

アラスカのトウヒ林における晴天・曇天時の森林ギャップ 確率の測定と葉面積指数推定値の比較

誌名	日本リモートセンシング学会誌 = Journal of the Remote Sensing Society of Japan
ISSN	02897911
著者名	小林, 秀樹 永野, 博彦 金, 龍元 鈴木, 力英
発行元	日本リモートセンシング学会
巻/号	38巻1号
巻号補足	
掲載ページ	p. 44-49
発行年月	2018年1月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



技術報告

アラスカのトウヒ林における晴天・曇天時の森林ギャップ確率の測定と葉面積指数推定値の比較

小林秀樹^{*1}・永野博彦^{*2,*3}・金 龍元^{*2}・鈴木力英^{*1}

Comparison of Gap Fraction and Leaf Area Index Measurements Under Clear and Cloudy Sky Conditions in Alaskan Spruce Forests

Hideki KOBAYASHI^{*1}, Hirohiko NAGANO^{*2,*3}, Yongwon Kim^{*2} and Rikie SUZUKI^{*1}

Abstract

At northern high latitudes, warming trends have been accelerating, and it is important to understand how the terrestrial ecosystems in these regions respond to such climate change. Satellite-based monitoring of vegetation parameters such as the leaf area index (LAI) provides the diagnostic characteristics for terrestrial vegetation dynamics. Thus, an effort to assure data quality through a comparison with ground-based datasets is crucial. The objective of this study is to evaluate LAI from gap fraction measurements under clear and cloudy sky conditions. We performed gap fraction measurements using plant canopy analyzers at four spruce forest sites in interior Alaska, USA, in September to October 2011 and August 2016. The measured gap fraction was then used to compute the LAI. After correcting the scattering radiation effect on the gap fraction, we obtained an LAI (L_m) of 1.00 to 1.75. When the woody area and shoot level clumping effects were taken into account, the green LAI was estimated to range from 1.18 to 2.33. The LAIs estimated after the scattering correction were closer to the LAIs obtained in cloudy sky conditions, suggesting that the LAI obtained in clear sky conditions can be considered to have the same accuracy as that obtained in cloudy sky conditions.

Keywords : leaf area index, forest gap fraction, radiative transfer, validation, boreal forest

1. はじめに

アラスカを含む周北極域は21世紀以降の温暖化の進行が全球平均に比較して極めて高く¹⁾、温暖化の進行が陸域生態系の変動や炭素循環プロセスに与える影響の正確な評価が必要である。その一方で、衛星データから推定される生態系構造パラメータの地上検証データは限られており、衛星導出プロダクトの精度改善に資する、十分に信頼性の担保されたデータの取得とその活用が求められている。陸上植生の衛星観測では、単位地表面積あたりの葉の片面の総面積で定義される葉面積指数 (Leaf Area Index, LAI) や地上部の森林バイオマス乾重量などの推定が試みられている。本技術報告で対象とする LAI は個葉スケールの光合

成量や呼吸量を植物群落レベルにアップスケールするために必要な生物物理量であり、生態系モデルで炭素収支を計算する際や、例えば羽島らの研究²⁾のように地球システムモデル等で独立に予測される LAI の検証に用いられている。

LAI の衛星推定値の精度検証を行うためには、地上で LAI を計測する必要がある。樹木や草本を刈り取って葉面積を調べる直接法は、衛星観測スケール規模の大規模調査に向かないことや破壊的な方法のために継続的な観測による時系列データの取得に向かないなどの問題点がある。このため、衛星推定値の精度検証では植物群落内での光の減衰や全天写真を利用した非破壊調査が用いられることが多い³⁾。

光の減衰や全天写真による非破壊法では、葉群は透過率

(2016. 11. 12 受付, 2017. 12. 15 改訂受理)

^{*1} 国立研究開発法人海洋研究開発機構 北極環境変動総合研究センター

〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町 3173-25

^{*2} アラスカ大学フェアバンクス校 国際北極圏研究センター
2160 Kouyukuk Dr., PO Box 757320, Fairbanks, Alaska 99775-7320, U. S. A.

