

# 産業への応用が開始された 量子カスケードレーザ

ボブ・シャイン、ピーター・R・ブエルキ、ティム・デイ

研究や軍用の中赤外装置として知られる可変同調量子カスケードレーザシステムは、手術に使われる麻酔ガスの検出、流出する化学物質や製造現場で見つかる有害物質の同定といった分光測定への応用が開始されている。

電磁スペクトルの中赤外線の部分(約3~20 $\mu\text{m}$ )は非常に豊かな分光領域になる。1994年に初めて登場した量子カスケードレーザ(QCL)は小型化が進み、広い利得帯域幅、高い輝度、高いパワーなどの性能を向上させながら、この分光領域における応用を拡大してきた<sup>(1)</sup>。QCLは学術研究用ばかりでなく、広範な用途において商業的にも重要な技術であるというのが初期の大方の評価であったが、最初の極低温冷却QCLから実用可能な産業装置への移行を実現するには大きな技術進歩が必要であった。

研究分野での初期の利用は使用可能な波長の拡大と同調性能の向上をもたらしたが、防衛分野での必要性は出力と信頼性の改善を推進した。現在われわれは、これらの改善が組み合わされたことによる商業利用の現実化をまのあたりにしている。

量子カスケードレーザは可視および近赤外半導体レーザのほとんどすべての特徴を組み合わせたいくつかの利点を得られる。競合する可視と近赤外の半導体レーザと同様に、QCLは小型の固体デバイスであり、通常のリニウム(InP)とヒ化ガリウム(GaAs)のエピタキシャル成長装置を用いた成長が行われる。しかしながら、QCLの発光波長は材料のバンドギャップではなく、導波路の厚みから決まるため、中赤外で

は広い波長範囲を得ることができる。

もう1つの利点はデバイスの単極性にあり、そこでは単一電子が素子構造の伝導バンド内部の多重量子井戸を「滝のように(カスケードイング)」流れて多数の光子を放出する。このようにして、高パワーの高効率デバイスと数ワットの動作が実現された。

QCLの利得帯域幅は非常に広く、中心波長の20%以上になる。しかしながら、分子の同定、撮像、分光などへの応用では狭い帯域幅と広い同調範囲への改良が必要になる。このことは米ドイト・ソリューションズ社が同社のECQCLデバイスで実証したように、QCLを外部共振器の内部に配置することで可能になる<sup>(2)</sup>。回折格子からのフィードバックによってQC利得帯域幅内の出力波長は選択され、選択された波長は回折格子の回転によって同調される。この設計はマルチスペクトルが得られるため、分子種の同定と特性評価が可能になる。

多くの新しい技術の場合と同様に、広帯域で同調可能な初期のQCLは研究分野で採用された。パルスと連続波の両方の動作が可能であり、固定同調に加えて、狭い可変同調(約30 $\text{cm}^{-1}$ )、中位の可変同調(約100 $\text{cm}^{-1}$ )または広い可変同調(>350 $\text{cm}^{-1}$ )範囲が選択できることで、さまざまなニーズへの対応がさまざまな価格帯で可能となった。

また、広い範囲(最大120 $\text{cm}^{-1}$ )でのモードホップフリー動作も実現された。波長範囲は初期の3.2 $\mu\text{m}$ (C-H伸縮振動に重要)から12 $\mu\text{m}$ 以上にまでの拡大が実証された。さらに、400mW以上の出力パワーも得られるようになった。

この技術の初期のもう1つの利用は防衛分野であった。最近の軍用のQCLは赤外線防衛兵器、標的照明、爆発物の遠隔検出などに応用されている<sup>(3)</sup>。これらの応用は高耐久性レーザシステムの開発につながり、きびしい温度と振動環境での動作が可能になっている。

これらの要求には-54 $^{\circ}\text{C}$ から+71 $^{\circ}\text{C}$ の温度範囲と20Hzから2kHzの6Grms振動加速度を同時に満足し、20Gのピーク振幅の衝撃に耐えなければならない。これらの要求は商業用のほとんどの要求を上回る。

