

電界誘起第二高調波発生を用いた離隔距離 10 m における

電界分布計測

佐藤 丈尚¹, 佐藤 正寛¹, 藤井 隆¹, 大石 祐嗣², 熊田 亜紀子¹

¹ 東京大学 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

² 電力中央研究所 (〒240-0196 神奈川県横須賀市長坂 2-6-1)

Measurement of electric-field profile at 10 m isolation distance based on electric-field-induced second-harmonic generation

Takenao SATO¹, Masahiro SATO¹, Takashi FUJII¹, Yuji OISHI², Akiko KUMADA¹,

¹The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-Ku, Tokyo 113-8656

² CRIEPI, 2-6-1 Nagasaka, Yokosuka, Kanagawa 240-0196

Abstract: Electric-field-induced second-harmonic generation (E-FISHG) is gaining attention as a non-contact, non-invasive, and highly sensitive electric field measurement technique. In this study, the SHG signal distribution was obtained by focusing laser on the electric field to be measured at a distance of 10 meters and measuring at multiple points by moving the electrodes along the laser path. From the SHG signal distribution, the electric field profile was successfully inferred.

Key Words: Laser sensing, Optical technology, Second-harmonic generation, Remote measurement

1. 序論

絶縁耐力の高い機器開発、運用中の設備の保守点検のため、放電に関わる物理量である電界の計測は重要である。近年、非侵襲・非接触な計測を実現する光学的手法として、非線形光学効果を用いた電界誘起第二高調波発生 (electric-field-induced second-harmonic generation: E-FISHG) に基づく手法が注目されている^{1,2)}。E-FISHG 法では、外部電界が印加された媒質中にレーザを照射し、3 次の非線形分極を発生させる。この非線形分極により第二高調波 (SH 光) が発生 (SHG) するため、本手法ではこの SHG 信号を計測に利用する。SH 光の分極は以下の式で表される¹⁾。

$$P_i^{(2\omega)} = \frac{3}{2} N \chi_{i,j,k,l}^{(3)} (-2\omega, 0, \omega, \omega) E_j^{(\text{ext})} E_k^{(\omega)} E_l^{(\omega)}$$

ただし、 $E_{k,l}^{(\omega)}$ は入射レーザの電界、 $E_j^{(\text{ext})}$ は外部から印加される電界、 N はガス分子密度、 $\chi_{i,j,k,l}^{(3)}$ は非線形感受率である。添え字はそれぞれ、 i は SH 光の分極方向、 j は外部電界の方向、 k, l はレーザの偏光方向を表して

いる。発生する第二高調波のエネルギーは $[P_i^{(2\omega)}]^2$ に比例するため、外部電界の二乗に比例する。

これまで、E-FISHG 法ではパルス幅が短く、高感度・高時間分解能計測が可能なフェムト秒レーザが主に利用されてきた³⁾。しかし、フェムト秒レーザはコストが高く、装置構成が複雑なため現場計測への適用が難しい。また、先行研究では主に光源と計測対象電界との離隔距離が 1 m 以下で計測が行われてきた^{1,2)}。しかしながら、500 kV 送電線では 11 m 離れて作業することが推奨されており、現場での実用にはさらなる離隔距離の拡大が望まれる⁴⁾。本稿では、現場計測に向け安価で可搬性に優れたナノ秒レーザを用い、光源と測定領域との離隔距離を 10 m に拡大したときの計測結果について報告する。

2. 実験方法および結果

Fig. 1 に実験配置を示す。光源には、Nd: YAG レーザ (Quantel Laser, CFR400, 繰り返し周波数 10 Hz, 波長

1064 nm, ビーム直径 7 mm, パルス幅 7 ns)を使用した。半波長板と偏光子を用いて集光前のレーザーエネルギーを 80 mJ とし, 集光前の半波長板を用いてレーザーの偏光面を回転し, 外部電界とレーザー電界を平行にした。その後, 凹レンズ ($f: -50$ mm)と凸レンズ ($f: 300$ mm)を用いてビーム径を 42 mm に拡大し, 焦点距離 10 m のレンズで電極間にレーザーを集光した。電極として, 平行棒電極 (半径 10 mm)を用い, 負極性直流電圧 (日新パルス電子, 100K5SU)により電界を印加した。集光後, ダイクロイックミラーで SH 光を折り返し, 同じ焦点距離 10 m のレンズで平行光とした。ダイクロイックミラーとバンドパスフィルタで基本波を減衰させた後, 光電子増倍管 (浜松ホトニクス, H7422P-40)の光電面 ($\phi 5$ mm)に SH 光を集光した。ミラーの後方に設置したフォトダイオードからの信号を用い, レーザに同期して光電子増倍管で SHG 信号を取得した。

