

可変スポット径のレーザー加熱光学系を用いた浮き・剥離の顕在化

東京大学 学生会員 ○久保田 祐貴, 正会員 早川 智彦
 非会員 望戸 雄史, 非会員 蛭間 友香
 非会員 枋岡 陽麻里, 非会員 石川 正俊

1. はじめに 橋梁やトンネルにおける崩落事故を未然に防ぐため、劣化の進んだコンクリート構造物の変状を迅速に把握する需要が増している。中でも、浮き・剥離部分と健全部の熱容量の差を利用し、表面温度の違いとして赤外線サーモグラフィカメラを用いて変状を可視化する赤外線サーモグラフィ法（赤外線法）は、対象を遠方から非接触に計測できる手法であり、打音法に代わる検査法として注目されている¹⁾。

特に、赤外線を放射する照明や熱源により、対象を加熱しながら測定するアクティブ・センシングは、太陽光や自動車の排気などによる受動的な加熱を利用するパッシブ・センシングに比して、対象の環境に依らずに測定が可能である。しかしながら、ハロゲンアークランプを用いた従来法²⁾では、スポットの大きさが対象までの距離により制約を受け、加熱範囲を適切に設定することが困難であった。加熱範囲を適切に設定することは、限られた熱源を用いて効率良く加熱するために不可欠である。そこで、本研究では、遠方に照射する際に加熱範囲を精度良く調整できる可変スポット径レーザー加熱光学系を提案し、その有効性を示す実験を行った。

2. 提案手法 図1に本研究で用いた光学系の概念図を示す。レーザー光源の光軸上に、凸レンズ2枚を配置した共焦点光学系を用いている。ただし、レーザー照明やビームエキスパンダーのような平行光の照射を目的とするのではなく、凸レンズ間の距離を調整することにより、ビームの広がり角を精度よく調整することを可能にしている。図1に示すパラメータを持つ直径 d の平行光線を入射した場合、近軸光線を仮定すると、レンズ系を通過した後の広がり角 u は、

$$u = \left(1 - \frac{y-f}{f_0}\right) \tan^{-1}\left(\frac{d}{2f}\right)$$

で与えられる。さらに、距離が l 離れた対象におけるスポット径 x は、

$$x = 2 \left\{ (y-f) \cdot \frac{d}{2f} + l \tan u \right\}$$

となる。実験では、以上のような近軸光線の伝播理論から導かれるスポット径を元にレンズ間距離を調整した。広がり角の制御を共焦点光学系のレンズ間距離に変換することで、レンズ1枚を用いて拡大した場合に比べ、スポット径を精度良く調整でき、さらに、デフォーマブルミラーなど高価な機材を用いないため、安価に作成できる。実験で使用した凸レンズは、いずれも近赤外から可視長波長にかけての反射防止膜を施し、光学系を通す前後でレーザーの照射パワーを計測することで減衰がほぼないことを確認した。

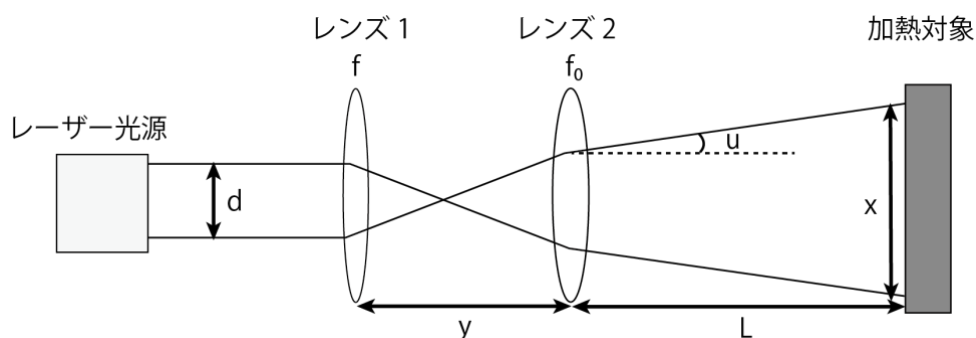


図1 本研究で提案する可変スポット径のレーザー加熱光学系の概念図

3. 予備実験とその結果 予備実験では、市販の可視光の赤色レーザーポインター（TLP-78, $\lambda=660$ nm）を用い、スポット径を適切に変更できているかについての実験を行った。凸レンズ2枚（TS 両凸レンズ 25X100 NIR1, $f=100$ mm）を用い、レンズ間距離を変えた際に、近軸光線の伝播理論から導かれるスポット径と実際のスポット径を比較した。用いた装置の写真を図2、スポット径が変化の様子を図3、対象までの距離を1, 5, 10 mとした場合の測定結果を表1に示す。

理論値と実験値がほぼ一致し、誤差がいずれの距離においても数 mm 程度にとどまっていることから、遠方の対象に対し精度よくスポット径を変更できていること、提案手法により、遠方対象に対して照射範囲を適切に制御できることが示された。

キーワード 赤外線法, 変状検出, 可変スポット径レーザー加熱装置, アクティブ・センシング

連絡先 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 TEL 03-5841-0224 FAX 03-5841-6952

