

特集号「赤外自由電子レーザーの現状、利用研究と展望」企画説明

和田真一（広島大学）

加藤政博（広島大学・分子科学研究所）

築山光一（東京理科大学）

自由電子レーザー（FEL）は原理的に波長可変であり高出力化が可能であることから、放射光と並ぶ加速器ベースの光源として長年研究開発が進められてきた。代替となるレーザー光源のない真空紫外・X線領域でのレーザー発振を目指してストレージリングや直線加速器を用いた技術開発が継続的に行われてきた結果、今日では発振波長域はX線領域に到達し実用化されるに至っている。一方長波長側でも、赤外自由電子レーザー（IR-FEL）が電子加速器由来の赤外光源装置として研究・開発が行われてきたとともに、従来の光学レーザーでは発振が困難であった長波長域で波長可変な高強度光源として、利用研究も活発に行われている。特に中赤外や遠赤外（テラヘルツ）領域では、高輝度かつ周波数可変な光源は現状IR-FELに限定されると言っても過言ではない。1977年に初めて発振に成功したFELは、その後短パルス・高コヒーレントな唯一無二の光源として紫外・X線領域で大きく花開くこととなり、日本国内でもSPring-8に隣接するSACLAでさまざまなインパクトある研究成果が公表されてきたことはご承知の通りである。しかしながらここでは、この記念すべき最初のFEL光は中赤外光であったという点を特筆しておきたい。

極めて広い波長範囲の光を様々な研究分野で利用するコミュニティである放射光学会においても、赤外光の利用はそれほど規模は大きくないかもしれない。しかし広く見渡すと、赤外光は分析・加工技術としては極めてスタンダードな光源といえる。そもそも赤外光は加熱された物質の黒体放射として容易に得られることから、可視光に次いで古くから利用されている光とも言えるだろう。物質科学の分野では分光手法としてその歴史は長く、赤外光の吸収は物質中の双極子モーメントの変化に因るが、その原因となる分子振動（格子振動）が化学物質固有のものであることから、振動吸収スペクトルが現れる中赤外領域のことを特に指紋領域と呼ぶことがある。研究分野で利用される光学レーザーの多くは、YAGレーザーやチタンサファイアレーザーといった赤外の固体レーザーの基本波や高調波である。また工業的にはCO₂レーザーやファイバーレーザーの赤外光を用いたレーザー加工・切断技術が広く定着

している。そして紫外・X線ユーザーにとって関心を引くトピックスとして、チタンサファイアレーザーといった赤外超短パルス光の高次高調波発生が利用に資するほど現実味を帯びてきている点が挙げられる。2017年には完全コヒーレントなテーブルトップサイズのX線源として、炭素K端でのフェムト秒時分割分光計測が報告された^{1,2)}。本特集でも執筆頂いたが、IR-FELを用いたより長波長な赤外光を用いることで、逆により短波長なコヒーレント硬X線の発生が期待されていることは大変興味深い。このように様々な分野の研究・利用が活発に行われていることから、赤外光利用の裾野の広さが伺える。

日本は放射光大国とも呼ばれているが、IR-FELについては現在国内では大阪大学、京都大学および日本大学で利用研究が推進されている。東京理科大学のIR-FEL施設は今春で任務を全うしたのが残念でならないが、一方で高エネルギー加速器研究機構では新しい中赤外FELの開発が進められている。このように国内でも広く利用研究がなされている新しい赤外光源であるIR-FELを俯瞰するような解説は放射光学会誌でもこれまでになかったことから、今回、特集号として企画することで会員の皆様に広く知ってもらおう機会を頂戴した。

ここで赤外光の分類名称とエネルギー単位について触れておきたい。赤外領域は可視光に近い波長から長波長になるにつれて、近赤外領域、中赤外領域、遠赤外領域と呼ばれて分類されている。なかでも遠赤外領域はマイクロ波に隣接することから電波との狭間領域にあたり、その振動数からテラヘルツ波としても知られている。波長は主にマイクロメートル（ μm ）が用いられているが、その逆数となるエネルギー単位では波数（ cm^{-1} ）や周波数（GHz または THz）が用いられる。したがってスペクトルの横軸はこれらが混在することが多い。以下に、紫外・X線領域でよく用いられるeV単位も含めた換算式を記した。また、Fig. 1にこれらを横軸とした各FEL施設の発振範囲をまとめたので、理解の一助にして頂ければ幸いである。

