

長野県北部のカラマツ林における葉面積指数の推定

栗林正俊¹・田中健太²・渡邊理英^{2,3}・小熊宏之⁴

本研究では、長野県の2050ゼロカーボンに向けた森林CO₂吸収量の確保を念頭に置き、長野県北部の飯綱高原と菅平高原のカラマツ人工林を対象に、2019～2021年にリタートラップ、魚眼レンズ付カメラ、LAI-2200により葉面積指数(LAI)を推定し、その特徴について比較・考察した。3つの手法の中で最も推定精度が高いと考えられるリタートラップによるカラマツの葉のLAIは、3.34～5.11 (m² m⁻²)で、カメラやLAI-2200により推定されたLAIよりも高く、カメラやLAI-2200はLAIを過小評価している可能性が示された。一方、LAI-2200は台風による大量の落枝の影響や、その後の樹冠の回復を捉えるなど、一定の頻度で観測を行うことによりカラマツ林の変化具合を評価できることが明らかになった。カメラは3つの手法の中で最もLAIを低く評価し、台風攪乱の影響を捉えることもできなかったが、高頻度の樹冠撮影により葉群フェノロジーを詳細に捉えて、カラマツの展葉や落葉のタイミングを評価することができた。本研究では、3つのLAIの推定手法でそれぞれに長所と短所があり、うまく併用することで効果的な森林のモニタリングが可能になることが示唆された。

キーワード：飯綱、菅平、カラマツ、LAI、長野県ゼロカーボン戦略

1 はじめに

長野県は2019年12月に全国の都道府県で初となる気候非常事態を宣言し、2050ゼロカーボンへの決意を表明した。また、2020年10月には、議員提案の「長野県脱炭素社会づくり条例」が施行された。さらに、長野県は2021年6月に長野県ゼロカーボン戦略を策定し、2050ゼロカーボンを達成するための基本方針となる数値目標を示した¹⁾。この目標では、2050年度までに2016年度実績に対して最終エネルギー消費量を7割削減し、再生可能エネルギー生産量を3倍以上に拡大した上で、残るCO₂排出量を森林吸収と再生可能エネルギー余剰分で相殺することにより、実質的なゼロカーボンを達成することとしている。

我が国では森林のCO₂吸収量は、炭素蓄積量の経年的な変化から見積もる蓄積変化法により評価されている²⁾。最近10年間の長野県の森林のCO₂吸収量は、2013年度の201万t-CO₂をピークに徐々に減少し、2017年度には150万t-CO₂を下回ったが、2018年度には184万t-CO₂に回復した¹⁾。また、2050年度には200万t-CO₂を確保することを目標としている¹⁾。この目標は現状と大きな差はないが、達成するためには適切な森林管理を進める必要があ

る。これは、長野県の人工林の多くは戦後の拡大造林期に植林されているので、森林が高齢化しており、何も手入れをしないしていると森林のCO₂吸収量は徐々に減少するからである。特に、長野県の主要造林樹種であるカラマツ(*Larix kaempferi*)は、民有林の樹種別蓄積の割合が36%と最も高く、2位のスギの倍以上を占める上³⁾、林業樹種で唯一落葉するので、CO₂吸収量は他の林業樹種よりも気候変動の影響を受けやすいと考えられる⁴⁾。従って、2050年の森林のCO₂吸収量の目標を達成する上で、カラマツ林の生態的特徴を理解し、適切な森林管理を施すことが重要である。

カラマツは落葉するため冬季の寒さに強く、内陸性の冷涼で降水量の少ない長野県の気候に適した樹種とされている。カラマツは春から秋の着葉期間に盛んに光合成を行い、大気中のCO₂を吸収するので、着葉期間の長さ、個葉の光合成能力、葉量などはカラマツの年間CO₂吸収量を考える上で重要な因子である。着葉期間は有効積算気温と関係があることが知られており、標高が高い寒冷地ほど短くなる⁵⁾。個葉の光合成能力は、葉内の葉緑体の体積や窒素含量と正の相関があることが知られており、植物が葉のクロロフィルや窒素を回収して紅葉・黄葉する秋は光合成能力が低下する⁶⁾。一方、葉量については