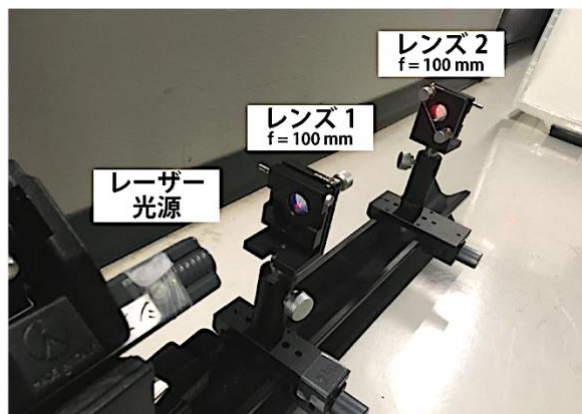


図2 予備実験で用いた実験装置

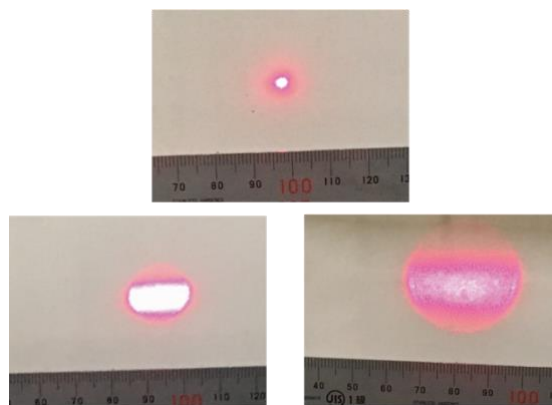


図3 スポット径が変化している様子

表1 対象の距離を変えた際の、スポット径の理論値と実験値の比較

x_{ideal} は、レーザー光源が純粋な平行光でないことから、実験結果をもとに $d=3\text{ mm}$ として計算を行った。

L mm	1000			5000			10000		
y mm	100	150	200	100	150	200	100	150	200
x_{ideal} mm	30.0	16.5	3.0	150.0	76.5	3.0	300.0	151.5	3.0
x_{exp} mm	32	19	6.0	150	75	7.0	300	150	8.0

4. トンネル内での加熱実験とその結果

遠方のコンクリート構造物に対して適切に照射加熱ができていのかを確認するため、静岡県富士市の施工技術総合研究所内の模擬トンネルにて加熱実験を行った。実験では、加熱用レーザー装置 (redENERGY G4, 20W, Z Type, EP Series, $\lambda=1064\text{ nm}$) および、3. と同様の凸レンズ2枚を用いた。レーザー光源による加熱は約 7000 mm 先の1辺 100 mm のコンクリート片に対して約 10 秒間行い、加熱を止めた直後に静止している自動車上から撮像を行なった。トンネル内のコンクリート片へ、赤色の可視光であるガイド光を照射した様子を図4、サーモカメラ (InfRec H9000) を用いて撮像した剥離が生じているコンクリート片の画像を図5にそれぞれ示す。

図4から、ガイド光によりスポットサイズが適切に変更され、コンクリート片の測定領域に照射できていることが観察できる。さらに、図5から、遠方のコンクリートの剥離が、本研究において提案されたレーザー光学系の加熱により検出できていることがわかる。また、スポット径を広げることでより広範囲での加熱ができることが示唆された。



図4 ガイド光を遠方に照射している様子

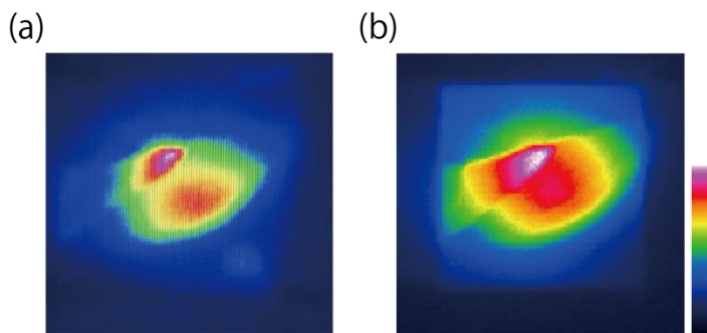


図5 剥離があるコンクリート片の赤外線画像
(a) スポットを絞った場合、(b) スポットを広げた場合

5. おわりに

本研究では、コンクリート構造物の浮きや剥離を検出するために、可変スポット径のレーザー加熱光学系を用いることによって、照射範囲を適切に制御できる手法を提案した。レーザー光の広がり角を共焦点光学系のレンズ間距離により調整できるため、安価に精度良くレーザー光のスポット径を調整が可能である。また、予備実験およびトンネル内での加熱実験から、提案した系を用いて適切に照射範囲を設定し、コンクリート構造物の変状を比較的短時間で計測ができる可能性が示された。今後は、さらなるスポット形状の制御、より高速かつ高精度な加熱・計測手法の開発に取り組む。

【参考文献】1) 中村士郎, 阪上隆英, 原田修輔, 久保司郎: 赤外線サーモグラフィを用いたコンクリートの剥離欠陥の3次元形状評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 19, No. 3, pp. 51-60, 2008. 2) 大屋戸理明, 田中寿志, 鳥取誠一, 栗田耕一: 強制加熱によるコンクリート剥離検知手法における照射出力と画像解析法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 18, No. 3, pp. 37-46, 2007.