

中赤外電子波長可変レーザーによる遠隔検知

実施予定期間：平成 22 年度～平成 26 年度

研究代表者：和田 智之（独立行政法人理化学研究所光量子制御技術開発チーム）

I. 概要

本課題では、中赤外線領域においてコンピューターによる広帯域で電子波長制御可能な世界初の波長可変レーザーを構築し、このレーザーを利用した遠隔検知システムを開発する。コンピューターに予め、化学剤の特徴的スペクトルをプログラムし、この特徴的な波長及び差分を取得するための僅かにずれた波長を高速かつ選択的にプログラマブルに掃引することにより、短時間での複数の化学剤の検知を可能とする。さらに、高速連続波長掃引により、予期しない吸収をもった物質の存在の検知も可能とする。

1. 目標

犯罪やテロ等、あるいは事故で発生する微量な化学物質を遠隔に検知する技術は、国民の安全・安心を確保するために重要な技術開発である。本研究課題では、理化学研究所が世界に先駆け開発した電氣的に光の波長を高速かつプログラムによって可変できる技術の中赤外線領域に拡張し、これをプローブとして対象となる領域に照射し、得られる散乱強度の変化から特殊ガスの存在を検知する遠隔検知システムを構築する。

本研究課題では、神経ガス（タブン、サリン、ソマン、VX ガス）、びらん剤（マスタードガス、ルイサイト）、血液剤（青酸ガス、シアン化塩素）、窒息剤（塩素ガス、ホスゲン）等のテーマ 7 に指定されている全ての化学剤を検出対象とし、これらの吸収バンドが集中する 6-10 μm で高速に波長同調の可能な可変波長レーザーを光源とした自

動車搭載可能な遠隔検知システムを実現することを目標とする。波長の切り換え間隔は、連続掃引、ランダム波長切り換え動作において 1 ms とし、リアルタイムの濃度変化測定を実現する。検出限界としては、致死量の 1/100 を目標値とする。この目的を達成するために、波長同調範囲で最大 10 mJ/pulse のレーザー出力を達成する。技術開発期間においては、1.5 \times 3 m² の光学定盤上で開発を行う。最終的に、レーザー装置を 1 \times 1 m²、重量は 100 kg 以下のシステムとして実現するための基盤技術を確立する。

2. 技術的内容

〈化学剤遠隔検知の方法〉

レーザーを用いたリモートセンシングにはさまざまな方法があるが、その中でも、中赤外波長領域の吸収を利用し、高感度で大気中のガスの検知が可能な方法として、差分吸収ライダー（differential-absorption lidar: DIAL）をあげることができる。DIAL は、レーザーを用いて、測定対象となる物質に、その吸収線に共鳴、非共鳴の 2 つの波長を照射し、共鳴、非共鳴間で生じるリターン光強度の違い（これは吸収断面積の違い、すなわち吸光度の違いに起因する）から、その物質の存在の有無と大気中濃度を決定する方法である。先の化学剤は中赤外線領域に特徴的な吸収スペクトルを有するために中赤外レーザーによる DIAL 法を利用することで、遠隔検知システムの実現が可能と考えられる。ここで、本課題での対象物質を検出できる遠隔検知システムの実現を目指すため、出力波長領域、必要エネルギーとレーザーのスペクトル幅、リアルタイム測定の必要性の面を総合すると、表 1 に示した性能を有するレーザー光源の開発が必要である。波長同調領域で、最大 1 パルス当たり 10 mJ のエネルギーを出力できることが望ましい。

表 1. レーザーに必要とされる性能（*出力は利得の中心とする。）

出力項目	性能
可変波長領域	6 - 10 μm (分子の指紋領域の一部)
出力パワー(1パルス当たりのエネルギー)*	10 mJ/pulse
動作	パルス動作
パルス幅	< 20 ns
スペクトル線幅(吸収スペクトルの分解能に相当)	0.1 ~ 4 cm^{-1}
連続的あるいはランダム波長切り換え間隔	< 1 ms