^{*3} 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力基礎工学研究センター

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地 4

^{*1} Institute of Arctic Climate and Environment Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3173-25, Showa-machi, Kanazawa-ku, Yokohama, Kanagawa, 236-0001, Japan

^{*2} International Arctic Research Center, University of Alaska, Fairbanks, 2160 Kouyukuk Dr., PO Box 757320
Fairbanks, Alaska 99775-7320, U. S. A., Tel: +1-907-474-2674

^{*3} Nuclear Science and Engineering Center, Japan Atomic Energy Agency, 2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1195, Japan

と反射率がゼロと仮定した LAI 推定モデルが多用される⁴⁾。その為、葉の表面における光の反射と透過の影響が大きくなる条件を避け、太陽直達光が存在しない完全曇天、夜明け、夕暮れ時の観測が推奨されている。一方で、このような限られた条件では、衛星観測値と同程度の観測スケール（数十～数百メートル）での多点観測や遠隔地でのデータ取得が困難になるという問題があった。近年、林内の光の透過率に含まれる葉面の光散乱（反射・透過）の寄与を一次元の放射モデルで理論的に計算し、その影響を除去してギャップ確率と LAI を推定する手法が提案された⁵⁾。この手法を用いることで太陽直達光が存在する場合でも、快晴に近い条件や天空における雲の移動時間が観測時間に比べて十分に遅い条件では、曇天時と同等の精度で LAI が推定できる⁵⁾。近年の研究で、この手法の有効性の検討は進んでいるものの^{6)~8)}、アラスカに広く分布するトウヒ林のように疎林で側枝が短く針葉が主幹周りに分布している森林構造では手法の有効性についての議論は進んでいない。トウヒ林における散乱補正法の有効性を議論するためには、晴天及び曇天時にギャップ確率を観測し、その観測値に基づいて比較検討する必要がある。

本技術報告では、2011 年 9 月～10 月と 2016 年 8 月に米国アラスカ州内陸部のトウヒ林（計 4 サイト）で曇天時と快晴時に実施した光学的推定法による LAI の観測結果をまとめ、曇天時と快晴時における LAI 推定値の比較から、快晴条件におけるギャップ確率の補正効果を調べることを目的としている。

2. 観測サイトと方法論

2.1 LAI 算出法

Chen⁹⁾ の定義に従うと LAI の本来の定義（単位地表面積あたりの葉の投影面積）に従う LAI (L) と葉群密集度（クランピング指数）の間には、以下の関係がある。

$$L = (1 - \alpha) L_e \gamma / \Omega \quad (1)$$

ここで、 α は森林内で光を遮断する植物体に対する非同化器官の割合、 L_e は有効葉面積指数、 γ はシュートスケールのクランピング指数、 Ω はシュート以上のスケールのクランピングである。有効葉面積指数 L_e には、非同化器官の影響も含まれるため、正確には有効植物体面積指数とするべきかもしれないが、ここでは Chen et al. (1996)⁹⁾ の表記にならって L_e とした。ここで、今回の観測データから算出するパラメータは、

$$L_m = L_e / \Omega \quad (2)$$

である。 L_m はギャップ確率の観測値から定量化した LAI であり、 α と γ は考慮していない。 L_m の観測にはプラント・キャノピー・アナライザー (LAI-2200C 及び LAI-2000) を使用した。これらのセンサは森林の光透過率（波長範囲 320–490 nm）を 5 つの異なる天頂角のリング（リング 1：

0.0°–12.3°、リング 2：16.7°–28.6°、リング 3：32.4°–43.4°、リング 4：47.3°–58.1°、リング 5：62.3°–74.1°）で計測する。一台のセンサを林冠もしくは観測対象林近くのオープンスペースに設置して太陽直達光を含まない大気中の散乱光を計測すると同時に、もう一台のセンサで林内の透過光を計測する。同時刻に観測された両センサの光量の比から森林の透過率が計算できる。葉面での反射と透過が十分に小さい場合には、プラント・キャノピー・アナライザー等で計測された光の透過率が天頂角 θ_s 方向のギャップ確率 ($P_0(\theta_s)$) とみなせる。Miller の式¹⁰⁾ はギャップ確率の天頂角情報から葉群の傾き分布情報なしに LAI 推定を行えることを示した重要な関係式である。観測で得られた P_0 を上述の 5 つのリング (Ring 1~5) の角度範囲で離散化して Miller の式を適用することプラント・キャノピー・アナライザーの観測値から LAI が計算できる⁴⁾。

