



TITLE:

Study on Beltrami Fields with Parallel Electric and Magnetic Fields at Microwave Frequencies(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

Mochizuki, Ryo

CITATION:

Mochizuki, Ryo. Study on Beltrami Fields with Parallel Electric and Magnetic Fields at Microwave Frequencies. 京都大学, 2023, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2023-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k24584>

RIGHT:

学位規則第9条第2項により要約公開; 許諾条件により要約は2024-03-01に公開; • Time-Harmonic Electromagnetic Fields with $E \parallel B$ Represented by Superposing Two Counter-Propagating Beltrami Fields Progress In Electromagnetics Research M, vol. 104, pp. 171-184, 2021. DOI:10.2528/PIERM21071603 • Zero Poynting vector $E \parallel H$ Beltrami field cylindrical cavity resonators AIP Advances, vol. 12, pp. 075314, 2022. DOI:10.1063/5.0100710

京都大学	博士 (工学)	氏名	望月 諒
論文題目	Study on Beltrami Fields with Parallel Electric and Magnetic Fields at Microwave Frequencies		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、マイクロ波帯における電場と磁場が平行なベルトラミ場の実現に向けた理論および数値的研究についてまとめたものである。具体的には単一周波数で振動する電場と磁場が平行($E H$)なベルトラミ場の一般解の導出と閉空間内に $E H$ ベルトラミ場を閉じ込めるための共振器の実装方法についてまとめてあり、全5章から構成される。</p> <p>第1章では、マイクロ波、ベルトラミ場および $E H$ 場の歴史や先行研究と研究動機・目的・課題についてまとめられている。$E H$ 場のマイクロ波帯での実現は新たなマイクロ波応用の開拓に繋がりをうるために意義深く本研究の動機となっている。そしてマイクロ波帯における $E H$ ベルトラミ場の実現には a)$E H$ ベルトラミ場の一般解の導出と b)$E H$ ベルトラミ場の閉空間への閉じ込めが課題である。課題 a)と b)の解決を通して、マイクロ波帯における $E H$ ベルトラミ場の実現可能性を示すことが本研究の目的である。</p> <p>第2章では、従来未解決であった単一周波数で正弦波振動する $E H$ 場の一般解を導出することで、課題 a)を解決した。本章では1組の適当なベクトル場 v とスカラ場 f を用いて $E H$ 場における電場 E と磁場 H を書き表した。単一周波数で正弦波振動する $E H$ 場はスカラ場 f の時間依存性によって Case I または Case II に分類可能である。Case I $E H$ 場はベルトラミ場でもある。ベクトル場 v はヘルムホルツ方程式の解であることから、ヘルムホルツ方程式の解の積分表示を利用することで、Case I $E H$ 場の一般解を導出できる。さらに、Case I $E H$ 場の一般解はさまざまな方向に進む同一巡回方向の円偏波の重ね合わせであるという物理的解釈を得る。Case II $E H$ 場は非ベルトラミ場である。Case II $E H$ 場では v は2次元ラプラス方程式の解であることから、正則関数と2次元ラプラス方程式の関係を利用し、Case II $E H$ 場の一般解を導出できる。Case II $E H$ 場の一般解は互いに逆向きに進行する巡回方向の異なる2つの平面ベルトラミ場の重ね合わせで得られるという物理的解釈を得た。</p> <p>第3章では、$E H$ ベルトラミ場を閉じ込める半波長円筒空洞共振器を提案することで、第1章で提示した課題 b)の解決方法を与えた。まず第2章で導出した Case I $E H$ ベルトラミ場の一般解を円筒座標系に適用することで、軸対称的な $E H$ ベルトラミ場を得る。その $E H$ ベルトラミ場は通常の導体壁で囲まれた円筒空洞共振器内には発生不可能である。そこで $E H$ 場と両立可能な共振器側面と端部における境界条件を与える。側面においては共振器縦断方向の電場と磁場を共にゼロにする特殊な境界条件 longitudinal electromagnetic conductor (LEMC)が必要である。端部においては周方向の電場と磁場を共にゼロにする特殊な境界条件 circumferential electromagnetic conductor (CEMC)が必要である。LEMC は周方向に配置されたコルゲーションを備えた円筒導波管によって実装される。さらに CEMC は同心的に配置された円形フィンによって実装される。そして LEMC と CEMC を備えた半波長円筒空洞共振器を設計し、設計した共振器には電場と磁場が時間・空間的に平行な共振モードが発生することを数値的に証明した。さらに、提案した共振器では電気および磁気エネルギー密度の空間分布が一致し複素ポインティングベクトルの虚部がゼロになるという通常の円筒空洞共振器には起こり得ない特異性質を持つことを数値的に示した。</p> <p>第4章では、第3章で提案した半波長円筒空洞共振器を発展させることで励振機構を</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	望月 諒
<p>備えた四分の一波長円筒空洞共振器の実装方法を与えた。第3章で提案した半波長円筒空洞共振器は外部系からの孤立を仮定したが、実際の利用には外部回路との結合による共振器の励振機構が不可欠である。そこで、共振器と TM および TE モード給電導波管を独立に結合させ、共振器内部で TM および TE モードを合成することで軸対称 E H ベルトラミ場を励振した。そのために新たに特殊な端部境界条件 radial electromagnetic conductor (REMC)を導入した。REMC は径方向の電場と磁場を共にゼロにする端部における特殊な境界条件であり、軸対称的に配置された放射状フィンによって実装される。提案する共振器は、四分の一波長 LEMC の両端を CEMC と REMC で終端することで実装される。提案共振器は CEMC 端部の底部に設けられた弧状スロットを介して TM モード給電導波管と結合し、REMC 端部の底部に設けられた放射状スロットを介して TE モード給電導波管と結合する。TM および TE 共振モードの蓄積エネルギーが一致する時 E H ベルトラミ場が生成されることから、E H となるための TM と TE の結合係数に関する条件を電磁界理論および回路理論的に導出した。そして E H 条件を満たす TM および TE の結合係数を備えた共振器を複数設計し、いずれの共振器でも E H 場が励振されることを数値的に確認し、実現できることを示した。このことから励振機構を含む提案した四分の一波長共振器の実装・設計手法の妥当性が確認された。</p> <p>第5章は結論であり、本研究で得られた成果と今後の課題について述べられている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文はマイクロ波帯における電場と磁場が平行(E||H)な電磁ベルトラミ場の実現に向けた理論および数値的研究についてまとめたものである。本論文で得られた主な成果は以下の通りである。

