

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.

藤 井 秀 幸

平成17年6月

論文内容の要旨

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 帯に適應させるため、植生パラメーター b と単一散乱アルベド ω_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。 ω_c は消散に占める散乱の割合で定義される。 ω_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 ω_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 ω_c の取り扱い方が本モデルの特色である。 b と ω_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、植生の成長にともなう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 ω_c の推定結果を従来の知見と比較しやすい。

さらに、 b と ω_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 ω_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 ω_c のそれぞれの混合モデルを示めた。

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 ω_c の推定を行なった。 b と ω_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 ω_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 ω_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 ω_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 ω_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 ω_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 ω_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 ω_c で表現することが可能である。植生タイプ(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ため、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 ω_c 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。

目次

第1章	序章	1
1.1	研究の背景	1
1.2	マイクロ波リモートセンシングによる陸域水文量の把握	2
1.3	研究の目的	8
1.4	論文の構成	9
第2章	受動型マイクロ波リモートセンシングとその原理	11
2.1	リモートセンシングの概要	12
2.2	物体の放射特性	13
2.3	放射伝達	14
2.4	電磁波の波動情報	17
2.5	衛星観測における放射伝達方程式	27
2.6	誘電特性	28
第3章	植生域を対象とした地表面の放射伝達モデル	33
3.1	植生における放射伝達に関する既往の研究	33
3.2	植生域地表面の地表面放射伝達モデルの検討	37
3.3	植生パラメーター b_{fp} と単一散乱アルベド $\omega_{c,fp}$ の推定方法	45
3.4	植生の放射・吸収特性	49
3.5	まとめ	53
第4章	地上観測の設計と概要	55
4.1	AMSR の概要	56
4.2	地上可搬型マイクロ波放射計観測システムの開発	57
4.3	航空機搭載型マイクロ波放射計の概要	60
4.4	対象植生	61
4.5	ソバ・クローバー観測	63
4.6	イネ観測	76
4.7	ダイズ・トウモロコシ観測	79
4.8	まとめ	81
第5章	解析結果および検証	85
5.1	解析方針	85
5.2	植生パラメーター b と単一散乱アルベド ω_c の推定結果と考察	90
5.3	検証	97
5.4	他の植生への適用	108
5.5	まとめ	113

第 6 章	総括	115
6.1	植生観測のためのシステム開発	115
6.2	植生域地表面の放射伝達モデルの検討	115
6.3	今後の展望	117

目 次

2.1	周波数帯と黒体の分光放射輝度および大気分光透過率	11
2.2	無限小円柱における放射伝達	14
2.3	放射伝達方程式の概念	16
2.4	平面電磁波の概念	20
2.5	損失性媒質中の伝搬する電磁波	21
2.6	減衰定数 α と位相定数 β の特性	22
2.7	代表的な物質の $\tan \delta$ の特性	22
2.8	平面波の反射と屈折 (水平偏波, TE 波)	25
2.9	衛星観測における放射伝達の概念	27
2.10	水および海水の複素比誘電率	29
2.11	土壌の複素比誘電率	31
2.12	植生体の複素比誘電率	31
3.1	植生層における放射伝達の概念	33
3.2	植生パラメーター b の周波数・植生タイプ依存性 (水平偏波)	35
3.3	球の単一散乱アルベドの変化	39
3.4	植生層放射伝達モデルの特性: 各成分の挙動	43
3.5	植生層放射伝達モデルの特性: 単一散乱アルベド ω_c の影響	43
3.6	植生層放射伝達モデルの特性: 植生被覆率の変化	43
3.7	$\tau_{c,fp}-\omega_{c,fp}$ 曲線 (18v)	46
3.8	植生層モデルにおける光学的厚さ τ_c と単一散乱アルベド ω_c に対する感度	47
3.9	$b_{fp}-\omega_{c,fp}$ 関係	48
3.10	植生媒体中の波長	50
3.11	マイクロ波散乱計によって観測されたトウモロコシの消散係数	51
3.12	葉の放射率	52
4.1	地上可搬型マイクロ波放射計観測システム	55
4.2	AMSR 観測概念図	56
4.3	地上可搬型マイクロ波放射計観測システム概要	59
4.4	イネ (2003 年 10 月 21 日撮影 東京大学付属農場にて)	61
4.5	クローバー (2003 年 12 月 8 日撮影 東京大学付属農場にて)	61
4.6	イネ (2000 年 6 月 17 日撮影 中之島末宝水田にて)	62
4.7	ダイズ (2002 年 7 月 7 日 M.Pathmathevan 氏撮影 AMES にて)	62
4.8	トウモロコシ (2002 年 7 月 7 日 M.Pathmathevan 氏撮影 AMES にて)	62
4.9	ソバ・クローバー観測配置図	64
4.10	ソバの植生重量含水比の日変化	69
4.11	GBMR のフットプリントと植生サンプル対象範囲	70
4.12	植生乾燥重量および植生水分量の変化 (ソバ観測)	71
4.13	植生指標 $MSAVI$ と植生水分量の関係 (クローバー)	72

4.14	植生水分量の変化 (クローバー観測)	72
4.15	茎の直径分布 (ソバ)	73
4.16	植生高さ分布 (ソバ)	73
4.17	葉のサイズ分布 (ソバ)	73
4.18	葉のサイズ分布 (クローバー)	73
4.19	植生被覆率の推定	75
4.20	くし形粗度計による観測の様子と解析事例	76
4.21	中之島観測配置図	77
4.22	AMES 観測配置図	79
4.23	大気下向き放射の変動	81
4.24	大気下向き放射における日射の影響	82
4.25	乾燥土壌における見かけの放射率	82
5.1	解析の流れ	85
5.2	ソバとクローバーの平均植生乾燥重量と平均植生水分量	87
5.3	k_s と h および Q の関係	89
5.4	クローバーの $b_{cl,fp}$ と $\omega_{cl,fp}$ の算定	91
5.5	ソバの植生パラメーター b と単一散乱アルベド ω の同定 (期間 1)	92
5.6	ソバの植生パラメーター b と単一散乱アルベド ω の同定 (期間 2)	92
5.7	ソバの植生パラメーター b と単一散乱アルベド ω の同定 (期間 3)	93
5.8	ソバの植生パラメーター b と単一散乱アルベド ω の同定 (期間 4)	93
5.9	光学的厚さ τ_{bw} と単一散乱アルベド ω_{bw} の比較 (ソバ観測)	94
5.10	ソバ (期間 3) とクローバー (case1) の植生パラメーターと単一散乱アルベドの比較	97
5.11	クローバーエリアでのマイクロ波輝度温度推定結果 (Case1)	98
5.12	az225 におけるクローバーエリアでのマイクロ波輝度温度推定結果 (Case2)	98
5.13	植生域地表面の放射伝達モデル概念図	100
5.14	単一散乱アルベド ω_c と植生パラメーター b の影響	101
5.15	パラメーターセット P-1 による輝度温度推定結果	102
5.16	パラメーターセット P-3 による輝度温度推定結果	102
5.17	解析期間毎のソバの特徴	103
5.18	精度の評価方法	104
5.19	植生水分量による評価 (ソバ)	105
5.20	植生水分量による評価 (クローバー)	105
5.21	パラメーターセット j-s による輝度温度推定結果	107
5.22	パラメーターセット j-w による輝度温度推定結果	107
5.23	イネのマイクロ波輝度温度推定結果	109
5.24	植生水分量による評価 (イネ, 6 月 17 日)	110
5.25	植生水分量による評価 (イネ, 6 月 29 日)	110
5.26	トウモロコシのマイクロ波輝度温度推定値と観測値の比較	112
5.27	ダイズのマイクロ波輝度温度推定値と観測値の比較	112
5.28	トウモロコシ・ダイズのマイクロ波輝度温度推定値と観測値の比較	113

表 目 次

1.1	衛星搭載マイクロ波センサー一覧	3
3.1	植生の単一散乱アルベドに関する既往の研究成果	36
3.2	植生の放射・吸収特性に関する考察	53
4.1	AMSR 諸元	56
4.2	マイクロ波放射計の仕様	58
4.3	AMR 諸元	60
4.4	ソバ・クローバー観測におけるオペレーションタイプと対象植生	65
4.5	クローバー観測の対象フットプリントの特性	66
4.6	SMTMS センサー埋設深度	68
4.7	植生被覆率(クローバー)	74
4.8	イネの状態	77
5.1	クローバー解析条件	87
5.2	ソバ解析対象期間	87
5.3	植生パラメーターと単一散乱アルベドの推定結果	91
5.4	各期間の λ' の値	94
5.5	各構成要素の単一散乱アルベド(ソバ期間3)	96
5.6	クローバーモデルの推定精度比較	99
5.7	ソバ期間 1-3 におけるマイクロ波輝度温度推定精度	103
5.8	Jackson and Schmugge (1991) による植生パラメーター b	106
5.9	イネ観測における輝度温度推定精度	109

第1章 序章

1.1 研究の背景

水は、地球環境を特徴づける重要な要素であり、我々の生活や経済活動に密接にかかわっている。地球上には、13 億 $8,600\text{km}^3$ の水があり、そのうち 2.5% が淡水、さらに淡水の 1% 未満が私たちが使うことができる水資源である [26]。21 世紀は「水の世紀」と言われ、このわずかな水資源に関する世界的な関心は高い。水不足、豪雨災害、水質汚染、生態系の破壊など、水にかかわる問題が世界各地で広がってきており、地球温暖化が水災害や水環境に及ぼす影響も懸念されている。IPCC¹の第3次評価報告書 [35] では、人為的排出が近年の気候変動の主要な要因であると断定し、20 世紀の温暖化によって、既に、氷河の縮小、永久凍土の融解、生態システムへの影響が現れているとしている。気候システムの変化は、ひとたび生じると生態系や人間社会に多大な影響をもたらす、大規模で不可逆な変化へつながる可能性をもつ。

このような変化に対して、温暖化の原因となる温室効果ガスの削減策とともに、変化しつつある気候に対応するための適応策の重要性が増している。適応は変化しつつある気候に自らを自動的に或いは計画的に調整する方法である [108]。適応策は、適切な計画を立てることにより便益をもたらすのが、反面、費用がかかり、計画の根拠には、水循環現象の定量的理解とモデル化が不可欠である。たとえば、温暖化にともなって集中豪雨や渇水の頻度が増加すると考えられている。集中豪雨に対して被害を最小限に留めるためには、定常的な降水観測を行うとともに、集中豪雨を事前に予測することが重要である。また、渇水に対しては、降水を水資源として有効利用することが必要となる。長期的な予測に基づいてダムや灌漑施設などの社会基盤の整備し、季節～年々の気象予報や水需要の予測などを踏まえて、それらを統合的に運用しなければならない。短期予報から長期的な予測まで、それぞれの精度を高めるためには、水循環現象の定量的理解とモデル化が不可欠である。

水循環の理解とモデル化は、気候変動予測とその影響評価においても重要な課題である。陸面・大気の相互作用が水循環を通して気候変動に与える影響は大きく、地表面における熱・水フラックスが気候システムの中で果たす役割を定量的に把握することは、水循環変動の理解やモデル化において不可欠である。しかしながら、地表面におけるフラックスを地球規模で直接計測することは困難であり、また、間接的なフラックスの推定においても、降水量や土壌水分量、積雪量の広域情報の収集が必要となる。これらの水文量は、空間的にも時間的にも変動が大きく、陸面の水文状態をグローバルに観測するシステムの確立が不可欠である。

衛星リモートセンシングは、「広域同時性」「周期性」といった特徴をもち、地球規模での計測に有効な手段である。衛星リモートセンシングは、1970 年代から本格的に始まり、個々の計測技術の高度化、データ処理能力の向上に支えられ、著しい発展を遂げてきた。衛星観測技術は、1962 年 2 月にミシガン大学において開催された「The 1st symposium on Remote Sensing of Environment」以来、それまでの航空機写真などの技術も含めて、リモートセンシングと呼ばれている [111]。

¹Intergovernmental Panel on Climate Change, 気候変動に関する政府間パネル

衛星からの観測は、1つのセンサーで全球規模の測定が可能で、空間的に一様なデータを取得できる。地上観測では、広域のデータを取得するためには複数の測器を必要とし、山岳地帯などの一部の地域では、地上観測網を展開することが困難な場合もある。

これまでに、可視・近赤外、熱赤外、マイクロ波を用いたセンサーが実用化され、観測データから物理量を推定するための手法も多く開発されている。可視・近赤外や熱赤外を利用したリモートセンシングは、主に、アルベド、エアロゾル、温度、植生などの観測に適し、人間活動が水文現象に与える影響や、気候変動が人間活動に与える影響評価の研究において有効な情報をもたらす。これに対し、マイクロ波を利用したリモートセンシングは、降水、土壌水分量、積雪、地温、植生、海氷などの観測に適し、水循環の理解とモデル化に有効な情報をもたらす。また、可視・赤外とマイクロ波、それぞれの特徴を相互補完することで、精度の向上や、さらなる物理量の推定が見込まれている。

1.2 マイクロ波リモートセンシングによる陸域水文量の把握

衛星に搭載したセンサーは、地表面において反射もしくは放射された電磁波が、大気中を伝搬してきた結果を計測する。電磁波は、伝搬過程において、途中に存在する物質により、吸収・散乱されて減衰する(消散)と同時に、その物質による熱放射、もしくは、散乱によって増大する(射出)。電磁波が伝搬する過程は放射伝達と呼ばれ、リモートセンシングにおける基礎をなしている。計測対象の放射伝達特性を理解することによって、定量的なリモートセンシングが可能となる。

水循環研究では、時間的・空間的、また量的・質的な水、雪氷、水蒸気の動態と、それに伴うエネルギーの流れが対象となる。その主役となるのは、固相、液相、気相の H_2O である。 H_2O は典型的な分極分子であるために、分子の熱運動に含まれる回転・反転モードからマイクロ波帯の電磁波が放射されている。この放射特性は誘電率によって表わされるが、とりわけ、液相の H_2O はマイクロ波帯で高い誘電率を有し、水文量観測におけるマイクロ波リモートセンシングの1つの利点となっている。

また、マイクロ波帯の波長の大きさも特徴の1つである。放射伝達における散乱現象は、対象物の形状、サイズと波長との相対的な大きさに強く依存する。そのため、誘電率が小さく、放射や吸収の寄与が少ない固相の H_2O でも、散乱によって、そのシグナルを捉えることが可能である。たとえば、降雪粒子は、氷の結晶であるため誘電率が小さく、密度も低いことから、極めて透過性が良いが、比較的短い波長の周波数帯の電磁波は、散乱により消散をうける。実際に、地上観測によって、降雪粒子によって散乱の影響を受けることが確認されている [109]。

さらに、大気中の気体の吸収線の構造が単純であることも利点の1つである。赤外域では、極めて細い幅の吸収線が多数存在するが、マイクロ波帯の吸収線は幅が広く、数も僅かである。100GHz以下では、23GHz帯の水蒸気の吸収帯と、50-60GHz帯の酸素の吸収線が存在するのみである。そのため、大気の影響は一律に扱いやすい。概して、低周波数ほど大気の透過性がよく、高周波になるほど大気の影響が増す傾向にある。

このように、マイクロ波リモートセンシングは、 H_2O に感度をもち、水文量のモニタリングに有用な手段になる。以下に、これまでの衛星観測と水文量推定の取り組みを述べ、その課題についてまとめる。

表 1.1: 衛星搭載マイクロ波センサー一覧

衛星 センサー 年代	入射角 走査幅 軌道	周波数・偏波 (フットプリントのサイズ, km)
Nimbus7 SMMR 1978 -	50.3 度 780km 太陽同期	6.6HV(148x95), 10.7HV(91x59), 18HV(55x41), 21HV(46x30), 37HV(27x18),
DMSP SSM/I 1987 -	53.1 度 1400km 太陽同期	19.35HV(69x43), 22.235V(60x40), 37HV(37x28), 85.5HV(15x13),
MOS-1, 1b MSR 1987-1996	10 度 317km 太陽同期	23H(32km) 31V(23km)
TRMM TMI 1997-	52.7 度 760km 太陽非同期	10.7HV(63x39), 19.4HV(30x18), 21.3H(27x17), 37HV(16x10), 85.5HV(7x4),
ADEOS-II AMSR 2002-2003	55 度 1600km 太陽同期 (10:30AM)	6.925HV(40x70), 10.65HV(27x46), 18.7HV(14x25), 23.8HV(17x29), 36.5HV(8x14), 89.0HV(3x6), 50.3V/52.8V(6x10),
AQUA AMSR-E 2002-	55 度 1450km 太陽同期 (2:30AM)	6.925HV(43x75), 10.65HV(29x51), 18.7HV(16x27), 23.8HV(18x32), 36.5HV(8x14), 89.9HV(4x7),
SMOS MIRAS 2007-	0-55 度 1000km 太陽同期	1.4HV(35-50),
Hydros 2010-	35-55 度 (固定) 1000km 太陽同期 (6AM/6PM)	1.4HVU(40),

1.2.1 マイクロ波センサーの種類

リモートセンシングは、計測手法の面から能動型と受動型に分類される。能動型のセンサーは、強制的に電磁波を照射して対象物で散乱された電磁波を観測する。受動型のセンサーは、自然界の物体から放射される電磁波を観測する。マイクロ波帯では、両タイプのセンサーが実現されており、それぞれ、マイクロ波散乱計とマイクロ波放射計と呼ばれる。

マイクロ波散乱計は、自然界の物体を起源とする放射よりも遥かに強いエネルギーを照射する。しかも、放射源を制御できることから、電磁波の強度のほか、位相や伝搬時間などの情報も入手できる。また、合成開口技術により、空間解像度の高いデータを取得できる。たとえば、今後打ち上げが予定されている陸域観測技術衛星 (Advanced Land Observing Satellite, ALOS) に搭載されているフェーズドアレイ方式 L バンド合成開口レーダ (PLSAR) は、地上分解能 10m を有する。しかし、地上分解能と観測頻度は背反し、観測幅 70km、回帰日数 46 日となる。

マイクロ波放射計は多波長・多偏波観測が容易である。対象物の偏波特性や周波数特性の情報を利用可能である。また、観測幅が広く、かつ、観測頻度も高い。たとえば、2002 年 12 月 16 日に打ち上げられた環境技術衛星 (Advanced Earth Observing Satellite-II, ADEOS-II) に搭載された高

性能マイクロ波放射計 (Advanced Microwave Scanning Radiometer, AMSR) は、観測幅 1600km を有し、1 日 2 回の観測頻度をもつ。

水文現象は、降水のように数時間スケールで変動する要素を持つ。そのため、降水を定量的に把握するためには、高頻度の観測が要求される。その点、マイクロ波放射計が有利である。また、受動型のシステムは能動型に比べ小型化・省電力化できることから、多くの衛星に搭載されており、複数のセンサーを利用することによって観測頻度を増すことも可能である。

表 1.1 に主要な衛星搭載型マイクロ波放射計の一覧を示す。幾つかの実験的衛星が打ち上げられたあと、Nimbus-7 搭載の SMMR (Scanning Multichannel Microwave Radiometer) より本格的な観測が始まった。その後、DMSP (Defence Meteorological Satellite Program) 搭載の SSM/I (Special Scenor Microwave / Imager)、熱帯降雨観測衛星 (Tropical Rainfall Measuring Mission) 搭載の TMI (TRMM Microwave Imager)、AQUA (別名 EOS-PM) 搭載の AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer - EOS) が継続している。我が国の衛星観測でも、マイクロ波放射計 (Microwave Scanning Radiometer, MSR) が海洋探査衛星 1 号、1b 号 (MOS-1, MOS-1b) に搭載され、その後、ADEOS-II 搭載の AMSR へと継続している。

水文学観測を目的とした衛星観測計画も進行中である。全球 3 時間毎の降水分布の把握を目的とする全球降水観測計画 (Global Precipitation Measurement, GPM) が、米国航空宇宙局 (NASA)、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) と情報通信研究機構 (NICT) を中心として進められている。マイクロ波放射計を搭載した 1 機の主衛星と 8 機の副衛星によって、高頻度頻度観測を実現し、同時に、主衛星に搭載した 14GHz 帯と 35GHz 帯の 2 周波レーダによって、その精度の向上を目指している。GPM の主衛星は、2007 年打ち上げを目標としている。

土壌水分のモニタリングに有利な低周波帯のマイクロ波放射計を搭載した衛星の打ち上げも予定されている。欧州宇宙機関 (European Space Agency, ESA) は、L バンド (1.4GHz) のマイクロ波放射計 (Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis, MIRAS) を搭載した衛星 (Soil Moisture and Ocean Salinity, SMOS) [93] の打ち上げを 2007 年に予定している。一般に、周波数が低くなるほどフットプリントが大きくなる。しかし、SMOS は合成開口技術を用いることにより解像度 35km を実現する。また、NASA は、L バンドのマイクロ波放射計と合成開口レーダを搭載した Hydros (Hydrosphere State) の打ち上げを予定している。Hydros は、6m の大型アンテナによって高解像度を実現する。

1.2.2 1 次水文学量の推定

(a) 土壌水分量

土壌水分は、蒸発散抑制を通して、赤外放射、顕熱、潜熱、地中熱の各フラックスへの吸収放射エネルギーの配分をコントロールすることにより、気候の形成と変動に深く関与していることが、気候モデルを用いたシミュレーションにより指摘されている [76, 17]。

土壌水分を対象としたマイクロ波放射計観測のためのアルゴリズム開発研究は、地上マイクロ波放射計や航空機搭載マイクロ波放射計による実験的研究 [87, 64] をもとに始められた。主に大気透過性のよい 1GHz ~ 6GHz の低周波数帯が利用されている。SMMR や SSM/I を利用した衛星利用研究 [94, 62, 13] も進められてきた。

土壌水分の算定にあたっては、植生が保持する水分からのシグナルと土壌水分からのシグナルの分離が必要となる。主要なアルゴリズムは、その取り扱いによって、主に 3 つ分類される。

- (1) 植生効果を考慮した統計的な手法 [87, 94, 13, 34]
- (2) 植生インデックスによる土壌水分の推定 [62, 63, 104]

(3) 土壌水分 / 植生 / 地表面温度の同時推定 [57, 103]

(1) の手法は、可視-近赤外データから得られる植生指数や土地利用区分から推定される植生効果を導入して、統計的手法により植生効果を取り除いた土壌水分量を算定するものである。(2) は植生による散乱効果が偏波特性に与える影響を導入して、植生バイオマスを算定しようというものである。(3) はそれぞれの水文量に対応するパラメーターを、多周波・多偏波観測データから得られる連立の放射伝達方程式を直接解くことによって求める手法で、物理的根拠に基づいた一般化された手法であると考えられる。Njoku(1999)[57] は、(3) に基づき問題を 1 元連立方程式で定式化し、その数値解法を提案している。小池 (2000)[103] は、数値解法では解の不安定性に加えて、解の収束状況が物理的に把握しにくいという欠点を踏まえ、(2) の手法を援用したアルゴリズムを提案している。土壌水分、植生水分量、地表面物理温度の 3 つの未知数の中で、地表面物理温度の効果をとり除き、かつ、土壌水分と植生含水量に感度を有する独立した 2 つの指標を導入することにより、2 元連立方程式に変換して数値的に土壌水分と植生含水量を求め、さらに、その結果を放射伝達方程式に代入して、地表面物理温度を算定するアルゴリズムである。

(b) 積雪量

積雪も陸面 - 大気との相互作用に関わる水文量である。気候の季節変動や年々変動は、大陸の季節的な加熱状況と密接な関係を持ち、特に、積雪の多寡で変動する観点から調べられている。Hahn and Shukla[29] は、ユーラシア大陸の冬の積雪面積と次の夏のインドモンスーン降水量の間に逆相関があることを示している。Barnett *et al* や Yasunari *et al* は、冬から春の積雪の偏差と春から夏にかけての大気の状態との関係を大気大循環モデル (GCM) を用いて検討している。そのメカニズムとして注目すべきことは、雪面のアルベド効果だけでなく、融雪による土壌水分量の増加が夏の地表面熱収支に与える影響である。

積雪量推定には既に数多くのアルゴリズムが提案されている。ただし、いずれのアルゴリズムも、基本的に乾き雪を対象としたものである。積雪量推定アルゴリズムは、積雪層中の放射伝達の扱いによって 2 つのタイプに分けられる。消散のみを評価したタイプと、さらに、散乱による射出効果を加えて評価したタイプである。両タイプともに、18GHz 帯と 35GHz 帯の 2 周波を用いたものが多い。乾雪の場合、誘電率が低いため、積雪中においては散乱が卓越する。そのため、雪粒子の粒径の取り扱いが重要となる。Kelly(2003)[41] は、雪粒子の変態を表わす積雪モデルを組み入れたアルゴリズムを開発している。筒井ら (2005) は、18GHz と 35GHz に加え、粒径に敏感な 85GHz の情報を用いて、積雪深、雪温、粒径を決定する手法を提案している。

また、積雪でも植生が存在する場合、その影響を受けることから、植生を考慮したアルゴリズムも提案されている。森林被覆率を導入したアルゴリズム [40] や、正規化植生指標 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) で評価される植生層での消散効果を導入したアルゴリズム [43] が提案されている。

(c) 植生量

植生は、蒸散作用を通じて水の輸送を司るほか、キャノピーが存在することによって、地温の抑制やアルベドの変化などをもたらす、直接的・間接的に水循環に大きくかわる水文量である。また、炭素循環の解明や植物基礎生産量の推定といった温暖化のモニタリングの側面からも、重要な物理量である。

植生バイオマス量やアルベドの算定については、可視・赤外の分野で、多くのアルゴリズムが提案されており、また、NOAA/AVHRR² データを基にしたグローバルプロダクツも提供されてい

² NOAA は、アメリカ海洋大気庁 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) によって運用されてい

る。しかし、可視・赤外リモートセンシングでは、植生が保持する水分の直接計測は困難である。

植生水分量の観測には、マイクロ波リモートセンシングが有用である。ところが、植生は複雑な形状を持つため、マイクロ波リモートセンシングによる植生水分量推定のための研究が少ないのが現状である。放射伝達特性は形状やサイズなどの幾何学的特徴にも依存し、とりわけ、数 mm ~ 数 cm の波長をもつマイクロ波帯では、植生の幾何学的特徴の影響が大きい。同じ水分量の植生でも、幾何学的特徴が異なることによって射出・消散が変化する。そのため、植生水分量の推定には、幾何学的特徴による影響を評価することが不可欠である。

また、植生の被覆状態の不均一性も問題となる。裸地の状態と植生で覆われた状態では、放射伝達が全く異なる。表 1.1 に示したように、マイクロ波放射計のフットプリントの大きさは数十 km あり、このスケールの地表面が、一面の植生に覆われている場所は極めて稀である。地表面の放射伝達を議論する場合、植生の被覆状態を考慮する必要がある。

これまでの陸域のマイクロ波リモートセンシングでは、主として土壤水分推定に主眼が置かれてきた。そのため、土壤水分に感度を有し、植生に対して透過性の良い 1GHz や 6GHz を中心に研究が進められてきた。これらの低い周波帯は、波長が長いために植生の幾何学的特徴への依存性が小さいという利点がある。土壤水分推定アルゴリズムの多くは、物理的プロセスを踏まえた放射伝達モデルに基礎をおき、植生の影響も考慮されている。しかしながら、植生の放射伝達に関しては、統計的な関係式が利用され、幾何学的特徴や被覆状態の不均一性が考慮されていない。また、低い周波数帯における植生の放射伝達に関する知見が、衛星観測で利用されているような高い周波数帯へそのまま援用されている。周波数が異なれば、放射伝達特性は変わってくる。そのため、十分な精度で植生水分量を推定することが難しいのが現状である。むしろ、土壤水分のアルゴリズムでは、植生に関する放射伝達のパラメーターが、モデルの不確定要素を調整するために使われることが多い。植生の放射伝達を理解することは、土壤水分推定精度の向上にも役立つ。

(d) 降水量

陸域水文過程の入力となる降水量は、各機関の GCM の比較 [33] によって示されているように、大気モデルによる推定値の不確実性が大きいため、実測が強く要求される水文量である。降水量の実測には、頻度の高い観測が必要となる。降水現象は、他の水文現象と比較して短期間で局所的に発生し、顕著な日周変化を示す地域もある。高頻度の観測を行なうことによって、そのような時間スケールの短い降水現象を捉えることができる。

降水の衛星リモートセンシングに用いられるセンサーには、可視・赤外センサー、レーダ、マイクロ波放射計の 3 つがある。

可視・赤外センサーは雲頂温度が測定可能である。可視・赤外センサーによる降水量推定法では、雲が発達して雲頂が高くなると雲頂温度が低下することを利用し、統計的に雲頂温度と地上雨量を関係付ける。しかし、地域性や季節特性を持ち、十分な精度を得ることは難しい。

降水レーダ (Precipitation Radar, PR; 周波数 14GHz) は、1997 年 11 月に打ち上げられた TRMM によって初めて実現された衛星搭載型のレーダである。水平 4km、鉛直 250m という細かなグリッドで降水の三次元観測が可能である。この衛星により降水定量観測が開始され、台風の 3 次元構造や、エル・ニーニョやラニーニャ発生時の降水現象を捉えることにも成功している。しかし、観測幅が 215km³ と狭く、観測頻度が低いため、日降水量の算定には不向きである。

これに対し、マイクロ波放射計は高頻度観測が可能である。これまで海洋上の降水を対象とし

る気象観測衛星。AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer) は可視から赤外までの 5 つのチャンネルをもつセンサーの名称。

³2000 年 8 月の高度変更にもとない観測幅が 245km になった

た利用研究が進められてきた [8, 99, 78] . 海洋は地表面が比較的均一で、かつ、放射率が低いいため、降水の放射を捉えやすい。しかしながら、陸域では、

- (1) 背景となる地表面の放射率が高く、かつ、時間的・空間的な不均一性が大きいいため、大気中の降水から放射されたシグナルを捕まえにくい。
- (2) 降水システムが、地形や地表面の水文状態による影響を受けて複雑な空間・時間変動を示し、それが降水の鉛直プロファイルに反映して降水量算定精度に大きな影響を与える。
- (3) 高緯度での降水は固体である場合が多く、陸域での多様な固体降水算定のアルゴリズムが開発されていない。

のような問題を抱え、マイクロ波放射計による陸域の降水量推定アルゴリズムは研究の域をでない。

陸域降水を対象とした既往のアルゴリズムの多くは、地表面の高い放射率を利用して、降水粒子における散乱に着目した指標が用いる [27, 20] . しかし、地表面の不均一性の影響が大きく、十分な精度の確保が難しい。Fujii and Koike (2001)[23] は、土壌水分と降水の光学的厚さを同時に推定することにより、地表面の空間不均一性と、降水の移動にともなう地表面状態の時間的変動の影響を排除したアルゴリズムを開発している。また、チベット高原におけるレーダ観測データを用いて、降水の光学的厚さと降水量の関係が、個体・液体降水のプロファイルに依存していることも指摘している。今後予定されている GPM では、副衛星群による高頻度のマイクロ波放射計観測と、主衛星による 2 周波レーダとマイクロ波放射計の同時観測が予定されている。2 周波レーダは個体降水にも感度を有し、マイクロ波放射計の高頻度観測と 2 周波レーダによるプロファイル観測を併用することで、陸域降水定量観測の精度向上が期待される。ただし、陸域には、植生が広く分布している。全球規模で降水量の推定を行うためには、植生の放射伝達を評価することが課題となる。

1.2.3 衛星観測と数値モデルとのリンク

最適化理論を用いて理論・モデル・観測を融合するデータ同化は、大気や地表面の過去・現在・未来の状態の推定に最も有望な手法の 1 つである。データ同化法として線形最小分散推定に基づく最適内挿法が広く利用されてきたが、1997 年 11 月、ヨーロッパ中期予報センター (European Center for Medium-Range Weather Forecasts, ECMW) は、4 次元変分法を現業化し、全球数値予報の精度を飛躍的に向上させている。変分法は最尤推定に基づく方法であり、衛星観測による輝度温度観測データなど、数値予報モデルの状態変数と可逆な線形関係にない物理量の観測データをそのまま同化できる特長をもつ。また、最適内挿法では解析解を局所的に計算するのに対し、変分法では全領域の解析値を一括して求めるので、力学的バランスに優れた解析値が得られることも利点である。ただし、高度な同化法になるほど観測データの品質も高い精度が要求される。

衛星で観測される輝度温度データは時間・空間的に断片化されているが、4 次元変分法は、そのようなデータも利用可能である。また、同一のセンサーで全球の計測を行っており、地上に展開した測器から得られるデータと比較してデータ品質が一様である。輝度温度データを数値モデルへ同化させることで、連続的な物理量の算定が可能になり、また、同時に予報精度の改善が期待される。ただし、輝度温度データと物理量の関係を記述する放射伝達モデルは予報精度に見合ったものが要求される。

Aonashi and Liu (1999)[5] は、SSM/I で観測された輝度温度とその 2 次プロダクトである降水フラグをメソ数値予報モデルへ同化する手法を開発した。1 次元変分法を採用し、観測オペレーター

として、散乱を考慮した大気の放射伝達モデル [49] を用いている。TOGA-COARE⁴ 期間中の海洋の降水へ適用し、可降水量の推定精度向上、水蒸気場の大規模スケール予報精度の向上が可能であることを示した。

また、Li *et al* (2004)[47] は、土壌水分算定のための同化手法を開発した。Very Fast Simulated Annealing(VFSA) と呼び、費用関数全体における最小値やピーク値の発見に際して、非線形性や非連続性に起因するエラーを軽減できる特長をもつ。Pathmathevan *et al* (2003)[67] は、地上マイクロ波観測から、その有用性を示している。また、チベット高原で行われた野外観測実験 GAME-Tibet のメソスケールエリアへ適用し、面的な土壌水分の算定を試みている [68]。ただし、放射伝達モデルにおける粗度や植生のパラメータは、現地観測データから較正した値を用いている。

1.2.4 植生域地表面の放射伝達モデルの必要性

これまで述べてきたように、マイクロ波リモートセンシングは、水に適度な感度を持ち、その放射伝達特性を利用することによって、降水から土壌水分まで様々な水文量の推定が可能である。現在、土壌水分と積雪量については、衛星プロダクトの製作が試みられるまでに達している。このうち、土壌水分は、今後打ち上げられる 1GHz 帯のマイクロ波放射計を用いることによって、さらなる精度向上が見込まれている。また、降水量の推定についても、研究段階であるがその方向性が示され、GPM が実現すれば降水現象の時間スケールに対応した衛星データが入手可能である。ところが、これらの陸域水文量に比べて、植生に関する研究は十分であるとはいえない。植生水分量の推定には、植生が持つ多様な幾何学的特徴や植生被覆状態の不均一性を考慮できる放射伝達モデルが必要である。

植生は陸域地表面上広く分布している。これまで、地表面の放射伝達モデルにおいて統計的な取り扱いがなされてきた植生の影響を、物理的な根拠に基づく植生の放射伝達モデルに置き換えることによって、土壌水分や積雪量の推定精度向上にも貢献できると考える。それらの地表面水文量の推定結果は、水循環の理解をする上で重要であると同時に、降水リモートセンシングにおいて背景となる地表面射出の分布を知る上で、価値のある情報になる。また、データ同化においては、物理量と衛星観測値である輝度温度との関係を記述する放射伝達モデル自体の精度が求められており、物理的根拠のある植生域地表面のモデルは、データ同化の精度の向上にも貢献できると考える。

1.3 研究の目的

以上の点を踏まえ、本論文は、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を目的とする。特に、多様な幾何学的特徴をもつ植生の評価、植生被覆の不均一性の影響評価に重点をおき、以下の検討を行う。

- 多様な植生の基礎データを取得するためのシステム開発。
- 衛星観測条件における詳細な植生データの取得。
- 植生の幾何学的特徴ならびに植生被覆の不均一性を考慮した地表面の放射伝達モデルの構築。
- 植生域地表面の放射伝達モデルの精度評価。

⁴ 熱帯海洋および全球大気プログラム海洋－大気結合実験 (Tropical Ocean Global Atmosphere Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment, TOGA-COARE)

この目的のため、衛星搭載型のマイクロ波センサーにおいて利用されている周波数の中でも、植生観測に有利な 10GHz と 18GHz 帯に注目して検討を行う。詳細な植生観測を行うことができる規模に対応したマイクロ波輝度温度データを取得するため、地上ベースのマイクロ波放射計システムを開発し、代表的な植生における基礎データを取得してモデルの検討・精度評価を行う。

1.4 論文の構成

2章では、マイクロ波リモートセンシングの概要を述べ、マイクロ波放射計観測の原理について説明を行う。衛星観測における放射伝達方程式を導出し、電磁波の伝搬を決定する誘電率について、水、土壌、植生の半経験モデルを紹介する。

3章では、既往の研究に基づいて本論文で扱う植生域地表面の放射伝達モデルの検討を行う。

まず、3.1 節において、既往の研究から 2 つのタイプの地表面放射伝達モデルについて述べる。1 つ目は、植生水分量によって放射・吸収の効果を表現した層モデルである。層モデルは、植生を均一な層とみなし、植生水分量と放射・吸収との統計的な関係式を用いて、植生の放射・吸収特性を表現する。主に、6GHz 以下の低い周波数帯を対象としている。2 つ目は、植生の幾何学的特徴を考慮できる離散型散乱体モデルである。離散型体散乱モデルは、植生の構成要素を個々に捉えて消散・射出効果を表現する。周波数帯に応じた 3 つのモデルを紹介する。

3.2 節～3.4 節では、衛星観測に質する地表面放射伝達モデルを提案し、その検討を行う。離散型体散乱モデルは多くの変数を含むために実用性に劣る。一方で、半経験モデルは、衛星観測条件に即した検討が不十分である。そこで、3.2 節では半経験モデルを基本とした拡張モデルを提案する。10GHz と 18GHz の放射伝達へ植生の幾何学的特徴が及ぼす影響を考慮するため、放射伝達に関する 2 つの植生の放射伝達に関するパラメータを導入する。フットプリント内の不均一性の表現、および、複数の植生が混在するときのパラメータの取り扱いについて検討する。また、3.3 節では、植生観測データから 2 つのパラメータを推定する手法を説明し、3.4 節では、衛星観測条件における植生の放射・吸収特性について述べる。

4章では、植生観測手法および、データの取得に関して述べる。高頻度の観測が可能で、検証データの取得も容易なことから、地上可搬型のマイクロ波放射計を開発した。その概要を 4.2 節において述べる。4.4 節では、対象とした植生の特徴について説明する。ソバとクローバーを解析対象とし、検証データとしてイネ、ダイズ、トウモロコシを対象とした。各野外観測の概要は、4.5 節～4.7 節において述べる。

5章では、取得したクローバーとソバのデータを使って植生の放射伝達に関する 2 つのパラメータを推定し、植生の幾何学的特性の観点から考察を行う。5.1 節においてクローバーとソバの解析方針を示し、5.2 節で解析結果および推定値に関する考察を与える。5.4 節では、従来モデルとの比較を交えながらモデルの精度評価を行い、さらに、イネ、ダイズ、トウモロコシのデータを使用して他の植生へのモデル適合性の検討を行う。

6章は、本論文の結論である。

第2章 受動型マイクロ波リモートセンシングとその原理

リモートセンシングとは、「離れた場所から直接触れずに対象物を同定あるいは計測し、またその性質を分析する技術」である [4]。リモートセンシングという用語は 1960 年代に提唱され、計測技術は 1970 年代以降の衛星観測技術の発展とともに急速に普及した。広義では音波や地震波なども含まれ、その応用分野は、室内レベルの各種工業用計測装置から、気象レーダのような地域レベル、大気・陸域・海洋などを対象とした全球レベル、天体観測まで極めて多岐にわたる。

リモートセンシングは、物体から放射、あるいは物体で散乱された電磁波の固有性に基礎をおく。放射源に発し、測定地点まで電磁波が伝搬してくる過程を放射伝達と呼び、計測される電磁波は、放射伝達において寄与を与えた物質の固有の周波数特性が反映されている。この物質固有の周波数特性は分光特性と呼ばれる。対象物の分光特性を把握し、目的に応じて適切な周波数を選択することにより、計測した放射エネルギーから物理量の推定が可能となる。

本章では、リモートセンシングの基礎となる放射伝達や電磁波理論についてまとめ、電磁波の伝搬を決定づける主要な物性である誘電率について述べる。

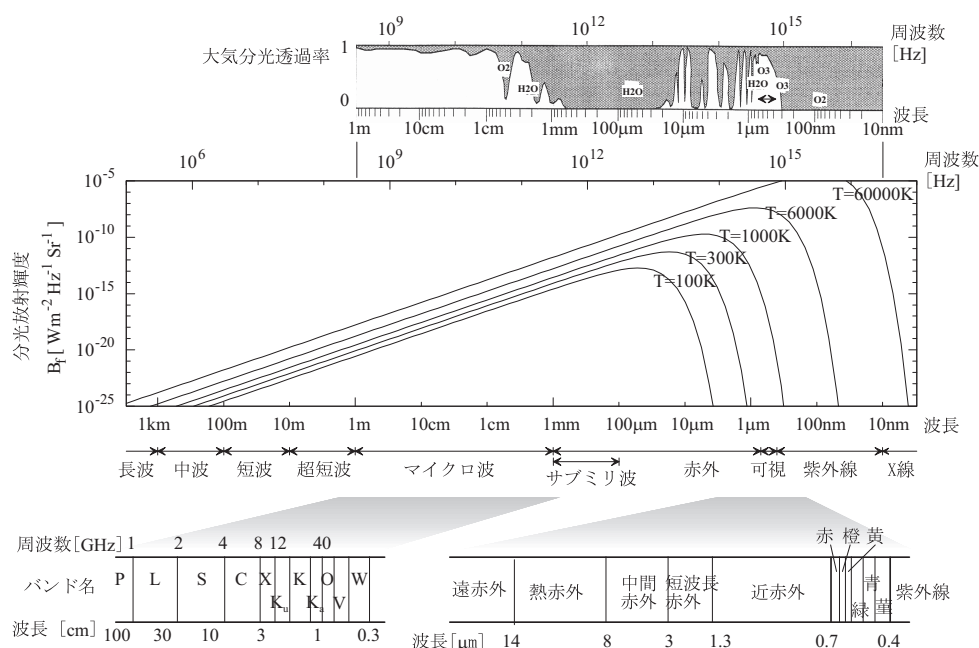


図 2.1: 周波数帯と黒体の分光放射輝度および大気分光透過率

参考:「図解リモートセンシング」[4]。大気分光透過率は、中島 (1995)[3, p.2] から引用。

2.1 リモートセンシングの概要

2.1.1 リモートセンシングとは

身近な例として、私たち人間の「目」を取り上げる。人間の目に感じる電磁波は可視光線と呼ばれ、波長 $0.4 \sim 0.7 \mu m$ の周波数領域を指す。この周波数領域は約 6000K の黒体から放射される電磁波のピーク周波数帯にあたり、可視光線の放射源は主として太陽である。また、「大気の窓」と呼ばれる大気が比較的透明な周波数帯にあたり、地球に入射する太陽光のうち、可視光線は地表面まで到達することができる。対象物に到達した可視光線は、一部は吸収されて他のエネルギーへ変換され、残りは散乱されて「目」まで届く。この過程で対象物の分光特性が反映されることになる。

たとえば、植物を見たときに葉の色が緑や黄・赤と認識できるは、葉に含まれる物質の分光特性に起因する。太陽光は可視域全体に連続したエネルギーを持つが、葉の表面において、葉緑体に含まれるクロロフィルとカロチンにより赤・青緑・青の電磁波が吸収され、緑のみが散乱されるためである。秋になり、クロロフィルの量が減ってカロチンのみになると、赤の電磁波が吸収されず、赤と緑が散乱されて「目」には黄色として認識される。さらに、細胞液中にアントシアニンが生成された場合には、青・青緑・緑が吸収されて葉が赤く見える。このように、人間の「目」は、葉に含まれる物質の特性が反映された電磁波を色として捉えている。物質固有の特性を理解していれば、「目」で捉えた情報から物質の状態の変化を推察することができる。これがリモートセンシングの基本である。いわば、結果を知って原因を求める逆問題である。この逆問題を解くには、原因を知って結果を知る順問題を解かねばならない。人間の「目」は葉の色の変化を定性的に把握しているに過ぎないが、物質固有の特性を定量的に明らかにすれば、クロロフィルやカロチン、アントシアニンの量を計測することが可能である。ただし、一般には、複数の物質の分光特性が電磁波情報に含まれており、多くの場合、単一周波数の測定結果から物理量を一意に定めることは困難である。そのため、複数の周波数帯での測定と、物理量を効率よく抽出するための推定手法が必要となる。

では、もっと波長の長い熱赤外やマイクロ波の「眼」で植物を観ると、どのようになるだろうか。図 2.1 に示すように、これらの波長帯では常温の物体でも放射源になりえる。地球上の物体の多くは、熱赤外域において黒体の放射に近い挙動をすることが多く、計測結果は主として対象物の物理温度を与える。たとえば、非接触型の温度計は熱赤外の周波数帯が使われている。一方、マイクロ波域における放射は、物理温度のほかに対象物の物性に大きく依存している。特に、水分子が特異な誘電率の挙動を示すため、マイクロ波の「眼」でみると、物理温度のほかに、対象物に含まれる水の状態によっても見え方が変わってくる。大まかには、水が多いほど暗くなり、少ないほど明るくなる。ただし、形や大きさ、表面の状態によっても変わってくる。

2.1.2 衛星リモートセンシングの種類

衛星観測に話を移す。一般に、衛星リモートセンシングでは、可視・近赤外～熱赤外、マイクロ波が利用される。電磁波の周波数区分やバンド名は研究分野によって異なるが、リモートセンシングで用いられている名称を図 2.1 に掲載する。

可視・近赤外のリモートセンシングは、前述のように太陽を放射源としており、地表面で反射された太陽光の分光特性を観測する。したがって、地表面対象物の分光反射特性が基本的なパラメーターとなる。これに対し、熱赤外やマイクロ波では、対象物を放射源とし、対象物の放射特性が観測の基本的なパラメーターとなる。

熱赤外の場合、 $8 \sim 12 \mu m$ の窓域を除き、水蒸気の吸収のため大気が不透明であり、二酸化炭素

やオゾンなどの微量気体の吸収線も多数存在する．各吸収線の幅は極めて狭く，複雑な吸収特性を有する．これに対し，マイクロ波は概して大気の透過率がよく，地表面からの情報を衛星観測で捉えやすいことが利点として挙げられる．また，大気中に雲が存在し，可視や赤外でほぼ不透明になってしまう場合でも，適切な周波数を選択することにより，地表面や雲内部の情報を得ることができる．低周波数ほど大気の透過性が良いために地表面のリモートセンシングに適し，周波数が高くなるほど雲や降水に対する感度が高くなる．水循環過程で主役となる H_2O はマイクロ波帯で極めて高い誘電率を有するため，マイクロ波リモートセンシングにおける電磁波の挙動は，主に，対象物に含まれる水の形態に依存するところが大きい，そのため，土壤水分，積雪，降水など水文量や，植生水分量のモニタリングに最適のツールであるといえる．

2.2 物体の放射特性

絶対温度が 0K 以上の全ての物体は，その物理温度に応じた原子や分子の内部状態によって電磁波を放射している．一般に，マイクロ波の領域では，放射エネルギーを輝度温度で表すことが多い．これは，放射エネルギーが温度に比例する線形式で近似できるからである．

2.2.1 黒体の放射則とその近似

まず，完全放射体である黒体の放射を考える．黒体からの表面からは，プランクの放射則に従って，いろいろな周波数の電磁波が放射されている．単位面積，中心周波数 f [Hz] の単位周波数幅，単位立体角あたりに放射される電磁波エネルギーを分光放射輝度と呼び，特定の物理温度 T [K] の黒体の分光放射輝度 B_{bf} [$W m^{-2} sr^{-1} Hz^{-1}$] は，以下のように表される．

$$B_{bf} = \frac{2hf^2}{c^2} \left(\frac{1}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1} \right) \quad (2.1)$$

ここに，

- h プランク定数． 6.63×10^{-34} joules
- k ボルツマン定数． 1.38×10^{-23} joules K^{-1}
- c 光速． $m s^{-1}$

である．中心周波数 f [Hz]，帯幅域 Δf [Hz] における黒体放射輝度 B_b [$W m^{-2} sr^{-1}$] は，

$$B_b = B_{fb} \Delta f \quad (2.2)$$

で与えられる．

マイクロ波帯においては， $\frac{hf}{kT} \ll 1$ が成立するので，式 (2.1) の右辺の分母の指数関数は展開できる¹．このとき，式 (2.2) は次式のように書き直される．

$$B_b = \frac{2k}{\lambda^2} T \Delta f \quad (2.3)$$

式 (2.3) はレイリー・ジーンズの放射式と呼ばれる．波長が長く周波数が低いマイクロ波領域では，放射輝度 B_b は物理温度 T に比例し，波長 λ の 2 乗に反比例する．式 (2.1) の関係を図 2.1 に示す．各曲線の左側の直線部分が式 (2.3) に対応する．式 (2.3) の精度は， $f/T < 3.9 \times 10^8 Hz K^{-1}$ であれば，1% 以下である．これは，物理温度 $T = 300K$ のとき，周波数 $f < 117GHz$ に相当する．

¹ $e^x \approx 1 + x$ を用いる

2.2.2 非黒体の放射則

通常物質は、黒体とは異なり完全放射体ではない。放射輝度 B は黒体の放射輝度 B_b と同じかもしくは小さくなる。その比は、放射率と呼ばれ、次式で定義される。

$$e \equiv \frac{B}{B_b} \quad (2.4)$$

従って、放射輝度 B は、

$$B = eB_b = e \frac{2k}{\lambda^2} T \Delta f \quad (2.5)$$

となる。すなわち、マイクロ波帯の放射エネルギーは、計測に用いる波長(周波数)と帯域幅が与えられると、対象とする物質の物理温度と、その波長(周波数)における放射率の積で決まる。これを輝度温度と呼び、

$$T_B = eT \quad (2.6)$$

と表される。物体の放射率は常に 1 以下 ($0 \leq e \leq 1$) であるため、輝度温度は物理温度よりも低くなる。放射率の値は、物体の誘電率や表面の粗さなどの物理的性質、周波数や偏波、入射角、方位角などの測定条件によって変化する。式 (2.6) を式 (2.5) へ代入し、輝度温度 T_B で表わすと、

$$B = \frac{2k}{\lambda^2} T_B \Delta f \quad (2.7)$$

となる。つまり、輝度温度は、物体の放射輝度と等しい放射輝度をもつ黒体の物理温度であるとみなせ、マイクロ波帯では、放射輝度を温度の単位を持つ輝度温度で表すことができる。

2.3 放射伝達

媒質中のある地点における放射は、そこに至る様々な経路を経て到達したものである。放射エネルギーは、伝搬中に存在する物体により、吸収・散乱されて減衰すると同時に、物体による散乱あるいは熱放射によって増大する。前者は消散、後者は射出と呼ばれる。

2.3.1 消散

いま、図 2.2 に示すように、放射源の輝度 B が断面積 dA 、厚さ dr の物体中を通過して観測点 P に達する場合を考える。物体を通過することによって消散されて失う放射輝度は、

$$dB(\text{extinction}) = k_e B dr \quad (2.8)$$

と表わされる。ここに、 k_e は消散係数と呼ばれる。消散係数は、吸収と散乱の両過程を含んでいる。吸収は、放射エネルギーの形態が変化して他エネルギーへ転換されるのに対し、散乱は、進行方向のみが変化し、エネルギーの変換は起こらない。吸収係数を k_a 、散乱係数を k_s とすると、消散係数は両者の和で表わされる。

$$k_e = k_s + k_a \quad (2.9)$$

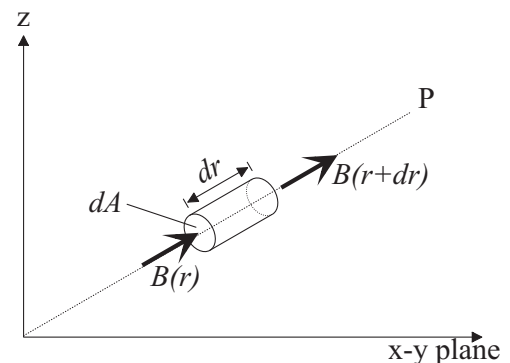


図 2.2: 無限小円柱における放射伝達

また，散乱係数と消散係数の比を単一散乱アルベド ω_0 という．

$$\omega_0 \equiv \frac{k_s}{k_e} \quad (2.10)$$

である．

2.3.2 射出

一方，この物体を通過中に，物体内で生じる熱放射によって放射軽度が増加し，また，他方向からのエネルギーが散乱されて一部は P の方向へ加わる．物体を通過中に射出される放射輝度は，

$$dB(\text{emission}) = (k_a J_a + k_s J_s) dr \quad (2.11)$$

と表わされる．ここに， J_a と J_s は放射源関数と呼ばれ，それぞれ，熱放射と散乱の起源を意味する．

「物質が熱的平衡状態にあるとき，ある波長の電磁波をよく吸収する物質は，その波長の電磁波をよく放射する」

という，キルヒホッフの法則に従えば，熱放射は吸収と等しくなるため， J_a は吸収源関数とも呼ばれ，式 (2.2) のプランクの放射則で与えられる．一方，散乱の放射源関数 J_s は他方向からの入射を起源とする．

$$J_s(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi} \iint_{4\pi} P(\vec{r}; \vec{r}_i) B(\vec{r}_i) d\Omega_i \quad (2.12)$$

ここに， $B(\vec{r}_i)$ は \vec{r}_i 方向から物体へ入射する放射輝度である． $P(\vec{r}; \vec{r}_i)$ は位相関数と呼ばれ， \vec{r}_i 方向から入射された放射が \vec{r} 方向へ散乱される割合を確立分布関数であり，形状や物質の状態に依存する．

式 (2.10) で定義された単一散乱アルベド ω_0 により，式 (2.11) を書き換えると，

$$dB(\text{emission}) = k_e [\omega_0 J_s + (1 - \omega_0) J_a] dr \quad (2.13)$$

となる．ここで，全放射源関数 J

$$J \equiv \omega_0 J_s + (1 - \omega_0) J_a \quad (2.14)$$

を定義し，式 (2.13) へ代入すると，式 (2.8) と同じ形式で表わすことができる．

$$dB(\text{emission}) = k_e J dr \quad (2.15)$$

2.3.3 放射伝達方程式

微小距離 dr における放射輝度の変化量 dB は，式 (2.8) および式 (2.15) より

$$\begin{aligned} dB &= B(r + dr) - B(r) \\ &= dB(\text{emission}) - dB(\text{extinction}) \\ &= k_e dr (J - B) \end{aligned} \quad (2.16)$$

となる．ここで，光学的深さ $d\tau = k_e dr$ を導入すると，

$$\frac{dB}{dr} + B = J \quad (2.17)$$

を得る．式 (2.17) は，放射伝達を記述する基礎式である．

次に、図 2.3 のように、点 O から点 Q まで伝搬する場合を考える。点 O における放射を $B(0)$ とし、 \vec{r} 方向 (θ, ϕ) へ伝搬するものとする。式 (2.17) は点 $Q(r')$ における微小体積の放射収支を与え、点 $Q(r)$ における放射輝度 $B(r)$ は伝搬経路に沿って式 (2.17) を積分することで得られる。

まず、 r_1 から r_2 までの消散係数の積分量 $\tau(r_1, r_2)$ を定義する。

$$\tau(r_1, r_2) \equiv \int_{r_1}^{r_2} k_e dr \quad (2.18)$$

$\tau(r_1, r_2)$ は光学的厚さと呼ばれる。式 (2.17) の両辺に $e^{\tau(0, r')}$ を乗じて、式を整理すると²

$$\frac{d}{d\tau} [B(r')e^{\tau(0, r')}] = J(r')e^{\tau(0, r')} \quad (2.19)$$

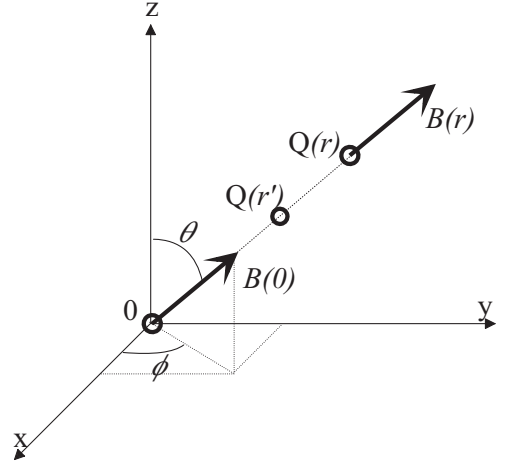


図 2.3: 放射伝達方程式の概念

をとる。両辺を 0 から r まで積分し、 $d\tau$ を $k_e dr$ で置き換えて境界条件を適用すると、

$$B(r) = B(0)e^{-\tau(0, r)} + \int_0^r k_e(r')J(r')e^{-\tau(r', r)}dr' \quad (2.20)$$