$$L_e = -2 \sum_{i=1}^5 W_i \ln(P_0^i) \cos \theta_i^* \quad (3)$$

ここで P_0^i および W_i は、 i 番目のリングのギャップ確率とその重み関数である。

一方で、快晴時など太陽直達光の強度が大気散乱光より極めて大きく、直達光の葉面散乱成分がプラント・キャノピー・アナライザーで観測される光透過率に混入する場合、葉面での直達光の散乱寄与分を補正した後に、式 (3) で LAI を推定する必要がある。プラント・キャノピー・アナライザーで得られる光透過率 P_m と森林ギャップ確率 P_0 には以下の関係がある⁵⁾。

$$P_m(\theta_s, \theta_v, \varphi_r) = P_0(\theta_s, \theta_v) + \frac{I_l(\theta_s, \theta_v, \varphi_r)}{I_{sky}(\theta_s, \theta_v, \varphi_r)} \quad (4)$$

ここで P_m は観測で得られる光透過率、 I_l は葉群で散乱される直達光の強度、 I_{sky} は森林に入射する太陽直達光の強度である。また、 θ_s と φ_r はそれぞれ太陽天頂角及び観測方向と太陽方向の相対方位角である。したがって、LAI 推定に利用される森林ギャップ確率 P_0 は、観測で得られた光透過率 P_m から式 (4) 右辺第二項の葉面散乱寄与分を差し引くことで求められる。

ここで、葉群で散乱される光の強度 I_l は、葉の反射率や透過率および LAI などの植物生理生態パラメータをもとにして放射伝達計算によって求められる。葉の反射率や透過率は対象とする植生の典型値を文献値などから引用するか、別途分光反射率計測で求める。放射伝達モデルの入力変数の一つである LAI は森林ギャップ確率から推定する未知数であり、式 (4) では求めるべき LAI が入力条件になる。その為、LAI は式 (3) と式 (4) の収束計算で求める¹¹⁾。最後に収束計算で求められた LAI (L_e) を式 (2) にならってクランピング指数 (Ω) で除して L_m を求める。クランピング指数 (Ω) の正確な決定は容易ではないが、Ryu et al. (2010)¹²⁾ の提案する「みかけのクランピング指数, Apparent clumping index」は、 Ω に近い定義のため、本研究ではみかけのクランピング指数を Ω とした。みかけクランピング

Table 1 Summary of the LAI measurements in clear sky conditions in Alaska, USA.

Site ID	Latitude/ Longitude	Date, time *	Local noon	View Azimuth Direction**	Solar Zenith angle	Solar Azimuth Angle	Diffuse fraction
T-1	67.99°N, 149.76°W	August 23, 13:20:01	12:59	340°	56.40°	186.18°	0.39
T-2	67.183°N, 150.30°W	August 28, 14:47:42	13:01	10°	59.91°	210.52°	0.25
T-3a	66.08°N, 150.17°W	August 29, 14:40:48	13:01	70°	58.95°	208.80°	0.24
T-3b		August 29, 14:23:06		260°	58.19°	203.97°	0.22
T-4a	65.84°N, 149.65°W	August 29, 12:39:41	12:59	30°	56.33°	174.07°	0.22
T-4b		August 29, 13:10:24		210°	56.24°	181.78°	0.21

* "Time" is the timing of the first below measurement in Alaskan Standard Time, AKST.

**Direction is from magnetic north. e.g. North=0°, East=90°, South=180°, West=270°.

Table 2 Summary of the LAI measurements under cloudy conditions in Alaska, USA.

