

共鳴ラマン効果を用いた爆発物遠隔計測装置の開発

杉本 幸代¹, 市川 祐嗣¹, 荻田 将一¹, 山下 望¹, 朝日 一平¹, 江藤 修三²,
染川 智弘³, Haik Chosrowjan³, 谷口 誠治³

¹株式会社四国総合研究所 (〒761-0192 香川県高松市屋島西町 2109 番地 8)

²一般財団法人電力中央研究所 (〒240-0196 神奈川県横須賀市長坂二丁目 6 番 1 号)

³公益財団法人レーザー技術総合研究所 (〒661-0974 兵庫県尼崎市若王子三丁目 20 番 11 号)

Development of Remote Sensing System for Explosive Substances Using the Resonance Raman Effect

Sachiyo SUGIMOTO¹, Yuji ICHIKAWA¹, Masakazu OGITA¹, Nozomi YAMASHITA¹, Ippei ASAH¹,
Shuzo ETO², Toshihiro SOMEKAWA³, Haik Chosrowjan³, Seiji TANIGUCHI³

¹ Shikoku Research Institute Inc., 2109-8 Yashima-nishimachi, Takamatsu-shi, Kagawa-ken 761-0192

² Central Research Institute of Electric Power Industry, 2-6-1 Nagasaka, Yokosuka-shi, Kanagawa-ken 240-0196

³ Institute for Laser Technology, 3-20-11 Nakouji, Amagasaki-shi, Hyogo-ken 661-0974

Abstract: We have been developing a remote measurement technique using resonant Raman scattering to measure hazardous materials generated by natural and human-induced disasters. In this study, explosives were selected as one of the hazardous materials to be measured. Sodium nitrite, pentaerythritol, and hexamethylenetetramines were selected as explosive simulants. The excitation wavelength dependence of these resonance Raman spectra (excitation profile) was measured. From the obtained excitation profiles, the excitation wavelength used for the remote measurement was determined to be 266 nm, and the resonant Raman scattering light of the explosive simulants was measured from a distance of 100 m using a flash lamp pumped fourth harmonic Q switched Nd:YAG laser. The obtained results confirmed that explosive simulants of the order of mg or less could be detected.

Key Words: Resonance Raman scattering, LIDAR, Explosive Substances, Hazardous substance

1. 序論

自然災害や人的災害等によって発生する有害物質や、工場等において発生する大気汚染物質は、ごく微量であっても人体に大きな悪影響を及ぼす場合がある。このため、可能な限り離れた場所から物質種とその量を把握する技術が必要である。発表者らは、物質の同定能力の高いラマン効果に着目し、遠隔から微量の物質を検知するため、共鳴ラマン散乱を観測する有害物質遠隔計測装置（共鳴ラマンライダ）を開発してきた。本研究では、有害物質の一つである爆発物を対象として遠隔計測技術の開発を行い、Nd:YAG レーザの第4高調波（波長 266 nm）を用いた場合の計測下限について、爆発物の擬剤を用いて離隔距離を 100 m として遠隔計測試験を実施することにより検討を行った。

2. 計測原理

2.1 共鳴ラマン効果

本研究では、物質の吸収波長と入射波長が一致させたときにラマン散乱光が著しく増大する現象である共鳴ラマン効果¹⁾を計測原理とする。原理的にその増強倍率は $10^4 \sim 10^6$ 倍と言われており、発表者らはこれまでに様々な物質の共鳴ラマンスペクトルの励起波長依存性（励起プロファイル）を実測し、ラマン散乱光が $10^3 \sim 10^4$ 倍に増強することを明らかにしてきた^{2,3)}。

2.2 励起波長の検討

本研究では、爆発物の擬剤として、亜硝酸ナトリウム、ペンタエリスリトール、ヘキサメチレンテトラミンを計測対象とする。これらはいずれも白色の粉末である。Fig.1 にこれら 3 種の擬剤の励起プロファイルを示す。これを見ると、励起波長を 266 nm とした場合、亜硝酸ナトリウムでは $1300 \sim 1400 \text{ cm}^{-1}$ に、ペンタエリスリトールとヘキサメチレンテトラミンでは $2800 \sim 3000 \text{ cm}^{-1}$ に顕著なピークが観測されたため、遠隔計測試験では、Nd:YAG レーザの第4高調波を光源として用いることとした。

