

電子ビームとテラヘルツ分光の研究



若 者

菅 晃 一*

Study on electron beam and terahertz (THz) spectroscopy

Key Words : Femtosecond electron beam, Terahertz (THz) wave, Spectroscopy

はじめに

筆者は、2009年3月に大阪大学大学院工学研究科の博士後期課程を修了し、大阪大学産業科学研究所で特任助教と特任研究員を経て、2013年3月より助教に着任し、現在に至っています。研究活動は大阪大学産業科学研究所 ナノ極限ファブリケーション研究分野 吉田陽一教授の下で従事しています。本稿では、筆者のこれまで研究してきた電子ビーム研究、最近取り組んでいるテラヘルツ分光の研究について、振り返りながら紹介させていただきます。

1. 大学時代 ～加速器と電子ビーム～

私が「加速器」という実物に出会ったのは、大学4年生で、大阪大学工学部電子・情報・エネルギー工学科原子力工学専攻の協力講座の吉田研に配属されたときでした。配属当時は、短パルス「電子ビーム」や放射線の研究、配属前に説明された加速器の制御系構築の勉強は面白いかもしれないと思い、研究室配属を希望した記憶があります。研究室ではパルスラジオリシスと呼ばれる、パルス電子ビームを極性・非極性の溶媒・溶液等に照射し、引き起こされたイオン化後の過渡反応を、分析光としてのパルスレーザーの時間分解吸収分光により、過渡種を時間追跡しながら反応解析を行う研究していました。その手法の時間分解能を向上するためには、短パル

スの電子ビームが必要であり、私は電子ビームパルス幅を短くするための研究を行うことになりました。

実際配属されると、楊金峰準教授（当時は、助手）の下で、アナログリレーを用いたインターロック回路、電子ビーム偏向のための小さな電磁石の静磁場計算と製作（鉄の構造体にコイル巻いて300 G程度の磁場を発生）等を教わりました。一方で、加速器はどうかというと、真空のビームパイプが完全には繋がっていない（電子ビームを発生できない）状態でした。そのため、実験室では、いつも数人でトランシット（測定の望遠鏡）を使いながら、電子銃、加速管、電磁石、真空配管等の各部品の物理中心とビーム軌道が一致するように設置する作業や信号ケーブル引きの作業等を行っていました。当時、私は250 ccのバイクと完全な保守は出来ないながらも少量のバイク保守用工具を持っていましたが、実験室の作業用工具（ネジ、回路部品、レンチ、切断・穴あけ工具、電気配線工具、治具等）の多さに感動したのを覚えています。私の配属の2年前から加速器立ち上げは始まっていましたが、私の配属の半年後に電子ビーム（エネルギー：32 MeV）発生を確認し、私は無事に学部を卒業することが出来ました。今考えると、加速器が動いていない時期に配属され、ビームが出ない加速器を見れる、非常に貴重な経験をさせていただいたと思っています。当時の専攻では学部卒業者の9割程度が大学院に進学していたと思いますが、私も大学院に進学しました。

博士前期課程では、フェムト秒のパルス幅を有する電子ビームの発生（パルス圧縮）方法の数値計算や計測について研究を行いました。その頃に、量子科学技術研究開発機構（当時は、日本原子力研究開発機構）のある先生には、Perlによる演算や処理（計算結果を見やすくまとめるために使用）の書き方や電子ビームの数値計算方法の初歩を教授頂き、非常

* Koichi KAN

1981年11月生

大阪大学大学院工学研究科環境 エネルギー工学専攻（2009年）

現在、大阪大学 産業科学研究所 ナノ極限ファブリケーション研究分野 助教
博士（工学） ビーム物理

TEL : 06-6879-4285

FAX : 06-6879-4287

E-mail : koichi81@sanken.osaka-u.ac.jp



にお世話になりました。現在でも、その方からは研究とその他アドバイスを頂いています。もしその先生と出会えていなければ、現在の私が測定系や制御系のソースコードを書くことは無かったと思える、大事な経験だったと思います。

博士後期課程では、さらにアト (10^{-18}) 秒をターゲットにして、電子ビーム発生の研究を行いました。研究では、従来のフェムト秒からアト秒領域のビーム発生のための数値計算、電子ビーム計測のための光計測の研究、高エネルギー加速器研究機構での新たな高周波電子銃製作（現地の先生に指南頂きながら特性測定等）に携わせていただき、2009年に修了しました。