〈中赤外電子波長可変レーザーのデザイン〉

6~10 μm の広帯域にわたる波長同調を実現するためには、非線形周波数変換法を導入する必要がある。非線形周波数変換には和周波発生、差周波発生、光パラメトリック発振などの方法があるが、中赤外領域で 10 mJ クラスの出力エネルギーを得るためには、励起光源として利用できるレーザーの発振波長領域、エネルギー変換効率を考慮して、光パラメトリック発振を選択するのが適切である。本課題では図 1 のようなレーザー装置デザインを提案する。

レーザーを発振器として Cr:ZnSe レーザーを導入する。Cr:ZnSe レーザーは 2.0~2.7 μm の中赤外光を発振させる

ことができる。この発振波長領域を利用して、非線形光学結晶 ZnGeP₂ を用いて光パラメトリック発振（Optical Parametric Oscillation; OPO）を行えば、位相整合角 $\theta = 50.5^\circ$ で 6~10 μm の中赤外光を得ることが可能である。図 1 のように、まず、1 パルスエネルギーが 5 mJ の Tm 系レーザーを用いて Cr:ZnSe レーザー発振器および Cr:ZnSe 初段増幅器を励起する。経験的に発振器で 0.5 mJ、初段増幅器で 1 mJ まで増幅が可能である。パルス幅は 15 ns である。次に、Cr:ZnSe 多段増幅器系を構築して 50 mJ を超えるレベルまでエネルギーを増幅する。その後、光パラメトリック発振器系で 20% のエネルギー変換効率が得られ

れば、DIAL に必要とされる 10 mJ レベルの中赤外光の出力エネルギーを得ることが可能である。光パラメトリック発振において 20% のエネルギー変換効率を得ることは、既知の実験報告から十分に実現可能な見積もりだと言える。Cr:ZnSe レーザー発振器に我々が独自に研究を進めてきたレーザーの電子波長制御技術を導入すれば、レーザー装置系を全く手動調整することなく 6~10 μm 領域の領域の任意の波長を連続的あるいはランダムに出力することができる。電子波長制御技術を DIAL に用いれば、DIAL に必要

な共鳴・非共鳴な波長を 1 レーザーシステムで切り換えながら出力できるだけでなく、共鳴・非共鳴の組み合わせを 6~10 μm の領域で自由に切り換えることが可能となる。共鳴・非共鳴の組み合わせを変更しながらの測定は、物質の指紋スペクトルを測定することに相当するため、したがって、大気中に停滞、浮遊する物質の同定までもが可能な DIAL を実現できると考えている。レーザー装置は $1 \times 1 \text{ m}^2$ の大きさになるように小型化することが可能であると見積もっている。以下、パートごとに説明する。