分光研究用に要求される精度と苛酷な軍用での実証が組み合わされて、揮発性有機化合物(VOC)や危険物質の研究を含めた商業利用の機会が開かれた。

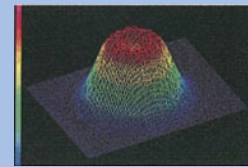
## 麻酔ガスの検出

VOCに曝される職場は広い同調範囲と高速の走査速度をもつ外部共振器QCLの価値が実証される産業分野の一つになる。この場合のシステムは広い範囲の分子の同定と定量が必要となり、過渡的な危険物質の曝露を実時間で分析しなければならない。

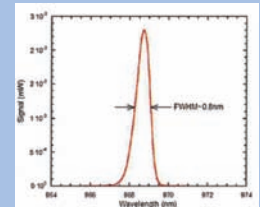
# これが 高出力 VCSEL です

この高出力半導体レーザーはエッジエミッター方式に比べ数々の特徴があります！

## ◆ビームの質がよい



Far-field beam profile



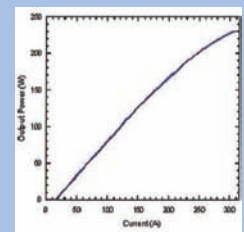
Emission spectrum

5mm×5mm VCSEL array at 100W output power

## ◆高スケールビリティ



100W CW single mode VCSEL array mounted on a micro cooler



### その他の特徴

- ◆ 温度依存性が低い
- ◆ 製品間のばらつきが小さい
- ◆ バックトークが少ない
- ◆ 波長の安定度が高い
- ◆ FIT<10

**AUTEX** オーテックス株式会社  
 URL <http://www.autex-inc.co.jp>  
 E-mail Sales11@autex-inc.co.jp

東京本社 〒162-0067  
 東京都新宿区富久町16-5 新宿高砂ビル  
 TEL. 03 (3226) 6321 FAX. 03 (3226) 6290

大阪支社 〒530-0004 大阪市北区堂島浜2-1-29  
 TEL. 06 (6344) 6328 FAX. 06 (6344) 6342

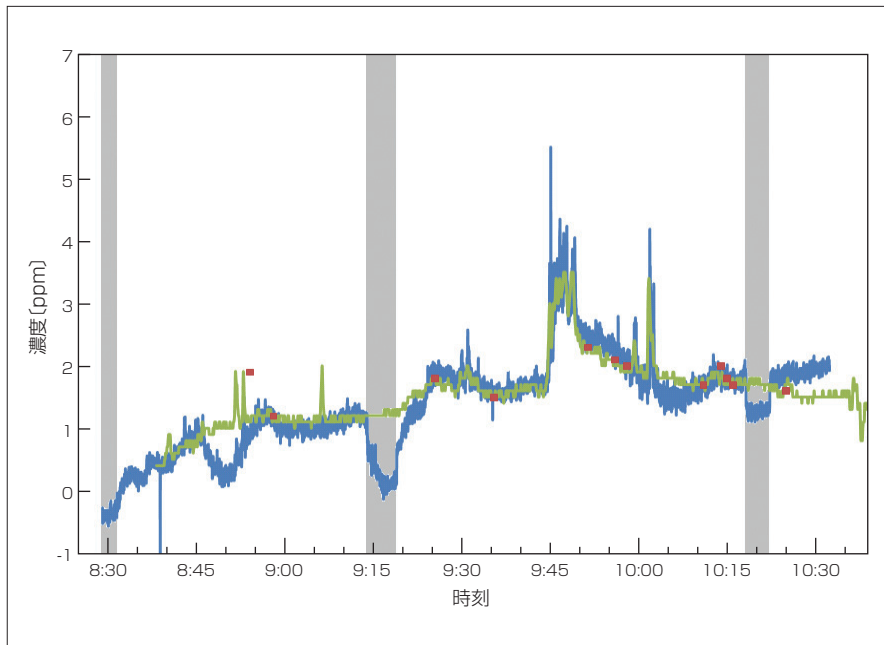


図1 Swept Sensor (青色)とMIRAN SapphIRe (緑色)を用いて同時に測定されたデータを比較している。灰色の網掛け部分はSwept Sensorが手術室の空気を監視していないときに測定された3つのバックグラウンドを示している。

