量子カスケードレーザの未来への考察

アントニオ・ラスパ、フランチェスカ・モグリア

量子カスケードレーザ（Quantum Cascade Laser：QCL）は、狭い線幅を特長とするため、関連用途として主に重点が置かれているのは、化学センシングである。しかし長期的には、電気通信や材料加工も注目を集める可能性がある。

量子カスケードレーザ（QCL）の初めての実証実験を行ったのは、現在は米ハーバード大（Harvard University）で応用物理学ロバート・ウォレス教授（the Robert Wallace Professor of Applied Physics）を務めるフェデリコ・カパッソ氏（Federico Capasso）が率いていた、米ベル研究所（Bell Labs）のチームで、1994年のことだった。同氏は、QCL発明から30年近く経った後に、（QCLは）「中赤外域の広い範囲にわたって波長が調整可能な、唯一のチューナブル光源で、コンパクトで室温で動作することと相まって、科学と技術の幅広い用途を切り拓き、分光法、気候変動研究のための大気化学、微量ガス分析、汚染監視、化学センシング、医療／材料／燃焼などの分野における診断、赤外線対抗装置などの軍事用途に影響を与えた」と述べた。これまでに、標準的な動作条件下で、最短で2.63μmから最長で250μmまでのレーザ波長が実証されているが、商用提供されているQCLは、4～12μmの範囲に発振波長を持つものがほとんどである。

QCLは、中赤外域（mid-IR）の周波数範囲全体を活用できるという点において重要である。

量子カスケードレーザ

元来の半導体レーザダイオードは、半導体材用のpn接合における遷移を利用して、光放射を生成する。これに対してQCLでは、所定の量子井戸の中の状態の間でレーザ遷移が生じる。この構造の利点は、光子を放出させる電子が次の量子井戸にトンネルするため、単一の電子によって複数の光子が生成でき、非常に効率が高いことである。

井戸から井戸へのこのトンネル動作から、「量子カスケード」という概念が生まれた。製造プロセスで層の深さを制御することによって井戸の深さを操作することにより、所望のレーザ遷移波長を生成することができる。この方法の最大の利点は、発振波長が層の厚さだけに依存し、従来の半導体レーザのように構成材料には依存しないため、非常に広い波長範囲のレーザが生成できることである（λは3～160μm）。

従来のフーリエ変換赤外（Fourier transform infrared：FTIR）分光法、質量分析法、光熱変換顕微分光法の各システムと比べて、QCLは応答時間が短く、チューニングレンジははるかに広くて、中赤外域と長波長赤外域をカバーする。このような特性から、より高速かつ高精度でコンパクトな微量元素検出器やガス分析器が構成可能で、QCLは、多様なセンシング及び分光用途に対して理想的な光源となっている。