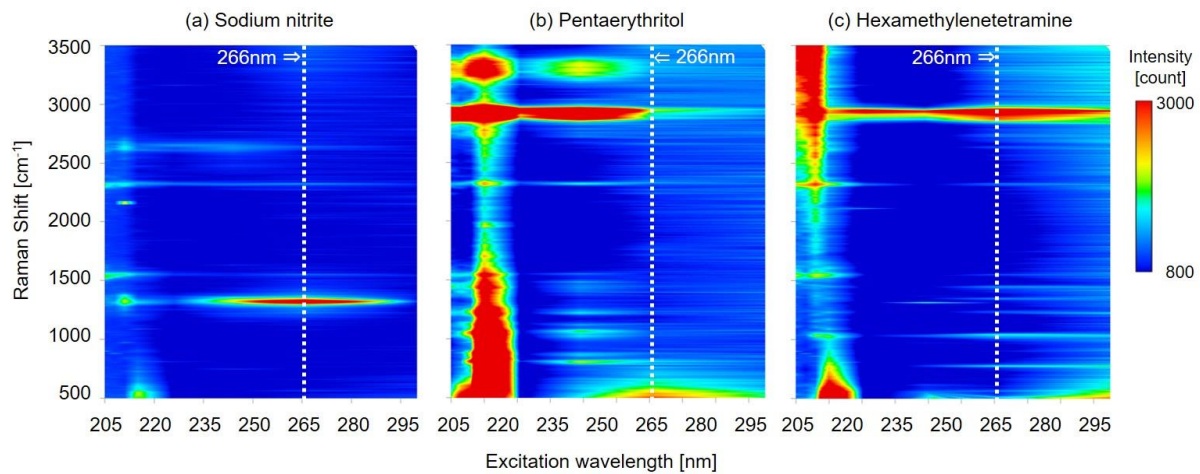


Fig.1 Excitation profiles of explosive simulants.

3. 爆発物擬剤の遠隔計測

3.1 装置構成

光源として、フラッシュランプ励起 Nd:YAG レーザの第 4 高調波 (Quantel 社製, Q-smart 850, 波長 266 nm, PRF 10Hz, パルスエネルギー 8 mJ) を用い, 100 m 先に設置した爆発物擬剤に照射した. Fig.2 に示すように試料は直径 50 mm の石英板 2 枚で挟んで設置した. 爆発物擬剤から発生した共鳴ラマン散乱光を有効開口径 300 mm の望遠鏡により集光し, EM-ICCD カメラ付き分光器 (Princeton Instruments 社製, IsoPlane160, PI- MAX4:1024EMB) によりスペクトルを得た. Fig.3 に共鳴ラマンライダの外観を示す. 望遠鏡は高効率で深紫外光の集光が可能な設計とし, 副鏡の位置を変化させることにより, 焦点距離を 20 m ~ 無限遠に調整することができる⁴⁾.



Fig.2 Installation situation of explosive simulants.



Fig.3 Appearance of resonance Raman lidar.

3.2 爆発物擬剤遠隔計測結果

離隔距離を 100 m として実施した 3 種の爆発物擬剤の遠隔計測結果を Fig.4 に示す. Fig.4 (a)は, 試料の量を 20 mg とした場合のスペクトルであり, 亜硝酸ナトリウムは 1330 cm^{-1} 近傍に顕著なピークが確認された. ペンタエリスリトールとヘキサメチレンテトラミンは 2960 cm^{-1} 近傍に最も大きなピークが確認され, $700\sim 1500\text{ cm}^{-1}$ にも複数のピークが確認された. このように, 3 種の擬剤はそれぞれ共鳴ラマンスペクトルの特徴が異なり, これらのピークの違いにより物質種の識別が可能である. Fig.4 (b)は, ヘキサメチレンテトラミンを計測対象とし, 試料の重量を変化させて計測した共鳴ラマン散乱光強度であり, 最も大きい 2960 cm^{-1} と次に大きい 1050 cm^{-1} のピークについて整理した. 試料の量が 0.5 mg 以下の場合, 石英板上での試

