

高感度爆薬採取・分析システムの研究 —爆薬分析技術に関する大学との共同研究を中心として—

防衛省技術研究本部陸上装備研究所 システム研究部無人車両・施設器材システム研究室

防衛技官 博士（理学） 成瀬 正啓

要旨

国際貢献活動等において、爆発物等による車両被害や人的損傷を防ぐためには、爆発物等を離隔から認識する技術が必要となる。本稿では、防衛省技術研究本部陸上装備研究所で取り組んでいる「高感度爆薬採取・分析システムの研究」^[1] について紹介する。

また、本研究は2つの大学と個別に実施している2つの共同研究を含んでいる。一つは爆薬認識抗体を利用した爆薬認識技術の共同研究、もう一方は抗原抗体反応の検出に関わる分析評価技術の共同研究であり、本稿では研究結果を交えて解説する。

1. はじめに

世界各地において、即製爆発装置（IED：Improvised Explosive Device）が脅威となっている。自衛隊の国際貢献活動の派遣先国等においても、今後、移動時や物資・人員の輸送といった任務等の際に脅威となる可能性がある。防衛省技術研究本部陸上装備研究所では、このIEDによる車両被害や人的損傷を防ぐため、「高感度爆薬採取・分析システムの研究」として、IED表面に付着した微量爆薬を遠隔操縦の無人器材により採取し、その微量爆薬を高感度で分析可能なシステム技術の研究を実施している。

近年、防衛装備技術と民生技術との境界は薄れてきており、相互の技術のスピノフという形で技術のデュアルユース化が進んでいる。防衛省としては、基礎的な研究領域を対象として外部研究機関等と連携し、先進的な研究技術を防衛装備品の要素技術として取り込むことで、新たな概念の優

れた防衛装備品等の創製へ活用できる。本研究において、当研究所では、抗体という生物由来の特異性の高い認識分子を爆薬検知に利用するための爆薬認識技術について、国立大学法人九州大学と共同研究を実施するとともに（平成25年6月19日共同研究協定締結）、抗原抗体反応の表面プラズモン共鳴（SPR：Surface Plasmon Resonance）法による検出における感度と計測誤差の検討のための分析評価技術について、学校法人帝京平成大学と共同研究を実施している（平成26年3月1日共同研究協定締結）。

2. 爆薬採取・分析システムとIED

2.1 IED

IEDとは、その日本語訳である「即製爆発装置」という名が示すように、簡易製造された爆発物の総称であり、正規に工場等で軍用に製造された爆弾と区別される。IED及びその被害の事例を図1に示す。

IEDは砲弾や地雷等を改造したものに限らず、農薬をはじめとする化学薬品から非工業的に合成した



図1 IED及びその被害の事例

爆薬を封入して製作した爆発物、いわゆる手製爆弾を含み、その含有物や形状は多種多様である。また、日用品に偽装されている場合もあるため、外見のみからIEDであることを判別することは非常に困難とされている。ただし、IEDは前述したように手工業的に製作されているため、一般的にIEDの表面には、その製作時に極微量の爆薬が付着することが知られており、その量は指紋1個あたりに1000ng程度である^[6]。従って、この表面付着爆薬を採取・分析することで、発見した不審物がIEDか否かの判断が可能である。しかしながら、IEDは携帯電話等により、人もしくは車両の接近に合わせて遠隔起爆される場合が多いため、人が近づいて調査を実施することは大きな危険を伴うとともに、数ng程度の爆薬を検出することも技術的に容易ではない。

2.2 高感度爆薬採取・分析システム

高感度爆薬採取・分析システムの概要を図2に示す。

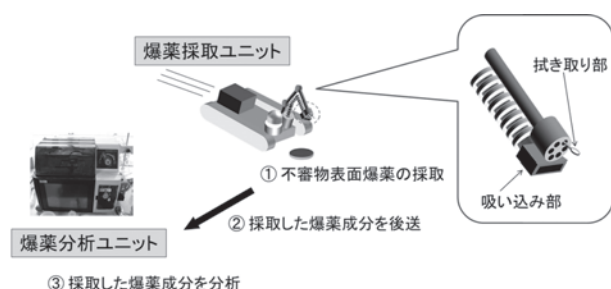


図2 高感度爆薬採取・分析システムの概要

本システムは小型無人車両に搭載された爆薬採取ユニットと爆薬分析ユニットから成る。前述のように、IED表面には極微量の爆薬が付着しており、爆薬採取ユニットにより遠隔操縦で対象物体の表面物質を採取し、持ち帰った表面物質を爆薬分析ユニットにより分析することで対象物体がIEDかどうかの判定をする。

