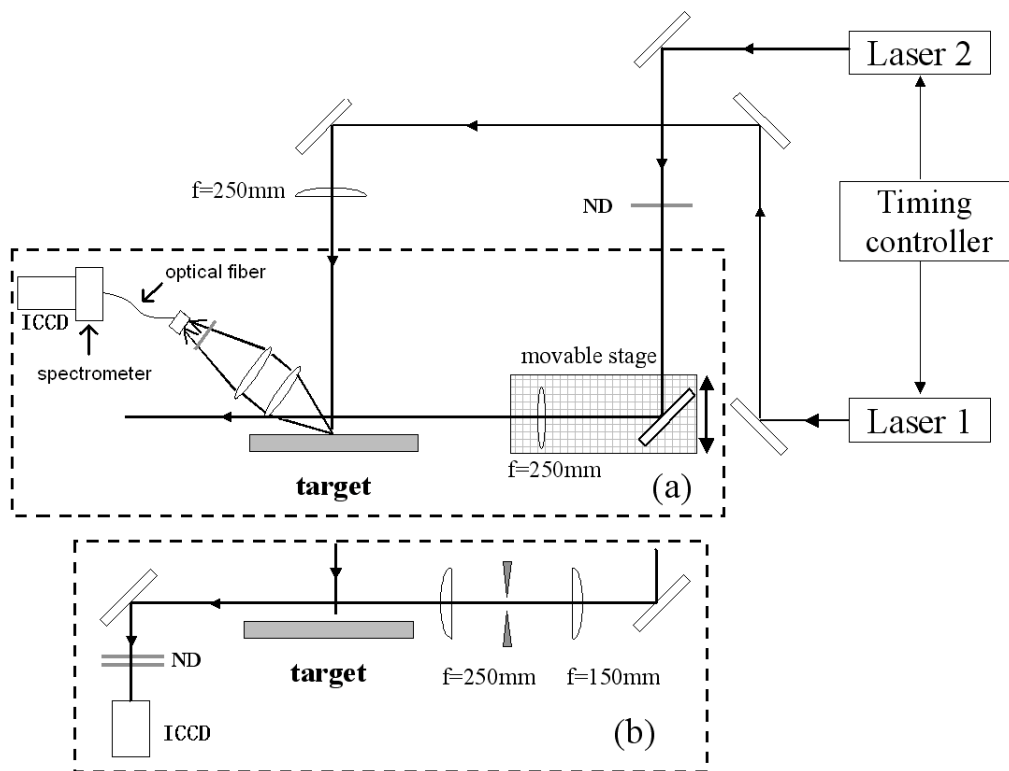


Fig. 1 Experimental setup of (a) double pulse LIBS and (b) shadowgraph

回転ホルダーに設置され、レーザー光は1ショット毎に新しいサンプル面に照射される。バッファガスとしてHeを、レーザー1の照射点下方より内径4mmのノズルを用いて噴射した。大気中におけるLIBS計測では白色光に起因するバックグラウンドが大きく、Heをバッファガスとして用いることにより白色光が低減し測定感度が向上することが報告されている²⁾。

ダブルパルスLIBSでは、レーザー1とレーザー2の遅延時間を1500nsとし¹⁾、ターゲット表面からレーザー2の光軸までの距離を変化させた時のCl発光(837.59nm)強度を測定した。この時、レーザー1およびレーザー2のエネルギーはそれぞれ200mJおよび300mJであった。プラズマからの発光は直径50mmのレンズによりファイバ端面に集光され、焦点距離460mmの分光器により分光され、ICCDカメラにより受光される。

シャドウグラフ計測では、レーザー2をプローブ光として用いた。レーザー2はf=150mmの片凸レンズを用いて集光させ、空間フィルターとしてピンホールを通過させた後、f=250mmの片凸レンズによって光束径14mmの平行光束とした。その後プラズマが形成されているターゲット表面上を通過させ、ICCDカメラ(Roper, PI-MAX1K-UniGen)により撮像した。ICCDカメラのゲート幅は20nsとし、ゲート遅延時間はレーザー2と同期させ、タイミングコントローラーにより調整した。レーザー1のエネルギーを50mJ、100mJ、200mJと変化した条件において、レーザー1に対するレーザー2の遅延時間を最大3000nsまで変化させ、それぞれの遅延時間においてシャドウグラフ法を用いたアブレーションプラズマ進展の撮像を行った。