1 長野県環境保全研究所 自然環境部 〒381-0075 長野市北郷 2054-120

2 筑波大学 生命環境系 山岳科学センター菅平高原実験所 〒386-2204 上田市菅平高原 1278-294

3 現：国保依田窪病院 〒386-0603 小県郡長和町古町 2857

4 国立環境研究所 生物多様性領域 〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2

様々な測定手法が存在するが、対象木を破壊せずに、高精度で、かつ、労力的な負荷が大きすぎない測定手法は未だに確立されていない。例えば、最も高精度な測定方法である層別刈取法は、植物体を上から等間隔で刈り取り、高さ毎に葉の重量を測定する方法であるが、破壊的であり、膨大な労力を要する。

葉量は葉面積指数(Leaf Area Index; LAI)として定量化することが一般的である。LAIは単位土地面積に占める片側の葉面積の総和で、推定方法は直接的方法と間接的方法に大別される。例えば、直接的方法には層別刈取法やリタートラップ法があり、リタートラップ法は林床に仕掛けた袋に落葉を溜めて計測する方法である。リタートラップ法は比較的精度が高い推定方法とされ、樹種を細かく分類することができるなどの長所があるが、落葉樹でなければ測定が困難なこと、リターを処理するのに労力がかかること、展葉から成長の過程での変化は追跡できないことなどが短所である。一方、間接的方法にはLAI-2200やカメラと魚眼レンズによる全天空写真を用いた方法があり、全天空写真を用いた方法は撮影された画像を植生画像解析ソフトにより解析して推定する方法である。こちらは、比較的労力がかからず、自動撮影により時間分解能の高い解析が可能なことなどが長所であるが、撮影時の環境条件に応じて推定精度が大きく変わること、単純化のための仮定(葉の空間分布の一様性・単純な角度分布など)が含まれることなどが短所である。また、捉えられるものは葉だけでなく幹や枝等も含んだ植物面積指数(Plant Area Index; PAI)である。そこで、本研究では、直接的方法と間接的方法を併用して、LAIやPAIを推定し、それぞれの特徴について比較・考察することを目的とする。

2 方法

2.1 観測サイト

観測サイトは長野県北部の表1に示した2つのカラマツ林とした。長野県環境保全研究所飯綱庁舎(以

下、飯綱)の観測サイトは、飯縄山(標高 1917 m)の中腹の南東向きの緩やかな斜面上に位置し、年平均気温は 8.3°C、年降水量は 1551 mm である(表 1)。一方、筑波大学菅平高原実験所(以下、菅平)の観測サイトは、四阿山(標高 2354 m)の中腹の西向きの緩やかな斜面上に位置し、年平均気温は 6.6°C、年降水量は 1343 mm である(表 1)。飯綱の森林構造は尾関・栗林(2019)⁷⁾、気象は栗林・浜田(2020)⁸⁾に、それぞれ詳述されている。

2.2 リタートラップ

飯綱と菅平のカラマツ林内に半径 40 cm、面積 0.5 m² のリタートラップを地上 120 cm の高さに一定の間隔を開けて3か所ずつ設置した(図1)。設置期間は、



図1 観測サイトの写真。
(a)長野県環境保全研究所飯綱庁舎、
(b)筑波大学菅平高原実験

表1 各観測サイトの位置、標高、林齢、年平均気温、年降水量、電源の有無。

観測サイト名	略称	北緯	東経	標高	林齢	年平均気温	年降水量	電源
筑波大学菅平高原実験所	菅平	36° 31' 25"	138° 20' 50"	1348 m	60-70年	6.6°C	1343 mm	なし
長野県環境保全研究所飯綱庁舎	飯綱	36° 43' 31"	138° 9' 13"	1030 m	60-70年	8.3°C	1551 mm	あり