を得る。点 $Q(r)$ における \vec{r} 方向の放射輝度 $B(r)$ は 2 つの項からなる。第 1 項は、境界で与えられた放射輝度 $B(0)$ が、点 $Q(r)$ まで伝搬する過程における消散によって $e^{-\tau(0, r)}$ の割合で減衰することを意味する。第 2 項は、伝搬経路上にある点 $Q(r')$ における微小距離 dr' から射出された輝度が、点 $Q(r')$ から点 $Q(r)$ まで伝搬する過程で消散により減衰して届くことを意味し、点 O から点 $Q(r)$ までの積算値である。

式 (2.3) のレイリー・ジーンズの放射式を適用すると、式 (2.20) は温度の次元で表現できる。式 (2.14) を代入し整理すると、

$$T_B(r) = T_B(0)e^{-\tau(0, r)} + \int_0^r k_e(r')[(1 - \omega_0)T(r') + \omega_0 T_{SC}(r')]e^{-\tau(r', r)}dr' \quad (2.21)$$

となる。ここで、 T_B は輝度温度、 T は物理温度をある。 T_{SC} は、形式上、散乱の放射源関数を温度の次元で表わしたものである。

$$T_{SC}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi} \iint_{4\pi} P(\vec{r}; \vec{r}_i) T_B(\vec{r}_i) d\Omega_i \quad (2.22)$$

散乱の影響がない場合 ($T_{SC} = 0$)、簡単に輝度温度を求めることができる。しかしながら、散乱を考慮する場合には、解析的に解くことは困難であり、式 (2.17) を数値的に解くことが必要となる。数値解法には、doubling-adding 法 [31]，discrete ordinate 法 [12, 48]，spherical harmonics 法 [38]，モンテカルロ法 [70, 14] など様々な手法が提案されている。doubling-adding 法は、1 次散乱あるいは 2 次散乱で近似できる薄い層の反射・散乱行列を求め、それを重ね合わせる方法である。discrete ordinate 法は、式 (2.21) を連立微分方程式に置きなおし、固有値問題として解く方法である。また、spherical harmonics 法は、放射場を球面調和関数で級数展開して方程式へ代入し、その係数についての連立微分方程式を解く方法である。

式 (2.21) は、マイクロ波放射計観測において基本となる放射伝達方程式である。大気をはじめ、植生や積雪、土壌など様々な対象へ適用可能である。対象物の物理特性は、消散係数すなわち吸収係数と散乱係数、および位相関数に含まれるため、対象とする物理量によって適切な記述をすることにより、計測した輝度温度から物理量の推定が可能となる。

²部分積分を使用： $\frac{dB}{d\tau} e^{\tau(0, r')} + B(r')e^{\tau(0, r')} = \frac{d}{d\tau} [B(r')e^{\tau(0, r')}]$

2.4 電磁波の波動情報

電磁波は、電磁場の周期的な変化が真空中や物質中を伝わる横波である．電磁波のエネルギーに加え、波としての電磁波の性質から物質と電磁波の相互作用を理解することにより、リモートセンシングによる情報収集の範囲を広げることができる．本節では、マクスウェル (James Clerk Maxwell, 1831 ~ 1879, イギリス) によって整理された電界と磁界の性質について述べる．

2.4.1 マクスウェルの方程式

電界と磁界を記述するパラメーターは、以下のように 6 個ある．

$$\begin{aligned} \text{電界強度 } \vec{E} [V \cdot m^{-1}] &\longleftrightarrow \text{磁界強度 } \vec{H} [A \cdot m^{-1}] \\ \text{電荷密度 } \rho [C \cdot m^{-3}] &\longleftrightarrow \\ \text{電束密度 } \vec{D} [C \cdot m^{-2}] &\longleftrightarrow \text{磁束強度 } \vec{B} [Wb \cdot m^{-2}] \\ \text{電流 } \vec{J} [A \cdot m^{-2}] &\longleftrightarrow \end{aligned}$$

ここで、電荷密度以外はベクトル量である．磁界には、電荷に相当する「磁荷」がなく、したがって、電流に相当する「磁流」もない．

マクスウェルは、静磁界のアンペアの法則に変位電流の概念を導入して、電磁波の基礎方程式として知られるマクスウェルの方程式を導出した [53] ．

$$\text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{Faraday's Law}) \quad (2.23)$$

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{Ampere's Law}) \quad (2.24)$$

$$\text{div} \vec{D} = \rho \quad (\text{Gauss' Law}) \quad (2.25)$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{Gauss' Law for Magnetic Charges}) \quad (2.26)$$

また、 $\sigma [S \cdot m^{-1}]$ 、 $\varepsilon [F \cdot m^{-1}]$ 、 $\mu [H \cdot m^{-1}]$ を導電率、誘電率、透磁率とすると、以下の関係式を構成方程式と呼ぶ．

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.27)$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (2.28)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.29)$$

マクスウェルの方程式は、空間と時間を変数とする過渡電磁界を満足する偏微分方程式である．一般に解析的に解くことは困難である．そこで、単色の解と呼ばれる定常状態の解を扱う．角周波数を ω とすると、電界と磁界は、時間 t と空間 $\vec{r}(x, y, z)$ の積の形に分離され、

$$\vec{E}(x, y, z, t) = \vec{E}_0(x, y, z) e^{j\omega t} \quad (2.30)$$

$$\vec{H}(x, y, z, t) = \vec{H}_0(x, y, z) e^{j\omega t} \quad (2.31)$$

また、電界と磁界の時間微分は、

$$\frac{\partial \vec{E}(x, y, z, t)}{\partial t} = \vec{E}_0(x, y, z) \frac{\partial e^{j\omega t}}{\partial t} = j\omega \vec{E}(x, y, z, t) \quad (2.32)$$

$$\frac{\partial \vec{H}(x, y, z, t)}{\partial t} = \vec{H}_0(x, y, z) \frac{\partial e^{j\omega t}}{\partial t} = j\omega \vec{H}(x, y, z, t) \quad (2.33)$$

と置き換えることができる．これを適用すると，マクスウェルの方程式は，構成方程式も含め，以下のように簡略化できる．

$$\text{rot} \vec{\mathbf{E}} = -j\omega\mu\vec{\mathbf{H}} \quad (2.34)$$

$$\text{rot} \vec{\mathbf{H}} = j\omega\left(\varepsilon + \frac{\sigma}{j\omega}\right)\vec{\mathbf{E}} \quad (2.35)$$

$$\text{div} \vec{\mathbf{E}} = \frac{\rho}{\varepsilon} \quad (2.36)$$

$$\text{div} \vec{\mathbf{H}} = 0 \quad (2.37)$$

以上の関係から，電磁波の波動を表すベクトル・ヘルムホルツ方程式が誘導される．ここでは，着目している空間に電荷が存在しない場合，つまり，外部で励振された波動が伝播する場合を考える．

$$\Delta \vec{\mathbf{E}}_0 + k^2 \vec{\mathbf{E}}_0 = 0 \quad (2.38)$$

$$\Delta \vec{\mathbf{H}}_0 + k^2 \vec{\mathbf{H}}_0 = 0 \quad (2.39)$$

ここで， k は伝播定数 (あるいは波数) であり，角周波数 ω ，導電率 σ ，誘電率 ε ，透磁率 μ を用いて記述される．

$$k = \omega \sqrt{\mu \left(\varepsilon + \frac{\sigma}{j\omega} \right)} \quad (2.40)$$

ベクトル・ヘルムホルツ方程式は，正弦的に時間変化する定常状態の電磁波動を決定するため，広い意味で，波動方程式とも呼ばれる．電界と磁界の 2 つの波動方程式は，マクスウェルの方程式から明らかなようにお互いに独立ではなく，一方の解が求まれば，式 (2.34) もしくは式 (2.35) から他方が定まる．

2.4.2 無損失媒質中の平面電磁波

図 2.3 のように，一方向に伝搬する電磁波を取り上げる．説明を簡単にするために，無損失媒質 (導電率 $\sigma = 0$) を平面波が伝搬していく場合を考える．平面波は，波に進行方向に波面が直交し，その波面上で波の振幅が一定となる波である．ある点から発生した波の波面は球面上に広がるが，遠方では平面とみなすことができる．波に進行方向を z 軸に選ぶと，その定義から x 軸方向と y 軸方向に界は変化しないことから，式 (2.38) は

$$\left(\frac{d}{dz} \right)^2 \vec{\mathbf{E}}_0 + k_0^2 \vec{\mathbf{E}}_0 = 0 \quad (2.41)$$

と簡略化できる．ここに， k_0 は無損失媒質の伝搬定数である． $\varepsilon = \varepsilon_0$ (空気中または真空の誘電率)， $\mu = \mu_0$ (空気の透磁率) とすると，

$$k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} \quad (2.42)$$

である．このとき，微分方程式の解は， $\vec{\mathbf{A}}^+$ と $\vec{\mathbf{A}}^-$ を定数ベクトルとして，

$$\vec{\mathbf{E}}_0 = \vec{\mathbf{A}}^+ e^{-jk_0 z} + \vec{\mathbf{A}}^- e^{jk_0 z} \quad (2.43)$$

の形で与えられる．ここで，式 (2.30) の定常状態の電界 $\vec{\mathbf{E}}$ へもどり，その指数部から平面波の等位相面 (波面) について考える．第 1 項の等位相面は，

$$-k_0 z + \omega t = \text{constant} \quad (2.44)$$

で与えられる．この式は，時間 t が経過すると「一定値」を満たすべく等位相面の位置 z はプラス方向へ移動することを意味している．同様に，第 2 項の等位相面はマイナス方向へ移動する．このため，第 1 項は進行波，第 2 項は後退波と呼ばれる．両者は，方向だけが異なる同一の波である．平面電磁波の性質を記述するためには進行波について考えれば十分である．

進行波の電界成分は，振幅を $\vec{E}_{00} = (E_{00x}, E_{00y}, E_{00z})$ とすると，

$$\vec{E}_0 = \vec{E}_{00} e^{-jk_0 z} \quad (2.45)$$

のようになる．同様に，磁界成分は，振幅を $\vec{H}_{00} = (H_{00x}, H_{00y}, H_{00z})$ とすると，

$$\vec{H}_0 = \vec{H}_{00} e^{-jk_0 z} \quad (2.46)$$

となる．いま，電荷 ρ が存在しない場合を考えているので，式 (2.36) は，

$$\text{div} \vec{E} = 0 \quad (2.47)$$

である．式 (2.45) を式 (2.47) へ代入すると，

$$\frac{\partial}{\partial x}(E_{00x} e^{-jk_0 z}) + \frac{\partial}{\partial y}(E_{00y} e^{-jk_0 z}) + \frac{\partial}{\partial z}(E_{00z} e^{-jk_0 z}) = 0 \quad (2.48)$$

となる．ここで，平面波の定義にもどると， x 軸方向と y 軸方向の電界の変化は起こらない．したがって，左辺の第 1 項と第 2 項はゼロである．式 (2.48) が成立するためには，

$$E_{00z} = 0 \quad (2.49)$$

である．同様に，磁界についても式 (2.26) と式 (2.46) から，

$$H_{00z} = 0 \quad (2.50)$$

が得られる．つまり，平面電磁波が進行方向に成分を持たない横波であることがわかる．

次に，電界と磁界の関係について考える．式 (2.30)(2.31) を式 (2.34) へ代入すると，

$$\text{rot} \vec{E}_0 = -j\omega\mu_0 \vec{H}_0 \quad (2.51)$$

となり，左辺を展開して磁界について整理すると，

$$H_0 = \frac{k_0}{\omega\mu_0} e^{-jk_0 z} (E_{00y}, -E_{00x}, 0) \quad (2.52)$$

を得る．これより，式 (2.46) の磁界の振幅は，

$$H_{00} = \frac{k_0}{\omega\mu_0} (E_{00y}, -E_{00x}, 0) \quad (2.53)$$

であることがわかる．電界の振幅 E_{00} と磁界の振幅 H_{00} の内積と外積を求めると，

$$E_{00} \cdot H_{00} = \frac{k_0}{\omega\mu_0} (-E_{00x} E_{00y} + E_{00x} E_{00y}) = 0 \quad (2.54)$$

$$E_{00} \times H_{00} = \frac{k_0}{\omega\mu_0} (E_{00x}^2 + E_{00y}^2) \vec{k} \quad (2.55)$$

となる． \vec{k} は z 軸方向の単位ベクトルである．これより，電界と磁界は直交し，かつ，電界から磁界方向の右ねじ方向へ伝搬することがわかる．

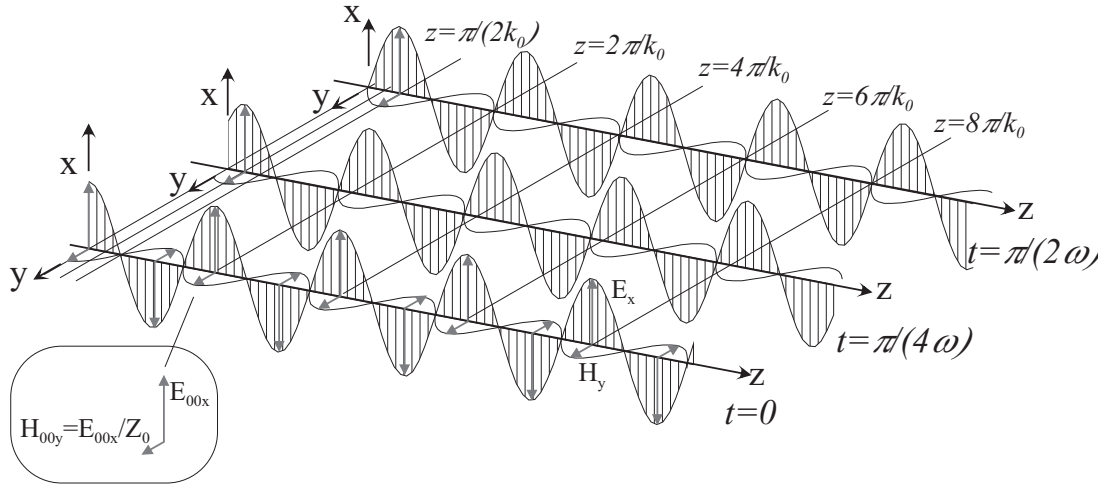


図 2.4: 平面電磁波の概念

時刻 $t = 0, \frac{\pi}{4\omega}, \frac{\pi}{2\omega}$ における電界 E と磁界 H の状態

以上のような平面電磁波の概念を図 2.4 示す．最も簡単な例として，電界が x 成分のみの場合を示す．この場合，平面電磁波の性質から磁界は y 成分のみとなる．電界と磁界を，それぞれ $\vec{E} = (E_x, 0, 0)$ と $\vec{H} = (0, H_y, 0)$ とすると，式 (2.34) から，磁界 H_y は

$$H_y = j \frac{1}{\omega \mu_0} \frac{\partial E_x}{\partial z} \quad (2.56)$$

となる．ここで，式 (2.30)(2.45) より，電界 E_x は，

$$E_x = E_{00x} e^{j(-k_0 z + \omega t)} \quad (2.57)$$

である．式 (2.57)(2.56) より，電界と磁界の実数表示は，

$$\text{Re}[E_x] = E_{00x} \cos(-k_0 z + \omega t) \quad (2.58)$$

$$\text{Re}[H_x] = \frac{E_{00x}}{Z_0} \cos(-k_0 z + \omega t) \quad (2.59)$$

となる．ただし， Z_0 は特性インピーダンス．

$$Z_0 = \frac{\omega \mu_0}{k_0} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \quad (2.60)$$

図 2.4 には，時刻 $t = 0, \frac{\pi}{4\omega}, \frac{\pi}{2\omega}$ における電界および磁界の分布を示してある．電界と磁界の最大値を連ねた点の値は， z の増加に対して常に一定（等振幅）である．いいかえれば，電磁界の振幅が一定である．磁界の振幅は，常に電界の振幅より常に $\frac{1}{Z_0}$ だけ小さく，かつ，両者は同相である．また，その周期は， $\lambda = \frac{2\pi}{k}$ で一定である． λ は，波長と呼ばれる．

2.4.3 損失性媒質中の平面電磁波

2.4.2 節で，無損失損失性媒質 ($\sigma = 0$) 中の平面波の特性について述べたが，本節では，損失性媒質あるいは導電性媒質における電磁波について述べる．水や土壌，電離層などが損失性媒質にあたる．これらの媒質では電磁波のエネルギーは，熱として失われる．

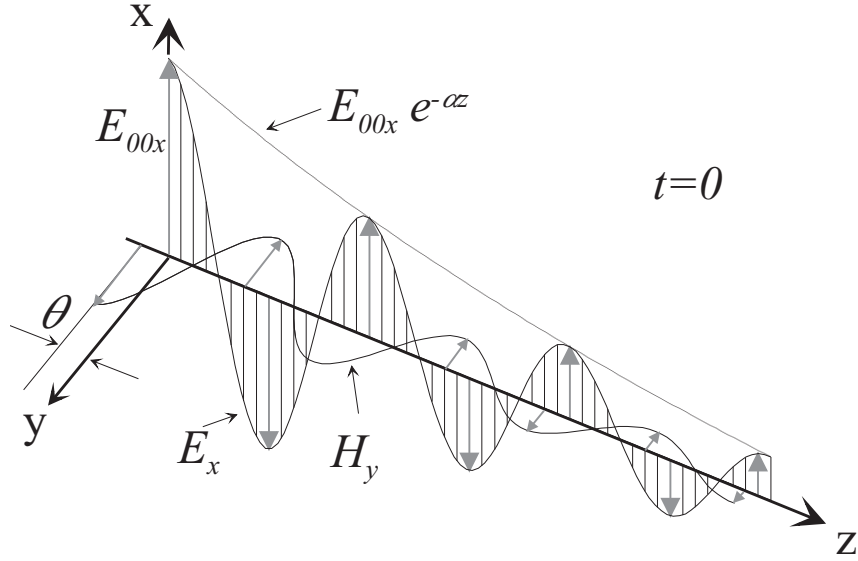


図 2.5: 損失性媒質中の伝搬する電磁波
時刻 $t = 0$ における電界 E と磁界 H の状態

損失性媒質の平面波の電磁界は，無損失媒質の伝搬定数 k_0 を式 (2.40) に置き換えることによって得られる．式 (2.40) で示される伝搬定数 k は， $\sigma \neq 0$ であるので複素数になる．そこで，

$$k = \omega \sqrt{\mu \left(\varepsilon + \frac{\sigma}{j\omega} \right)} = \beta - j\alpha \quad (2.61)$$

とおく．式 (2.61) の両辺を二乗し，かつ，実部と虚部からなる連立方程式を解くと α と β が求まる．

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon} \right)^2} - 1 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (2.62)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon} \right)^2} + 1 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (2.63)$$

いま，図 2.4 と同じように，電界が x 成分のみである場合を考える．式 (2.58)(2.59) および式 (2.60) に式 (2.61) を適用すると，損失性媒質中を伝搬する電界および磁界が求まる．

$$E_x = E_{00x} e^{j(-kz + \omega t)} \quad (2.64)$$

$$H_y = \frac{E_{00x}}{Z} e^{j(-kz + \omega t)} \quad (2.65)$$

$$\text{ここに } Z = \frac{\omega\mu}{k} = \frac{\omega\mu}{\beta - j\alpha} \quad (2.66)$$

電界と磁界の実数表示は，それぞれ，

$$E_x = E_{00x} e^{-\alpha z} \cos(-\beta z + \omega t) \quad (2.67)$$

$$H_y = \frac{E_{00x}}{|Z^*|} e^{-\alpha z} \cos(-\beta z + \omega t - \theta) \quad (2.68)$$

となる． $*$ は複素共役を意味し， θ は Z^* の偏角である．

時刻 $t = 0$ における電界と磁界は，図 2.5 のようになる．図 2.4 とは異なり，電界と磁界は振動しながら次第に小さくなることがわかる．電界の振動の周期は $\cos \beta z$ で決まり，電界 E_x は $e^{-\alpha z}$ で

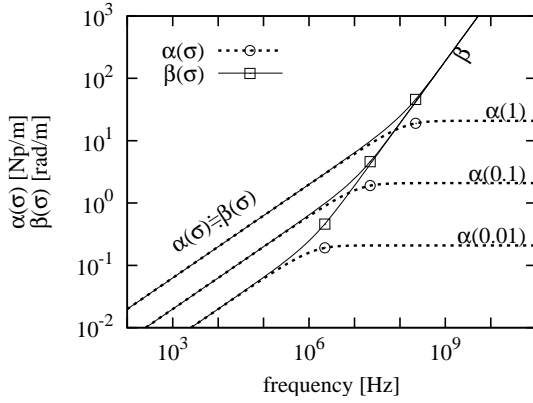


図 2.6: 減衰定数 α と位相定数 β の特性
 計算条件: 比誘電率 $\epsilon_s = 81$ (水), 伝導率 $\sigma = 1, 0.1, 0.01$. プロットは $\frac{\sigma}{\omega\epsilon} = 1$ における計算値を示す. (参考: 上崎 (1991)[105, p.36])

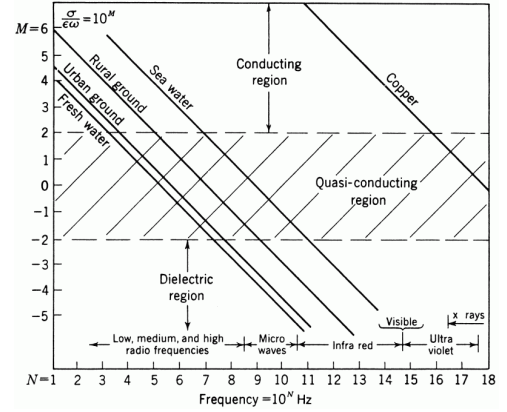


図 2.7: 代表的な物質の $\tan \delta$ の特性
 Kraus(1984)[44, p.446] より引用

減衰していく. α と β は, それぞれ, 媒質の減衰定数と位相定数と呼ばれる. エネルギーの減衰量は電界の強さの減衰量の二乗であることから, 吸収係数 K_a は,

$$k_a = 2\alpha \quad (2.69)$$

となる. また, E_x の振幅が $1/e$ になる距離 $\delta = 1/\alpha$ は表皮深さと呼ばれ, エネルギーが $1/e$ になる深さ $\delta/2$ を侵入深さと呼ばれる. 両者は, 電磁波がどの程度侵入するかの目安となる. 一方, 磁界 H_y は, 振幅が電界の振幅より $1/|Z^*|$ だけ小さく, かつ, 位相は電界より θ だけ遅れる.

2.4.4 減衰定数 α と位相定数 β の特性

式 (2.62)(2.63) において, ϵ, μ, σ は, ω に対して一定であり, かつ, 式 (2.62)(2.63) は, ω の関数となっている. 媒質中の電磁波の伝播を表す減衰定数 α と位相定数 β は, ϵ, μ, σ の媒質の特性と, 周波数によって特徴付けられる. α と β の単位は, Np/m あるいは dB/m である. β は radian/m である. 式 (2.62)(2.63) を説明するために, 水の比誘電率 $\epsilon_s = 81$ (真空の誘電率との比 $\epsilon_s = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$) のときの計算例を示す. 透磁率は地球上のほとんどの物質はほぼ等しいため空気の透磁率を用い, 導電率 σ を 1, 0.1, 0.01 の 3 通り与えて計算した結果である. 図中のプロットは, $\frac{\sigma}{\omega\epsilon} = 1$ となるとき周波数における計算値である. $\frac{\sigma}{\omega\epsilon}$ は $\tan \delta$ と呼ばれ, 媒質の特性を決める 1 つの基準となる. α と β の各計算値は, $\tan \delta \approx 1$ の付近で変曲点となり, その前後で性質が異なる. $\tan \delta \gg 1$, つまり σ が大きいとき, あるいは ω が小さいとき, 媒質は導体として働き, $\tan \delta \ll 1$, つまり σ が小さいとき, あるいは ω が小さいとき, 媒質は誘電体として働く. その中間 $\tan \delta \approx 1$ は準導電性媒質である. 導体と誘電体は, それぞれ以下のように近似できる.

$$\alpha \approx \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}, \quad \beta \approx \omega \sqrt{\mu\epsilon} \quad \text{for } \tan \delta \ll 1 \quad (2.70)$$

$$\alpha \approx \beta \approx \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} \quad \text{for } \tan \delta \gg 1 \quad (2.71)$$

各媒質の $\tan \delta$ の特性の図 2.7 に示す. マイクロ波帯では, 水や土壌は誘電体として働く.

2.4.5 複素比誘電率

全ての物質は、正電荷を帯びた原子核と負電荷を持った電子から構成されている。したがって、物質を電界中におくと、これらの荷電粒子はクーロン力により変位する。導体や半導体の場合には、電子が運動し電流が流れるが、誘電体では構成荷電粒子がそれらの平衡位置からわずかに移動するだけで、正負の電荷対(双極子)が電界を打ち消す方向に配列して表面に電荷を生じる。このような現象を誘電分極と呼び、分極の機構から、電子分極、イオン分極、配勾分極に分類される。電子分極は、電子雲と原子が相対的に変位を起こすことによって生じ、全ての物質に起こりうる。イオン分極は NaCl のようなイオン結晶によって、また、配勾分極は H₂O のように正負の電荷の重心が一致していない分子に起こる分極である。

通常、分極にともなう電荷の変位は慣性をともなうため、電磁波のような交流電界の場合は位相の遅れとなって現れる。電界の変化が遅い間、双極子の変化は追従できるが、ある周波数以上になるとその変化についていけなくなる。このため、誘電率が角周波数 ω 依存性を持つ。この現象は、誘電分散と呼ばれる。電気双極子の遅れによって生じる位相差を ϕ とすると、式 (2.28) より、

$$D_0 e^{j(\omega t - \phi)} = \varepsilon E_0 e^{-j\omega t} \quad (2.72)$$

ε について整理すると、複素数となる。

$$\varepsilon = \frac{D_0}{E_0} e^{-j\phi} = \frac{D_0}{E_0} (\cos \phi - j \sin \phi) = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (2.73)$$

誘電分散が生じる角周波数の大まかな値は次のようである。

- 配勾分極：短波～マイクロ波領域
- イオン分極：赤外線領域
- 電子分極：紫外線領域

なお、マイクロ波リモートセンシングで対象とする水分子 H₂O は典型的な分極分子である。

また、完全な誘電体であれば加えられた電界エネルギーは保存されるが、導電性をわずかに有する不完全誘電体の場合は伝導電流によってエネルギーが失われる。この効果を含めた実効誘電率 ε_{eff} は次のように定義される。

$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon - j \frac{\sigma}{\omega} \quad (2.74)$$

これは、式 (2.40) の誘電率の項と導電率の項の和について虚数部を整理したものである。式 (2.73) を式 (2.74) へ適用すると、

$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon' - j \left(\varepsilon'' + \frac{\sigma}{\omega} \right) \quad (2.75)$$

となる。これを改めて、

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (2.76)$$

と表して、物質の複素誘電率と呼ぶ。ここで、複素誘電率の実部は回転による位相の遅れの効果を含んでおり、虚部は不完全な誘電体であるために生じる導電性によるエネルギーロスと位相差の両方の効果を含んでいる。また、真空の誘電率に対する物質の誘電率の比を複素比誘電率 ε_r と呼び、次式で表わされる。

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (2.77)$$

2.4.6 偏波

2.4.2 節および 2.4.3 節では、電界が x 軸方向にあるときを取り上げたが、一般には、進行方向の z 軸に直行する x, y 方向の 2 つの振動成分を持っている。これら 2 つの成分を持つ横波の振動伝搬の様子は、波の偏り、偏波の概念として理解・分類されている。電界と磁界は式 (2.34) より関係付けられるため、ここでは、電界を取り上げ、偏波について述べる。

いま、 z 方向に進行する振幅、位相がお互いに異なる 2 つの平面波を考える。それぞれ、 x 方向と y 方向に電界の振動面をもち、振幅の位相が ϕ と ψ である 2 つの波の和は、

$$\vec{E} = \{\vec{i} E_{00x} e^{j\phi} + \vec{j} E_{00y} e^{j\psi}\} e^{j(-kz + \omega t)} \quad (2.78)$$

と表わせる。ここで、 \vec{i} と \vec{j} は、それぞれ単位ベクトルである。電界の実数表示は次のようになる。

$$\text{Re}[E] = \vec{i} E_{00x} \cos(-k_0 z + \omega t + \phi) + \vec{j} E_{00y} \cos(-k_0 z + \omega t + \psi) \quad (2.79)$$

これより、電界ベクトルの先端を x - y 平面への射影した軌跡は楕円を描くことがわかる。これは楕円偏波と呼ばれる。振幅が等しく ($E_{00x} = E_{00y}$)、位相差が $\phi - \psi = \pm \frac{\pi}{2}$ である場合には、その軌跡は円となる。これを円偏波と呼ぶ。回転方向は x - y 平面をどちらの方向から見るかで定義が異なる。電磁波工学では電磁波の進行を後ろから見て定義しているので、 y 成分に対する x 成分の位相差が $-\frac{\pi}{2}$ のとき右円偏波、 $\frac{\pi}{2}$ のとき左円偏波と呼ばれている。また、位相が等しい場合 ($\phi = \psi$) には、軌跡は直線となる。図 2.4 と図 2.4 は、 $\phi = \psi$ 、かつ、 $E_{00y} = 0$ の場合である。 $E_{00x} = E_{00y}$ になると偏波面は 45 度になる。

リモートセンシングでは平面からの電磁波の放射や、境界面での反射や屈折を扱うことが多く、2 種類の電界方向を有する直線偏波が用いられる。対象とする平面の法線ベクトルと電磁波の進行方向がつくる面を入射面と呼び、電界強度ベクトルが入射面に対して垂直 (perpendicular) な場合を s 偏波 (TE 波)、平行 (parallel) な場合を p 偏波 (TM 波) と呼ぶ。また地表面を基準に考えると、それぞれは水平偏波 (horizontal polarization)、垂直偏波 (vertical polarization) と呼ばれる。

2.4.7 物質境界面での反射と放射

2 媒質境界面での平面波の反射・屈折の問題は、数学的な境界値問題として、また、物理的にも光学の基本問題として、歴史的に重要な位置にある。衛星リモートセンシングでも、背景となる地表面における電磁波の挙動を知るうえで最も基本となる事項である。

まず、図 2.8(a) のように、媒質 1, 2 の境界面へ水平偏波 (TE 波) が入射する場合を考える。このとき、境界面での電界・磁界の接線成分の連続性から、媒質 1 側と媒質 2 側での接線成分のそれぞれの和が等しくなる。

$$E_x^i + E_x^r = E_x^t \quad (2.80)$$

$$H_y^i + H_y^r = H_y^t \quad (2.81)$$

ここで、入射波の電界振幅を 1 とし、反射波と透過波の電界振幅をそれぞれ $R_{TE,12}$ と $T_{TE,12}$ とすると、電界・磁界の境界面接線成分は

$$\begin{cases} E_x^i = e^{-jk_1(z \cos \theta_i + y \sin \theta_i)}, \\ E_x^r = R_{TE,12} e^{-jk_1(z \cos \theta_r + y \sin \theta_r)}, \\ E_y^t = T_{TE,12} e^{-jk_2(z \cos \theta_t + y \sin \theta_t)}, \\ \begin{cases} H_x^i = \frac{\cos \theta_i}{Z_1} e^{-jk_1(z \cos \theta_i + y \sin \theta_i)} \\ H_x^r = -R_{TE,12} \frac{\cos \theta_r}{Z_1} e^{-jk_1(z \cos \theta_r + y \sin \theta_r)} \\ H_y^t = T_{TE,12} \frac{\cos \theta_t}{Z_2} e^{-jk_2(z \cos \theta_t + y \sin \theta_t)} \end{cases} \end{cases}$$

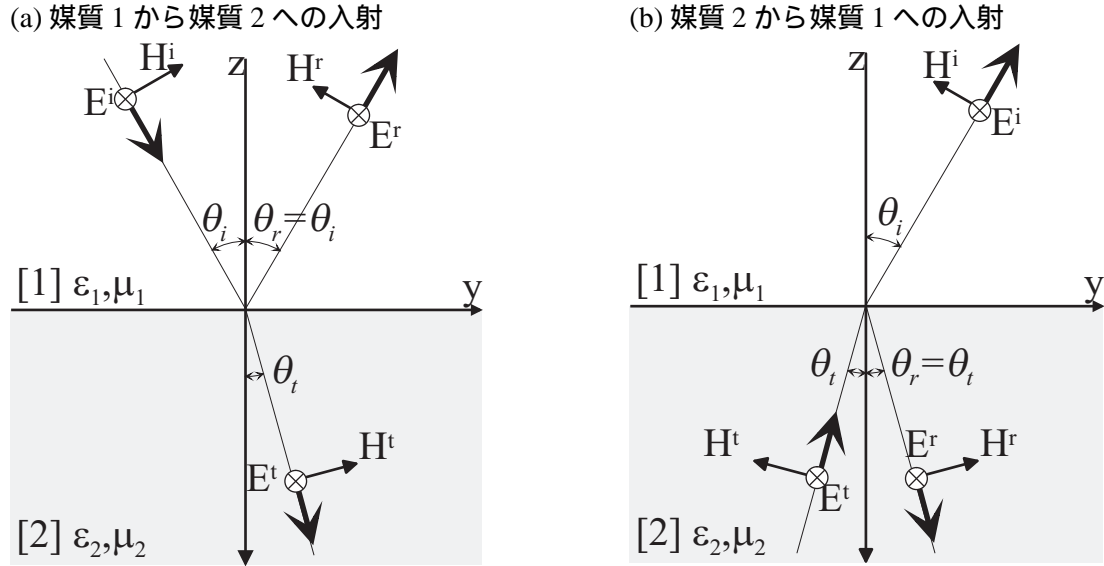


図 2.8: 平面波の反射と屈折 (水平偏波, TE 波)

となり, 式 (2.80)(2.81) へ代入すると,

$$e^{-jk_1(y \sin \theta_i)} + R_{TE,12} e^{-jk_1(y \sin \theta_r)} = T_{TE,12} e^{-jk_2(y \sin \theta_t)} \quad (2.82)$$

$$\frac{\cos \theta_i}{Z_1} e^{-jk_1(y \sin \theta_i)} - R_{TE,12} \frac{\cos \theta_r}{Z_1} e^{-jk_1(y \sin \theta_r)} = T_{TE,12} \frac{\cos \theta_t}{Z_2} e^{-jk_2(y \sin \theta_t)} \quad (2.83)$$

を得る. これらの式が境界面上において位置に関係なく成立するためには, 位相が等しいなければならない (位相整合条件) ことから, よく知られた反射・屈折の法則が導かれる.

$$\theta_i = \theta_r \quad (2.84)$$

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_t} = \frac{k_2}{k_1} \equiv n \quad (\text{snell's law}) \quad (2.85)$$

n は屈折率である. 式 (2.85) を考慮すると, 式 (2.82)(2.83) から, 反射波の振幅が求まる.

$$R_{TE,12} = \frac{1 - K_{TE}}{1 + K_{TE}} \quad (2.86)$$

$$T_{TE,12} = 1 + R_{TE,12} = \frac{2}{1 + K_{TE}} \quad (2.87)$$

$$K_{TE} = \frac{Z_1 \cos \theta_t}{Z_2 \cos \theta_i} = \frac{\mu_1 \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_i}}{\mu_2 \cos \theta_i} \quad (2.88)$$

また, 垂直偏波の反射率 R_{TM} と透過率 T_{TM} も同様にして求まる.

$$R_{TM,12} = \frac{1 - K_{TM}}{1 + K_{TM}} \quad (2.89)$$

$$T_{TM,12} = 1 + R_{TM,12} = \frac{2}{1 + K_{TM}} \quad (2.90)$$

$$K_{TM} = \frac{Z_2 \cos \theta_t}{Z_1 \cos \theta_i} = \frac{\varepsilon_1 \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_i}}{\varepsilon_2 \cos \theta_i} \quad (2.91)$$

入射波の振幅を 1 としているため, 以上のように求まった反射波と透過波の振幅は, ただちに, 電界強度の反射係数を与える. これらは滑らか面で成立し, フレネルの反射係数と呼ばれ, その値

には，電界の強度だけでなく，位相の変化も考慮されている．フレネルの反射係数を用いると，偏波 p の電磁波エネルギーの反射率を次式のように表すことができる．

$$|R_{p,12}|^2 \equiv \Gamma_p \quad (2.92)$$

これをフレネルの電力反射係数 Γ_p と呼ぶ．また，通常の媒質では， $\mu_1 = \mu_2 = \mu_0$ であるため，式 (2.86)(2.89) を整理すると，水平偏波と垂直偏波の反射率は複素誘電率と入射角で表わすことができる．

$$R_{TE,12} = \frac{\cos \theta_i - \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} - \sin^2 \theta_i}}{\cos \theta_i + \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} - \sin^2 \theta_i}} \quad (2.93)$$

$$R_{TM,12} = \frac{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \cos \theta_i - \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} - \sin^2 \theta_i}}{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \cos \theta_i + \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} - \sin^2 \theta_i}} \quad (2.94)$$

媒質 1 が空気の場合には，複素誘電率の比 $\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$ は，媒質 2 の複素比誘電率 ε_r となる．

次に，媒質 2 からの放射を考える．図 2.8(b) に示すように，媒質 2 からの放射は，媒質 2 から媒質 1 への透過波として捉えることができる．いま，媒質 2 から境界面へ入射角 θ_i で入射する電磁波を考え，透過波の角度を θ_t とすると，位相整合条件から，式 (2.85) のスネルの法則はそのまま成立する．入射波の振幅を 1 とおき，反射波の振幅を $R_{TE,21}, R_{TM,21}$ とすると，それぞれば，媒質 1 から媒質 2 への入射の場合を同様に導出できる．

$$R_{TE,21} = \frac{K_{TE} - 1}{1 + K_{TE}} \quad (2.95)$$

$$R_{TM,21} = \frac{K_{TM} - 1}{1 + K_{TM}} \quad (2.96)$$

式 (2.86)(2.89) および式 (2.95)(2.96) より，

$$R_{TE,21} = -R_{TE,12} \quad (2.97)$$

$$R_{TM,21} = -R_{TM,12} \quad (2.98)$$

が成立する．したがって，媒質 2 から媒質 1 へ入射するときのフレネルの電力反射係数は，媒質 1 から媒質 2 へ入射するときのフレネルの電力反射係数に等しいことになる．

$$|R_{p,21}|^2 = |R_{p,12}|^2 \equiv \Gamma_p \quad (2.99)$$

ここで，境界面でのエネルギー収支を考える．媒体 2 から偏波 p で境界面へ入射するエネルギーを $P_{i,p}$ ，反射するエネルギーを $P_{r,p}$ ，透過するエネルギーを $P_{t,p}$ とすると，

$$P_{i,p} = P_{r,p} + P_{t,p} \quad (2.100)$$

が成り立つ．式 (2.99) の電力反射係数を用いると，透過波のエネルギーは，

$$P_{t,p} = P_{i,p} - P_{r,p} = (1 - \Gamma_p)P_{i,p} \quad (2.101)$$

のようになる．したがって，媒質 2 から媒質 1 へ透過するエネルギーは，1 から境界面の反射率 Γ_p を引いた値と境界面へ媒質 2 から入射するエネルギーの積に等しい．

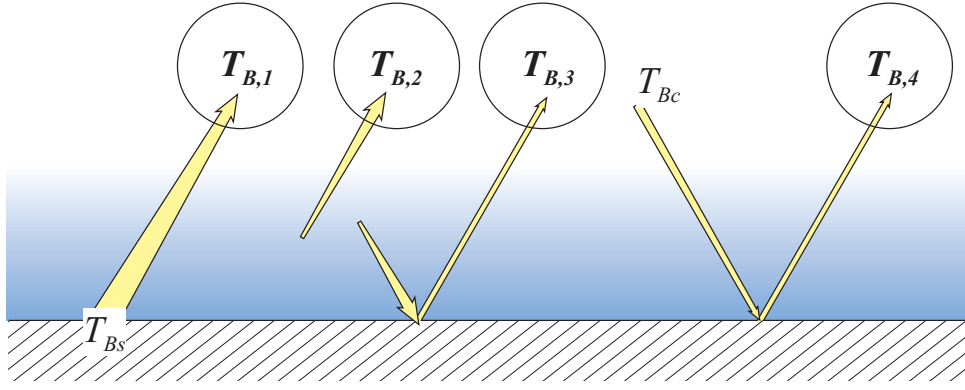


図 2.9: 衛星観測における放射伝達概念

2.5 衛星観測における放射伝達方程式

衛星や航空機をプラットフォームとするセンサーによって地表面を観測するとき、マイクロ波放射計で観測される輝度温度には、様々な対象からのシグナルが含まれている。観測される輝度温度を放射源毎に考えると、図 2.9 のように 4 つの項目に分類できる。図中の $T_{B,1} \sim T_{B,4}$ の放射源は、それぞれ、地表面放射 T_{Bs} 、大気上向き放射、大気下向き放射、宇宙の背景雑音温度 T_{Bc} である。これらの放射源から射出された電磁波は、消散されながら大気中を伝搬し、 $T_{B,1} \sim T_{B,4}$ の総和が衛星で観測されることになる。式 (2.21) を用いて衛星で観測される輝度温度を表わすことができる。地表面から距離 R において偏波 p で観測される輝度温度 T_{Bp} は、

$$\begin{aligned} T_{Bp} &= T_{B,1} + T_{B,2} + T_{B,3} + T_{B,4} \\ &= T_{Bp}(0)e^{-\tau_p(0,R)} + \int_0^R k_e(r') \left[(1 - \omega_{0p}) T(r') + \omega_0 T_{SCp}(r') \right] e^{-\tau_p(r',r)} dr' \end{aligned} \quad (2.102)$$

で与えられる。地表面 $r = 0$ における放射 $T_{Bp}(0)$ は、地表面からの放射 T_{Bsp} と下向き放射の和である。

$$T_{Bp}(0) = T_{Bsp} + \Gamma_p \cdot T_{Bp}^{down} \quad (2.103)$$

$$T_{Bp}^{down} = T_{Bc}e^{-\tau_p(0,R)} + \int_0^R k_e(r') \left[(1 - \omega_{0p}) T(r') + \omega_0 T_{SCp}(r') \right] e^{-\tau_p(r',r)} dr' \quad (2.104)$$

マイクロ波帯では、波長が数 mm ～ 数 cm と比較的長いため、大気中の気体による散乱はほぼ起こらない。散乱源としては、雨や降水などの大気水晶が主であり、周波数が高くなると、雲水や氷晶も散乱源になりうる。

式 (2.21) の放射伝達方程式は、大気中の放射伝達ばかりでなく、土壌や植生、積雪といった様々な媒質中の放射伝達へ適用できる。そこで、地表面からの放射 T_{Bsp} を求めるために、式 (2.21) を土壌中の放射伝達へ応用する。ここでは、土壌を半無限の均一な媒質（吸収係数 k_{a0} 、地温 T_0 ）とみなし、散乱がない場合 ($k_s = 0$) を仮定する。図 2.8(b) において、媒質 1 を大気、媒質 2 を土壌とした場合に相当する。

はじめに、下方から地表面へ入射角 θ_t で入射する放射 T_{Bp}^- を求める。ある深度に下部境界をおき、伝搬方向に座標をとって境界面を 0、下部境界を $-R$ とすると、 T_{Bp}^- は

$$T_{Bp}^- = T_{Bp}(-R) e^{-\tau_p(-R,0)} + \int_{-R}^0 k_{a0} T_0 e^{-\tau_p(r',0)} dr' \quad (2.105)$$

となる．ここで，吸収係数 k_{a0} が一定であるので，光学的厚さ $\tau_p(r_1, r_2)$ は定義より，

$$\tau_p(r_1, r_2) = \int_{r_1}^{r_2} k_{a0} dr' = k_{a0}(r_2 - r_1) \quad (2.106)$$

となる．式 (2.105) は，次のように展開できる．

$$T_{Bp}^- = T_{Bp}(-R)e^{-k_{a0}R} + \int_{-R}^0 k_{a0} T_0 e^{k_{a0} r'} dr' = T_{Bp}(-R)e^{-k_{a0}R} + T_0 [1 - e^{-k_{a0}R}]$$

$r \rightarrow \infty$ の極限をとると，

$$T_{Bp}^- = T_0 \quad (2.107)$$

を得る．散乱を無視できる均一な土壌では，地表面境界へ下方から入射する放射の輝度温度が，地温に等しくなる．式 (2.101) を適用すると，地表面からの放射 T_{Bsp} が求まる．

$$T_{Bsp} = (1 - \Gamma_p)T_{Bp}^- = (1 - \Gamma_p)T_0 \quad (2.108)$$

また，式 (2.6) と比較すると，地表面の放射率 e は，

$$e_p = 1 - \Gamma_p \quad (2.109)$$

となる．

2.6 誘電特性

2.4.2 節で述べたように，媒質中における電磁波の伝搬は，角周波数 ω ，減衰定数 α ，位相定数 β で決まり， α と β は，複素誘電率と透磁率によって特徴づけられる．このうち透磁率は，一般の物質では真空の透磁率とほぼ等しいため，観測周波数における媒質の複素誘電率が電磁波の挙動を支配することになる．本節では，代表的な媒質の複素比誘電率のモデルについて述べる．

配勾分極による誘電分散の周波数依存性は，初めにデバイ (Peter Joseph William Debye, 1884-1966, ドイツ) によって定式化された．

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' + \varepsilon_r'' \quad (2.110)$$

$$\varepsilon_r' = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2.111)$$

$$\varepsilon_r'' = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)\omega\tau}{1 + \omega^2 \tau^2} + \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0} \quad (2.112)$$

ここに， ε_s は静電界に対する比誘電率， ε_∞ は誘電分散が緩和されたとき (追従できなくなった) の誘電率． τ は誘電緩和時間．式 (2.112) は，式 (2.75)(2.77) によって導電性によるエネルギーロスを含めた形式で表わした． ε_0 は真空の誘電率 ($\approx 8.854 \cdot 10^{-12} [F/m]$) ．

2.6.1 水，氷

P.S.Ray(1972)[72] は，デバイの式に基づき，水および氷の誘電率の半経験モデルを提案している³．温度適用範囲は，氷は $-20 \sim 0^\circ C$ ，水は $-20 \sim 50^\circ C$ であり，波長 $10^{-6} \sim 10^7 m$ の幅広い波長帯へ適用可能である．

³原著論文では λ_{is} の係数が -4 になっているが誤植であることが指摘されている．

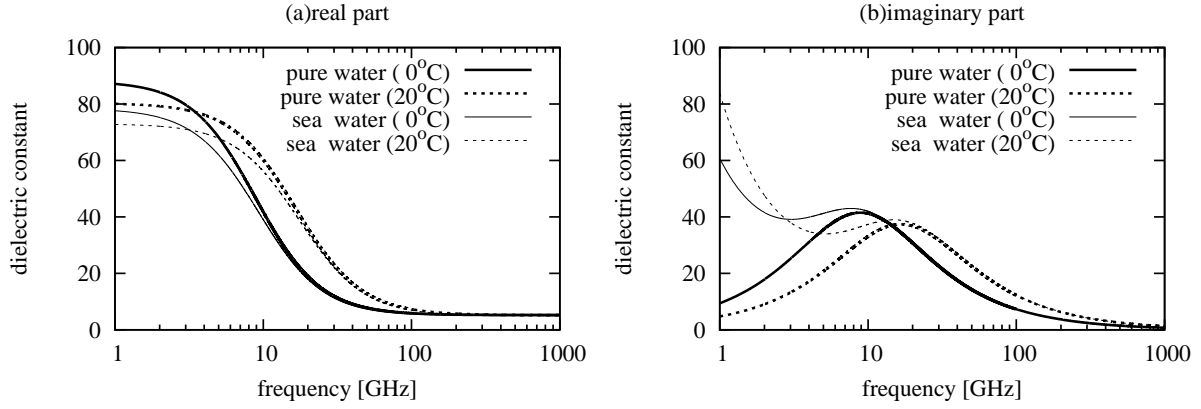


図 2.10: 水および海水の複素比誘電率

計算条件：水温 0 度および 20 度，塩分濃度 32.54%(海水)，参考：Ulaby(1986) [85, p.2023]

$$\varepsilon = \varepsilon' + j\varepsilon'' \quad (2.113)$$

$$\varepsilon' = \varepsilon_{w\infty} + \frac{(\varepsilon_{w0} - \varepsilon_{w\infty})[1 + (\lambda_{ws}/\lambda)^{1-\alpha} \sin(\alpha\pi/2)]}{1 + 2(\lambda_{ws}/\lambda)^{1-\alpha} \sin(\alpha\pi/2) + (\lambda_{ws}/\lambda)^{2(1-\alpha)}} \quad (2.114)$$

$$\varepsilon'' = \frac{(\varepsilon_{w0} - \varepsilon_{w\infty})(\lambda_{ws}/\lambda)^{1-\alpha} \cos(\alpha\pi/2)}{1 + 2(\lambda_{ws}/\lambda)^{1-\alpha} \sin(\alpha\pi/2) + (\lambda_{ws}/\lambda)^{2(1-\alpha)}} + \frac{\sigma\lambda}{18.8496 \times 10^{10}} \quad (2.115)$$

ε は複素比誘電率， ε' ， ε'' は，複素比誘電率の実部と虚部， λ は波長 [cm] である． ε_0 ， ε_∞ ， α ， λ_s ， σ は，各々，氷および水に対して，以下の式で表せる．水に対しては添え字 w ，氷に対しては添え字 i で加える．

ここに，水に対して (添え字 w)，

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{w0} &= 78.54[1.0 - 4.579 \times 10^{-3}(t - 25.0) \\ &\quad + 1.19 \times 10^{-5}(t - 25.0)^2 - 2.8 \times 10^{-8}(t - 25.0)^3] \\ \varepsilon_{w\infty} &= 5.27137 + 0.0216474t - 0.00131198t^2 \\ \alpha_w &= -16.8129/(t + 273) + 0.0609265 \\ \lambda_{ws} &= 0.00033836 \exp[2513.98/(t + 273)] \\ \sigma_w &= 12.5664 \times 10^8 \end{aligned} \right\} \quad (2.116)$$

氷に対して (添え字 i)，

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{i0} &= 203.168 + 2.5t + 0.15t^2 \\ \varepsilon_{i\infty} &= 3.168 \\ \alpha_i &= 0.288 + 0.0052t + 0.00023t^2 \\ \sigma_i &= 1.26 \exp\{-12500.0/[(t + 273.0)1.9869]\} \\ \lambda_{is} &= 9.990288 \times 10^{-5} \exp\{13200.0/[(t + 273.0)1.9869]\} \end{aligned} \right\} \quad (2.117)$$

ただし， t は温度 [°C] である．

図 2.10 に水温 0 度および 20 度における計算例を示す．

2.6.2 塩水

陸域リモートセンシングでは，塩水を対象することは稀であるが，植生の誘電率の計算において，自由水に塩分を考慮していることから，ここで取り上げる．

温度 $t[^\circ\text{C}]$, 塩分濃度 $S_{sw} [\text{‰}]$ (水 1kg あたり塩分 $S_{sw}[\text{g}]$) とすると, 塩水の誘電率は, 式 (2.110) で与えられる. 各変数は, Ulaby *et al* [85, pp.2022-2055] によって以下のように総括されている.

$$\varepsilon_\infty = 4.9 \quad (2.118)$$

$$\varepsilon_s(t, S_{sw}) = \varepsilon_{sw}(t, 0) \cdot a(t, S_{sw}) \quad (2.119)$$

$$\tau(t, S_{sw}) = \tau_{sw}(t, 0) \cdot b(t, S_{sw}) \quad (2.120)$$

$$\sigma(t, S_{sw}) = \sigma_{sw}(25, S_{sw})e^{-\phi} \quad (2.121)$$

ここに,

$$\begin{aligned} \varepsilon(t, 0) = & 87.134 - 1.949 \times 10^{-1} t - 1.276 \times 10^{-2} t^2 \\ & + 2.491 \times 10^{-4} t^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a(t, S_{sw}) = & 1.0 + 1.613 \times 10^{-5} t S_{sw} - 3.656 \times 10^{-3} S_{sw} \\ & + 3.210 \times 10^{-5} S_{sw}^2 - 4.232 \times 10^{-7} S_{sw}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau_{sw}(t, 0) = & \frac{1}{2\pi} [1.1109 \times 10^{-10} - 3.824 \times 10^{-12} t \\ & + 6.938 \times 10^{-14} t^2 - 5.096 \times 10^{-16} t^3] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b(t, S_{sw}) = & 1.0 + 2.282 \times 10^{-5} t S_{sw} - 7.638 \times 10^{-4} S_{sw} \\ & - 7.760 \times 10^{-6} S_{sw}^2 + 1.105 \times 10^{-8} S_{sw}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{sw}(25, S_{sw}) = & S_{sw} [0.18252 - 1.4619 \times 10^{-3} S_{sw} \\ & + 2.093 \times 10^{-5} S_{sw}^2 - 1.282 \times 10^{-7} S_{sw}^3] \\ \phi = & \Delta [2.033 \times 10^{-2} + 1.266 \times 10^{-4} \Delta + 2.464 \times 10^{-6} \Delta^2 \\ & + S_{sw} (1.849 \times 10^{-5} + 2.551 \times 10^{-7} \Delta + 2.551 \times 10^{-8} \Delta^2)] \\ \Delta = & 25 - t \end{aligned}$$

ただし, $0 \leq t \leq 40[^\circ\text{C}]$, 塩分濃度 $4 \leq S_{sw} \leq 35 [\text{‰}]$ である.

図 2.10 に水温 0 度および 20 度における計算例を示す. 塩分濃度は海水を想定し, 32.54% を与えた.

2.6.3 土壌

Dobson *et al* (1985)[18] は, 土壌の半経験的モデルを提案している. 土壌を土粒子, 空気, 自由水, 非自由水から構成される混合誘電体とみなし, 土壌を構成する媒質が誘電率に寄与する状態を示すパラメーター α および土壌の構造によって決まるパラメーター β を導入することにより, 混合誘電率モデルを構築した.