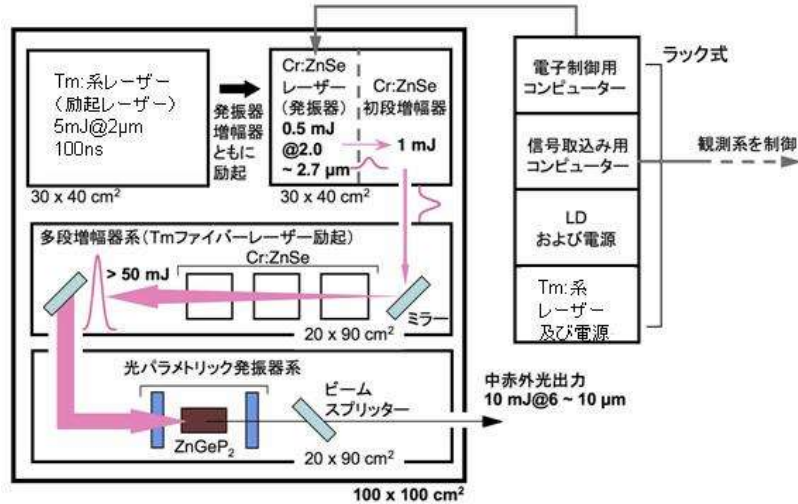


図 1. レーザー装置模式図

〈Tm 系レーザー〉

Tm 系レーザーを Cr:ZnSe レーザーの励起光源として用いる。Tm 系レーザーの発振波長である 2 μm 近傍は Cr:ZnSe レーザーの吸収スペクトル内に含まれる波長帯であり、効率のよい励起が可能である。Tm 系レーザーの励起光源として半導体レーザー (LD) を励起光源として用いる。このため、LD を搭載可能な Tm レーザー発振器用の励起モジュールおよび発振器用の LD 電源を用いて Tm レーザー発振器を開発する。音響光学 Q スイッチを共振器内部に設置し、Q スイッチパルス発振動作させると、パルス幅 100 ns、2 μm で 1 パルスあたり 5 mJ を超える出力エネルギーが得られると見積もることができる。

〈電子波長可変 Cr:ZnSe レーザー発振器・初段増幅器〉

図 2 に電子波長可変 Cr:ZnSe レーザー発振器および初段増幅器系を示す。Tm 系レーザービームを $\lambda/2$ 板、グランレーザープリズムを使いながら、発振器、初段増幅器に分配してそれぞれを励起する。

発振器の Cr:ZnSe 結晶はブリュースター角に設置し、その表面ダメージを避けながら、できる限り強励起するために両端面励起にする。その結晶の左側にテレスコープを設置してビームを拡大し、音響光学可変波長フィルター (AOTF) に入射する。AOTF は二酸化テルルにニオブ酸リチウム製のトランスデューサーを装着した系を有する。トランスデューサーに電子制御および信号取込み用コンピ

ューターから高周波 (RF) を印加すると、それがトランスデューサーによって音響波に変換され、二酸化テルル内に入射される。音響波は RF に相当する疎密波を二酸化テルル内で発生させ、これが Cr:ZnSe から発生する光に対して回折格子として作用する。すなわち、1 つの RF を印加すると、Cr:ZnSe から放射された蛍光スペクトル内の 1 光波が回折し、レーザー発振器内で帰還増幅され発振する。RF を変化させると、帰還増幅される光の周波数がシフトする。したがって、電子制御および信号取込み用コンピューターによって RF を高速に連続的あるいはランダムに変化させれば、それに対応して発振する波長を連続的な掃引あるいはランダムに切り換えることが可能となる。AOTF の左に設置したプリズムは固定したままでよい。これは波長を切り換えるためのものではない。AOTF で光波を回折する場合、波長に依存して非常にわずかながら回折角がずれる。すなわち、このプリズムは、Cr:ZnSe の利得領域のすべての波長が帰還増幅されるように回折時における回折角のわずかなずれを補正するためのものである。また、発振器の共振器内に音響光学 Q スイッチを設置し、パルス発振動作を得る。パルス幅が 15 ns 程度で 1 パルスあたり 0.4~0.5 mJ の出力エネルギーが得られると予測している。初段増幅器によって出力光を 1 mJ 以上に増幅する。初段増幅器の Cr:ZnSe 結晶は必要に応じて、片端面励起あるいは両端面励起に系をアレンジする。