飯綱では2019年7月1日から2019年12月2日まで、菅平では2019年7月1日から2021年11月29日までとし、月末か月初めのいずれかに月1回の頻度でリターの回収作業を行った。なお、菅平では冬季にはリタートラップを支柱から外して真下におろし、積雪期間中はリタートラップを地上におき、翌春の雪解け後にリタートラップ内に落ちていたリターを回収した上で、リタートラップを支柱に設置した。

回収したリターは、カラマツの葉、カラマツ以外の葉、枝・葉柄・繁殖器官(花や種子など)、その他、の4種類に分類した。“その他”の項目には、樹皮、虫の死骸・糞・抜け殻などが含まれる。分類後のリターは、72°Cで24時間乾燥させた後に乾燥重量を電子天秤で計量した。各観測サイト・各月毎に3か所のリタートラップで別々に計量し、平均値を計算した。

“カラマツの葉”の乾燥重量からLAIを推定する際には、葉面積を葉重で除した値である比葉面積(Specific Leaf Area; SLA)を乾燥重量に乗じる。このSLAには、山梨県富士吉田市の国立環境研究所富士北麓フラックス観測サイトの約65~70年生のカラマツ人工林における先行研究⁹⁾で得られた値の平均値176(cm²g⁻¹)を使用した。LAIを計算する際の“カラマツの葉”の乾燥重量は、リタートラップを設置した月から翌春までの乾燥重量を積算した値とした。すなわち、リタートラップ法で推定されるLAIは、その年の上限値と考えることができる。ここで上限値とした理由は、LAIはある時点の葉量を代表する指数で経時的に変化する値であるが、もし展葉完了直後に何らかの攪乱を受けて落葉し、夏季に新たな葉が再生されて秋季に落葉するようなことが起きた場合、リタートラップ法で推定されるLAIは別の時期に着いていた葉が積算されているので、実際の着葉期間のLAI最大値よりも大きくなる可能性があるからである。

2.3 魚眼レンズ付カメラ

飯綱と菅平のカラマツ林内に林床から樹冠に向けて魚眼レンズ付きのデジタル一眼レフカメラを設置し、定期的に樹冠画像を撮影した。設置期間は、飯綱も菅平も各年の4月中旬頃から12月上旬頃とした。デジタル一眼レフカメラはNikon社製で、機種は飯綱がD3300、菅平がD5600をそれぞれ使用した。魚眼レンズはシグマ光機社製で、レンズとカメラの一式はドーム窓を付けたブラボックスに密閉し

表2 カメラの主な設定.

設定オプション	本研究の設定
撮影モード	絞り優先モード(A)
絞り値	f8
感度自動制御	ON
ISO感度 制御上限感度	1600
低速限界設定	AUTO
測光モード	中央重点測光
ホワイトバランス	曇天
画質モード	RAW+F
色空間	sRGB

た状態で収納した。カメラの主な設定は、表2のとおりである。撮影は、商用電源のある飯綱では0:00から21:00まで3時間間隔として、商用電源のない菅平では0:00から18:00まで6時間間隔とした。ただし、樹冠画像からPAIを推定する場合、太陽が入らず一定の明るさがある時刻に撮影することが望ましいことから、日が短い秋には17:00頃の画像を取得できるように撮影時刻を1時間程度早めた。なお、月1回の頻度で撮りためた画像の回収や機器のメンテナンス作業を行った。

カメラの樹冠画像は、横4000画素、縦6000画素で、どちらの方向も解像度は300dpi、ビットの深さは24bitカラーのJPG形式である。樹冠画像は、夜間の画像、ドーム窓に雨滴・結露・カラマツの葉などの異物が付着した画像、太陽が写っている画像、を目視で確認して取り除き、できるだけ早朝や日没時の画像、または曇天時の画像を解析対象とした。解析対象として峻別した樹冠画像を、森林生態学分野での利用を目的に開発された植生画像解析ソフトLIA for Win32(以下、LIA32)により、植物体(幹・枝・葉)と非植物体(間隙)に分けて二値化処理し、日々のPAIを計算した。LIA32で二値化処理する際は、魚眼レンズが捉えた円形の画像全体を解析対象範囲に指定し、Intermeansアルゴリズムを用いて画像の青(B)の画素値から閾値を算出する方法¹⁰⁾を選択した。また、PAIは解析対象範囲の天頂角0~74°の範囲に対して計算されるようにした。