土壌複素比誘電率の混合モデルは, 次のように表わされる.

$$\varepsilon_{soil}^\alpha = V_{ss}\varepsilon_{ss}^\alpha + V_a\varepsilon_a^\alpha + V_{fw}\varepsilon_{fw}^\alpha + V_{bw}\varepsilon_{bw}^\alpha \quad (2.122)$$

m_v は土壌の体積含水率. 添え字 s, a, fw, bw および m は, それぞれ, 土粒子, 空気, 自由水, 非自由水, 混合土壌を表わす. ここで, パラメーター β を

$$m_v^\beta = V_{fw}\varepsilon_{fw}^\alpha + V_{bw}\varepsilon_{bw}^\alpha \quad (2.123)$$

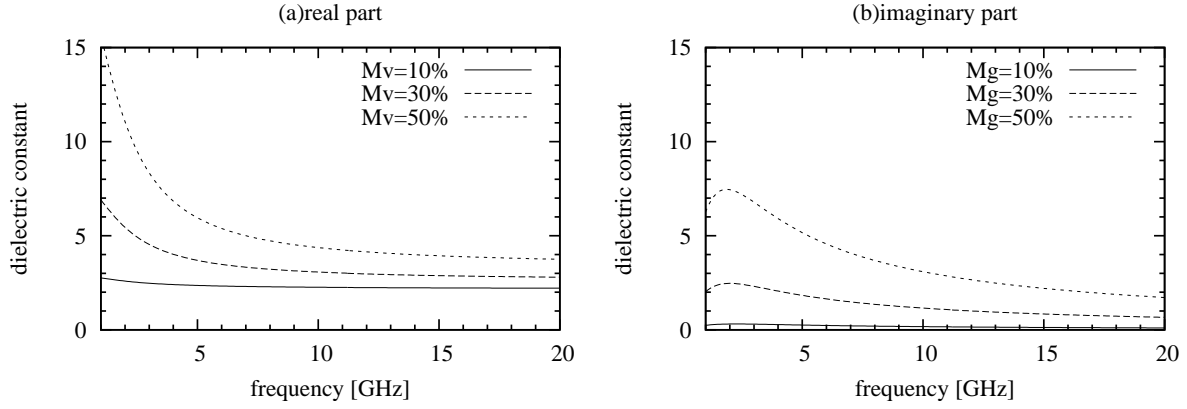


図 2.11: 土壌の複素比誘電率

計算条件：温度 22 度，体積含水率 $M_v = 10\%$ ， 30% ， 50% 。

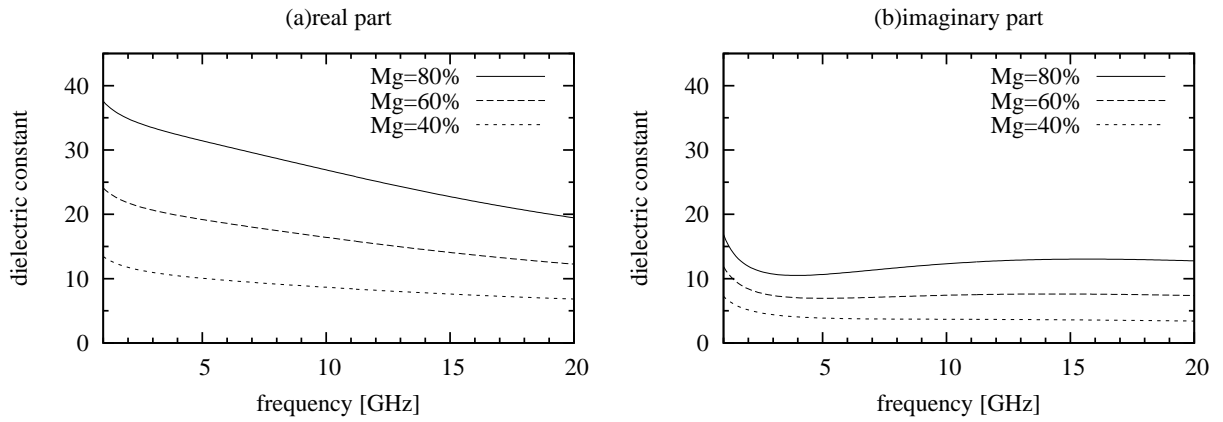


図 2.12: 植生体の複素比誘電率

計算条件：温度 22 度，植生水分量 $M_g = 80\%$ ， 60% ， 40% 。

と仮定し，さらに，土壌の乾燥密度 ρ_b および土粒子の密度 ρ_{ss} を用いると，

$$\epsilon_{soil}^\alpha = 1 + \frac{\rho_b}{\rho_{ss}} (\epsilon_{ss}^\alpha - 1) m_v^\beta (\epsilon_{fw}^\alpha - 1). \quad (2.124)$$

を得る．Dobson *et al* (1985)[18] では，1.4GHz～18GHz の測定結果 [30] に基づき，土粒子の複素比誘電率 $\epsilon_{ss} \approx 4.7 + j0$ ，パラメーター $\alpha = 0.65$ (一定) としている．また，パラメーター β は土質によって異なる値をとる．たとえば，三枝ら (1994)[101] は，関東ローム土 ($\rho_{ss} = 2.8 \text{ [g/cm}^3\text{]}$) の測定結果から， $\beta = 1.644$ を示している．

2.6.4 植生

Ulaby and EL-Rayes (1987)[84] は，植生体の半経験的モデルを提案している．624 サンプルからなるトウモロコシの葉の測定結果 [19] に基づき，自由水，非自由水，植生組織の 3 要素から成る混合誘電率モデルを構築した．植生の複素比誘電率は，次のようである．

$$\epsilon = \epsilon_{vr} + v_{fw} \epsilon_{fw} + v_b \epsilon_b \quad (2.125)$$

ここに添え字 fw, b, vr は、それぞれ、自由水、非自由水およびその付着した植生組織、残りの植生組織を表わす。 v_{fw} と v_b は体積割合である。

$$\varepsilon_{vr} = 1.7 - 0.74M_g + 6.16M_g^2 \quad (2.126)$$

$$\varepsilon_b = 2.9 + \frac{55.0}{1 + (jf/0.18)^{0.5}} \quad (2.127)$$

$$v_{fw} = M_g(0.55M_g - 0.076) \quad (2.128)$$

$$v_b = \frac{4.64M_g^2}{1 + 7.36M_g^2} \quad (2.129)$$

ε_{fw} は、式 (2.110) ならびに式 (2.118)(2.121) で与えられ、 $S_{sw} = 8.5\%$ としている。なお、周波数の適用範囲は、0.2 ~ 20GHz である。

第3章 植生域を対象とした地表面の放射伝達モデル

従来の陸域のリモートセンシングでは、土壌水分の推定に主眼がおかれてきた。そのため、地表面の放射伝達モデルは、植生のシグナルを分離して土壌からのシグナルを抽出する目的で研究が進められている。土壌水分の変化に対して幅広い輝度温度のレンジを持つ水平偏波に関する議論が多く、植生に対して透過性の良い1GHz帯から6GHz帯が使われてきた。これらの周波帯は、波長が長く、吸収が卓越するために植生の総水分量で議論ができる。しかも、水平偏波の放射・吸収特性は、入射角依存性が小さい。

現在の衛星観測アルゴリズムの多くは、このような低い周波数帯における知見を援用している。また、植生の総水分量のみで議論し、被覆状態の不均一性が考慮されていない。ところが、衛星観測で利用されているような高い周波数では、植生の幾何学的特徴への依存性や入射角への依存性が強まることが指摘されている。また、実際の衛星観測のフットプリントは数十kmあり、植生の被覆状態の不均一性も問題となる。植生域地表面の放射伝達モデルには、植生の総水分量のほか、幾何学的特徴や被覆状態の不均一性を考慮することが必要である。

本章では、植生の放射伝達に関する既往の取り組みをまとめ、それを踏まえて、幾何学的特徴および被覆状態の不均一性を考慮した植生域地表面の放射伝達モデルの開発方針を示す。

3.1 植生における放射伝達に関する既往の研究

植生に覆われた地表面からの射出を記述する方法には、主に、層モデルによる半経験的アプローチと、離散型散乱体モデルによる理論的アプローチがある。前者は、植生を等方等質な誘電性スラブとして捉え、観測的研究により植生の効果を評価する手法である。層モデルは、植生の効果を光学の厚さ τ_c と単一散乱アルベド ω_c の2つのパラメーターで表現する。低周波帯では、単一散乱アルベド ω_c が小さく、光学の厚さ τ_c が植生水分量と良い相関があることから、従来の土壌水

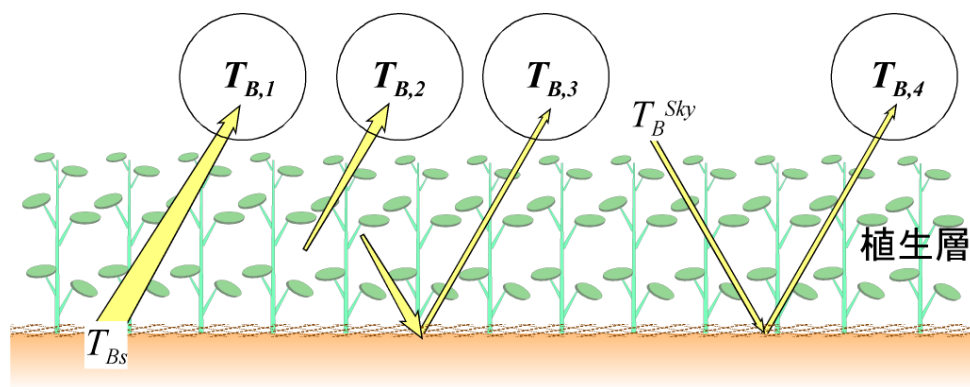


図 3.1: 植生層における放射伝達概念

分推定アルゴリズムの基礎となっている．一方，後者は，物理プロセスを踏まえたモデルである．植生を構成する葉や茎などの要素を個々に捉えて散乱計算を行うことから，離散型散乱体モデルと呼ばれる．植生の幾何学的特徴が考慮でき，より詳細に詳細に放射伝達方程式を記述することができる．

3.1.1 層モデルによる半経験的アプローチ

はじめに，層モデルによる半経験的アプローチについて述べる．植生の空間密度が疎であると仮定すると，植生間の相互の影響は小さく，多重散乱の影響を無視できる．また，植生体が空間に占める割合が小さく，植生層全体の有効誘電率は大気誘電率とほぼ等しくなる．その結果，植生層上部境界での反射は発生せず，土壌表面における反射は大気-土壌における反射と等しく扱うことができる．2.5 節で述べた地表面-大気の放射伝達方程式において，大気プロファイルが一様な場合と考えることができ，多重散乱が無視できることから $T_{SC} = 0$ とすると，植生層上端における上向き放射は，

$$\begin{aligned} T_B &= T_{Bp,1} + T_{Bp,2} + T_{Bp,3} \\ \begin{cases} T_{Bp,1} &= T_{Bsp} \cdot e^{-\tau_c} \\ T_{Bp,2} &= (1 - \omega_c) \cdot T_c \cdot (1 - e^{-\tau_c}) \\ T_{Bp,3} &= (1 - \omega_c) \cdot T_c \cdot (1 - e^{-\tau_c}) \cdot \Gamma_p \cdot e^{-\tau_c} \end{cases} \end{aligned} \quad (3.1)$$

となる [85, 54]．ここで，添え字 p は垂直・水平の偏波を表わし， τ_c と ω_c は，植生層の光学的厚さと単一散乱アルベドである．また， T_{Bsp} は土壌表面から放射される輝度温度である． $T_{Bp,1}$ は植生層によって消散を受ける地表面からの放射， $T_{Bp,2}$ は植生層自体の上向き放射， $T_{Bp,3}$ は地表面で反射された植生層下向き放射を表す．各成分の概念を図 3.1 にまとめる． $T_{Bp,3}$ は， $T_{Bp,1}$ や $T_{Bp,2}$ に比べて，10 分 1 以下であるので考慮しない場合もある．なお，図 3.1 で示した大気下向き放射の反射 $T_{Bp,4}$ は，1GHz 帯や 6GHz 帯では 10K 以下と小さく，さらに，植生層で消散されるため，通常，無視される．

式 (3.1) は，植生層に関して，光学的厚さ τ_c と単一散乱アルベド ω_c の 2 つの放射伝達に関する変数と，植生温度 T_c の合計 3 つの変数を含む． τ_c と ω_c は，形状やサイズなどの植生の幾何学的特徴，空間個数密度，植生水分量などに依存し，観測周波数・偏波ごとに異なる挙動を示す．以下， τ_c と ω_c に関する既往の研究をまとめる．

(a) 光学的厚さ τ_c

地表面のリモートセンシングに有利な波長の長い 1GHz 帯や 6GHz 帯では， τ_c は植生水分量 W に依存することが，観測 [54, 79] と理論 [42, 74, 91] から示されている．Jackson and O'Neill (1990) [79] は，ダイズとトウモロコシを対象とした地上観測実験結果から，以下の式を提案している．

$$\tau_c = b \cdot W \quad (3.2)$$

ここで， W は植生水分量， b は植生パラメーターである．植生の種類に依存する係数である．

Jackson and Schmugge (1991) [80] は，公開されている地上および航空機観測データを用いて， b の植生タイプおよび周波数依存性に関して検討を行った． b の算定にあつては，植生温度 T_c と土壌温度 T_s が等しいとおき，さらに，単一散乱アルベド ω_c を無視して，H 偏波に限定して議論を行なっている．また，使用したデータの多くは，入射角 10 度以下の比較的鉛直に近い観測データであり，視線方向の経路長の比から入射角 0 度に補正して比較している．

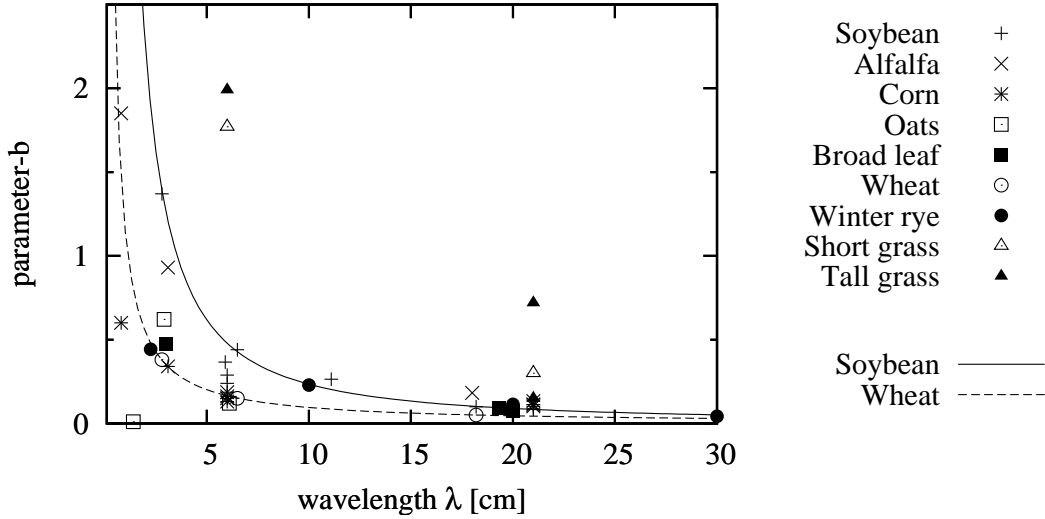


図 3.2: 植生パラメーター b の周波数・植生タイプ依存性 (水平偏波)
 Jackson and Schmugge(1991)[80] より引用．論文中的数据より再プロットを行なった．ダイズとトウモロコシのフィッティング結果を実線と破線で示す．

図 3.2 に，Jackson and Schmugge (1991) [80] による植生パラメーター b の算定結果を示す．1GHz 帯 (波長 18cm-20cm) では，植生の種類による違いはほとんど見られず， $b = 0.15$ でほぼ一定の値をとっている．しかしながら，波長が短くなるにつれて， b は徐々に大きくなり，6GHz 帯 (波長 5cm) を境にして急激に増大する．加えて，植生の種類によって b の大きさが異なり，周波数が高いほど，植生の種類への依存性が強くなっている．Jackson and Schmugge (1991) [80] は，芝のような密生している植生を除き，植生パラメーター b を 2 つのタイプに大別できるとしている．ダイズやムラサキウマゴヤシ (アルファルファ) のような葉が卓越した植生と，コムギやトウモロコシのような茎が卓越する植生である．さらに，従来提案されていたモデル [42, 66] を参考にして，植生パラメーター b の波長依存性を表すモデルを提案している．

$$b = b' \cdot \lambda^\chi \quad (3.3)$$

λ は波長 [cm]， b' は波長に依存しない植生パラメーター， χ は波長依存性を表すパラメーターである．Ulaby and Wilson (1985) [89] によって観測されたコムギおよびダイズのデータ (波長 2.8cm, 6.5cm, 18.2cm) へ式 (3.3) を適用し，コムギ $\chi = -1.08$ ，ダイズ $\chi = -1.38$ を示している．なお，式 (3.2) は，植生層を大気と植生から構成される均一な混合誘電体とした吸収モデルによって妥当性示されている [74]．

一方，垂直偏波における光学的厚さは，植生タイプや周波数のほか，入射角にも依存する [89, 88] ため，水平偏波のように包括的に議論されていない．

(b) 単一散乱アルベド ω_c

単一散乱アルベド ω_c に関する研究事例は少なく，マイクロ波放射計による観測研究は，ほんの数例である．表 3.1 に，単一散乱アルベド ω_c に関する既往の成果をまとめる．Brunfeldt and Ulaby (1984) [11] によるトウモロコシ，ダイズ，コムギを対象にした 2.7GHz と 5.1GHz の結果と，Macelloni *et al* (1998) [50] によるコムギを対象にした 10GHz と 37GHz の結果を示す．両研究とも良く成長した段階の植生を対象にして，周波数・偏波ごとに ω を決定している．また，Mo *et al* (1982) [54]，Pampaloni and Simonetta (1986) [66] も，観測実験から ω_c の値を求め，表 3.1 と同程

表 3.1: 植生の単一散乱アルベドに関する既往の研究成果

植生	偏波	Brunfeldt and Ulaby(1984)[11]		Macelloni <i>et al</i> (1998)[50]	
		2.7GHz	5.1GHz	10GHz	37GHz
コムギ	垂直	0.075	0.065		
	水平	0.118	0.081	0.035 ~ 0.045	0.02 ~ 0.025
トウモロコシ	垂直	0.049	0.092		
	水平	0.082	0.085		
ダイズ	垂直	0.103	0.124		
	水平	0.124	0.127		

良く成長した植生の観測データより決定した単一散乱アルベド入射角は、Brunfeldt and Ulaby(1984) と Macelloni *et al* (1998), それぞれ, 40 度と 45 度。

度の値を示している。しかし、偏波を考慮せず、垂直偏波と水平偏波の単一散乱アルベドが等しいと仮定しているため、表 3.1 には記載していない。

表 3.1 のように、植生の単一散乱アルベド ω_c は比較的小さい。多くのアルゴリズムでは、ゼロと仮定したり [103, 64], もしくは、既存の研究事例をもとに定数として与えている [15]。また、モデルの調整パラメーターとして観測値によって較正する場合もある [58]。

3.1.2 離散型散乱体モデルによる理論的アプローチ

次に、物理プロセスを踏まえた理論的なアプローチについて述べる。本節で述べるモデルは、植生を構成する葉や茎などの要素を個々に捉えて散乱計算を行うことから、離散型散乱体モデルと呼ばれる。任意の形状の散乱計算は難しく、かつ、膨大な計算リソースを必要とするため、茎や葉を円柱や円盤といったシンプルな形状で近似を行なっている。シンプルな形状で近似を行うことで、比較的容易に境界条件を適用できる。また、離散型散乱体モデルは、各散乱体の空間分布情報も考慮することが可能である。

一般に、物理的プロセスを踏まえたモデルは、モデル化の過程で導入される簡略化や概念化により、さまざまな不確定要素が除外され、注目したい現象を効率的に取り出して見ることができる利点を持つ [110]。しかし、高度なモデルになるほど多くのパラメーターを含み、変数を減ずることを戦略とするアルゴリズム開発へ直接の応用することが難しくなる。これまで、離散型散乱体モデルは、

- (1) 経験的なモデルに理論的な裏づけを与える [91],
- (2) 植生の幾何学的な特徴を示す統計的なデータ [73] を適用してパラメーターを減らす [9],
- (3) 感度分析結果を踏まえて新たな指標を提案する [60, 107],

のように利用されている。

対象とする周波数帯や植生、注目する現象に応じて、種々モデルが開発されている。以下に、コヒーレントモデル、多重散乱モデル、および、光学的なモデルについて述べる。

(a) コヒーレントモデル

1GHz 帯のように波長が長い場合、植生による体積散乱の影響は小さい。しかしながら、植生が存在することによって生じる誘電率の不均一性から、反射・透過の過程で位相のズレが生じる。

Lang and Sidhu (1983) [45] は、振幅および位相を考慮したコヒーレントモデルを提案している。多重散乱近似の 1 つである Fodly 近似によって植生層の平均場をもとめ、さらに、完全散乱体の遠方近似である Born 近似によって散乱振幅を求める。ただし、植生による吸収を考慮するため、散乱体を含む平均場の等価誘電率を導入している。Lang and Sidhu (1983) は、これを「distorted Born 近似」と呼び、単一散乱アルベド ω_c が小さな場合に適用可能であるとしている。Chauhan (1994) [59] は、葉がランダムに分布し、傾き分布が一樣である理想化した条件のもとで、Lang and Sidhu (1983) のモデルから式 (3.2) の形式を示している。また、Vine (1996) [91] は、実測結果を参考にトウモロコシおよびダイズの光学的厚さのシミュレーションを行い、10GHz 以下の周波数帯で式 (3.2) が妥当であることを示している。ただし、植生水分量 W と光学的厚さ τ_c の関係は、決して単調増加にならないことも同時に示唆している。

(b) 多重散乱モデル

波長が短く散乱が卓越するような場合、多重散乱に着目したモデルが有効である。波長に比べて散乱体間の距離が十分に離れていれば、位相の変化は小さく、振幅のみを考慮すればよい。位相マトリクスと吸収・散乱係数を求め、放射伝達方程式を数値的に解く。数値解法には、Matrix doubling 法 [25] や、モンテカルロ法 [82]、また、放射伝達方程式の直接解法 [83, 9] も提案されている。これらのモデルは、後方散乱を計測する能動型リモートセンシングの分野を中心に研究がなされてきたが、受動型リモートセンシングへも応用されている [22, 37, 69]。

(c) 光学的なモデル

更に、波長が短くなると光学的な振る舞いに近づく。Choudhary (1990) [9] は、樹木のような大型の植生を想定して、光学的近似を用いた散乱モデルを提案している。瀬戸 (2003) [107] は、Choudhary のモデルを衛星観測データを用いて感度分析を行い、植生の影響が少なく土壌水分を推定に有利な指標の検討を行っている。

3.2 植生域地表面の地表面放射伝達モデルの検討

本節では衛星観測に資する植生域の地表面放射伝達モデルを検討する。

3.1 節では、層モデルと離散型散乱体モデルの 2 つのアプローチについて述べた。層モデルは、その簡易さから多くの土壌水分推定アルゴリズムにおいて利用されている。一方、離散型散乱体のモデルは、植生の幾何学的特徴が放射伝達に及ぼす影響を評価でき、より高度な地表面放射伝達モデルを構築することができる。しかし、層モデルは、高い周波帯や大きな入射角における観測データに対して十分な検証が行なわれておらず、また、植生の総水分量のみで議論され、植生の被覆状態の不均一性は考慮されていない。離散型散乱体のモデルは、植生の幾何学的特徴や散乱体の空間分布情報を考慮できるが、多くの変数を含み、パラメーターの較正・簡易化、モデルの検証が必要となる。どちらのアプローチとも、衛星リモートセンシングにおける観測条件において、取得した観測データによって、モデルを検討することが必要である。

本論文は、層モデルを基本として、植生域地表面の地表面放射伝達モデルの構築を行う。本節では、はじめに、半経験的なアプローチによる植生の放射伝達のモデル化と植生の放射伝達に関するパラメーターの推定について述べる。次に、植生被覆率を導入して層モデルを拡張し、地表面放射伝達モデルへ植生の被覆状態の不均一性を考慮する方法について述べる。

3.2.1 基本とする地表面放射伝達モデル

(a) 放射伝達方程式

式 (3.1) を基本とする．4.8.1 節において後述するように，10GHz 帯や 18GHz 帯では，雲や水蒸気の変動により大気放射も大きく変化する．そこで，大気下向き放射の反射項 $T_{B,4}$ を加えた 4 成分の放射伝達方程式を用いる．

$$T_{B,fp} = T_{B,fp,1} + T_{B,fp,2} + T_{B,fp,3} + T_{B,fp,4} \quad (3.4)$$

$$\begin{cases} T_{B,fp,1} &= T_{B,fp} \cdot e^{-\tau_{c,fp}} \\ T_{B,fp,2} &= (1 - \omega_{c,fp}) \cdot T_c \cdot (1 - e^{-\tau_{c,fp}}) \\ T_{B,fp,3} &= (1 - \omega_{c,fp}) \cdot T_c \cdot (1 - e^{-\tau_{c,fp}}) \cdot \Gamma_{fp} \cdot e^{-\tau_{c,fp}} \\ T_{B,fp,4} &= T_B^{sky} \cdot \Gamma_{fp} \cdot e^{-2\tau_{c,fp}} \end{cases}$$

ここで，添え字 f は周波数帯を意味し，それぞれ，6，10，18 と数値で表す．以後，周波数帯と偏波に特化していることを明示するために，周波数帯 f と偏波 p を組み合わせたインデックス fp を添え字に用いる．インデックスを具体的に示す場合は，10GHz の垂直偏波であれば「10v」，水平偏波であれば「10h」となる．

表 3.1 に示した過去の観測研究事例によると，5.1GHz，10GHz の単一散乱アルベドは，およそ 0.03～0.12 の値をとる．コムギやトウモロコシ，ダイズといった形状の異なる植生において，この範囲に収まっている．18GHz 帯の観測値は示されていないが，37GHz で 0.02 程度であることを踏まえると，0.03～0.12 の範囲に収まると推定できる．また，単一散乱アルベドは消散に占める散乱の割合を指すため，その値が小さいときは，放射伝達が主に放射・吸収によって決まることを意味する．したがって，低い周波帯を対象として放射・吸収を表現した層モデルが 10GHz 帯や 18GHz 帯へ適用できる可能性が高い．

(b) 光学的厚さ $\tau_{c,fp}$

放射・吸収が卓越する場合， $\tau_{c,fp}$ は主として放射・吸収特性によってきまり，総水分量と良い相関関係を持つ．式 (3.2) を適用し，植生の幾何学的特徴を表わす植生パラメーター b を植生水分量に独立な変数とする．ここに，あらためて添え字 fp を添えて記す．

$$\tau_{c,fp} = b_{fp} \cdot W \quad (3.5)$$

b_{fp} は，特定の周波数・偏波における植生パラメーターとし，植生の幾何学的特徴による放射・吸収特性の違いを表す．

(c) 単一散乱アルベド $\omega_{c,fp}$

従来のモデルでは，単一散乱アルベド $\omega_{c,fp}$ を一定値と置いたり，もしくは無視することが多い．それは，単一散乱アルベド $\omega_{c,fp}$ の幾何学的特徴への依存性が強く，複雑な形状の植生を植生水分量のような 1 つの物理量で表わすことが困難であること，加えて，表 3.1 のように単一散乱アルベド $\omega_{c,fp}$ の値が比較的小さいことによる．

本論文では，単一散乱アルベド $\omega_{c,fp}$ を，植生水分量に対して独立な植生の幾何学的特徴に依存するパラメーターとして扱う．

一般に、散乱と吸収は、対象物の含水比が大きくなるほど増大する。ところが、散乱は、吸収よりもサイズや形状といった幾何学的特徴への依存性が強いので、散乱と消散の比である単一散乱アルベドは、植生水分量よりも幾何学的特徴の影響が強調される傾向にある。

図 3.3 は、植生の誘電率を持つ球の単一散乱アルベドのシミュレーション結果である。横軸に植生重量含水比 M_g をとり、6通りの粒径に対して単一散乱アルベドを計算した結果である。周波数 10.65GHz において計算を行った。この図によると、単一散乱アルベドの変化は、 M_g よりも、むしろ、サイズの違いによる変化の方が大きいことが分かる。特に、単一散乱アルベドが 0.1 以下の範囲に着目すると、 M_g が 80% 前後では、含水率の変化に対して単一散乱アルベドの変化がほぼ一定となっており、その傾向が強い。

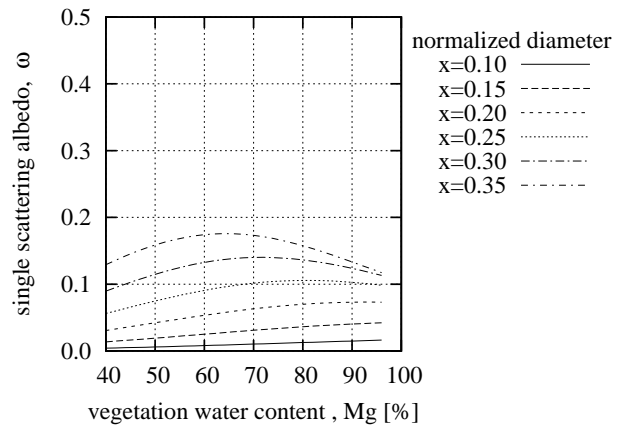


図 3.3: 球の単一散乱アルベドの変化
植生の誘電率を有する球の単一散乱アルベド。横軸は植生重量含水率。x は規格化直径 ($x = \pi D / \lambda$, D : 球の直径, λ : 波長)

図 3.3 の事例は、最も単純な形状である球の結果である。実際の植生は、複雑な形状をしており、形状が異なると、単一散乱アルベドが大きく変化する。そのため、単一散乱アルベド $\omega_{c,fp}$ を、植生水分量に対して独立とみなし、植生の幾何学的特徴に依存するパラメータとして扱った。

なお、図 3.3 の計算には、小口らによって開発されたモード整合法による回転楕円体の散乱モデル [61, 6, 106] を用いた。このモデルは、固有値を補正しながら計算を行うため、植生のように高い誘電率を有する媒体でも、安定した解を得ることができる。

3.2.2 植生層放射伝達モデルの検討方針

植生層の放射伝達モデルを検討するにあたり、注目すべきは、複雑な形状を有する植生に対する植生パラメータ b_{fp} と単一散乱アルベド $\omega_{c,fp}$ の挙動である。以下に、モデルの検討方針とこれらの変数の推定方法についてまとめる。

(a) 放射伝達モデル基本方針

形状やサイズ、傾きなどの幾何学的な特徴が同じである植生は、その放射伝達特性も同じであると考え、以下のような仮説を置く。

「幾何学的特徴によって決まって植生タイプが決まり、1つの植生タイプに対して、植生パラメータ b_{fp} と単一散乱アルベド $\omega_{c,fp}$ が 1 組の値を取る。」

前節の 3.2.1 節で述べた基本モデルにおいて、植生の幾何学的特徴を表わす放射伝達のパラメータは、植生パラメータ b_{fp} と単一散乱アルベド $\omega_{c,fp}$ の 2 つである。茎や葉などの植生を構成する要素の幾何学的特徴に着目して植生タイプを分類し、植生パラメータ b_{fp} と単一散乱アルベド $\omega_{c,fp}$ を、植生タイプを特定して衛星観測と同一の周波数・偏波条件において取得したマイクロ波放射計の植生観測データから直接決定する。

この方法は、観測データから植生パラメータ b_{fp} と単一散乱アルベド $\omega_{c,fp}$ を直接決定することによって、対象とした植生タイプの幾何学的特徴を推定結果へ反映させることが可能である。また、植生を構成する要素に着目して植生タイプを分類するため、既往の理論的なアプローチから

得られた知見と比較がしやすい。

離散型散乱体モデルは、植生を構成要素ごとに捉え、各要素の形状、サイズ、方向、個数などの情報を用いて放射伝達のモデル化を行っている。そのようなモデルから得られた知見をもとに、植生パラメーター b_{fp} と単一散乱アルベド $\omega_{c,fp}$ の推定結果に考察を与えることができる。3.4 節では茎と葉の放射・吸収特性について述べ、5.2.3 節では、その結果に基づいて、植生パラメーター b_{fp} と単一散乱アルベド $\omega_{c,fp}$ の推定結果を考察する。

また、植生の幾何学的特徴は、成長によっても変化する。そこで、5.4 節では、植生の生育状態による幾何学的特徴の違いに留意してモデルの検証を行う。

(b) 植生パラメーター b_{fp} と単一散乱アルベド $\omega_{c,fp}$ の推定

サイズと形状が b_{fp} と $\omega_{c,fp}$ へ与える影響を解析的に評価するためには、離散型散乱体モデルが必要となる。しかし、その解析は、植生を構成する個々の要素について、含水比、形状、サイズ、向き、傾き、空間分布などの詳細な情報を必要とする。これらの情報は、定量的な計測が難しい因子も含み、多種・多様な植生についての系統的な評価は難しい。本論文では、観測データを用いた経験的なアプローチによって、 b_{fp} と $\omega_{c,fp}$ の評価を行う。以下に、植生観測から b_{fp} と $\omega_{c,fp}$ を推定する方法について述べる。

b_{fp} と $\omega_{c,fp}$ が一定のとき、2 つ以上の観測データセットがあれば、 b_{fp} と $\omega_{c,fp}$ を決定することができる。式 (3.4)(3.5) の基本放射伝達方程式の各成分を整理すると、関連する因子は次のようである。

- (1) 物理量：植生温度 T_c 、植生総水分量 W 、地温 T_s 、土壤水分 M_v 、
- (2) 土壤に関するパラメーター：地表面粗度、土壤タイプ
- (3) 植生に関するパラメーター：植生パラメーター b_{fp} 、単一散乱アルベド $\omega_{c,fp}$ 、
- (4) 計測条件：周波数 f 、偏波 p 、入射角 θ 、
- (5) 上部境界条件：植生層上向き放射 T_B 、大気下向き放射 T_B^{sky} 。

式 (3.4) では、土壤表面からの放射 $T_{Bs,fp}$ と土壤表面の反射率 Γ_{fp} が含まれているが、地温 T_s 、土壤水分 M_v 、地表面粗度、土壤タイプの 4 つの因子で表わすことができる。土壤を均一な半無限媒体と考えると式 (2.108) を適用でき、土壤表面からの放射 $T_{Bs,fp}$ は、反射率 Γ_{fp} と地温 T_s から定まる。反射率 Γ_{fp} は、土壤タイプを特定すると、式 (2.124)、式 (2.93)(2.94) より、土壤水分と地温の関数として周波数・偏波毎に求まる。ただし、式 (2.93)(2.94) のフレネルの電力反射係数は、鏡面を仮定しているため、実際の土壤への適用の際には、土壤表面の粗度を考慮する必要がある。これらの整理すると、上記の (1)～(5) を得る。

ここで、それぞれの項目について考える。(1) は計測可能な物理量である。(4) は観測条件から決まるため既知である。また、(2) のうち土壤タイプは、対象エリアが決まれば同定できる。したがって、(3) の項目を求めるためには、未知の因子として、(2) の項目の地表面粗度と (5) の項目が残されている。本論文では、地上可搬型のマイクロ波放射計観測システムを開発することによって、土壤・植生データと対応する (5) の輝度温度データの取得を可能にした。また、地表面粗度に関しては、同システムにより、植生を刈り取った後の裸地の状態で取得したデータを用いてモデル化を行った。

システム開発の詳細および植生観測については、4 章にまとめる。観測データの解析手法は 3.3.2 節に述べ、粗度の推定手法と併せて具体的な手法を 5.1 節に記す。

3.2.3 植生被覆率による層モデルの拡張

実際の衛星観測ではフットプリントの大きさが数十 km あり、フットプリント一面が均一な植生に覆われている場合は稀である。また、一群をなす植生域でも、複数の植生が混在していることが多い。良く管理されている農地でさえ、農作物のほかに雑草が自生し、混生した状態となることがある。基本とした層モデルは水平方向に均一なスラブを仮定している。その適用の際には、植生被覆状態の不均一性や、複数の植生が混在しているときの影響を考慮する必要がある。本節では、層モデルの拡張について述べる。

(a) ミクセルモデル

植生の被覆状態の不均一性を考慮するため、層モデルに植生被覆率 V_c を導入する。

可視・近赤外のリモートセンシングでは、1 つのピクセル内に複数の地表面状態が混在する場合をミックスピクセル(ミクセル)問題と呼び、土地被覆分類を行なう際に 1 つの主題となる。本論でもこれに習い、植生被覆率を導入したモデルをミクセルモデルと呼ぶこととする。

Rayleigh-Jeans の法則によると、マイクロ波領域では電磁波エネルギーが温度に比例するため、ミクセルモデルは線形式を用いる。アンテナパターンが一様であると仮定すると、 n 種類の地表面被覆が存在するフットプリントからの輝度温度は、次式のように表わせる。

$$T_{B,fp} = \sum_{i=0}^n c_i \cdot T_{B,fp,i} \quad (3.6)$$

c_i は、 i 番目の被覆がフットプリント内に占める面積割合である。 $\sum_{i=0}^n c_i = 1$ とする。いま、植生域と裸地域の 2 種類のみを考えると、

$$T_{B,fp} = V_c \cdot T_{B,fp}^{canopy} + (1 - V_c) \cdot T_{B,fp}^{bare} \quad (3.7)$$

を得る。ここで、 $T_{B,fp}^{canopy}$ と $T_{B,fp}^{bare}$ は、植生域と裸地域、それぞれの放射を表し、 V_c は植生被覆率である。 $T_{B,fp}^{canopy}$ は、式 (3.4) において、 $T_{B,fp}$ に相当する。

植生の被覆状態の不均一性を考慮する場合、植生パラメーター b_{fp} と単一散乱アルベド $\omega_{c,fp}$ に加え、植生被覆率 V_c の 3 つの変数を持つことになる。 V_c はフットプリント内の植生被覆状態に関するパラメーターであり、植生層内の放射伝達特性を表わす b_{fp} や $\omega_{c,fp}$ とは性質が異なる。植生層内の放射伝達と直接的な関係はない。可視・近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では、被覆分類手法が多数開発されており、実際の衛星観測でも、対象エリアの植生被覆率を把握することは比較的容易である。そこで、植生被覆率 V_c は、外的因子として捉え、定数として与えることとする。

(b) 複数の植生が混合している場合の光学的厚さと単一散乱アルベド

次に、1 群をなす植生域に複数の植生が混在している場合を考える。

散乱体が空間中にランダムに分布している場合、散乱過程に伴う位相の効果は平均化されたときに相殺されてランダムな位相は消える。さらに、散乱体の個数密度が小さく、十分に離れている場合、それぞれの散乱体間の寄与は無視することができる。その結果、散乱係数 K_s と吸収係数 K_a は、各要素の合計として表すことができる。 m 種類の異なる植生が混生している場合の散乱係

数 K_s と吸収係数 K_a は ,

$$K_s = \sum_{i=0}^m K_{s,i} \quad (3.8)$$

$$K_a = \sum_{i=0}^m K_{a,i} \quad (3.9)$$

となる . また , 植生層全体の消散係数は ,

$$K_e = \sum_{i=0}^m K_{s,i} + \sum_{i=0}^m K_{a,i} = \sum_{i=0}^m K_{e,i} \quad (3.10)$$

となり , 消散係数は個々の要素の合計となる . したがって , 消散係数の積分で定義される光学的厚さも個々の要素の光学的厚さの和となる .

$$\tau_{c,fp} = \sum_{i=0}^m \tau_{c,fp,i} \quad (3.11)$$

一方 , 単一散乱アルベド $\omega_{c,fp}$ は , 定義より ,

$$\omega_{c,fp} = \frac{K_s}{K_e} = \frac{\sum_{i=0}^m K_{s,i}}{\sum_{i=0}^m K_{e,i}} = \frac{\sum_{i=0}^m \{\omega_{c,fp,i} \cdot K_{e,i}\}}{\sum_{i=0}^m K_{e,i}} \quad (3.12)$$

である . $\omega_{c,fp,i}$ は , 個々の要素の単一散乱アルベドである . 植生層が均一な場合 ,

$$K_{e,i} = \tau_{c,fp,i} / r \quad (3.13)$$

が成り立つ . r は視線方向の経路長である . 式 (3.12)(3.13) より ,

$$\omega_{c,fp} = \frac{\sum_{i=0}^m \{\omega_{c,fp,i} \cdot \tau_{c,fp,i}\}}{\sum_{i=0}^m \tau_{c,fp,i}} \quad (3.14)$$

を得る . 複数の植生が混在する場合の単一散乱アルベド $\omega_{c,fp}$ は , 個々の要素の単一散乱アルベドを光学的厚さで重み付き平均した形式で表される .

3.2.4 植生層放射伝達モデルの特性

式 (3.4) で示した植生層モデルの各成分の特性を考察し , 光学的厚さ , 単一散乱アルベドや植生被覆率が , 輝度温度へ与える影響について考える .

(a) 光学的厚さ $\tau_{c,fp}$ に対する植生層放射伝達方程式の挙動

式 (3.4) に示した植生層の放射伝達方程式の挙動を図 3.4 に示す . 単一散乱アルベドを $\omega_{c,fp} = 0$, 植生被覆率を $V_c = 1$ としたときの , 光学的厚さ $\tau_{c,fp}$ と輝度温度の各成分との関係を表している . $\omega_{c,fp}$ や V_c の影響は , 別途 , 考察する . 裸地の状態ときに $\tau_{c,fp} = 0$ であり , 植生が増加するほど光学的厚さ $\tau_{c,fp}$ が大きくなる傾向にある . このシミュレーションに用いた植生温度 , 地温 , 土壌水分などの物理量は , 4.5 節で後述するクローバー観測で取得した値を用いた . 図中に計算条件を明記する . 土壌表面からの放射の項 $T_{B,fp,1}$ と植生層の上向き放射の項 $T_{B,fp,2}$ は左軸 , 地表面で反射された植生層の下向き放射の項 $T_{B,fp,3}$ と大気下向き放射の項 $T_{B,fp,4}$ は右軸にスケールを示す .

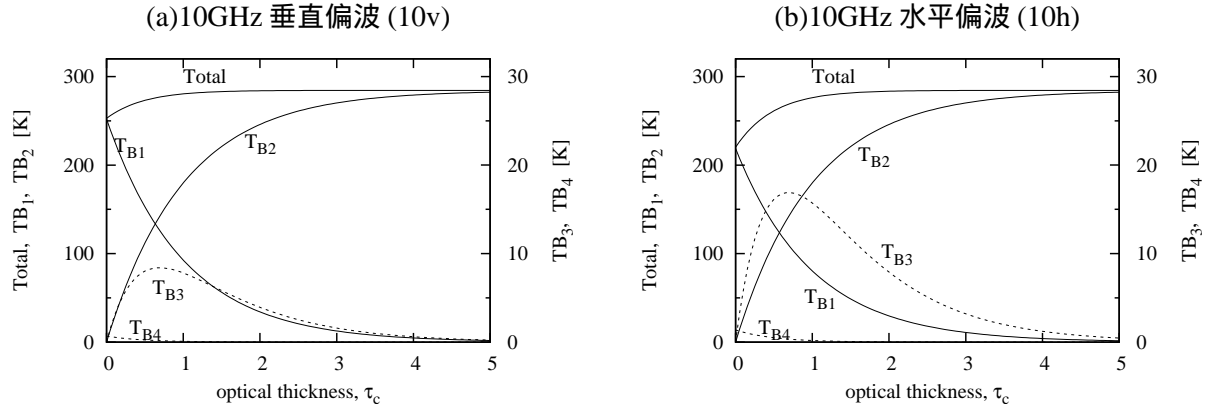
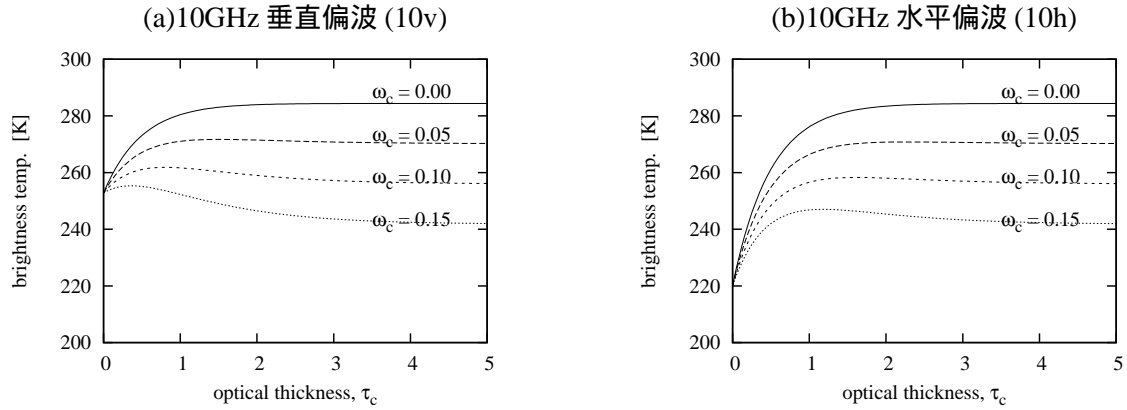


図 3.4: 植生層放射伝達モデルの特性：各成分の挙動

計算条件：周波数 10.65GHz，入射角 55 度，単一散乱アルベド 0.00，植生被覆率 100%，植生温度 11.2 度，地温 12.0 度，土壌水分 53.0%，大気下向き放射 5.7 K． $T_{Bp,1}$ ：植生層によって消散を受ける地表面からの放射， $T_{Bp,2}$ ：植生層上向き放射， $T_{Bp,3}$ ：地表面で反射された植生層下向き放射． $T_{Bp,4}$ ：地表面で反射された大気下向き放射．Total:合計． $T_{Bp,1}$ ， $T_{Bp,2}$ ，Total は左軸， $T_{Bp,3}$ ， $T_{Bp,4}$ は右軸に示す．


 図 3.5: 植生層放射伝達モデルの特性：単一散乱アルベド ω_c の影響

単一散乱アルベド $\omega_c = 0, 0.05, 0.10, 0.15$ における地表面射出(縦軸)の比較．計算条件は図 3.4 に同じ．

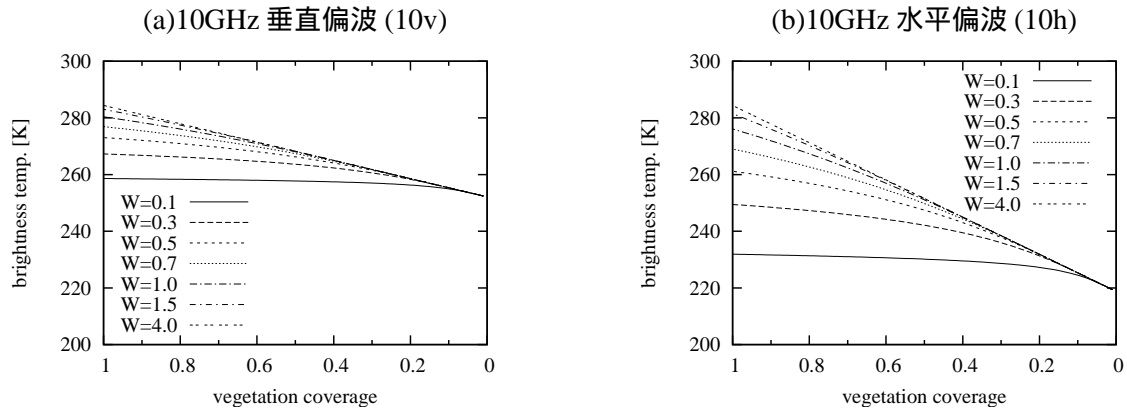


図 3.6: 植生層放射伝達モデルの特性：植生被覆率の変化

植生パラメーター $b_{fp} = 1$ ，その他の計算条件は図 3.4 に同じ． W は，植生水分量 [kg/m^2] を意味する．

Total は 4 成分の合計で式 (3.4) の左辺を指す．左軸にスケールを示す．

図から， $T_{B,fp,3}$ と $T_{B,fp,4}$ は低く， $T_{B,fp,1}$ と $T_{B,fp,2}$ が主要素であることが分かる． $\tau_{c,fp}$ の変化に応じて，それぞれ，200K 以上もの変動範囲を有する． $T_{B,fp,3}$ の変動範囲は，その 10 分の 1 以下である．大気下向き放射の項 $T_{B,fp,4}$ は，絶対値が低かったために全体への寄与は数ケルビンしかない． $\tau_{c,fp}$ が 0.5 程度になるとゼロになっている． $T_{B,fp,1}$ と $T_{B,fp,2}$ の関係は，逆相関であり，合計である Total は，数十ケルビンの変動幅をもつ．

個々の項目の挙動について見てみる． $T_{B,fp,1}$ は， τ_{fp} の増加とともに低下する．これは，植生層が吸収体として働く結果である．反対に，植生からの放射である $T_{B,fp,2}$ と $T_{B,fp,3}$ は， τ_{fp} の増加によって上昇する．ところが，これらの植生からの放射も， $T_{B,fp,1}$ と同じように伝播過程で吸収を受けるため， $\tau_{c,fp}$ が「適度に」大きくなると， $T_{B,fp,2}$ の変化の割合は緩やかになっていき，反射波である $T_{B,fp,3}$ の変化は減少へと転ずる．ここで「適度に」とは，この事例では， $\tau_{c,fp}$ が，およそ 1 から 3 の範囲を指す． $\tau_{c,fp}$ が 4 以上になると，輝度温度の変化がなく，ほぼ一定の値となる．この状態では， $T_{B,fp,3}$ や $T_{B,fp,4}$ と，深層に位置する植生からの上向き放射は，伝播過程において吸収とバランスし，植生層上面から出てくる放射輝度は，ある一定の深さまでの表層に位置する植生からの放射によって決まる．

垂直偏波と水平偏波の各成分の挙動は，同じ傾向を示している．しかし，土壌表面の放射率の違いによって， $\tau_{c,fp}$ に対する輝度温度のレンジ幅が異なる．水平偏波は，放射率が低く，土壌面の放射が低いためにレンジ幅が広い．水平偏波と垂直偏波の差は， $\tau_{c,fp}$ が増加して主要素が $T_{B,fp,1}$ から $T_{B,fp,2}$ へ移る過程で小さくなっている．

(b) 単一散乱アルベド $\omega_{c,fp}$ に対する植生層放射伝達方程式の挙動

図 3.5 に，単一散乱アルベド $\omega_{c,fp}$ と放射輝度温度 $T_{B,fp}$ の関係を示す．これは，図 3.4 の Total に対応する値である．図 3.4 と同じ計算条件を与え， $\omega_{c,fp}$ を 0.00 ~ 0.15 の範囲で 0.05 刻みに 4 ケース設定した．

単一散乱アルベド $\omega_{c,fp}$ は， $T_{B,fp,2}$ と $T_{B,fp,3}$ の項に含まれ，植生からの放射を決めるパラメータである．したがって，植生からの放射の占める割合が増えるほど， $\omega_{c,fp}$ の影響も大きくなる．図 3.5 において， $\omega_{c,fp} = 0$ の曲線と，それぞれの曲線との差を見ると， $\tau_{c,fp}$ の増加にともなって差が広がっているのが分かる． $\tau_{c,fp}$ が十分に大きくなり，輝度温度の変化がなくなる区間で，この差が最大となる．たとえば， $\omega_c = 0.1$ の曲線をみると，最大 30K 近く低下している．

ω_c の影響が最大となる区間は，具体的に数式で表現できる． $\tau_{c,fp}$ が十分に大きい場合， $e^{-\tau_{c,fp}}$ は 0 に近づき，式 (3.4) は次式のようになる．

$$T_{B,fp} \approx T_{B,fp,2} \approx (1 - \omega_{c,fp}) \cdot T_c \quad (3.15)$$

植生層上部境界から出てくる放射 $T_{B,fp}$ は，1 から $\omega_{c,fp}$ を引いた値に植生温度を乗ずることにより求まる．つまり，単一散乱アルベド $\omega_{c,fp}$ の増分の割合だけ，輝度温度の最大値が低下することになる． $\omega_{c,fp}$ が 0.1 であれば，植生温度の大きさの 1 割分だけ低下する．植生の放射と土壌表面の放射は独立であるため，土壌表面の放射が比較的高い場合は，植生層からの放射が土壌表面の放射よりも低くなることもありえる．特に，垂直偏波は土壌表面からの放射が大きく，その可能性は高い．図 3.5(a) のケースでは， $\omega_{c,fp} = 0.1$ のときに植生から放射の最大値が土壌表面の放射とほぼ等しく， $\omega_{c,fp} = 0.15$ になると， $\tau_{c,fp}$ が増加するにつれて輝度温度が低下している．

(c) 植生被覆率 V_c に対する植生層放射伝達方程式の挙動

図 3.6 は、植生被覆率 V_c と放射輝度温度 $T_{B,fp}$ の関係を示す．完全に植生に覆われた状態 ($V_c = 1$) は層モデルを意味する、 $V_c = 0$ は、裸地の状態である．このシミュレーションでは、植生被覆率 V_c が変化しても植生水分量 W が一定となるように拘束条件を与えた．植生被覆率 V_c を導入したとき、光学的厚さ τ_c と植生水分量 W との関係式である式 (3.5) は、次のように再定義できる．

$$\tau_{c,fp} = b_{fp} \cdot \frac{W}{V_c} \quad (3.16)$$

図 3.6 では、植生パラメーター b_{fp} を 1 とし、植生水分量 W を、 0.1kg/m^2 から 4.0kg/m^2 まで、7 通りの条件を設定した．その他の計算条件は図 3.4 と同じである．ミクセルモデルでは輝度輝度温度 $T_{B,fp}$ と各被覆からの放射の関係は、線形であるが、植生域の放射伝達方程式の非線形性を反映して、植生被覆率 V_c と輝度輝度温度 $T_{B,fp}$ の関係は線形にならない．特に、植生水分量 W が 0.3kg/m^2 から 0.7kg/m^2 のときに非線形性が強い．

式 (3.16) のように光学的厚さ $\tau_{c,fp}$ は植生被覆率 V_c に反比例し、植生水分量 W が一定のとき、 V_c が減少すると $\tau_{c,fp}$ は増加する．しかし、 $\tau_{c,fp}$ と $T_{B,fp}^{canopy}$ の関係は図 3.4 のように非線形であり、 $\tau_{c,fp}$ が大きくなると $T_{B,fp}^{canopy}$ 増加の割合が小さくなって一定値へと近づく． $T_{B,fp}^{canopy}$ が一定値になれば、 V_c と $T_{B,fp}$ の関係は線形となる．いま、 $b_{fp} = 1$ であるので、図中の $W = 4$ の曲線は、 $V_c = 1$ のときに $\tau_{c,fp}$ が 4 となる．この場合、 V_c が減少しても $T_{B,fp}^{canopy}$ がほぼ一定であるため、輝度温度は直線的に低下している． $W = 1.5$ 以下の曲線は、 V_c の減少とともに輝度温度は低くなるが、徐々に $W = 4$ の曲線へ近づき、 $\tau_{c,fp}$ が 4 を超えた時点で、 $W = 4$ の曲線と等しくなる．また、図 3.6(a) と (b) を比べると、垂直偏波は、水平偏波に比べて植生被覆率 V_c の影響が小さいことが分かる．これは、垂直偏波の土壌面の放射が大きいために、植生域と裸地域とのコントラストが小さいためである．

3.3 植生パラメーター b_{fp} と単一散乱アルベド $\omega_{c,fp}$ の推定方法

3.2.2 節において植生パラメーター b_{fp} と単一散乱アルベド $\omega_{c,fp}$ の推定について述べた．本節では、はじめに、光学的厚さ $\tau_{c,fp}$ と単一散乱アルベド $\omega_{c,fp}$ の関係について説明し、次に、これらのパラメーターの具体的な推定手順について述べる．

3.3.1 光学的厚さ $\tau_{c,fp}$ と単一散乱アルベド $\omega_{c,fp}$ の関係

式 (3.4) を $\omega_{c,fp}$ に関して整理すると、

$$\omega_{c,fp} = 1 - \frac{T_{B,fp} - T_{Bs,fp} \cdot e^{-\tau_{c,fp}} - T_{B,fp}^{sky} \cdot \Gamma_{fp} \cdot e^{-2\tau_{c,fp}}}{T_c(1 - e^{-\tau_{c,fp}})(1 + \Gamma_{fp} \cdot e^{-\tau_{c,fp}})} \quad (3.17)$$

を得る．図 3.7 に、式 (3.17) の計算例を示す．図 3.4 と同一条件を用い、輝度温度は後述するクローバーの 18GHz 垂直偏波の観測値を使用した．図 3.7 は、輝度温度・土壌面の放射と反射率・植生温度が与えられたとき、光学的厚さ $\tau_{c,18v}$ と単一散乱アルベド $\omega_{c,18v}$ が取りうる組み合わせを意味する．

従来、単一散乱アルベド ω_c は無視されることが多く、 $\omega_c = 0$ として求めた光学的厚さ $\tau_{c,fp}$ から植生パラメーター b が決められている [80]．しかし、図 3.7 をみると、 $\omega_{c,fp}$ を考慮することによって、 $\tau_{c,fp}$ の推定値が変化することが分かる．たとえば、 $\omega_{c,fp} = 0.077$ である植生を考える．この値は、5.2.1 節で後述する実際のクローバーの観測データから推定した値である． $\omega_{c,fp}$ を考慮した場合 (case1) と考慮しない場合 (case2) を比較すると、 $\tau_{c,fp}$ の値は 2 倍近くの開きがある．