3. 実験結果

ダブルパルス LIBS において、ターゲット表面からレーザー2の光軸までの距離を変化させた時に得られた Cl 発光強度の変化を Fig. 2 に示す。図より、ターゲット表面からレーザー2の光軸までの距離が 0.5mm~1.5mm までは Cl 発光強度は緩やかに減少し、2mm 以上では Cl 発光強度が急激に低下することが分かる。

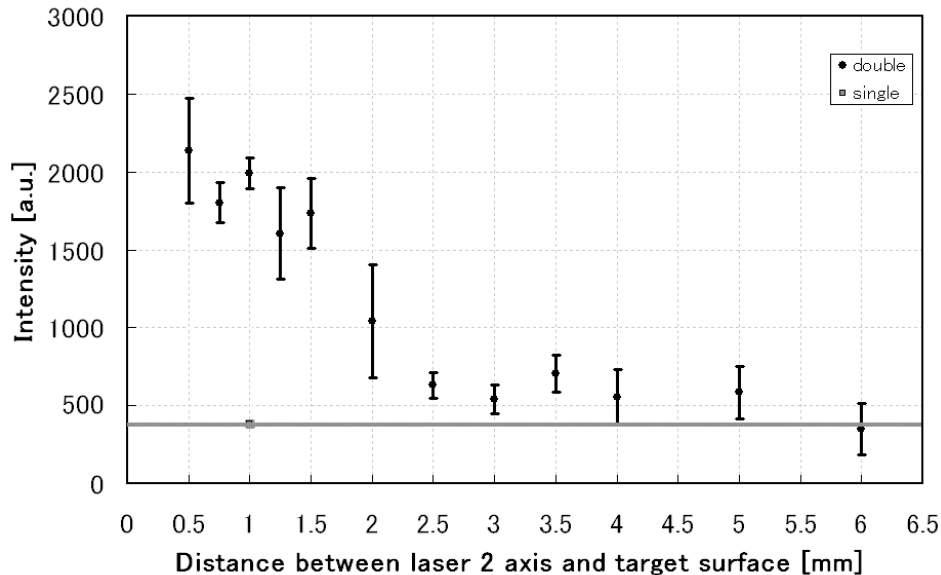


Fig. 2 Intensity of Cl spectral line (837.59nm) versus distance from target surface to laser axis of the second laser pulse.

Fig. 3 に、レーザー1のエネルギーが 200mJ においてシャドウグラフにより得られたアブレーションプラズマの時間発展を示す。レーザー1に対するレーザー2の遅延時間は 80ns から 3000ns まで変化させた。レーザー1照射直後にターゲット表面にプラズマブルームが形成され、時間経過とともにプラズマが膨張していく過程が観測される。Fig. 3(a)より、プラズマ形成の初期段階では、ターゲット表面に対して垂直方向に細長いプラズマが形成されていることが分かる。その後、Fig.3(b)~(d)より、プラズマが He ガスと大気との境界面まで到達するとガス中に閉じ込められるように広がっていくことが分かる。

ここで Fig. 3(c)は Fig. 2 と同一条件で取得されたシャドウグラフである。この結果より、遅延時間 1500ns におけるアブレーションプラズマは、ターゲット表面から垂直方向に 3~4mm の位置に到達していることが分かる。レーザー1の光軸上におけるレーザー2の集光径は約 1mm であるので、Fig.2 において、ターゲット表面から 1.5~2.5 mm において Cl 発光強度が低下した原因は、He ガス内に閉じ込められたプラズマからレーザー2の光軸が外れたためと考えられる。

以上の結果より、ターゲット表面からレーザー2の光軸までの距離を大きくすると、レーザー2が通過するアブレーションプラズマの体積が減少し、これに伴い Cl 発光強度が低下したと考えられる。ダブルパルス LIBS における Cl 発光強度は、今回の実験配置においてはターゲット表面からレーザー2の光軸までの距離が 0.5~1.5mm では大きな変化は無く、これはシャドウグラフの結果とよく一致する。