Site ID	Latitude/ Longitude	Date, time *	Local noon	View Azimuth Direction**	Solar Zenith angle	Solar Azimuth Angle	Diffuse fraction
T-2	67.183°N, 150.30°W	September 28, 12:58:00	13:01	45°	68.97°	180.00°	1.0
T-3	66.08°N, 150.17°W	October 2, 16:08:29	13:01	0°	77.06°	131.75°	1.0

* "Time" is the timing of the first below measurement in Alaskan Standard Time, AKST.

**Direction is from magnetic north. e.g. North=0°, East=90°, South=180°, West=270°.

グ指数は、プラント・キャノピー・アナライザーの観測値をもとにして以下の式で算出できる。

$$\Omega = \sum_{i=1}^5 \frac{\ln(\bar{P}_i)}{\ln(P_0)} \quad (5)$$

ここで式(5)のオーバーライン“ $\bar{}$ ”は、 i 番目のリングにおけるサンプル平均を取ることを示している。

2.2 観測サイト

LAIの観測は曇天時の観測を2011年9月28日～10月2日に、晴天時の観測を2016年8月23日～8月29日に行った。観測地点はアラスカ州内陸部のフェアバンクス市から216km～508km北に位置する森林である(北緯65.84°～67.99°, Table 1, Table 2)。T-1サイトはシロトウヒ林(White spruce, *Picea glauca*)であり、その他の3サイト(T-2, T-3, T-4)はクロトウヒ林(Black spruce, *Picea mariana*)である。Fig. 1(a)はT-2のクロトウヒ林サイトの様子である。観測サイトは、対象林分の周辺に大気散乱光の測定が可能なオープンスペースが存在する場所を選定した。それぞれのサイトの2007年時点の地上部森林バイオマス乾重量は4.8 Mg ha⁻¹ (T-1), 22.4 Mg ha⁻¹ (T-2), 12.6 Mg ha⁻¹ (T-3), 30.8 Mg ha⁻¹ (T-4)である¹³⁾。2011年の観測ではT-2, T-3の観測を曇天条件で行った。他の2地点については降雪などの影響で有効なデータを取得できなかった。2016年の観測時の天候はT-1を除いて快晴で、プラント・キャノピー・アナライザーの観測天頂角の範囲(0°～74.1°)に雲は存在しなかった。T-1での観測時には雲が存在した為、日射の変動が少ないタイミングを見計らって測定を行った。

2.3 データ取得及び解析

本研究ではプラント・キャノピー・アナライザーにセンサ視野角45°のキャップを使用して測定を行った。林内の測定は、30mのトランセクトを設置して0m～30mまで2m毎(2016年観測)及び5m毎(2011年観測)に往復(0m→30mと30m→0m)しながら観測を行った。快晴時(2016年)の観測では各サイトで2方向の方位角で観測した。この2方向の相対方位角ができるだけ180°に近くなるように設定し(Table 1)、さらにトランセクト方向とできるだけ直交させることで、各観測の視野が重ならない(オーバーサンプリングならない)ようにした。1回のトランセクト往復の観測に要した時間は約20～30分であり、サイト選定からトランセクト設置、測器の準備、森林光透過率測定までの一連の観測に要する時間は2時間程度であった。プラント・キャノピー・アナライザーの観測は、地上から約30cmの高さでおこなった。したがって計算されるLAIには、クロトウヒの他に30cm以上の高さに存在するブルーベリーやヤナギなどの林床植生の葉群が含まれている。なお、観測データの解析にはセンサの直上に葉が存在することでギャップ確率がほぼ0となる観測値が存在した。このような観測値は、プラント・キャノピー・アナライザーによるLAI解析の適用条件である「葉群がセンサから十分に離れていること」を満たさないため解析から除外した。

快晴時の観測では1回のトランセクト観測はKobayashi et al. (2013)⁵⁾に準じて以下のような手順で行った。

1. センサにコサイン拡散板を取り付けて、森林外で太陽

(a) Forest landscape at T-2



(b) LAI-2000 sky measurements



Fig. 1 (a) Black spruce forest site at T-2 and (b) the sky measurements by Plant Canopy Analyzer at the open space.