$\tau_{c,fp}$ の推定値は b_{fp} の決定に直接反映されるため、この結果を用いて輝度温度を推定する場合、誤差を生む原因となる。case2 は、 $\omega_{c,fp}$ を無視することにより生じる誤差を水分量の関数である光学的厚さ $\tau_{c,fp}$ に転化し、 b_{fp} を実際よりも小さく評価している。パラメーター決定時と同じ温度・水分条件のもとでは、case1 と case2 は同じ輝度温度を与えるが、異なる条件のもとでは、植生の放射の項を過小評価し、土壌面からの放射を過大評価することになる。観測値から植生パラメーター b_{fp} を求めるにあたり、単一散乱アルベド $\omega_{c,fp}$ と同時に推定を行えば、このような誤差は回避できる。

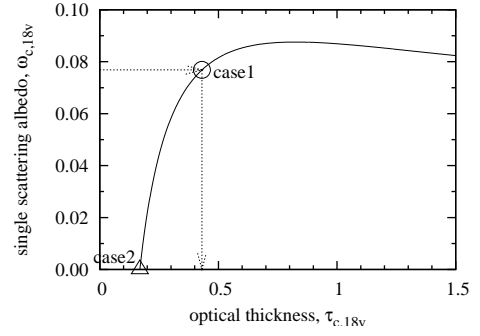


図 3.7: $\tau_{c,fp}$ - $\omega_{c,fp}$ 曲線 (18v)
 計算条件: $T_{B,18v} = 264.41K$, $T_{B,18v}^{sky} = 12.43K$. その他は図 3.4(a) に同じ。

3.3.2 植生パラメーター b_{fp} と単一散乱アルベド $\omega_{c,fp}$ の推定手順

観測で得られたデータから、植生パラメーター b_{fp} と単一散乱アルベド $\omega_{c,fp}$ を同時に推定する手法を 2 つ挙げる。1 つは植生層の放射伝達方程式から直接求める方法で、もう 1 つは統計的に求める方法である。

(a) 直接解法

式 (3.4) は、 b_{fp} と $\omega_{c,fp}$ 、2 つの未知数を含む方程式であるので、独立した 2 つのデータセットより推定することができる。ここでは、以下のような数値解法によって b_{fp} と $\omega_{c,fp}$ を決定する。観測データには測定誤差が含まれ、解が存在しない場合もありうる。この方法は視覚化しやすく、結果の判定が容易である。

1. 2 組の観測データを式 (3.17) へ適用し、2 つの方程式を作る。ここでは式 A と式 B と呼ぶことにする。 $\tau_{c,fp}$ は、式 (3.16) によって b_{fp} の関数とする。また、 $V_c \neq 1$ のときは、 $T_{B,fp}$ の代わりに、式 (3.7) から求まる $T_{B,fp}^{canopy}$ を用いる。
2. $b_{c,fp}$ の計算範囲と刻みを設定する。
3. 全ての $b_{c,fp}$ について、 $\omega_{c,fp}$ を算定する。
4. 式 A と式 B の b_{fp} が等しくなるときの $b_{c,fp}$ を探す。このときの $\omega_{c,fp}$ と b_{fp} の値が推定値となる。

この手法における推定精度は、植生水分量や温度の観測精度への依存性が高い。また、2 組のデータセットにおいて各因子のレンジが大きいほど良い精度が得られる。

(b) 統計的手法

多数のデータセットが整っている場合は、統計的手法が有効である。植生パラメーター b_{fp} と単一散乱アルベド $\omega_{c,fp}$ の複数の組み合わせの中から、輝度温度の観測値に最も近い推定値を与える組み合わせを求める。下記に手順を示す。

1. 対象とする観測データセットを作成する。

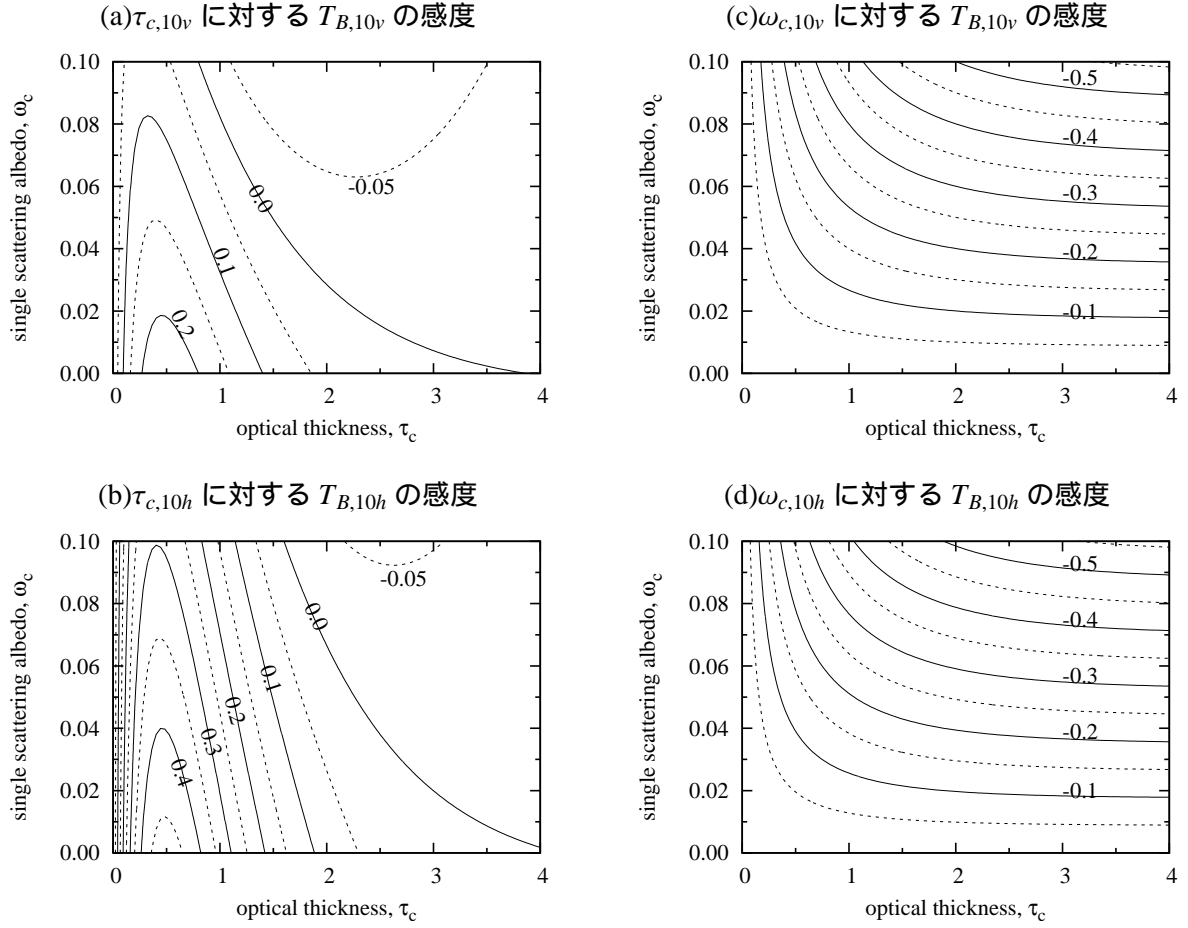


図 3.8: 植生層モデルにおける光学的厚さ τ_c と単一散乱アルベド ω_c に対する感度輝度温度の差分の分布図．等差分線の間隔は 0.05K．(a)(b) は、 τ_c が 2% 変化したときの差分．(c)(d) は、 ω_c が 2% 変化したときの差分．また、(a)(c) は垂直偏波、(b)(d) は水平偏波の結果である．計算条件は図 3.4 に同じ．

2. b_{fp} と $\omega_{c,fp}$ の計算範囲、刻みを設定する．
3. 式 (3.4)、式 (3.7)、式 (3.16) により、全ての b_{fp} と $\omega_{c,fp}$ の組み合わせについて輝度温度の推定値 $T_{B,i}^{est}$ ($i = 1, 2, \dots, n$. n は観測データ数) を計算する．
4. 輝度温度推定値と観測値 $T_{B,i}^{obs}$ との差の絶対値 $|T_{B,i}^{est} - T_{B,i}^{obs}|$ を求める．
5. $|T_{B,i}^{est} - T_{B,i}^{obs}|$ の平均値が最小となる b_{fp} と $\omega_{c,fp}$ の組み合わせを推定値とする．なお、この平均値を $\overline{T_{B,err}}$ と呼ぶ．

3.3.3 光学的厚さ $\tau_{c,fp}$ と単一散乱アルベド $\omega_{c,fp}$ に対する輝度温度の感度

b_{fp} と $\omega_{c,fp}$ を同時に推定するためには、 $\tau_{c,fp}$ と $\omega_{c,fp}$ とともに輝度温度に対して感度を有しているデータを使用しなければならない．3.2.4 節において、 $\tau_{c,fp}$ と $\omega_{c,fp}$ の変化に対する輝度温度の挙動について議論したが、ここでは、輝度温度の感度について考えてみる．

式 (3.4) を, $\tau_{c,fp}$ と $\omega_{c,fp}$ について偏微分すると次式を得る .

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_{B,fp}}{\partial \tau_{c,fp}} &= -T_{B,fp} \cdot e^{-\tau_{c,fp}} + (1 - \omega_{c,fp})(1 - \Gamma_{fp}) \cdot T_c \cdot e^{-\tau_{c,fp}} \\ &\quad + 2 \left\{ (1 - \omega_{c,fp})T_c - T_B^{sky} \right\} \cdot \Gamma_{fp} \cdot e^{-2\tau_{c,fp}} \end{aligned} \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial T_{B,fp}}{\partial \omega_{c,fp}} = -T_c \cdot (1 - e^{-\tau_{c,fp}})(1 + \Gamma_{fp} \cdot e^{-\tau_{c,fp}}) \quad (3.19)$$

式 (3.18)(3.19) は, それぞれ, 光学的厚さ $\tau_{c,fp}$ と単一散乱アルベド $\omega_{c,fp}$ に対する輝度温度 $T_{B,fp}$ の感度を意味する . $\omega_{c,fp}$ に対する感度は, $\omega_{c,fp}$ に対して独立で, $\tau_{c,fp}$ のみに依存するが, $\tau_{c,fp}$ に対する感度は, $\tau_{c,fp}$ 自身にも依存することが分かる .

もう少し具体的に, $\tau_{c,fp}$ と $\omega_{c,fp}$ に対する感度を調べてみる . 図 3.8 は, $\tau_{c,fp}$ と $\omega_{c,fp}$ に対する輝度温度 $T_{B,fp}$ の感度を示したグラフである . 式 (3.20)(3.21) に示した $\tau_{c,fp}$ もしくは $\omega_{c,fp}$ に対する輝度温度の差分 $\Delta T_{B,fp}$ の分布図である .

$$\Delta T_{B,fp}(\Delta \tau_c) = T_{B,fp}(\tau_c + \Delta \tau_c, \omega_c) - T_{B,fp}(\tau_c, \omega_c) \quad (3.20)$$

$$\Delta T_{B,fp}(\Delta \omega_c) = T_{B,fp}(\tau_c, \omega_c + \Delta \omega_c) - T_{B,fp}(\tau_c, \omega_c) \quad (3.21)$$

ここで, $\Delta \tau_c$ と $\Delta \omega_c$ として, それぞれ 2% の変動を与えた . 図 (a)(b) は τ_c に対する差分 $\Delta T_{B,fp}(\Delta \tau_c)$, 図 (c)(d) は ω_c に対する差分 $\Delta T_{B,fp}(\Delta \omega_c)$ である . それぞれ, 垂直偏波と水平偏波の結果を示す .

図 3.8(a)(b) に示した $\tau_{c,fp}$ に対する感度は, $\tau_{c,fp}$ の増加とともに良くなるが, さらに $\tau_{c,fp}$ が大きくなると鈍くなっている . 0.1K の等差分線を基準にして感度のレンジを見ると, 感度の上限は $\tau_{c,fp}$ が 1~2 である . 水平偏波の方が上限の大きい . また, $\omega_{c,fp}$ が大きくなると感度を有する範囲は狭まっている . 一方, 図 3.8(c)(d) に示した $\omega_{c,fp}$ に対する感度は, 全般的に良い感度を有する . 変動を相対的な大きさで与えているため, $\omega_{c,fp}$ の大きさに比例して感度が大きくなっている . しかし, $\tau_{c,fp}$ が小さい場合は, 植生の放射も小さいため, $\omega_{c,fp}$ に対する感度は鈍くなっている .

輝度温度の感度は, b_{fp} と $\omega_{c,fp}$ の推定精度に関わってくる . 植生量が少なく $\tau_{c,fp}$ が小さい場合は, $\tau_{c,fp}$ も $\omega_{c,fp}$ も感度が鈍く, $\tau_{c,fp}$ が大きい場合は, $\omega_{c,fp}$ の感度が良くなるが, $\tau_{c,fp}$ に対して感度がなくなる . 輝度温度が $\tau_{c,fp}$ に対して感度をもつ上限は, この例では $\tau_{c,fp}$ が 1~2 程度である . b_{fp} と $\omega_{c,fp}$ の推定には, $\tau_{c,fp}$ が 0.5~1 程度の植生が適している .

3.3.4 植生パラメーター b_{fp} と単一散乱アルベド $\omega_{c,fp}$ の推定値の解釈

植生水分量が多いデータを対象にして b_{fp} と $\omega_{c,fp}$ を推定したときの結果について考えてみる .

式 (3.17) で表される $b_{fp} - \omega_{c,fp}$ の曲線は, 3.3.2 節の直接解法と統計的手法の基本をなしている . 直接解法は, 2 本の $b_{fp} - \omega_{c,fp}$ 曲線の交点を探索する手法であり, 統計的手法は, 多数の $b_{fp} - \omega_{c,fp}$ 曲線から最も相関の高い点を探索する手法である . 十分に植生水分量が多くなった場合を想定して, 式

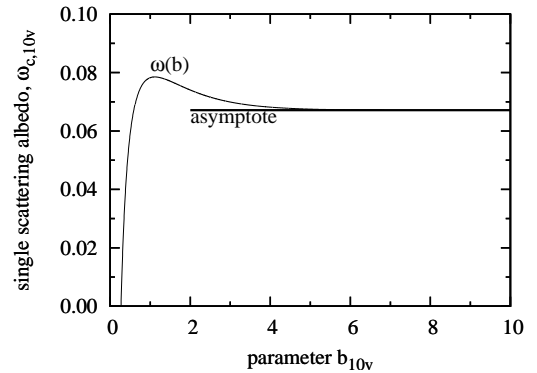


図 3.9: $b_{fp} - \omega_{c,fp}$ 関係
計算条件は, 図 3.4(a) に同じ . 植生水分量を 0.342 kg/m^2 として横軸を植生パラメーター b で表わす .

(3.17) において, $\tau \rightarrow \infty$ の極限と取ると,

$$\omega_{c,fp} = 1 - \frac{T_{B,fp}}{T_c} \quad (3.22)$$

となり, $\omega_{c,fp}$ は一定値に近づくことが分かる. 図 3.9 は, 式 (3.17) と式 (3.5) の $b_{c,fp} - \omega_{c,fp}$ の曲線とその漸近線を示している. 横軸は, 植生水分量 0.342 kg/m^2 として光学的厚さから計算した植生パラメーター b である.

植生水分量が多く, 光学的厚さに感度を持たないデータの場合, 直接解法では, 2 つの曲線が漸近線上に重なり, 統計的手法では, $\overline{T_{B,err}}$ の最小値が漸近線に沿って線上になる. このとき, $b_{c,fp}$ の推定結果は意味を持たない.

3.4 植生の放射・吸収特性

基本とする植生域地表面の放射伝達モデル式 (3.4) は, 植生の放射・吸収特性に基礎を置いている. そこで, 本節では, 既往の知見から, 植生の放射・吸収特性を整理する.

Jackson and Schmugge (1991) [80] は, 放射・吸収特性の植生タイプ依存性を表す植生パラメーター b が, 葉が卓越する植生と, 茎が卓越する植生の 2 タイプに分類できることを示し, さらに, 周波数依存性を表すモデルを提案している. しかしながら, 水平偏波に限定し, 比較的小さな入射角で取得された観測データを用いて議論しているため, 衛星観測を想定した放射伝達モデルへ, そのまま適用することはできない. 周波数や入射角が変われば, 放射・吸収特性も変わってくる. たとえば, Wu *et al* [100] は, 10GHz のマイクロ波散乱計によるダイズの観測から, 入射角 30 度のときに葉が支配的であるが, 入射角 50 度になると茎が支配的であると指摘している. つまり, Jackson and Schmugge (1991) [80] において葉が支配的であるとされているダイズでも, 入射角が大きくなった場合, 茎が卓越する可能性を持っている.

本節では, 「茎」や「葉」といった植生の構成要素ごとに, 衛星観測条件における放射・吸収特性を考える.

3.4.1 茎の放射・吸収特性

はじめに, トウモロコシやコムギのように鉛直構造が卓越した植生を取り上げる.

これらの植生では, 垂直偏波の光学的厚さが入射角が大きくなるにつれて大きくなることが知られている [89, 88]. これは, 電界の向きが茎の軸方向に対して平行であることに起因する現象である. 鉛直に立っている棒を上から見たときは「点」であるが, 斜めから見ると「線」となり, 角度が大きいほど長くなる. 茎は幅を持っているので, 入射角が大きいほど視線方向への投影断面積も大きくなる. その結果, 吸収断面積が大きくなり, 同じ植生水分量でも斜めから見ると光学的厚さは大きくなる.

一方, 水平偏波では, 茎の直径が波長と比べて十分に短いときに, 軸方向の寄与が無視できる. その場合, 入射角依存性はない. Jackson and Schmugge (1991) [80] では, この水平偏波の特性を前提としている. しかし, 茎の直径が波長に対して長くなると入射角依存性が現れ, 垂直偏波と同様の振る舞いを示すようになる. 「波長に対する長さ」の 1 つの基準として, 次式が示されている [85, p.1638].

$$\lambda' = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_v}} \quad (3.23)$$

λ' は, 波長 λ の電磁波が, 誘電率 $\epsilon_v' + j\epsilon_v''$ の植生媒体中に侵入したときの波長である. 茎の直径が λ' 以下であれば, 軸方向の寄与は無視できる.

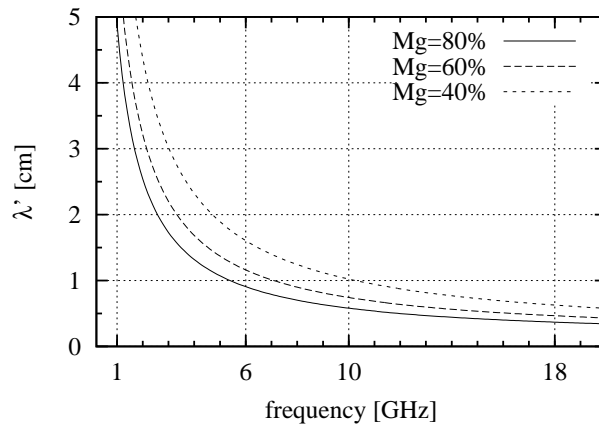


図 3.10: 植生媒体中の波長

植生水分量 M_g が 80%, 60%, 40% のときの植生媒体中における波長 (縦軸) を示す。

図 3.10 に、1GHz ~ 20GHz における λ' の値を示す。これは、図 2.12 に示した植生体の誘電率を用いて計算した結果である。図中に、重量含水比 $M_g = 80\%, 60\%, 40\%$ の 3 つ曲線を示す。80% は比較的元気な葉を想定している。40% は枯れかけた葉である。

この図において、トウモロコシとコムギの茎の直径を比較してみる。茎の直径は品種や生育相により異なるが、トウモロコシを 2cm ~ 3cm、コムギを 5mm 程度として話をすすめる。トウモロコシとコムギは、Jackson and Schmugge (1991) [80] において、茎が卓越した植生として分類されている。まず、1GHz 帯を見ると、最も条件の厳しい $M_g = 80\%$ の曲線で、 λ' が約 4cm である。そのため、茎の太いトウモロコシでも、1GHz 帯の水平偏波は入射角に依存しないことになる。6GHz 帯になると λ' は 1cm 程度まで短くなるので、トウモロコシでは入射角依存性が現れる。しかし、コムギでは、まだ茎の直径は λ' より短い。10GHz 帯や 18GHz 帯になると λ' は 5mm 以下になり、コムギでも入射角依存性が生じる。草本を対象とする場合、茎の太さは数 mm から数 cm にわたり、周波数帯によって入射角依存性の有無が異なることになる。

入射角依存性の有無によって、植生の放射・吸収特性がどのように変化するか考察する。茎のように鉛直に立った誘電性の円柱に斜めから入射する場合、入射波の一部は表面で反射され、残りは内部へ侵入する。内部では、多重散乱を繰り返しながら透過波として外部へ出てくる。吸収・散乱特性は単純ではない。トウモロコシやイネの茎¹のように中空である場合は、さらに反射・透過のプロセスは複雑になる。このような問題は、古くは Wait(1955) [92] によって解析され、最近では光ファイバーの理論で詳しく取り扱われている [102]。円柱の軸方向に伝播する成分を考慮し、垂直偏波と水平偏波、それぞれの散乱計算が必要となる。ここでは、より直感的に理解できる既往の観測に基づく研究を参照する。

図 3.11 は、Ulaby *et al* (1987) [88] によって行なわれたトウモロコシの消散係数の観測結果である。1GHz 帯、5GHz 帯、10GHz 帯の 3 つの周波帯をもつマイクロ波散乱計によって、入射角 20 度、40 度、60 度、90 度の計測が行なわれている。植生層を均一と見なすと、光学的厚さは、消散係数に視線方向沿った植生層の長さを乗ずることで得られる。

まず、図 (a) の 1GHz 帯を見ると、垂直偏波は入射角と正の相関が見られるのに対し、水平偏波は入射角によらず、ほぼ一定の値を示していることが分かる。衛星の入射角に近い 60 度のデータをみると、垂直偏波と水平偏波には、3 倍以上の開きがある。これに対し、図 (b) 5GHz 帯や図 (c) 10GHz 帯では、水平偏波も消散係数の値が大きくなっている。 λ' の基準から判断すると、入射

¹中空の茎のことを「稈」という

角依存性が発生する周波数帯である。

図 (b)5GHz 帯では、入射角が浅いときに、垂直偏波と水平偏波に差が見られるが、入射角が大きくなると、偏波間の差はほとんどない。より波長の短い図 (c)10GHz 帯では、入射角が浅いときでも偏波間に差は見られない。Ulaby *et al* (1987) の観測では、18GHz 帯の測定は行なわれていないが、図 3.10 に示した 18GHz 帯の λ' は、10GHz 帯よりも短く、消散係数は 10GHz 帯と同様に垂直偏波と水平偏波の差が小さいと推察する。

また、消散係数と入射角の関係は、単調増加でないことも分かる。たとえば、図 (c)10GHz 帯では、入射角 40 度のときに消散係数が最も大きくなっている。

以上のことから、入射角依存性がある場合、光学的厚さは入射角依存性がないときと比べて大きく、その値は、入射角によって特有の挙動を示すと推察できる。

次に、茎が傾いている場合を考える。植物学では、主茎や分枝などのように植生の構造は細かく定義されているが、マイクロ波に対する挙動は、形状や傾きによって吸収・散乱特性が決まるため、ここでは、主茎や分枝も一括して茎として扱う。

一般に、植生は鉛直方向ばかりでなく水平方向へも広がりをもつ。茎が水平方向へ広がっているほど、茎の傾き分布は一様になる。この場合、1 つ 1 つの茎が異方性を持っていたとしても、傾きが一樣に分布している場合、植生層全体としては異方性が小さくなり、水平偏波と垂直偏波の差は小さくなる傾向になる。ただし、 λ' よりも細かい茎で構成されているときは、軸方向に直角な方向の成分が小さいため、全体の光学的厚さは、小さくなると推定できる。また、ツル性の植物のように地面に沿って水平に伸びる場合も同様である。この場合、傾き分布は水平成分が多くなるが、ツルの伸びる方向がランダムであれば、やはり異方性は小さくなる。

3.4.2 葉の特性

はじめに、水平方向に広がりを持つ葉を取り上げる。比較的ランダムに見えるダイズの葉でも、水平を 0 度とすると、0 度から 30 度程度までの傾きを持つ葉が多い [77]。水平方向に広がった葉を斜めから見ると、投影面積は小さくなる。したがって、視線方向への投影面積の観点から考えると、入射角が大きくなれば、葉の寄与が小さくなることになる。これは、茎とは逆の現象である。しかしながら、葉の放射特性は、葉の厚さによっても変わってくるため、一概には言えない。葉の放射特性は、葉の

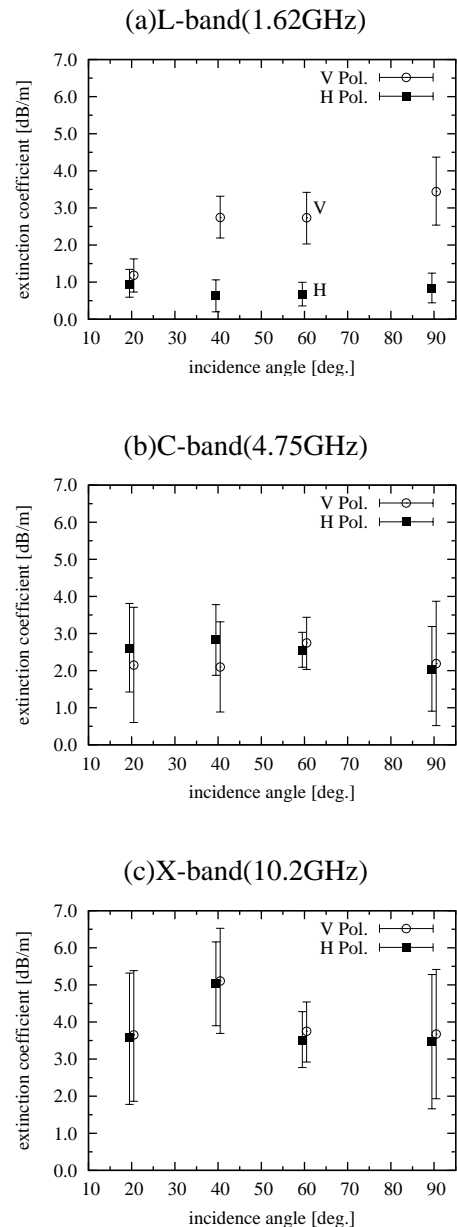


図 3.11: マイクロ波散乱計によって観測されたトウモロコシの消散係数

Ulaby *et al* (1987) [88] より引用。論文中の図をトレースして再描画した。原図にあるモデル計算値は削除した。平均値と $\pm 25\%$ 信頼区間を示す。

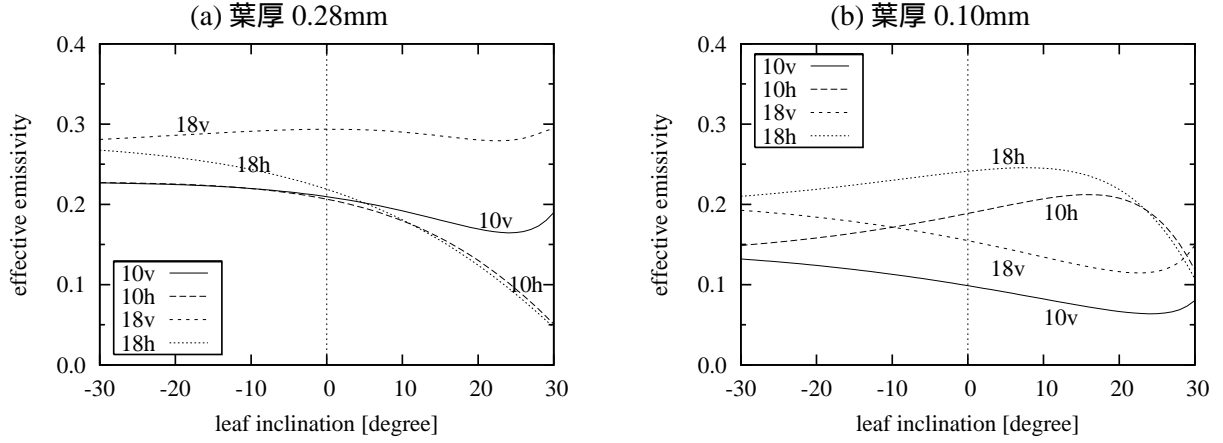


図 3.12: 葉の放射率

葉を誘電性スラブと仮定したときの有効放射率．横軸は葉の傾き (水平 0 度) を示す．計算条件：入射角 55 度，葉の重量含水比 80%，葉面温度 22 度，葉厚 (a)0.28mm，(b)0.10mm．

表面での反射および透過との収支によって決まる．そこで，葉を誘電性のスラブと仮定したモデルによって，葉厚と放射の関係について調べる．

図 3.12 は，次式に示す誘電性スラブのコヒーレントモデル [86, pp.245-247] によって計算した葉の有効放射率である．このモデルは，葉の表面における反射および透過のプロセスで生じる位相差を考慮している．

$$e_c = \frac{(1 - \Gamma_l) \left(1 - \frac{\Gamma_l}{L^2}\right) - \frac{1}{L} (1 - \Gamma_l)^2}{\left(1 + \frac{\Gamma_l^2}{L^2}\right) - \frac{2\Gamma_l}{L} \cos(2\beta' d)} \quad (3.24)$$

e_c は葉の有効放射率， Γ_l は葉の表面の反射率， L は葉の吸収ロス， d は葉の厚さ [m] である． β' は，誘電スラブの位相定数 β で定義される．

$$\beta' = \beta \sec \theta_l \quad (3.25)$$

ここで， θ_l は，誘電スラブ内の透過波の角度で，スネルの法則から，

$$\cos \theta_l = \sqrt{1 - \frac{1}{\epsilon_v} \sin^2 \theta} \quad (3.26)$$

となる． θ は入射角である．また，葉の吸収ロス L は，減衰定数 α と葉厚 d から求まる．

$$L = e^{2\alpha d \sec \theta_l} \quad (3.27)$$

なお，位相定数 β および減衰定数 α は，植生の誘電率 ϵ_v と波長 λ より求まる．

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \text{Re} \left[\sqrt{\epsilon_v} \right], \quad (3.28)$$

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda} \left| \text{Im} \left[\sqrt{\epsilon_v} \right] \right|. \quad (3.29)$$

である．ここで， $\text{Re}[\]$ と $\text{Im}[\]$ は，それぞれ，実部と虚部を表す．

図 3.12 では，周波数 10GHz，18GHz，入射角 55 度，葉の重量含水比 80% を与え，葉の傾きを水平 0 度として 30 度まで変化させた．重量含水比は 80% は，比較的元気な葉を想定している．図 (a) と図 (b) は，それぞれ，葉厚 0.28mm と葉厚 0.10mm の場合の計算値である．これらの葉厚は，後述するソバとクローバーの葉厚の測定値である (4.5.7 節)．

2つの図を比べると、垂直偏波と水平偏波の関係が逆転していることが分かる。図 (a) では垂直偏波が水平偏波よりも大きい、図 (b) では、水平偏波が大きくなっている。水平方向に広がった葉が卓越する場合、葉の厚さによって、放射・吸収特性が異なることが分かる。

次に、イネやコムギのように、鉛直に向いた葉を取り上げる。直立している葉は、茎と同様に、入射角が大きくなるほど投影面積が大きくなる傾向にある。さらに、図 3.12 に示したように、葉厚によっても挙動が異なる。しかし、実際の植生を考えると、鉛直に立っている葉が多い植生の葉面が一定の方向に向いていることは少なく、多くのケースでは、さまざまな方位へ向いている。葉面の法線方向が入射面と同一であれば、水平偏波と垂直偏波は分離して考えることができるが、葉面が回転し法線方向が入射面が一致しない場合は偏波混合が発生する。さらに、横向きに近くなると、垂直偏波と水平偏波が逆転する。その結果、個々の葉が異方性を示している場合でも、植生層全体としては等方性媒体として振舞う可能性が高い。

また、葉面の方向がランダムである場合、茎と同様に、等方性媒体として振舞うと考えられる。

3.5 まとめ

既往の植生に関する放射伝達の研究に基づき、衛星観測に資する植生域放射伝達モデルの検討を行った。層モデルを基本とした放射・吸収モデルを援用し、 $\tau_{c,fp}$ は植生水分量の関数として、植生の幾何学的特徴を示すパラメーター b_{fp} を導入する。植生パラメーター b_{fp} と単一散乱アルベド $\omega_{c,fp}$ は、周波数・偏波を特定し、植生水分量に独立で植生の幾何学的特徴に依存する変数として扱う。また、植生パラメーター b_{fp} と単一散乱アルベド $\omega_{c,fp}$ は、形状の異なる植生タイプごとに一意に決まり、植物の成長に対して一定であるという仮説をおく。

さらに、植生の幾何学的特徴が放射・吸収特性に及ぼす影響について、植生の主な構成要素である「茎」と「葉」について考察した。表 3.2 に、結果をまとめる。入射角 55 度で測定した場合、入射角が浅いときと比べて、茎の放射・吸収が大きくなり、また、植生層は等方性媒体として振舞う。しかし、鉛直方向が卓越した植生で、茎の太さが波長に比べて細かい場合は水平偏波が小さくなる。また、茎よりも葉が卓越する植生では、葉が水平方向に広がっている場合、葉厚によって放射・吸収特性が変化する。

4 章では、これらの特性を踏まえて、対象植生を選択する。

表 3.2: 植生の放射・吸収特性に関する考察

方向性	茎	葉
鉛直方向が卓越	λ' を基準として、茎の直径が太い場合、等方性媒体として振舞う。細かい場合、水平偏波が小さくなる。	茎と同様に振舞う可能性が高い。
水平方向が卓越	等方性媒体として振舞う	葉の厚さにより、異方性が強まる。
ランダム	等方性媒体として振舞う	等方性媒体として振舞う

第4章 地上観測の設計と概要

マイクロ波放射計のプラットフォームとして、衛星や航空機などがある [2]。また、観測実験を目的としてトラック搭載型などの地上可搬型も開発されている [95, 65, 50, 52, 21, 90]。衛星搭載型は、グローバルなデータを定常的に取得できる反面、フットプリントの大きさは、数キロメートルから数十キロメートルあり、放射伝達モデルの開発には適さない。対象植生の特定が困難なうえ、現地データの取得は多大な労力を要する。航空機搭載型は、フットプリントのサイズが数百メートルから数キロメートルであり、機動性に優れていることから、放射伝達モデルの開発に有用である。しかし、フライトは天候に左右され、費用面からも、頻度の高い観測は難しい。その点、地上可搬型のシステムは、フットプリントも数メートルと小さく、対象の特定、物理特性の計測が容易であり、かつ、高頻度観測も可能である。

本章では、地上可搬型マイクロ波放射計観測システム (Ground Based Microwave Radiometer system, GBMR) (図 4.1) の製作、データ取得のための観測の設計、および、使用するデータセットについて述べる。また、検証には航空機観測データも使用しており、ここに、その概要を併記する。



図 4.1: 地上可搬型マイクロ波放射計観測システム

2003 年 10 月 19 日、東京大学大学院農学生命科学研究科附属農場にて撮影

表 4.1: AMSR 諸元

中心周波数 (GHz)	6.925	10.65	18.7	23.8	36.5	50.3	52.8	89	89
								A 系	B 系
帯域幅 (MHz)	350	100	200	400	1000	200	400	3000	
偏波	垂直および水平					垂直		垂直および水平	
3dB ビーム幅 (°)	1.8	1.2	0.65	0.75	0.35	0.25	0.25	0.15	0.15
瞬時視野 (km)	40x70	27x46	14x25	17x29	8x14	6x10	6x10	3x6	
サンプリング間隔 (km)	10x10							5x5	
温度分解能 (K)	0.34	0.7	0.7	0.6	0.7	1.8	1.6	1.2	
入射角 (度)	55							54.5	
ダイナミックレンジ (K)	2.7 - 340								
走査幅 (km)	約 1600								
積分時間 (ミリ秒)	2.5							1.2	
量子化ビット数 (bit)	12	10							
走査周期 (秒)	1.5								

(http://sharaku.eorc.jaxa.jp/AMSR/ov_amsr/sensor_j.htm より引用)

4.1 AMSR の概要

地上可搬型マイクロ波放射計の開発にあたり、まず、衛星搭載型のマイクロ波放射計について述べる。ここでは、現行のマイクロ波放射計の中で、最も高精度の AMSR を取り上げる。

1 章で述べたとおり、AMSR は環境観測衛星 ADEOS-II に搭載されたマイクロ波放射計である。AMSR は ADEOS-II の他に、米国航空宇宙局 NASA の EOS-PM1 にも搭載されている。EOS-PM1 に搭載されたセンサーは AMSR-E と呼ばれるが、ADEOS-II のリファレンスハンドブック [1] では、AMSR という用語で 2 つのセンサーを総称しており、本論文でもこれに準じる。両者は、アンテナ口径が若干異なるが、ほぼ同じ仕様を持つ。残念ながら、ADEOS-II は 2003 年 10 月 25 日 7 時 28 分頃をもって運用を停止したが、EOS-AQUA は運用中である。以下、AMSR の特徴について、ADEOS-II のリファレンスハンドブック [1] を引用する。

AMSR は、6.9GHz 帯から 89GHz 帯までの 8 周波数帯を各々垂直偏波及び水平偏波で観測する (50GHz 帯の 2 周波数帯を除く) マイクロ波放射計で、アンテナ等を機械的に回転させ走査することにより放射輝度データを取得する。ADEOS-II AMSR は口径 2m のアンテナを有し、最も波長の短い 89GHz 帯では約 5km、最も波長の長い 6.9GHz 帯でも約 60km の空間分解能のデータを取得することができる。また、地表面入射角を 55 度で一定となるようにコニカル走査を行い、1600km という広観測幅を有する。さらに、観測データを校正するために、深宇宙の輝度温度 (約 2.7K) を

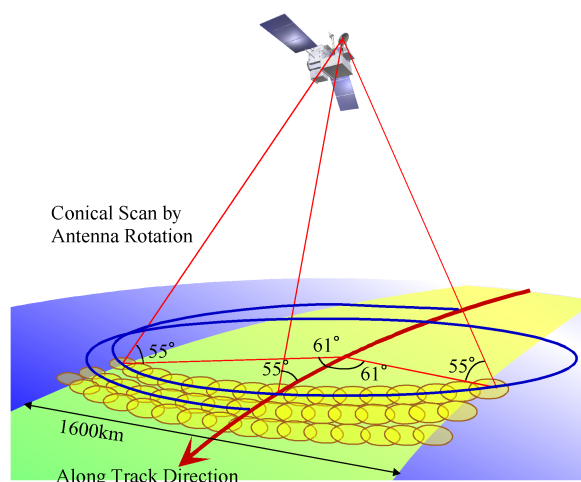


図 4.2: AMSR 観測概念図

参考：ADEOS-II リファレンスハンドブック [1]。

取得する機能および高温校正源を装備する．ここで，表 4.1 に AMSR の主要諸元を示す．また，AMSR の観測概念を図 4.2 に示す．

4.2 地上可搬型マイクロ波放射計観測システムの開発

4.2.1 設計基準

地上可搬型マイクロ波放射計観測システムに要求される仕様を，マイクロ波放射計観測に必要な性能と可搬型システムとして要求される性能の 2 つに分けて考える．

(a) マイクロ波放射計の性能

マイクロ波放射計は，物体から放射された微弱な電磁波エネルギーを計測するシステムである．ところが，マイクロ波放射計のシステム自体も電磁波を放射しており，精度の良いデータを安定して取得するためには，システムのノイズを一定に保ち，シグナルを校正するため機能を装備していなければならない．また，校正は野外でも行えることが前提となる．

マイクロ波放射計の基本性能は，表 4.1 に示した AMSR の諸元を満たすものとする．

- 周波数帯は，6.925GHz, 10.65GHz, 18.7GHz とする．
- 測定範囲は，2.7 - 340 [K] 以上とする．
- 温度分解能は，0.34K 以下とする．
- アンテナのビーム効率 90% 以上

(b) 可搬型システムの性能

- 容易にシステムを移動できること．

移動が容易であり，移動中も機材に損傷がないよう機材は固定されていなければならない．また，移動中の振動対策も必要である．

- 機密性が優れ，温度管理が可能なハウジングを装備していること．

温度管理が行なえるシステムでなければならない．野外観測では，日射や気温などの外的要因の影響を直接受ける．夏季は強い日射を受けて温度が急激に上昇し，逆に冬季は気温が零下を下回る．このような環境下で運用するためには，マイクロ波放射計を格納できるハウジングが必要となる．ハウジングは，温度管理範囲を外気温 -30 度～40 度とし，マイクロ波放射計を常温に保てることとする．また，降水や風に晒されることを考えると，ハウジングは十分な機密性が要求される．

- 電源供給システムが装備されていること．

固定点観測では商用電源の利用が可能であるが，移動観測では，電源の確保は比較的難しい．容易に観測を行なうためには，安定した電源を供給できるシステムが必要となる．

- システムの操作性・安全性

安全にオペレーションができ，操作が容易あることが重要である．誤操作がないよう，システムは簡易であることが望ましい．

表 4.2: マイクロ波放射計の仕様

周波数帯	6.925, 10.65, 18.7 GHz
測定範囲	0K ~ 350K
絶対精度	0.5K, RMS 0.3K (10 分間毎)
測定解像度	最小 0.2K
アンテナビーム幅	10 °(3dB)
ビーム効率	最小 90 %
偏波混合率	最大 3 %
サイドロープレベル	最大 -40dBi
偏波	垂直偏波, 水平偏波 (同時測定)
アンテナ制御	方位角 0 ~ 360 °, 仰角 - 90 ° ~ +90 °, (0 °:水平)
バンド幅	200MHz
積分時間	0.1, 0.2, 0.5, 1, 5, 10 秒 (選択可能)
較正方法 1	高温較正源 (常温) と低温較正源 (液体窒素, 77.4K@1000hPa) の 2 点較正 .
較正方法 2	ノイズダイオードによる内部較正
電源	AC110V/AC100V, 50/60Hz, 1.8kW(最大 3.9kW)

- 防犯上の安全の確保 .

野外観測において, 未使用時でもマイクロ波放射計を安全に保管できるよう, ハウジングは
 強固でなければならない .

4.2.2 マイクロ放射計の選定

システムの中核をなすマイクロ波放射計には, ドイツ Radiometer Physics GmbH 社製 6 channel radiometer を採用した . 本センサーは, 6GHz 帯, 10GHz 帯, 18GHz 帯の 3 つの放射計で構成され, それぞれ, 水平・垂直偏波を同時測定可能である . アンテナ部にレンズ付きフィードホーンを用いることにより, ビーム幅 10 °, サイドロープレベル-40dB を実現している . 表 4.2 に 6 channel radiometer の仕様を示す . 表 4.1 と比較して AMSR 以上の性能を有する .

また, 安定したデータ品質の確保に欠かすことのできない温度制御機能およびセンサー較正機能を有する . 温度制御機能は, 放射計自身のノイズの変動を最小限に抑えるため, 熱電素子を用いた PID 制御¹が採用されており, 温度を 308K に保つように設計されている . さらに, これら 3 つの放射計は, 断熱処理を施したセンサーケースに収められ, 低温下でもシステムが安定するよう, センサーケース内には, 出力 800W のヒーターが 2 つ装備されている .

センサー較正機能は, 低温較正源 (液体窒素) と高温較正源 (常温) による絶対較正, および, ノイズダイオードによる内部較正の 2 種類を備えている . 絶対較正は, 液体窒素で約 77K に保った低温較正源と常温の高温較正源の測定から, システムノイズと利得を決定し, さらに, ノイズダイオードの絶対較正を行う . 内部較正はノイズダイオードによって利得の補正のみを行う . 液体窒素を必要とせず 20 秒ほどで完了するため, 測定毎に実施することができる . ノイズダイオードには, マックスプランク研究所 100m 電波望遠鏡にも使われている安定性に優れたダイオード [39] を採用しており, 安定した温度下でマイクロ波放射計が管理されていれば, 絶対較正は 1 週間に 1

¹ Proportional-Integral-Derivative control: PID 制御は, 現在値と設定値の偏差に比例した出力を出す比例動作 (Proportional Action : P 動作), その偏差の積分に比例する出力を出す (Integral Action : I 動作), 偏差の微分に比例した出力を出す微分動作 (Derivative Action : D 動作) の和を出力し, 目標値に向かって制御することを言う .

度程度で良い．また，液体窒素は比較的容易に入手可能であり，運搬も簡単であることから，野外でもセンサーの絶対較正が実施可能である．2つの較正機能を併用することで，一定のデータ品質を確保することができる．

センサーケースは，姿勢を制御するためのポジショナーに取り付けられており，全方向での測定が可能である．放射計およびポジショナーの操作はRS232C および RS422 経由でパソコンから制御できる．

4.2.3 可搬型観測システムの製作

マイクロ波放射計のプラットフォームとして，昇降機付きコンテナを作成した．マイクロ波放射計は，昇降機へ固定し，図 4.1 のように，コンテナ天井部の観音式扉から室外に出ることが可能である．昇降機は，コンテナ底面から 3.8m の高さまで可動し，ポジショナーの高さを含めると，マイクロ波放射計は最大 4.5m まで上昇する．観測後は，コンテナ内部へ格納することができる．地表面から 4.5m の高さから入射角 55 度にて測定を行なった場合，フットプリントのサイズは，およそ，アジマス方向 1.6m，レンジ方向 3m になる．天井部の観音式扉は，バッテリー駆動になっており電源を必要としない．また，手動でも開閉可能である．

コンテナは，移動観測および固定観測の両方に対応している．通常の海上コンテナとしての扱いができるよう，20 フィート ISO 国際海上規格認定（認識番号；GBMR112594-4）を取得した．これにより，国内外を問わず，陸上・海上輸送が容易に行なえる．陸上輸送では，海上コンテナ専用のトレーラーがあるが，10 トン低床型トラックであれば積載可能である．そのため，輸送時にはエアサスペンション式などの振動対策の施されたトラックも選択できる．全ての機材は床および壁面へ固定してある．さらに，他の観測機材の固定できるよう，床面には固定用フックを多

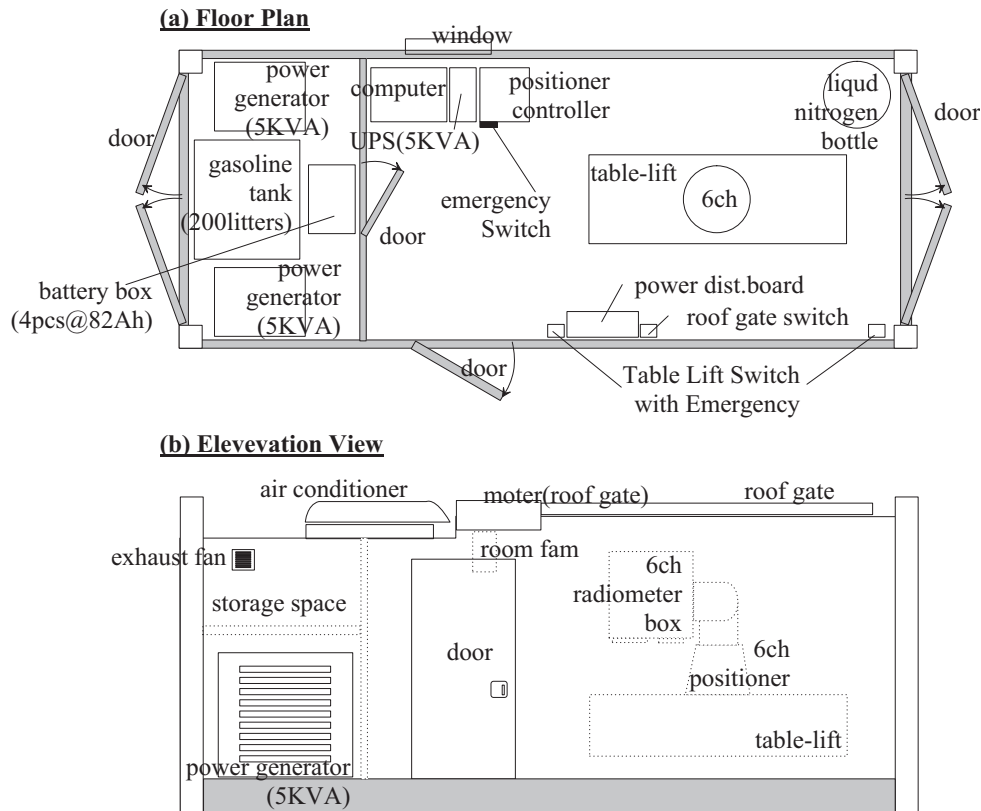


図 4.3: 地上可搬型マイクロ波放射計観測システム概要

表 4.3: AMR 諸元

項目	性能					
観測チャンネル数	12 チャンネル					
観測中心周波数 (GHz)	6.925	10.65	18.7	23.8	36.5	89.0
観測帯域幅 (MHz)	350	100	200	400	1000	3000
積分時間 (sec)	1.33					
温度分解能 (K)	0.1 以下	0.2 以下	0.1 以下			
偏波	垂直/水平					
ビーム幅 (deg)	10.8/12.3	9.0/10.0	6.6/7.9	5.5/6.3	6.3/7.2	6.0/6.9
主ビーム効率	90%以下					
交差偏波発生率	3%以下					
サンプリング周期 (sec)	3.2					
ダイナミックレンジ	30K ~ 340K					
絶対精度	1K 以下					

数取り付けてある。

一般に、海上コンテナの構造は、海上輸送にも耐えうるよう強固であり、固定観測時の防犯にも役立つ。また、製作時に防水試験を行い、機密性が確保されていることを確認した。さらに、コンテナ壁面は断熱材を入れた二重壁を採用し、冷暖房兼用エアコンおよび大型ヒーターを装備した。これにより、外気温が変化してもマイクロ波放射計の一定の温度下に保つことができる。

電源は、外部電源を使用できるほか、5KVA の発電機 2 機を搭載した。固定点観測では、商用電源を使うことにより安定した電源を確保でき、移動観測でも発電機を使うことにより電源を確保できる。さらに、電源の不安定性によるマイクロ波放射計への負担を軽減するため、インバータ方式の無停電電源装置を装備した。また、発電機用に 200 リットルのガソリンタンクを装備しており、無補給で 3 日間程度運用可能である。

図 4.3 にコンテナの概要図を示す。操作系統は、天井扉および昇降機などの動力系統の操作と、マイクロ波放射計の操作の 2 つに分けて配置した。誤操作を防止するべく、完全にマイクロ波放射計を室外にセットしてから、マイクロ波放射計の操作へ取り掛かるものとする。動力系統の操作は、天井扉と昇降機のスイッチが連動しており、天井扉が完全に開かないうちは、昇降機は動作しないようになっている。また、コンピューター正面に窓を設け、観測中の主要 3 方向が見渡せるようになっている。マイクロ波放射計操作中の事故防止のため、緊急停止ボタンをコンピューター直ぐ脇に設置した。

4.3 航空機搭載型マイクロ波放射計の概要

航空機搭載型マイクロ波放射計 (Advanced Microwave Radiometer, AMR) は、環境観測技術衛星 ADEOS-II 搭載、高性能マイクロ波走査型放射計 (Advanced Microwave Scanning Radiometer, AMSR) 準備プログラムとして、宇宙開発事業団 (現在：宇宙航空研究開発機構) が開発した航空機 (ビーチクラフト B200 スーパーキングエア JA8705) をプラットフォームとするセンサーである。AMR は AMSR と同一周波数・偏波のセンサーを有し、AMSR 地上検証およびアルゴリズム開発のためのデータ取得を目的としている。表 4.3 に AMR の諸元を示す。アンテナは偏波共用 (89GHz を除く) の円錐ホーン形式で、機外へ先端を突き出している。受信機は観測データの較正用として高温

較正源と液体窒素冷却の低温較正源を有するディック型²[16]である．垂直偏波と水平偏波を交互に測定を行い，それぞれの観測毎に較正データを取得する．

4.4 対象植生

植生パラメーター $b_{c,fp}$ と光学的厚さ $\omega_{c,fp}$ の解析は，ソバとクローバーを対象とした．また，検証用データとして，イネ，トウモロコシ，ダイズのデータを取得した．以下に，それぞれの特徴を述べる

4.4.1 ソバ

ソバ (学名 *Fagopyrum esculentum* Moench, buckwheat) は，ダテ科の 1 年草の植物である．発芽と生育が極めて早く，播種から収穫まで 60～80 日程度である．播種後，24 日目頃から開花期に入り，35 日前後で開花盛期となる．52 日目頃で開花が終わり，69 日目前後で成熟期に至る．

発芽から開花盛期にかけて茎が成長し，葉の枚数も増えていく．主茎は，直径 5mm 程度で，鉛直方向へ伸び，高さ 60cm～150cm 程度になる．葉は数 cm～10cm 程度で，主として水平方向へ広がりを持つ．開花盛期を過ぎると茎と葉の成長は止まり，結実が始まる．花は未熟粒から成熟粒へと変わっていく．収穫期になると，実は乾燥するとともに，葉は枯れ落ちる．しかしながら，茎は一定の水分量を保持している．このような各生育相を追って観測を行なうことで，葉が茂っている状態から，葉がなく茎伸びの状態まで，同一の植生からデータを取得することができる．

栽培上，春播夏取りの夏ソバと，夏播秋取りの秋ソバに 2 分される．夏ソバは，秋ソバに比べて開花・結実時期のばらつきが大きく，収量・品質ともやや劣る．秋ソバは，開花・結実時期は比較的一律で，播種が遅くなると収量が減る傾向にある．マイクロ波放射伝達モデルの開発において対象とする植生は，均一な方が好ましい．そこで，秋ソバを採用した．さらに，葉と茎が主要素となるよう，播種は 9 月末に行い，実が多くなりすぎないようにした．



図 4.4: イネ (2003 年 10 月 21 日撮影 東京大学附属農場にて)

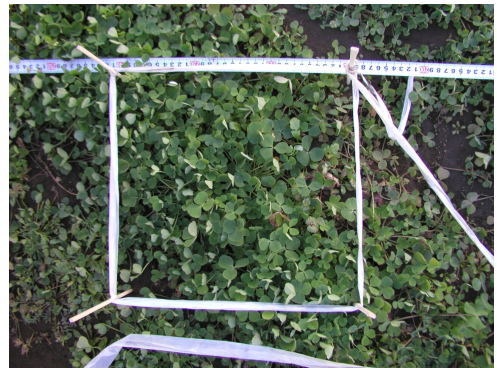


図 4.5: クローバー (2003 年 12 月 8 日撮影 東京大学附属農場にて)

4.4.2 クローバー

クローバーは，マメ科の多年草の植物であるムラサキツメクサ (学名 ; *Trifolium pratense*) やシロツメクサ (学名 ; *Trifolium repens*) の通称である．シロツメクサが地を這うように茎が成長するのに対し，ムラサキツメクサは，1 つの株から斜めに立ち上がり放射上に成長する特徴を持つ．通常，

²検波回路部の前に入力切替スイッチを設け，アンテナからの入力シグナルと比較較正源からのシグナルを交互に切り替える方式

8～10月に播種すると、翌年の5月～8月に開花する。冬季は、ほとんど成長しない。

ここでは、ソバ畑内に自生したクリムゾンクローバ(学名; *Trifolium incarnatum* L.)を対象とした。クリムゾンクローバは、ムラサキツメクサのように、1つの株から茎が放射状に立ち上がる特徴がある。ソバを刈り取った後のフットプリントで観測を行った。生育初期であったため、比較的円形に近い葉を持ち、大きな葉で直径2cm程度である。茎は直径2mm程度、草丈は10cm～15cm程度であった。株がまだ小さかったために、茎は主に鉛直方向へ伸びていた。以後、クリムゾンクローバのことを、単に、クローバーと呼ぶ。

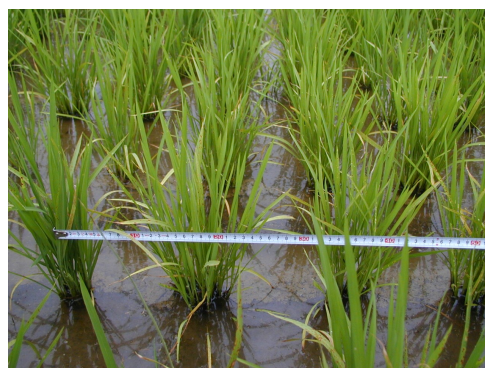


図 4.6: イネ (2000 年 6 月 17 日 撮影 中之島末宝水田にて)

