

関西支部だより

関西支部の2019年度第2回講演会・見学会が8月23日(13時30分～17時00分)に福井大学・遠赤外領域開発研究センター後援のもと、同研究センター5F コロキウム室(福井県福井市文京 3-9-1)において開催された。今回は「遠赤外・テラヘルツ領域の研究最前線」と題して講演と見学を行った。参加者総数31名(大学・研究所関係14名、会社関係12名、学生5名)であった。関西支部長の横山彰一氏による開会挨拶に続き、当研究センターで行われている研究最前線に関する2件の講演と、独自に開発された世界最高水準の遠赤外高出力光源「ジャイロトロン」や超低温物性実験施設などの見学会があった。以下に講演会のプログラムを示す。

【講演会】

1. 「開会挨拶」 関西支部支部長
2. 「遠赤センターにおける遠赤外・テラヘルツ技術開発とその応用」
福井大学・遠赤外領域開発研究センター
谷 正彦氏
3. 「福井大学における低温テラヘルツ物性研究」
福井大学・工学研究科
菊池 彦光氏
4. 「閉会挨拶」 関西支部副支部長

谷氏の講演では、遠赤外領域開発研究センターの概要からはじまり、同センターで独自に開発を進めてきた高出力ジャイロトロンの詳細とその応用、さらにフェムト秒レーザーを使った最新のテラヘルツ放射・検出デバイスの研究開発状況が紹介された。

まず、遠赤外領域開発研究センター(遠赤センター)は、高出力テラヘルツ光源(ジャイロトロン)の開発とその応用などを目的として、1999年に学内共同研究施設として設立し、現在は「未開拓の遠赤外/テラヘルツ領域の技術開発」、「高出力遠赤外光源を用いた先端応用研究」、および「レーザー技術を用いた新しいテラヘルツ波発生および検出法の研究開発とその分光・計測への応用研究」を目標に研究を行っている。また「高出力テラヘルツジャイロトロンの開発推進」のための国際コンソーシアムの形成など、広く国際交流・連携活動も活発に行っているということである。

この施設の概要説明に引き続きテラヘルツ/遠赤外に関する最先端の研究紹介が行われた。ここではまず、テラヘルツ/遠赤外領域電磁波の基本的性質についての説明が行われ、この周波数領域の電磁波の代表的な応用例としては、その特徴を生かした①物質科学・生命科学、②セキュリティ・検査、③生体・医療、④テラヘルツ波通信、⑤テラヘルツ波加工・反応制御などの応用が有力であること。特に、高出力ジャイロトロン

を使った研究としては、テラヘルツ非線形光学効果などの物質科学や細胞の制御などの生命科学、またテラヘルツ波加工や反応制御など、これまでにない新たな先端応用研究も可能となりうるということである。

この高出力ジャイロトロンに関しては、半導体レーザーなどは数%程度の電力-光エネルギー変換効率であるのに対して、ジャイロトロンではカソードで発生した電子を高磁場が印加された真空の共振器内でらせん状に歳差運動をさせながら、その運動エネルギーを電磁エネルギーに変換するため、電力-電磁波変換効率が非常に高いことが特徴であるということである。ちなみに、遠赤センターの高出力ジャイロトロンに関して言えば、印加磁場8-10テスラで200-300GHzの電磁波出力を可能としており、その取り出し効率は何と30-40%もあるという。また実際の出力としてはパルスとして300kW以上で最大400kWまでの高出力遠赤外線電磁波の取り出しが可能である。現在、この装置を用いた研究としては、トムソン散乱を利用したプラズマ診断(プラズマ温度計測)などが行われているという。また、ジャイロトロンにおいては、印加磁場を上げることによって高周波化も可能であり、これまでに20テスラの磁場を印加することで1THzの発振にも成功しているという。

次にフェムト秒レーザーを利用したテラヘルツ放射および検出デバイスの最先端研究が紹介された。この手法では、フェムト秒レーザーを一次光としてテラヘルツパルスを発生させるが、まず最初に、光伝導スイッチを用いたテラヘルツ波放射および検出の原理や、テラヘルツ時間領域分光法(THz-TDS)について詳細な説明がなされた。