その一例には医療従事者が経験する麻酔ガスのリスク、つまり手術中の患者の呼吸装置や回復中の患者の吐息からのガス漏れがある<sup>(4)</sup>。このリスクの解析と安全のための監視は、病院で使用されるさまざまな麻酔ガスや他のVOCが存在することにより複雑になる。この環境における感度と特異性は監視用の赤外分光法を必要としてきた。

これらの要求に対応して、デイライト・ソリューションズ社は、高速同調可能な広帯域可変同調中赤外レーザー光源、光電子検出器、システム制御とデジタル信号処理の電子回路、多重光路セル、ガス操作、オプトメカニクスなどのビルディングブロック技術を統合したSwept Sensorを開発した。この装置の設計は電力消費を最小化し、通常の電池による動作を可能にしている。この装置はソフトウェアとファームウェアコードを使用して、吸収データの取得と解析を行い、分子の濃度を決定する。

Swept Sensorの試験は病院の手術設

備を使用し、ヒツジの心臓を切開するときの麻酔ガスを監視して行われた。麻酔ガスはイソフルランが使用された。Swept Sensorは米サーモ・エンバイロメンタルシステムズ社(Thermo-Environmental Systems)のMIRAN SapphIRe携帯型周囲空気分析計と並べて比較された。MIRAN SapphIReは職場VOCの監視用ガスセンサとして業界をリードしている。

手術時の2つのガスサンプリング用具は相互に近付けて配置され、手術室の空気のサンプリングと麻酔設備からのガス漏れおよび手術台上の麻酔ガス濃度の測定が周期的に行われた。Swept Sensorの場合は測定を適宜に中断してデータ解析用のバックグラウンド測定も行われた。

図1はMIRAN SapphIReとSwept Sensorの記録データの直接比較を示している。Swept Sensorデータは1秒の更新間隔で記録され、MIRANデータは5秒ごとに更新された。2つのデータは