4.4.3 イネ

イネ(学名: *Oryza sativa*, rice) は、品種や地域により作付け時期や生育状況が異なる。観測を行なった地域では、通常 2.5 葉期～4 葉期の苗を使用して、田植えを5月初旬に行なっている。

イネの茎(稈)は節と節間から構成される。種もみから生える茎を主茎(主稈)といい、田植え後、イネはこの主茎を中心にして根元から茎を増やして大きくなっていく(1次分げつ)。葉は平らな部分(葉身)と、さやのようになった部分(葉鞘)からできている。1つの茎は3枚の葉しか持たず、4枚目の葉が出ると、上から4枚目の葉は新しい茎の葉となる(2次分げつ)。6月中旬になると分げつ数は15～20に達し、それまで分げつを増やし株を大きくしてきたイネは、分げつをやめて節を伸ばし始め(茎が伸びる)、穂作りの準備に入る。この時期に、水田の水を落とし(中干し)、ムダな分げつの発生を抑えるとともに根に酸素を送りこむ工程を行なう。イネは最後の葉を作り終え、出穂5週間くらい前になると幼穂を形成する。

イネの観測は、田植え直後から幼穂形成期にかけて合計4回実施した。



図 4.7: ダイズ (2002 年 7 月 7 日 M.Pathmathevan 氏撮影 AMES にて)

4.4.4 ダイズ

ダイズ(学名: *Glycine max* Merrill, soybean) は、マメ科の1年草本で、4～5ヶ月で成長し結実する。主茎は直立おり、節間が伸びることによって成長して30cm～90cmほどになる。5枚目以降の本葉がでると4枚下の本葉から側枝ができ、横方向へも広がりながら成長する。葉は、ソバよりも一回り大きく、茎もやや太めである。観測は、開花期前の生育初期のダイズを対象に行なった。



図 4.8: トウモロコシ (2002 年 7 月 7 日 M.Pathmathevan 氏撮影 AMES にて)

4.4.5 トウモロコシ

トウモロコシ (学名: *Zea mays* L., corn) はイネ科大型の 1 年草本である。イネと同様に、茎 (稈) は節と節間からなり鉛直に立っており、葉は葉身と葉鞘から構成される。イネとの違いは分げつ数が極端に少なく、品種にもよって異なるが 0~2 本程度である。茎の径は 2cm~3cm 程度、高さ 2m 程度まで成長する。観測は、開花期前の生育初期のダイズを対象にして行った。

4.5 ソバ・クローバー観測

東京都西東京市に位置する東京大学農学生命科学研究科付属農場 (通称: 耕地生産教育研究センター) において、2003 年 10 月~12 月、地上可搬型マイクロ波放射計観測システム (GBMR) によるソバとクローバーの植生観測を実施した。GBMR を圃場の一角に設置し、植生の成長プロセスを追ってマイクロ波放射計および地表面詳細観測を行った。図 4.9 に観測サイトの概要を示す。

ソバは、列間隔約 20cm で東西方向に播種を行った。播種はトラクターを用いて 9 月 17 日に行い、9 月 24 日に出芽を確認している。開花は 10 月 15 日前後に始まり、10 月 30 日前後に開花盛期となった。11 月 20 日ごろに成熟期に入り 12 月 2 日ごろから収穫期となった。クローバーは、ソバ出芽後から 1 週間ほど遅れてが出芽した。

マイクロ波放射計は、コンテナの影により温度・土壌・植生水分に不均一性が生じないように対象エリアの北端に設置した。ソバ畑内には、植生温度測定システム (Vegetation Temperature Measuring System, VTEMP) を 1 箇所、土壌水分地温測定システム (Soil Moisture and Temperature Measuring System, SMTMS) を 3 箇所設置し、植生温度 (1 分間隔)、地温・土壌水分 (10 分間隔) の連続観測を行なっている。また、自動気象観測装置 (Auto Weather Station) により、気温、湿度、下向き短波放射、下向き長波放射、降水量を 10 分間隔で測定を行った。

測定対象とするフットプリントは、az150, az180, az187, az195, az210, az225 の 6 方位設定し、それぞれ、フットプリントの名称を方位角で呼ぶこととする。

4.5.1 オペレーションタイプ

次の 3 つのオペレーションを基本として、ソバの開花始めから収穫期まで、成長段階を追って観測を実施した。

集中観測

1 つのフットプリントを対象として、植生全数サンプルを実施する。サンプル前後にマイクロ波放射計観測を実施する。ソバに関しては、全数サンプルを葉、実、茎の構成要素毎に行う。

日変化観測

日中、1 時間~2 時間毎にマイクロ波放射計観測を実施する。測定毎に、植生重量含水比および土壌水分の計測を行なう。植生重量含水比の測定は、1 株ないし 3 株のサンプル採取による。

通常観測

集中観測と日変化観測を補間するため、マイクロ波放射計観測および、植生重量含水比および土壌水分の簡易計測を行なう。植生重量含水比の測定は、1 株ないし 3 株のサンプル採取、もしくは、1 列 50cm のサンプルによる。

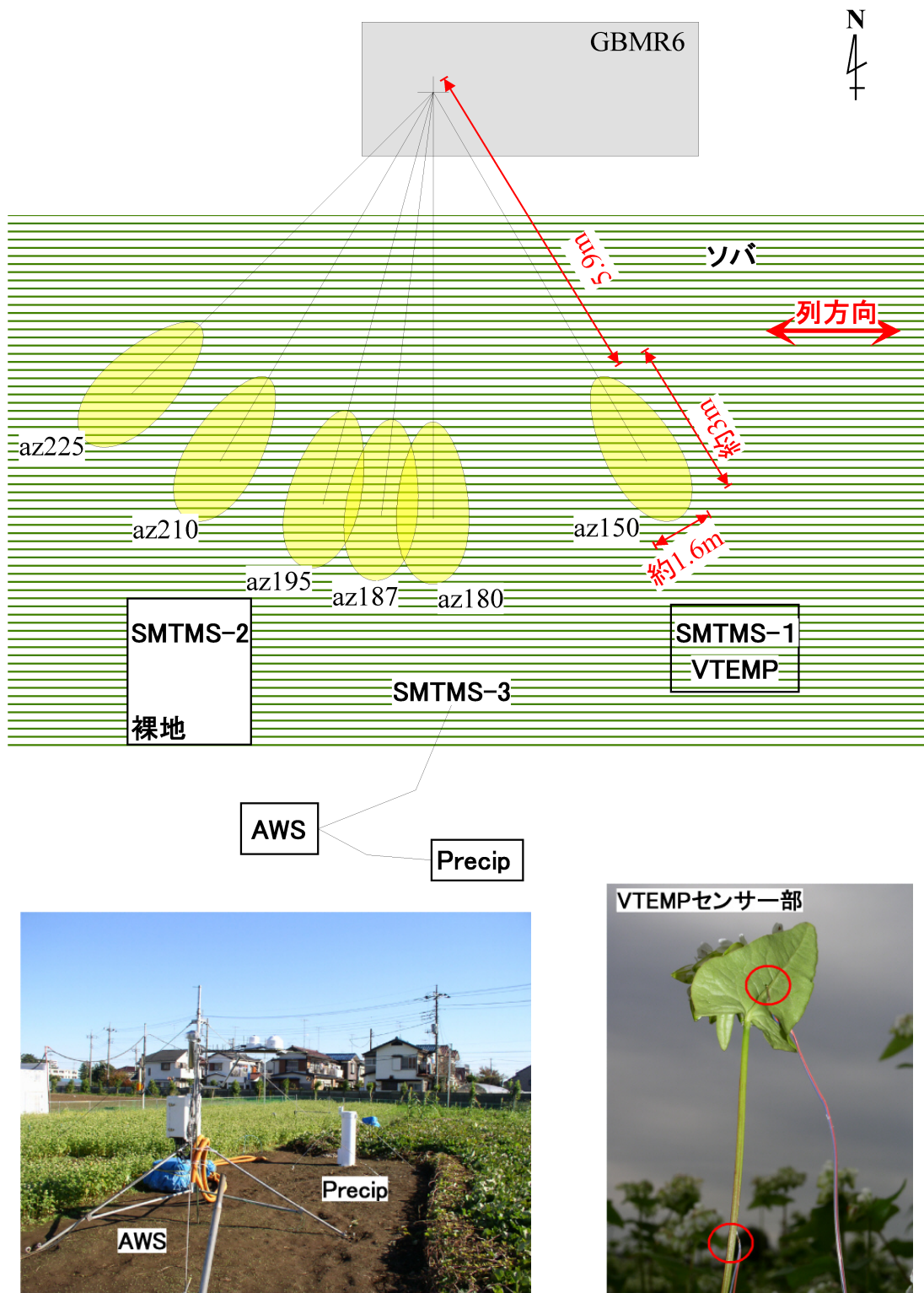


図 4.9: ソバ・クローバー観測配置図
GBMR-6；地上可搬型マイクロ波放射計観測システム，SMTMS；土壤水分地温測定システム，VTEMP；植生温度観測システム，AWS；自動気象観測システム，Precip；重量式雨量計

4.5.2 各フットプリントの状況

表 4.4 に、測定一覧を示す．az225, az210, az195 においてソバの集中観測を実施した．クローバーの観測は、これらの集中観測後のフットプリントにおいて実施した．az187, az180, az150 のフットプリントは、期間を通じて、ソバを自然状態に保ったままである．以下に、各フットプリントの状況をまとめる．

(a) az225

az225 では、10 月 30 日に集中観測を実施して、ソバの刈り取りを行った．これ以降、11 月 12 日まで、az225 は観測対象としておらず、全体的に踏み固められて平らになっている．クローバーは、ソバ刈り取り時に踏み慣らされ、その後、復活もしくは再発芽したものである．直接、寒風にさらされていたため、他のフットプリントに比べて背丈が低く、小さい葉が多い．クローバーの集中観測は、12 月 10 日に実施した．

(b) az210

az210 では、11 月 12 日にソバ集中観測を実施した．集中観測の前日に、クローバーを刈り取り、ソバの列間を平らに締め固めている．3.5kg の大型ハンマーを使用して、高さ約 30cm から自然落下させて締め固めた．ソバの集中乾燥終了後、フットプリントはそのままの状態に保存した．地表面の状態は、締め固めを行なったソバの列と列の間は比較的平らになっているが、ソバを刈り取った列は、5cm 程度の畝が残っている．クローバーは数日後に生えてきたが、az225 同様に寒風にさらされていたため、成長速度が非常に遅く、疎らである．クローバーの集中観測は、12 月 10 日に実施した．

表 4.4: ソバ・クローバー観測におけるオペレーションタイプと対象植生

ソバ生育相	観測日	タイプ	az150	az180	az187	az195	az210	az225
開花初め	2003/10/15	通常	×	c,b	c,b	×	×	×
	2003/10/21	通常	×	c,b	c,b	×	×	×
	2003/10/27	通常	c,b	c,b	c,b	c,b	c,b	×
	2003/10/30	集中	c,b	c,b	c,b	c,b	c,b	c,[b]
開花盛期	2003/11/04	通常	c,b	c,b	c,b	c,b	c,b	×
	2003/11/06	通常	c,b	c,b	c,b	c,b	c,b	×
	2003/11/07	日変化	欠損	欠損	欠損	欠損	欠損	欠損
	2003/11/12	集中	b	c,b	c,b	c,b	[b]	×
開花終わり	2003/11/14	日変化	c, b	c,b	c,b	c,b	c	c
	2003/11/21	集中	c, b	c,b	c,b	c,[b]	c	c
成熟期 収穫期	2003/11/26	集中	c, b	c,b	c,b	c,[b]	c	c
	2003/12/08	集中	c, b	c,b	c,[b]	c	c	c
	2003/12/09	集中	[c],b	c,b	×	[c]	c	c
	2003/12/10	集中	b	c,b	×		[c]	[c]
	2003/12/12	通常	b	c,b	×			

c と b は、それぞれクローバー観測とソバ観測を意味する．[] は集中観測の対象フットプリントを表す．× は測定対象外．11 月 7 日はマイクロ波放射計用 PC 不具合のためデータ欠損．

(c) az195

az195 では、11 月 21 日と 26 日の 2 日間にわたりソバ集中観測を実施した。11 月 21 日に全ての実と半分の葉（一列おき）、11 月 26 日に残りの葉と全ての茎をサンプルした。ソバの植生重量含水比の測定果から、両日とも、茎、葉の水分量は日変化の範囲に収まっていることを確認している。ソバのサンプルにあたっては、クローバーを傷めないように、細心の注意を払いながらソバをカットした。クローバーは、ソバの播種時から自然な状態を保っており、また、ソバに保護されていたため、比較的生育状態が良好である。az225 と az210 に比べて、背丈が高く、若干大きめ葉が多い。クローバーの集中観測は、12 月 9 日に実施した。また、土壌面は、一切手を入れておらず、播種時の状態のままである。東西方向に伸びる約 20cm 間隔のソバの畝がそのまま残っており、土壌は柔らかく、最も粗度が粗い。

(d) az180

az180 は、播種以降、ソバとクローバーともに自然状態を保っている。土壌の状態も播種時の状態を保持しており、az195 同様に、土壌が柔らかく、20cm 間隔のソバの畝が残っている。ソバとクローバーの全数サンプルを実施していないが、az195 と状態がほぼ同じであり、フットプリントの位置も比較的近いことから、az195 の結果を代表値とする。

(e) az187

az187 は、11 月 21 日まで、az180 と同じ状態を保っている。このフットプリントは、方位角 190 度～192 度が隣の az195 と重なるため、az195 の集中観測実施以降のソバの観測データは無効である。また、12 月 8 日にソバの集中観測を実施しているが、方位角 187 度～190 度を対象として行なった部分的範囲を対象とした集中観測である。

(f) az150

az150 のソバは、az180 と同様に、一切手を加えておらず、自然状態のままである。しかし、クローバーは、11 月 12 日と 12 月 9 日の 2 回クローバーの刈り取りを行なっている。11 月 12 日は、az210 と同じく、クローバーの刈り取りとともに、列間の締め固めを行った。このとき、クローバーの水分量の計測は実施していないが、12 月 9 日は、全数サンプルの計測を行なっている。

表 4.5: クローバー観測の対象フットプリントの特性

	az195	az210	az225
クローバーの生育状況	比較的均一	疎ら	裸地との混在
草丈	10～15cm	10cm 程度	10cm 程度
植生水分量 [kg/m^2] (測定日)	0.342 (12 月 9 日)	0.054 (12 月 10 日)	0.374 (12 月 10 日)
土壌乾燥密度 [g/cm^3]	0.809	0.830	0.881
地表面状態	20cm 程度の畝・表面は粗い	5cm 程度の畝・畝の間は平ら	比較的平ら

4.5.3 ソバ観測とクローバー観測

ソバ集中観測実施後のフットプリントを、特にクローバー観測して区別する．完全なソバ集中観測は、az225、az210、az195 の 3 つのフットプリントで行っている．それぞれ、クローバー観測の対象フットプリントとして設定した期間は、az225 と az210 が 11 月 14 日以降、az195 が 12 月 8 日以降である．前述のように、これらのフットプリントは、異なる特徴をもつ．表 4.5 にクローバー観測の各フットプリントの特性を整理する．

一方、ソバ観測のフットプリントは、az195 と同じ地表面状態である．ただし、az150 に関しては、az210 と対象性を保つようにした．

4.5.4 マイクロ波放射計観測および地表面情報の取得

マイクロ波放射計観測およびそれに同期して行なうフットプリントの観測について述べる．特に温度の測定は、気象条件による変化が激しいことから、優先して観測を行った．

(a) マイクロ波輝度温度

10GHz と 18GHz において、輝度温度データを取得した．マイクロ波放射計の計測は、全てのフットプリントを自動で走査するように設定した．測定開始から終了まで、10 分ほど要する．この間、走査範囲に入らないよう注意しながら、土壌・植生観測を行った．

1 つフットプリントの測定において、積分時間 0.2 秒、計測時間 10 秒間、合計サンプル数 50 回行い、その平均の輝度温度を観測値とした．入射角は 55 度とし、地表面放射のほか、同一方位角において大気下向き放射を測定した．また、安定した精度を確保するため、毎朝、観測開始前にセンサーの絶対較正を実施し、測定毎に内部較正を実施した．さらに、測定終了後、高温較正源の測定を行い、データ品質を確認した．

18GHz 垂直偏波については、やや不安定な傾向が見られたため、観測終了後の高温較正源の測定値と大気下向き放射観測データによって観測値を補正した．大気下向き放射は、偏波によらず等しいと仮定して 18GHz 水平偏波の測定値を使用した．

(b) 土壌表面温度・植生温度

赤外放射温度計による温度測定を実施した．フットプリント内の温度不均一性を把握するため、各フットプリント内で、10～30 地点のデータを取得した．赤外放射温度計で計測したデータは、植生と土壌、それぞれの放射率によって補正を行った．放射率は、後述の植生温度計測システムと比較観測結果から植生の放射率を 0.979、土壌の放射率を 0.982 とした．

(c) 土壌水分

地表面の土壌水分は、炉乾法、もしくは、TDR 法 (Time Domain Reflectometry, 時間領域誘電率反射法) によって、マイクロ波放射計の計測毎に計測した．炉乾法を基準とするが、炉乾法の測定を行っていない場合は、TDR 法の測定値を用いた．TDR 法の測定値は、炉乾法の測定を用いて較正した．

炉乾法は、採土した直後の湿潤重量と炉で乾燥させた後の重量から、土壌水分を求める手法である．土壌水分の測定値として、最も信頼性が高い．定容量のサンプル缶を使用すれば、土壌の密度も求めることができる．観測では、容量 50cc(高さ 2.5cm) のサンプル缶を基本として、容量

表 4.6: SMTMS センサー埋設深度

	TYPE	埋設深度 [cm]
SMTMS-1	TDR	1.5, 4, 10, 20, 40, 60
	Pt100	0, 0.5, 1.5, 2.5, 4, 7, 10, 20, 40, 60
SMTMS-2	TDR	1.5, 4, 10, 20, 40, 60
	Pt100	0, 0.5, 1.5, 2.5, 4, 7, 10, 20, 40, 60
SMTMS-3	TDR	4, 20, 60, 100, 160, 250
	Pt100	4, 10, 20, 40, 60, 100, 130, 160, 200, 250

TDR: TDR 土壌水分計, Pt100: 白金温度センサー

25cc(高さ 1cm) と容量 100cc(高さ 5cm) のサンプル缶も使用した。フットプリント脇で採土を行い、湿潤重量を計測後、24 時間乾燥させ、乾燥重量を計測した。

TDR 法は、センサーの一定周波数の電磁波 (30MHz ~ 3GHz: 任意周波数) が土壌中の電極を往復する速さを時間領域で測定し、その速さから誘電率を求める方法である。Topp *et al* (1980) [81] によって、土中の伝達速度と誘電率との関係が定式化され、誘電率と土壌体積含水率との関係を記述する 3 次の経験式が提案されている。誘電率を計測する TDR プロブは、ロッドが平行 2 線もしくは 3 線式が多く、1 本モールド式 [32] やコイル式 [56] もある。ここでは、平行 2 線式のプロブを有するドイツ IMKO 社の携帯型土壌水分計 TRIME-FM(プロブ長 8cm, 直径 3cm) を使用した。各フットプリント脇の土壌表面へ埋設し、マイクロ波観測時に土壌水分を記録した。

(d) 植生重量含水比

炉乾法により、植生の重量含水比の計測を行った。1 列 50cm を基本として、観測人員やオペレーション時間に応じて 3 株もしくは 1 株のサンプルによって、茎、葉、実などの構成要素毎に湿潤重量および乾燥重量の測定を行った。植生の乾燥重量は、80 度に保った乾燥炉で 3 日間乾燥させた後の重量とした。重量は、精度 0.1mg の電子天秤にて計測した。なお、湿潤重量測定後に、茎の径や葉面積などの計測も行なっている。4.5.7 節で述べる。

4.5.5 自動観測項目

フィールド内に設置した自動観測測器について述べる。観測期間と通じて、植生、土壌および気象データを連続的に取得した。

(a) 植生温度および土壌表面温度

植生温度は、日射条件の変化により大きく変動する。そこで、熱伝対による植生温度測定システムを作成し、1 分毎に植生温度の記録を取った。熱電対は測温接点と基準接点との温度差で熱起電力が決定する。本システムは、地表面 10cm の高さに設置した通風筒内に取り付けた白金温度センサー感部に基準接点を設けて零接点補償を行った。熱伝対には素線径 0.127mm のテフロン被覆の T 熱電対を使用しており、葉・茎に直接差し込むことができる。これを、土壌表面へ設置すれば、地表面温度の測定にも利用可能である。

(b) 土壌水分・地温プロファイル

土壌が乾燥してくると、土壌表面からの放射には土壌内部の影響が強くなる．そこで、土壌水分地温計測システム (Soil Moisture and Temperature Measuring System, SMTMS) を作製し、土壌水分・地温プロファイルの計測を行った．計測間隔は 10 分とした．SMTMS は、平行 2 線式 TDR プローブ 6 本 (ドイツ IMKO 社, TRIME-IT, プローブ長 8cm, 径 3cm), 白金温度センサー 10 本, データロガーで構成したバッテリー駆動式の土壌水分プロファイルと地温プロファイルの計測装置である．ソバ・クローバー観測では、フィールド内に 3 セット設置した．各センサーの深度を表 4.6 に示す．SMTMS-1 と SMTMS-2 は、それぞれ、植生域と裸地域の土壌プロファイルの取得を目的として、ソバ生育エリアと、フィールド内に作成した裸地エリアに設置した．SMTMS-3 は、深層のプロファイルを目的としてソバ生育エリアに設置した．

(c) 気象観測

ソバ畑の南端に、自動気象観測装置 (Automatic Weather Station, AWS) を設置した．観測項目は、以下の通りである．測定間隔は 10 分とした．

- 気温・湿度：通風式気温・湿度計を地表高 1.5m に設置．センサーは VAISALA HMP45D を使用．
- 降水量：重量式雨量計 (ETI NOAH-II) を使用．
- 風向・風速：地表 3m に設置．Young Model 05103 を使用．設置高 3m．
- 下向き短波放射：EKO MS202F を使用
- 下向き長波放射：EKO MS802F を使用

4.5.6 植生水分量の算定

植生の総水分量は、生育にともなって植生体が大きくなることによって増加する．また、周囲の環境の変化や生育相に応じて、植生体の含水比が変化することによっても変動する．例えば、図 4.10 は、11 月 14 日に測定したソバの重量含水比の変化である．茎、葉、実ともに、重量含水比で 10% 前後の変動している．植生体内の水分は、根からの吸収量と葉からの蒸散量のバランスによって決まるため、日射、気温、風速などの気象条件や土壌水分の変化に応じて、植生体内の水分量が変わる．そこで、乾燥重量と植生重量含水比の測定値を用いて植生水分量の算定を行った．乾燥重量には、集中観測で実施した全数サンプルによる測定値を用いた．また、植生重量含水比は、観測毎に行なった植生サンプルの測定値を用いた．

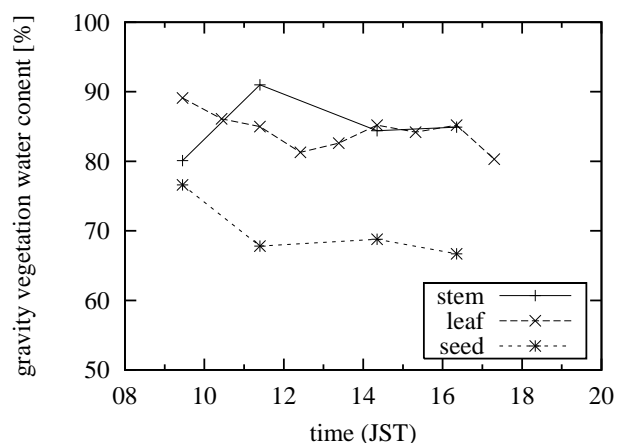


図 4.10: ソバの植生重量含水比の日変化
測定日: 2003 年 11 月 14 日 (快晴)．stem: 茎, leaf: 葉, seed: 未熟粒および花．

重量含水比 M_g と植生水分量 W_{water} は，その定義より，次式のような関係がある．

$$W_{water} = \frac{M_g}{1 - M_g} W_{dry} \quad (4.1)$$

ここで、 W_{dry} は植生乾燥重量である．植生乾燥重量と重量含水比から，植生水分量を算定することができる．

集中観測日以外の観測日の乾燥重量は、日数によって線形補間して求めるか、もしくは、成長が止まっている場合には全数サンプル時から変化しないとした。基本的に、開花盛期前の茎や葉、成熟期の実のように成長過程にある要素は線形補間を行い、成熟期の茎や葉などのように既に成長が止まった要素については一定とした。

(a) 全数サンプルによる湿潤重量および乾燥重量の測定

図 4.11 に、フットプリントと集中観測の対象範囲を示す。フットプリントは、ビーム幅(3dB)で定義される領域とした。図 4.11 において楕円で示した領域である。10GHz と 18GHz とでは、アンテナの位置が異なるためフットプリントも数十 cm ずれている。

ソバの集中観測の対象範囲は、レンジ方向の両端から、それぞれ 50cm の余裕をとって設定した。ソバの植生高さは 40cm ~ 60cm ほどになるため、フットプリントの手前にあるソバがアンテナの視野に入る。一方、フットプリントの先端は角度が浅くなるため境界が手前よりもやや曖昧になることと、ソバの列がフットプリントに対し斜めになる場合を考慮した。

クローバーの場合は、ソバとは異なる。ソバのサンプル範囲を3等分した中心部のエリアBを、クローバーのサンプル範囲とした。クローバーは、植生高さが低いことと、列にはなっておらず、植生被覆状態が不均一であることから、正確なデータを取得するためには、サンプル範囲をフットプリントに合わせるべきであるが、10GHzと18GHzのフットプリントが同一ではないため、作業が煩雑になることと、アンテナは中心部で感度が高く、端に行くほど感度は鈍くなることから、両フットプリントに共通する中央部のみを対象とした。

集中観測では、対象エリア内のソバもしくはクローバーの総湿潤重量と総乾燥重量の測定を行った。また、1列30cm間隔ごとに1株のサンプルをとり、茎、葉、実、それぞれの重量、サイズを個別に計測した。

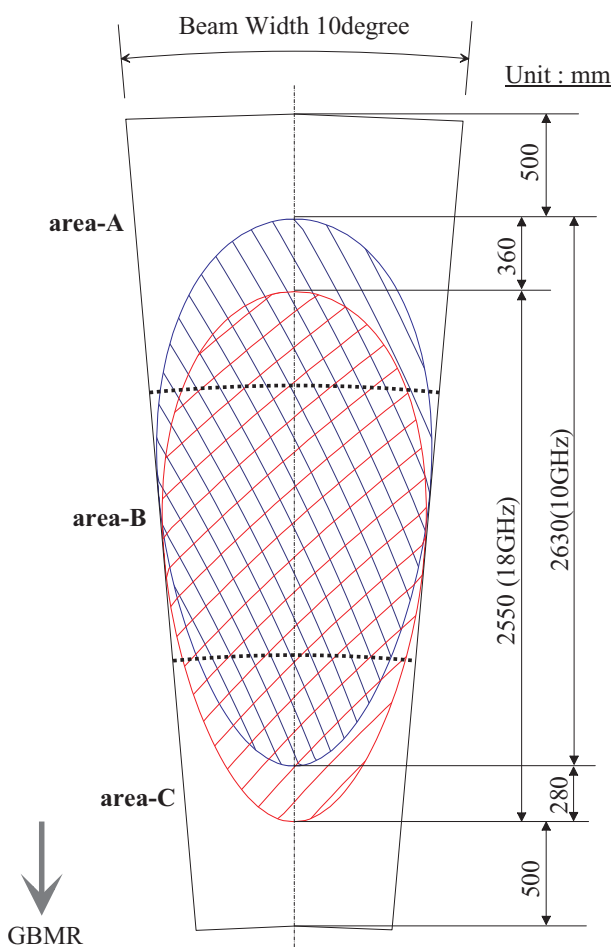


図 4.11: GBMR のフットプリントと植生サンプル
対象範囲

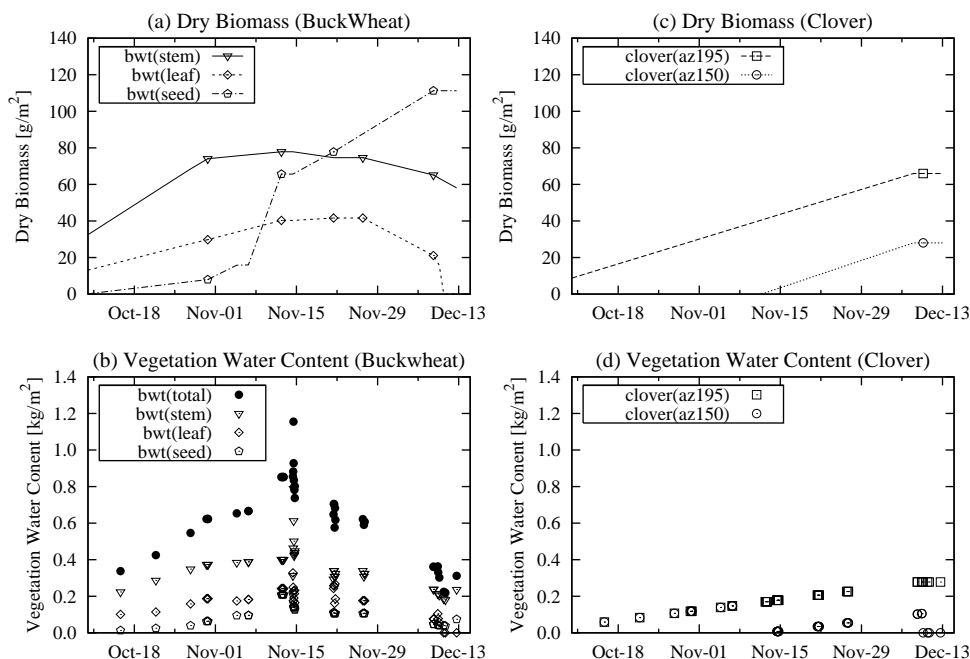


図 4.12: 植生乾燥重量および植生水分量の変化 (ソバ観測)

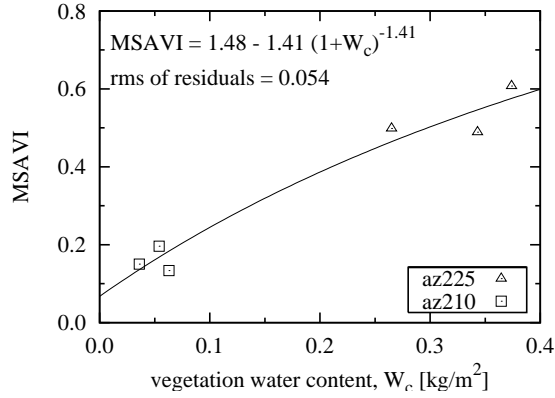
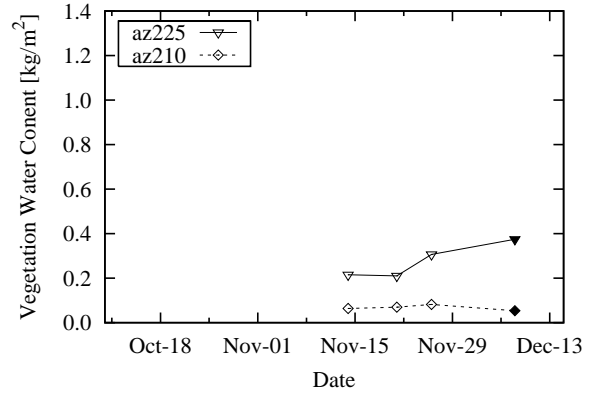
(a) ソバの乾燥重量: それぞれ, bwt(stem) は茎, bwt(leaf) は葉, bwt(seed) は花・未熟粒・整粒. プロットは, 全数サンプルによる測定値を示す. (b) ソバの植生水分量: bwt(total) は, bwt(stem)・bwt(leaf)・bwt(seed) の合計である. (c) クローバーの乾燥重量: clover(az195) と clover(az150) は, それぞれ, az195, az150 のクローバー植生水分量. (d) クローバーの植生水分量:

(b) 植生の乾燥重量と水分量の時系列変化の推定 (ソバ観測)

図 4.12(a)(b) に, ソバの乾燥重量および植生水分量の変化を示す. 10 月 30 日の 1 回目の集中観測以前の乾燥重量は, 出芽日 9 月 24 日を茎と葉のゼロ点, 開花始め 10 月 15 日を花のゼロ点として線形補間を行なって算定した. 11 月 4 日と 6 日の乾燥重量は, 10 月 30 日と 11 月 12 日の線形補間の結果を用いた. この期間の花の乾燥重量に関しては, 11 月 10 日以降になって急激に未熟粒が増加しているため, 11 月 7 日に実施した日変化観測の結果から算定した茎に対する花を含む未熟粒の乾燥重量比を用いて, 茎の乾燥重量から算定した. 12 月の乾燥重量の算定は, 12 月 8 日に行なった全数サンプルデータを基本とした. 急激な冷え込みによって 12 月 10 日に全ての葉が枯れ落ちているため, 12 月 10 日の乾燥重量は, 葉の乾燥重量をゼロとし, さらに, 葉とともに葉柄も枯れ落ちていることから, 茎の乾燥重量から葉柄の乾燥重量を減じて算定した. 葉柄の乾燥重量は, 11 月 21 日計測した茎に対する葉柄の乾燥重量の割合 10.7%を用いて算定した.

図 4.12(c)(d) は, ソバのフットプリント内に自生したクローバーの乾燥重量および植生水分量の変化である. az195 と az150 の結果を示す. これらのフットプリントでは, クローバーの被覆状態は比較的均一である. az195 の乾燥重量は, 12 月 9 日に行なったクローバーの集中観測結果とクローバーの出芽日 10 月 1 日を基点として日数による線形補間を行って算定した. az150 の乾燥重量は, クローバーの刈り取りを行なった 11 月 11 日とゼロとして, 12 月 10 日の集中観測までを線形補間を行って算定した. az150 のクローバーの 11 月 10 日以前の状態は az195 のクローバーと同じである. また, az180 および az187 のクローバーも, az195 のクローバーと同じように自然状態を保っている. この 2 つのフットプリントのクローバーの乾燥重量は, az195 の zone-A ~ C においてサンプルした値を用いた.

クローバーの植生水分量は, ソバのように明確な日変化が見られなかったため, 重量含水比を一定として算出している. クローバーの植生水分量の日変化が少ないのは, 植生高が低いうえに


 図 4.13: 植生指標 $MSAVI$ と植生水分量の関係 (クローバー)

 図 4.14: 植生水分量の変化 (クローバー観測)
 白のプロットは、 $MSAVI$ による推定値．黒のプロットは、全数サンプルによる測定値．

土壌が非常に湿っていたこと、ソバの存在により直射日光が遮られることなどに起因すると推測する．

(c) クローバーの水分量の時系列変化の推定 (クローバー観測)

az225 と az210 のクローバーは、気象条件の変化を直接受けるため、ソバのフットプリント内に混生しているクローバーと生育状態が異なる．また、az225 と az210 のクローバーは、ソバの集中観測後に再び生育したもので、集中観測直後にクローバーの量を把握していないため、線形補間をすることができない．そのため、これら 2 つのフットプリントにおけるクローバーの水分量は可視・近赤外域のスペクトルデータから算出した Modified Soil Adjusted Vegetation Index ($MSAVI$)[71] を用いて推定した．スペクトルデータの測定には ANALYICAL SPECTRAL DEVICES 社の分光放射計 FieldSpec Pro (測定波長範囲 350nm - 2500nm) を使用し、11 月 14 日以降、観測日毎に測定を行った．以下に、クローバーの植生水分量 W_c の推定に用いた $MSAVI$ - W_c 関係について述べる．

$MSAVI$ は、植生と裸地が混在するような領域において、土壌の影響を除き、植生のシグナルのみを抽出することができる指標である．各種の植生指標のなかで葉面積指数 LAI に対して比較的良好な感度を持つ [10, 28] ． $MSAVI$ は、次式で定義される [71] ．

$$MSAVI = \frac{2R_{NIR} + 1 - \sqrt{(2R_{NIR} + 1)^2 - 8(R_{NIR} - R_{RED})}}{2} \quad (4.2)$$

R_{RED} と R_{NIR} は、それぞれ可視域の赤のバンドと近赤外の波長域における反射率である．ここでは、NOAA AVHRR の Ch.1 と Ch.2 の観測波長領域である 580 ~ 680nm と 725 ~ 1100nm の反射率を用いた．

一般に、 $MSAVI$ などの可視・近赤外の植生指標 VI は、葉面積指数 LAI が大きくなるほど一定値に近づく． VI と LAI との関係は、次のような指数関数が提案されている [7, 10] ．

$$VI = VI_{\infty} + (VI_g - VI_{\infty}) \exp(-K_{VI} \cdot LAI) \quad (4.3)$$

ここで、 VI_g は植生がない状態のときの植生指標の値、 VI_{∞} は LAI が大きくなったときの漸近値、 K_{VI} は係数である．一方、葉面積指数 LAI と植生水分量 W_c の関係は、S.Paloscia and P. Pamploni(1988) [64] によって提案されている．

$$LAI = y \cdot \ln(1 + W_c) \quad (4.4)$$

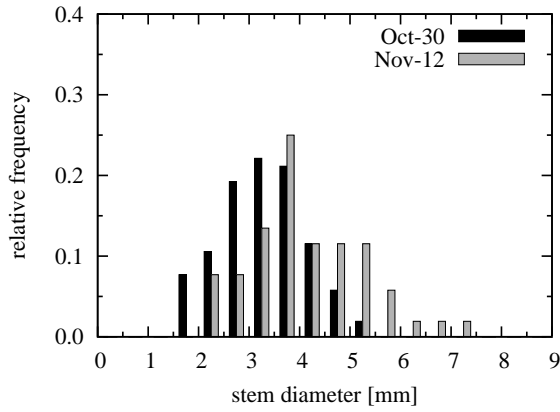


図 4.15: 茎の直径分布 (ソバ)
茎の直径(第 2 節の径)の分布。サンプル実施日は、10 月 31 日と 11 月 12 日。サンプル数は、それぞれ、104 本と 52 本

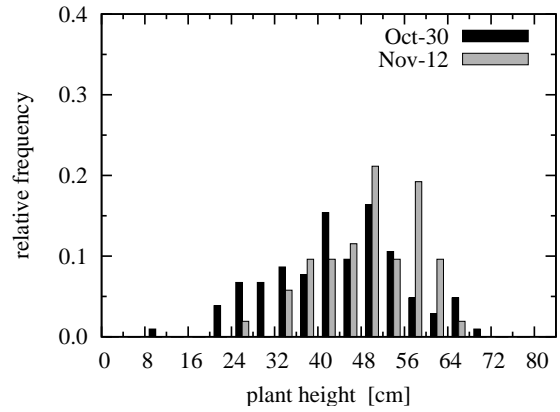


図 4.16: 植生高さ分布 (ソバ)
茎の高さの分布。サンプル実施日は、10 月 31 日と 11 月 12 日。サンプル数は、それぞれ、104 本と 52 本

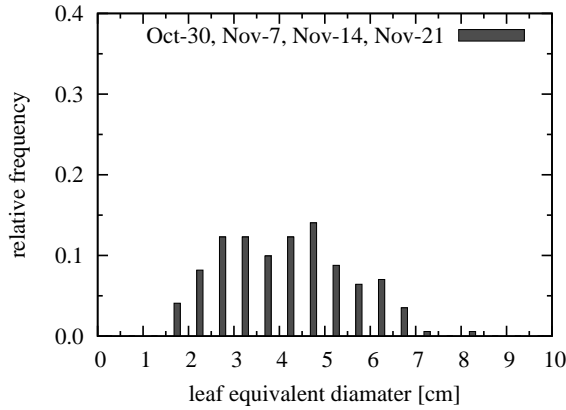


図 4.17: 葉のサイズ分布 (ソバ)
葉の等価面積直径の分布。サンプル実施日は、10 月 31 日、11 月 7 日、14 日、21 日。サンプル数、総計 171 枚。

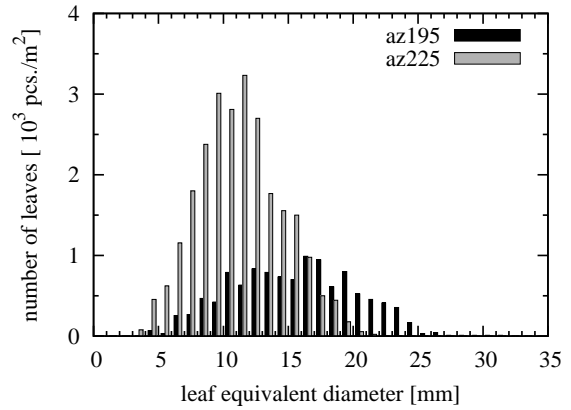


図 4.18: 葉のサイズ分布 (クローバー)
フットプリント az195 および az225 の葉の等価面積直径の分布。総枚数、az195:1024 枚、az225:2272 枚。

y は、植生タイプに依存するパラメーターである。式 (4.4) を式 (4.3) へ代入し、係数を整理すると、

$$MSAVI = c_1 + c_2(1 + W_c)^{-c_3} \quad (4.5)$$

を得る。 c_1 、 c_2 、 c_3 は、土壌と植生に依存する係数となる。ここでは、 $MSAVI$ と植生水分量 W_c の観測値から、Levenberg-Marquard アルゴリズムによる非線形最小二乗法 [46, 51] を用いて、 c_1 、 c_2 、 c_3 を決定した。それぞれの値は、1.48、1.41、1.41 である。なお、観測値には、az225、az210 における集中観測のデータを使用した。それぞれのフットプリントの A~C のエリアで、スペクトル観測を行い、植生水分量もエリア毎に集計した。図 4.13 に $MSAVI$ と W_c との関係を示す。また、図 4.14 に az225 と az210 のクローバーの植生水分量推定結果を示す。

4.5.7 植生の幾何学的特徴の把握

ソバとクローバーの幾何学的特徴に関する観測について述べる。

(a) 茎

ソバの茎は、根本の第 1 節がやや細く、第 2 節以降の節は比較的同じ直径で、先端もやや細くなる特徴を持つ。ここでは、第 2 節における直径を茎の径とした。また、直径と同時に植生の高さも計測した。図 4.15 にソバの茎の直径分布、図 4.16 に植生高さの分布を示す。それぞれの図において、10 月 30 日と 11 月 12 日の測定結果を比較した。成長に伴って、太い径をもつ茎が多くなり、植生高さも高くなっていることが分かる。

(b) 葉面積

葉面積の測定は、スキャナーを用いて行った。サンプルした葉を 100dpi の解像度で取り込み、画像処理を行って面積を計測した。図 4.17 と図 4.18 にソバとクローバーの葉のサイズ分布を示す。葉のサイズは、面積の等しい円の直径とした。図 4.17 のソバの葉のサイズ分布は、日変化観測および集中観測において採取した葉のサイズを集計した結果である。図 4.18 のクローバーの葉のサイズ分布は、az195 と az225 内に設定した 30cm × 30cm の領域から採取した葉のサイズを集計した結果である。クローバーのサンプルは、12 月 9 日の集中観測時に実施した。

ソバの葉は 3cm から 5cm 程度のサイズが多く、クローバーは 8mm から 2cm 程度の葉が多い。また、クローバーは、フットプリントによる違いも見られる。az225 は、比較的小さい葉が多い。10GHz と 18GHz の波長は 2.8cm と 1.6cm であるが、波長と比べると、ソバの葉は波長よりも大きく、クローバーの葉は波長と同程度もしくはやや小さい傾向にある。

(c) 葉の厚さ

葉の厚さは、1 枚毎に計測した葉の体積から算定した。体積を葉面積で除した値を葉の厚さとした。体積は水置換法を用いて測定した。ソバの葉の体積測定は 11 月 14 日および 11 月 21 日に行い、合計 94 サンプルのデータを取得した。その結果、ソバの葉の厚さは、平均 0.276mm(標準偏差 $7.4 \times 10^{-3} \text{mm}$) であった。一方、クローバーは、葉や茎の表面に軟毛が密生しており、表面に気泡が残って体積の測定ができなかったため、マイクロ스코プによって葉の断面を計測した。3 サンプル、合計 6 ポイントの測定の結果、クローバーの葉の厚さは、ほぼ一定で、0.1mm であった。

4.5.8 地表面状態の推定

植生被覆率ならびに地表面粗度の測定について述べる。

(a) 植生被覆率

各フットプリントの植生被覆率は、マイクロ波放射計と同じ入射角 55 度で撮影した写真を用いて推定した。裸地と植生の被覆判定は、色探索法を用いた。はじめに、裸地と識別できる任意のピクセルを指定し、そのピクセルの RGB(赤, 青, 緑)の各色の輝度 (0 ~ 255) の値を基準として、解析対象範囲内の全ピクセルから、輝度の値が許容範囲内に収まるピクセルをカウントする。次に、カウントしたピクセル数と解析対象範囲の全ピクセル数との比を取って植生被覆率とする。RGB の許容範囲は写真の状

表 4.7: 植生被覆率 (クローバー)

観測日	az225	az210	az195
11 月 14 日	47 %	8 %	-
11 月 21 日	53 %	-	-
12 月 08 日	-	-	96 %
12 月 09 日	60 %	20 %	-

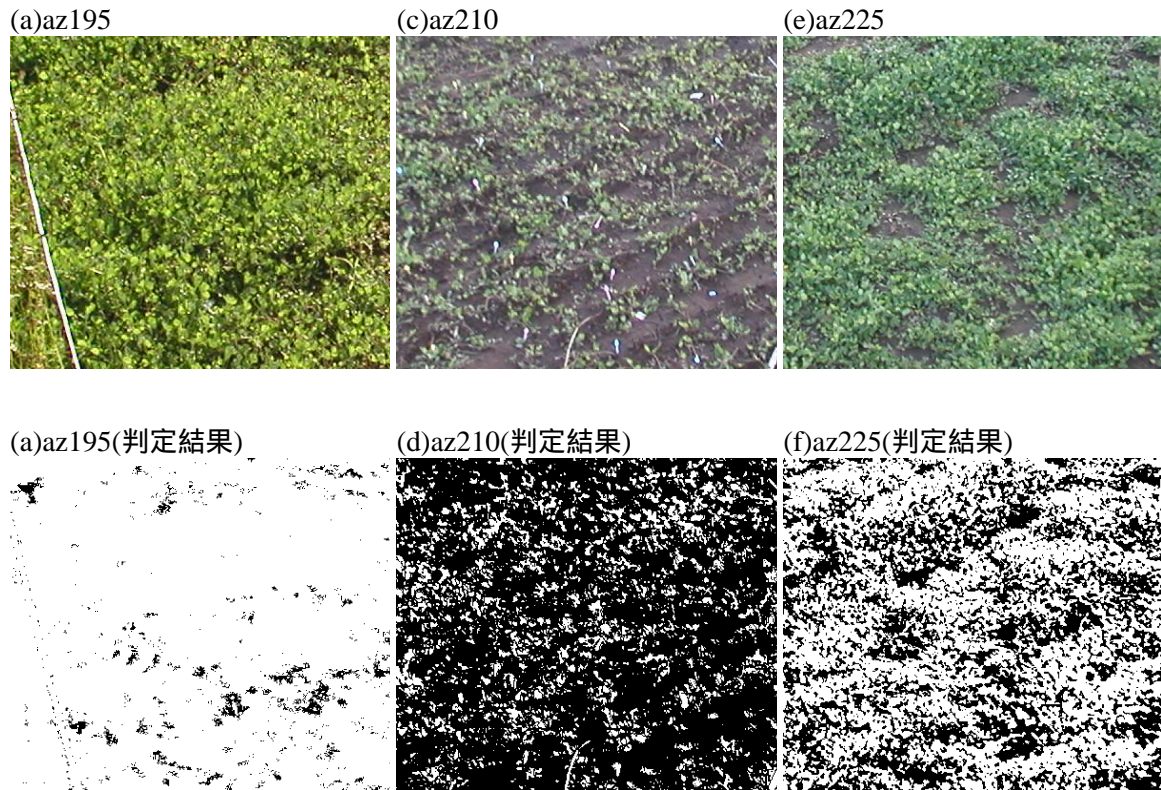


図 4.19: 植生被覆率の推定
各フットプリントの状態 (上段) と裸地 / 植生の判定結果 (下段) . 判定結果は、植生を白、裸地を黒で示す .

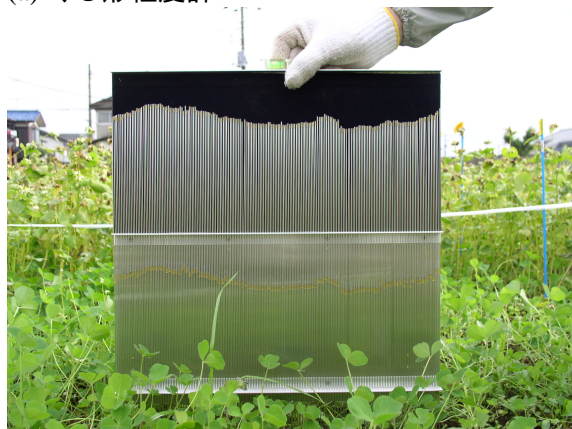
態によって適宜定める . この方法では、初めに指定するピクセルの RGB 値によって結果が変わるので、同様の作業を 20 回以上繰り返して、その中央値を対象範囲の植生被覆率とした . なお、この解析には名古屋大学の山本によって開発された解析ソフト (LIA32 for Win32 ver.0.376 1) を使用した .

図 4.19 にクローバーのフットプリントの状態、ならびに、裸地と植生の判定結果を示す . 植生被覆率の判定用の写真撮影は、11 月 14 日、21 日、12 月 8 日、12 月 9 日に行った . 表 4.7 に推定結果を示す . フットプリントによって写真撮影を行っていない観測日があるが、5 章の解析では、写真のない観測日の植生被覆率を日数による線形補間によって求めることとする .

一方、ソバのフットプリントの植生被覆率は 100% とした . 図 4.9 に示したように、ソバは GBMR のコンテナに対して平行な列を成しており、各フットプリントのマイクロ波放射計の視線方向は、ソバの列に対して直角から ± 45 度の方向である . つまり、ソバの列に対して、ほぼ横から観測している . 各列におけるソバの株の間隔は数 cm と非常に密生しており「壁」の状態になっている . さらに、列間隔は約 20cm と植生高さよりも短く、入射角 55 度で観測した場合、列と列の間の土壌面は見えない .

また、ソバと混生しているクローバーの植生被覆率も 100% とした . ソバと混生している場合、上述の写真による手法では、植生被覆率を求めることができないが、もっとも状態に近い az195 のクローバーの植生被覆率をみると 96% と非常に高い . ソバと混生しているクローバーの植生被覆率を 100% と見なしても影響は少ないと考える .