一般にこのTHz-TDS法では一定の繰り返し周波数のフェムト秒レーザーを光源として使用し、機械式遅延ラインの制御により時間領域波形を計測するため、測定にかなりの時間を要してしまうが、この測定時間の大幅な短縮化を図るための方法として非同期光サン



谷正彦氏のご講演の様子

リング (AOS) 法についての説明が行われた。一般に AOS 法では繰り返し周波数の異なる 2 台のフェムト秒レーザーを使用してポンプ光とプローブ光の時間遅延を短時間で変化させるため、高速な波形計測が可能であるが、その繰り返し周波数が各レーザー光源で固定されているため測定時間における無駄が大きく、かつ時間分解能もそれほど得られないという欠点がある。このため谷らは繰り返し周波数可変フェムト秒レーザーを用いた新規な AOS 法の開発を行っている。この方法では 1 台のレーザーを用いて、全電気制御にて振動フリーの状態での繰り返し制御を行うため、従来の AOS に比較してさらなる測定の高速度化や効率化が可能になるということである。この方法で実際にシリコンからのテラヘルツ電磁波放射測定をした結果は、20-100GHz の帯域であるが、パワースペクトルで 10^4 程度の SN 比を達成している。この帯域が低周波に制限されるのはレーザーのタイミングジッタによるとのことであるが、将来的にこれらも解決されてより高周波領域のスペクトル解析も可能になることを期待したい。

このあと、非線形光学素子を用いたテラヘルツ波の発生や電気光学素子を用いた検出技術や、パルス面傾斜法を用いた高強度テラヘルツ波の発生法について、また最近開発された新たなテラヘルツデバイスとして金属スピントロニクステラヘルツ放射素子に関する報告があった。

この金属スピントロニクス素子では強磁性体金属 (鉄など) 表面に非磁性金属 (白金など) をナノメートルオーダーの厚みで蒸着した二重層を持つ。これに磁場をかけると強磁性体内部に生成されるアップおよびダウンスピンの数が異なり、ここにフェムト秒レーザーを照射することによって励起されるスピンの拡散によって非磁性金属内に流れ込む。このとき生じる逆スピンホール効果によってスピン流が自由電子に変換され、その自由電子の過渡的な流れによって金属内においてもテラヘルツ電磁波が発生するというのである。この素子のメリットとしては、磁性体金属内のスピン励起によるため、励起レーザーの波長にほとんど関係なくテラヘルツ電磁波の発生が可能であるという点で、光伝導スイッチと比べて長所といえるであろう。また 50 フェムト秒程度のパルスレーザーを用いれば 20-30THz 程度の帯域を持つテラヘルツ電磁波の発生が可能であることである。

最後に遠赤センターで行われている研究として、テラヘルツ波を使った癌細胞の分光イメージング、ジャイロトロンを用いた高純度アルミナの材料プロセス他、個々の最先端の研究成果について報告があった。

菊池氏の講演では、福井大学における低温テラヘル

ツ物性研究の紹介があった。

まず、福井大学と低温施設の紹介があった。福井大学では最近、国際地域学部が設置され、工学部も 8 学科から 5 学科に改組されるなど改革が進められている。一方、工学部附属超低温物性実験施設は地方大学としては 1、2 の伝統を誇り、2014 年にヘリウム液化機更新を済ませるなど現在も高いパフォーマンスを保っている。昔は液体窒素も製造していたとのことである。

次に、 ^3He - ^4He 希釈冷凍機を用いた超低温高周波 ESR/NMR 二重磁気共鳴装置の開発について紹介があった。物性物理学では超低温域の物性研究が重要であり量子臨界状態の解明などテーマが尽きないが、最近では量子コンピューティングへの応用など実用レベルで超低温開拓への注目が集まっている。この中で核スピンと電子スピンを制御し高感度で検出するため核磁気共鳴 (NMR) と電子スピン共鳴 (ESR) を組み合わせた超低温クライオスタット開発がすすめられた。この温度域ではわずかな熱流入が温度上昇をもたらすためきわめて低いパワーの精密な電波分光技術が必要であり、金薄膜を用いた Fabry-Pérot 共振器などの開発を行ってきた。この共振器は熱収縮でミラー間の距離が変化するため、超低温領域で使用可能なピエゾアクチュエータを用いて可動式とし、それにより共振周波数も可変になっている。この装置を用いて銅を含む有機化合物 $\text{Cu}(\text{C}_4\text{H}_4\text{N}_2)(\text{NO}_2)_2$ の ESR 測定を行い、7 K 以下で 2 つに分裂した ESR スペクトルの温度依存性を得た。分裂したスペクトルは温度低下とともに直線的に増加し、この温度域の温度マーカーとして有用とのことである。超低温域で興味深い現象を示す物質の ESR 測定が可能となり、新しい発見が期待される。

