

## 学 位 論 文 要 旨

氏 名

申 龍 熙

題 目

地球観測衛星 Terra/ASTER データによる山地流域の葉面積指数及び蒸発散量の推定法に関する研究

( Studies on the estimation methods of leaf area index and evapotranspiration in a forest watershed using Terra/ASTER data)

山地流域の葉面積指数 (LAI) は、森林生態系の特性を表わす最も重要な植生指数の 1 つであると同時に、山地流域の蒸発散や流出などの水循環にも大きな影響を及ぼす重要なパラメータの 1 つである。本研究は、データの広域性、同時性の点で優れている地球観測衛星 Terra/ASTER データを用いて山地流域における LAI の合理的推定法の確立とその蒸発散量の推定への応用法について理論的かつ実験的に検討、考察した。ここで得られた主な研究成果を要約すると以下のようになる。

1. 植生キャノピー内の電磁波吸収・散乱過程に基づく 2 方向成分モデルによる LAI 推定法を提示した。そして、この推定法を夏季 (2007 年 8 月 18 日) と冬季 (2008 年 1 月 9 日) の Terra/ASTER データに適用し、山地流域における LAI の空間分布を推定した。同時に、対象区域内の 16 地点で Plant Canopy Analyzer (LAI-2000) を用いて LAI の現地観測を行い、観測地点における LAI の推定値と測定値を比較した結果、この LAI 推定法により得られた LAI の推定値は、LAI-2000 による測定値と良く一致した ( $r=0.97$ )。このことから、本研究で提示された LAI 推定法の適用性と妥当性が検証された。
2. 地球規模の LAI 調査などに広く利用されている MOD15A2 LAI プロダクトと、ここで提示された LAI 推定法により求められた ASTER LAI マップを比較した結果、研究対象区域である山地流域において MOD15A2 LAI は実際の LAI よりも過大評価されていることが確認された。
3. 提示された LAI 推定法により ASTER データから算出された LAI と ASTER データから推算された地表面温度 (LST) さらに気象台から得られた日平均気温分布データを蒸発散量の推定法のための 2 層モデルに適用し、山地流域の蒸発散量分布を推定した。そして、その蒸発散量推定法の有効性を検証するために、FAO Penman-Monteith (FAO-56) 式の蒸発散量推定値と比較、検討した。その結果、夏季の場合、LAI が高い地点では、両者の推定値は比較的良く一致したが、LAI が低い地点では、2 層モデルの推定値は FAO-56 式のそれより高い値を示した。また、冬季の場合、全体的に 2 層モデルの値は FAO-56 式のそれより高い値を示した。両方法による蒸発散量推定値の差異の原因の 1 つとして、FAO-56 式的前提条件が研究対象区域の山地流域において満たされていないことにあると考えられた。しかし、両モデルで推定された夏季と冬季の蒸発散量の空間分布や平均蒸発散量には大きな差異は見られなかった。

## 学 位 論 文 要 旨

氏 名

Yonghee SHIN

題 目

Studies on the estimation methods of leaf area index and evapotranspiration in a forest watershed using Terra/ASTER data  
(地球観測衛星 Terra/ASTER データによる山地流域の葉面積指数及び蒸発散量の推定法に関する研究)

Leaf area index (LAI) is one of the most important vegetation indices to characterize the forest ecosystem, and one of the parameters that affects the water cycle such as evapotranspiration and runoff in a mountainous watershed. This study examined and established a reasonable estimation method of LAI. Furthermore, the established estimation method was applied to estimate evapotranspiration experimentally and theoretically in a mountainous watershed using excellent satellite (Terra/ASTER) remote sensing data including regional characteristics, simultaneity. The main conclusions of this study are as follows:

1. The estimation method of LAI was presented by the two-stream radiative transfer model based on absorption and dispersion processes of electromagnetic waves in the vegetation canopy. In addition, the spatial distribution of LAI in the mountainous watershed was estimated by applying the Terra/ASTER data to this estimation method. The data were collected in summer (August 18, 2007) and winter (January 9, 2008). The validation of LAI estimation using Terra/ASTER data was conducted by comparing the estimated and measured LAIs. The later one was measured using Plant Canopy Analyzer (LAI-2000) on 16 observation points in the target area. As a result, validity of LAI estimation method was confirmed as exhibited by a high correlation( $r=0.97$ ) between estimated and measured LAIs. Thus, this result confirmed that the present method is a reliable method for LAI estimation in a forest watershed.
2. MOD15A2 LAI product which is used for global LAI investigation was compared with ASTER LAI map obtained in this study to evaluate the accuracy. The result confirmed that MOD15A2 LAI estimation resulted overestimate LAI in the study area.
3. Evapotranspiration in the mountainous watershed was estimated by applying Terra/ASTER data to the two-layer model. LAI calculated from ASTER data by LAI estimation method, LST computed from ASTER thermal infrared data and the average daily temperature distribution data were obtained from weather station and DEM data used in this estimation. The validation of the estimation method was carried out by comparing the evapotranspiration obtained from the two-layer model and the FAO-56 reference evapotranspiration equation. As a result, in case of summer, the estimations obtained from both methods were comparable well in the location with high LAI, but an underestimation was obtained from FAO-56 equation in the location with low LAI. Although the two-layer model tended to give a high estimation in winter, there was no significant difference in the range of evapotranspiration estimated from both model in summer and winter.

学位論文審査結果の要旨	
学位申請者 氏 名	申 龍 熙
審査委員	主査 佐賀大学 教授 瀬口 昌洋
	副査 鹿児島大学 教授 初井 和朗
	副査 佐賀大学 教授 田中 明
	副査 琉球大学 教授 吉永 安俊
	副査 鹿児島大学 准教授 中川 啓
審査協力者	
題 目	地球観測衛星 Terra/ASTER データによる山地流域の葉面積指数及び蒸発散量の推定法に関する研究 (Studies on the estimation methods of leaf area index and evapotranspiration in a forest watershed using Terra/ASTER data)
<p>山地流域の葉面積指数 (LAI) は、森林生態系の特性を表わす最も重要な植生指数の 1 つであると同時に、山地流域の蒸発散や流出などの水循環にも大きな影響を及ぼす重要なパラメータの 1 つである。しかし、現在のところ、流域レベルでの広域的な LAI や LAI などに基づく蒸発散量の合理的推定法は、まだ十分に確立されていない。</p> <p>本研究では、観測データの広域性、同時性及び周期性の点で優れている地球観測衛星 Terra/ASTER データ (地表分解能: 15m) を用いて山地流域における LAI の合理的推定法とその蒸発散量推定への応用法を確立するために、これらの方法について理論的及び実験的側面から詳細に検討、考察した。ここで得られた主な研究成果は、以下のように要約される。</p> <p>植生キャノピー内の電磁波吸収・散乱過程に基づく 2 (上下) 方向成分モデルによる LAI 推定法を提示した。そして、この推定法を佐賀県内に設定された研究対象区域の夏季 (2007 年 8 月 18 日) と冬季 (2008 年 1 月 9 日) の Terra/ASTER データに適用し、山地流域における LAI の空間分布を推定した。</p>	

同時に、対象区域内の16地点で Plant Canopy Analyzer (LAI-2000) を用いて LAI の現地観測を行い、観測地点における LAI の推定値と測定値を比較した結果、この LAI 推定法により得られた LAI の推定値は、LAI-2000 による測定値と良く一致した ( $r=0.97$ )。このことから、本研究で提示された LAI 推定法の適用性と妥当性が検証された。

地球規模の LAI 調査などに広く利用されている MOD15A2 LAI プロダクトと、ここで提示された LAI 推定法により求められた ASTER LAI マップを比較した結果、研究対象区域にある山地流域において MOD15A2 LAI は実際の LAI よりも過大評価されていることが確認された。

提示された LAI 推定法により ASTER データから算出された LAI と ASTER データから推算された地表面温度 (LST) さらに気象台から得られた日平均気温分布データを蒸発散量の推定法のための2層モデルに適用し、山地流域の蒸発散量分布を推定した。そして、その蒸発散量推定法の有効性を検証するために、FAO Penman-Monteith (FAO-56) 式の蒸発散量推定値と比較、検討した。その結果、夏季の場合、LAI が高い地点においては、両者の推定値は比較的良く一致したが、LAI が低い地点においては、2層モデルの推定値は FAO-56 式のそれより高い値を示した。また冬季の場合、全体的に2層モデルの値は FAO-56 式のそれより高い値を示した。両方法による蒸発散量推定値の差異の原因の1つとして、FAO-56 式の前提条件 (十分な土壌水分と背丈の短い芝) が研究対象区域の山地流域において満たされていないことによるものと推察された。しかし、両モデルで推定された夏季と冬季の蒸発散量の空間分布や平均蒸発散量には大きな差異は見られなかった。

