

氏 名	シイナ タケオ 椎名 健雄
所 属	理工学研究科 電気電子工学専攻
学 位 の 種 類	博士（工学）
学 位 記 番 号	理工博 第 201 号
学位授与の日付	平成 28 年 3 月 25 日
課程・論文の別	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題名	超高周波の電波ばく露装置およびばく露評価に関する研究
論文審査委員	主査 教 授 多氣 昌生 委員 教 授 須原 理彦 委員 准教授 鈴木 敬久

【論文の内容の要旨】

本文

ブロードバンドやスマートフォンの急速な普及とともに搬送波の高周波化が進んでおり、イメージングやセキュリティ技術へのミリ波（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）の応用が進められている。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。電磁界の安全性、医療応用、バイオ・生体分析の観点から、生体への電波照射（ばく露）については多くの研究が実施されている。

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、明確に定義されていない。例えば、Fröhlich は、1970 年代に、超高周波が生体膜上での振動と結合するコヒーレントな振動の励起の存在を理論的な仮説として示した。Fröhlich の仮説を背景とし、Grundler らは、周波数 41 GHz 付近の微弱な超高周波が、イースト菌や大腸菌の増殖機能に周波数依存的に影響することを実験的に示し、同様の現象を繰り返し確認した。一方、Furia らが行った再現実験では、周波数依存性が見られなかった。しかし、これらのばく露条件は明確でなく、周波数依存性を含む非熱作用の有無への考察に適したばく露方法の確立と、ばく露条件の精確な定量化が必要である。

生体作用は、ばく露強度に依存する。熱作用には閾値があるが、非熱作用については、強度の窓があるといわれている。身のまわりの電磁界の強度については、国際非電離放射線防護委員会（ICNIRP）等により、国際的な人体防護ガイドラインが示されており、各国

での規制があるため、ガイドラインの指針値と同程度（超高周波では 20 mW/cm^2 ）までの比較的大きな強度の超高周波に、人体がばく露される可能性がある。しかし、高出力が得られる超高周波の波源は普及していないため、入力電力に対するばく露量の効率が重要である。また、細胞への熱作用を抑制するために、比較的高強度のばく露に対しても、電磁エネルギーの吸収による温度上昇は、細胞培養液内で 0.5°C 程度以下にする必要がある。

先行研究における超高周波ばく露装置の放射源として、ホーンアンテナと開放終端導波管が使われている。培養容器とアンテナ開口面の間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放射電磁界の空間分布がより均一になる一方で、ばく露強度の効率は低下する。ばく露強度の効率と均一性の点において、周波数 60 GHz での最適な離隔距離はアンテナの近傍界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、アンテナと培養容器の間の定在波が影響し、アンテナ位置の精度がミリ単位で要求されることである。また、これらの装置には、解析モデルの規模が膨大になること、また、培地の温度制御が困難になるという問題点もある。

本研究の目的は、超高周波帯電波が生体に与える影響を調べるための、高精度な細胞実験方法を確立することである。強度依存性を調べるために、入力電力に対する高い吸収電力効率を得る装置、高強度ばく露で生じる熱を培地内から逃がす装置を確立する。使用周波数は、早期の実用化が見込まれている $40, 60, 120, 300 \text{ GHz}$ である。

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、高効率のばく露と、細胞の存在する面内での十分な強度の均一性を実現した。アンテナと培養容器の距離が十分でない放射型ばく露装置で問題となる多重反射に対して、培養容器と空気のインピーダンスを整合させ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、数値解析モデルが培養容器と入射界のみで表現できることを示した。開発した放射型ばく露装置は、周波数 300 GHz でも、高い吸収電力の効率が得られ、波源の出力が低いときも公衆を対象とした一般環境の指針値と同程度のばく露量を得ることができた。

漏れ波型ばく露装置は、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て培養容器に照射する、これまでにない方式の装置である。この装置は、培地内に吸収される電力の効率が高く、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。温度上昇 0.5°C 以下を維持し、指針値以上の強度が得られた。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、上記に加えて、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、

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である。この特長により、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。

本研究で開発した、これらの装置は、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。

以下に本論文の章構成を示す。

第1章は序論として、本研究の目的及び位置づけを示した。

第2章では、超高周波のばく露装置開発の全体像を示した。まず、超高周波の生体影響の研究から得られた知見と国内外の人体防護ガイドラインをまとめ、非熱作用の評価の考え方と超高周波ばく露装置の開発に必要な性能を整理した。さらに具体的な性能は、過去の超高周波ばく露装置の研究を整理し、強度、一様性の評価指標と数値目標を示した。最後に、本論文の超高周波ばく露装置の主な解析手法を整理した。

第3章では、放射型ばく露装置の構成とばく露評価、従来の超高周波ばく露装置との比較について述べた。数値解析により、ばく露特性についての効率、ばく露の一様性を定量的に示した。放射型ばく露装置の問題点としてアンテナと培養容器の間の多重反射による影響とインピーダンス整合による解決法を示した。

第4章では、漏れ波型ばく露装置の構成と、数値解析と実測によるばく露評価、放射型ばく露装置との特性の比較について述べた。一定の温度上昇を超えない範囲でのばく露強度を、超高周波数帯に対してそれぞれ示し、漏れ波型ばく露装置の有効な周波数範囲についてまとめた。

第5章では、第6章で議論する周波数依存性のため、周波数 60 GHz 近傍での漏れ波型ばく露装置の詳細なばく露特性を定量的に議論した。

第6章では、周波数依存性の非熱作用の有無の考察に対して、漏れ波型ばく露装置の有効性を示した。

第7章では、ばく露装置の応用として、ラットへの動物ばく露実験装置などの応用例を示し、有効性を示した。

第8章では、本研究で得られた知見を総括し、今後の展望と課題を整理した。