料の分布の不均一さに起因し、光強度がばらつく結果となったが、0.1mg でもノイズに対し十分優位な信号が確認されており、0.05 mg 以上で $S/N > 2$ となる条件で計測可能であることが明らかとなった。

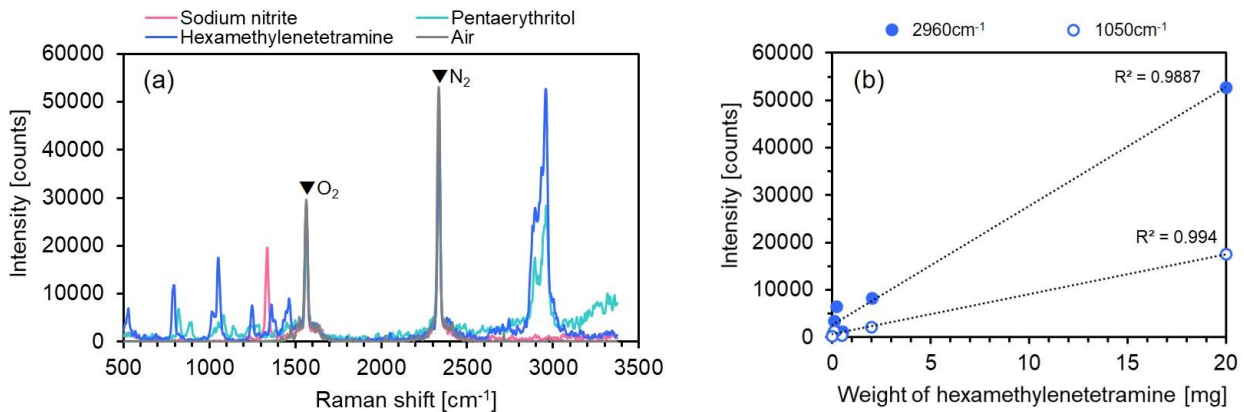


Fig.4 Results of remote measurement of explosive simulants. (a) Resonance Raman spectra with 20 mg of explosive simulants, (b) Weight dependence of resonance Raman scattering light intensity of hexamethylenetetramine.

4. 結論

本研究では、有害物質のうち爆発物に着目し、亜硝酸ナトリウム、ペンタエリスリトール、ヘキサメチレンテトラミンの3種の擬剤を用いて遠隔計測性能の検証を実施した。遠隔計測試験に先立ち、擬剤の励起プロファイルを実測し、遠隔計測に用いる励起波長を266 nmと決定した。試料までの離隔距離を100 mとして爆発物擬剤の遠隔計測を実施した結果、mg オーダ以下の爆発物擬剤の共鳴ラマン散乱光が観測可能であることが分かった。今後は装置の現場適用を目指し、装置の小型・軽量化について検討するとともに、爆発物については、近接での計測ニーズもあることから、物質種の識別性能を高めた近距離型装置についても検討を進めたい。

謝 辞

本研究は、防衛装備庁が実施する安全保障技術研究推進制度 JPJ004596 の支援を受けたものである。

参考文献

- 1) A. Weber: *Raman spectroscopy of gases and liquids* (Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1979) pp.204-252.
- 2) 朝日 一平 他：第36回レーザーセンシングシンポジウム予稿集 B03 (2018) pp.14-15.
- 3) 朝日 一平 他：第37回レーザーセンシングシンポジウム予稿集 P17 (2019) pp.49-50.
- 4) S. Eto et al.: *Applied Spectroscopy* Vol.76 Issue10 (2022) doi: 10.1177/00037028221094632