別紙様式８

研　究　主　論　文　抄　録

論文題目　　　　マイクロ波伝送線路における損失の数値計算法に関する研究
（ A Study of the numerical method for the loss on the microwave transmission lines ）

熊本大学大学院自然科学研究科　　情報電気電子工学専攻　　先端情報通信工学講座
（ 主任指導　　松島　章　　教授 ）

論文提出者　　　松木　誠
（by　Makoto Matsuki ）

主論文要旨

長方形断面をもつ導体線路は，MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit，モノリシックマイクロ波集積回路）において一般的に用いられており，その特性インピーダンスや減衰定数に関する公式が提案されてきた．近年，ディジタル信号処理の高速化が進んでおり，伝送線路の表皮効果および近接効果に起因する導体損，誘電体損などの伝送損失の上昇が問題となっている．これに伴い，回路設計において，従来の回路シミュレータなどに組み込まれている設計公式が無視できない誤差を含むようになっている．回路における信号の品質を維持するために，線路の単位長当りのインピーダンスを正確に評価することが回路設計において必要とされている．そのためこれらの特性を定量的に見積もることができると同時に，ディジタル信号の広帯域な周波数領域をカバーできる計算手法の開発が望まれている．この目的のために，計算電磁気学に基づいた数値手法の開発が高い関心を集めてきた．特に，基本構造である孤立長方形導体に関する問題は，解析的取り扱い，実測，および数値計算の各観点から議論されてきた．しかしながら，各手法による結果を比較検討する取り組みは十分になされていない．さらにこれまで提案されてきた手法は，扱える構造に制限があり，線路が孤立導体の場合や支持部に損失のない誘電体基板を用いる場合に限られる．損失のある誘電体基板に流れるうず電流による等価的な抵抗の上昇がマイクロ波帯で顕著となることを考えれば，損失誘電体基板をもつ多線条線路の問題に対応するように積分方程式法を拡張しなければならない．

以上の観点から，本論文では，長方形断面をもつ導体線路のインピーダンスを計算する手段として，積分方程式を用いた精密な数値解析法について述べる．

第 1 章は序論であり，本研究の背景，研究の現状，並びに本論文の構成について述べる．

第 2 章では，長方形断面をもつ孤立導体線路に関する基本理論の研究と有効性の検証を行う．この問題は，まず長方形断面導体を流れる電流密度を未知関数とする第 2 種フレドホルム形積分方程式を解くことに帰着される．次に導体断面を長方形の小領域に分割し，

パルス関数を基底関数および試験関数に用いたモーメント法を積分方程式に適用し，導体内の電流密度が満たすべき連立 1 次方程式を導く．数値計算の効率化を図るため，表皮効果を考慮した不均等グリッドを採用し，電流密度が大きくなる導体の表面および端点付近において細かい分割を行う．マイクロ波領域における物理量の特性を検証するために，単位長当りのインピーダンスの周波数特性および孤立導体内の電流密度に関する計算を行う．単位長当りの抵抗に関して，実験データをカーブフィットして得られた公式，並びに等角写像法と摂動法に基づく高周波漸近公式による結果と比較することにより，本手法の有効性を示す．また電流密度に関して，ディリクレ境界条件に基づく級数解による結果との比較を行い，本手法が物理的に正しい解を与えることを確認する．

第 3 章では，損失誘電体基板を装荷した多線条線路に対応するように第 2 章の手法を拡張し，線路インピーダンスの特性を詳細に調べる．第 2 種フレドホルム形積分方程式のモーメント法による数値解について議論する際に，導体線路を複数個とし，さらに半無限基板の影響を取り入れて，孤立導体線路の解析を一般化した形とする．半無限基板の影響は，積分方程式の核関数に対数形の補正項を加えることにより取り入れることができる．補正項に含まれるゾンマーフェルト積分は，特殊関数であるシュトルーベ関数およびノイマン関数によって解析的に評価される．数値計算では，マイクロ波領域における単位長当りのインピーダンスに関して，周波数および線路パラメータに対する依存性を詳細に調べる．エネルギー保存則が数値的に成立していること，および実測値や電磁界シミュレータによる結果と合致していることを示し，本手法の有効性を実証する．さらに，得られた線路インピーダンスに基づいてディジタル信号の時間応答波形を計算することにより，シグナルインテグリティの取り組みへの発展性にも言及する．

第 4 章は結論であり，本研究の結果をまとめている．

本論文では，孤立導体線路および損失誘電体基板を装荷した多線条線路に関する問題を取り上げ，積分方程式法およびモーメント法による解法理論を展開した．数値計算において，マイクロ波帯における物理量に関して，周波数および線路パラメータに対する依存性を詳細に検討した．他文献との結果の比較により本手法の有効性を確認した．