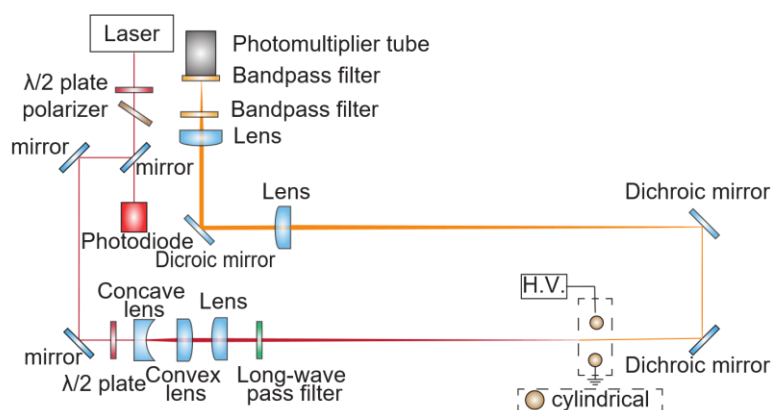


Fig. 1 Experiment setup for electric-field measurement.

今回, 我々が開発したレーザー光路に沿った電界分布を推定する手法を用いた²⁾。本手法は, 光軸に沿った多点計測により取得した SHG 信号分布を電界分布の推定に利用する。推定手法の詳細については文献を参照されたい²⁾。今回, 信号の取得間隔を 10 mm とし, 800 mm の範囲で 81 点取得した。ギャップ長 10 mm, 印加電圧 15 kV として校正用に SHG 信号分布を取得した。次に, ギャップ長 20 mm, 印加電圧 35 kV として SHG 信号分布を取得し, 校正データに基づき平行棒電極による電界分布の推定を行った。推定結果を有限要素法による電界解析結果と比較した。

取得したそれぞれの SHG 信号分布と電界分布の推定結果を Fig. 2, Fig. 3 に示す。Fig. 2 より, SHG 信号分布は回折が原因と考えられる振動が観測されたが, 理論計算によって予測されるローレンツ分布に従った。Fig. 3 において, 推定値と想定値の最大値がそれぞれ 1.52 kV/mm, 1.53 kV/mm であり, 想定値の最大値と誤差 0.7%で推定することに成功した。

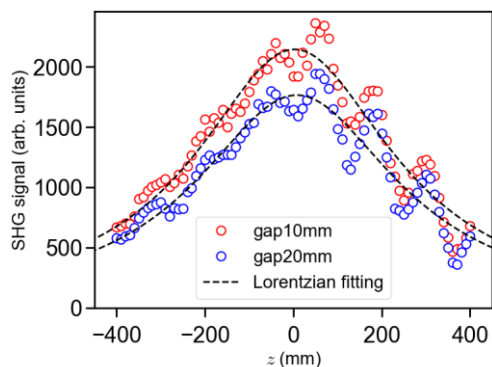


Fig. 2 SHG signal distributions.

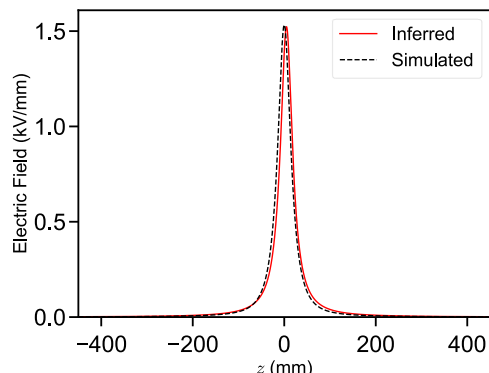


Fig. 3 Comparison of inferred and simulated electric field.

参考文献

- 1) A. Dogariu, B. M. Goldberg, S. O'Byrne, and R. B. Miles: Phys. Rev. Applied, **7**, 2, (2017) P.024024.
- 2) S. Nakamura, M. Sato, T. Fujii, A. Kumada, and Y. Oishi: Phys. Rev. A, **104**, 5, (2021) P.053511.
- 3) S. Nakamura, M. Sato, T. Fujii, A. Kumada: Plasma Sources Science Technology, **31**, (2022) P.115020.
- 4) 関西電力送配電: <https://www.kansai-td.co.jp/supply/accident-prevention/power-line/> (アクセス日: 2024/07/25)