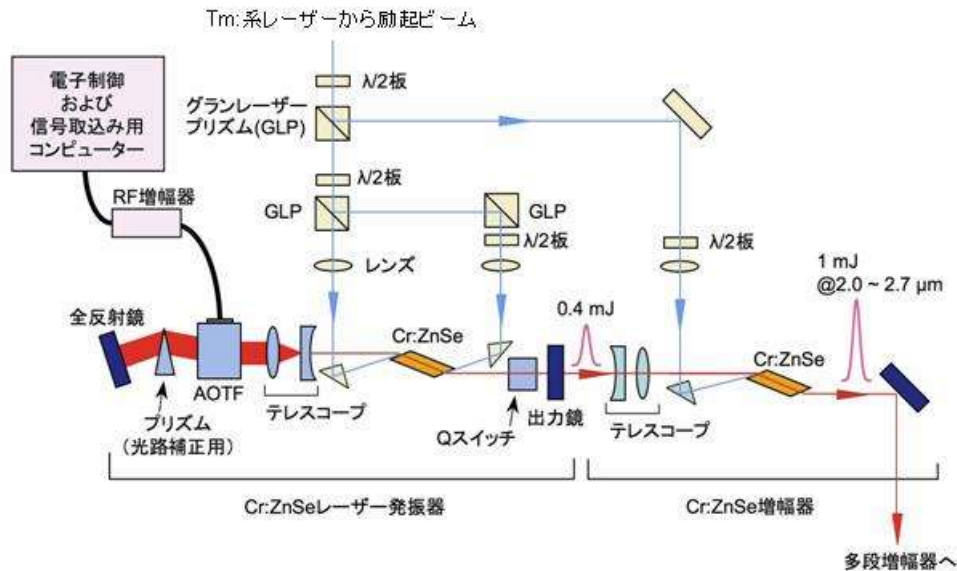


図2. 電子波長可変 Cr:ZnSe レーザー発振器・初段増幅器

〈多段増幅器系〉

Cr:ZnSeを媒質として用いた固体増幅器をタンデムに並べた多段増幅系を構築する。Cr:ZnSeを励起する光源として、発振線が $2\mu\text{m}$ のTm系レーザーを用いる。Cr:ZnSe増幅器は、容易に2倍を超える増幅率を実現することが可能であることが知られている。Cr:ZnSe初段増幅器で 1mJ 得られるとすると、6段増幅を行えば、少なくとも $1\text{mJ} \times 2^6 = 64\text{mJ}$ となり、図1に示した目標値の 50mJ を超えるエネルギーが得られる。1増幅器につき2パス増幅すれば3器の増幅器で目標値が得られる。

〈光パラメトリック発振器系〉

光パラメトリック発振器 (OPO) 技術を導入する。 $2\mu\text{m}$ 帯のCr:ZnSeレーザーを用いたOPOにおいて $6\sim 10\mu\text{m}$ 帯を出力できる有効な非線形光学結晶として ZnGeP_2 を用いる。構成は図1のような簡単な系によって実現できる。2枚のさまざまな曲率半径を有するミラーを用いてOPO共振器を構成し、その内部の光束伝搬特性をシミュレーションで解析する。Cr:ZnSe増幅器からの入射する励起レーザービームに一致させ、励起条件の最適化をはかり高効率変換を目指す。一般的に考えても $20\sim 30\%$ の効率が得られ

ると予測している。この効率から、 $64\text{mJ} \times 0.2\sim 0.3 = 12.8\sim 19.2\text{mJ}$ の中赤外光エネルギーが得られると見積もることができる。

〈観測システムの開発〉

観測システムは、図3の系を想定している。主鏡の直径が 50cm のカセグレン望遠鏡を用いて対象物質からの後方散乱光を受光する。受光系の光学素子を $6\sim 10\mu\text{m}$ に対して最適化し、通過損失を最小限にし、検出用望遠鏡の受信効率 K を最大にする。トリガージェネレーター用のQスイッチ (すなわち発振時刻の決定: 実際にはTm系レーザー用のQスイッチの制御も行う)、電子制御用コンピューター、データ集録用コンピューター、ボックスカー積分器を制御する。電子制御用コンピューターは中赤外電子制御可変レーザーのAOTFに印加するRFを制御、すなわち発振波長の波長同調および切り換えタイミングを制御する。データ集録用コンピューターによって部分反射ミラーからの出力および水銀カドミウムテルル検出器からの後方散乱シグナルを取り込み集録、解析を行う。