(a) くし形粗度計



(b) 解析事例

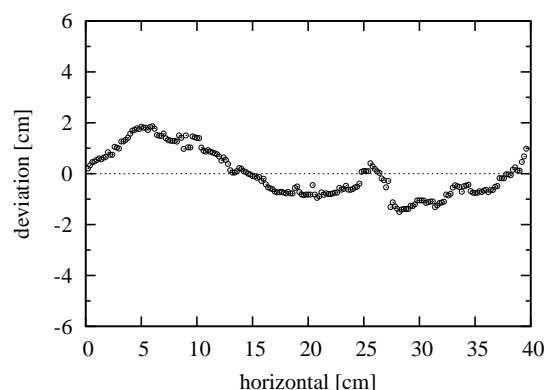


図 4.20: くし形粗度計による観測の様子と解析事例

(b) 粗度

11月12日, 28日, 12月10日の合計3回, くし形粗度計による粗度観測を実施した。くし形粗度計は鋼板にピアノ線を取り付けたもので, 鉛直方向に自由に動く直径1mmのピアノ線が2mm間隔で200本取り付けられている。くし形粗度計を土壤面に鉛直に立てて持ち上げると, ピアノ線の先端が土壤面の凹凸に沿って上下するため, 鋼板上に土壤面の凹凸が再現される。この各ピアノ線の先端の座標を読み取ることによって, 土壤の粗度を求めることができる。粗度測定はマイクロ波放射計のビーム方向およびビームに直角なアジマス方向を1セットとして, 各フットプリント内で, 3点ないしは2点測定した。図4.20に, くし形粗度計の観測の様子と解析事例を示す。

4.6 イネ観測

新潟県三島郡中之島町末宝圃場において, 2000年5月~6月, 地上可搬型マイクロ波放射計観測システムGBMRおよび航空機搭載型マイクロ波放射計(Advanced Microwave Radiometer, AMR)による観測を実施した。末宝圃場と北側に隣接する中条圃場と合わせると, 東西方向約2km, 南北方向約6kmの一帯に水田が広がっている。この地域は5月初旬になると一斉に田植えを行なうため, イネの生育状態は比較的一様である。そのため, 航空機観測の対象エリアとしても適した地域である。

観測は, 末宝圃場のほぼ中央に位置する水田を観測地点と定め, 合計4回の観測を実施した。田植え直後の5月15日, 分けつ期の6月3日, 6月17日, 幼穂形成期の6月29日である。このうち, GBMR観測は, 5月15日, 6月3日, 6月17日の3回, AMR航空機観測は, 5月15日と6月29日の2回実施した。5月15日は, 5m/s以上の比較的強い風が吹き, 水面に小波がたっていた。また, 6月17日は, 観測地点の水田が中干しのため落水していたため, 別の水の張ってある水田においても, GBMR観測を実施している。図4.21にGBMR観測の配置図を示す。GBMRと搭載したトラックを用いて道路から測定を行い, あぜ道へ10m程度入った場所で植生観測を行った。

水田は水面で覆われているため, 植生の放射伝達の解析に最適な状態である。水面の放射率は, 垂直偏波0.7程度, 水平偏波0.4程度と小さく, 植生からの放射が水面からの放射によりも卓越する。さらに, 風がない状態では, 水面が鏡面として取り扱うことができ, 粗度による表面散乱を考慮する必要はない。

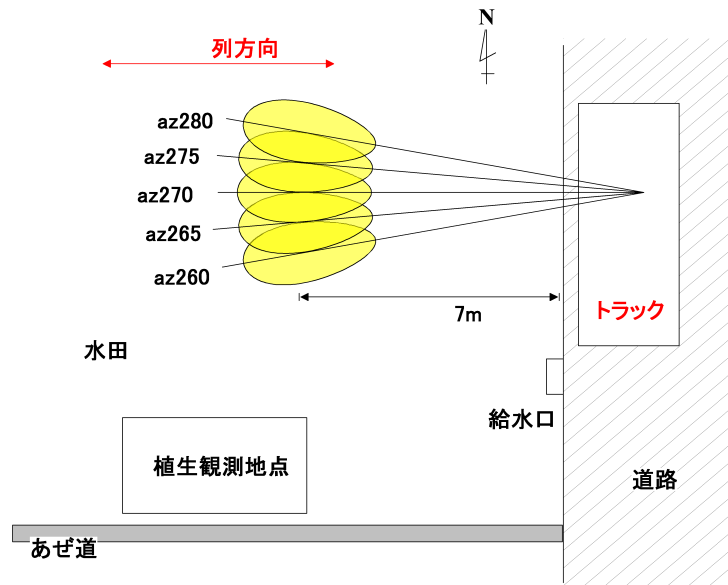


図 4.21: 中之島観測配置図

表 4.8: イネの状態

観測日	観測	地表面 状態	イネの 状態	植生高さ [cm]	植生水分量 [kg/m ²]	植生 被覆率 [%]	LAI
5月15日	GBMR, AMR	水面	葉	8	(0.005)	17	(0.028)
6月3日	GBMR	水面	葉	20	(0.036)	36	(0.182)
6月17日	GBMR	土壌/水面	葉	34	(0.143)	76	[0.686]
6月17日	GBMR	水面	葉	29	(0.129)	80	(0.621)
6月29日	AMR		葉・茎	48	[0.511]	100	[2.121]

植生水分量は，サンプルによる実測値を〔〕で，LAI から指定した値を（）で示す．LAI は，サンプルによる実測値を〔〕で，LAI 計による測定値を（）で示す．LAI メーター測定値は実測値で較正を行なっている．

4.6.1 イネの状態

5月15日のイネは、まだ、分けつが始まっておらず、植生高さも低い。6月に入ると分けつが盛んになり、株が増えていくが、まだ、茎は短く、水面上に出ているは、ほとんどが葉身である。6月17日の時点では、葉身は、長さ15cmから20cm、幅8mm程度であり、ほぼ鉛直に立っている。6月29日のイネは、茎が伸びて背丈も高く、葉も長さ30cm、幅1cm程度まで大きくなっている。表4.8に各観測日のイネの状態をまとめる。

4.6.2 測定項目

(a) マイクロ波輝度温度

GBMR は、この時点でコンテナを製作しておらず、センサーを固定した昇降機を直接トラックに搭載して観測を行った。観測前に液体窒素による絶対較正を行い、計測時に大気下向き放射と高温較正源の測定を行った。イネの列の方向を中心として、左右 5 度おきに、合計 5 つのフットプリントを設けた。1 回の観測で、これら 5 つのフットプリントを 2 回走査した。各フットプリントにおいて、積分時間 0.2 秒、サンプル数 50 回、合計 10 秒間計測を行い、その平均を輝度温度の

観測値とした。

また、コンテナが無いために、日射を受けてセンサーが不安定になりやすいことから、絶対較正～観測終了まで2時間以内に終わるようにした。また、マイクロ波放射計未使用時は、反射シートでセンサーを覆い、日射をの影響を最小限に抑えた。

(b) 温度観測

マイクロ波輝度温度観測と同期して、水温と植生温度の測定を行った。水温の測定には白金温度計を使用し、植生温度の測定には赤外放射温度計を使用した。

(c) 植生水分量

6月17日および6月29日にはサンプリングによる実測を行った。ただし、6月17日は乾燥重量の測定に不備があったため、6月29日のデータのみ有効である。これ以外の観測日のデータは式(4.4)を用いて葉面積指数 LAI より推定を行った。式(4.4)の係数 y は、6月29日の植生水分量と葉面積指数 LAI の測定データから決定した。表 4.8 に各観測日のイネの植生水分量の値を示す。

(d) 葉面積指数 LAI

観測実施日もしくはその翌日に、葉面積指数 LAI の計測を行った。計測は、植生群落内に入射する光の減衰の程度から LAI を推定する間接測定機器 (LI-COR Biosciences 社, LAI-2000) を使用した。間接測定機器による LAI の値は、6月17日および6月29日に行なったサンプリングによる実測値を用いて較正した。表 4.8 に各観測日のイネの LAI を示す。

(e) 植生被覆率

列方向に撮影した水田の写真より、植生被覆率を求めた。表 4.8 に各観測日の植生被覆率の値を示す。

(f) 気象観測

このほか、自動気象観測システムを設置し、観測期間中の気温、湿度、風向、風速を10分毎に記録した。

(g) AMR 航空機観測

AMR 観測は、2000年5月15日と6月29日の2回実施し、1回の観測で3フライトのデータを取得した。各フライトは南北方向に経路をとり、飛行高度 3000ft、飛行速度 260km/h で、北側より侵入した。観測エリア侵入前に、日本海で較正用データを3分間取得した。観測角は55度とし、このときのフットプリントの大きさは、10GHz でアジマス方向約 190m・レンジ方向約 1000m となる。また、航空機からは、赤外放射温度計による地表面温度測定および直下のビデオ撮影を行った。

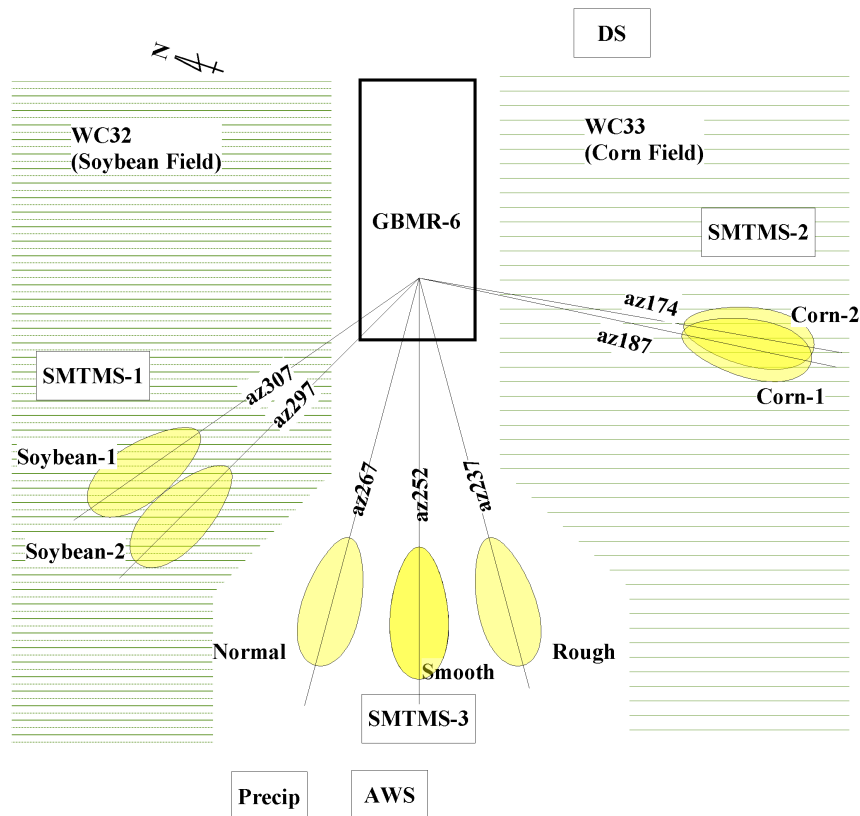


図 4.22: AMES 観測配置図

GBMR-6; 地上可搬型マイクロ波放射計観測システム, SMTMS; 土壌水分地温測定システム, AWS; 自動気象観測システム, Precip; 重量式雨量計, DS; 雨滴計

(h) AMR 同期地上観測

AMR 観測に同期して、地上では地表面状態の調査を実施した。航空機観測では、フライトコースや姿勢の制御状態によりフットプリントの位置が変わるため、地表面調査は末宝圃場全域を対象とした。1 区画の水田毎に、面積、地表面状態(水面、湿潤土壌、乾燥した土壌)、被覆状態(イネ、草地、畑、裸地)を目視で記録し、航空機飛来時の水面温度、土壌温度、植生温度、土壌水分の測定を行った。

4.7 ダイズ・トウモロコシ観測

2002 年 6 月から 7 月にかけて、米国 IOWA 州において行なわれた Soil Moisture Experiment in 2002 (SMEX02) へ参加し、GBMR による植生観測を実施した。SMEX02 は、米国航空宇宙局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 陸面水文プログラム土壌水分ミッション (EX-4a), NASA 全球水・熱循環研究プログラム (Global Water and Energy Cycle Research Program, GWEC), および、高性能マイクロ波走査型放射計 (Advanced Microwave Scanning Radiometer for Earth Observing System, AMSR-E) の共同プロジェクトとして行なわれた大規模な観測実験である。主に、陸面-大気相互作用の理解、AMSR 土壌水分推定アルゴリズムの検証を目的とし、衛星・航空機・地上観測の 3 つのスケールによる検証データの取得、数種類の気象観測ネットワークによる境界層観測が実施された。詳細は、<http://hydrolab.arsusda.gov/smex02/> にて紹介されている。

IOWA 州には、トウモロコシとダイズの広大な耕作地帯が広がる。SMEX02 では、AMES 市南

部の耕作地帯を航空機観測対象エリアと定め、エリア内には 33 地点の地上検証サイトが設定されている。その中で、WC32(ダイズ)と WC33(トウモロコシ)の境界に GBMR 観測サイトを設けた。観測は、2002 年 6 月 21 から 7 月 12 日にかけて実施した。

図 4.22 に観測サイトの概要を示す。アンテナを回転させることにより、トウモロコシおよびダイズの両フィールドにフットプリントを設けた。さらに、中央部に裸地エリアを確保して、自然状態、滑らかな表面状態、粗い表面状態の 3 タイプのフットプリントを作成した。それぞれのフットプリントを、corn, soybean, natural, rough, smooth と呼ぶ。

rough, soybean, corn のそれぞれのフットプリント近傍に、土壌水分地温測定システム (Soil Moisture and Temperature Measureing System, SMTMS) を設置し、地温 (埋設深度: 0, 1.5, 4, 6, 8, 10, 15, 25, 35, 50cm) および土壌水分 (埋設深度: 1.5, 4, 8, 15, 25, 50cm) を 10 分間隔で記録した。また、自動気象観測装置 (Auto Weather Station) により、気温、湿度、下向き短波放射、下向き長波放射、降水量を 10 分間隔で測定を行った。これらは、ソバ・クローバー観測と同一のシステムである。雨滴計により、1 分間隔の雨量の計測も行っている。期間中ほとんど降水がなく、地表面は非常に乾燥していた。また、SMTMS 埋設時に、75cm の深度に地下水位を確認した。

4.7.1 ダイズの状態

観測期間は、花芽分化期にあたる。茎の葉のみで構成され、まだ結実はしていない。ダイズの植生高さは、観測を開始した 6 月 21 日に約 15cm であったが、7 月 11 日には 45cm まで成長した。葉の大きさは 6cm から 12cm ほどで、ソバに比べてやや大型である。主茎の太さの計測は実施していないが、一般に 5mm ~ 1cm 程度である。

4.7.2 トウモロコシの状態

観測期間中は、生育初期にあたり、まだ出穂していない。植生高さは、観測を開始した 6 月 21 日に約 90cm で、7 月 11 日には約 2m まで成長した。7 月 11 日の茎の太さは 2cm ~ 3cm、葉、幅約 10cm、長さ約 75cm 程度であった。

4.7.3 測定項目

以下、自動観測システム以外の主要測定項目を列挙する。

(a) マイクロ波輝度温度

各フットプリントにおいて、積分時間 0.2 秒、サンプル数 50 回、合計 10 秒間計測を行い、その平均を輝度温度の観測値とした。入射角は 55 度に固定し、地表面放射のほか、同一方位角の大気下向き放射を測定した。センサーの絶対較正は、4 ~ 5 日間隔で実施した。データ品質の確認のため、測定時に、Hot Load および大気下向き放射の測定を行った。

(b) 植生温度および土壌温度

マイクロ波放射計測定時に、赤外放射温度計による温度測定を実施した。各フットプリント内において、地温 3 地点、植生 3 地点のデータを取得した。

(c) 土壌水分

SMTMS による土壌水分の自動計測のほか，SMTMS を設置していない normal および rough のフットプリント近傍で，携帯型土壌水分計 (TRIME - FM) により表層 1.5cm の土壌水分を測定した．また，裸地の各フットプリントにおいて，表層 1cm の土壌をサンプリング行ない，土壌重量含水比を測定した．この土壌重量含水比は，水置換法により計測した土壌乾燥比重を用いて土壌体積含水率へ換算する．

(d) 植生水分量

1 から 3 株の植生サンプルを行ない，植生水分量の測定を行った．期間中 5 回 (6 月 21 日，26 日，7 月 5 日，7 日，11 日) 実施したが，最後の 3 回分のデータは，乾燥重量のデータが欠損しているため，6 月 26 日の植生重量含水を用いて，湿潤重量から推定した．

(e) 粗度

裸地において，4～5 日間隔で，くし形粗時計による粗度計測を実施した．

(f) その他

LAI 計 (LAI-2000) による葉面積指数 LAI の測定，および，分光放射計 (Fieldspec Pro, 300nm～2500nm) によるスペクトルの測定を実施した．また，本サイトでは，期間中，マイクロ波レーンレーダ (21GHz) および大気下向き放射用マイクロ波放射計 (23GHz,31GHz) による大気 1 次元観測も実施した．

4.8 まとめ

本章では，観測データの取得に関して取りまとめた．地表面の放射伝達モデルの開発には，マイクロ波放射計の輝度温度データと同時に地表面状態の情報が不可欠である．植生を特定し，地表面情報の取得するためには，観測のスケールが小さな方が有利である．そのため，地上可搬型マイクロ波放射計システム (GBMR) の開発を行った．

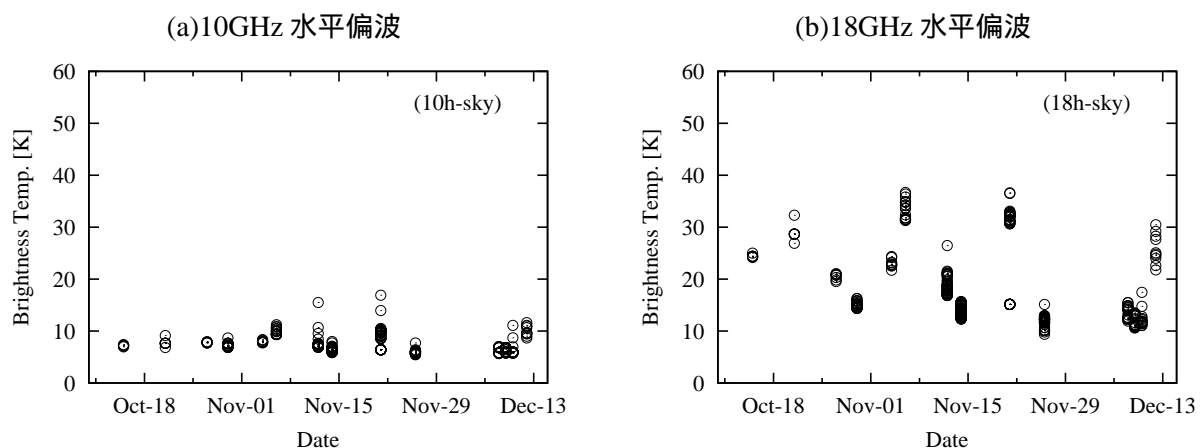


図 4.23: 大気下向き放射の変動
ソバ・クローバー観測における大気下向き放射の観測値．

本章のまとめとして，GBMR 観測によって得た幾つかの知見を付記する．

4.8.1 大気下向き放射

図 4.23 にソバ・クローバー観測において取得した大気下向き放射の輝度温度測定結果を示す．観測期間中の観測データのうち，次節で述べる日射の影響のないデータのみをプロットした．

10GHz と 18GHz を比較すると，18GHz の大気下向き放射の輝度温度が高く，変動も大きいことが分かる．最高で 40K 程度まで上昇している．これに対し，10GHz の大気下向き放射の輝度温度は，10K 程度で，変動も小さい．この図では示していないが，6GHz の大気下向き放射の輝度温度は，6K 程度で，変動も数 K である．一般に，高周波になるほど大気の影響は大きくなる．また，降水粒子が存在すると，輝度温度が高くなる傾向にある．

対象とした 10GHz や 18GHz は，大気の下向き放射の影響を考慮する必要がある．裸地ではその影響が大きく，特に，反射率が高い水平偏波で影響が大きい．たとえば，図 3.4 に示した条件のときの 18GHz 水平偏波の反射率は約 0.2 である．このとき，大気下向き放射が 40K であれば，裸地面で反射する輝度温度は 8K になる．5 章で述べる粗度の議論をする際には，8K の値は大きな影響を持つ．

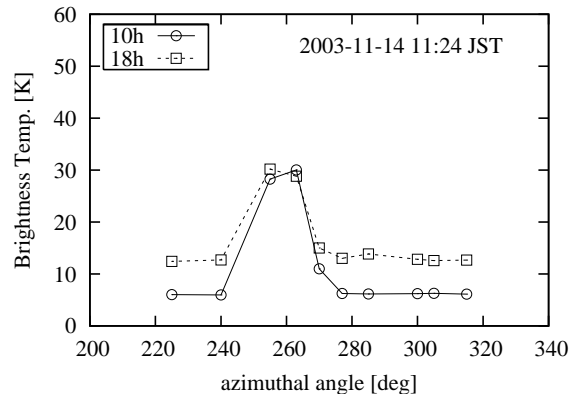


図 4.24: 大気下向き放射における日射の影響
ソバ・クローバー観測における大気下向き放射の観測値．横軸は方位角を示す．観測日時：2003 年 11 月 14 日 11 時 24 分 (日本時間)．

4.8.2 日射の影響

大気下向き放射を観測する場合，太陽放射も放射源となりうる．図 4.24 に，入射角 55 度に固定したときの方角 225 度から 315 度までの 10 方位の大気下向き放射の測定値を示した．このときは快晴で，太陽は方位 260 度付近に位置している．太陽の方向とそれ以外の方向では，約 20K の差がある．10GHz の大気下向き放射は，18GHz の大気下向き放射よりも小さいが，日射の影響がある．方位 260 度付近の輝度温度は 30K まで上昇している．また，注意すべき点は，その指向性である．太陽は点光源であるため，マイクロ波放射計のビーム内に太陽が位置した場合には，ビーム内の不均一性が問題となる．

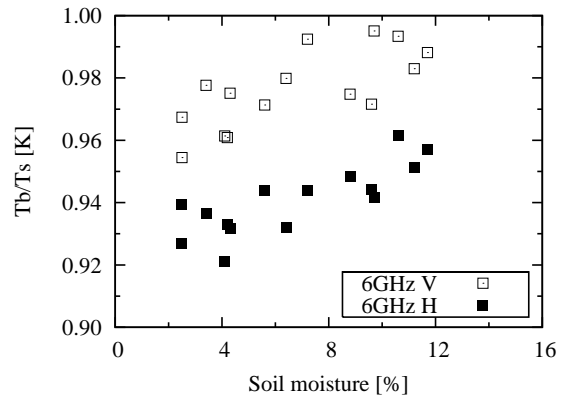


図 4.25: 乾燥土壌における見かけの放射率
引用：Fujii *et al* [24]

4.8.3 乾燥土の挙動

図 4.25 に乾燥土壌における観測結果を示す．このデータは，1999 年 7 月 米国オクラホマ州において地上可搬型マイクロ波放射計 (GBMR) によって取得した裸地のデータである．横軸に土壤水分の観測値，縦軸に輝度温度を地表面温度で除した地表面の見かけの放射率を示した．

一様な半無限媒体と仮定した土壌からの放射は、式 (2.108) および式 (2.109) から求められ、地表面の放射は 1 から反射率を引いた値に等しくなる。通常、式 (2.94)(2.93) から求まる反射率は、土壌水分の増加とともに大きくなるため、放射率は土壌水分に対して単調減少となるが、観測結果は、反対に単調増加となっている。したがって、式 (2.108) および式 (2.109) は、土壌が乾燥している場合は成立しないことが分かる。乾燥土壌では、土壌中の放射伝達を考える必要がある。

第5章 解析結果および検証

3章では、基本とする植生域地表面の放射伝達モデルについて述べ、4章では、モデルの構築に必要なデータの取得について述べた。本章では、ソバとクローバーを対象にしてモデルを構築し検証と他の植生への応用を試みる。

はじめに、観測データを用いて、ソバとクローバーの植生パラメーター b と単一散乱アルベド ω_c を推定し、3.4節で整理した茎と葉の放射・吸収特性から推定結果を考察する。次に、植生の成長に伴う幾何学的特徴の変化や植生被覆率の変化に対するモデルの精度について検討し、最後に、イネ、ダイズ、トウモロコシへ適用を試みる。

5.1 解析方針

図 5.1 に観測データの解析の流れを示す。クローバーとソバのパラメーターを識別するために、それぞれ、添え字として「cl」と「bw」を書き添える。表 4.4 に示したように、ソバのフットプリントは、ソバとクローバーが混生している。そのため、ソバの解析ではクローバーの影響を考慮

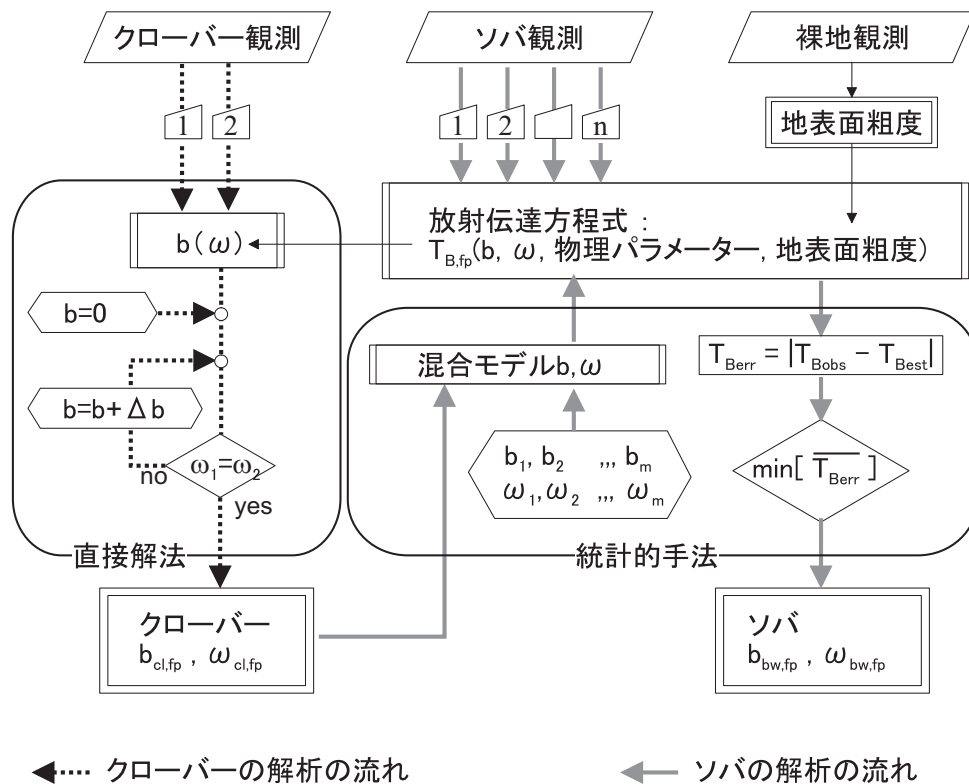


図 5.1: 解析の流れ

しなければならない．はじめにクローバーの植生パラメーター $b_{cl,fp}$ と単一散乱アルベド $\omega_{cl,fp}$ を求め、次に、3.2.3 節 (b) の植生混合モデルを用いて、ソバの植生パラメーター $b_{bw,fp}$ と単一散乱アルベド $\omega_{bw,fp}$ の解析を行った．また、クローバーとソバの解析に先立ち、植生を刈り取った後の裸地の観測データから、地表面粗度の評価を行った．

以下に、クローバーとソバ、地表面粗度、それぞれの解析について述べる．

5.1.1 クローバーの解析

はじめに、クローバー観測で取得したデータについて述べる．表 4.4 に示したように、クローバーのみの観測を行なったフットプリントは、az195, az210, az225 の 3 つである．この 3 つのフットプリントを対象に、クローバーの解析および検証を行う．az210 と az225 では、11 月 14 日から 12 月 9 日まで、クローバーの成長を追ってデータを取得している．これに対し、az195 では、クローバーのデータが有効であるのは最後の 2 日間のみである．一方で、表 4.4 の植生被覆の状態を見ると、az195 の植生被覆率が 96% で 3 つのフットプリントの中で最も高い．

2 番目に、解析について述べる．クローバーの植生パラメーター $b_{cl,fp}$ と単一散乱アルベド $\omega_{cl,fp}$ の推定は、最も均一にクローバーが分布している az195 を対象とする．az195 の観測データが少ないため、直接解法を用いて $b_{cl,fp}$ と $\omega_{cl,fp}$ を推定する．解析には、集中観測の直前の 12 月 9 日 11 時と、前日の 12 月 8 日 17 時に取得したデータを使用する．集中観測では全数サンプルにより植生水分量を実測しており、12 月に入るとクローバーは殆ど成長していないため、両データの植生水分量データの信頼性は高い．また、12 月 8 日 17 時と 12 月 9 日 11 時のデータは、フットプリント内の温度分布が均一な条件下でデータを取得している．観測時に実施したフットプリント内の温度測定結果は、それぞれ、最大と最小の温度差が 0.8K 以内に収まっていた．解析に用いた観測条件を表 5.1 に示す．両データとも土壌水分はあまり変化していないが、植生温度に約 7 度、地温に約 4 度の差がある．また、植生水分量は、ともに 0.342 kg/m^2 であった．

3 番目に、検証について述べる．検証には、az210 と az225 のデータを用いる．az195 において推定した $b_{cl,fp}$ と $\omega_{cl,fp}$ を適用して、クローバーの放射伝達モデルの検証と不均一性を考慮したミクセルモデルの評価を行う．az210 と az225 のクローバーは植生育日数が異なるため、図 4.18 に示したように葉のサイズも異なる．そのため、成長に伴うサイズの変化に対するモデルの精度の検証が可能である．また、az210 と az225 のクローバーは植生被覆状態が異なるため、ミクセルモデルの検証も可能である．さらに、 $b_{cl,fp}$ と $\omega_{cl,fp}$ 推定方法による考察も加える．本論文では、 $b_{cl,fp}$ と $\omega_{cl,fp}$ を同時に推定する方法を用いた．この方法と、従来広く用いられている $\omega_{cl,fp}$ を無視して $b_{cl,fp}$ を決定する方法を比較する．

5.1.2 ソバの解析

ソバは多くのデータ取得しているため、統計的手法を用いて $b_{cl,fp}$ と $\omega_{cl,fp}$ を推定する．解析の対象は、az150, az180, az187 とする．これらのフットプリントでは、観測期間中比較的長い間、データを取得している．az180 と az187 は、ソバも、混生しているクローバーも、自然状態を保ったままである．az150 は、途中、クローバーの刈り取りを実施しているが、ソバは、自然状態を保ったままである．

解析にあたり、ソバの幾何学的特徴を考慮して期間を 4 つに分割した．各解析期間ごとに、植生パラメーター $b_{cl,fp}$ と単一散乱アルベド $\omega_{cl,fp}$ を推定する．ソバの成長に伴う幾何学的特徴の変化に対するモデルの推定精度の検証では、それぞれの解析期間の推定結果を相互に適用する．

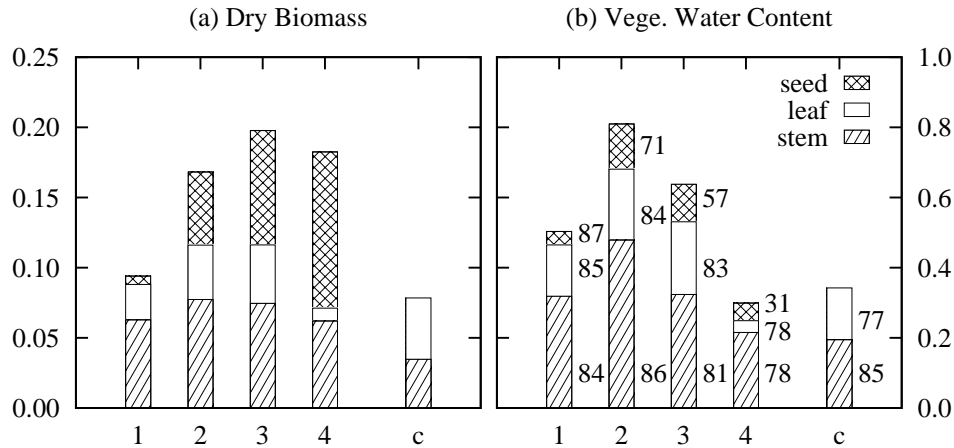


図 5.2: ソバとクローバーの平均植生乾燥重量と平均植生水分量
ソバとクローバーの (a) 平均植生乾燥重量と (b) 平均植生水分量を示す。横軸の数値がソバの期間番号を示す。'c' は az195 において 12 月 8 日に行ったクローバー観測結果。stem: 茎, leaf: 葉, seed: 実 (未熟粒・成熟粒の合計, 花を含む)。図 (b) の各棒グラフ右側に示した数値は各要素の重量含水率 [%]。

表 5.1: クローバー解析条件

観測日時	土壌水分 Mv [%]	地温 Ts [degC]	植生温度 Tc [degC]
2003/12/08 17 時	53.0	11.40	11.24
2003/12/09 11 時	53.5	15.82	18.18

表 5.2: ソバ解析対象期間

期間名	ソバ生育相	対象日	データ数	主要素	備考
期間 1	開花始め ~ 開花盛期	10/15, 10/21, 10/27, 10/30	10	茎, 葉	成長期。茎の径は, 2mm ~ 4mm 程度。
期間 2	開花盛期 ~ 完熟期	11/04, 11/06, 11/12, 11/14	33	茎, 葉, 未熟粒	茎・葉の成長は止まり, 結実が始まる。茎の径は, 3mm ~ 6mm 程度。葉の大きさは数 cm ~ 8cm 程度。実の直径は 5mm ~ 8mm 程度。最も水分量が多い期間である。
期間 3	完熟期	11/21, 11/26	24	茎, 葉, 未熟粒 ~ 成熟粒	茎・葉の量は期間 2 とほぼ同量。成熟が始まり。徐々に乾燥していく。
期間 4	収穫期 (落葉後)	12/8, 12/9, 12/10, 12/12	4	茎, 成熟粒	落葉し, 成熟粒は比較的乾燥している。茎は高い水分量を保持する。

はじめに、ソバの観測データについて述べる。

表 5.2 に解析期間の区分と各期間のソバの特徴を示す。また、図 5.2 は、各期間における乾燥重量と植生水分量の平均値の比較図である。図中の数値は、各要素の重量含水率である。

期間 1 はソバの成長期にあたり比較的細い茎が多く葉も少ない。開花盛期を境にして茎と葉の成長が止まるため、ここで分割し、期間 2 とする。期間 2 は成長の全盛時期にあたり、最も水分量が多い。

次に、乾燥化が始まる 11 月後半を期間 3 とする。期間 2 から期間 3 にかけて、実は未熟粒から成熟粒へ変化し、全体に水分量が少なくなるが、個々の要素は形状や大きさに変化がない。これは、茎と葉の乾燥重量が変化していないことから推察できる。実は乾燥重量が増加しているが、成熟にともない密度が増加したもので、観察した限りは、形状や大きさに大きな変化はなかった。

期間 4 は収穫期にあたり、落葉のため葉の量が激減している。茎は高い水分量を保持しており、形状の変化も少なかった。幾何学的特徴の観点から、落葉している期間 4 を、葉が茂っている他の期間とは別の植生として扱う。

2 番目に解析について述べる。植生パラメーター $b_{cl,fp}$ と単一散乱アルベド $\omega_{cl,fp}$ を推定は、統計的な手法を用いて行う。解析に当たって、下記の条件に当てはまるデータを対象から外し、安定した条件で取得したデータのみを使用する。

- 朝露のために葉が湿っている午前中のデータ。
- フットプリント内の植生温度の最大値と最小値の差が 5K 以上あるときのデータ。
- 日射の影響を含むデータ。

さらに、11 月 12 日は植生水分量の算定に必要な植生重量含水率の計測を行っていないため解析対象外とする。また、期間 4 になると、クローバーが成長して自然状態のままの az180 ではソバよりも水分量が多くなっているため、az150 のデータのみを使用する。az150 では、期間中に 2 回のクローバー刈り取りを行なっている。各解析期間のデータ数を表 5.2 に示す。

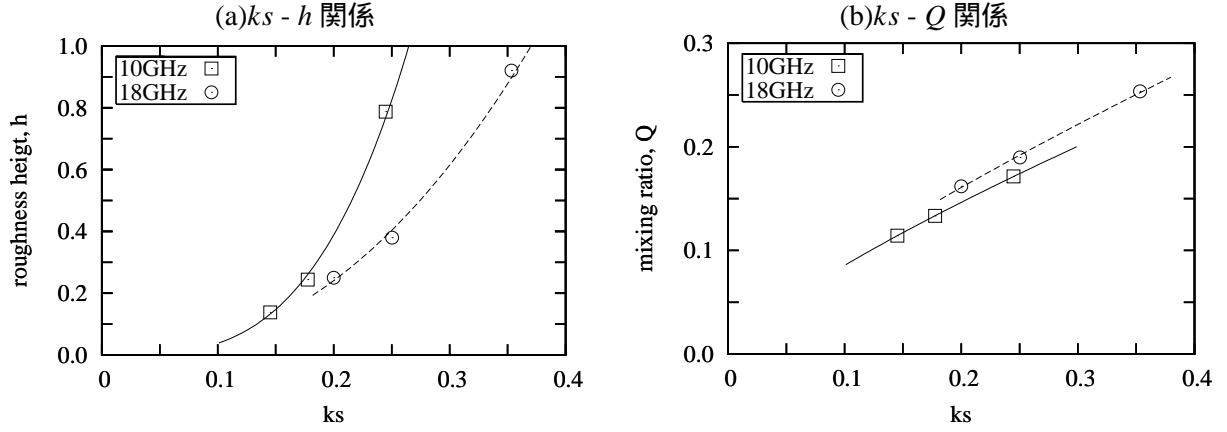
3 番目に検証について述べる。検証では、期間 1 と期間 3 の植生パラメーター $b_{cl,fp}$ と単一散乱アルベド $\omega_{cl,fp}$ の推定結果を相互に適用にモデルの適合性を調べる。成長に伴う幾何学的特徴に変化が、輝度温度と植生水分量の推定に与える影響を検討する。

5.1.3 土壌からの放射と地表面粗度

観測期間中、土壌水分は体積含水率 49% ~ 60% を保ち、常に湿っている状態であった。このように極度に湿った土壌では、体積散乱の影響は非常に小さく、地表面放射は、式 (2.108) で近似することができる。ここに、改めて記す。

$$T_{Bsp} = (1 - \Gamma_{fp}) \cdot T_s \quad (5.1)$$

土壌表面の反射率 Γ_{fp} は、入射角 θ と土壌の誘電率 ε_{soil} で決まる。入射角 θ は 55 度で一定であり、土壌特性が決まれば、土壌誘電率 ε_{soil} は、土壌水分 m_v と地温 T_s の観測値から式 (2.124) によって算定可能である。


 図 5.3: ks と h および Q の関係

(a) ks - h 関係, (b) ks - Q 関係を示す。プロットは観測値, ラインは最小二乗法によるフィッティング結果を示す。それぞれ, 10GHz(実線): $h = 87.9(ks)^{3.38}$, $Q = 0.511(ks)^{0.796}$. 18GHz(破線): $h = 9.95(ks)^{2.31}$, $Q = 0.575(ks)^{0.792}$.

(a) 地表面での散乱と粗度モデル

実際の地表面では滑面である場合は稀であり, 土壌表面の凹凸により発生する表面散乱を考慮する必要がある。表面散乱モデルとして, Wang *et al* (1981)[96] による経験式を導入する。

$$\Gamma_{fp}(\theta, \varepsilon_{soil}, Q, h) = \left\{ (1 - Q)\Gamma_{fp}^{sp}(\theta, \varepsilon_{soil}) + Q\Gamma_{fq}^{sp}(\theta, \varepsilon_{soil}) \right\} \exp(-h) \quad (5.2)$$

ここで, Γ^{sp} は, フレネルの電力反射係数である。添え字 p と q は垂直偏波と水平偏波もしくはその逆の組み合わせを指す。 Q と h は, それぞれ, 偏波混合率と粗度パラメータである。式 (5.2) は, Q の割合で偏波が混合し, その際, h によって減衰することを意味する。

(b) 粗度パラメータ h と偏波混合率 Q の推定法

式 (5.2) より, 垂直偏波と水平偏波に関する連立方程式を整理すると

$$h = -\ln \left\{ \frac{\Gamma_V + \Gamma_H}{\Gamma_V^{sp} + \Gamma_H^{sp}} \right\} \quad (5.3)$$

$$Q = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \frac{\Gamma_V - \Gamma_H}{\Gamma_V^{sp} - \Gamma_H^{sp}} \cdot \frac{1}{\exp(-h)} \right\} \quad (5.4)$$

を得る。添え字 V と H は, 垂直・水平偏波を意味する。一方で, 植生がない裸地の状態で取得した地温と輝度温度の観測値より, 見かけの反射率 Γ^{obs} が求まる。式 (3.4)(5.1) より,

$$\Gamma_{fp}^{obs} = \frac{T_s - T_{Bp}}{T_s - T_B^{sky}} \quad (5.5)$$

ここで, Γ^{obs} が Γ に等しいとすると, 式 (5.3)(5.4) より Q と h が決きまる。

(c) 粗度パラメータ h と偏波混合率 Q と地表面粗度

植生を刈り取った後の裸地の観測データを用いて h と Q を推定可能である。しかしながら, 地表面粗度は, 降水や強風などによって変化し, また, 刈り取り作業中でも地表面の変化は避けら

れない．したがって，裸地の Q と h を植生域へ適用することは難しい．そこで， Q と h を粗度計データより算出した粗度の物理パラメーターでモデル化を行い，それを用いて，クローバー観測での粗度の評価を行なうこととする．

マイクロ波における粗度の表面散乱は，主に，土壤水分推定の観点から低周波数帯において，経験的手法 [55, 98] や物理モデル [75] によって検討がなされてきた．高周波帯における粗度の検討は，Wegmüller and Mätzler(1999)[97] が，4.9GHz～94GHz の地上マイクロ波放射計観測データを用いた統計的解析から，粗度高さ s を波数で正規化した指標 ks を変数するモデルを提案している．

$$h = A_0(\theta) \cdot (ks)^{A_1(\theta)} \quad (5.6)$$

ここで， A_0 と A_1 は，入射角に依存するパラメーターである．入射角を一定とすると， A_0 と A_1 は定数となる．裸地観測データより推定した h と，同時に測定した粗度高さ s の複数のデータセットより， A_0 と A_1 を決定した．

(d) 粗度のスケール

一般に，波長よりも十分に大きな水平スケールをもつ周期的な地表の変化は，地表面散乱へ及ぼす影響が小さい [85]．むしろ，地表面散乱は，畝の表面にできる小さなスケールの粗度によって発生する．そこでは，畝によってできる大きなスケールをもつ地形を基準面とし，基準面上にできた小さなスケールの凹凸を地表面粗度と定義する．基準面は，地形をできる限り歪めずに抽出するために Savitzky-Golay の平滑重み係数による移動平均法を用い，移動平均区間を波長として周波数ごとに決定した．粗度高さは，基準面との差から算出した．

(e) 粗度推定結果

誘電率の計算にあたって，土壤特性に依存する各パラメーターは，三枝ら (1994)[101] による関東ローム土の測定結果を採用し，土粒子密度 $\rho_{ss} = 2.80 \text{ g/cm}^3$ ，土壤パラメーター $\alpha = 0.650$ ， $\beta = 1.644$ とした．図 5.3 に，az195, az210, az225 のそれぞれの裸地観測データを用いて推定した $ks-Q/h$ 関係を示す．

5.2 植生パラメーター b と単一散乱アルベド ω_c の推定結果と考察

5.2.1 クローバー推定結果

クローバーの解析結果を，図 5.4 に示す．12 月 8 日 16 時および 12 月 9 日 11 時のデータセットを用い， $b_{cl,fp}$ を 0～4 まで， 1×10^{-4} 刻みで変化させたときの $\omega_{cl,fp}$ の算定結果である．この 2 つの曲線の交点が求めるべき解となる．図中に円で交点を示す．表 5.3 には， $b_{cl,fp}$ および $\omega_{cl,fp}$ の推定結果を示す．12 月 8 日 16 時のデータから， $\omega_{cl,fp}$ をゼロのときの $b_{cl,fp}$ の値も併記する．これは，Jackson and Schmugge (1991) [80] が行なった単一散乱アルベドを無視して植生パラメーターを求める手法と同義である．以後， $\omega_{cl,fp}$ を考慮した場合を case1，無視した場合を case2 と呼ぶ．

なお， $b_{cl,fp}$ 決定時における光学的厚さは，各周波数とも 0.34～0.92 の範囲であった．3.3.3 節において感度に関して議論したが，対象としたクローバーが同手法の適正範囲にほぼ収まっている．

表 5.3: 植生パラメーターと単一散乱アルベドの推定結果

	植生パラメーター $b_{c,fp}$				単一散乱アルベド $\omega_{c,fp}$			
	10v	10h	18v	18h	10v	10h	18v	18h
クローバー (case1)	0.990	2.05	1.25	2.70	0.028	0.062	0.077	0.098
クローバー (case2)	0.788	1.35	0.494	0.950	-	-	-	-
ソバ (期間 1)	1.83	1.25	2.11	1.71	0.051	0.059	0.053	0.055
ソバ (期間 3)	1.93	1.93	2.40	2.24	0.061	0.085	0.059	0.063
ソバ (期間 4)	3.24	2.67	2.84	2.77	0.043	0.074	0.047	0.060

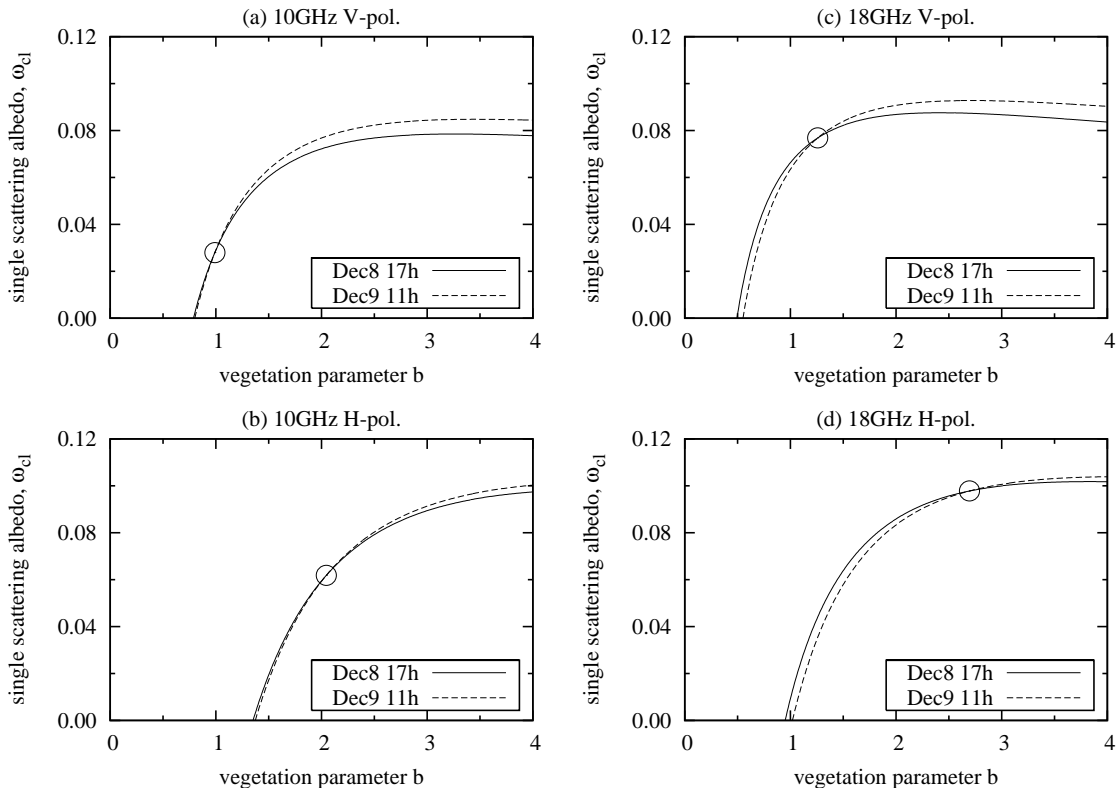


図 5.4: クローバーの $b_{cl,fp}$ と $\omega_{cl,fp}$ の算定

b_{cl} を 0~4 まで, 0.0001 刻みで変化させたときの $\omega_{cl,fp}$ 推定値. 実線は 12 月 8 日 17 時, 破線は 12 月 9 日 11 時の結果. それぞれの図は, (a)10GHz 垂直偏波, (b)10GHz 水平偏波, (c)18GHz 垂直偏波, (d)18GHz 水平偏波を示す. 円は両曲線の交点を示す.

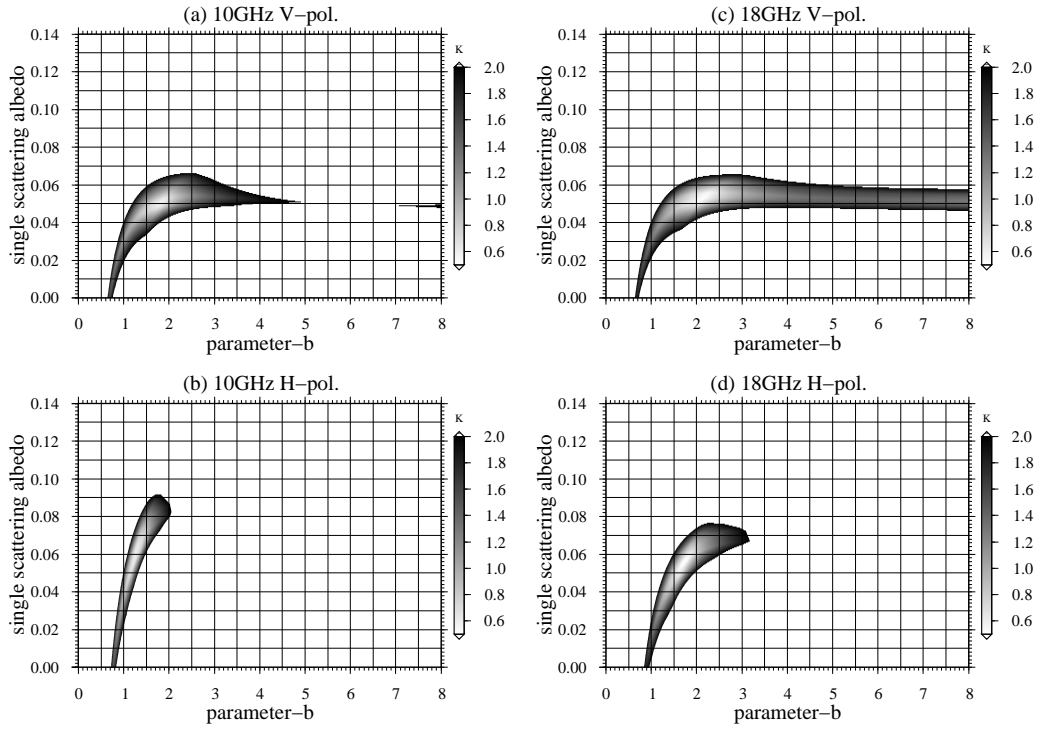


図 5.5: ソバの植生パラメーター b と単一散乱アルベド ω の同定 (期間 1)
 (a)10GHz 垂直偏波 . (b)10GHz 水平偏波 . (c)18GHz 垂直偏波 . (d)18GHz 水平偏波 . 植生パラメーター b と単一散乱アルベド ω を与えときの輝度温度推定値と観測値の差の絶対値の平均を表す .

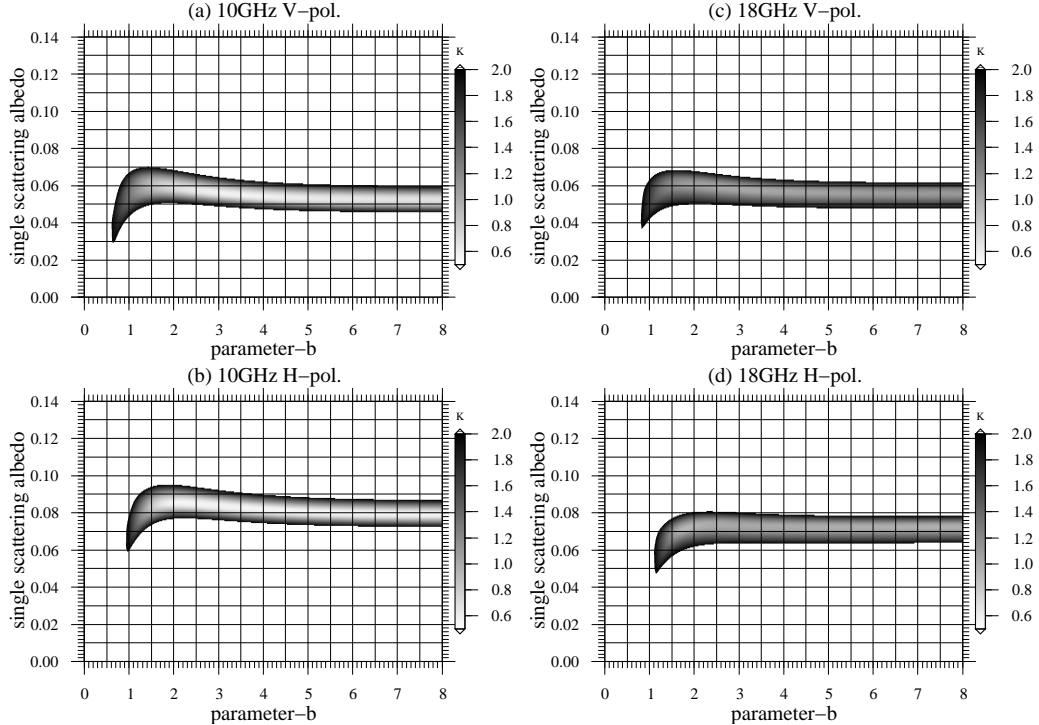


図 5.6: ソバの植生パラメーター b と単一散乱アルベド ω の同定 (期間 2)
 (a)10GHz 垂直偏波 . (b)10GHz 水平偏波 . (c)18GHz 垂直偏波 . (d)18GHz 水平偏波 . 植生パラメーター b と単一散乱アルベド ω を与えときの輝度温度推定値と観測値の差の絶対値の平均を表す .

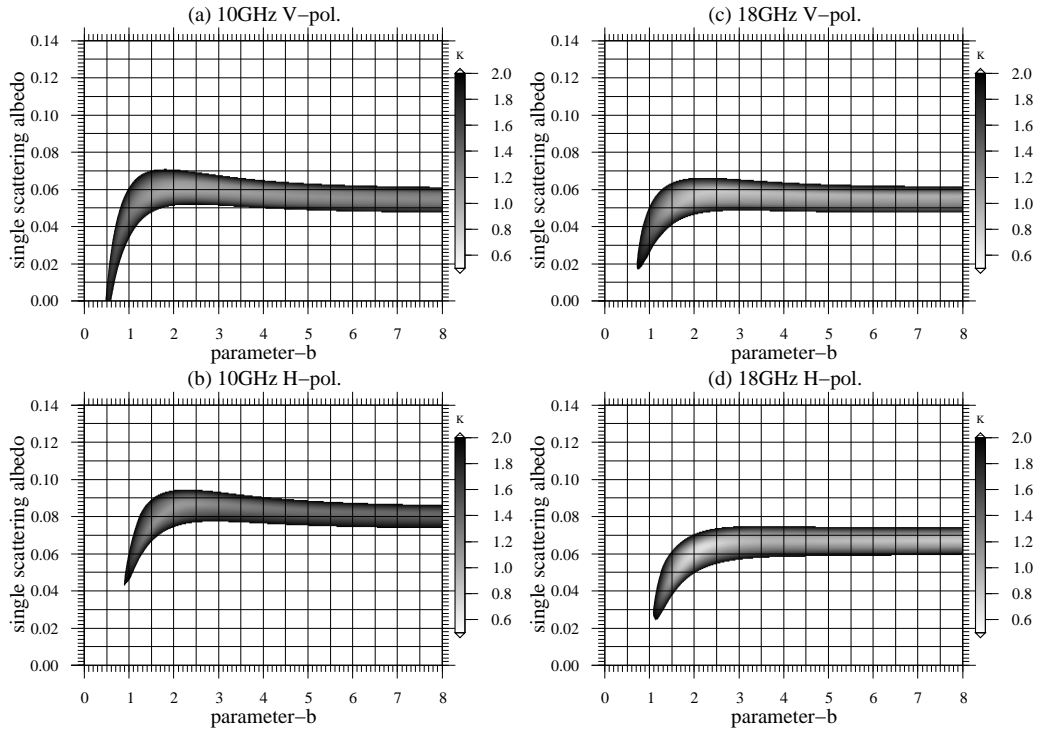


図 5.7: ソバの植生パラメーター b と単一散乱アルベド ω の同定 (期間 3)
 (a)10GHz 垂直偏波 . (b)10GHz 水平偏波 . (c)18GHz 垂直偏波 . (d)18GHz 水平偏波 . 植生パラメーター b と単一散乱アルベド ω を与えときの輝度温度推定値と観測値の差の絶対値の平均を表す .

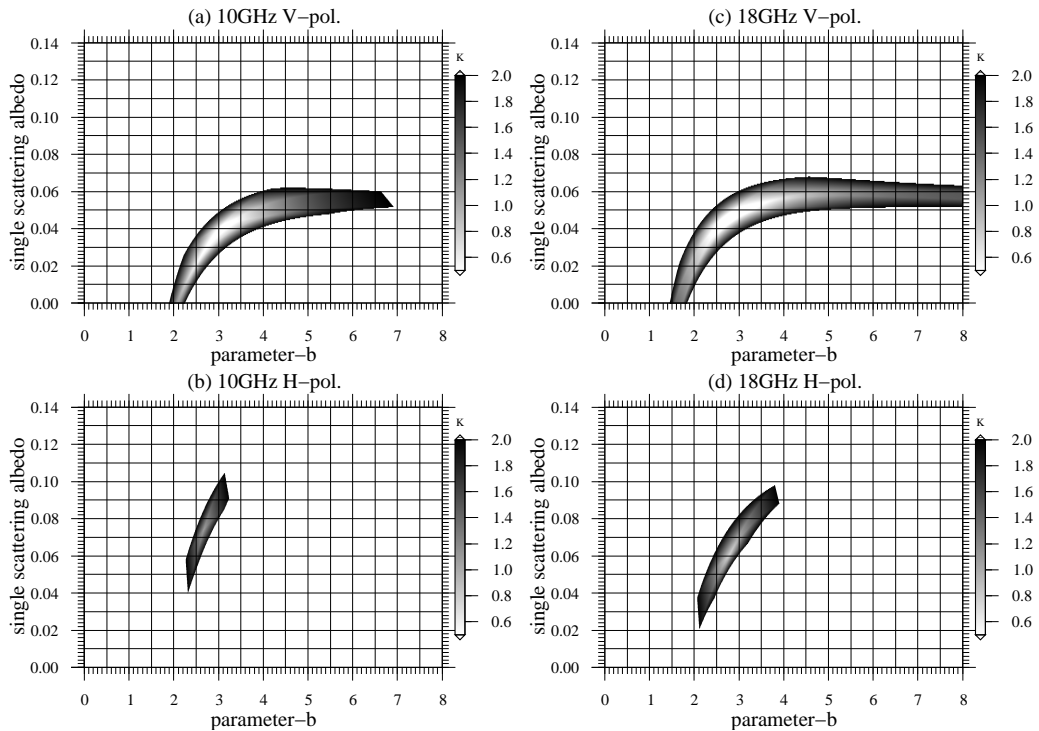
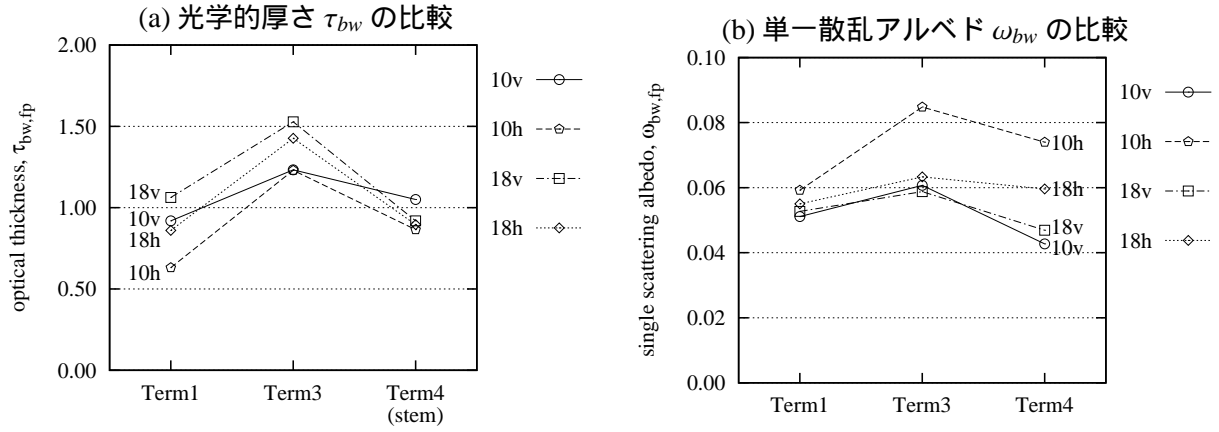


図 5.8: ソバの植生パラメーター b と単一散乱アルベド ω の同定 (期間 4)
 (a)10GHz 垂直偏波 . (b)10GHz 水平偏波 . (c)18GHz 垂直偏波 . (d)18GHz 水平偏波 . 植生パラメーター b と単一散乱アルベド ω を与えときの輝度温度推定値と観測値の差の絶対値の平均を表す . レーの領域は 3K 以内 . 1.5K 以内はカラーで示す .