樹冠画像から推定されたPAIについて、各年の観測期間中の最大値から最小値を差し引くことにより、LAIを計算した。PAIの年間最小値は落葉樹の展葉前や落葉後といった落葉樹の葉が着いてない時期に観測されるのに対し、PAIの年間最大値は落葉樹が全て展葉しきって樹冠開空度が最も低くなる夏季に

観測される。すなわち、PAIの年間最大値と年間最小値の差をとることで、樹冠画像に写った幹、枝、常緑樹の葉などの分が相殺されて、落葉樹の葉のLAIを抽出できる。このLAIは、その年の最大値と考えることができ、主にカラマツの葉と考えられるが、一部にはカラマツ以外の落葉樹も含まれている。

2.4 LAI-2200

魚眼レンズ付カメラによる自動観測に加えて、LAI-2200(LI-COR社製)によるPAIの手動観測も不定期で行った。LAI-2200もPAIの基本的な観測原理は魚眼レンズ付カメラと同様で、魚眼レンズへの入射光を天頂角0~75°の範囲で測定してPAIを推定する。LAI-2200では、群落の上方(外部)と下方(内部)の放射光を測定し、それぞれの放射光の比からPAIを計算する。また、LAI-2200のセンサーは490nm以上の波長の光をカットするフィルターを持っており、受光部は波長が320~490nmの光に感度がある。これは、植物の葉は波長が約500nm以下の光の透過率はほぼ0になるため、植物体(幹・枝・葉)は黒、非植物体(間隙)は明るく認識され、二値化された情報が取得できる。魚眼レンズ付カメラの場合は、波長500nm以上の光が葉を透過したり、葉群で散乱されたりし、これらの透過光や散乱光も入射光と認識されてしまうので、LAI-2200の方が魚眼レンズ付カメラよりも高精度にPAIを推定できる。ただし、LAI-2200は手動観測のため自動観測できる魚眼レンズ付カメラよりも観測頻度は少ない。

LAI-2200により森林のPAIを観測する際は、前述のとおり群落の外部と内部の放射光を測定する必要があるため、森林に開けたギャップか樹冠より上に出たタワーが必要である。飯綱では飯綱庁舎前の駐車場、菅平では樹木園の横の草原をそれぞれ森林群落の外部の放射光測定箇所とした。また、直達光が入らない日没時か曇天時が良い観測条件なので、飯綱では夕方か曇天日に測定を行い、菅平では魚眼レンズ付カメラのメンテナンス日が曇天だった場合に測定を行った。PAIは同じ林内でも樹冠の空き具合が場所により異なることから、LAI-2200で観測するには飯綱も菅平も林外1箇所・林内4箇所の測定を2セット行うことで、できるだけ林内の平均的なPAIを取得するようにした。

