

【学位論文審査の要旨】

1 研究の目的

無線通信技術の急速な進歩と普及により、通信の高速大容量化のニーズが高まるとともに、搬送波の高周波化が進み、ミリ波（30—300 GHz）、テラヘルツ波（0.1—10 THz）（以下、これらを超高周波と呼ぶ）を利用した無線通信の技術開発が進められている。また、超高周波のイメージングやセキュリティ技術への応用も進んでいる。これにともない、超高周波の電磁界が人体の健康に与える影響について関心が高まっている。

超高周波を含む高周波数帯では、電磁エネルギーの吸収にともなう加熱によって生じる熱作用の存在が確立されている。一方で、熱以外のメカニズムによる非熱作用のモデルは諸説あり、明確に定義されておらず、報告されている実験結果にも一貫性がない。このような不一致の原因の一つは、実験におけるばく露条件が明確でないことであり、周波数依存性を含む非熱作用の有無に関する考察に適したばく露方法の確立と、ばく露条件の正確な定量化が必要である。

先行研究における細胞用超高周波ばく露装置では、ホーンアンテナあるいは開放終端導波管を用いて培養容器底面から照射する方法が主に使われている。この場合、培養容器とアンテナ開口面との離隔距離を大きくするほど、細胞の存在する位置における入射電磁界の空間分布が均一になる一方で、ばく露の効率は低下する。ばく露の効率と均一性の点において、最適な離隔距離はアンテナのフレネル領域にあることが示されている。しかし、この場合の問題点は、効率が十分に高くないことに加えて、ばく露量がサブミリメートル単位のアンテナ位置の精度で変動することである。

本研究の目的は、超高周波電磁界が生体に与える影響を調べるための、高精度な細胞実験用ばく露装置を確立すること、またその装置のばく露評価を高精度に行うことである。使用周波数は、早期の実用化が見込まれている 40, 60, 120, 300 GHz である。

2 研究の方法と結果

本研究で開発したばく露装置は、自由空間を超高周波が伝搬する放射型ばく露装置と、細胞培養液の温度制御が可能な漏れ波型ばく露装置である。放射型ばく露装置としては、培養容器の下部へインピーダンス整合層を挿入した新たな放射型 60 GHz 超高周波ばく露装置と、放物面鏡を用いた周波数 300 GHz の超高周波ばく露装置を開発した。放射型 60 GHz 超高周波ばく露装置では、従来の装置に比べて高効率のばく露と、細胞の存在する面内でのばく露量の十分な均一性を実現した。アンテナと培養容器の距離が十分に離れていない放射型ばく露装置で問題となる多重反射に対して、空気と培養容器表面との境界におけるインピーダンス整合層の効果を示した。インピーダンス整合層により、アンテナ位置の精度の要求を低減でき、また高効率のばく露を実現できることを示した。300GHz のばく露装置は、この周波数で行われた実験の先例がなく、新たな装置である。

放射型ばく露装置は、効率を犠牲にして培養容器底面に一様な平面波を照射しても、培

培養容器の端部での散乱波と入射波の干渉により、培地内でリップル状の不均一を生じることが避けられない。また、効率のよい温度制御が困難である。そこで本研究では、全く新しい方法による、漏れ波型ばく露装置を考案した。このばく露装置は、ポスト壁導波路の技術を応用して、プリント基板内を伝搬する超高周波を結合窓から漏洩させ、基板上に置かれた培養容器底面から超高周波を照射するもので、培地内に吸収される電力の効率が高い特長に加えて、プリント基板を介して直接に培養容器の温度制御を行うことができる特長を有する。加工精度の限界のために、300GHz では適用できないが、本研究ではこの方式により、温度上昇 0.5°C以下を維持しつつ、40, 60, 120 GHz において十分な強度でのばく露を実現した。また、実験および熱解析により、ヒートシンクやペルチェ素子などの放熱素子の取り付けによる温度制御の効果を示した。

本研究で開発した漏れ波型ばく露装置は、ばく露の均一性については必ずしも十分高いとはいえない。しかし、多数の結合窓から培養容器にランダムな位相の電波が多数重畳して照射されるために、振幅の統計的な特性が周波数によらず一定となることから、周波数を変化させても、統計的に同等のばく露特性が得られるというこれまでの装置にはない特長を有する。すなわち、このばく露装置は、非熱作用の周波数依存性を評価するための、有効な手段となることを明らかにした。

本研究で開発した、これらのばく露装置は、京都大学との共同研究により、細胞ばく露実験に使用され、その有効性が確認されている。

3 審査の結果

本論文では、今後実用化が見込まれる、超高周波電磁界の生体作用について、細胞レベルで検討を行うためのばく露装置を開発し、数値解析及び実験により、高精度なばく露評価を行っている。また、開発したばく露装置は、共同研究により細胞実験に用いられ、再現性の高い実験を行うことができることが確認されている。開発したばく露装置の有用性に加えて、漏れ波型ばく露装置はこれまでにない方式のものであり、ばく露効率の高さや効果的な温度制御に加えて、ばく露量の統計的な分布が周波数にほとんど依存しないことから、培養容器内の細胞全体を評価対象とすることにより、周波数依存性の詳細な評価ができるという、従来のばく露装置にはない特長を有することを明らかにしている。これらの成果は、超高周波電磁界の生体作用研究のための有用な手段を与えるものであり、超高周波技術の今後の健全な発展に向けて必要な、人体防護ガイドラインを示す根拠を与える上で、寄与するところの大きな成果である。なお、本論文の内容の大部分は、すでに国内外で開催された国際会議で口頭発表されるとともに、関連分野の学術論文誌に論文として公開されている。よって本論文は、博士（工学）の学位を授与するに値するものと判定した。

4 最終試験の結果

本学の学位規定に従って試験及び試問を行った。さらに 2016 年 1 月 30 日に公開の論文発表会を開催して、学内外から多数の出席者を得て多角的な討論を行った。また、審査員全員による筆答及び口頭の試験を実施した。これらの結果を総合的に考慮し、慎重に審査した結果、合格と判定した。