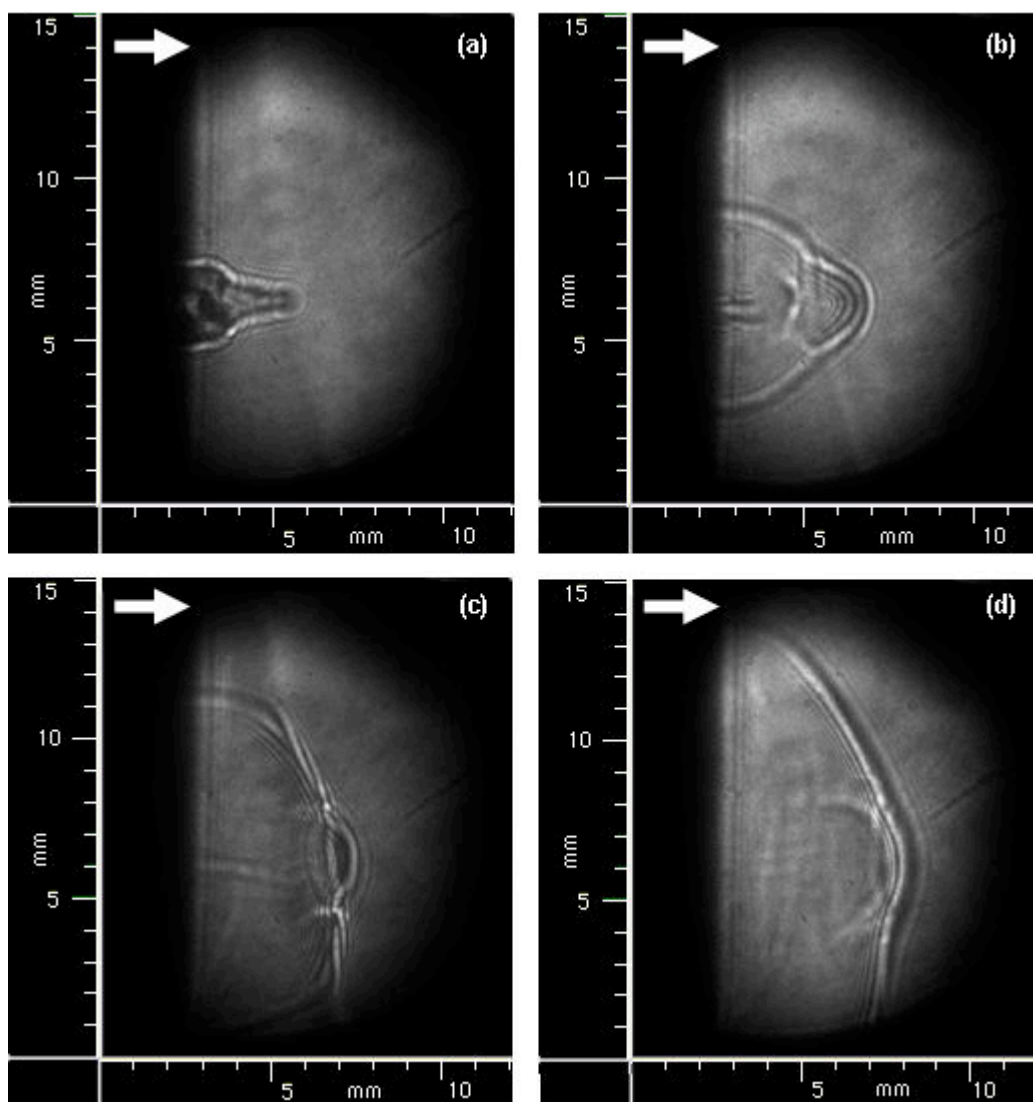


Fig. 3 Shadowgraph of ablation plasma plume in He gas spray at the gate delay of (a) 80ns, (b) 500ns, (c) 1500ns and (d) 3000ns. Arrows show the target surface.

4. まとめ

今回、ダブルパルス LIBS における、Cl 発光強度とアブレーションプラズマに対するレーザー2 照射位置の関係を明らかにした。さらに、シャドウグラフ法によりコンクリートサンプル上でのアブレーションプラズマの進展を観測した。白色光を抑制するためにバッファガスとして用いた He ガス中にプラズマが閉じ込められており、アブレーションプラズマのサイズが、ダブルパルス LIBS における第2レーザーパルスの照射位置に対する発光強度の依存性の結果と良く一致する。

参考文献

- 1) 杉山清博, 藤井隆, 松村卓郎, 塩竈裕三, 根本孝七 "LIBS によるコンクリート含有塩分計測" 第 25 回レーザーセンシングシンポジウム予稿集 p123-124
- 2) G. Wilsch, F. Weritz, D. Schaurich, and H.Wiggenhauser, "Determination of chloride content in concrete structures with laser-induced breakdown spectroscopy" Construction and Building Materials Vol. 19, pp. 724-730 (2005).