LAI-2200によるPAIに関しても、魚眼レンズ付カメラによるPAIと同様に、年間最大値と年間最小値の差分をとってLAIを計算した。ただし、菅平に

ついては観測頻度が少ないことから、カラマツの展葉前である2020年4月17日に測定したPAIを最小値として、各年の最大値との差分を計算した。

3 結果と考察

3.1 リタートラップ

リタートラップによる回収物の月別乾燥重量は、菅平の2020年12月~2021年4月を除き、10月と11月が他の月に比べて圧倒的に重い(図2)。菅平の2020年12月~2021年4月の乾燥重量は、大部分を枝・葉柄・繁殖器官が占めており、冬季の大雪による着雪で大量の落枝が発生したと考えられる。10月と11月の乾燥重量は、飯綱の2019年10月を除き、大部分を葉が占めており、10月と11月にカラマツをはじめとした落葉樹の葉が落葉したことを意味する。リタートラップで回収された葉(“カラマツの葉”と“カラマツ以外の葉”の和)に占めるカラマツ以外の葉の割合を計算すると、飯綱の2019年は15.6%、菅平の2019年は23.5%、菅平の2020年は19.6%、菅平の2021年は26.8%で、飯綱も菅平もカラマツ林の中にカラマツ以外の落葉樹が15~30%は混在していると考えられる(図2)。

飯綱の2019年10月は、枝・葉柄・繁殖器官の乾燥重量が葉よりも重く、2019年10月12日に襲来した令和元年東日本台風の影響で大量の落枝があったことを反映している⁴⁾。菅平では、2019年10月の枝・葉柄・繁殖器官の乾燥重量は目立って大きくはなく、東日本台風による攪乱は飯綱に比べて小さ

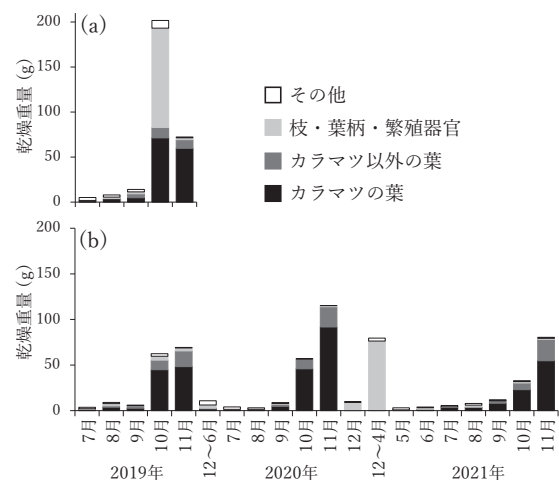


図2 リタートラップによる回収物の月別乾燥重量。(a)飯綱、(b)菅平。

かったと考えられる。一方、2020年が2019年と2021年に比べて10月と11月の葉の乾燥重量が重く、2021年は2020/21年冬季の落枝の影響を受けて葉が少なかったと考えられる(図2b)。本研究の結果からは不明であるが、菅平のアメダスでは2019年1月26日に日降雪深41cmを観測しており、2018/19年冬季も着雪による落枝が発生して2019年の葉量に影響を及ぼした可能性がある。台風や豪雪による攪乱は、カラマツ林の葉量を減らすと考えられ、攪乱の少ない年の方が相対的に葉量は多くなると考えられる。過去には菅平のアカツ林や広葉樹林を対象に約7年間のリターフォール量を調査した研究があり、リターフォール量には季節変動や年変動のパターンがあること、長期的には森林の遷移に伴うリターの変化があることが示されており¹¹⁾、継続的な調査を行うことでカラマツ林においても葉量の年次変化のパターンを評価できる可能性がある。

3.2 魚眼レンズ付カメラとLAI-2200

魚眼レンズ付カメラの樹冠画像から推定されたPAIは、飯綱も菅平もカラマツの展葉とともに値が増加し、落葉とともに値が減少する季節変化を示した(図3)。すなわち、飯綱も菅平も4月下旬から5月上旬に展葉が始まりPAIが増加し始め、5月下旬から6月上旬には展葉が完了してPAIの増加が止まり、10月中旬から下旬に落葉が始まりPAIが減少し始め、11月中旬から下旬には落葉が完了してPAIの減少が止まっている。この季節変化は、飯綱におけるLAI-2200によるPAIからも見てとれる(図3a)。カメラによるPAIを細かくみると、飯綱では2021年の春先のPAIの増加が比較的早く、展葉が他の年に比べて早いこと(図3a)、菅平では2019年より2020年、2020年より2021年の方が、それぞれPAIが高い値で推移していることなど(図3b)、年による葉群フェノロジーや葉量の違いも読み取れる。また、PAIの上昇が頭打ちになる展葉完了の時期は、飯綱よりも菅平の方が遅いこと、着葉季のPAIは飯綱よりも菅平の方が高く葉量が多いことなど、観測サイトによる葉群フェノロジーの違いも読み取れる。