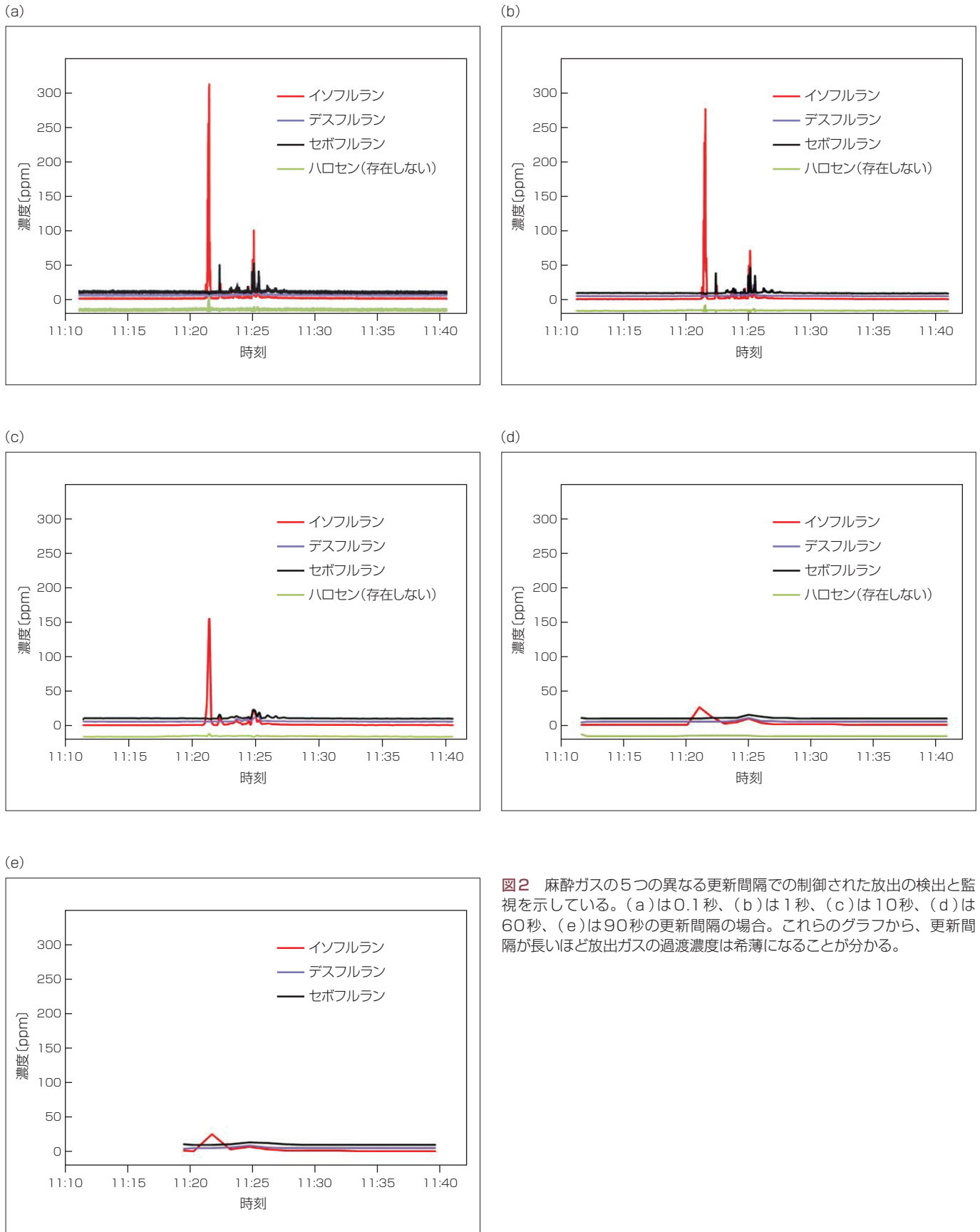


図2 麻酔ガスの5つの異なる更新間隔での制御された放出の検出と監視を示している。(a)は0.1秒、(b)は1秒、(c)は10秒、(d)は60秒、(e)は90秒の更新間隔の場合。これらのグラフから、更新間隔が長いほど放出ガスの過渡濃度は希薄になることが分かる。

よく一致し、両者の読取はそれぞれの誤差範囲内に収まった。これらのデータは麻酔装置の近傍でガス漏れを意図的にチェックしたとき(8:47と10:00)、Swept Sensorがバックグラウンドを測定したとき、および手術が済んで麻酔装置を手術室から取り出したときに大きな偏差が生じた。

麻酔ガス供給装置に近付いてサンプリングすると、イソフルランの濃度は高くなった。手術助手が人工呼吸器からプラスチック管を取り外して何かをチェックしたときは5.5ppmのピーク値が観測された。

2番目の試験では無人の手術室に3種類の一般的な麻酔ガス(イソフルラン、セボフルランおよびデスフルラン、いずれも揮発性の強い麻酔液)の制御された状態での放出が行われた。これらの麻酔液はティッシュペーパー上に次々に注がれた。これらの分子に加えて、Swept Sensorは手術室には存在しないと予想されるハロセンも調べた。これらの試験において、MIRAN SapphIReのサンプリング用具はSwept Sensorの上部に配置され、室内の空気が1 $\mu$ mの膜フィルタを通して吸引された。

図2はSwept Sensorで測定した麻酔ガスの記録チャートを示している。これらのチャートは麻酔ガスのそれぞれを0.1から90秒の異なる更新間隔で記録している。最長の90秒はMIRAN SapphIReの更新間隔と整合するよう  
に選択された。

