

学 位 論 文 題 名

航空機および地上リモートセンシングを用いた
北方林広域森林バイオマス計測に関する研究

学位論文内容の要旨

本研究は、航空機および地上リモートセンシング計測を導入して、北方森林のバイオマスを広域に精度よく計測する手法および森林の過去のバイオマスとバイオマス変化の過程を把握するための手法について研究を行ったものである。京都議定書発効に伴い、日本は第1約束期間中に温室効果ガスを1990年比で6%削減することになったが、目標達成に当たって森林等の吸収源による吸収量の算入が3.9%認められた。このような吸収源の炭素排出権を算入するためには国際専門家審査チームのレビューに対応できるモニタリング評価体制の構築が必要となる。リモートセンシングによる計測は、広範囲を低コストで行うことができ、再検証が可能な方法であるため、吸収源モニタリングに効果的な手法である。さらに、第2約束期間においてはモデルと統合した吸収量評価方法が検討されているため、リモートセンシングによる森林バイオマス計測手法の確立が緊急の課題となっている。

ただし、従来の森林リモートセンシング手法である航空写真の解析には、判読作業に熟練と時間を要するといった問題点がある。またLandsat画像では林分レベルの計測には分解能が不足する問題点がある。これに対し、近年商業化された航空機LiDARを用いた計測方法には、バイオマスと相関の高い樹冠高が高分解能・面的に計測可能なことから、機械的・自動的なバイオマスの把握が期待される。しかし、航空機LiDARを用いた計測方法にも、パルス密度の精粗や下層木が計測できないことによるバイオマスの過小評価の問題や、実用化が最近であることから過去の情報が存在しないため、過去にさかのぼった把握や時系列的な解析が不可能といった問題もある。また、リモートセンシング計測の精度を上げるためには、グラウンドトゥールースとしての地上調査データをできるだけ多く整備することが重要である。しかし、地上調査を従来の手法で行うには時間と労力がかかり、多くの計測を行うのは困難である。本研究は、これら従来のバイオマス計測方法の問題点の克服を試み、精度の高い広域森林バイオマスの把握を機械的に展開できる方法の体系化をすすめようとしたものである。具体的な研究課題は、1)「単木法」を用いた航空機LiDARによるバイオマス計測、2)「森林体積法」を用いた航空機LiDARによる計測と航空写真による時系列解析、3)地上リモートセンシングを用いたバイオマス計測の各手法の開発・構築である。それぞれの研究方法、結果を以下に記す。

1) 「単木法」を用いた航空機LiDARによるバイオマス計測

航空機LiDARデータから立木本数・樹高を計測する単木抽出法を用いて、針葉樹人工林と天然林のバイオマス計測を試みた。樹冠抽出には航空機LiDARデータにWatershed法を適用する方法で、上層木の抽出と樹高の計測に成功した。また、時系列の航空機LiDAR計測で問

題となる、パルス密度に依存した樹高の計測誤差を、高密度時の計測樹高と低密度時の計測樹高間の相関式を用いることで補正することに成功した。次に、航空機 LiDAR データからバイオマスを算出するため、既存の資料である材積式（立木幹材積表・密度管理図・航空写真林分材積表）を組み込んだ方法を試みた。航空機 LiDAR データから下層木を検出することは困難なため、立木幹材積表・密度管理図を適用した方法ではバイオマスの過小評価傾向があったが、空中写真林分材積表を適用した方法では下層木も含めた林分バイオマスを推定することが可能となった。また、立木幹材積表を適用する方法の過小評価傾向を改善するため、上層木構造に穂積の MNY 法を適用して下層木構造を推定することでバイオマスの補正に成功した。この結果、広く一般に使われている立木幹材積表を用いることで林分の樹高・バイオマス成長を精度良く計測することが可能となった。しかし、天然林では単木の抽出精度の低下が避けられないことが判明した。以上より、単木法による航空機 LiDAR データの解析は、天然林での計測に課題が残るものの、梢端の明瞭な針葉樹人工林の成長計測手法として有効であることが明らかとなった。