LAI-2200によるPAIは、飯綱では2019年10月11日から15日の間に $3.35 \text{ (m}^2 \text{ m}^{-2}\text{)}$ から $2.40 \text{ (m}^2 \text{ m}^{-2}\text{)}$ に低下した(図3a)。これは、2019年10月12日に襲来した令和元年東日本台風の影響で大量の落枝があり(図2a)、樹冠が空いたことが原因と考えられる。この台風による大量の落枝の影響は、カメラに

よるPAIには見られず、カメラよりもLAI-2200の方が観測精度が高いことを示唆している。LAI-2200によるPAIは、東日本台風襲来前の2019年が最も高い値で推移しているのに対し、2020年は最も低い値で推移し、2021年は2020年よりもやや高い値で推移した(図3a)。これは、台風による落枝で空いた樹冠が徐々に回復してきているためと考えられる。菅平では飯綱に比べるとLAI-2200による観測が少ないが、PAIの季節変化はカメラと同じと考えられ、6月や7月のLAI-2200によるPAIは着葉季の葉量を反映している。菅平におけるLAI-2200の6月や7月のPAIは、2019年より2020年、2020年より2021年の方が、それぞれ高く、カメラによるPAIと同じ傾向を示した。ただし、3.1節で述べたとおり、菅平は飯綱に比べると東日本台風による落枝は少なく、むしろ2020/21年の冬季の落枝が多いので、LAI-2200とカメラで捉えられたPAIが2020年より2021年の方が高いことは、リタートラップの結果とは整合していない。この原因として、菅平ではLAI-2200によるPAIは観測の頻度が低いこと、カメラによるPAIは攪乱に対する感度が鈍いこと、が考えられる。

