

学 位 論 文 題 名

人工衛星データによる農林地の蒸発散量の
推定に関する研究

学位論文内容の要旨

第1章は序論で、本研究の目的および既往の研究との関係を記述している。従来とられてきた蒸発散量の測定・推定法は、対象範囲（空間スケール）が狭く、いわば点における観測値・推定値でしかないため、地上観測でその全容を知るとは極めて困難であった。本論文は、一定面積の平均的な観測値が得られ、また広い範囲の分布が調べられる特徴をもつ人工衛星データを用いて、最終的に地域蒸発散量を推定する手法を開発することを目的としている。

第2章では人工衛星データ（極軌道気象衛星 NOAA）の処理と補正について記述している。人工衛星データは、地理的な位置関係が不明確で、しかも地上の表面温度や反射の絶対値が不明な画像情報であるため、幾何補正と放射量補正が必要である。幾何補正としてまず行ったタンジェント変換は、観測機器の機構的なものや地球が球面であることによる歪を取り除くために行うものである。この変換のみでは幾何学的な歪がまだ残ったため、さらに地上基準点を用いた補正を行った。この補正には地図座標系からタンジェント変換を終えた画像座標系への変換方程式として2次多項式を採用した。2段階の幾何補正を行った結果、使用した全ての画像で位置誤差が1ピクセル以内となった。次に、放射量補正として熱赤外データから衛星内で測定されている校正データを用いて輝度温度を算出した。また、可視・近赤外データの放射量補正として衛星打ち上げ前の試験によって求められた輝度と反射率の関係式によって反射率を算定した。

第3章では、蒸発散量推定のための地上の表面温度の推定について記述している。地上の表面温度は、蒸発散量の推定モデルのなかで重要な入力データの一つであるため、衛星データで評価した地上の表面温度の精度を検証しておく必要がある。衛星データとの比較に用いた地上観測データは、耕地（水田・小麦畑）および森林（北海道大学農学部附属苫小牧演習林）において、人工衛星の測定と原理が同一である放射温度計を用いて測定した。人工衛星データから大気中の水蒸気・炭酸ガスなどの長波放射の吸収・放射物質の影響を補正（大気補正）するために、熱赤外のチャンネルの輝度温度によって大気補正を行う Split Window 法を利用した。まず海洋（放

射率が0.97～0.98)を対象として発表された大気補正式を適用して地上実測値と比較した。測定で得られた森林の放射率(0.976 ± 0.014)は海洋の値にはほぼ等しいため、放射率による影響は少ないと考えられる。海洋の大気補正式を用いたときの平均残差は日中が 0.6°C 、夜間が -0.2°C で符号が逆になった。また、残差標準偏差はそれぞれ 1.1°C 、 0.7°C となり、海洋での結果(0.6°C)より大きくなった。この違いは海洋と陸域の熱的な特性(比熱や熱伝導率等)やピクセル内での水平的な温度変動の大小によって生じたものと考えられる。このような差はあるものの、ある一定のバイアスを与えれば海洋で用いられている補正式を用いて、NOAA データから約 1°C 以内の誤差で植被の表面温度の推定が可能であると結論づけられる。次に、観測結果と NOAA の輝度温度を用いて陸上(ここでは植生上)における表面温度を推定するための算定式を重回帰分析により求めた。一部の係数に海洋で用いられているものと違いが見られた。この原因には対象表面上の大気状態の違い等、表面や大気特性によるものと、海面水温の変化幅に比較してここで用いた地上の表面温度の変化幅が小さいというデータの特性によるものが考えられる。

第4章は、蒸発散量推定のためのアルベドの推定について記述している。NOAA データでアルベドを推定するために、可視域と近赤外域を観測しているチャンネルを用いて、構成法が異なる2種類の推定モデルを使用した。また、推定値と比較するための地上実測値は、耕地、森林、牧草地における観測から得た。可視・近赤外の測定にも大気による散乱・吸収の影響が加わるため大気補正を行う必要がある。大気補正には太陽高度、日射の透過率・大気中の水蒸気量・オゾン量をパラメータにした補正式を用いた。また、衛星で得られる反射率を用いて全波長帯の反射率を算定する波長補正については、他の人工衛星とともに求められた実験式、および放射伝達モデルを用いた加重平均法を採用した。実測値との比較の結果、波長補正を先に行うモデルで推定値は過大推定される傾向が顕著で、また残差の標準偏差も大きい。大気補正を先に行うモデルではそれらが改良され(残差が0.022、残差の標準偏差が0.033)、後者のモデルの方が優れた。誤差の主な原因は、ここでは地表面を太陽光の反射に対して等方性と仮定したためであると考えられる。現実の植生上では等方的ではなく、測定する方向、あるいは太陽・対象地表・衛星の位置関係によって反射の特性が変化する。この効果を補正するのはきわめて困難な問題で、今後の研究課題である。

第5章は人工衛星データによる蒸発散量の推定について記述している。本研究では、衛星データによる蒸発散量推定に平衡蒸発モデルを適用し、モデル内のパラメータ(α)は、地上の表面温度から求めた平衡蒸発量とボーエン比法によって測定した蒸発散量とを比較して事前に決定した。その観測は1987～1989年の夏期に実施し、主な測定項目は、植被上における純放射量、植被