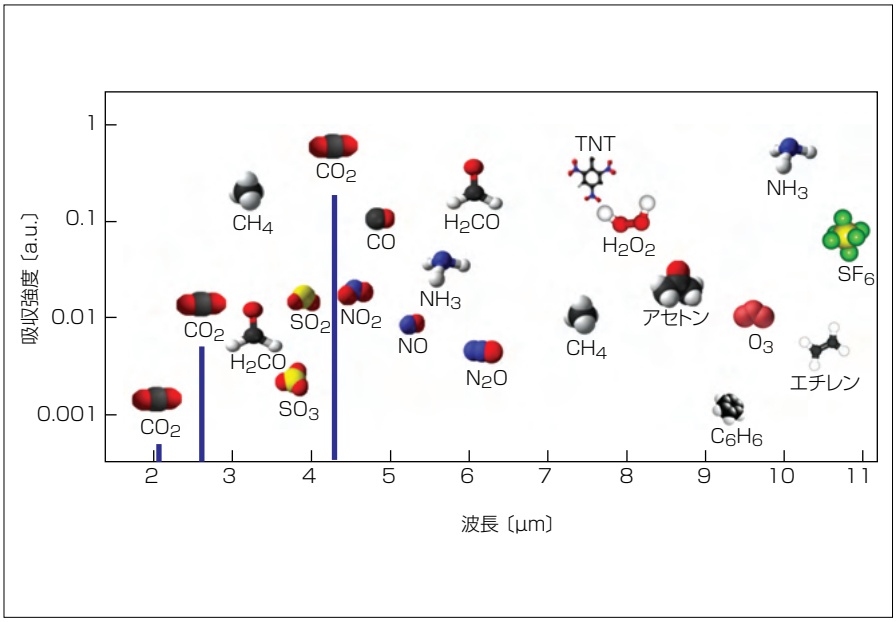


図1　2～12μmの波長範囲で振動及び回転する主な分子構造。（画像提供：MIRPHAB）

分光法とIRの指紋領域

QCLを利用することにメリットがある技術の1つが、赤外（IR）分光法であ

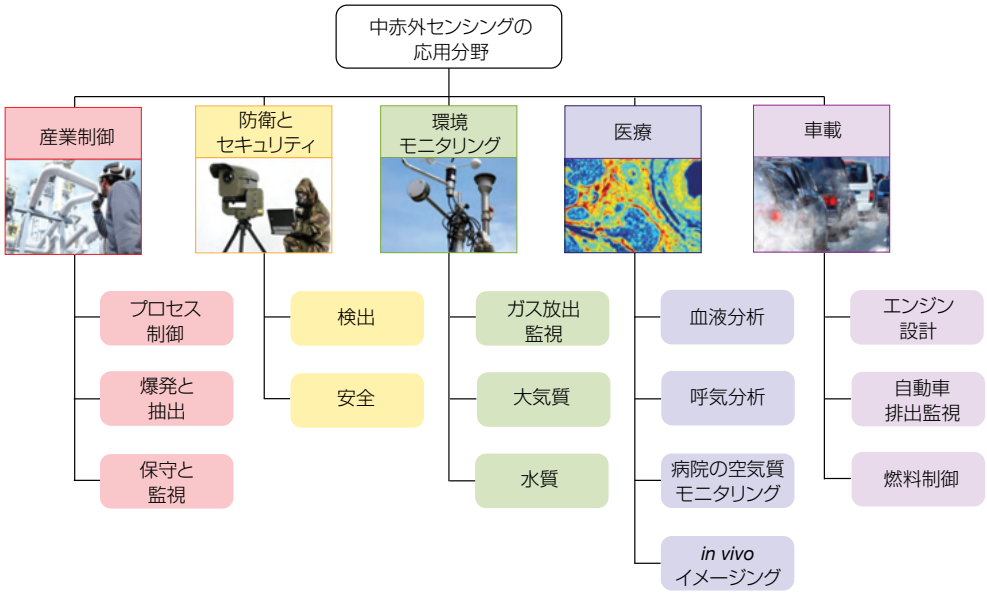


図2　中赤外センシングの主要応用分野。（画像提供：仏テマティス社［Tematys］）

る。赤外分光法は、100年以上前から吸収または透過による物質の化学的特性評価に用いられている。分子構造によって許容される振動／回転モードが異なるために、すべての共有結合材料が赤外域に固有の吸収スペクトルを持つ。各分子結合に伴う多様な吸収バンドによって、それぞれ異なるスペクトルが形成される。分子指紋として知られるこのスペクトル（5～14μm）の中で、ほとんどの液体、気体、プラスチック、ガラス、生物組織の振動共鳴や、天体からの放射を観測することができる（**図1**）。

従来、IR吸収は、広帯域IR光源と走査干渉計で構成されるFTIR分光計によって測定されていた。QCLを使用する場合は、干渉計は完全に不要となり、IR光源はチューナブルQCLに置き換えられて、そのシステムは大幅に簡素化される。その結果として、システムのコストと複雑さが大幅に軽減されるため、QCLは現在、化学分析や化学イメージングに、広く利用されている。

加えてQCLは、他のコヒーレント光源よりも指紋領域における輝度がはるかに高く、遠く（最大で数百メートル離れた場所）にある物質の非接触センシングを、非常に小さな光結合損失で行うための十分な輝度を備える。また、QCL光源の高い輝度によって、十分に高い信号雑音比（SNR）が得られるため、高感度の極低温検出器は不要となり、液体窒素を供給する面倒な手間も省かれる。

応用分野

QCLは、従来の半導体レーザよりもサイズが小さく、消費電力が低く、高度な機能を備えることから、複数の応用分野（**図2**）においてますます利用が拡大している。以下では、その一部を紹介する。