次に、ジャイロトロンを用いた高周波パルス ESR システムの開発について紹介があった。通常の ESR は周波数一定のミリ波を試料に照射し、磁場掃引により共鳴スペクトルを得る。一方、パルス法は一定の共鳴磁場下で所定の短時間ミリ波を試料に照射し、磁化の緩



菊池彦光氏のご講演の質疑応答の様子

和過程を得る手法で、高分解能 NMR、MRI と同じ原理手法である。スピネコー現象を利用して詳細な緩和パラメータを求め、フーリエ変換分光法によって高分解能データの取得が可能になる。ただし、一般に電子スピンの緩和時間は核スピンの比で3ケタ速く、そのため高出力かつ短時間の照射パルスが必要であり、パルス化が困難であった。これに対して Si ウエハーにレーザー光を当てるとホットエレクトロンが形成されて高周波を反射するという、いわゆる光駆動シャッターを利用してジャイロトロンから出てくる高周波を短パルス化することにより、パルス ESR システムが開発された。標準物質の BOPA ラジカルを用いて ESR 測定を行い、自由誘導減衰 (FID) 信号の検出に成功した。今後の進展が楽しみである。

最後に、低温磁性に関する発表があった。三角格子反強磁性体などで見られる電子スピン配列の不安定性をスピンプラストレーションと呼び、多彩な磁性を示すため盛んに研究されている。結晶構造に依存するためスピンプラストレーションを示す物質は限られるが、天然鉱物の中に典型物質が存在することが明らかになった。菊池氏は銅を含む天然鉱物に着目し、日本画の顔料として知られる藍銅鉱 (アズライト、 $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$) 及び孔雀石 (マラカイト) によく似た擬孔雀石 ($\text{Cu}_5(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_4$) の低温磁性研究を行った。アズライトではフラストレーションを持つ量子スピン系に特有な $1/3$ 磁化プラトーと呼ばれる磁性を観測した。擬孔雀石では極低温強磁場下で多段の磁化の飛びを見出した。いずれも量子スピン系を理解するための貴重なデータである。天然鉱物の中には不純物の少ない極めて純良な結晶があり、また容易に人工合成ができないものがある。それらの膨大な研究データが蓄積されているが、物理的性質については研究されていないものが多い。新物質探索のヒントになるのではないかとこのことで活発な質疑応答があった。

講演会終了後、2 班に分かれて施設見学会を行った。



遠赤センター・テラヘルツ時間領域分光装置の見学の様子

遠赤外領域開発研究センターでは、0.2~0.3THz および 1THz 発振用ジャイロトロンをはじめ、フェムト秒レーザー光源を使用する各種テラヘルツ分光装置、遠赤外分子気体レーザー装置などの見学を行い、また超低温物性実験施設では、我が国に数台しか無いというミリ波・サブミリ波ネットワークアナライザーをはじめ、寒剤供給設備や極低温物性試験装置 (ESR 分光装置) の見学を行った。いずれの見学においても見学者からの活発な質問が飛び交い、とても有意義な見学会を開催することができた。



超低温物性実験施設・極低温物性試験装置の見学の様子

講演会・見学会終了後、有志 11 名により恒例の懇親会が JR 福井駅前の居酒屋で開催され、新鮮な海の幸と美酒を肴に会員相互の交流を深めた。

今回は、関西圏外の福井大学での開催ということで、かなりチャレンジングな講演会・見学会であったが、参加者数も 31 名と大変盛況な会であった。

最後に、今回の講演会・見学会の開催にあたり、場所のご提供および見学の企画をして頂きました福井大学遠赤外領域開発センターの皆様、話題のご提供を頂きました講師の先生方にこの場をお借りして厚くお礼を申し上げます。

(大阪大学 村上博成、大阪府立大学 野口 悟)