上2 高度の乾湿球温度、放射温度計による植被温度、熱流板による地中熱伝導量であった。30分平均の日中の観測全データを用いて平衡蒸発量と実蒸発散量の関係から、短時間の潜熱フラックスの推定にも平衡蒸発モデルが使用可能であることを確認し、 α の値として森林の1.06、水田と小麦畑の1.03を得た。気温を用いて求めた α は移流のない湿潤面に対して1.26になると言われているが、今回はそれより約20%も低い値になった。この原因には気温ではなく地上の表面温度を用いたことの違いと、完全な湿潤面でなかったことが考えられる。次に、このパラメータ α を用いて、平衡蒸発モデルを5シーンのNOAAのデータに適用し、蒸発散量の推定を行った。この推定には衛星データから算出したアルベド・地上の表面温度および日射量の実測値、高層気象データを組合せた式で純放射量を求め、地中熱伝導量は無視して適用した。この蒸発散量推定値と苫小牧演習林の地上測定値を比較した結果、約10%以内の誤差で推定できた。しかし、蒸発散量や純放射量の推定値と実測値を詳細に調べれば、精度に大きく影響するのは純放射量の推定値であることが判明した。また今回の解析の結果、パラメータ α を決定した時と同様に土壌水分の不足がないと考えられる場合には、十分利用が可能であることが判明した。すなわち、平衡蒸発モデルは風速や湿度などを必要とせず、単純な形式であるため、人工衛星データによる推定に応用できる。

第6章は、以上の結果を総括し、人工衛星データによる蒸発散量推定に関する今後の課題と展望について述べている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 堀 口 郁 夫

副 査 教 授 前 田 隆

副 査 教 授 梅 田 安 治

本論文は6章で構成され、図34、表16、引用文献111を含む総頁数136頁の和論文である。別に参考論文、21編が添えられている。

従来行われてきた蒸発散量の測定・推定法は、主として地上における測定で対象範囲が狭く、いわば点における観測値・推定値でしかない。そのため、地上観測で広い範囲の蒸発散の全容を知ることは極めて困難であった。本論文は、一定面積の平均的な観測値が得られ、また広い範囲

の分布が調べられる特徴をもつ人工衛星データを用いて、広い範囲の蒸発散量を推定する手法を開発することを目的としている。そのため、地上測定値と人工衛星データによる推定値を比較する手法によって、人工衛星データによる蒸発散量推定法を確立している。

第1章は本研究の目的および既往の研究との関係を記述している。

第2章では人工衛星データ（極軌道気象衛星 NOAA）の処理と補正について記述している。人工衛星データは、地理的な位置関係が不明確で、しかも地上の表面温度や反射の絶対値が不確定な画像情報である。そのため、幾何補正と放射量補正を行って、画面上の位置の確定と表面温度や反射率に比例する物理量を求める必要がある。幾何補正としてまずタンジェント変換を行い、さらに地上基準点による補正を行って、地図上の位置誤差が1ピクセル以内にすることに成功している。さらに、放射量補正として NOAA の熱赤外データを用いて、衛星内で測定されている校正データによって、輝度温度を算出するアルゴリズムを完成している。

第3章では、蒸発散量推定のための地上の表面温度の推定について記述している。地上の表面温度は、蒸発散量の推定モデルのなかで重要な入力データの1つであり、輝度温度に大気補正を施して求めることが出来る。そのため、NOAA データによる輝度温度に海洋の大気補正式を用いて推定した表面温度と、地上で測定した表面温度を比較検討した。地上測定は比較的均一な地上状態が得られる森林（苫小牧演習林）と耕地（恵庭）で行った。その結果、植生（森林）の放射率を 0.976 ± 0.014 と確定し、海洋の放射率（ $0.97 - 0.98$ ）とほぼ等しいことから、海洋で用いられる大気補正式を陸域で用いても大きな差がないことを示した。この海洋の大気補正式を用いた表面温度の平均残差は、日中が 0.6°C 、夜間が -0.2°C となった。さらに、地上で測定した表面温度を用いて、陸域の大気補正式を導きだしている。

第4章は、蒸発散量推定のためのアルベドの推定について記述している。NOAA データでアルベドを推定するために、NOAA の可視域と近赤外域の輝度値を用いて、構成法が異なる2種類の推定モデルを使用した。また、推定値と比較するための地上実測値は、森林、耕地、牧草地における観測から得ている。NOAA データからの推定値と実測値との比較の結果、大気補正を波長補正の前に行うモデルが推定精度が高く、残差が 0.022 、残差の標準偏差が 0.033 であった。

第5章は人工衛星データによる蒸発散量の推定について記述している。本研究では、人工衛星データによる蒸発散量推定に平衡蒸発モデルを適用し、モデル内のパラメータ（ α ）は、地上の表面温度から求めた平衡蒸発量とボーエン比法によって測定した蒸発散量とを比較して事前に決定した。その結果、 α の値として森林が 1.06 、水田と小麦畑が 1.03 の値を得た。

このパラメータ α を用いて、平衡蒸発モデルを5シーンの NOAA データに適用し、蒸発散量

の推定を行った。この推定には NOAA データから算出したアルベド，地上の表面温度および日射量の実測値と高層気象データを組合せた式で純放射量を求めて適用した。この蒸発散量推定値と苫小牧演習林の地上測定値を比較した結果，約10%以内の誤差で推定できた。

第6章は，以上の結果を総括し，人工衛星データによる蒸発散量推定に関する今後の課題と展望について述べている。

以上の研究成果は，人工衛星データを用いて蒸発散量を推定するという先駆的研究であり，地域の蒸発散や地球規模の水循環を知るために重要な貢献をするものである。また，その結果はリモートセンシングや農業気象学上高く評価される。

よって審査員一同は，別に行った学力確認試験の結果と合わせて，本論文の提出者谷 宏は博士（農学）の学位を受けるのに十分な資格があるものと認定した。