2) 「森林体積法」を用いた航空機 LiDAR による計測と航空写真による時系列解析

単木法で課題の残った天然林において、樹冠面と地表面に挟まれた空間である森林体積と、地上調査で計測したバイオマスとの相関式を作成することによって、バイオマスの算出に成功した。ただし、単木法では既存の材積表を用いることで必ずしも地上調査は必要ではないが、森林体積法では既存の資料がないことから、地上調査が必要という課題が残った。また、航空機 LiDAR による地表面高は過去においても不変であると仮定し、既存航空写真からステレオマッチングにより樹冠表面高データを作成することで過去の森林体積の計測が可能となった。さらに、現在の森林体積-バイオマス相関式を適用することで、過去のバイオマスの算出に成功した。また、過去の樹冠表面高データの変化を利用することで、森林の伐採木の検出、材積変化の計測が可能となった。以上より、航空機 LiDAR の解析には、針葉樹人工林では「単木法」、天然林では「森林体積法」の適用が妥当であることが明らかとなった。また、過去にさかのぼった把握や時系列的な解析を可能とする方法としては、航空機 LiDAR と既存航空写真を用いた時系列解析方法を考案し、有効な手法であることも明らかにした。

3) 地上リモートセンシングを用いたバイオマス計測

航空機 LiDAR データを「森林体積法」で解析する場合は、地上情報との関連把握が最も重要となる。このことから、簡便で高精度な地上調査手法を開発することを目的に、地上レーザスキャナを用いた単木解析、地上レーザスキャナを用いた林分解析、魚眼写真を用いた単木解析、地上写真測量を用いた林分解析を試みた。レーザスキャナを用いた単木解析では、立木位置は精度良く計測できたが、複数計測点からのデータ接合の困難さや、計測点から離れた場所に存在する立木の計測精度の低下から、材積・炭素重量を求めるには課題が残った。レーザスキャナを用いた林分解析では、計測データにピッターリッヒ法の拡張である箕輪法の適用を試み、自動的に、かつ既存の材積表を必要とせず、高精度なバイオマス計測が可能となった。しかし、機器が高価であるため、普及に課題が残った。写真を用いた単木解析では、立木位置・胸高直径の現地調査を簡単に行える一方、内業に大きな負担がかかる課題が残った。写真を用いた林分解析では、二方向から撮影した画像をステレオマッチングするデジタル写真測量を用いることで、地上レーザスキャナと同様のデータが取得可能となった。さらに箕輪法を適用することで、ほぼ自動的に材積を計測することが可能となった。

以上から、1) 針葉樹人工林においては航空機 LiDAR データを「単木法」で処理する、2) 天然林においては航空機 LiDAR データと航空写真測量データを「森林体積法」で処理する、

3) 「森林体積法」で処理する場合には、地上レーザスキャナや地上写真測量を用いてバイオマスを計測し、森林体積-バイオマス相関式を作成することが、広域森林バイオマス計測に有効な手法であることを明らかにした。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 笹 賀 一 郎

副 査 教 授 高 橋 邦 秀

副 査 教 授 中 村 太 士

副 査 総合研究官 山 形 与志樹 (国立環境研究所)

学 位 論 文 題 名

航空機および地上リモートセンシングを用いた

北方林広域森林バイオマス計測に関する研究

本論文は、図 69、表 35 を含む総頁数 131 の和文論文であり、他に参考論文 7 編が添えられている。

本研究は、航空機および地上リモートセンシング計測を導入して、北方森林のバイオマスを広域に精度よく計測する手法および森林の過去のバイオマスとバイオマス変化の過程を把握するための手法について研究を行ったものである。リモートセンシングによる計測は、広範囲を低コストで行うことができ、再検証が可能な方法でもあることから、森林の広域バイオマス把握には効果的な手法と考えられる。とくに、地球温暖化防止をはじめとした環境保全と森林利用の課題においては、リモートセンシングによる森林バイオマス計測手法の確立が緊急の課題となっている。