2. 卒業後 ～医療応用の電子ビーム～

卒業後、1年間、特任助教として採用され、医療応用のためのフォトカソード RF 電子銃ライナックを用いた強度変調 X 線の発生について、研究を行いました。放射線療法では、がん組織のみだけでなく周りの正常組織に放射線が照射され、そこでの副作用が問題となっています。このため、放射線の形状を不均一に変化させ、がん組織に照射線量を集中させる、強度変調放射線治療と呼ばれる技術が発達してきました。また、私は、これまでの研究では、フォトカソード高周波電子銃を用いた電子ビーム発生を研究してきました。この電子銃の特徴は、レーザーの光電効果により電子ビームを発生する（フォトカソード）ことです。そのため、電子ビームの形状がレーザーの形状に依存する特性を生かして、強度変調電子ビーム、さらには電子ビームから強度変調 X 線への変換の研究を行いました。その結果、電子ビーム、X 線、共に数 mm の空間分解能での発生に成功しました。

3. 現在 ～テラヘルツ分光～

その後、特任研究員を経て、2013年に助教として採用され、現在はテラヘルツ分光等の研究を行っています。テラヘルツ波は、電波と赤外線間の電磁波（周波数 0.1 ～ 10 THz で波長 30 μm ～ 3 mm）です。近年では、プラズマ加熱、イメージング、セキュリティ、生物学等の様々な応用が研究されています。

私がテラヘルツ分光を研究することになったのは、

パルスラジオリシスの時間分解能を向上するための 100 フェムト秒以下の電子ビームパルス幅測定を行うためでした。理想的なデルタ関数をフーリエ変換したときは、無限の周波数成分を含む周波数スペクトルが得られます。しかし、有限の幅のパルス波形は、大雑把には、その幅の逆数から計算される周波数成分を含まれることになります。また、私たちが扱っている電子ビームは、有限の幅を持つ電子の塊（パルス）です。単純のため、例えば 1 ピコ秒の電子ビームパルス幅を仮定したときは、その逆数が 1 テラヘルツ (THz) に相当するため、電子ビームの放射する電磁波の色を解析（テラヘルツ分光）し、電子ビーム診断を行うこととなりました。具体的には、電子ビームのコヒーレント放射と呼ばれる現象（電磁波の山と谷の位相が揃い高強度な電磁波を放射）を利用し、電子ビームパルス幅よりも長い波長（低周波）の電磁波の放射強度が大きくなる性質を測定しながら、電子ビーム診断を行ってきました。その結果、現在では、20 フェムト秒以下の電子ビーム発生可能であることが分かりました。同時に、その他の放射機構も検討するために中空誘電体管や回折格子を利用した電子ビームとテラヘルツ波の分光研究、2つの電子ビームを用いたテラヘルツ波分析光を利用したパルスラジオリシスに関する研究も行ってきました。今後、このような電子ビームを利用した、高時間分解能の時間分解計測へ応用する予定です。

今更ですが、私は院試の面接の時に、恥ずかしながら、苦い答弁をした記憶があります。面接官「あなたの数学の出来が悪いですが、どう思いますか？」、私「問題の出題範囲を読めていませんでした。」というようなやりとりでした。恐らく、フーリエ・ラプラス変換の問題がうまく解けなかったのだと思います。学部時代は、今後フーリエ変換を使うことはないだろうと思っていましたが、現在は分光のためにフーリエ変換を使うことが多くあります。私には出来ませんでした、学生時代からしっかり教養を身につける、勉強しておくことは大事だったのだと、痛感している今日この頃です。

4. おわりに

最後に、本稿では、筆者の大学時代・卒業後・現在の研究（電子ビームとテラヘルツ波）を、振り返

りながら紹介させていただきました。回想・散文的になり、まとまりの無い文章になってしまいました。今後、お付き合い頂きありがとうございました。今後も研究活動に励んで参りたいと思います。

謝辞

これまで私の研究をご指導くださった大阪大学産業科学研究所の吉田陽一教授、関係者の皆様、その他研究機関の先生方に深く感謝いたします。

また、本稿執筆の機会を与えてくださいました大阪大学産業科学研究所の真嶋哲朗教授、ならびに「生産と技術」関係者の方々に深く御礼申し上げます。

