

学位論文題名

ミリ波帯電波の降雨伝搬特性に関する実験的研究

学位論文内容の要旨

社会経済活動における高度情報化の動きに伴い、電波利用の増大には著しいものがあり、周波数利用は拡大の一途をたどっている。増大、多様化、高度化する電波需要に応えるには新周波数帯であるミリ波帯電波の開拓が重要な課題になっている。新周波数帯の開拓には装置開発と並んで電波伝搬特性に関する基礎的研究が不可欠になる。特にミリ波帯では降雨により大きな減衰を被るため、その特性の解明と評価法の確立が不可欠である。しかし本研究以前にはミリ波帯全域を対象とした降雨減衰特性に関する実験的研究は見あたらなかった。このような背景を踏まえて、本論文ではミリ波帯全域を対象とした降雨減衰特性に関する実験研究を行い、その成果を取りまとめている。本論文は全7章から構成されている。

第1章は総論であり、上述した本研究の背景、意義と位置づけ、本論文全体の構成について述べている。第2章～第5章は本論文の中核部分であり、ミリ波帯降雨減衰特性の研究結果について述べている。第6章においては、降雨以外の降水現象として降雪と霧の影響についての研究結果を述べている。第7章は本論文のまとめである。以下、第2章以降の各章の概要をまとめて示す。

第2章においては、降雨伝搬の基礎理論を整理・考察し、ミリ波帯降雨減衰特性を解明する上での課題を明確にしている。理論的には、降雨減衰は雨滴による電波の前方散乱振幅を伝搬路平均雨滴粒径分布の重み付けをして雨滴直径に関して積分したものとして与えられる。雨滴による電波の前方散乱振幅は理論的に既知なので、伝搬路平均雨滴粒径分布が分かれば、原理的に任意周波数の降雨減衰が計算できる。一方、ミリ波帯降雨減衰特性は雨滴粒径分布の仮定に大きく依存する。以上の理論的考察により、ミリ波帯降雨減衰特性を解明する課題の核心は、伝搬路上の雨滴粒径分布特性を解明することに帰着することが明確になる。

第3章においては第2章における考察結果を踏まえて、伝搬路平均雨滴粒径分布を求める方法を検討している。まず、直接測定法と電波伝搬特性の測定データを逆変換することにより伝搬路平均雨滴粒径分布を推定する方法を検討し、本研究の目的には後者の方法が適していることを示す。さらにその具体的な方法の一つとして、負指数関数型の試験関数を仮定する方法を提案する。提案した手法の適用性を実験的に検証するために、1.3kmの伝搬路に11.5GHz、34.5GHz、81.8GHzの多周波数電波伝搬実験装置と降雨測定装置からなる実験システムを導入する。同実験システムにより測定された、典型的な強降雨イベント時における伝搬実験データを用い、伝搬路平均雨滴粒径分布の推定を試み、その有効性を明らかにする。この結果、多周波数の伝搬実験システムを用いた伝搬路平均雨滴粒径分布の推定法が確立される。

第4章においては、第3章で確立された伝搬路平均雨滴粒径分布推定法を統計的な実験データへ適用することを試みている。即ち、11.5GHz、34.5GHz、81.8GHzにおける降雨減衰累積分布の等累積確率値に適用し、累積確率毎に伝搬路平均雨滴粒径分布を推定する。この結果を用いて対応する累積確率における任意周波数の降雨減衰を推定（降雨減衰分布の周波数スケーリング）し、その結果が少なくとも100GHz程度までの周波数領域で有効であることを示す。この検討の過程で、実験に用いた1.3km程度の短距離伝搬路では、空間的に一様な降雨モデル（一様降雨モデル）を仮定し得ることがわかるので、得られた伝搬路平均雨滴粒径分布から、単位伝搬路長当たりの降雨減衰に相当する降雨減衰係数をミリ波帯周波数の全域にわたって推定する。この降雨減衰係数モデルを、最近国内外で得られているミリ波帯全域での降雨減衰データと比較することにより、その適用性を明らかにする。この結果、我が国においてミリ波帯全域で精度よく適用可能な降雨減衰係数モデルが確立される。

第5章においては、降雨減衰特性に影響を及ぼす可能性のあるもう一つの因子である、降雨の空間的不均一性の影響について検討を加えている。検討においてはまず、広い範囲の降雨条件、伝搬路長を仮定して、一般性のある条件下での数値的検討を行い、降雨強度と降雨減衰係数の間にある非線形な関係の取り扱い方が、降雨減衰分布の推定における降雨の空間的不均一性の影響評価に誤差を生じる可能性のあることを示す。しかし、近年期待の高まっている1km程度以下の伝搬路長での各種のミリ波利用を想定すると、このような短距離伝搬路では、降雨の空間的不均一性の取り扱い方の詳細とはほぼ無関係に、一様降雨モデルによって大きな誤差なく降雨減衰分布を推定できることを、推定法に関する数値的検討と伝搬実験データの両方を用いて示す。即ち、1km程度以下の伝搬路におけるミリ波帯の任意周波数の降雨減衰分布は、第4章で導いた降雨減衰係数モデルを用いれば一様降雨モデルに基づき容易に推定可能であることが示される。

第6章においては、降雨以外の降水の代表として降雪と霧の影響について実験データに基づく検討を行っている。伝搬モデルとの比較の観点と、降雪や霧の減衰が降雨減衰を含む伝搬減衰の累積分布に及ぼす影響を明らかにする観点からのものである。検討の結果として、伝搬減衰の累積分布は事実上、降雨減衰により決定されることが示される。