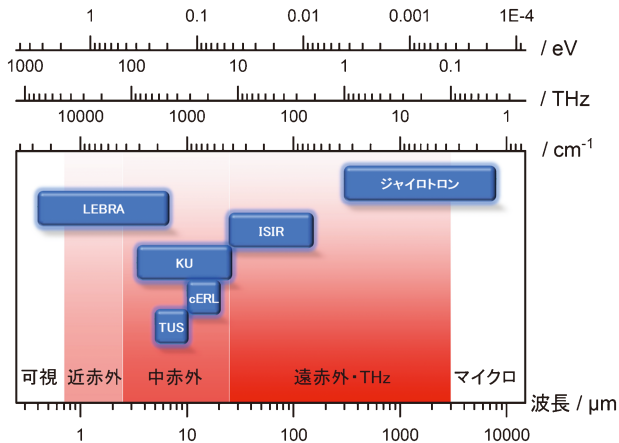


Fig. 1 (Color online) Regions within IR^{3,4)} and oscillating ranges of IR-FEL facilities versus wavelength (μm), photon energy (cm^{-1} and eV), and frequency (THz).

波長 (μm) \leftrightarrow

$$10,000/\text{波長}(\text{cm}^{-1}) = 300/\text{波長}(\text{THz}) = 1.24/\text{波長}(\text{eV})$$

赤外光の波長域^{3,4)}

近赤外光	: 0.7–2.5 μm
中赤外光	: 2.5–25 μm
遠赤外光・テラヘルツ波	: 25–3000 μm

本特集では、各 IR-FEL 施設の現状や開発状況について報告頂いた。併せて IR-FEL と並ぶ世界最高水準の出力を誇る遠赤外ジャイロトロン^{3,4)}の現状や、IR-FEL を用いた究極の波形成形技術についても執筆頂いた。

初めに、築山光一氏 (東京理科大) に「赤外自由電子レーザーの分光学・分子科学への応用」と題して、東京理科大学の中赤外 FEL である FEL-TUS の解説と基礎物質科学への利用研究例について執筆頂いた。また川崎平康氏 (東京理科大・現 KEK) には、生命科学・環境科学への利用研究例について「赤外自由電子レーザーの生命・環境科学への応用研究」と題して執筆頂いた。

全炳俊氏、紀井俊輝氏、大垣英明氏 (京大) には、「京都大学小型中赤外自由電子レーザー施設の開発とその利用展開」と題して、同大学の中赤外光源 KU-FEL とその利用研究例について紹介頂いた。境武志氏 (日本大) には

「日本大学 LEBRA 共同利用施設における加速器開発とその応用利用」と題して、同大の近中赤外光源の特徴と研究例について紹介頂いた。また入澤明典氏 (大阪大) には、「大阪大学 遠赤外・テラヘルツ自由電子レーザーを用いた利用研究」と題して、遠赤外・テラヘルツ光源である同大学の ISIR THz-FEL の紹介とイメージングをはじめとする利用研究例について執筆頂いた。

山口裕資氏 (福井大) には、「遠赤外ジャイロトロン施設における装置開発ならびに応用展開」と題して、磁場中の電子運動から発生する電磁波の短波長化で強力なテラヘルツ光源を発生するジャイロトロンについて解説頂いた。加藤龍好氏 (KEK) には、現在開発を進めている中赤外の cERL-FEL について、「エネルギー回収型リニアックを用いた高平均出力赤外自由電子レーザーの開発」と題して説明頂いた。最後に、羽島良一氏 (QST) には「共振器型自由電子レーザーによる数サイクル赤外光の発生と強光子場科学への展開」と題して、FEL 共振器を利用した極短赤外パルスの発生原理と結果、そしてアト秒紫外・X線高調波パルス生成への展望について解説頂いた。本特集企画に賛同し、快く執筆頂いた著者の先生方には心より感謝申し上げます。

放射光はまだ高度化しています。高強度かつコヒーレントな光を赤外から硬 X 線に亘って利用できるようになりました。そして極短パルス光や波形をコントロールした光の発生も可能になってきました。これまで光学レーザーが得意だった光技術が、放射光技術をベースにして今や赤外から硬 X 線に亘る幅広い光で可能になってきました。様々な選択肢の中からどのような波長 (エネルギー) の光をどのような特徴で利用するのか、正にユーザーの立場からはワクワクが止まらない時代になったと言えるかもしれません。装置と利用研究の両面で大きく進展している IR-FEL 研究について、本特集記事が少しでも本誌読者の皆様の関心を引く一助になることを願っています。

- 1) Y. Pertot *et al.*: Science **355**, 264 (2017).
- 2) A. R. Attar *et al.*: Science **356**, 54 (2017).
- 3) 田隅三生: 分光研究 **59**, 27 (2010).
- 4) 西澤誠治: 分光研究 **61**, 7 (2012).