爆薬採取ユニットは、有線または無線で遠隔操縦が可能であり、主に目視範囲で走行と採取を行う。当該ユニット先端の採取部については、拭き取りによる採取と吸い込みによる採取の2方式が選択可能であり、露出した不審物等に対しては拭き取り方式を、埋没した不審物等に対しては吸い込み方式を使用することで効果的な採取を目指す。

爆薬分析ユニットは、抗原抗体反応を利用した分析器であり、抗体の持つ抗原特異的な結合性を生か

して、爆薬認識抗体による爆薬に対する高い識別性を、またSPR法によって高い検出感度を目指す。次項にて、爆薬採取ユニットに係る爆薬採取技術と、爆薬分析ユニットに係る爆薬分析技術それぞれの研究の概要を述べる。

3. 研究概要

3.1 爆薬採取技術

爆薬採取技術については、爆薬採取ユニットによる採取作業の操用性向上を目的として研究を実施している。近年の産業用ロボットの発展を考えると、無人器材のアームによって対象物体表面を拭き取るまたは吸い込むといった作業は一見簡単のように思えるが、IEDの可能性のある不審物はその形状・寸法が多様であり、爆薬採取ユニットからの相対位置も状況により異なるため、遠隔操縦による採取には困難が伴う。従って、対象物を認識し、操縦者の入力によって自動的に採取作業を行う機構について研究を実施している。検討中の爆薬採取方法の概要を図3に示す。

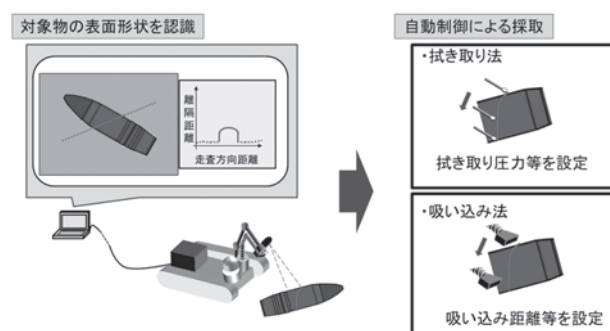


図3 爆薬採取方法

爆薬採取ユニットはそのアームに測距センサを有し、それによって爆薬採取ユニットの先端近傍の表面（地表面及び対象物体表面を含む）までの距離を測定する。その距離データを用いて対象物に該当する範囲を操縦者が設定することで、アーム先端を自律的に走査させることが可能となる。なお、その際に、拭き取り方式ならば押しつけ圧力等を、吸い込み方式ならば対象表面からの離隔距離等を対象物体の材質や形状に合わせて設定する必要があると考えている。

3.2 爆薬分析技術

爆薬分析技術に関しては、質量分析の一種であるイオンモビリティ法や化学的な呈色反応を利用した

爆薬検知器材が製品化されており、米軍等では使用の簡便性から呈色反応を利用したものが採用されている。しかしながら、本研究では不審物表面から採取した爆薬と不純物の微粒子の混合物を対象とすることから、特異性の高い抗原抗体反応を利用するとともに、またSPR法によって高感度な分析を目指している。爆薬分析技術の研究の概要を図4に示し、以下、抗体を用いた爆薬認識及びSPR法による抗原抗体反応の検出についてそれぞれ述べる。

