

論文内容の要旨

論文題目：包括的な地上観測に基づく植生域地表面のマイクロ波放射伝達モデルの開発
Development of a microwave radiative transfer model for vegetated land surface based on comprehensive in-situ observations.

氏名： 藤井 秀幸

衛星マイクロ波リモートセンシングは、全球規模の水文量のモニタリングに有効な手段である。とりわけ、受動型センサーであるマイクロ波放射計は、高い頻度でデータを取得でき、多周波・多偏波観測が容易である特長を有する。計測対象の放射伝達特性に基づいて、適切な周波数・偏波を選択することにより、輝度温度の観測値から、様々な水文量の推定が可能である。従来、海洋における水文量の推定に利用されてきたが、土壌水分や積雪量などの陸域の地表面水文量の推定にも利用されている。ところが、陸域に広く分布する植生については、マイクロ波放射計を用いた水分量推定の議論は少ない。植生は直接的・間接的に水循環に大きくかかわる水文量である。また、植生水分量をも含む地表面状態を把握することは、陸域の降水リモートセンシングにおいて必要不可欠である。降水リモートセンシングは、地表面射出を主な放射源とする。しかし、陸域では、地表面射出を決める地表面水文量の分布は、時間的にも空間的にも変動が大きい。そのため、地表面水文量を推定することが先決である。

植生は多様な幾何学的特徴を有する。このことが植生水分量の推定を困難にする原因の1つになっている。マイクロ波リモートセンシングは、水がマイクロ波帯で高い誘電率を示す性質を利用するが、放射伝達特性は、誘電率のほか、対象の形状・サイズ・向きなどの幾何学的特徴によっても変化する。そのため、多様な幾何学的特徴を持つ植生の放射伝達は、非常に複雑になる。従来の地表面の放射伝達モデルは土壌水分推定の観点から植生の影響を評価したものが多く、植生の幾何学的特徴は考慮されていない。必ずしも十分な精度で植生水分量が推定できるとは限らず、むしろ、植生に関する放射伝達のパラメータは、モデルの不確定要素を調整するための性質が強い。また、植生被覆状態の不均一性も、植生水分量の推定に影響を及ぼす。従来のモデルでは、被覆状態の不均一性は考慮されていない。

植生は陸域に広く分布する。植生の幾何学的特徴や植生被覆状態の不均一性を考慮できる植生の放射伝達モデルは、植生水分量の推定ばかりでなく、土壌水分や積雪量の推定精度の向上の面からも必要とされている。

本論文の目的は、衛星マイクロ波リモートセンシングに利用可能な植生域地表面の放射伝達モデルの構築である。植生の幾何学的特徴と、被覆状態の不均一性の2点に着目して、地表面放射伝達のモデル化を行った。植生観測に有利な10GHz帯と18GHz帯を対象とし、

放射伝達モデルへ植生の幾何学的特徴を考慮するために、植生観測データによる半経験的なアプローチを採用した。

半経験的なアプローチは、放射伝達モデルにおける植生に関するパラメーターを、観測データから直接決定する方法である。本手法の利点は、対象植生の幾何学的特徴を反映したパラメーターが得られることである。また、対象植生の幾何学的特徴を調べることによって、パラメーターの推定結果の評価を行うことができる。ただし、パラメーターの推定には、マイクロ波放射計の輝度温度データのほか、放射伝達を決める土壌や植生の物理量の測定が必要である。さらに、物理量に加えて、対象植生の被覆状態や幾何学的な情報を得る場合、その観測は非常に詳細なものとなる。その結果、観測のスケールは自ずと限られる。

本論文は、数メートル規模の観測に対応した地上可搬型マイクロ波放射計システム (Ground Based Microwave Radiometer system, GBMR) の開発を行うことによって、半経験的なアプローチに対応したデータの取得を可能にした。GBMR を、高性能のマイクロ波放射計と、安定して運用するためのコンテナ型プラットフォームで構成し、より多くの植生のデータを効率的に得るために可搬性を重視した設計とした。

本論文で取り扱った植生域地表面の放射伝達モデルは以下のとおりである。

基本モデルには、放射・吸収特性に基礎をおく従来の放射伝達モデルを援用し、10GHz帯と18GHz帯に適応させるため、植生パラメーター b と単一散乱アルベド c の2つの植生に関するパラメーターを導入した。 b は、放射・吸収特性の幾何学的特徴への依存性を表わすパラメーターである。 c は消散に占める散乱の割合で定義される。 c は対象物の形状やサイズ、傾きへ強く依存するため、本モデルでは c を植生の幾何学的特徴を表わすパラメーターとして扱った。これらのパラメーターは、衛星観測と同一条件において取得したGBMR観測データより決定した。本モデルは、従来のモデルを援用することで実用性が高く、既往の水文量推定アルゴリズムへも応用しやすい特長を持つ。

植生の幾何学的特徴を表わす b と c の取り扱い方が本モデルの特色である。 b と c は植生タイプごとに決まり、1つの植生タイプに対して1組の値をとる。また、植生の成長とともに幾何学的特徴の変化に対しても1組の値をとる。植生タイプは、植生を構成する要素に着目して、各要素の形状・方向性によって定義する。これは、理論的なモデルにおける植生の取り扱いに準じている。そのため、 b と c の推定結果を従来の知見と比較しやすい。

さらに、 b と c をパラメーターとする基本モデルを、植生被覆率を導入することによって拡張した。拡張モデルは、裸地と植生の2つの被覆が混在するフットプリントにおいて、それぞれの被覆面からの地表面射出を、植生被覆率を用いて個別に取り扱う。 b と c の基本モデルはフットプリント内に植生が一様に分布した状態を仮定しているが、植生被覆を導入することにより、不均一なフットプリントへも適用可能である。また、一群をなす植生域の中に複数の植生タイプが混在する場合に対応するため、 b と c のそれぞれの混合モデル