産業制御（オンラインガスセンシング）。QCLの高いビーム品質により、輸送ターミナル、化学工場、製油所、軍事基地などの大きな屋内及び屋外施設の監視に有効な、長い経路長が実現できる。例えば、QCLベースのシステムによって、空港ターミナル内の空気をスキャンして、大気中に化学物質が浮遊している危険性を検出することができる。類似のシステムは、プロセス制御のためのパイプ内のガスのオンライン監視や、ガスをサンプリングすることなく環境規制に対応するための産業用排気筒の遠隔リアルタイムセンシングにも利用されている。より長い波長を吸収する、さらに複雑なガス分子に対しては、テラヘルツQCLが現在商用化されている。中には100～150μmの波長範囲で発振して、現行技術よりも高い測定精度を達成するものも存在する。

防衛とセキュリティ。防衛分野におけるQCLの主な用途は、ヘリコプタや航空機のミサイル保護である。指向性赤外線対抗装置（direct infrared countermeasure：DIRCM）として一般的に知られるこの用途では、4μmの高出力QCLが、熱検知のミサイル防衛手段として利用される。また、即席爆発装置（Improvised Explosive Device：IED）は多くの場合、テラヘルツ帯に吸収スペクトルを持つ複合材料で構成されており、堅牢でポータブルなテラヘルツQCLベースの検出器は、移

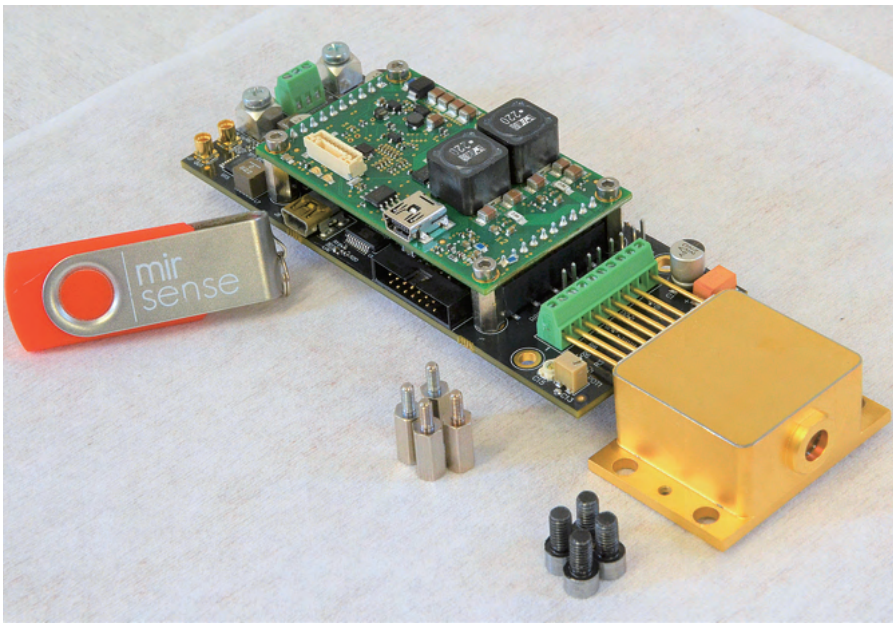


図3　4μmで1Wを出力するQCLドライバとレーザモジュール。（写真提供：ミアセンス社）

動部隊の前方の連続スキャンや、多くの人々が集まる公共の場における脅威の検索に利用することができる。

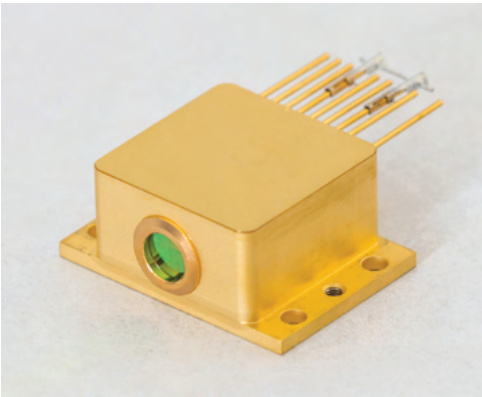
環境モニタリング。交通、産業、農畜産業によって地球の大気中に放出される過剰な量の汚染物質（NOx、CO、NH_3、VOCなど）は、疾病やアレルギーを引き起こし、人間を死に至らしめる恐れさえある。また、動物や食用作物といった他の生物に害を及ぼし、自然環境や構築環境に損害を与える可能性もある。大気質の監視と診断は、呼吸する空気を清潔で安全な状態に保つために不可欠である。これに対し、レーザ吸収分光法に基づくコンパクト（ポータブル）で正確な測定器が、複数のガス（SO_2、CO、CO_2、NH_3、VOC、NOx、CH_4など）のリアルタイム検出用に提供されており、地球温暖化に関する信頼性の高いデータの収集が可能である。

