

## 福井大学における遠赤外ジャイロトロンの開発と応用研究 —これまでとこれから—

斉藤輝雄

福井大学遠赤外領域開発研究センター

遠赤外領域は未開の電磁波領域と言われて久しい。電波領域と可視光領域の間にある遠赤外領域電磁波は、電波的性質として、物質中に透過でき、非電離性で遺伝子を損傷しない。光的性質として、直進性による高精度計測、ミラー系・レンズ系による伝送が可能である。さらに、分子の振動・回転周波数や、強磁場印加下の電子スピン共鳴周波数がこの帯域にあり、新しい物理現象の発見・計測とともに新機能物質の創成につながる研究が期待される。

しかし、学術研究に使える遠赤外光の発生は簡単ではない。後進波管や進行波管も、波長に合う遅波構造の製作は極めて困難である。一方、電子を速波と相互作用させれば遅波構造は不要である。さらに、磁場があれば電子サイクロtron周波数に対応した電磁波が放射される。マグネトロンも磁場中で回転運動する電子からの電磁波放射に基づくが、ジャイロトロンは相対論効果による電子のサイクロtron回転位相の集群が基本原理である。J. L. Hershfield と G. Bekefi (米) は、ジャイロトロンの原理を実験的に検証し、Electron Cyclotron Maser と呼んだ。同じ頃、旧ソ連では A. V. Gapanov, V. A. Fryagin らが Magnetron Injection Gun を用いて周波数 10 GHz の高出力発振に成功し、ジャイロトロンと名付けた。出原は、福井大学の超伝導マグネットの技術基盤を活用し、ジャイロトロンの高周波化で世界をリードしてきた。1984年に 100 GHz を超える発振を示して以来、周波数の世界最高記録を保持し続け[1]、2005 年末には、世界で初めて 1 THz を超えるジャイロトロン発振に成功した[2]。

ジャイロトロンの高周波化の進展に伴い、新しい電磁波源としての応用研究も重要である[3]。福井大学では、ジャイロトロン幅広い学術研究への応用を目指して、連続発振ジャイロトロンを次の課題として研究を進め、さらに進んだ応用研究に対応できるジャイロトロン的高度化研究を実施している[4]。まず、モード変換器をジャイロトロンに内蔵することにより、ガウスビームを放射するジャイロトロンを開発した。また、PID 法による帰還制御系を用いて、数時間以上にわたる出力の安定化を実現した。共振器形状を工夫して後進波発振機構を発現させ、400 GHz 帯において周波数可変幅約 4 GHz を実現した。写真は、ガウスビーム出力を実証した最新のジャイロトロン FU CW GIII である。

ジャイロトロン学術研究への応用例を 2 つ示す。1 つは NMR 分光の超高感度化である。遠赤外領域の電磁波照射により電子スピンをほぼ完全に分極させることが可能であり、電子スピスが核スピンの近くにあると、核スピンのとの相互作用を通してこの分極を核スピんに移すことができる。この結果、NMR 分光の感度を飛躍的に大きくすることが期待される。これを DNP-NMR 法という。この有望な応用は高分子量蛋白質の構造解析であり、世界的な開発競争が起きている。福井大学は大阪大学および英国 Warwick 大学と共同研究を進め、感度向上率 60 倍を達成し、さらに 500 倍の見通しを得ている[5]。

もう 1 つ、素粒子物理学への応用例を示す。電子と陽電子からなる「最小原子」ポジトロニウムには両粒子のスピスが同方向のオルソ状態と反対方向のパラ状態があるが、両状態のエネルギー準位差には間接的手法による計測値と量子電気力学による理論値の間に有意差がある。この直接計測は極めて重要である。東京大学のグループは福井大学の高出力遠赤外ジャイロトロンを用いてこの課題に挑戦し、最近、世界で初めての直接計測に成功した[6]。

講演では、高出力遠赤外光を用いる先導的学術研究や国際的研究拠点としての今後の方向性も示したい。

[1] T. Idehara et al., IEEE Trans. Plasma Sci. **27**, 340 (1999).

[2] T. Idehara et al., Int. J. Infrared Milli Waves **27**, 319 (2006).

[3] T. Idehara, S P. Sabchevski, J. Infrared Milli Terahz Waves **33**, 667 (2012).

[4] T. Saito et al., Phys. Plasmas **19**, 063106 (2012), Y. Tatematsu et al., J. Infrared Milli Terahz Waves **35**, 169 (2014), Plasma Fusion Res. **9**, 1206058 (2014), Y. Yamaguchi et al., Nucl. Fusion **54**, No.11 (2014) など。

[5] Y. Matsuki et al., J. Mag. Res. **225**, 1 (2012).

[6] T. Yamazaki et al., Phys. Rev. Lett. **108**, 253401 (2012), A. Miyazaki et al., J. Infrared Milli Terahz Waves **35**, 91 (2014).



Gyrotron FU CW GIII