ただし、リモートセンシング手法の中でも航空機 LiDAR を用いた計測方法には自動的な森林バイオマスの把握が期待されるが、パルス密度の精粗や下層木が計測できないことによるバイオマスの過小評価の問題、さらに実用化が近年であることから過去の時系列的な解析が不可能といった問題がある。また、リモートセンシング計測の精度を上げるためには、グラウンドトゥルースとしての地上調査データを多く整備することが重要となる。しかし、地上調査を従来の手法で行うには時間と労力がかかり、数多くの計測を行うことは困難である。本研究は、これら従来のバイオマス計測方法の問題点の克服を試み、精度の高い広域森林バイオマスの把握を機械的に展開できる方法の体系化をすすめようとしたものである。研究は、次の 3 つの課題を中心にすすめられている。

1) 「単木法」を用いた航空機 LiDAR によるバイオマス計測

航空機 LiDAR データから立木本数・樹高を計測する単木抽出法を用いて針葉樹人工林と天然林のバイオマス計測を試み、樹冠抽出には航空機 LiDAR データに Watershed 法を組み

込む方法で、上層木の抽出と樹高の計測が可能となることを明らかにしている。また、パルス密度に依存した樹高の計測誤差を、高密度時の計測樹高と低密度時の計測樹高間の相関式を用いることで補正することに成功している。次に、計測された情報からバイオマスの把握をおこなうため、既存資料である立木幹材積表を組み込んだ方法を試みている。本方法における下層木検出の困難性を改善するため、上層木構造に MNY 法を適用して下層木構造を推定する方法でバイオマスの補正を行ない、ほぼ正確なバイオマス把握が可能となることを明らかにしている。これらの方法により、地上調査を必要とせず林分の樹高・バイオマス成長を精度良く計測することが可能とされている。ただし、天然林においては、「単木法」では抽出精度の低下が避けられないことも判明している。

2) 「森林体積法」を用いた航空機 LiDAR 計測と既存航空写真の時系列解析

「単木法」で課題の残った天然林については、樹冠面と地表面に挟まれた空間である森林体積と、地上調査で計測したバイオマスとの相関式を作成することによって、バイオマスの算出が可能となることを明らかにしている。また、既存航空写真からステレオマッチング作成した樹冠表面高データと航空機 LiDAR から作成した地表面高データを使用することで、過去の森林材積の算出および時系列的な把握が可能となることも明らかにしている。

3) 地上リモートセンシングを用いたバイオマス計測

航空機 LiDAR データを「森林体積法」で解析する場合には、地上情報との関連把握が重要となる。このことから、簡便で高精度な地上調査手法を開発することを目的に、地上レーザスキャナおよびデジタルカメラを使用した方法の開発を試みている。地上レーザスキャナ計測データにビッターリッヒ法の拡張である箕輪法の適用を試み、自動的に、かつ既存の材積表を必要とせずに、高精度のバイオマス計測が可能となることを明らかにしている。デジタルカメラを使用した方法では、デジタル写真測量を導入することで、地上レーザスキャナと同様のデータ取得が可能となることも明らかにしている。さらに、箕輪法を適用することで、ほぼ自動的に材積を計測することを可能にしている。

以上のように、本研究は、航空機および地上リモートセンシングを利用した北方森林バイオマスの広域把握と、リモートセンシング成果を導入することにより既存空中写真の時系列解析を進展させたものであり、その成果は学術・応用面から高く評価されている。また、研究成果の一部は、すでに実用化がなされるにいたっている。よって、審査員一同は、米 康充 が博士（農学）の学位を受ける十分な資格があると認定した。