医療。QCLベースのシステムは、拡大しつつある医療診断の分野でも利用が増加している。生物組織を構成するさまざまな分子の基本振動によって、3～12μmの領域に鋭く強力な吸収ピークが現れるためである。従って、それらの分子によって形成される吸収スペクトル（いわゆる「指紋スペクトル」）を調べることにより、生物組織の分析が可能で、構成分子を同定してその組成を分析することができる。原理上は、中赤外吸収分光法を利用することにより、血液や間質液に含まれるタンパク質、糖質、脂質などの成分を非侵襲的に分析することができる。従って、採血を行うことなく、その場でリアルタイムに健康診断を行う医療システムの開発が期待されている。例えば、患者の呼気に含まれる微量ガスは、糖尿病や、ぜんそくなどの呼吸器疾患、腎臓や肝臓の機能不全を示唆する可能性があり、これ以外の指標も定期的に発見されている。QCL分光法は、表層の化学分析が可能である。例えば、整形外科用インプラントの表面に適用される特殊な骨親和性コーティングの特性評価を行うことが可能で、これによって、人体組織に対するインプラントの受容性を高めることができる。

自動車。自動車から排出される亜酸化窒素は、地球温暖化の要因であるため、その排出レベルの測定は、ますます重要になっている。QCLを利用することのメリットは、放射レーザ光の帯域幅が非常に狭く、測定対象成分に対する非常に高い感度が得られることである。QCLベースのガス分析器としては現在、自動車排出ガスの4つの窒素含有成分（NO、NO_2、N_2O、NH_3）を、高い選択性と感度で、クロスオーバーを引き起こすことなく、直接かつ同時にリアルタイムで測定できるものが提供されている。

QCLの製造シナリオ

現在、QCLは間違いなく最も万能な中赤外レーザで、テラヘルツ帯での発振も可能である。また、OPOやOPAなどの他の中赤外光源よりもはるかにコンパクトで堅牢である。その結果、中赤外域で動作する多くの用途において、QCLが光源として使用されている。QCLは柔軟性が高いため、企業各社から非常に多岐にわたる製品が、コンパクトで堅牢という共通の目標を達成する独自のソリューションとして提供されている。加えて各企業には、独自のビジネスモデルが存在する。例えば、仏ミアセンス社（mirSense）の最高経営責任者（CEO）で創設者のマシュー・カラス博士（Mathieu Carras）は、「QCLの価格が高くて市場規模が限られているという悪循環を断ち切るために、当社は、より大きな市場を直接対象とした、低コストのレーザ設計から小型光音響センサ（一般的にcm^3スケール）に至るまでの垂直統合全体に注力している」と述べている。ミアセンス社は、小型で軽量で堅牢な固体中赤外QCLを製造している。その構造（アクティブ領域、導波路、分布帰



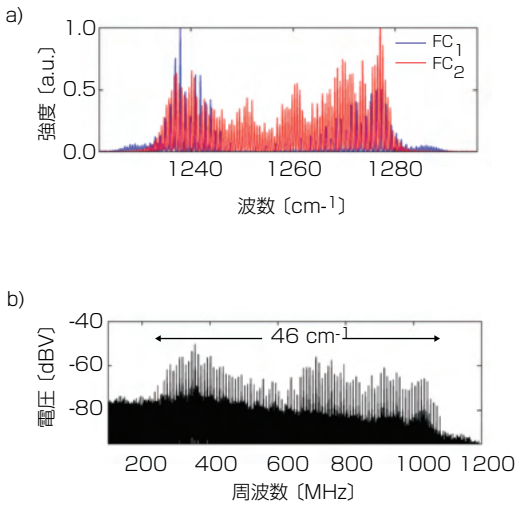


図4　コムレーザはHHLパッケージに内蔵することができる（左）。a)は、約8μmの2つのFC-QCLのスペクトルを重ねたもので、b)は、デュアルコム分光法用のマルチヘテロダインビートスペクトルの測定結果。（画像提供：アルプス・レーザー社）