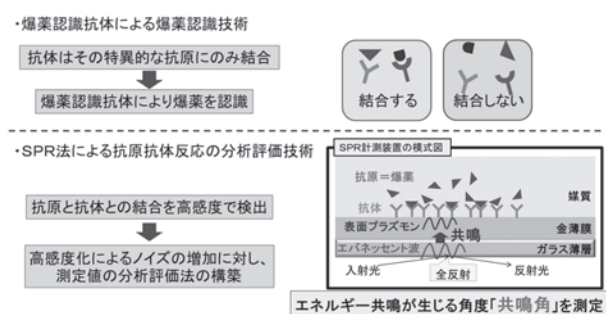


図4 爆薬分析技術の研究概要

抗体は本来生体の免疫防御、特に獲得免疫の根幹を成すものであり、各抗体産生細胞のクローン集団によって作られた抗体はその特異的な抗原のみに結合する。例えば、麻疹の予防接種等によって麻疹に対する免疫を獲得した人の免疫系は、麻疹ウイルスの侵入に迅速に反応して、麻疹ウイルスにのみ特異的に結合する抗体を産生することが可能である。従来より生命医学の研究においてはこの抗体の特異的な結合性を利用し、マウス等に人為的に目的物質を投与することでその目的物質に対する抗体を作成し、目的物質の標識や微量検出といった用途に使用してきた。本研究においても、爆薬に対する抗体を使用することで、不審物表面から採取した微粒子の混合物から特異的に対象爆薬を検出可能とする。

次に、SPR法による抗原抗体反応の検出装置の構成は、図4に示されるように、媒質、金薄膜、ガラス薄層及び光学計測部からなる。SPRによる抗原抗体反応の検出は、金薄膜表面のプラズモンという自由電子の波数が、金薄膜表面上の媒質中における抗原抗体の結合によって変化することを利用している。金薄膜に接したガラス薄層には、光学計測部よりレーザー光が入射しており、その入射角度は可変である。また、光学計測部では同時に反射光のエネルギーを測定している。光の全反射の際には、エバネッセント場という電磁波の浸透が起こり、この波

数は入射角に依存するが、このエバネッセント場の波数と表面プラズモンの波数が一致したときに、共鳴によってエネルギーがエバネッセント場から表面プラズモンへ移行する。従って、入射角度を走査しながら反射光のエネルギーを計測することにより、エネルギー共鳴の起こる入射角（共鳴角）が測定可能であり、抗原抗体反応によるプラズモンの波数の変化を共鳴角の変化として測定できる。

本研究では、爆薬認識抗体による高い特異性、またSPR法による高い検出感度を利用し、後述するように現在までのところ既存の検知系に対して数千倍程度の感度での爆薬検出が可能であることを確認している。また、爆薬認識抗体による爆薬認識技術については九州大学と、SPR法による抗原抗体反応の分析評価技術については帝京平成大学と、それぞれ共同研究を実施しており、次項にて詳細を記述する。

4. 共同研究の取り組み

4.1 共同研究の概要

共同研究の概要を図5に示す。

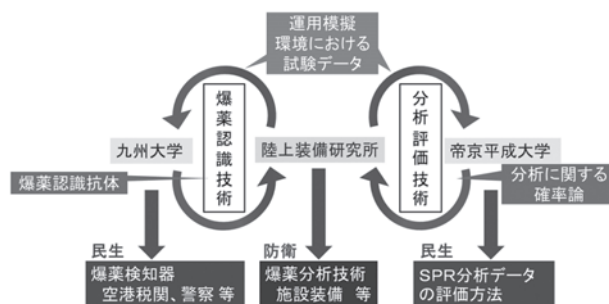


図5 共同研究の概要

2つの共同研究は独立したものである。まず、九州大学との共同研究は、爆薬認識技術について、同大学の有する爆薬認識抗体に関する技術と、当方の有する運用模擬環境における試験データを交換する枠組みである。次に、帝京平成大学との共同研究は、SPR法による抗原抗体反応の分析評価技術について、同大学の有する分析に関する確率理論と、当方の有する運用模擬環境における試験データを交換する枠組みである。

九州大学との共同研究からは、爆薬検知器等の民生及び防衛装備のデュアルユース技術としてアウトプットが期待され、帝京平成大学との共同研究からは、SPR法による抗原抗体反応に係る、新規の分析