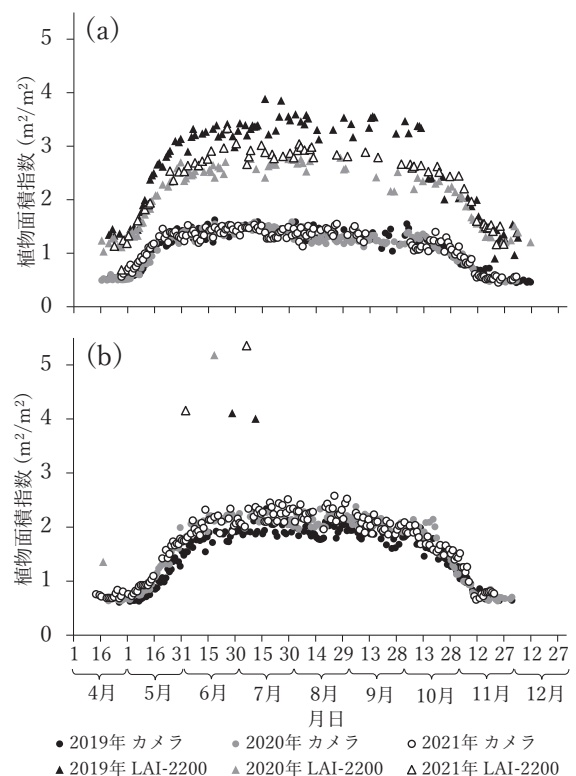


図3 魚眼レンズ付カメラとLAI-2200による植物面積指数(PAI)。(a)飯綱、(b)菅平。

3.3 各方法で推定された LAI

リタートラップ、魚眼レンズ付カメラ、LAI-2200の3つの方法で推定されたLAIを表3に示す。リタートラップのLAIは、飯綱では2019年に4.96 ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$)、菅平では2019年に3.64 ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$)、2020年に5.11 ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$)、2021年に3.34 ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$)だった。これらの値は、菅平の2021年を除いて、カメラやLAI-2200によるLAIよりも高い。リタートラップのLAIはカラマツの葉のみであるのに対して、カメラやLAI-2200のLAIにはカラマツの葉に加えてカラマツ以外の落葉樹の葉も含まれるにも関わらず、リタートラップのLAIの方が高いことについて少し考察する。一般的にLAIの推定方法は直接的な手法の方が間接的な手法よりも精度が高いとされていること¹²⁾、層別刈取法とLAI-2000により推定された各LAIを比較した研究では、LAI-2000は過小推定することが報告されていること¹³⁾、などから本研究で比較した3つの方法の中では、リタートラップにより推定されたLAIが最も推定精度が高く、カメラやLAI-2200のLAIは過小評価と考えられる。LAI-2200と魚眼レンズ付カメラのLAIを比較すると、LAI-2200によるLAIの方がリタートラップによるLAIに近い値であり(表3)、LAI-2200の方が魚眼レンズ付カメラよりもLAIの推定精度が高いと考えられる。

魚眼レンズ付カメラやLAI-2200で推定されるカラマツ林のLAIが過小評価となる原因として、葉の相互被陰、および、カラマツが針葉樹であることが考えられる。前者については、3次元的に分布した葉がカメラやLAI-2200により2次元の画像に投影される際に、複数の葉が重なり合うことで、実際よりもLAIが低く推定されてしまうと考えられる。後者については、カメラもLAI-2200も放射光を捉えているので、針葉樹のように広葉樹に比べて細かい葉が大量についている場合、放射光が葉の縁で回折されたり、林内で散乱されたりして、カメラやLAI-2200の受光部に届く光の量が広葉樹に比べると相対的に多くなると考えられる。すると、樹冠で遮断される放射光の量が過小評価されて、LAIの値も低く推定されてしまうと考えられる。

4 おわりに

本研究では、リタートラップ、魚眼レンズ付カメラ、LAI-2200により飯綱と菅平のカラマツ林のLAI

表3 各方法で推定された飯綱と菅平のカラマツ人工林の葉面積指数(LAI)

観測方法	飯綱			菅平		
	2019年	2020年	2021年	2019年	2020年	2021年
リタートラップ ^{a)}	4.96	—	—	3.64	5.11	3.34
魚眼レンズ付カメラ ^{b)}	1.17	1.13	0.99	1.73	1.81	1.92
LAI-2200 ^{b)}	2.92	1.75	2.20	2.75	3.82	4.00

a) カラマツの葉のLAIの上限値

b) カラマツ林内のカラマツ以外の落葉樹も含むLAIの最大値

を推定して比較することにより、それぞれの推定手法が持つ特徴を明らかにした。各手法をうまく併用することで、LAIの最大値や、その季節変化に基づく展葉・落葉のタイミング、攪乱によるLAIの急激な変化や回復過程を捉えることが可能になり、カラマツ林の生態系の炭素収支の高精度な評価に役立つことが期待される。特に、気候変動を念頭に置くと、LAIの最大値や展葉・落葉のタイミングと気象要素の関係、豪雨・豪雪・猛暑・早魃などの極端現象による攪乱がLAIに及ぼす影響などを明らかにすることが、将来の森林CO₂吸収量を適切に評価する上で重要である。このためには、次の2つが今後の課題と考えられる。1つは、森林におけるモニタリング体制を拡充して、より多様な手法で継続的なLAIの観測を行うことで、もう1つは、気候予測データセット2022¹⁴⁾などアンサンブル計算された気候予測値を力学的ダウンスケールにより高解像度化した気象データを陸域生態系モデルに入力して、極端現象が森林生態系の炭素収支にもたらす影響を評価することである。

謝 辞

本研究は、(独)環境再生保全機構の環境研究総合推進費(JPMEERF20182R03)により実施した。また、長野県環境保全研究所と筑波大学山岳科学センターの連携協定に基づく共同研究、および国立環境研究所と地方環境研究所との共同研究(適応型)の一環として実施した。