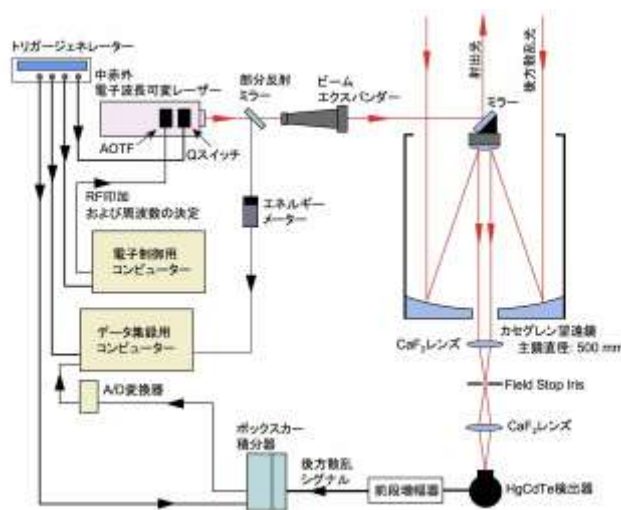


図3. 遠隔検知システム

実証期間

〈実験室における吸収スペクトル測定実験〉

神経ガスの分光データや検知試験には、それらと同様に P=0 結合、P-0-C 結合、および P-C 結合の存在する Dimethyl methylphosphonate (DMMP)、あるいは P=0 結合を有するメチルホスホン酸ジエチル (Diethyl methylphosphonate; DEMP) が模擬物質として利用できる。実験室において、DMMP を用いて、濃度に依存した吸収スペクトルの測定実験を行う。既知の分光データとして、スペクトル線幅が $1\sim 4\text{ cm}^{-1}$ レベルの FTIR を用いてサリン等の神経ガスの吸収スペクトルが測定された例があるが、これらのスペクトルは、致死濃度よりも数桁高い濃度のサンプルで測定されたものである。遠隔検知システムを致死量の 1/100 以下のレベルで検出するためには、測定標準となる吸収スペクトルが是非とも必要である。このスペクトルの測定を FTIR および本課題で開発する中赤外電子波長可変レーザーを用いて行い、検出濃度限界の見極めを行う。

〈レーザースペクトル線幅など出力特性の最適化〉

また、対象物質の濃度が低下したとき、検出効率を増大させるためには、レーザーの波長を、物質の振動あるいは回転準位によって得られる吸収スペクトルの中心に合わせてかつレーザーのスペクトル線幅を狭帯幅化することが必要とされる。一般に大気中で ppb 濃度レベルの CO、NO₂、SO₂、HCl、CH₄ などを観測する時には、スペクトル線幅が 0.1 cm^{-1} レベルのレーザーが使用されている。スペクトルの狭帯幅化が必要な場合は、OPO 共振器内に回折格子およびエタロンを設置するなどの措置を行う。

〈レーザー光源と観測システムの融合・実験室試験〉

対象物質の分光スペクトルおよび中赤外電子波長可変レーザーのスペクトル線幅の最適化が完了した後、レーザー (図 1) と観測システム (図 3) を融合させ、動作試験

を行う。毒性の強い化学物質が測定対象であり、理研所内における使用と入手が困難であり、ハンドリングには極めて高い専門性が必要とされることを考慮し、防衛省技術研究本部先進技術推進センター研究管理官 (ヒューマンエン지니어リング技術担当) 付 NBC 検知技術推進室の協力、アドバイスを得ながらシステムの性能の向上を図る。

〈レーザーシステムの改良・安定化〉

中赤外電子波長可変レーザーを実験室仕様から $1 \times 1\text{ m}^2$ への小型化とフィールド観測に耐えうるよう各マウント類の安定化を行う。

3. 技術開発期間終了時の目標

中赤外線電子波長制御固体レーザー

波長：6~10 μm (音響光学波長可変フィルターによる電子制御波長可変)

パルスエネルギー：10mJ (利得中心)

スペクトル幅：0.1~4 cm^{-1}

波長切り替え速度：1ms

光検知システム

カセグレン望遠鏡：50cm

波長検出範囲：6~10 μm

ディテクター：HgCdTe

検出感度：0.002ppm (サリンガス仮定)