評価方法が確立されることが期待される。

4.2 九州大学との共同研究

九州大学との共同研究の概要を図6に示す。

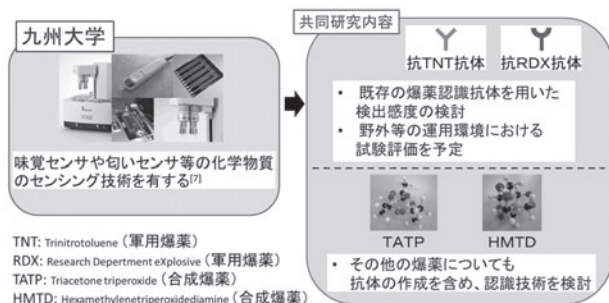


図6 九州大学との共同研究の概要

爆薬認識技術については、九州大学の有する、味覚センサや匂いセンサ等の化学物質のセンシング技術^[8]をベースとし、トリニトロトルエン（TNT：Trinitrotoluene）並びにシクロトリメチレンニトロアミン（RDX：Research Department eXplosive）に対する抗体を使用して、その検出感度の検討を実施している。また、TNTやRDXといった軍用に製造された爆弾に使用される爆薬だけではなく、非工業的に合成してIEDに使用される爆薬として、トリアセトンペルオキシド（TATP：Triacetone triperoxide）やヘキサメチレントリペルオキシジジアミン（HMTD：Hexamethylenetriperoxidodiamine）^[6]についての抗体作成の検討も実施している。

図7にこれまでの研究結果の一例を示す。

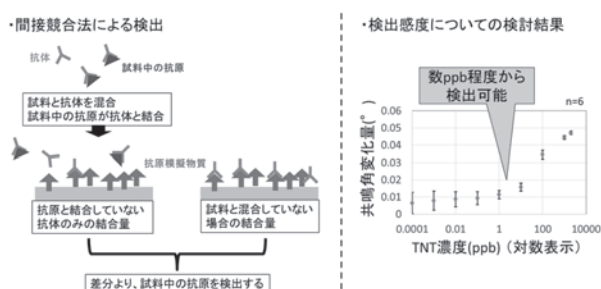


図7 爆薬認識技術についての共同研究成果の一例

ここでは、検出対象爆薬をTNTとして、間接競合法による検出感度を検討した結果を示す。間接競合法とは、図7左に示すように、TNT模擬物質を金薄膜上に固定し、検出対象試料を先に既知濃度の抗TNT抗体と混合した場合の抗体の金薄膜への結合量を、検出対象試料と混合しない場合の抗体の結合量と比較し、その減少量により検出対象試料中の

TNTを検出するものである。

その結果を図7右のグラフに示す。ここで、横軸は検出対象試料中のTNT濃度を表しており、単位はppb (parts per billion) は、重量比で10億分の1含まれていることを示している。縦軸は、検出対象試料と混合しない場合と、横軸に示すTNT濃度の検出対象試料を混合した場合の金薄膜への結合量の差分を、共鳴角変化量として表している。図より、共鳴角変化量はTNT濃度1～10ppb以上で明確な増加が認められる。従って、本検出系は数ppb程度（25mプールに小さじ1杯程度）の検出感度を有していると考えられる。

一方で、呈色反応を利用した既存の検知器については、同様の調査をした結果は、10ppm (parts per million) 程度（1ppm=1000ppb、10ppmはドラム缶に小さじ1杯程度）が検出の限界であり、本研究の検知系は、既存の検知系に対して数千倍程度の感度を有していることが推測される。

4.3 帝京平成大学との共同研究

帝京平成大学との共同研究の概要を図8に示す。

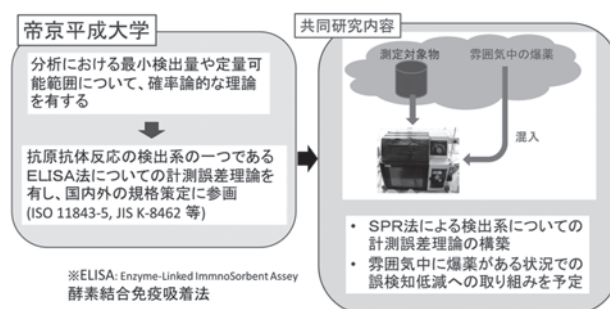


図8 帝京平成大学との共同研究の概要

SPR法による抗原抗体反応の分析評価技術については、帝京平成大学の有する、最小検出量や定量可能範囲についての確率論的な理論をベースとし、SPR法とは異なる抗原抗体反応の検出系である酵素結合免疫吸着法（ELISA：Enzyme-Linked ImmnoSorbent Assay）についての既存の計測誤差理論^[9]を参考に、SPR法による抗原抗体反応の検出系についての計測誤差理論の構築を検討している。また、高感度爆薬採取・分析システムの運用環境は、雰囲気中に爆薬が存在する可能性もあるため、そういったセンサにとって外乱となる状況での誤検出低減に関する取り組みも計画している。