ORCID

Masatoshi Kuribayashi

<https://orcid.org/0000-0001-7709-1287>

Tanaka Kenta

<https://orcid.org/0000-0002-6234-1017>

Hiroyuki Oguma

<https://orcid.org/0000-0002-0100-0243>

文 献

- 1) 長野県, 長野県ゼロカーボン戦略 : <https://www.pref.nagano.lg.jp/kankyo/keika/ku/zerocarbon/index.html> (2022年12月確認)
- 2) 長野県林業総合センター技術情報No.133 (2008) 森林のCO₂吸収量評価のしくみ - 立木幹材積から, 炭素吸収量を計算する - : <https://www.pref.nagano.lg.jp/ringyosogo/seika/gijyutsu/documents/133-1.pdf> (2022年12月確認)
- 3) 長野県林務部 (2022) 長野県民有林の現況 : <https://www.pref.nagano.lg.jp/rinsei/sangyo/ringyo/toukei/minyurin/documents/r4genkyou.pdf> (2022年12月確認)
- 4) 栗林正俊・尾関雅章 (2021) 信州カラマツの炭素収支の気候変動応答に関するモデル解析, 長野県環境科学技術者協議会報, 130:6-9
- 5) 只木良也・北村秀夫・蟹江清丞・佐野弘美・重松明子・大津慎一 (1994) 標高に伴うカラマツの葉の開葉と落葉の挙動, 日本生態学会誌, 44:305-314
- 6) 小野清美・永野聡一郎 (2013) 葉の老化に影響を与える環境要因と葉の老化の制御機構, 日本生態学会誌, 63:49-57
- 7) 尾関雅章・栗林正俊 (2019) 長野市飯綱高原におけるカラマツ高齢人工林の樹木成長, 長野県環境保全研究所研究報告, 15:45-49
- 8) 栗林正俊・浜田崇 (2020) 飯綱高原のカラマツ人工林における2018~2019年の気象観測, 長野県環境保全研究所研究報告, 16:59-64
- 9) 小枝慧子 (2022) 落葉を用いた葉面積指数の直接推定に関する研究, 長野県林業総合センター技術情報, 167:18-21
- 10) Yamamoto, K. (2000) Estimation of the canopy-gap size using two photographs taken at different heights, *Ecological Research*, 15:203-208
- 11) 正木大祐・金井隆治・長岡講二・佐藤美幸・勝山麻里子 (2014) リターフォールトラップを使用した長期調査, 筑波大学技術報告, 35:35-38
- 12) 及川武久・山本晋 (2013) 陸域生態系の炭素動態, 京都大学学術出版会, pp.414
- 13) 石井孝・梨本真・下垣久 (1999) 衛星データによる葉面積指数LAIの推定, *水文・水資源学会誌*, 12(3):210-220
- 14) 文部科学省・気象庁 (2022) 気候予測データセット2022 : <https://diasjp.net/ds2022/> (2023年1月確認)

Estimation of leaf area index at larch forests in northern part of Nagano Prefecture

Masatoshi KURIBAYASHI¹, Tanaka KENTA², Rie WATANABE^{2,3} and Hiroyuki OGUMA⁴

¹ *Natural Environment Division, Nagano Environmental Conservation Research Institute, 2054-120 Kitago, Nagano 381-0075, Japan*

² *Sugadaira Research Station, Mountain Science Center, University of Tsukuba, 1278-294 Sugadaira Kougen, Ueda 386-2204, Japan*

³ *Present address: Yodakubo Hospital, 2857 Furumachi, Nagawa, Chiisagata 386-0603, Japan*

⁴ *Biodiversity Division, National Institute for Environmental Studies, 16-2 Onogawa, Tsukuba 305-8506, Japan*

Key words : Iizuna, Sugadaira, Larch, LAI, Nagano prefecture zero carbon strategy