4. 実証期間終了時の目標

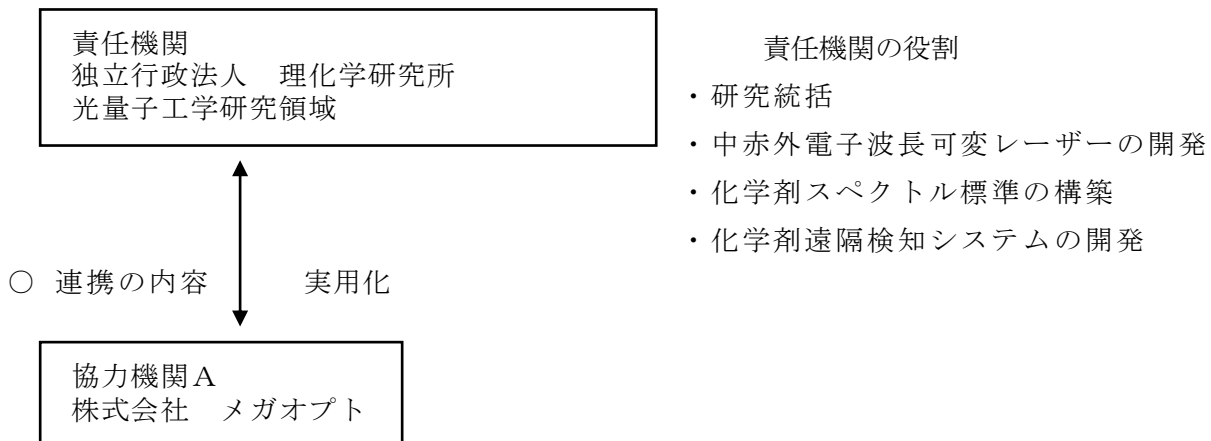
上記システム性能に加え、

サイズ：1 \times 1 m^2 (望遠鏡等の検出系は含まず、レーザーシステムのみサイズ)

重量：100 kg

自動車搭載の達成

5. 実施体制



6. 各年度の計画と実績

a. 平成 22 年度 (技術開発期間 1 年目)

・ 計画

中赤外電子波長制御レーザーの核となる電子波長可変 Cr:ZnSe レーザー発振器およびその初段増幅器の開発を行う。上記〈電子波長可変 Cr:ZnSe レーザー発振器・初段増幅器〉に相当する。発振器では、発振波長領域 2.0 ~ 2.7 μm のうちの 0.3 μm の幅において、パルス幅が 15 ns 程度で 1 パルス当たり 0.4 ~ 0.5 mJ の出力エネルギーを得ることが最終目標であり、第 1 年度は、発振を確認することを目標とする。

・ 実績

電子波長可変 Cr:ZnSe レーザーの励起光源となる Tm 系レーザーの開発及び Cr:ZnSe レーザーの発振実証を目標に研究を行った。Tm 系レーザーは 30mJ 以上のパルスエネルギーを得ることに成功し、Cr:ZnSe レーザーの励起光源として利用することが可能なレーザー発振器として構築した。この Tm 系レーザーを励起光源として Cr:ZnSe レーザーの発振実験を行った。Tm 系レーザーのパルスエネルギーが 2.3 mJ の時に 0.7 mJ のパルスエネルギーが得られることを実証した。また 2.25~3.04 μm (幅 0.79 μm) の可変波長領域を得ることに成功した。以上により、当初計画

通りに進捗したことはもとより、目標値以上の実績を達成した。

b. 平成 23 年度（技術開発期間 2 年目）

・計画

Cr:ZnSe レーザーの増幅システムを開発し、波長発振波長領域 2.0~2.7 μm で、パルス幅が 15 ns 程度で 1 パルス当たり 50mJ の出力エネルギーを得ることを目標とする。差分吸収ライダーのための観測システムの開発を行う。

・実績

中赤外線電子波長可変固体レーザーの開発に関しては、電子波長可変 Cr:ZnSe レーザーの後段にあたる Cr:ZnSe 増幅システムの開発を行った。130 mJ 級の Tm:YAG レーザーを励起光源とした Cr:ZnSe 多段増幅システムを考案し、50.4 mJ の出力エネルギーを得ることに成功した。光検知システムの開発に関しては、受光系の光学素子を 6~10 μm に対して最適化した主鏡の直径が 50 cm のカセグレン望遠鏡の開発に設計から取り組み、赤外光検出器と融合させて光検知システムとして完成させた。以上により、計画通りの目標を達成した。

c. 平成 24 年度（技術開発期間 3 年目）

・計画

中赤外線電子波長制御レーザーのための光パラメトリック発振器系の開発、および観測システムを統合し、化学剤遠隔検知システムを構築する。また、DMMP や DEM 等の神経物質の疑似物質を用いた、実験室レベルでの性能評価を実施する。