1. 従来未導出であった単一周波数で正弦波振動する E||H 場の一般解を数学的に導出した。単一周波数 E||H 場は E と H の比例係数関数の時間依存性によって 2 つのクラスに分類されることを示し、各クラスにおいて適切な手法で E||H 場の一般解を導出した。1 つ目のクラス(Case I)の E||H 場はベルトラミ場である。Case I E||H 場ではヘルムホルツ方程式の解の積分表示を利用することで積分表示の E||H 場の一般解を得た。この一般解を利用することで、未発見の E||H 場の一例を得た。2 つ目のクラス(Case II)の E||H 場はベルトラミ場ではない。Case II E||H 場では正則関数の性質を利用することで E||H 場の一般解を得た。
2. 軸対称な E||H 場を閉じ込める半波長円筒空洞共振器を提案した。E||H ベルトラミ場は通常の導体壁境界条件とは矛盾することが過去に指摘されており、閉空間では E||H 場は存在不可能であると考えられていた。しかし、本論文では共振器側面と端部において E||H ベルトラミ場と両立する特殊な境界条件として longitudinal electromagnetic conductor(LEMC)および circumferential electromagnetic conductor (CEMC)をそれぞれ提案した。LEMC は電場と磁場の縦断面方向成分を共にゼロにする特殊な境界条件で、CEMC は電場と磁場の周方向成分を共にゼロにする特殊な境界条件である。LEMC と CEMC は周方向に配置されたコルゲーションを備えた円筒導波管と同心円的に配置された円形フィンによってそれぞれ実装可能であることを示した。そして、LEMC および CEMC を備えた半波長円筒空洞共振器を設計し、設計した空洞共振器内に E||H 場が発生することを数値シミュレーションで証明した。さらに、従来の共振器にはない電気および磁気エネルギー密度の空間分布の一致およびポインティングベクトルゼロの特異性質を確認した。
3. E||H 場を閉じ込める円筒空洞共振器の現実的な実装方法を提示した。上述の円筒空洞共振器は外部系からの孤立を仮定したが、実際の利用には外部回路との結合による共振器の励振機構が不可欠である。本章では特殊な端部境界条件として radial electromagnetic conductor (REMC)を新たに提案した。REMC は径方向の電場と磁場を共にゼロにする境界条件であり軸対称に配置された放射状フィンによって実装される。外部回路との結合スロットを備えた CEMC および REMC 端部によって励振機構を実現した。そして E||H 場を発生させるための結合係数に関する条件を回路理論的に導いた。E||H 場発生条件を満たす LEMC, CEMC および REMC を備えた円筒空洞共振器を複数設計し、いずれの共振器内にも E||H 場が発生することを数値シミュレーションで証明した。

本論文で得られた成果は学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和5年1月16日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規定第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際して、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。