を示めした。

本論文は、次の3つの植生タイプを対象として検討を行った。

- (1) 鉛直方向に伸びた茎と水平方向に広がる葉で構成される植生。
- (2) 主に水平方向に広がる葉で構成される植生。
- (3) 主に鉛直方向に伸びた茎で構成される植生。

マイクロ波リモートセンシングでは垂直偏波と水平偏波が利用される。上記の3つのタイプは、幾何学的特徴の影響が偏波情報へ顕著に現れる植生タイプである。具体的には、(1)と(3)の植生タイプとしてソバ(ソバ, *Fagopyrum esculentum* Moench, buckwheat)を選択し、(2)の植生タイプとしてクローバー(クリムゾンクローバ, *Trifolium incarnatum* L.)を選択した。ソバは基本的には(1)の植生であるが、収穫期のソバは、落葉して葉の影響がなくなるため、植生タイプ(3)となる。

はじめに、 b と c の推定を行なった。 b と c の推定結果は、次のとおりである。

各植生タイプの b の結果は、茎と葉の放射・吸収特性に関する知見から判断し、妥当であった。茎の b は、細い茎ほど水平偏波の値が小さく、垂直偏波の値が大きい。太い茎になると水平偏波の値が大きくなり、垂直偏波の値とほぼ等しくなる傾向にある。これらの茎の太さによる偏波特性は、植生媒体中における波長 λ と茎の直径によって特徴づけることができる。また、葉の b の値は、葉の厚さによって変化する。葉が薄くなると、水平偏波が大きくなる傾向にある。

一方、各植生タイプの c の結果は 0.1 以下の値となった。この値は、既往の研究の成果と一致している。ただし、周波数や偏波ごとに一律な傾向は見られなかった。一般に、散乱特性は、形状や、対象のサイズと波長との相対的な関係によって複雑な挙動を示す。

次に、モデルの検証を行った。「1つの植生タイプに対して b と c が1組みの値をとる」という本モデルの特長を検証するため、解析には植生タイプ(1)のソバと植生タイプ(2)のクローバーのデータを使用した。植生タイプ(1)のソバは、成長プロセスに応じて3つの期間を設け、それぞれの解析期間ごとに推定した b と c を、異なる期間へ相互に適用してモデルの適合性を調べた。植生タイプ(2)のクローバーの検証は、最もクローバーが良く生育したフットプリントで取得したデータから推定した b と c を用いて、生育状況の異なる他のフットプリントにおいてモデルの適合性を調べた。クローバーの検証では、裸地と植生域の被覆が混在したフットプリントを対象として選択し、植生被覆率によって拡張した放射伝達モデルのほか、フットプリント内を均一としたモデルを用いて、植生被覆に対する検討も行った。

検証の結果、両植生タイプともに、輝度温度の推定値は、成長過程全般にわたって観測値に良く一致した。ソバの検証において、 b と c を相互に適用した結果も、お互いに同じ程度の推定誤差に収まった。成長に伴って茎や葉のサイズが変化し、 b と c の値が変化するが、その影響は小さいと言える。つまり、1組の b と c で表現することが可能である。植生タイ

ブ(1)のソバの結果については、比較的細い茎が多い期間で、水平偏波の輝度温度の推定精度が低下する傾向があったが、この輝度温度の精度低下が植生水分量の推定に及ぼす影響は小さかった。これは、水平偏波の土壌面の放射が小さいために、植生水分量に対する輝度温度の変化の幅が広いことに起因する。

植生被覆率を導入した拡張モデルと、フットプリント内を均一としたモデルの比較では、植生被覆率を導入したモデルを用いた輝度温度の推定結果が、各周波数・偏波ともに、観測値と良く一致した。一方、フットプリント内を均一とした放射伝達モデルを用いた輝度温度の推定結果は、水平偏波で著しい精度低下を示した。これは、土壌面の放射が小さく、裸地と植生とのコントラストが大きいためである。水平偏波は、植生水分量に対する輝度温度の変化の幅が広く、植生水分量の推定には有利である。しかし、植生被覆状態の不均一性の影響が大きいと、植生被覆率を適切に与えることが必要である。

最後に、他の植生へのモデルの適合性を調べるため、イネ、トウモロコシ、ダイズへの応用を試みた。それぞれの植生の形状と方向性を踏まえて、イネとトウモロコシは植生タイプ(3)、ダイズは植生タイプ(1)のモデルを採用した。その結果、各植生とも、良い適合性を示した。イネは、生育初期に鉛直方向に伸びた葉のみで構成されているが、分けつ期を終えると茎が伸び、タイプ(3)へ近い形状になる。本モデルのイネへの適用結果は、茎と葉で構成されるイネに対して非常に良い一致を示した。

以上のように、放射伝達モデルにおける植生の幾何学的特徴を b と θ によって表わし、それらをGBMR観測データから直接決定することによって、衛星マイクロ波リモートセンシングに利用可能な植生域地表面のマイクロ波放射伝達モデルの構築を行った。さらに、植生被覆率を導入することによって、被覆状態が不均一なフットプリントにも対応した。本論文は、ソバとクローバーを対象としてモデル化を行ない、その結果が形状や方向性が似た植生へ適用可能であることを示した。

植生は多様な幾何学的特徴を有する。今後、形状と方向性の観点から植生タイプを体系化し、本手法を用いてモデル化を行うと同時に、植生分類や土地被覆推定に関する多くの取り組みが行われている可視・赤外リモートセンシングや能動型マイクロ波リモートセンシングから得られる情報を併用することで、衛星観測による陸域地表面水文量の推定が可能になると考える。