以上の成果は、山地流域における森林生態系の特性の把握や水収支構造を解明する上で大きく役立つと同時に、現在、大きな地球環境問題となっている森林破壊や砂漠化などの実態把握及び原因究明さらには森林生態系の保全への取組みの礎になるものとして、高く評価される。よって、本研究は、博士 (農学) の学位を与えるに十分な価値を有するものと認められる。

最終試験結果の要旨	
学位申請者 氏名	申 龍 熙
審査委員	主査 佐賀大学 教授 瀬口 昌洋
	副査 鹿児島大学 教授 初井 和朗
	副査 佐賀大学 教授 田中 明
	副査 琉球大学 教授 吉永 安俊
	副査 鹿児島大学 准教授 中川 啓
審査協力者	
実施年月日	平成 22 年 1 月 8 日
試験方法 (該当のものを○で囲むこと。) <input checked="" type="radio"/> 口答・筆答	
<p>主査及び副査は、平成22年1月8日の公開審査会において学位申請者に対して学位申請論文の内容について説明を求め、関連事項について試問を行った。具体的には別紙のように質疑がなされ、いずれも満足できる回答を得ることができた。</p> <p>以上の結果から、審査委員会は申請者が博士（農学）の学位を受けるに必要な十分の学力ならびに見識を有すると認めた。</p>	

学位申請者 氏 名	申 龍 熙
<p>【質問 1】圃場土壌とは何か。赤土、クロボク土、有明粘土は一般的に理解されると思うが、圃場土壌にはいろいろな種類の土壌がある。したがって、ここでは圃場土壌を定義した方がよいと思う。</p> <p>【回答 1】今回の実験で使用した土壌は、佐賀県内外で採取されたものである。その中で、圃場土と名付けた土壌は佐賀県佐賀市久保泉町の佐賀大学農学部附属資源循環フィールド科学教育研究センターの圃場で採取された。この土壌の組成はそれぞれシルト 19.18%、粘土 42.45%、砂 38.37%であり、国際土壌分類法の 1 つである USDA 土壌タクソノミーで分類を行った結果、粘土と分類された。</p> <p>【質問 2】被覆率 100%の状態では波長に対する反射率の推移が異なる。その原因は何か。</p> <p>【回答 2】植生（クズの葉）に被覆される風乾状態の各土壌の反射率は波長によってそれぞれ異なる。可視波長域で、土壌の反射率が植生の反射率より高い場合、植生被覆率が 0%から 100%へと増加するに伴い、その反射率は減少する。しかし、土壌の反射率が植生より低い場合、逆に植生被覆率が増加するに伴い、その反射率は増加する。このように植生の反射率はその下の土壌の分光反射特性に影響を受け、被覆率が 100%の時も植生層を通過し、土壌層から反射される電磁波放射エネルギーの差で波長に対する反射率の推移が異なる。</p> <p>【質問 3】LAI の算出において、広葉樹は気孔が多い裏面積（片面積）だけでよいと思うが、針葉樹の場合は、どのように求めるのか。</p> <p>【回答 3】LAI は単位地表面積当たりの片面葉面積合計値で算出される。針葉樹では、針葉の投影面積で定義する場合と、針葉の総面積の半分とする場合がある。葉を刈り取って葉面積を測定するとき調査木を何層かで切り分けて層別に葉の全量を採取し、その重量を測定する。また、スキャナーを用いて標準的な葉の面積測定し、葉の重量と葉面積の関係から調査木の総葉面積を求めた後、立木本数から調査区での葉面積指数を算出する。今回山地流域での LAI 測定は光学的方法である Plant Canopy Analyzer を用いて行った。</p> <p>【質問 4】冬は落葉樹が目立つところもあるが、このようなところの LAI はどのように扱われているのか。</p> <p>【回答 4】研究対象区域内にはヒノキやスギのような常緑針葉樹やクスのような常緑広葉樹、クヌギのような落葉樹がそれぞれの群落を形成し分布している。これらの森林キャノピーに対する LAI の測定は、Plant Canopy Analyzer により常緑樹や落葉樹に係わらず夏季と冬季の ASTER データの取得日の前後 2 週間にわたって行われた。冬の落葉樹群落では、落葉により LAI が他の群落より小さく測定された。このような特性は ASTER データによる LAI 推定値からも確認された。</p> <p>【質問 5】FAO-56 式は、土壌水分が豊富で制限因子とならない場合の蒸発散量を与える式であるが、今回対象とした地域の土壌水分は Soil-line のグラフから判断して、どのような状態なのか。また風速は場所によって異なると思うが、どのような値を使用したか。</p>	