 図 5.9: 光学的厚さ τ_{bw} と単一散乱アルベド ω_{bw} の比較 (ソバ観測)

期間 1・3・4 の (a) 光学的厚さ τ_{bw} と (b) 単一散乱アルベド ω_{bw} の比較 (折れ線グラフ)。(a) において、期間 1 と期間 3 の光学的厚さは、それぞれの期間における平均植生水分量と植生パラメーター b から算出。期間 4 の光学的厚さは、期間 4 の植生パラメーター b と期間 3 の茎の水分量により算出。

5.2.2 ソバ推定結果

ソバの解析結果を、図 5.5 ~ 図 5.8 に示す。期間ごとの $T_{B,err}$ の計算結果である。 b_{bw} を $0 \sim 10$, 1×10^{-3} 刻み, ω_{bw} を $0 \sim 0.15$, 1×10^{-4} 刻みで変化させたときの $T_{B,err}$ の分布図である。 $T_{B,err}$ が 2K 以下の領域をグレースケールで示す。図では、 b_{bw} を $0 \sim 8$ の範囲, ω_{bw} を $0 \sim 0.14$ の範囲を示す。

$T_{B,err}$ が 2K 以下となる領域を見ると、はじめ、 b_{bw} とともに ω_{bw} が増加し、ある程度 b_{bw} が大きくなると ω_{bw} は一定値となっている。図 3.9 に示した $b_{bw} - \omega_{bw}$ 関係と同じ形である。 $T_{B,err}$ が極小となる領域は変曲点付近に現れている。しかし、期間 2 のみ $T_{B,err}$ の極小となる領域が線に出現しており、 b_{bw} は一意に定まらない。期間 2 は最も植生水分量が多く、既に τ に対して感度を持たない範囲にある可能性が高い。そこで、期間 2 を解析対象から外し、期間 1,3,4 について、 $T_{B,err}$ が最小となる b と ω の組み合わせを求めた。表 5.3 に結果を示す。なお、期間 1,3,4 について推定した $b_{cl,fp}$ と平均植生水分量から、光学的厚さを求めると、 $0.6 \sim 1.5$ の範囲に収まり、ソバに関しても、適正範囲にある。

5.2.3 植生パラメーター b と単一散乱アルベド ω_c の推定結果に対する考察

(a) ソバの植生パラメーター

図 5.9(a) は、各期間の光学的厚さの推定結果を比較した折れ線グラフである。植生パラメーター $b_{bw,fp}$ を各期間の平均植生水分量によって光学的厚さ $\tau_{bw,fp}$ へ変換して比較した。期間 4 については、葉と実の影響が小さく、茎の形状が期間 3 とほぼ同一であるため、期間 3 の茎の水分量を適用した。期間 4 と期間 3 を比較することで、茎の効果と、それ以外の葉や実の効果を分けることができる。

 表 5.4: 各期間の λ' の値

	10GHz	18GHz
期間 1	5.3	3.5
期間 3	5.5	3.6
期間 4	5.9	4.0

(単位:mm)

はじめに、期間 4 の茎の光学的厚さに注目する。10GHz では垂直偏波と水平偏波の光学的厚さに差が見られるが、18GHz では偏波間の差が見られない。これは、3.4.1 節において議論した鉛直構造が卓越する植生の放射・吸収特性によるものと考えられる。放射・吸収特性の基準である λ' に対して、茎の径が、10GHz の λ' より大きく、18GHz の λ' 以下

である結果、それぞれ、異方性と等方性の違いが現れたと推察する。

具体的に、茎と径と λ' を比較するため、期間ごとに λ' の算定を行った。表 5.4 は、植生温度と植生含水率から各観測ごとに λ' を計算し、各解析期間で平均した値である。期間 4 における λ' の値は、10GHz で 5.9mm、18GHz で 4mm である。一方、茎の直径分布は図 4.15 に示す通りで、期間 4 の観測結果はないが、期間 2 以降成長が止まっているので期間 2 の直径分布を参照すると、直径 3mm ~ 5.5mm の茎が多いことが分かる。18GHz の λ' に対しては太い茎が多いが、10GHz の λ' に対しては細い茎が多い。10GHz の光学的厚さが異方性を示したと考える。

このように、植生パラメーター $b_{bw,fp}$ の推定結果は、茎の放射・吸収の観点から λ' の基準と一致する傾向を示した。

次に、期間 3 に注目する。図 5.2 によると、期間 3 の葉と実の水分量の合計は、茎の水分量とほぼ等しい。しかし、期間 3 の光学的厚さは、茎の光学的厚さを示す期間 4 と比較して 2 倍にはなっていない。葉や実の影響が茎の影響に比べて相対的に小さいことが分かる。

各周波数・偏波ごとに個々に光学的厚さを比較すると、期間 4 とは反対に、10GHz の光学的厚さは両偏波が等しく、18GHz の光学的厚さは偏波間の差が開いている。18GHz の光学的厚さが 10GHz の光学的厚さよりも大きく、かつ、18GHz では垂直偏波の光学的厚さが若干大きくなっている。期間 3 と期間 4 は、茎の径に変化はなく、また、 λ' の値も殆ど変わっていないことから、茎の影響は期間 4 と、あまり変わらないはずである。

このことを説明するために、葉の影響に着目する。期間 3 は実も存在するが、形状が球形に近いために偏波間の差が生じにくく、また、水分量が少ないことから、実の影響は小さいと考える。図 3.12(a) に葉の有効放射率を示したが、ソバのように水平方向（傾きがゼロ）に広がる葉の場合、10GHz の有効放射率は等しく、18GHz の有効放射率は垂直偏波が卓越する。ちょうど、期間 3 の光学的厚さと同じ傾向である。葉の影響は、相対的に茎よりも小さいが、葉の偏波特性が反映されていると推察できる。

最後に期間 1 を考える。期間 1 は、10GHz と 18GHz の光学的厚さは、ともに偏波間の差が開いている。ただし、茎の影響を示す期間 4 と比べると、10GHz は垂直偏波の光学的厚さが期間 4 と等しく、18GHz は水平偏波の光学的厚さが期間 4 と等しい。これは、それぞれ、茎の特性と葉の特性によるものと考えられる。

まず、10GHz から説明する。図 4.15 の茎の直径分布を参照すると、期間 1 の茎の径は 2.5mm ~ 4mm に分布している。10GHz の λ' は 5.3mm であり、茎の径の方が遥かに小さい。このような場合、図 3.11 に示したように水平偏波が小さくなる傾向にある。そのため、10GHz の光学的厚さは、垂直偏波が期間 4 と等しく、水平偏波のみが小さくなっていると考えられる。

一方、18GHz の λ' の値は 3.5mm であるため、半数以上の茎が λ' より大きい。茎は等方性の性質が強いと考える。それにもかかわらず、18GHz が大きくなっているのは、期間 3 と同様に、葉の影響が現れているためと考える。期間 1 は成長過程にあり、葉の含水率は期間 3 よりも高い。そのため、偏波特性が強くなり、期間 3 よりも偏波間の差が広がる傾向にある。

以上のように、ソバの各解析期間における植生パラメーター $b_{bw,fp}$ を光学的厚さで比較した結果は、茎と葉の放射・吸収特性の観点から、妥当な結果となった。

(b) ソバの単一散乱アルベド

単一散乱アルベドに関しては、形状、サイズに強く依存し、複雑な挙動を示すことから、放射・吸収特性のような明確な基準はない。単一散乱アルベドの推定結果の妥当性を評価するためには、

形状や傾き，サイズなどを考慮した散乱計算を行なう必要がある．また，前方散乱が卓越する場合は，散乱計算の結果に補正が必要となる [54, 36, 49]．たとえば，茎のような長い円柱は，前方散乱が卓越することが知られている [54, 105]．複雑な形状を有する植生に対して，それらの解析は容易ではない．ここでの地表面放射伝達モデルは，放射・吸収を主体におくことから，単一散乱アルベドの推定結果の妥当性の検討は割愛する．ただ，単一散乱アルベド $\omega_{bw,fp}$ と植生パラメーター b_{fp} は互いに独立ではない．放射・吸収に基礎を置く放射伝達モデルによって同時推定した結果，放射・吸収特性を表わす植生パラメーター b_{fp} が妥当な結果を示したことは，単一散乱アルベドの推定結果にとっても意味がある．以下，単一散乱アルベドの推定結果に基づいて，考察を行う．

図 5.9(b) の期間 4 の結果を見ると，水平偏波の単一散乱アルベドは垂直偏波より大きな値となっている．特に 10GHz が大きい．これに対し垂直偏波では，18GHz と 10GHz の値がほぼ等しい．

一般に，対象物のサイズが極端に小さい Rayleigh 領域では散乱が小さいが，対象物のサイズが波長と同じオーダーになると，Mie 領域となって散乱が極大となり，さらに，対象物のサイズが大きくなると，光学的領域となって散乱は一定値に近づく．単一散乱アルベドは消散と散乱の比であるが，Mie 領域のような散乱が極大となる場合，単一散乱アルベドも大きくなる可能性が高い．Mie 領域の極大となる時の対象物のサイズと波長との関係は，一定ではなく，主に対象物の屈折率の実部に依存して変化する [3, 中島]．

このような観点から期間 4 の結果をみると，1 つの見解として，電界の向きが茎の軸に平衡な垂直偏波が光学的領域に相当し，軸方向に直角な水平偏波が Mie 領域に相当しているものと想定できる．

表 5.5: 各構成要素の単一散乱アルベド (ソバ期間 3)

	葉と実	茎 (期間 4)
10v	0.164	0.043
10h	0.110	0.074
18v	0.077	0.047
18h	0.070	0.060

また，期間 4 は主に茎によって構成されているため，期間 3 と期間 4 を比較することによって，茎と，それ以外の葉や実の影響を分離できる．ただし，複数の要素を含む場合の単一散乱アルベドは，式 (3.14) のように光学的厚さによる重みつき平均の形式で表わされる．そこで，次式を用いて算定する．式 (3.14) を変形し，

$$\omega_{fp} = \frac{\omega_{3,fp}\tau_{3,fp} - \omega_{4,fp}\tau_{4,fp}}{\tau_{3,fp} - \tau_{4,fp}} \quad (5.7)$$

ここに，添え字の数値は，解析期間の番号を表わす．表 5.5 は，各周波数・偏波ごとの算定結果である．

植生パラメーター $b_{bw,fp}$ は茎の影響が卓越していたが，単一散乱アルベド $\omega_{bw,fp}$ は，茎以外の葉や実の方が大きくなっている．ただし，葉と実の影響は，このデータからは分けることはできない．また，期間 1 については，茎のサイズが期間 4 と異なることから，上式を適用することができない．

(c) ソバとクローバーの比較

図 5.10 において，ソバとクローバーの植生パラメーターおよび単一散乱アルベドの比較を行う．クローバーは茎と葉で構成され，茎は，直径 1mm 程度である．生育初期のために株が小さく，鉛直方向へ伸びている茎が多い．葉は，水平に近い傾きを持ち，大きさは 1cm から 2cm 程度である．葉のサイズ分布は図 4.18 の az195 に示す．図 5.2 の項目 c に示したように，ソバに比べて葉が占める割合が多い．

まず，縦軸に示した植生パラメーター b_{fp} について考える．5.2.3 節 (a) では，ソバ期間 3 の植生パラメーターに，葉の影響によって偏波間の差が生じていることを指摘したが，クローバーと比較すると，ソバの偏波間の差は小さい．等方性を示す茎の影響が大きいことが改めて認識できる．

クローバーでは，水平偏波が垂直偏波の 2 倍近く大きな値をとっている．ソバは垂直偏波の方が大きかったが，逆の現象である．これは，クローバーの葉の放射率の特性と一致している．図 3.12(b) に示したクローバーの有効放射率は水平偏波が卓越していた．また 18GHz の有効放射率が 10GHz より大きく，周波数に関してクローバーの植生パラメーターの大小関係は一致している．このことを踏まえると，クローバーの植生パラメーターの推定値も，妥当な結果であると考えられる．

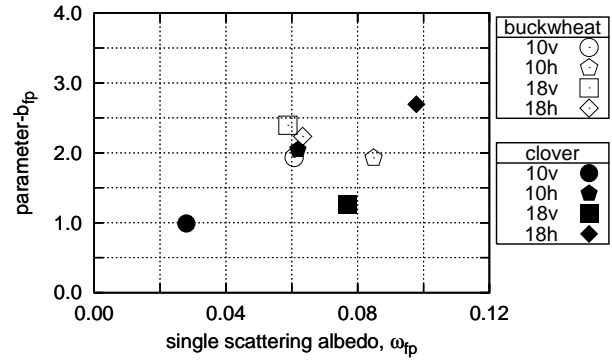


図 5.10: ソバ(期間 3)とクローバー (case1) の植生パラメーターと単一散乱アルベドの比較

次に，横軸に示した単一散乱アルベドについて考える．単一散乱アルベドでも，クローバーとソバには大きな違いがある．特に周波数特性が異なる．ソバと同じく，推定結果の妥当性についての考察は割愛するが，1 つの見解としては，波長の短い 18GHz の方が単一散乱アルベドが大きくなっていることから，10GHz が Rayleigh 領域側に，18GHz が Mie 領域側もしくは光学領域に相当していると想定できる．ちなみに，幾何学的な大きさの比較をすると，クローバーは 1cm ~ 2cm の葉が多いのに対し，18GHz の波長は 1.6cm，10GHz は 2.8cm である．なお，ソバとクローバーの比較は，大きさや葉厚さ，茎と葉の分量などが，異なることから，単純な比較はできない．

5.3 検証

前節においてクローバーとソバの植生パラメーター b_{fp} と単一散乱アルベド $\omega_{c,fp}$ を推定した．ソバの解析では，成長段階ごとに特徴が異なることから 4 つの期間に分割し，それぞれの期間で植生パラメーター b と単一散乱アルベド ω_c を推定した．その結果，茎と葉の特徴を反映した結果を得た．

本節では，植生の成長に伴う特徴の変化が，輝度温度と植生水分量の推定に及ぼす影響について検討する．クローバーの解析は，成長段階毎に植生パラメーター b と単一散乱アルベド ω_c の推定を行っていないが，異なる生育状態のフットプリントへ適用することによって植生の成長に伴う特徴の変化の及ぼす影響を検討する．また，クローバーの検討では，ミクセルモデルと層モデルの比較，case1 と case2 の推定手法の比較を合わせて行なう．さらに，Jackson and Schmugge (1991) [80] によって提案された植生パラメーター b のソバ観測データへ適用し，従来モデルの問題点を明らかにする．

なお，前節で推定した植生パラメーター b_{fp} と単一散乱アルベド $\omega_{c,fp}$ の組み合わせを，パラメーターセットと呼ぶことにする．

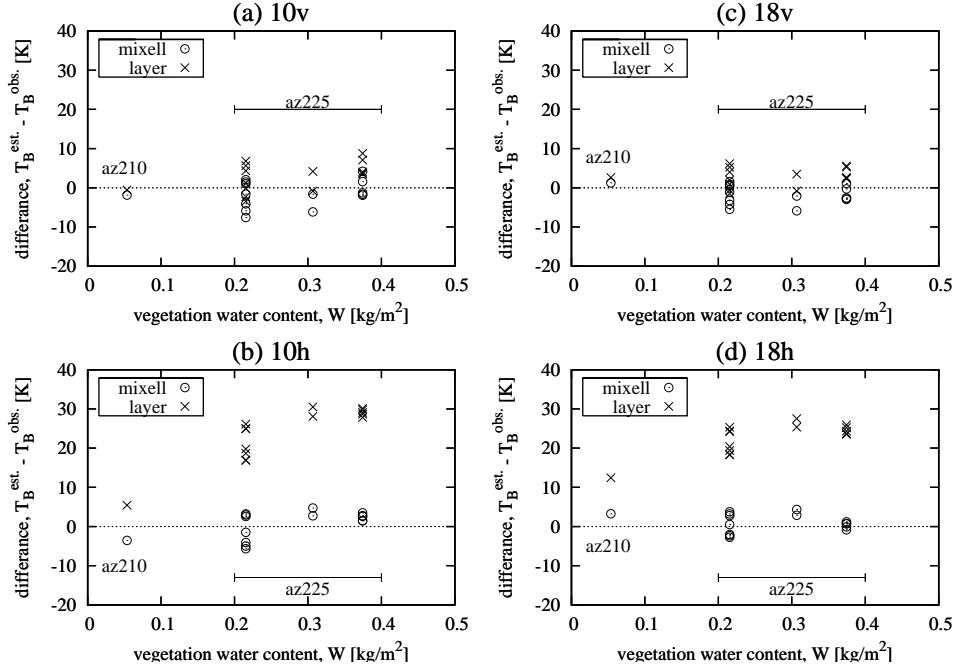


図 5.11: クローバーエリアでのマイクロ波輝度温度推定結果 (Case1)

横軸は植生水分量．縦軸は推定値と観測値との偏差．az225 と az210 における結果を示す．mixell と layer は，それぞれミクセルモデルと層モデルの推定結果．各図は，(a)10GHz 垂直偏波，(b)10GHz 水平偏波，(c)18GHz 垂直偏波，(d)18GHz 水平偏波を示す． $b_{cl,fp}$ と $\omega_{cl,fp}$ を同時推定した結果 (表 5.3 クローバー case1) を適用．

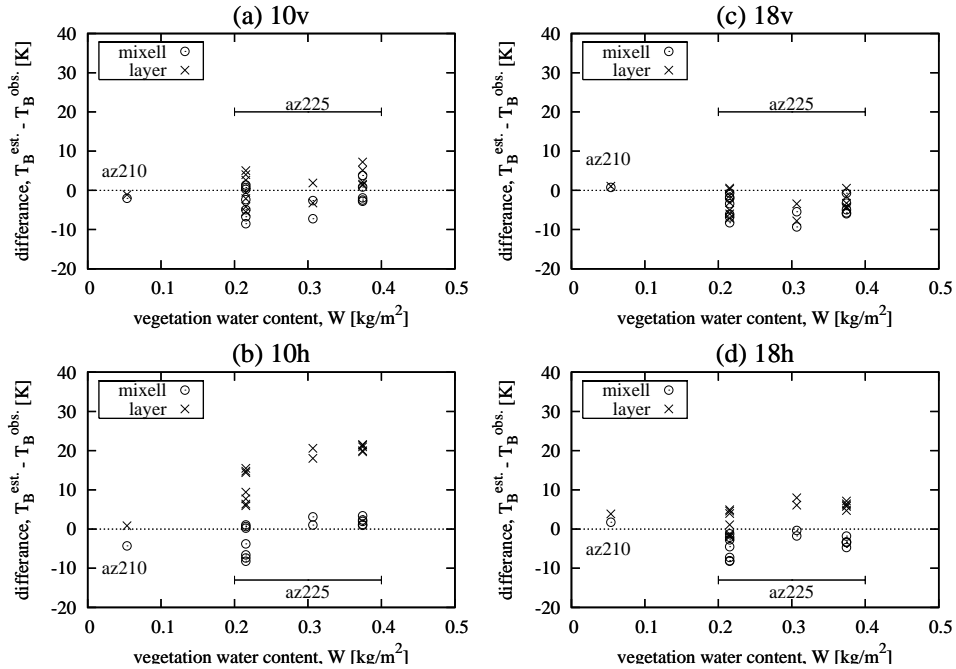


図 5.12: az225 におけるクローバーエリアでのマイクロ波輝度温度推定結果 (Case2)

横軸は植生水分量．縦軸は推定値と観測値との偏差．az225 と az210 における結果を示す．mixell と layer は，それぞれミクセルモデルと層モデルの推定結果．各図は，(a)10GHz 垂直偏波，(b)10GHz 水平偏波，(c)18GHz 垂直偏波，(d)18GHz 水平偏波を示す． $\omega_{cl,fp} = 0$ として $b_{cl,fp}$ を推定した結果 (表 5.3 クローバー case2) を適用．

表 5.6: クローバーモデルの推定精度比較

parameter	model	10v	10h	18v	18h
Case1	ミクセルモデル	2.9(3.2)	3.2(3.4)	2.4(2.4)	2.1(2.2)
	層モデル	3.8(3.5)	23.9(6.8)	3.0(2.3)	22.6(3.9)
Case2	ミクセルモデル	3.2(3.3)	3.1(3.8)	4.4(2.9)	3.6(2.7)
	層モデル	3.2(3.6)	14.5(6.6)	3.3(2.8)	4.5(3.2)

輝度温度推定値と観測値の差の絶対値の平均．() 内の数値は差の標準偏差を示す．(単位：K)

5.3.1 クローバー観測における検証

5.2.1 節において推定した az195 の植生パラメーター $b_{cl,fp}$ と単一散乱アルベド $\omega_{cl,fp}$ を az225 と az210 へ適用し，輝度温度の推定値と観測値を比較する．図 5.11 と図 5.12 は，それぞれ，case1 と case2 の $b_{cl,fp}$ と $\omega_{cl,fp}$ を用いて輝度温度を推定した結果である．横軸に植生水分量，縦軸に輝度温度の推定値と観測値の差を示す．それぞれの図において，ミクセルモデルと層モデルの 2 通りの計算を行なった結果をプロットする．

解析に使用したデータは，

- az225: 11 月 14, 26 日, 12 月 8 ~ 10 日
- az240: 12 月 8 日 17 時のみ

である．図中に，元データを取得したフットプリント名を記す．az225 の 11 月 21 日のデータは，観測日前後に粗度観測を行っていないので対象から外した．また，5.1.2 節のソバのデータセットと同じように，朝露，日射，温度不均一性を含むデータを対象外とした．az240 は，植生が非常に少ないこと，畝による傾斜分布が大きいことにより，日射を受けて土壌面温度の不均一性を生じやすく，植生の効果を的確に評価できない可能性が高い．そのため，最も安定した条件のデータのみを使用した．実際，晴天日には，畝の北斜面と平坦部で最大 14K の温度差を観測している．採用した 12 月 8 日 17 時のデータは，曇天の日没時に取得しており，フットプリント内の最大と最小の温度差が 1K 以内の収まっている．また，植生サンプルは 12 月 10 日に実施しており，植生水分量のデータも比較的信頼度が高い．

表 5.6 に，輝度温度の推定値の精度をまとめる．推定値と観測値の差の絶対平均と，差の標準偏差を示す．前者は推定値の誤差の程度を，後者は推定値のバラツキ度合いを表している．観測データには測定誤差が含まれているが，平均値を用いることにより，測定誤差による影響を軽減し，モデルの適合性を強調できる．

(a) 輝度温度の推定結果

以上のように，2 通りの推定手法と 2 つのモデルの組み合わせ，合計 4 通りの方法により輝度温度を推定した．その結果は，case1 のミクセルモデルが最も良い適合性を示した．case1 のミクセルモデルは， $b_{cl,fp}$ と $\omega_{cl,fp}$ を同時に推定した結果を用いて，植生被覆率を考慮した計算結果である．

図 4.18 に示すように，パラメーターを推定した az195 と，検証を行った az225 は，葉のサイズが異なる．しかし，輝度温度の推定結果は，az210 の植生水分量少ない状態から，成長を追って植生量が増加する az225 の状態までの一連の観測値と良く一致しており，その誤差は，表 5.6 によれば，2.1K ~ 3.2K である．

(b) 植生被覆率の導入効果

ミクセルモデルは、図 5.13(a) のように、1 つのフットプリント内に植生域と裸地域が混在する場合、図 5.13(b) のように植生と裸地の 2 種類に分離し個別に輝度温度を求めている。これに対し、層モデルは、図 5.13(c) のように、植生水分量が等しい 1 つ植生層として扱っている。つまり、フットプリント内に均一にならした平均植生水分量を用いて輝度温度を推定している。3.2.4 節 (a) で述べたとおり、植生水分量と光学的厚さは線形であるが、光学的厚さと輝度温度は非線形であるため、層モデルは誤差が生じやすい。

図 5.11 に示した case1 において層モデルの結果をミクセルモデルと比較すると、層モデルの推定結果は、垂直偏波においてミクセルモデルと同程度であるが、水平偏波では 20K 以上も誤差が生じていることが分かる。ただし、植生水分量が小さくなると、層モデルの推定値は観測値へ近づいている。

これは、3.2.4 節 (c) で触れたように、水平偏波のほうが V_c の寄与が大きいためである。土壌表面の放射率の違いによって水平偏波は植生域との裸地域のコントラストが大きいことによる。たとえば、極端な例として、植生が十分に茂っている状態を考える。十分に植生が茂っている場合、植生域地表面からの放射は式 (3.15) で表わせる。ここに改めて書くと、

$$T_{B,fp} \approx (1 - \omega_{c,fp}) \cdot T_c \quad (5.8)$$

である。式 (5.8) を、等方性の半無限媒体からの放射を示す式 (2.108) と比較すると、同じ形式を持つことから、十分に植生が茂っている地表面からの射出は、反射率 $\omega_{c,fp}$ と物理温度 T_c を有する半無限媒体からの放射とみなすことができる。土壌面の反射率は、垂直偏波が 0.1 以下、水平偏波が 0.2 ~ 0.3 程度の値をとる。単一散乱アルベドは、垂直偏波では土壌面の反射率と比較的近いが、水平偏波では小さい。この差が、層モデルにおいて水平偏波が過大評価となる原因である。これとは逆に、植生量が少ない場合は、相対的に植生の寄与が小さくなるため、水平偏波でも、誤差が小さくなる傾向にある。

適切な植生被覆率を与えることにより、植生水分量の幅広いレンジに渡り、このような誤差を回避できる。

(c) 推定手法の評価

従来利用されることの多い解析手法である case2 は、3.3.1 節において述べたように、単一散乱アルベド $\omega_{c,fp}$ を無視してパラメーターセットを決定するため、植生パラメーター b_{fp} が過小に評価されている。これは水分量に独立な単一散乱アルベドを無視することによって生じる影響を水分量の関数である光学的厚さに転化することになり、その結果が植生パラメーターの値に反映されることになる。クローバー観測結果から、過小評価された植生パラメーター b_{fp} と単一散乱アルベドをゼロとすることの影響を考察する。

図 5.14 に、植生パラメーター b_{fp} と単一散乱アルベド $\omega_{c,fp}$ に含まれる誤差が輝度温度算定に与える影響をまとめる。 $b_{fp} = 1.0$ 、 $\omega_{c,fp} = 0.08$ である植生に対して、図 (a) と図 (b) は、それぞれ、

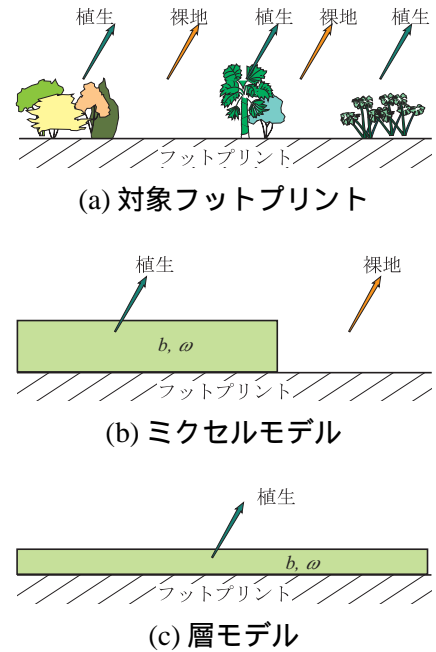


図 5.13: 植生域地表面の放射伝達モデル概念図

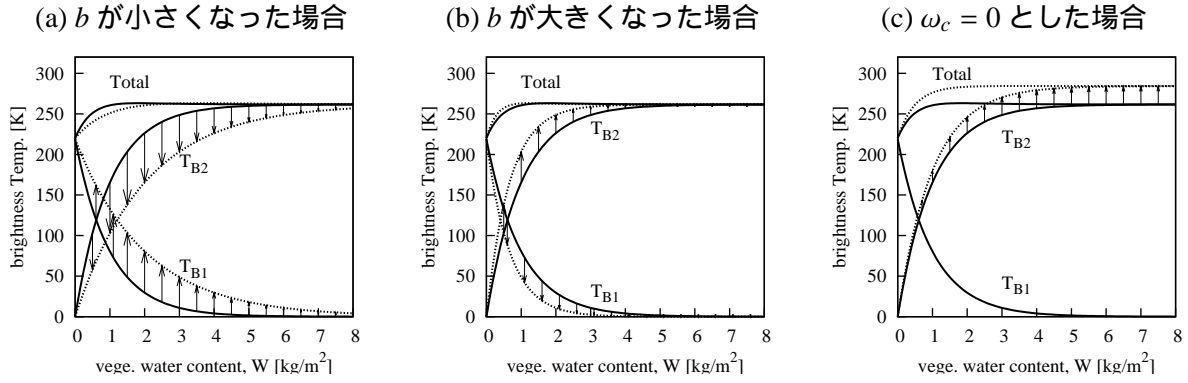


図 5.14: 単一散乱アルベド ω_c と植生パラメーター b の影響
 $b = 1.0$, $\omega_c = 0.08$ である植生 (実線) において, b と ω_c が変化したときの輝度温度への変化 (点線) を表す. (a) b 小さくなった場合 ($b = 0.5$), (b) b が大きくなった場合 ($b = 1.5$), (c) $\omega_c = 0$ とした場合. 計算条件は図 3.4(b) に同じ. 各図中に, 土壌面からの放射 $T_{B,fp,1}$, 植生からの放射 $T_{B,fp,2}$, および, 4 成分の合計 'Total' を示す.

b_{fp} がマイナスの誤差を持つ場合とプラスの誤差を持つ場合である. 図 (c) は $\omega_{c,fp}$ をゼロとした場合である. 図 (a)(b) から, b の影響は, 植生からの放射と土壌面からの放射の双方へ影響を及ぼし, 数十ケルビンの影響があることが分かる. しかし, お互いに, 放射と吸収, 反対に働くために, 双方が打ち消しあって植生層全体としては輝度温度の変化は小さくなる傾向にある. 全体として b_{fp} に含まれる誤差の影響は, 光学的厚さに対する感度が最も良い「適度に」水分量がある状態のときに最大となり, b_{fp} がマイナスの誤差を持つ場合には輝度温度が過小評価され, b_{fp} がプラスの誤差を持つ場合には過大評価される. これに対して, 図 (c) の ω_c の影響は植生の放射のみに現れる. 全体の輝度温度は過大評価され, かつ, 誤差は植生水分量の増加とともに大きくなる.

case2 のパラメーターセット用いた輝度温度の推定には, 図 (a) の b_{fp} がマイナスの誤差を持つ場合と, 図 (c) の $\omega_{c,fp}$ がゼロの場合の 2 つの影響が含まれている. 「適度な」水分量の植生を対象とした場合, この 2 つの影響がお互いに相殺して誤差が小さくなる傾向にある. そのため, 表 5.6 に示した case2 のミクセルモデルは, 比較的良好な結果を示している. だが, case1 のミクセルモデルに比べれば差が大きく, 図 5.11 と図 5.12 を見比べると, 輝度温度推定値は, case2 のミクセルモデルが若干過小評価となっている. b_{fp} による過小評価が $\omega_{c,fp}$ の過大評価を上回っている. また, 表 5.6 の標準偏差の値が case1 に比べて大きく, case2 の推定値にバラツキが大きいことを示している. これは, 単一散乱アルベドが植生温度に掛かる係数で, 植生パラメーターが植生水分量に掛かる係数であることに起因すると考える. 特に, 日変化観測のように植生温度の変動が大きい場合, 推定値の誤差にバラツキ多くなる.

case2 の層モデルは, 従来の植生放射伝達モデルの考え方を踏襲するモデルである. この場合, 層モデルとすることで, 植生からの放射が過大に評価されているが, case2 のパラメーターセットを用いことによる過小評価のため, 誤差が相殺される傾向にある. case1 の層モデルと case2 の層モデルを比べると, case2 の層モデルの推定値の方が観測値に近い. しかし, 10GHz 水平偏波のように, 依然として 20K 近い誤差が残っている. 植生被覆の影響が大きいと推察する.

以上のように, 従来の方法は, 複数の要因が相互に働き, 結果として輝度温度に推定に及ぼす影響が小さくなる傾向にある. しかし, 物理条件が異なると, 誤差が突出する可能性が高い.

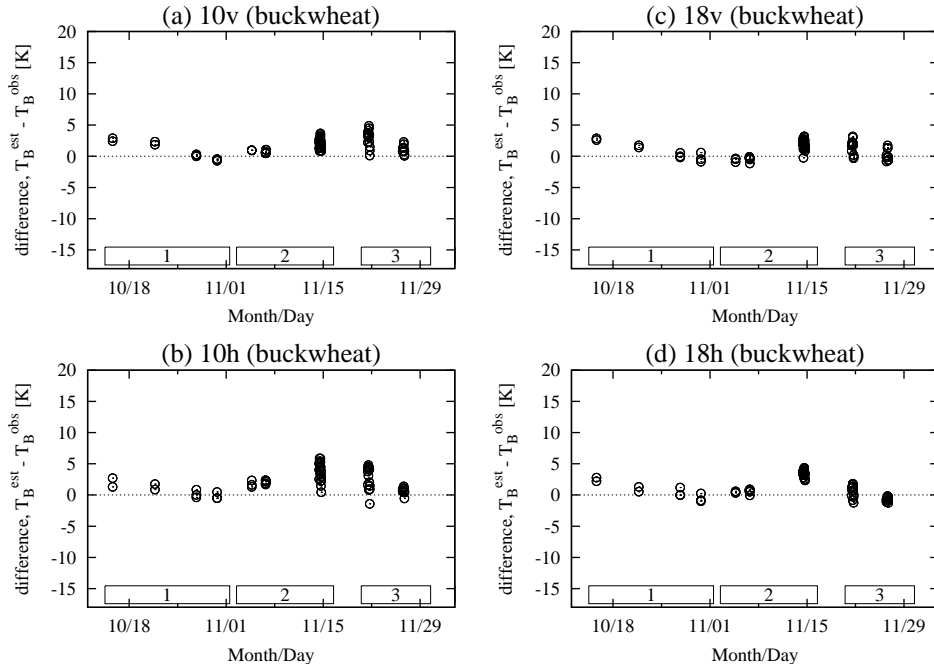


図 5.15: パラメーターセット P-1 による輝度温度推定結果
縦軸は輝度温度推定値と観測値の差，横軸は時間を示す．また，解析期間番号を横軸に明記する．各図は，(a)10GHz 垂直偏波，(b)10GHz 水平偏波，(c)18GHz 垂直偏波，(d)18GHz 水平偏波．

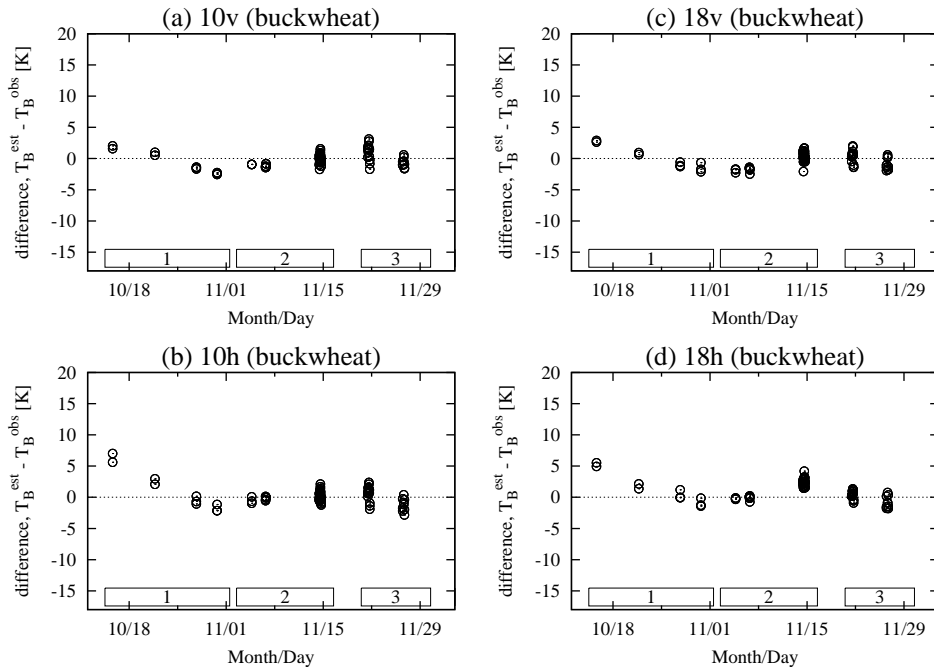


図 5.16: パラメーターセット P-3 による輝度温度推定結果
縦軸は輝度温度推定値と観測値の差，横軸は時間を示す．また，解析期間番号を横軸に明記する．各図は，(a)10GHz 垂直偏波，(b)10GHz 水平偏波，(c)18GHz 垂直偏波，(d)18GHz 水平偏波．

表 5.7: ソバ期間 1-3 におけるマイクロ波輝度温度推定精度

パラメーターセット	適用期間	10v	10h	18v	18h
P-1	期間 1	1.2 (1.3)	0.9 (1.0)	1.1 (1.2)	1.0 (1.2)
	期間 2	1.8 (0.9)	3.4 (1.5)	1.6 (1.3)	2.6 (1.4)
	期間 3	2.3 (1.4)	2.2 (1.8)	1.3 (1.2)	0.9 (1.0)
	期間 2-3	2.0 (1.2)	2.9 (1.8)	1.5 (1.2)	1.9 (1.7)
P-3	期間 1	1.7 (1.7)	2.5 (3.1)	1.5 (1.7)	1.8 (2.3)
	期間 2	0.8 (0.8)	0.6 (0.8)	1.0 (1.2)	1.8 (1.3)
	期間 3	1.2 (1.4)	1.3 (1.5)	1.0 (1.1)	0.8 (1.0)

輝度温度推定値と観測値の差の絶対値の平均。() 内の数値は差の標準偏差を示す。P-1 と P-3 はソバの解析期間 1 と 3 のパラメーターセット。各パラメーターセットによる推定結果を適用期間毎に集計した。(単位: K)

5.3.2 ソバ観測における検証

5.2.2 節において推定したソバの植生パラメーター $b_{bw,fp}$ と単一散乱アルベド $\omega_{bw,fp}$ のパラメーターセットを用いて、輝度温度を推定し観測値と比較する。ここでは、期間 1、期間 3、期間 4 の結果を、それぞれ、パラメーターセット P-1, パラメーターセット P-3, パラメーターセット P-4 と呼ぶ。解析期間 4 のソバは落葉しており、明らかに他の解析期間と形状が異なる。そのため、解析期間 1, 2, 3 を対象とする。

図 5.15 と図 5.16 は、期間 1～期間 3 までのデータセットから推定した輝度温度の結果である。縦軸が推定値と観測値との差、横軸が観測日である。図 5.15 が P-1 の適用結果で、図 5.16 が P-3 の適用結果である。各解析期間ごとに集計した推定精度を表 5.7 にまとめる。表 5.6 と同様に、推定値と観測値の差の絶対平均と標準偏差を示す。

図 5.15 と図 5.16 のパラメーターセット P-1 と P-3 の適用結果は、全期間にわたり観測値と良く一致している。表 5.7 によれば、それぞれのパラメーターセットが持つ精度、つまり、P-1 と P-3 を決定したそれぞれの期間における差の絶対平均が 0.8K～1.3K 程度であるのに対し、P-1 と P-3 を他の期間へ適用した結果も、おおむね 2K 以内に収まり、最大でも 3.4K である。

ここで、各解析期間におけるソバの特徴を再度確認する。詳細は 5.1.2 節に述べた通りであるが、要約すると、図 5.17 になる。まず、植生の成長による幾何学的特徴の変化、サイズの変化や個数の増加などの変態は、期間 1 から期間 2 にかけて起こり、期間 2 から期間 3 にかけては一定である。一方で、植生が保持する水分の割合は、期間 1 と期間 2 がほぼ等しく、期間 2 から期間 3 にかけて減少する。

このデータの特性の踏まえると、水分条件の変化に対する検討は、期間 3 のパラメーターセット P-3 を期間 2 に適用した結果によって評価できる。表 5.7 に示した P-3 の適用結果を参照すると、期間 2 への適用結果は、18v を除き期間 3 よりも小さくなっており、バラツキを示す標準偏差も小さい。18v は期間 2 の方が大きいとその値は 1.8K である。このことから、含水率の変化によるパラメーターセットへの影響はないと言える。3.2 節において、植生パラメーター b_{fp} と単一散乱アルベド $\omega_{c,fp}$ を水分量に独立な変数として仮定したが、観測結果からもその妥当性が伺える。

このように、パラメーターセットが植生含水率に対して独立であることを踏まえると、P-1 を期間 2 と期間 3 へ適用した結果と、P-3 を期間 3 へ適用した結果を比較することにより、植生の成長に

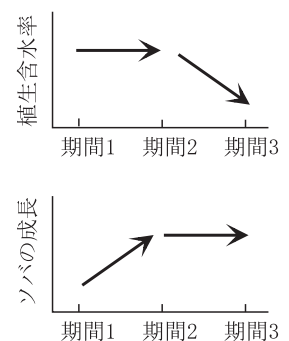


図 5.17: 解析期間毎のソバの特徴

対するパラメーターセットの適合性を評価できる．表 5.7 に示した P-1 の期間 2-3 への適用結果と P-3 の期間 1 への適用結果を参照すると，成長に伴う幾何学的特徴の変化の影響は，最大で 2.9K 以内に収まっている．特に，10GHz 水平偏波を除けば 2.0K 以内である．また，P-1 と P-3 の結果は，P-3 の方が全般に良い適合性を示す．植生の寄与は，植生水分量が増加するほど大きくなることから，植生水分量の多い期間 3 で推定したパラメーターセット P-3 の方が P-1 よりもソバのパラメーターセットとしての代表性が高いと考える．

しかしながら，10GHz 水平偏波に関しては，他の周波数・偏波に比較し，誤差が大きい．図 5.16 において期間 1 における P-3 の結果を個々にみると，生育初期になるほど誤差が大きくなっており，推定値が過大評価になっている．また，比較的精度の良い 18GHz 水平偏波も，10 月 15 日の結果は差が大きい．これに対し，垂直偏波は期間 1 でも一様に精度を有している．この水平偏波の挙動は，これまで議論してきた鉛直要素をもつ植生の放射・吸収特性に起因すると推察する．5.2.3 節 (a) において，放射・吸収特性の 1 つの基準である λ' と茎の径の比較を行なったが，茎の径が λ' 以下になると，異方性が生じ，水平偏波の光学的厚さが小さくなっていた．P-3 による推定値が生育初期ほど過大に評価するのは，異方性が原因であると考ええる．

以上のことから，放射・吸収特性の基準である λ' を境として，植生パラメーター $b_{bw,fp}$ と単一散乱アルベド $\omega_{bw,fp}$ の適合性を整理できる． $b_{bw,fp}$ と $\omega_{bw,fp}$ はソバの成長段階を追って一定値と見なせ，その精度は 2K 以内である．ただし，茎の径が λ' 以下の場合，水平偏波の精度が低下する．

5.3.3 植生水分量による放射伝達モデルの精度評価

これまで，輝度温度によってモデルの精度評価を行ってきた．しかし，同じ 1K の精度でも，植生の存在が寄与する程度は偏波や周波数ごとに異なる．そこで，輝度温度推定値と観測値の差の絶対平均によって表わした放射伝達モデルの精度を，物理量である植生水分量に換算して評価する．

(a) 精度評価方法

以下の手順で求めた差を，植生水分量換算誤差とする．図 5.18 に評価方法の概要をまとめる．

- (1) 土壌水分，地温，植生温度の仮定する．
- (2) それぞれの植生タイプに対する植生パラメーター b_{fp} と単一散乱アルベド $\omega_{c,fp}$ によって輝度温度 T_B を求める (図中の実線，曲線 T_B の)．
- (3) 表 5.6 と表 5.7 に示した周波数・偏波ごとの輝度温度推定の誤差の絶対平均 $\overline{T_{B,err}}$ を T_B へ加え，輝度温度の変動の範囲とする．このときプラスとマイナスの 2 通り計算する．それぞれ曲線 $T_B + err$ と曲線 $T_B - err$ とする．
- (4) ある植生水分量 W_c を設定し，そのときの輝度温度 T_B を求める．図 5.18 には， 0.2kg/m^2 の場合を示した．

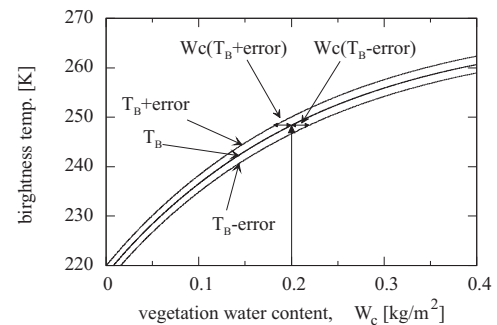


図 5.18: 精度の評価方法

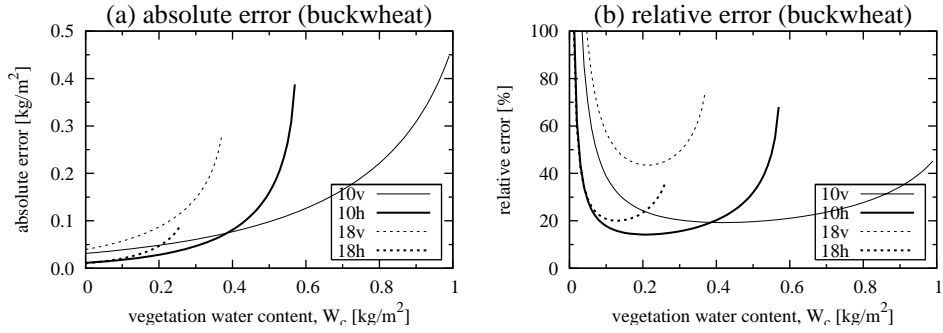


図 5.19: 植生水分量による評価 (ソバ)

計算条件は図 3.4 に同じ．誤差範囲は表 5.7 の P-3 期間 1 の結果を使用．(a) 絶対誤差．(b) 相対誤差

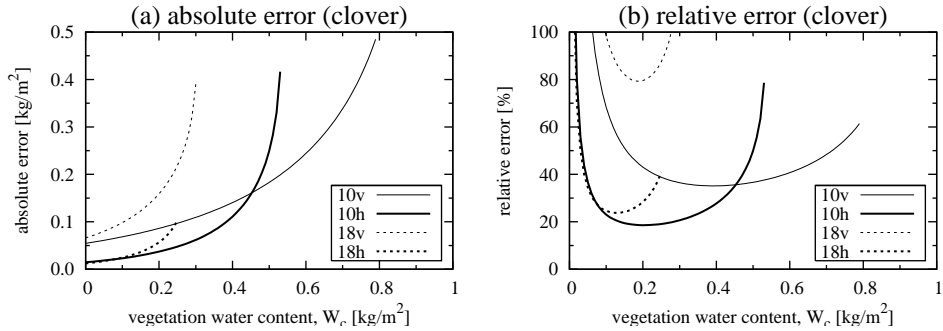


図 5.20: 植生水分量による評価 (クローバー)

計算条件は図 3.4 に同じ．誤差範囲は表 5.6 の case1 ミクセルモデルの結果を使用．(a) 絶対誤差．(b) 相対誤差

(5) 曲線 $T_B + err$ と曲線 $T_B - err$ において， T_B となるときの水分量をもとめる．それぞれ，植生水分量 $W_c(T_B + err)$ と $W_c(T_B - err)$ とする．

(5) 植生水分量の差 $|W_c(T_B + err) - W_c|$ と $|W_c(T_B - err) - W_c|$ を比較し，大きな値を植生水分量換算の誤差と定義する．

(b) ソバとクローバーにおける精度評価

図 5.19 と図 5.20 に，ソバとクローバー植生水分量換算誤差を示す．それぞれ，図 (a) が植生水分量の絶対誤差，図 (b) が絶対誤差を植生水分量で除した相対誤差である．この解析における土壌水分，地温，植生温度の条件には，図 3.18 に示した観測条件を用いた．

はじめに，図 5.19 のソバの結果を見る．この図から，周波数・偏波ごとに精度が異なり，それぞれ植生水分量に対して適正範囲があることが分かる．10GHz の方が 18GHz よりも精度がよく，偏波を比べると水平偏波の方が良好である．18GHz 垂直偏波は，相対誤差 50% 程度であるが，他の周波数・偏波は，20% 前後の精度を有している．

植生水分量に対する適正範囲は 10GHz の方が広く，10GHz 水平偏波は，約 $0.05\text{kg/m}^2 \sim 0.45\text{kg/m}^2$ の範囲で相対誤差 30% 以下である．10GHz 水平偏波は，輝度温度評価値が 2.5K で最も輝度温度の差の絶対平均の値が大きかった．ところが，植生水分量に対する輝度温度の感度が良いことから，植生水分量で評価した場合は最も精度が良くなっている．18GHz 水平偏波も同様に輝度温度の感

度が良いことから、適正範囲では、良い精度を示している。前節において、水平偏波では λ' より細い茎になると茎の放射特性が変化することを指摘したが、植生水分量の算定に当たって、その影響は小さいと言える。

10GHz 垂直偏波は、輝度温度の感度が水平偏波よりも鈍いため、精度が水平偏波よりも僅かに劣るが、輝度温度の精度が良いため、幅広い植生水分量のレンジで等しい精度を有し、およそ $0.15 \sim 0.8 \text{ kg/m}^2$ の植生水分量の範囲で、相対誤差 30% 以下である。

18GHz 垂直偏波は、輝度温度評価値で 1.5K と最も精度が良かったが、土壌面の放射が高いことから植生水分量の変化に対する輝度温度の感度が最も鈍く、10GHz 垂直偏波よりも悪くなっている。植生水分量から輝度温度を推定する場合は影響が少ないが、逆に輝度温度からの植生水分量の推定する場合は、輝度温度の僅かな変化が水分量の算定に反映されやすい。

次に、図 5.20 のクローバーの結果を見る。クローバーにおける精度は、ソバと同じ傾向を示しているが、全般的にソバに比べて精度が悪いことが分かる。特に垂直偏波の精度が低下している。18GHz 垂直偏波では、植生水分量が適正範囲にある 0.2 kg/m^2 付近でも相対誤差が 80% となっている。

これは、輝度温度の精度の評価をした対象が、植生と裸地が混在するフットプリントであったことが原因と考える。裸地域からの放射の精度は、土壌水分や地温の不均一性のほか地表面の粗度の精度によっても左右される。クローバーの解析では、植生と裸地が混在するためミクセルモデルによって評価した。そのため、クローバーの輝度温度評価値には、裸地の輝度温度誤差が直接含まれている。水平偏波と垂直偏波を比較すると、土壌面の放射率は、水平偏波が小さく、垂直偏波が大きい。このことは、裸地面の誤差が垂直偏波においてミクセルモデルに反映されやすいことを意味する。

最も土壌面の放射が小さい 10GHz 水平偏波をソバと比較した場合、相対誤差 20% を有しており、また、適正範囲もソバとほぼ等しいことから、クローバーの放射伝達モデルもソバと同等の精度を有していると考える。

5.3.4 従来のパラメーターセットの検証

図 5.21 と図 5.22 は、Jackson and Schmugge (1991) [80] の植生パラメーター b を適用した結果である。葉が卓越した植生の代表であるダイズの植生パラメーター b と、茎が卓越した植生の代表であるコムギの植生パラメーター b を用いて計算した。両者とも単一散乱アルベドをゼロとおき、それぞれ、パラメーターセット j -s と j -w と呼ぶ。植生パラメーター b は、式 (3.3) によって周波数ごとに求め、入射角の余弦で除すことにより、伝搬経路長の補正を行なった結果を用いている。表 5.8 に植生パラメーター b の値を示す。

表 5.8: Jackson and Schmugge (1991) による植生パラメーター b

モデル	10GHz	18GHz
ダイズ	2.5	5.3
コムギ	0.66	1.2

Jackson and Schmugge (1991) [80] は水平偏波のモデルであるが、植生層が等方性媒体であると仮定して、垂直偏波へも水平偏波の値を適用した。対象としたデータは、ソバ観測で解析を行なった az150, az180, az187 のデータを使用した。これらのフットプリントは、ソバとクローバーが混在しているため、 j -s, j -w をソバのパラメーターセットとして用い、クローバーのパラメーターセットは、表 5.3 のクローバー case1 を使用した。

ソバは、図 4.4 のように横方向に広がる葉を有する植生である。しかし、葉が卓越した植生の代表であるダイズのパラメーターセット j -s は、約 15K も過大に輝度温度を評価している。むしろ、

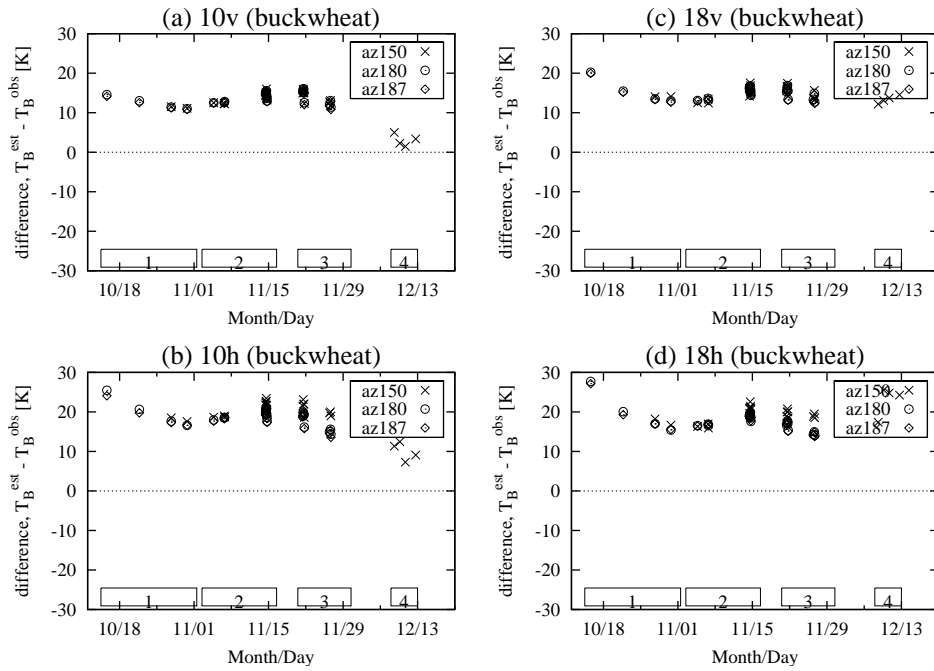


図 5.21: パラメーターセット j-s による輝度温度推定結果

縦軸は輝度温度推定値と観測値の差，横軸は時間を示す．また，解析期間番号を横軸に明記する．各図は，(a)10GHz 垂直偏波，(b)10GHz 水平偏波，(c)18GHz 垂直偏波，(d)18GHz 水平偏波．

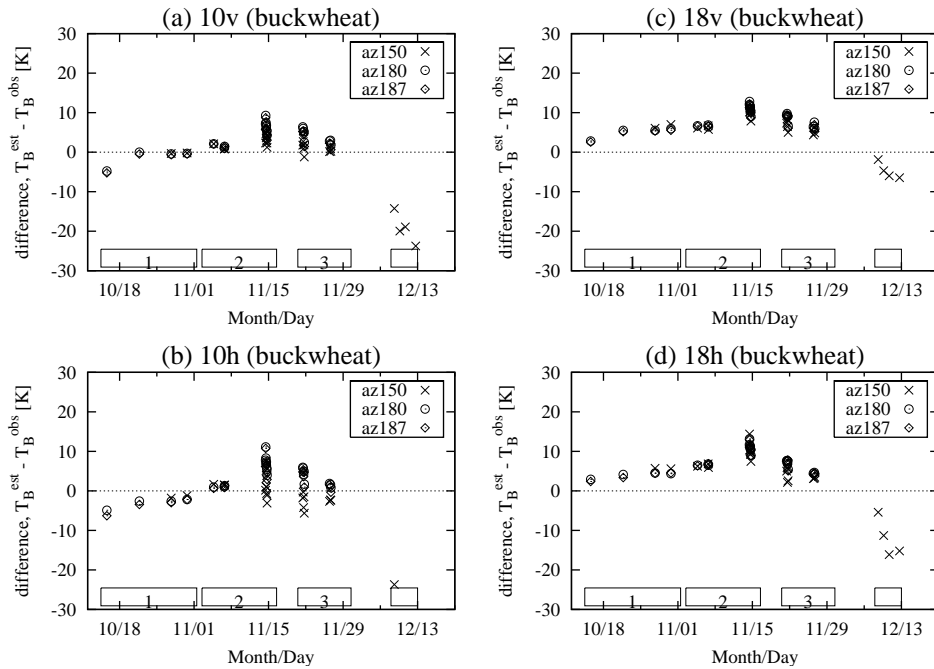


図 5.22: パラメーターセット j-w による輝度温度推定結果

縦軸は輝度温度推定値と観測値の差，横軸は時間を示す．また，解析期間番号を横軸に明記する．各図は，(a)10GHz 垂直偏波，(b)10GHz 水平偏波，(c)18GHz 垂直偏波，(d)18GHz 水平偏波．