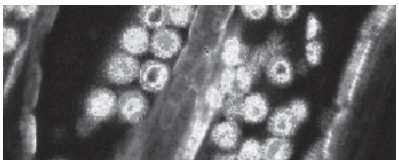
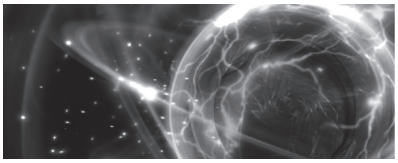
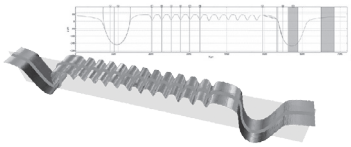
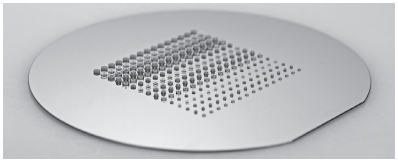
還構造）は、顧客のニーズに対応するための高いアジリティを確保するために、同社独自のモデリングツールによって設計されている。同社は、標準的なリン化インジウム（InP）ベースの技術と、その代替となるヒ化インジウム（InAs）ベースの技術という、2つの異なる半導体技術を活用する、唯一のQCLメーカーである。これによって、QCLの発振波長範囲を、単波長側で3μm、長波長側で20μmにまで拡張することに成功し、分子分光法による防衛やガスセンシングなどの用途に適したQCLを実現している（**図3**）。これらのレーザは室温で動作し、パルスまたは連続波（CW）モードで動作可能で、QCLの内部温度や駆動電流を変えることによってチューニングされる。

仏Lytid社は、市場最速の中赤外検出器と主張する、5μmの最先端中赤外検出器「MIRQWIP」によって、量子井戸技術の検出限界を押し上げた。応用分野としては、高速中赤外光リンク、ヘテロダイン計測器、QCLコムの特性評価などがある。ライティッド社は、カスケード量子井戸構造内のサブバンド間遷移を利用して、イメージング、ガス分光法、宇宙分野を対象とした、60～150μmのテラヘルツ放射を生成する、テラヘルツQCLも提供している。主要な利点は、テラヘルツ光子の直接生成と、高い出力である。このデバイスには、テラヘルツQCL特有のニーズに合わせて設計された同社独自の小型レーザドライバと、高い性能と信頼性を備えた寒剤を使用しない冷却システムも搭載されている。

先進的な光源を考案する先駆的なスイス企業であるアルプス・レーザー社（Alpes Lasers）のCEOを務めるアントワーヌ・ミュラー博士（Antoine Müller）によると、同社が新たに開発した周波数コムQCLは、特別に設計されたスペクトル分散を採用して製造されており、広帯域で強力な周波数コムで構成されるマルチモードの光出力を生成するという。このQCL周波数コム（QCL-FC）は、アルプス・レーザー社の協力の下で、スイス連邦工科大チューリッヒ校（ETH Zurich）のチームによって2012年に初めて実証されたもので、現在は、中赤外域で提供されている最も有望な周波数コムデバイスとなっている。QCL-FCと超短パルスレーザのモード間隔は、どちらも共振器の長さによって決まる。しかし、QCLの場合は、時間領域における周期的な変調が、振幅変調（AM）ではなく周波数変調（FM）であり、出力は一定である。QCL-FCは、励起レーザと微小共振器を導波路に組み込んだスタンドアロンのデバイスである。これによってQCL-FCは、これまでの技術と比べてはるかにコンパクトにすることができる。こうした性質のすべてが、他にはない特性をQCL-FCに与えており、QCL-FCは、製薬業界で関心を集める（約6.02μmを中心とする）アミンバンドなど、幅広い斬新な用途に理想的な光源となっている（**図4**）。