ここで示す実際の濃度はそれほど重要ではないが、記録チャートは二つの重要な事実、すなわち、データを実時間で取得することの重要性と、濃度が測定  
の継続時間に対して一定でないときの測定濃度に対する更新間隔の影響を示している。2(a)から2(e)までの図は  
いずれも濃度を同じ尺度で表している。

更新間隔が短いときは、2つの非常に高いイソフルラン濃度(250および300ppmのピーク濃度)が短い過渡時間(約3秒)で観測された。更新間隔が長くなると、これらの高い濃度は次第に希薄化され、90秒の更新間隔では25ppmにまで減少した。この結果は化学物質曝露の過渡濃度を正確かつ適切に測定するには短い更新間隔が必要になることを示している。

## 危険物質の検出

外部共振器QCLシステムのもう1つの産業用途として注目されているのが、化学物質の流出後の成分の測定および同定や、化学廃棄物容器の中身の確認である。この能力を実証するために、工場用地で問題になる標識のないプラスチック噴霧容器が試験された。

その一例として、実験棚のイソプロパノールが入っていると思われる標識のない噴霧容器の内容物の一部を取出したときの蒸気を測定する模擬実験がSwept Sensorを用いて行われた。この場合のセンサはn-ブタノール、イソプロパノール、メタノール、アセトンおよびエチルアセテートの5種類の蒸気の可能性を分析した。その結果、噴霧容器はイソプロパノール以外にもかなりの量のメタノールを含むことが分かった。われわれは標識のない容器に不適切な溶媒が再充填されたと推測した。これ

らの結果は、このセンサが危険物質(HazMat)を洗浄するときに流出する化学物質の化学組成の迅速同定に使えることを実証している。

もう1つの例として、ホルムアルデヒドが残留していると考えられる空のホルマリン容器の上部空間をSwept Sensorで分析した。予想とは異なり、水分の吸収に加えて、1500ppmまでのキシレン濃度が測定された。このことは空の容器を廃棄するために、キシレンによる洗浄が行われたことの可能性を示している。

測定した上部空間のスペクトルの詳細な解析から、ホルムアルデヒドの存在が明瞭に確認された。測定した1121 $\text{cm}^{-1}$ のピーク強度をもつホルムアルデヒドの濃度は約100ppmであった。このように、このセンサは化学廃棄物容器に含まれる物質の真の化学組成を同定することに成功した。

QCLは1994年に実証されて以来、その顕著な進歩によって、産業への応用が実現された。研究分野の利用が波長選択と可変同調の性能改善を牽引し、防衛分野の利用が出力の拡大と信頼性の増強を牽引してきた。これらのニーズが組み合わせられて産業分野の利用が可能となり、いくつかの実例で示したように、量子カスケードレーザは実験室の装置から商業的に有用な製品への移行が実現されている。

## 参考文献

- (1) J. Faist et al., "Quantum Cascade Laser," *Science*, 264, 553(1994).
- (2) M.J. Weida, P. Buerki, E. Takeuchi, and T. Day, "External-cavity QCLs broaden capabilities for molecular detection," *Laser Focus World*, 46, 4, 58-62 (April 2010).
- (3) G. Overton, "IR countermeasure aim for safer flights," *Laser Focus World*, 47, 8, 35-43 (August 2011).
- (4) "Waste Anesthetic Gases-Occupational Hazards in Hospitals," DHHS(NIOSH) Publication No. 2007-151, September 2007; <http://www.cdc.gov/niosh/docs/2007-151/pdfs/2007-151.pdf>.

## 著者紹介

ボブ・シャイン(Bob Shine)は米デイライト・ソリューションズ社(Daylight Solutions)の商用事業開発担当上級部長、ピーター・R・ブエルキ(Peter R. Buerki)は同社の応用サイエンティスト、ティム・デイ(Tim Day)は同社のCEO兼CTO。  
e-mail: rshine@daylightsolutions URL: www.daylightsolutions.com.