・実績

中赤外線電子波長制御固体レーザーおよび光検知システムに関して、ミッションステートメントに掲げた性能目標をすべて実現することに成功した。中赤外線電子波長制御固体レーザーに関しては、波長 5.0~10.4 μm 、利得中心におけるパルスエネルギー 10.1 mJ、スペクトル幅 2.5 cm^{-1} 、波長切り換え速度 1 ms を実現した。光検知システムに関しては、HgCdTe デテクターを搭載した主鏡 50 cm のカセグレン望遠鏡を完成させた他、受光光学系および濃度に対して、実際のスケールを縮小した光検出系を実験室内で構成し、擬剤としてアセトンを用いて、濃度 0.002 ppm の散乱分光スペクトルの検出を実現した。

d. 平成 25 年度（実証期間 1 年目）

・計画

レーザーの小型化を行って実用化試作機を構築し、一般

的なレーザーの性能に加え、様々な環境下でのガス検知特性などの性能評価を行い、明らかになった諸問題に対する改良版を製作する。

この評価結果に基づきデータ校正手法を開発確立する。

また、化学剤の迅速な同定と濃度計測のための観測アルゴリズムを開発し、データ収集システムと統合する。

更に、化学剤の同定に必須の吸収スペクトル情報を収集し、化学剤データベースを構築する。

・実績

実証期間の 1 年目として、中赤外電子波長可変レーザーと光検知システムを組み合わせた実用化試作機の初号機を完成させた。技術開発期間終了時の目標性能を有し、寸法が 1m \times 1m \times 1m で、固定治具の使用により自動車搭載が可能な状態に仕上げた。キャスターが装着されており、平坦な場所における移動を容易にした。屋外への持ち出し、自動車への搭載、移動を経た後も自動計測が実現することを確認した。また、開発者以外のオペレーターでも擬剤、実剤を検出できることを確認した。現在のシステムの重量は 250 kg であるが、電源類の軽量化および軽量の部品の使用により、平成 26 年度に更なる軽量化を目指す。並行して、経済産業省から Organization for the Prohibition of Chemical Weapons の化学剤の IR データを入手し、このデータが、擬剤、実剤の計測とそのスペクトルを見極めるために有効であることを確認した。

e. 平成 26 年度（実証期間 2 年目）

・計画

実用化試作機の実証性能評価を行った上で、フィールドでの試験を行う。ユーザーから実践に近い環境下における観測の利便性の向上のためにコメントを頂き、平成 25 年度に構築した実用化試作機に出来る限り反映させる。更に、サイズ(1 \times 1m²)と重量(100kg)に対しての評価も行い、自動車への搭載に向けて最終的な調整を行う。

このフィールド試験の結果に基づきデータ校正手法を改良する。

また、実証期間 1 年目から継続する観測アルゴリズムの開発を完了させる。

検出システム、解析システムに上述のデータ校正手法、観測アルゴリズムを組み込み、レーザー制御部との統合を行って統合システムを完成させる。また、ユーザーインターフェースを可視化し操作性の向上を図る。

更に、化学剤データベースの構築を完了する。

7. 年次計画

取組内容	1年度目	2年度目	3年度目	4年度目	5年度目
中赤外電子波長可変固体レーザーの開発	2μm 波長可変レーザーの開発 ←→ 発振実証	2μm 波長可変レーザー増幅器の開発 ←→ パルスエネルギー50mJ 達成	6-10μm 中赤外線電子波長可変レーザーの構築 ←→ 光パラメトリック発振の達成		
光検知システムの開発		カセグレン望遠鏡および光検出器の開発 ←→ 設計及び製作	カセグレン望遠鏡および光検出器の開発 ←→ 機能試験		
統合システムの開発			試作機的设计開発 ←→ 実験室レベルでの試作機の性能評価	実用化試作機の製作・改良・評価 ←→	統合システムの開発 ←→
実証試験等				化学剤データベースの構築 ←→	フィールド試験・まとめ ←→