第7章においては、第2章から第6章の各章の研究結果を取りまとめるとともに、これらの研究の結果として、ミリ波帯電波が大気中を伝搬する際に被る降水現象の影響が明らかになり、ミリ波帯全域における降雨減衰特性の評価法が確立されたことを結論している。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 伊 藤 精 彦
副 査 教 授 小 柴 正 則
副 査 教 授 小 川 恭 孝
副 査 教 授 宮 永 喜 一

学 位 論 文 題 名

ミリ波帯電波の降雨伝搬特性に関する実験的研究

本論文は、新周波数帯であるミリ波帯電波の利用を図る上で大きな問題になる降雨減衰特性とその評価法を実験的に研究し、その成果をまとめたものである。

近年における社会の高度情報化の動きに伴い、電波周波数の利用は拡大の一途をたどっており、これに対応するために新周波数帯であるミリ波帯電波の開拓が重要な課題になっている。電波伝搬特性の解明は新周波数帯開拓の基礎になるが、ミリ波帯においては特に大きな影響のある降雨減衰特性の解明と評価法の確立が不可欠である。しかし本研究以前には、ミリ波帯降雨減衰特性に関する研究は散発的で、ミリ波帯全域を対象とした実験的研究は見あたらなかった。

ミリ波帯では、降雨減衰特性が雨滴粒径分布に顕著に依存する大きな特徴がある。従って、実際の電波伝搬路上における雨滴粒径分布特性を把握し、それに基づいてミリ波帯降雨減衰特性を解明し減衰評価法を確立することが重要になる。

本論文ではこのような問題に対し、ミリ波帯降雨減衰特性と雨滴粒径分布の理論的關係を明確にした後、多周波数の電波伝搬実験データを逆変換することにより伝搬路平均雨滴粒径分布を推定する方法を提案し、その有効性を実験的に示した。さらにこの方法を降雨減衰累積分布に適用し伝搬路平均雨滴粒径分布モデルを導き、これを用いてミリ波帯降雨減衰係数モデルを求め、その有効性を示した。さらに降雨の空間的不均一性の影響について検討し、近年各種のミリ波利用が期待されている短距離伝搬路では、その影響は小さいことを示し、従って、上述の降雨減衰係数モデルを用いれば一様降雨モデルにより降雨強度分布データから降雨減衰分布を容易に推定できることを明らかにした。さらに降雪、霧の影響を実験的に検討し、その影響は無視できる程度であることを明らかにした。以下に本論文の構成を示す。

第1章では、本論文の背景、意義と位置づけ、本論文全体の構成について述べた。

第2章では、降雨伝搬特性は理論的に雨滴の前方散乱振幅と伝搬路平均雨滴粒径分布の積を粒径積分したものとして表現されること、従って、降雨減衰特性の解明は電波伝搬路上の雨滴粒径分布特性を解明することに帰着することを明確にした。

第3章では、伝搬路平均雨滴粒径分布として負指数関数型の試験関数を仮定する伝搬路平均雨滴粒径分布推定法を提案し、1.3kmの伝搬路で11.5GHz、34.5GHz、81.8GHzにおいて測定された典型的な強降雨イベント時の伝搬実験データを用い、伝搬路平均雨滴粒径分布の推定を試み、その有効性を示した。

第4章では、第3章で得られた伝搬路平均雨滴粒径分布推定法を上述の伝搬路で測定された降雨減衰分布の等累積確率値に適用し、伝搬路平均雨滴粒径分布の推定を介して任意周波数の降雨減衰累積分布を推定する方法がミリ波帯で有効であることを示した。さらに伝搬路平均雨滴粒径分布をモデル化し、これに基づきミリ波帯の降雨減衰係数を推定し、これをミリ波帯降雨減衰係数モデルとして提案した。最近国内外で得られたミリ波帯降雨減衰データとの比較により、上述の降雨減衰係数モデルは、我が国においてミリ波帯全域で精度よく適用できることを示した。

第5章では、降雨減衰に及ぼす降雨の空間的不均一性の影響について検討を行った。その影響は、降雨強度と降雨減衰係数の間にある非線形な関係の取り扱い方の問題や降雨の空間的不均一性が有する地域性などの問題があり複雑な様相を呈するが、近年各種のミリ波利用が着目されている1km程度以下の短距離伝搬路という条件においては、その影響は小さく、降雨減衰分布の推定に一様降雨モデルを適用できることを示した。即ち、短距離伝搬路におけるミリ波帯降雨減衰分布は、降雨強度分布データに第4章で導いた降雨減衰係数モデルを適用することにより容易に推定できることを示した。

第6章では、降雪と霧の影響について伝搬モデルとの比較、及び伝搬減衰統計への影響の観点から実験的検討を行った。その結果、降雨、降雪、霧を総合した伝搬減衰の累積分布は、実質的に降雨減衰により決定され、降雪及び霧の影響はミリ波帯においても無視できる程度であることを示した。

第7章では、本論文の結論を述べ、論文全体の成果を要約した。

これを要するに、著者は、ミリ波帯電波が大気中を伝搬する際に被る降水現象の影響を明らかにし、ミリ波帯全域における降雨減衰特性の評価法を確立したものであり、電波伝搬工学の分野に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。