日本では、世界各地に拠点を置く浜松ホトニクスが、分子ガス分析や吸収分光法を対象に、3種類の中赤外（4～10μm）QCLを製造している。1つめは、波長掃引パルスQCLで、外部共振構造によって、広範囲の波長掃引が実現されている。2つめは、DFB-CW駆動型（レンズ内蔵型）QCLで、シールドされたバタフライパッケージでコリメートビームを出力する。3つめは、DFB-CW駆動型QCLで、SPC（シング

レーザー・光技術のお困りごとは
レーザー専門商社の
JLC JAPAN LASER
にお任せください!
レーザー加工

顕微鏡、バイオイメージング

原子・分子・量子研究

検査・分析・評価

ナノフォトニクス、微細加工

光技術に関するご相談は
https://www.japanlaser.co.jp/
E-mail: jlc@japanlaser.co.jp
JLC JAPAN LASER 株式会社日本レーザー
本　社　〒169-0051 東京都新宿区西早稲田2-14-1
TEL: 03-5285-0861
大阪支店　TEL: 06-6323-7286
名古屋支店　TEL: 052-205-9711

ルフォトン共鳴連続緩和）構造と分布帰還型構造（DFB）の採用によって、室温連続動作で安定したシングルモード発振を提供する。

米ソーラボ社（Thorlabs）は、中赤外域で発振する幅広い種類の量子カスケードレーザ及びインターバンドカスケードレーザ（ICL）を提供している。これには、医用イメージング、照明、顕微鏡検査に非常に適したファブリペロー（Fabry-Perot）QCLと、明確に定義された中心波長で発振し、化学センシングや光通信などの用途に適した単一の空間モード動作を提供する分布帰還型QCLの両方が含まれる。

課題

現時点において、QCLはまだやや特殊なデバイスであり、2つの大きな課題に直面している。1つめは、ドライバや温度制御電子部品に対してシステム設計者が特別な注意を払う必要があるため、製造の最適化が難しいことである。QCLドライバからの電流ノイズによってレーザ線幅が広くなり、それによってシステム全体の感度と精度が低下し、温度変化によって波長のドリフトが生じる。QCLによって実現可能な最大限の精度を達成するには、超低ノイズのドライバと非常に安定した温度コントローラによって、それを駆動することが重要である。2つめは、バッチサイズが小さいために単価が高くなることである。

QCLは、その高度な機能とスペクトル特性により、多くの用途に対して非常に貴重なツールとなっている。科学者やメーカーだけでなくエンドユーザーにも利用者が拡大していることに伴って、QCLの市場の数はますます急速なペースで増加している。今後5年間で、これらのデバイスの価値に対する認識が高まるにつれて、さらに多くの用途が生み出されて、QCLはさらに入手しやすく、手ごろな価格になるというのは、理にかなった予測である。その目標に向けて、現在の勢いを最大限に生かすために、Mid-IR AllianceがMIRPHABによって設立されている。MIRPHABは、ガスと液体の両方の媒体の中で動作可能な、中赤外化学センシングデバイスのプロトタイプ製作と製造のためのパイロットラインの確立を目指す、Photonics21との官民連携（Public Private Partnership：PPP）イニシアチブで、欧州委員会（EC）の資金助成を受けている。Mid-IR Allianceは、サプライチェーンのあらゆるレベルにおいて中赤外技術を積極的に推進する企業で構成される業界団体で、中赤外技術の継続的な成功と進歩に尽力している。この団体には、レーザや検出器のメーカー、中赤外カメラやセンサの開発メーカー、フォトニック集積回路／モデリングソフトウエア／パッケージングサービスを提供する企業が加盟している。その目的は、中赤外技術の発信源となり、エンドユーザーとこのハイテクコミュニティを構成する企業の間の懸け橋となることである。

注記

MIRPHABは、欧州連合（EU）の研究・イノベーション促進プログラムであるHorizon 2020による資金助成を受けており（贈与契約番号688265）、Photonics PPPのイニシアチブである。

著者紹介

アントニオ・ラスパ（Antonio Raspa）は、欧州フォトニクス産業コンソーシアム（European Photonics Industry Consortium：EPIC）のイノベーション・マネージャー。フランチェスカ・モグリア（Francesca Moglia）は、EPICのプロジェクト・リーダー。

e-mail: antonio.raspa@epic-assoc.com URL: epic-assoc.com

LFWJ