茎が卓越した植生の代表であるコムギのパラメーターセット j-w の方が、観測値に一致している。ソバのように水平方向に広がる葉を持った植生でも、入射角が大きい場合、茎が卓越した植生に近い挙動を示すことが分かる。しかしながら、j-w の結果も、期間を通してみると、観測値との差は一定ではなく、変化に傾向が見られる。期間 1 から期間 2 にかけて差が大きくなっていき、期間 2 から期間 3 にかけて小さくなっている。ちょうど、植生水分量の増減の傾向と同じである。

ここで、パラメーターセット j-s と j-w に含まれる誤差について考えてみる。Jackson and Schmugge (1991) [80] のモデルは、

- (1) 単一散乱アルベドをゼロとして b を決定したことによる過小評価、
- (2) 輝度温度に算定にあたり、単一散乱アルベドをゼロとしたことの影響、
- (3) 入射角依存性の有無、

などの誤差要因を含む。これらのうち、(1) と (2) については、5.3.1 節 (c) において議論した。(3) 影響については、入射角依存性がある植生では光学的厚さは大きくなるため、パラメーターセット j-w の b は、実際の植生の b よりも小さく評価することとなる。したがって、(1) と (3) が過小評価、(2) が過大評価である。

パラメーターセット j-s と j-w のどちらのモデルも、(1) と (3) の過小評価の影響を含んでいる。しかし、パラメーターセット j-s を用いた場合は、 b の値が大きいために、同じ植生水分量でも、パラメーターセット j-s を用いた場合に比べて光学的厚さが大きくなる。光学的厚さが大きい場合、(2) の影響が強まるため、図 5.21 のパラメーターセット j-s の結果は、全体的に過大評価となったと考える。

一方で、図 5.21 のパラメーターセット j-w の結果は、ちょうど、過小評価と過大評価がバランスした状態である。(1) と (2) による過小評価と (3) による過大評価が相殺され、輝度温度の差が小さくなっている。しかし、水分状態に応じて両者の大きさが変化するため、輝度温度の差も変化している。植生水分量が少ない初期の段階は過小評価であるが、成長にともない水分量が多くなると過大評価へ移行する。逆に、水分量が低下する期間 2 から期間 3 にかけては、再び輝度温度差が小さくなっている。はじめ、(1) と (3) の影響があるものの、成長によって植生の影響が強まると (2) の影響により過大評価になると推察できる。結果として、植生の成長による変化を表現できず、推定値の精度が水分量によって変化したと考える。10GHz の水平偏波は、11 月 14 日以降バラツキが大きくなっているが、土壌面の変化を反映した結果と考える。az150 のデータは、他のフットプリントに比べて、バラツキが大きい。このフットプリントは、11 月 7 日にクローバーの刈り取りを行っているため、背景となる土壌面状態の変化による影響が大きい。

以上のように、従来のパラメーターセットは、植生の成長による変化を表現できず、推定精度が一様でない。また、水分量に独立な単一散乱アルベドを無視することによって生じる影響を水分量に掛かる係数である植生パラメーターに転化しているため、温度条件によっても誤差が大きくなる可能性がある。

5.4 他の植生への適用

5.4 節においては、成長に伴う幾何学的特徴の変化に対する各パラメーターセットの適合性について検討した。5.3.1 節のクローバーの検討では、裸地の影響を踏むデータで評価を行い、3.2K の精度でパラメーターセットが一定と見なせ、5.3.2 節のソバの検討では、2K 以内の精度パラメー

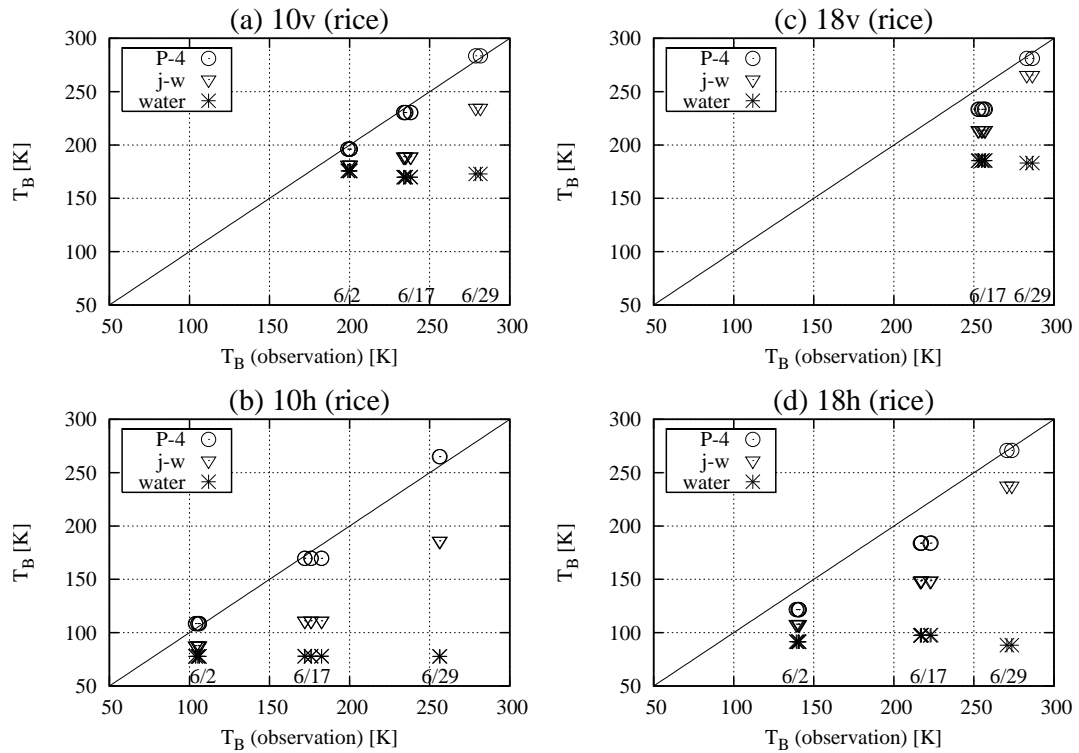


図 5.23: イネのマイクロ波輝度温度推定結果

イネ測におけるマイクロ波輝度温度観測値 (横軸) と推定値 (縦軸) の比較。P-4 は、ソバの解析期間 4 における $b_{bw,fp}$ と $\omega_{bw,fp}$ の推定値を適用した結果。j-w は、Jackson and Schmugge (1991) [80] によるコムギの b を適用した結果。観測値として、6 月 3 日および 17 日は GBMR 測定値、6 月 29 日は AMR 測定値を使用した。横軸上に観測日を示す。各図は、(a)10GHz 垂直偏波、(b)10GHz 水平偏波、(c)18GHz 垂直偏波、(d)18GHz 水平偏波。また、water は水温から計算した水面における放射 (縦軸)。

表 5.9: イネ観測における輝度温度推定精度

観測日	P-4				j-w			
	10v	10h	18v	18h	10v	10h	18v	18h
6 月 2 日	3.7	3.4	-	18.5	18.5	17.3	-	32.2
6 月 17 日	5.2	7.1	21.4	35.0	46.5	65.6	41.0	70.2
6 月 29 日	3.3	8.8	3.6	1.6	45.4	70.3	19.2	34.4

輝度温度推定値と観測値の差の絶対値の平均値。P-4 は、ソバ解析期間 4 の結果を適用した結果。j-w は、Jackson and Schmugge (1991) [80] のコムギの結果を適用した結果。各パラメーターセットの推定結果を解析期間毎に集計した。(単位: K)

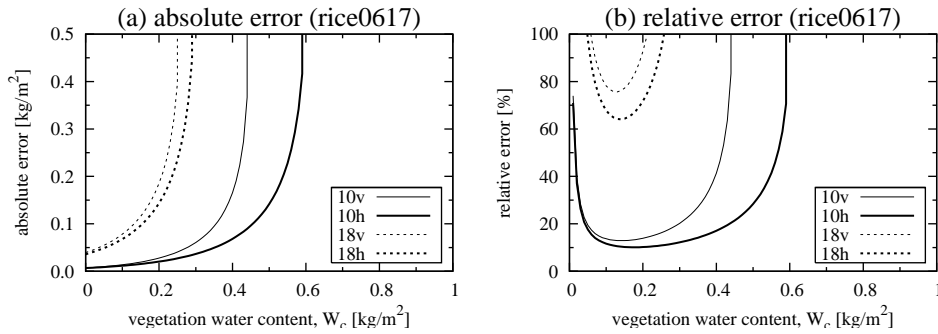


図 5.24: 植生水分量による評価(イネ, 6月17日)

計算条件: 植生被覆率 100%, 水温 28.8 度, 植生温度 25.9 度. 誤差範囲は表 5.9 の 6 月 17 日の結果を使用. (a) 絶対誤差. (b) 相対誤差

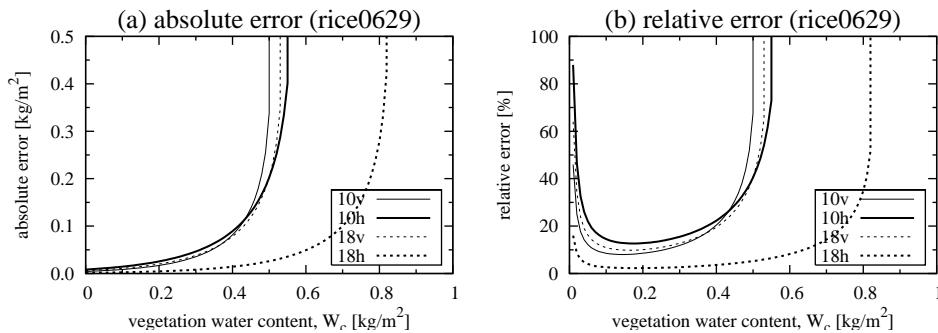


図 5.25: 植生水分量による評価(イネ, 6月29日)

計算条件: 植生被覆率 100%, 水温 28.8 度, 植生温度 25.9 度. 誤差範囲は表 5.9 の 6 月 29 日の結果を使用. (a) 絶対誤差. (b) 相対誤差

ターセットを一定と見なせることを明らかにした. 本節では, さらに, 幾何学的特徴が比較的近い植生へ, これらのパラメーターセットを適用し, その精度を評価する.

5.4.1 イネへの適用

イネは, 図 4.6 のように鉛直要素が卓越する植生である. そこで, ソバ観測結果のパラメーターセット P-4 を適用する.

水田のように水面で覆われている場合は, 無風であれば粗度を考える必要がなく, 鏡面として取り扱うことができる. また, 水面の放射率が低いために植生からの放射が卓越し, 植生の放射の効果を評価するのに適している.

解析には, 風の影響がない, 6 月 3 日, 17 日, 29 日の観測データを用いた. この期間に植生水分量が 0.036kg/m^2 から 0.511kg/m^2 まで変化している. イネの状態は, 6 月 3 日と 17 日は, 中干し前の分けつ期間にあり, まだ茎は伸びておらず, 水面から出ているのは, 葉身と呼ばれる葉の平らな部位だけである. これに対し, 29 日は中干しをした後で, 十分に茎が伸びた状態に鳴っている. 同じ鉛直方向に卓越した植生であるが, さらに細かく分類すると, 中干しを境にして, 板状のだけで構成される植生と, 板状の葉と円柱状の茎で構成される植生に分かれる. ソバの茎は円柱形状であるため, 植生形状は後者に近い.

図 5.23 に, 輝度温度の推定値と観測値の比較を示す. ソバのパラメーターセット P-4 のほか, Jackson and Schmugge (1991) [80] のコムギのパラメーターセット j-w によって輝度温度を推定し

た．また，water は，水温から算定した水面放射の輝度温度を表している．水面つまり植生層下部境界における輝度温度と観測値との差が，イネが存在することによって変化した輝度温度の範囲を意味する．この図では，water から 45 度線までが植生の影響を指す．

まず，ソバ P-4 の結果をみる．形状の近い 6 月 29 日の推定結果は，10GHz も 18GHz も，よく観測値と一致している．たとえば，6 月 29 日の 10GHz 水平偏波は，200K 以上の変動範囲を持つなかで，推定値と観測値の差は 8.8K である．これに対し，葉だけで構成されている 6 月 3 日と 17 日は，10GHz で良く一致しているものの，18GHz では，18K～35K の誤差がある．図 5.24 と図 5.25 は，5.3.3 節と同様の方法で，輝度温度の推定誤差を植生水分量によって評価した結果である．それぞれ，6 月 17 日の結果と 6 月 29 日の結果を示す．図 5.25 の 6 月 29 日の結果は，各周波数・偏波ともに相対誤差 20% 以内に収まっている．図 5.24 の 6 月 17 日の結果は，18GHz で精度低下がみられ，輝度温度 18K～35K の誤差は，植生水分量の相対誤差で 65%～80% に対応している．このことから，次のように考える．構成要素の形状および方向性が一致していれば，ソバのパラメーターセットの適合性は良い結果を示す．ただし，周波数が高く波長が短くなるほど，植生の方向性だけではなく，形状の違いによる影響が大きくなる．

次に，図 5.23 において，Jackson and Schmugge (1991) [80] のコムギのパラメーターセット j-w の適用結果をみる．こちらは，全期間にわたり，推定値は過小に評価している．これは，5.3.4 節に上げた 3 の因子のうち，(1) と (3) の過小評価の影響が強いと考える．水田では，水面の放射が小さいために植生からの放射が卓越する．そのため，植生パラメーター b に含まれる (1) と (3) の影響を大きくなる傾向にある．

5.4.2 ダイズ・トウモロコシへの適用

ダイズとトウモロコシの観測データへソバのパラメーターセットを適用する．

ダイズは，図 4.7 に示すように，水平方向に広がる葉を持つ植生である．主径は円柱で鉛直に伸びており，形状は，ソバに近い．トウモロコシはイネ科の植物であり，形状はイネに近い．図 4.7 のように，鉛直方向に卓越しており，円柱の茎と，長い板状の葉で構成される．このような植生の形状を考慮し，ダイズにはパラメーターセット P-3，トウモロコシには，パラメーターセット P-4 を適用する．

ダイズ・トウモロコシ観測では，期間中ほとんど降水がなく，地表面は非常に乾燥した状態であったが，7 月 10 日に，午前 3 時から午前 9 時過ぎまで総雨量 80mm を超える降水があり，土壤水分が 30% まで上昇したため，このときのデータを使用する．また，日中は曇天が続き，植生温度や地表面温度が比較的一様であった．植生水分量は，ダイズ $1.09\text{kg}/\text{m}^2$ ，トウモロコシ $6.53\text{kg}/\text{m}^2$ である．

ソバ観測から推定したパラメーターセットをダイズ・トウモロコシ観測へ適用した結果を図 5.26 と図 5.27 に示す．横軸は観測時刻である．これらの図からは，10GHz 水平偏波を除き，トウモロコシ，ダイズともに，推定値と観測値が良く一致していることが分かる．11 時のデータは，降水後 2 時間ほどしか経過していないために葉の表面が十分に乾いておらず，観測値が水滴の影響を含んでいる可能性が高い．しかし，12 時以降は，推定値はと観測値の差は数 K である．

一方，10GHz 水平偏波は，最大で 7K の差がある．これは主に，ソバのパラメーターセットにおいて，10GHz の水平偏波の単一散乱アルベドの値が高いことに起因すると推察する．トウモロコシは，植生水分量が多いため，主として単一散乱アルベドによって，植生の放射が決まっていると見なせる．そこで，11 時のデータを除くトウモロコシ観測データから単一散乱アルベド $\omega_{c,fp}$ を求めると，0.055 となる．表 5.3 によると，ソバの 10GHz 水平偏波は 0.085 であり，トウモロコ

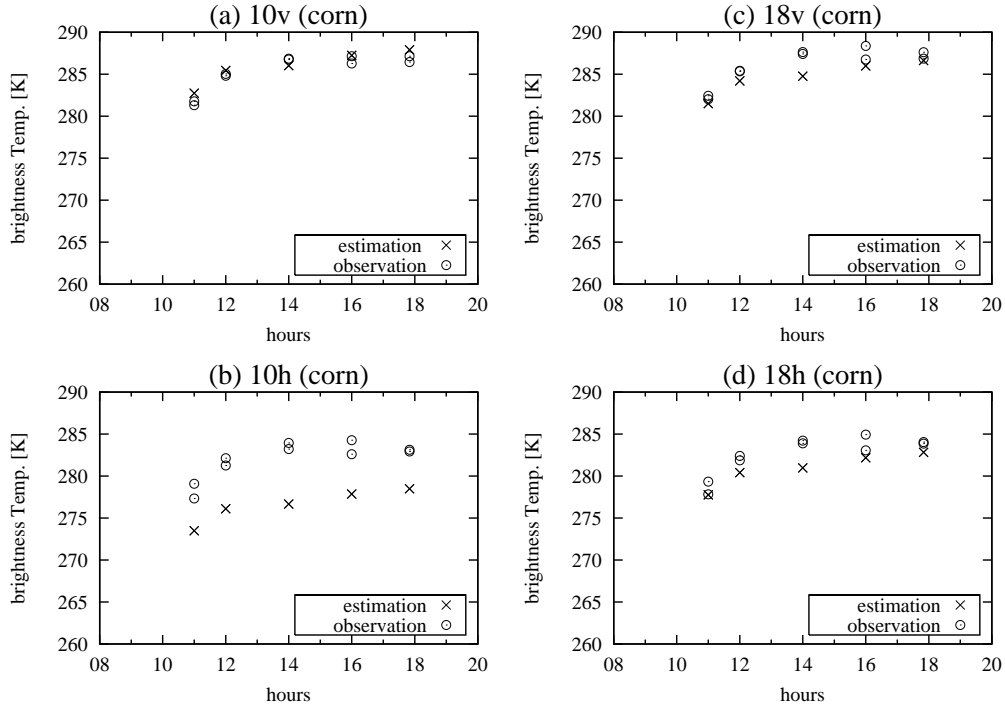


図 5.26: トウモロコシのマイクロ波輝度温度推定値と観測値の比較
2002 年 7 月 10 日観測データより．横軸は時間(米国中部標準時間)．縦軸は輝度温度．各図は，
(a)10GHz 垂直偏波，(b)10GHz 水平偏波，(c)18GHz 垂直偏波，(d)18GHz 水平偏波．

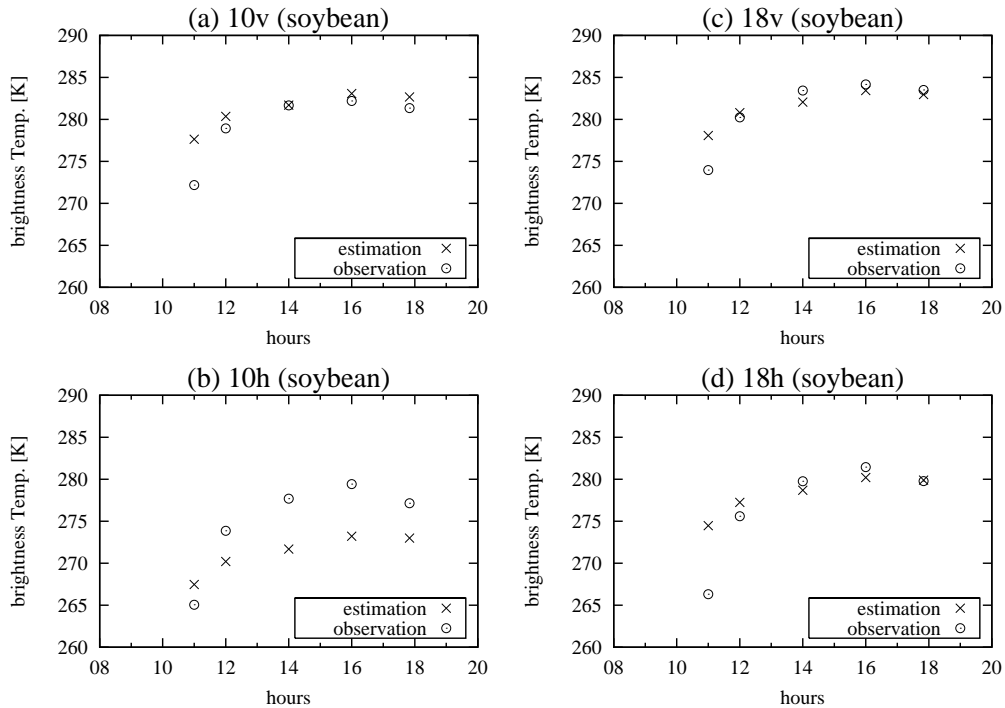


図 5.27: ダイズのマイクロ波輝度温度推定値と観測値の比較
2002 年 7 月 10 日観測データより．横軸は時間(米国中部標準時間)．縦軸は輝度温度．各図は，
(a)10GHz 垂直偏波，(b)10GHz 水平偏波，(c)18GHz 垂直偏波，(d)18GHz 水平偏波．

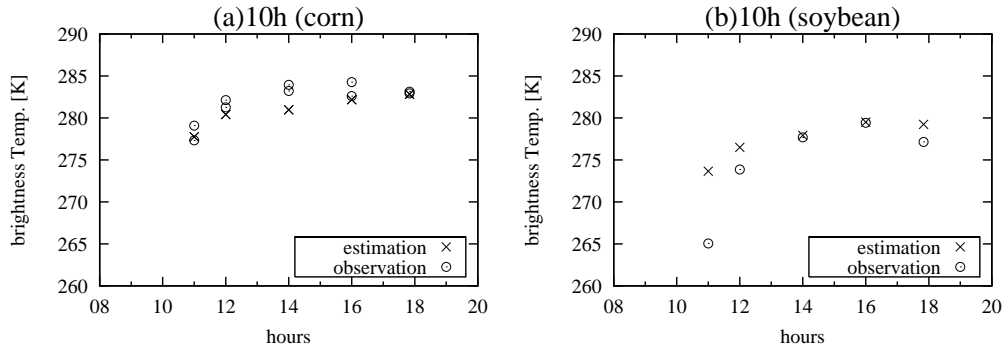


図 5.28: トウモロコシ・ダイズのマイクロ波輝度温度推定値と観測値の比較
18GHz 水平偏波の P-3 を 10GHz 水平偏波に適用した結果。(a) トウモロコシ。(b) ダイズ

シと比較すると 0.03 大きい。つまり、植生温度の値の 3% にあたる量が観測値と推定値の差となっている。

5.2.3 節 (b) において、ソバの単一散乱アルベドの推定結果に対する 1 つの見解として、10GHz は Mie 散乱の極大値、18GHz は光学的領域にある可能性について述べた。それに基づいて考えると、トウモロコシやダイズは、ソバよりも茎の径が太く、10GHz でも光学的領域である可能性が高い。参考までに、ソバ P-3 の 18GHz 水平偏波のパラメーターセットをトウモロコシとダイズの 10GHz 水平偏波に適用した結果を図 5.28 に示す。この図では、推定値と観測値が良く一致している。

5.5 まとめ

ソバとクローバーを対象に、植生パラメーター b_{fp} と単一散乱アルベド ω_{fp} のパラメーターセットの推定を行い、その検証を行った。ソバ解析では、生育段階を考慮して 4 つの解析期間を設け、植生水分量の変化に対する光学的厚さの感度がある期間 1、期間 3、期間 4 のパラメーターセットを推定した。また、クローバーは、最も植生被覆率が高い az195 においてパラメーターセットを推定した。それぞれのパラメーターセットの推定値は、幾何学的特徴に基づく放射・吸収特性の観点から、妥当な結果が得られた。

次に、得られたパラメーターセットによって成長段階を追って検証を行った。クローバーでは、状態の異なるフットプリントに適用し、植生水分量が $0.5 \sim 4.0 \text{ kg/m}^2$ の状態に対して、2.1K ~ 3.2K の精度を得た。ソバは、異なる期間へ相互に適用した結果、2.9K 以内に収まった。さらに、茎の径が、放射吸収特性の 1 つの基準である λ' 以上であれば、その精度は 2K 以内であった。茎の径が λ' より小さくなるほど、輝度温度の推定精度は低下する傾向にある。ただし、輝度温度から植生水分量の推定する場合、輝度温度の感度の違いから、水平偏波による植生水分量推定精度が最も良く、植生水分量が適正範囲にあれば、相対誤差 20% である。

また、クローバーの検証では、モデルおよび推定手法に対する検討を行った。植生被覆率を導入したミクセルモデルは、各周波数・偏波で同等の精度を有するのに対し、フットプリント内を均一と見なす層モデルは、水平偏波で著しい精度低下を示した。推定手法による検討では、単一散乱アルベドを無視して求めた場合と考慮した場合を比較した。単一散乱アルベドを無視して求めた場合は、考慮した場合に比べ、1K ~ 2K の精度低下がみられ、推定値のバラツキが大きくなる傾向を示した。

次に、Jackson and Schmugge (1991) [80] の結果を用いて同様の比較を行った。葉が卓越する植

生のダイズの結果と、茎が卓越する植生のコムギの結果の 2 つのパラメーターセットを適用した。ソバは、幾何学的にはダイズに近い特徴を持つが、比較結果は、茎が卓越する植生のコムギの結果を用いた推定値が、観測値に近い値を示した。しかしながら、期間全体を通して比較すると、観測値と推定値の差に植生水分量に正の相関をもつ傾きが見られた。これは、単一散乱アルベドがゼロと仮定していることに起因すると考えられ、成長に伴い植生水分量が増加すると、推定値が過大評価される傾向にある。

最後に、5.4 節において、ソバのパラメーターセットを用いてイネ、ダイズ、トウモロコシの評価を行い、その適合性について検討した。その結果、対象植生の主な構成要素の形状や方向性などの幾何学的な特徴が近い植生において、ソバのパラメーターセットによる推定値は観測値と良く一致した。また、ソバの 10GHz 水平偏波のパラメーターセットは、散乱の影響が大きい可能性を持つことも分かった。

第6章 総括

本論文は、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を目的とした。特に、多様な幾何学的特徴をもつ植生の評価、植生被覆の不均一性の影響評価に重点をおき、以下の検討を行った。

- 多様な植生の基礎データを取得するためのシステム開発。
- 衛星観測条件における詳細な植生データの取得。
- 植生の幾何学的特徴ならびに植生被覆の不均一性を考慮した地表面の放射伝達モデルの構築。
- 植生域地表面の放射伝達モデルの精度評価。

この目的のため、衛星搭載型のマイクロ波センサーにおいて利用されている周波数の中でも、植生観測に有利な 10GHz と 18GHz 帯に注目して検討を行った。詳細な植生観測を行うことができる規模に対応したマイクロ波輝度温度データを取得するため、地上可搬型マイクロ波放射計システムを開発し、代表的な植生における基礎データを取得してモデルの検討・精度評価を行った。

6.1 植生観測のためのシステム開発

半経験的なアプローチによる植生域地表面の放射伝達モデルの構築には、マイクロ波放射計観測と同時に取得した植生や土壌のデータが必要である。そのため地上可搬型マイクロ波放射計システム (GBMR) の開発を行った。

GBMR は、現行の衛星搭載マイクロ波放射計の中で最も精度の良い AMSR と同等の性能を有するマイクロ波放射計と、マイクロ波放射計を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される。多種・多様な植生データを効率的に取得できるように移動観測を前提として、可搬性を重視した設計とした。

GBMR は、数メートル規模の観測に対応し、かつ、移動観測が容易である。本システムを用いることによって、様々な種類の植生において、詳細な植生観測と併せたマイクロ波輝度温度計測が可能となった。

6.2 植生域地表面の放射伝達モデルの検討

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 ω_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。 ω_c は消散に占める散乱の割合で定義される。 ω_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 ω_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 ω_c の取り扱い方が本モデルの特色である。 b と ω_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、植生の成長にともなう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 ω_c の推定結果を従来の知見と比較しやすい。

さらに、 b と ω_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 ω_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 ω_c のそれぞれの混合モデルを示めた。

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。

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 ω_c の推定を行なった。 b と ω_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 ω_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。

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 ω_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 ω_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 ω_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 ω_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 ω_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 ω_c で表現することが可能である．植生タイプ (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ため，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 ω_c 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，衛星観測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．

6.3 今後の展望

陸面からの射出は，衛星リモートセンシングにおいて熱源となる最も重要な要素である．本研究において開発した植生域地表面を対象とする放射伝達モデルは，土壌水分や植生量のみならず積雪や降水など，陸域のマイクロ波リモートセンシング全般へ応用可能であり，陸域水文学の推定精度の向上に寄与すると考える．

ところが，植生は多様な幾何学的特徴を有する．本論文では，わずか 3 つの植生タイプを対象としてモデル化を行なったにすぎない．しかし，その結果は，幾何学的な特徴が同一である植生に適用可能であり，また，本論文で行った地上可搬型マイクロ波放射計システムによる植生観測および解析手法は，他の植生に対しても利用可能である．今後，形状と方向性の観点から植生タイプを体系化し，本手法を用いて各植生タイプのモデル化を行うことが必要であろう．

また，本モデル利用に際しては，植生タイプと植生被覆率が必要となる．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では，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おり，それらの情報と本モデルの関連付けを行なうことで，地表面放射伝達モデルの応用範囲が広がることが期待される．多様な地表面を持つ陸域において水文学を推定するためには，それぞれのセンサーの特長を生かし，マルチセンサーによる複合的な観測体制が有効であろう．

参考文献

- [1] 環境観測技術衛星 ADEOS-II リファレンスハンドブック, PDF, <http://sharaku.eorc.jaxa.jp/ADEOS2/>.
- [2] SOIL MOISTURE EXPERIMENTS IN 2002, Experiment Plan, PDF, June 2002, <http://hydrolab.arsusda.gov/smex02/>.
- [3] 企画・事業委員会（編）：水文・水資源研究へのリモートセンシング利用講座（その2）. 水文・水資源学会, 東京, 1995.
- [4] 日本リモートセンシング研究会（編）：図解リモートセンシング., 第1版社団法人日本測量学会, 東京, 1992.
- [5] K. Aonashi and G. Liu: Direct Assimilation of Multichannel Microwave Brightness Temperature and Impact on Mesoscale Numerical Weather Prediction over the TOGA COARE Domain, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 77(3):771–794, 1999.
- [6] J. Awaka and T. Oguchi: Bistatic Radar Reflectivities of Pruppacher-and-Pitter form Raindrops at 14.3 and 5.33 GHz, *Journal of Radio Research Laboratories*, 29(127):125–150, 1982.
- [7] F. Baret and G. Guyot: Potentials and Limits of Vegetation Indices for LAI and APAR Assessment, *Remote Sensing of Environment*, 35:161–173, 1991.
- [8] W. Berg. and R. Chase: Determination of mean rainfall from the Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I) using a mixed lognormal distribution, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 9(2):129–141, 1992.
- [9] B.J.Choudhury and J.R.Wang: Simulated and observed 37GHz emission over Africa, *International Journal of Remote Sensing*, 11(10):1837–1868, 1990.
- [10] N. Brogea and E. Leblanc: Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density, *Remote Sensing of Environment*, 76:156–172, 2000.
- [11] D. R. Brunfeldt and F. T. Ulaby: Microwave attenuation properties of vegetation canopies, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-22:520–524, 1984.
- [12] S. Chandrasekhar: *Radiative Transfer*.Dover Publ. Inc., New York, 1960.
- [13] B. Choudhury and B. Golus: Estimating Soil Wetness Using Satellite Data, *International Journal of Remote Sensing*, 9(7):1251–1257, 1988.
- [14] R. Danielson, D. R. Moore, and H. C. van de Hulst: The transfer of visible radiation through clouds, *Journal of Atmospheric Sciences*, 26:1078–1087, 1969.

- [15] R. A. M. de Jeu and M. Owe: Further validation of a new methodology for surface moisture and vegetation optical depth retrieval, *International Journal of Remote Sensing*, 24(22):4559–4578, 2003.
- [16] R. H. Dicke: The measurement of thermal radiation at microwave frequencies, *Review of scientific instruments*, 17:268–275, 1946.
- [17] P. A. Dirmeyer: Assessing GCM Sensitivity to Soil Wetness Using GSWP Data, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 77(1B):367–385, 1999.
- [18] M. C. Dobson, F. T. Ulaby, M. T. Hallikainen, and M. A. El-Rayes: Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil - Part II: Dielectric Mixing Models, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-23(1):35–46, 1985.
- [19] M. A. EL-Rayes and F. T. Ulaby: Microwave Dielectric Spectrum of Vegetation - Part I: Experimental Observations, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-25(5):541–549, 1987.
- [20] R. R. Ferraro, N. C. Grody, and G. F. Marks: Effects of surface conditions on rain identification using the DMSP-SSM/I, *Remote Sensing Rev.*, 11:195–210, 1994.
- [21] P. Ferrazzoli, J.-P. W. L. Guerriero, and A. Chanzy: Multifrequency Emission of Wheat: Modeling and Applications, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(1):332–337, 1998.
- [22] F.T.Ulaby, K. Sarabandi, K.Mcdonald, M. Whitt, and M. Dobson: Michigan microwave canopy scattering model (MIMICS), *International Journal of Remote Sensing*, 12:1223–1253, 1990.
- [23] H. Fujii and T. Koike: Development of TRMM/TMI Algorithm for Precipitation in the Tibetan Plateau by Considering Effects of Land Surface Emissivity, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 79(1B):475–483, 2001.
- [24] H. Fujii, T. Koike, T. Ohta, H. Ishidaira, T. J. Jackson, and G. Heathman: Soil moisture observation under different vegetation conditions by GBMR, In *IEEE Int. Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS2000)*, pp. 1268–1270, Honolulu, Hawaii, 24–28 July, 2000.
- [25] A. K. Fung: *Microwave Scattering and Emission Models and Their Applications*. ARTECH HOUSE, 685 Canton Street Norwood, MA 02062, USA, 1994.
- [26] P. Gleik: *The World Water 2000-2001.*, p. 315 Island Press, 2000.
- [27] N. C. Grody: Classification of snow cover and precipitation using the Special Sensor Microwave / Imager (SSM/I), *J. Geophys. Res.*, 96:7423–7435, 1991.
- [28] D. Haboudane, J. R. Millera, E. Pattey, P. J. Zarco-Tejada, I. B. Strachan: Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture, *Remote Sensing of Environment*, 90:337–352, 2004.
- [29] D. G. Hahn and J. Shukla: Apparent Relationship between Eurasian snow cover and Indian monsoon rainfall, *Journal of The Atmospheric Sciences*, 33(12):2461–2462, 1976.

-
- [30] M. T. Hallikainen, F. T. Ulaby, M. C. Dobson, M. A. El-Rayes, and L.-K. Wu: Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil - Part I, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-23(1):25–34, 1985.
 - [31] J. E. Hansen and L. D. Travis: Light scattering in planetary atmospheres, *Space Science Reviews*, 16:527–610, 1974.
 - [32] W. R. Hook, N. J. Livingston, and Z. J. Sun: Remote diode shorting improves measurement of soil-water by time domain reflectometry, *Soil Science Society of America Journal*, 56(5):1384–1391, 1992.
 - [33] J. Houghton, L. M. Filho, B. Callender, N. Harris, A. Kattenberg, and K. Maskell eds.: *Climate Chang 1995 - The Science of Climate Change.*, UK, 1995Cambridge Univ. Press.
 - [34] T. J. Jackson, D. M. L. Vine, and A. Y. Hsu: Soil Moisture Mapping at Regional Scales Using Microwave Radiometry: The Southern Great Plains Hydrology Experiment, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(5):2136–2151, 1999.
 - [35] J.J.McCarthy, O. F. Canziani, N. A. Leary, D. J. Dokken, and K. S. White eds.: *Climate Chang 2001- Impacts, Adaptation , and Vulnerability*.Cambridge Univ. Press, 2001.
 - [36] J. J. Joseph and W. J. Wiscombe: The Delta Eddington Approximation for Radiative Flux Transfer, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 33:2542–2459, 1978.
 - [37] M. Karam, A.K.Fung, R.H.Lang, and N.S.Chauhan: A microwave scattering model for layered vegetation, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30:767–784, 1992.
 - [38] A. H. Karp: Recent advances in the spherical harmonics method, *International Journal of Engineering Science*, 36(12-14):1551–1568, 1998.
 - [39] N. Keen and P. Zimmermann: First Measurements with the 100m Telescope: An Assessment of Performance, *Nachrichtentech. Zeitschrift*, 26:124–128, 1973.
 - [40] R. E. Kelly, A. T. Chang, L. Tsang, and J. L. Foster: Development of a passive microwave global snow depth retrieval algorithm for Special Sensor Microwave Imager (SSM/I) and Advanced Microwave Scanning Radiometer-EOS (AMSR-E) data, *Radio Science*, 38(4), 2000, No.8076.
 - [41] R. E. Kelly, A. T. Chang, L. Tsang, and J. L. Foster: A Prototype AMSR-E Global Snow Area and Snow Depth Algorithm, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(2):230–242, 2003.
 - [42] K. P. Kirdiashev, A. A. Chukhlantsev, and A. M. Shutko: Microwave radiation of the Earth's surface in the presence of vegetation cover, *Radio Eng. Electron. Physics*, pp. 256–264, 24.
 - [43] T. Koike, E. Togashi, and H. Fujii: Validation and application of a snow algorithm in the Eurasian continent, In *IEEE Int. Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS2000)*, Honolulu, Hawaii, 24-28 July, 2000.
 - [44] J. D. Kraus: *Electromagnetics*.McGraw-Hill, Inc., 1984.
 - [45] R. H. Lang and J. S. Sidhu: Electromagnetic Backscattering from a Layer of Vegetation: A Discrete Approach, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-21(1):62–71, 1983.

- [46] K. Levenberg: A Method for the Solution of Certain Problems in Least Squares, *Quarterly Applied Math.*, 2:164–168, 1944.
- [47] X. Li, T. Koike, and M. Pathmathevan: A very fast simulated re-annealing(VFSA) approach for land data assimilation, *Computers and Geosciences*, 30:239–248, 2004.
- [48] K. N. Liou: *An introduction to atmospheric radiation*.Academic Press, New York, 1980.
- [49] G. Liu: A Fast and Accurate Model for Microwave Radiance Calculations, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 76(2):335–343, 1998.
- [50] G. Macelloni, S. Paloscia, P. Pampaloni, and R.Ruisi: Microwave Emission Features of Crops with Vertical Stems, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(1):332–337, 1998.
- [51] D. Marquardt: An Algorithm for Least-squares Estimation of Nonlinear Parameters, *SIAM Journal Applied Math.*, 11:431–441, 1963.
- [52] C. Mätzler: Passive microwave signature catalog 1989-1992, *Report of the Institute Applied Physics, Univ. of Berne*, Dec. 1992.
- [53] J. C. Maxwell: A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 155:459–512, 1864.
- [54] T. Mo, B. Choudhury, T. Schmugge, and J. Wang: A Model for Microwave Emission From Vegetation-Covered Fields, *Journal of Geophysical Research*, 87(13):11229–11237, 1982.
- [55] T. Mo and T. J. Schmugge: A Parameterization of the Effect of Surface Roughness on Microwave Emission, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-25(4):481–486, 1987.
- [56] H. H. Nissen, P. Moldrup, and K. Henriksen: High-resolution time domain reflectometry coil probe for measuring soil water content, *Soil Science Society of America Journal*, 62(5):1203–1211, 1998.
- [57] E. G. Njoku: AMSR Land Surface Parameters, Algorithm Theoretical Basis Document, Technical report, Jet Propulsion Laboratory, December 10 1999.
- [58] E. G. Njoku and L. Li: Retrieval of Land Surface Parameters Using Passive Microwave Measurements at 6-18 GHz, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(1):79–93, 1999.
- [59] N.S.Chauhan: Soil moisture estimation under a vegetation cover: combined active passive microwave remote sensing approach, *International Journal of Remote Sensing*, 18(5):1079–1097, 1994.
- [60] N.S.Chauhan: Soil moisture inversion at L-band using a dual-polarization technique; a model-based sensitivity analysis, *International Journal of Remote Sensing*, 18(5):1079–1097, 1994.
- [61] T. Oguchi: Scattering and absorption of a millimeter wave due to rain and melting hailstones, *Journal of Radio Research Laboratories*, 13(67):141–172, 1966.
- [62] M. Owe, A. Chang, and R. Golus: Estimating Surface Soil-Mositure From Sattellite Microwave Measurements and A Satteellite Derived Vegetation Index, *Remote Sensing of Environment*, 24(2):331–245, 1988.

- [63] S. Paloscia, G. Macelloni, E. Santi, and T. Koike: A Multifrequency Algorithm for the Retrieval of Soil Moisture on a Large Scale Using Microwave Data from SMMR and SSM/I Satellites, 2001.
- [64] S. Paloscia and P. Pampaloni: Microwave Polarization Index for Monitoring Vegetation Growth, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 26(5):617–621, 1988.
- [65] P. Pampaloni and S. Paloscia: Experimental relationships between microwave emission and vegetation features, *International Journal of Remote Sensing*, 6:315–323, 1985.
- [66] P. Pampaloni and S. Paloscia: Microwave emission and plant water content: A comparison between field measurement and theory, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-24(6):900–904, 1986.
- [67] M. Pathmathevan, T. Koike, and X. Li: A New Satellite-Based Data Assimilation Algorithm to Determine Spatial and Temporal Variations of Soil Moisture and Temperature Profiles, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 81(5):1111–1135, 2003.
- [68] M. Pathmathevan, T. Koike, X. Li, and H. Fujii: A simplified land data assimilation scheme and its application to soil moisture experiments in 2002(SMES02), *Water resources Reserach*, 39(12), 2003, Art. No. 1341, doi:10.1029/2003WR002124.
- [69] P.Ferrazzoli, L. Guerriero, S. Paloscia, P. Pampaloni, and D. Solimini: Modeling Polarization Properties of Emission from Soil Coverd with Vegetation, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30:157–165, 1992.
- [70] G. N. Plass and G. W. Kattawar: Monte Carlo calculations of light scattering from clouds, *Applied Optics*, 7:415–419, 1968.
- [71] J. Qi, A. Chehbouni, A. Huete, Y.H.Kerr, and S. Sorooshian: A Modified Soil Adjusted Vegetation Index, *Remote Sensing of Environment*, 48:119–126, 1994.
- [72] P. S. Ray: Broadband Complex Refractive Indices of Ice and Water, *Applied Optics*, 11(8):1836–1843, 8 1972.
- [73] J. Ross: *The radiation regime and architecture of plant stands*. Dr W. Junk Publishers, Hague, Netherlands, 1981.
- [74] T. Schmugge and T. Jackson: A Dielectric Model of the Vegetation Effects on the Microwave Emission from Soils, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(4):757–760, 1992.
- [75] J. Shi, K. Chen, Q. Li, T. J. Jackson, P. E. O’Neill, and L. Tsang: A Parameterized Surface Reflectivity Model and Estimation of Bare-Surface Soil Moisture With L-Band Radiometer, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(12):2674–2686, 2002.
- [76] J. Shukla and Y. Mints: Influence of Land-Surface Evapo-transpiration on the Earth’s Climate, *Science*, 215(4539):1498–1501, 1982.
- [77] D. E. Strebel, N. S. Goel, and K. J. Ranson: Two-Dimensional Leaf Orientation Distributions, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-23(5):640–647, 1985.

- [78] J. R. Tesmer and T. Wilheit: An improved microwave radiative transfer model for tropical oceanic precipitation, *J. Atmos. Sci.*, 55, 1998.
- [79] T.J.Jackson and P. E. O'Neill: Attenuation of Soil Microwave Emissivity by corn and soybean at 1.4 and 5GHz, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-28:978–980, 1990.
- [80] T.J.Jackson and T. Schmugge: Vegetation Effects on the Microwave Emission of Soils, *Remote Sens. Environ.*, 36:203–212, 1991.
- [81] G. C. Topp, J. L. Davis, and A. P. Annan: Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission lines, *Water Resources Research*, 16:574–582, 1980.
- [82] L. Tsang, K. H. Ding, G. Zhang, C. Hsu, and J. A. Kong: Backscattering Enhancement and Clustering Effects of Randomly Distributed Dielectric Cylinders Overlying a Dielectric Half Space Based on Monte-Carlo Simulations, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 43(5):488–499, 1995.
- [83] L. Tsang and J. A. Kong: Thermal microwave emission from a three-layer random medium with three dimensional variations, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 18:212–216, 1980.
- [84] F. T. Ulaby and M. A. EL-Rayes: Microwave Dielectric Spectrum of Vegetation - Part II: Dual-Dispersion Model, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-25(5):550–557, 1987.
- [85] F. T. Ulaby, R. K. Moore, and A. K. Fung: *Microwave Remote Sensing: Active and Passive.*, Vol. III ARTECH HOUSE, 685 Canton Street Norwood, MA 02062, USA, 1986.
- [86] F. T. Ulaby, R. K. Moore, and A. K. Fung: *Microwave Remote Sensing: Active and Passive.*, Vol. I ARTECH HOUSE, 685 Canton Street Norwood, MA 02062, USA, 1986.
- [87] F. T. Ulaby, M. M. Razani, and M. C. Dobson: Effects of Vegetation Cover on the Microwave Radiometric Sensitivity to Soil Moisture, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-21(1):51–61, 1983.
- [88] F. T. Ulaby, A. Tavakoli, and T. B. A.: Microwave Propagation Constant for a Vegetation Canopy With Vertical Stalks, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-25(6):714–725, 1987.
- [89] F. T. Ulaby and E. W. Wilson: Microwave attenuation properties of vegetation canopies, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-23:746–753, 1985.
- [90] A. A. van de Griend, M. Owe, J. de Ruiter, and B. T. Gouweleeuw: Measurement and Behavior of Dual-Polarization Vegetation Optical Depth and Single Scattering Albedo at 1.4- and 5-GHz Microwave Frequencies, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(4):957–965, 1996.
- [91] D. M. L. Vine and M. A. Karam: Dependence of Attenuation in a Vegetation Canopy on Frequency and Plant Water Content, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(5):1090–1096, 1996.

- [92] J. Wait: Scattering of a Plane Wave from a Circular Dielectric Cylinder at oblique Incidence, *Can. J. Phys.*, 33:189, 1955.
- [93] P. Waldteufel, Y. Kerr, and J. Boutin: Selecting an optimal configuration for the Soil Moisture and Ocean Salinity mission, *Radio Science*, 38(3), 2003, 8051f.
- [94] J. R. Wang: Effect of Vegetation on Soil-Moisture Sensing Observed From Orbiting Microwave Radiometer, *Remote Sensing of Environment*, 17(2):141–151, 1985.
- [95] J. R. Wang, P. E. O’NEILL, T. J. Jackson, and E. T. Engman: Multifrequency Measurements of the Effects of Soil Moisture, Soil Texture, and Surface Roughness, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-21(1):44–51, January 1983.
- [96] J. Wang and B. Choudhury: Passive Microwave Remote Sensing of Soil Moisture Content Over Bare Soil Fields at 1.4GHz and 5GHz Frequencies, *Journal of Geophysical Research*, 86:5277–5282, 1981.
- [97] U. Wegmüller and C. Mätzler: Rough Bare Soil Reflectivity Model, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(3):1391–1395, 1999.
- [98] J.-P. Wigneron, L. Laguerre, and Y. H. Kerr: A Simple Parameterization of the L-Band Microwave Emission from Rough Agricultural Soils, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(8):1697–1707, 2001.
- [99] T. T. Wilheit and L. Chiu: Retrieval of monthly rainfall indices from microwave radiometric measurements using probability distribution functions, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 8, 1991.
- [100] L.-K. Wu, R. K. Moore, and R. Zoughi: Sources of Scattering from Vegetation Canopies at 10GHz, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-23(5):237–745, 1985.
- [101] 三枝健二, 佐藤公規, 山田美由紀, 長谷部望: Semi-Empirical Model による関東ローム土の誘電率評価, 1994 年電子情報通信学会秋季大会, p. 158, 1994.
- [102] 中司浩生: 学生・技術者のための電磁波の散乱., 増補版シュプリング・フェアーク東京株式会社, 東京, 2002.
- [103] 小池俊雄, 下茂力, 太田哲, 藤井秀幸, 柴田彰: 陸面水文量分布のグローバル推定のためのマイクロ波放射計アルゴリズムの開発と検証, 水工論文集, 第 44 巻:247–252, 2000.
- [104] 小池俊雄, 中村佳照, 開發一郎, G. Davaa, 松浦直人, 玉川勝徳, 藤井秀幸: 改良型高性能マイクロ波放射計 (AMSR-E) による土壌水分・植生水分観測手法の開発, 水工学論文集, 48(2):217–222, 2004.
- [105] 上崎省吾: 電波光学., 第 2 版サイエンスハウス, 東京, 1991.
- [106] 石田信行, 小口知宏: 偏平回転楕円体による電磁波の散乱 - 回転楕円体関数を用いた計算 -, 第 380 回 電波科学研究連絡委員会 F 分科会 資料, 12 1993.
- [107] 瀬戸心太: マイクロ波リモートセンシングによるグローバルな土壌水分推定に関する研究., 博士論文, 2003.

- [108] 総合科学技術会議環境担当議員, 内閣府政策統括官(科学技術政策官)(編): 地球温暖化研究の最前線., 地球温暖化研究イニシャティブ総合科学技術会議, 2003.
- [109] 藤井秀幸, 小池俊雄, 梶川正弘: レーダ・マイクロ波放射計観測による降雪鉛直観測, 水工学論文集, 41, 1997.
- [110] 石平博: 寒冷圏における水文現象のモデル化に関する研究 - 分布モデルからマクロモデルへの展開 -, 博士論文, 1 1997.
- [111] 古濱洋治, 岡本謙一, 増子治信: 人工衛星によるマイクロ波リモートセンシング. 社団法人 電気通信学会, 東京, 1986.

謝辞

本論文の審査の労を賜りました小池俊雄教授，安岡善文教授，柴崎亮介教授，佐藤慎司教授，沖大幹助教授，鼎信次郎助教授に心より御礼申し上げます。

主査である小池俊雄教授には，長岡技術科学大学の学生の頃から，暖かく，時に厳しくご指導頂きました。野外観測やプロジェクトの進め方，研究に至るまで，幅広い知識と豊富な経験，洞察力に基づき，常に道筋を示して頂きました。また，苗場山の観測に始まりチベットの観測まで，現場に立って現象を考えることができる多くの機会を与えて頂きました。12年もの長きにわり，研究環境を与えて下さるとともに，根気強くご指導頂き，本論文を纏めるに至りました。

副査である安岡善文教授，柴崎亮介教授，佐藤慎司教授，沖大幹助教授，鼎信次郎助教授には，論文を取りまとめるにあたって，多くの有益なご助言を頂きました。凝り固まってしまった本論文に対する考えに対して，それを打ち砕くような貴重なご意見，ご指摘，そしてご助言を様々な角度から頂きました。安岡善文教授には可視・赤外リモートセンシングの立場からご助言を頂きました。また，センサーの設計という立場から本論文を見直す視点を与えて頂きました。柴崎亮介教授には，能動型マイクロ波リモートセンシングの立場からご助言を頂きました。先生にご指摘頂いた受動型・能動型センサーの複合的な観測は，本論文を発展させる1つの方向です。佐藤慎司教授には，工学の視点からご助言を頂きました。先生との議論を通じて，本論文の位置づけを明確にすることができました。沖大幹助教授には，モデルについて多くのご助言を頂きました。先生にご助言いただいた「モデルのエlegantさ」について今後検討していきたいと考えております。鼎信次郎助教授には，水文・気象モデルの視点から多くのご助言を頂きました。先生のモデル化に関するお話はとても勉強になりました。

また，本論文は多くの方々のご支援・ご協力により進めることができました。ここに記して，深く御礼申し上げます。

河川・流域環境研究室の知花武佳講師と谷口健司助手には，研究を進めるにあたり，的確なご助言を頂きました。

地上可搬型マイクロ波放射計システムの開発に当たっては，多くの技術者の方々のご助言，ご支援を頂きました。Peter Zimmermann 博士，Thomas Rose 博士をはじめ，Radiometer Physics GmbH 社の皆様，風間茂穂氏をはじめ，総合電子の皆様，今井秀夫氏をはじめ，ジェスクホリウチの皆様，片桐章夫氏をはじめ，北村製作所ならびに北村車体の皆様。皆様の豊富な経験に裏打ちされた確かな技術，迅速なサポートにより，地上可搬型マイクロ波放射計システムは，使いやすく，安定したシステムになりました。

観測に際しても，多くの方々のご協力を頂きました。心より御礼申し上げます。

米川智司助教授，久保田浩史技術職員をはじめ，東京大学大学院農学生命科学研究科附属農場の皆様には，観測に対してご理解を頂くとともに，とても素晴らしい圃場を提供して頂きました。特に，米川智司助教授は，事前準備にご尽力頂き，さらに植生観測に関して有益なご助言を頂きました。久保田浩史技術職員には，植生の選定から，耕作，播種，収穫までサポートして頂き，数々のプロの技を見せて頂きました。また，河川・流域環境研究室の皆様にもご協力頂き，共に観測で汗を流して頂きました。なかでも，広瀬望博士，森田正人研究員には，観測のマネージメントまで行なって頂きました。農場における観測は，作物はもちろんのこと，研究の面でも「実り」のある観測になりました。

イネの観測では，池田守明氏をはじめ，中之島土地改良区の皆様に全面的にご協力頂きました。また，坂田氏には，貴重な資産である水田の利用を快諾して頂きました。観測では，長岡技術科学大学の熊倉俊郎助教授，上米良秀行氏，青柳洋平氏，豊田文吾氏，河川・流域環境研究室の玉川勝徳研究員，広瀬望氏，富樫英太氏にお手伝い頂きました。

ダイズ・トウモロコシの観測では、USDA の Thomas J Jackson 博士にご協力頂きました。また、観測では、河川・流域環境研究室の Yang Kun 博士、Mahadevan Pathmathevan 氏、Thomas Pfaff 氏、澁谷隆史氏にご協力頂きました。

観測だけではなく、機材の購入・管理、観測やプロジェクトの進行の面でも、多くの方々にご支援頂きました。長岡技術科学大学在籍中には、立川フミ子事務官、中島則子氏、渡辺千雅氏にお世話になりました。河川・流域環境研究室では、井口葉子氏、江藤奈穂氏、長谷川泉氏、合田昭子氏、斎藤亜沙美氏、松平紀子氏にお世話になりました。諸般の事務を手際よくこなして頂きました。学生の頃からの友であり先輩・後輩である玉川勝徳氏、筒井浩行氏、太田哲氏には、良き相談相手になって頂いたとともに、研究・事務全般に渡りお世話になりました。

また、宇宙開発事業団(現：宇宙開発機構)、科学技術振興事業団(現：科学技術振興機構)のご支援により機材の調達、観測の実施を行なうことができました。

最後になりますが、USDA の Thomas J Jackson 博士、Gary C. Heathman 氏、M. Smith 氏、Allan Roy 氏、山梨大学の石平博助教授、太田哲氏、そして小池俊雄教授に深くお礼申し上げます。1999 年真夏、オクラホマ州の広大な農作地帯を、皆様とともにマイクロ波放射計を積んだトラックで走り回った経験が、地上可搬型マイクロ波放射計システムの開発に生かされております。特に、石平博助教授には、この時、観測のノウハウをご教授頂きました。

ご指導、ご助言、そして影響を与えて頂いた方は、まだまだおります。あらためて、本論文は多くの方々のお陰でまとめることができたと痛感させられ、同時に、自分が出会う方々に本当に恵まれていると感謝しております。そして、長年、暖かく見守り支援してくれた両親、兄、妹へ、この場を借りて深くお礼申し上げます。

平成 17 年 6 月 6 日
藤井秀幸