図9にこれまでの研究成果の一例を示す。

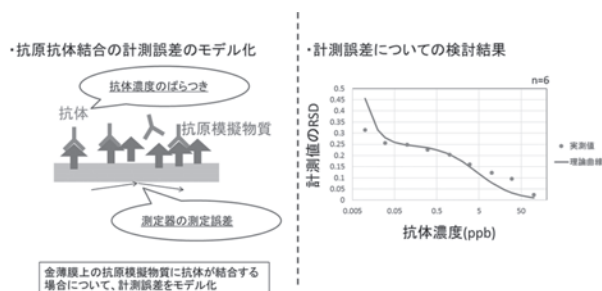


図9 分析評価技術についての共同研究成果の一例

ここでは、前項と同じくTNTの検出系について結果を紹介するが、間接競合法ではなく、図9左に示すように、金薄膜上の抗原模擬物質に抗体が結合するという単純な場合について述べる。図9右がその結果を示したものであり、横軸はセンサに流入させたppb単位の抗体濃度であり、縦軸は計測結果のばらつきの指標として、共鳴角変化量の相対標準偏差（RSD：Relative Standard Deviation）を表している。青点は各濃度6回ずつの実験を実施して得られたRSDの値であり、赤線は金薄膜上の抗原模擬物質に抗体が結合する系について計測誤差モデルを構築して求めた理論曲線を示している。なお、計測誤差モデルは、抗原抗体反応に対する共鳴角の検量線、センサに流入する抗体濃度のばらつき、及びSPR計測装置の内在的なばらつきを考慮して構築した。

結果より、実測値と理論曲線は概ね一致しており、構築した計測誤差理論が実際の誤差現象を比較的精度よく表しうることが示唆された。今後は、理論の更なる精度向上を図るとともに、間接競合法等の複雑な検出系における計測誤差理論の構築について検討する予定である。

5. おわりに

高感度爆薬採取・分析システムの研究は、2つの共同研究を通じて、高感度の爆薬検出と、SPR法による抗原抗体反応の計測誤差理論の構築に関して、成果を得つつある。本研究のような共同研究を通じて、民生と防衛に応用可能なデュアルユース技術の研究が今後益々活性化することを期待したい。

参考文献

- [1] 成瀬正啓、岸田浩司、勝山好嗣、森下政浩：“爆発物識別システムの研究（抗原抗体反応による爆薬検出技術の検討）”、防衛省技術研究本部技報第7156号、2014
- [2] http://www.army.mil/article/92419/Afghan_soldiers_take_lead_in_IED_defeat/
- [3] http://www.army.mil/article/134389/82nd_Airborne_Division_s_fall_JOAX_includes_counter_IED_scenarios/
- [4] <http://www.army.mil/article/16536/army-creates-electronic-warfare-career-field/>
- [5] <http://www.army.mil/article/26877/>
- [6] 爆発物探知ハンドブック 1章爆発物について、火薬学会編、pp. 2-23、2010
- [7] <http://ultrabio.ed.kyushu-u.ac.jp/>
- [8] Onodera T., Mizuta Y., Horikawa K., Singh P., Matsumoto K., Miura N., and Toko K.：“Displacement Immunosensor Based on Surface Plasmon Resonance for Rapid and Highly Sensitive Detection of 2,4,6-Trinitrotoluene”, Sensors and Materials, Vol. 23, No. 1, pp. 39-52, 2011
- [9] Hayashi Y., Matsuda R., Maitani T., Imai K., Nishimura W., Ito K., Maeda M.：“Precision, limit of detection and range of quantitation in competitive ELIZA”, Analytical Chemistry, Vol. 46, pp. 1295-1301, 2004