【回答5】 研究対象区域に対する ASTER 画像の Band 2 と Band 3 のデータを用いて散布図を作成すると、土壌のみの画素データから Soil-Line と呼ばれる直線が得られる。この Soil-Line 上では土壌が湿っているほど、あるいは有機物が多いほど Band 2 と Band 3 のデータは原点に近い位置にプロットされる。今回の Soil-Line 上にプロットされている各裸地に対する Band 2 と Band 3 のデータが広い範囲に分布しているため、土壌水分は地点によって大きく異なると考えられる。また、流域内の風速は、その空間的な推定ができなかったため佐賀市気象台の日平均風速（夏季：2.0 m/s、冬季：1.7 m/s）を使用した。

【質問6】 2層モデルで、葉面温度を一定（夏：300 K、冬：280 K）と仮定したのはなぜなのか。

【回答6】 ASTER の熱赤外バンド ( $BN_{13}$ ) を用いて求められる地表面温度 (LST) データは、LAI が高い森林キャノピーに対して葉面温度となり、植生被覆率が0%の Soil-Line 上の裸地に対しては土壌面温度となる。本研究の対象流域内で LAI が最も高い所の地表面温度は夏季に 300 K、冬季に 280 K と算出され、これらを葉面温度と仮定した。また、植生の被覆率に大きく影響を受ける土壌面温度に比べ植生の葉面温度はあまり変化しないため、山地流域内の葉面温度を一定と仮定した。

【質問7】  $BN_2$  と  $BN_3$  の関係のプロットで植生があつて、Soil-line より上にこれだけデータがばらついていたら、一点の値だけを用いて LAI の推定を行っても問題ないのか。

【回答7】 ASTER データを用いた LAI 推定モデルのパラメータである  $BN_{\infty 2}$  と  $BN_{\infty 3}$  は、植生が最も密集していると予想される地点の  $BN_2$  と  $BN_3$  の値である。植生が密集するほど  $BN_2$  と  $BN_3$  をプロットした点は、Soil-line からほぼ垂直方向に移動し、 $BN_{\infty 2}$  と  $BN_{\infty 3}$  に収束する。したがって、この一点を  $BN_{\infty 2}$  と  $BN_{\infty 3}$  に対応させることは、特に問題ないと思われる。

【質問8】 ASTER データにより推定された ASTER LAI と MOD15A2 LAI の分布の特徴が LAI=3 で分けられる原因はどのように説明できるのか。

【回答8】 今回 ASTER データを用いて推定した対象流域における ASTER LAI 分布図を Terra-MODIS データから作成された同じ時期の MOD15A2 LAI プロダクトと比較するため、ASTER LAI の空間分解 (90m×90m) を MOD15A2 LAI の空間分解能 (1km×1km) に対応するように空間平均化を行った。その結果、LAI が3以上となる山地流域で、MOD15A2 LAI が過大評価することが確認された。したがって、このような両データの空間分解能の差異が、その原因の1つと推察される。

【質問9】 2層モデルの妥当性を検証するために用いた FAO-56 式は的確に蒸発散量を表していないのであれば、どのように扱うべきか。FAO-56 式での作物係数はどのように扱ったのか。

【回答9】 2層モデルにより推定された蒸発散量  $ET_{two}$  と FAO-56 式により推定された可能蒸発散量  $ET_{FAO}$  は LAI が4以上の山地流域に対して両者の推定値がほぼ対応しているが、LAI がそれより低いところでは、 $ET_{two}$  は  $ET_{FAO}$  より高くなった。しかし、両モデルで推定された蒸発散量の空間分布や平均蒸発散量には大きな差異は見られなかったため、推定法の妥当性がある程度認められたと考えられる。また、農作物の場合、FAO-56 式に作物係数を適用し実蒸発散量を推定するが、森林に関する報告例は見当たらない。したがって、今回の場合、農作物の作物係数を基に推算した。