直達光を含む太陽入射光を計測

2. センサにコサイン拡散板を取り付けて、森林外で太陽直達光を遮蔽して大気散乱光を計測
3. センサに 270° のキャップを取り付けて、森林外で太陽直達光を遮蔽してセンサの 5 つのリングに入射する大気散乱光強度を計測
4. センサに 45° のキャップを取り付けて、森林外で太陽直達光を遮蔽してセンサの 5 つのリングに入射する観測方位角方向の大気散乱光強度を計測
5. 林内にて 30m トランセクト上で 2m 毎の光強度計測を往復で実施

6~9 の手順は 5 の観測後に 1-4 の手順を繰り返す。

また、この手順 1~9 を行っている間、天空光強度の観測をプラント・キャノピー・アナライザーを用いて 15 秒ごとに行った。

取得したデータは、筆者ら作成したスクリプト言語 R のプログラムで解析し、LAI を算出した。計算に必要なパラ

メータは、観測で得られた光透過率データ (P_m)、直達・散乱比、太陽天頂角、太陽方位角、観測方位角、プラント・キャノピー・アナライザーの観測波長での葉の反射率と透過率である。直達・散乱比は、上述の手順 1 及び 2 で算出した。観測時の太陽天頂角、太陽方位角、観測方位角を Table 1 に示した。葉の反射率と透過率は、Kobayashi et al. (2013)⁵⁾ の文献値 (反射率=0.05, 透過率=0.01) を使用した。

3. 結果と考察

3.1 LAI の算出と葉面散乱効果の補正の効果

Table 3 に LAI の算出結果をまとめた。T-4 サイトの View azimuth direction=210° の観測値に関しては、3 点の観測値に直達光の混入が確認できたため、そのデータを除いて LAI を算出している。

Table 3 の晴天時 (Clear sky) のデータで Uncorrected LAI は、観測で得られた光透過率をギャップ確率とみなして式 (1) で LAI を計算した値であり、Corrected LAI は、式 (4) に示した散乱補正法を適用した LAI である。補正後の LAI は補正前よりも 10-24 % 高くなった。これは、散乱補正によって式 (4) 右辺第 2 項の影響を除去したことにより、光透過率 P_m よりもギャップ確率 P_0 が小さくなったためである。Fig. 2 は、散乱補正前と補正後の LAI の変化率 (%) と観測方位角と太陽方位角との間の相対方位角の関係を示している。散乱補正による LAI の変化率は相対方位角が大きいほど大きくなった。これは相対方位角が大きいほど、太陽直達光の葉面散乱の寄与が大きいためであり、本調査による観測値に対する散乱補正でも、その葉面散乱の効果を適切に取り込んでギャップ確率の補正と LAI の算出が行われたことを示している。また Fig. 2 をみると相対方位角が 50° の場合、散乱補正前後の LAI の差は 10 % 程度であった。この結果から、限られたデータによる結果ではあるものの、衛星観測値の検証データとして LAI に求められる精度を考慮すると¹⁵⁾、相対方位角が 50° 程度以下であれば、散乱補正法を適用しなくても地上観測値としての精度は満たさせると言える。

T-2 及び T-3 サイトにおいて曇天時の観測データから見積もられた LAI と晴天時の LAI の結果を比較すると、両サイトとも散乱補正後の LAI (Corrected LAI) と曇天時の LAI の差 (T-2=0.11, T-3a=0.12, T-3b=0.01) は、補正前の LAI (Uncorrected LAI) との差 (T-2=0.31, T-3a=0.25, T-3b=0.20) よりも小さかった。これは、散乱補正を実施することで晴天時の観測値であっても曇天時に近い品質のデータが得られることを示している。なお、今回使用したデータは、曇天時のデータが 2011 年であり、晴天時のデータが 2016 年と 5 年間の時間間隔がある。しかし、T-2 サイトで継続的に実施している毎木調査の結果を見ると 2007 年から 2016 年にかけて、森林バイオマスは 15 % 程度の増加傾向にあり (小林, 未発表データ)、2011 年から 2016 年にか

Table 3 Summary of the estimated LAI under clear and cloudy sky conditions.

Site ID	Clear sky		Cloudy sky
	Uncorrected LAI (L_m)	Corrected LAI (L_m)	
T-1	1.23	1.61	N.A.
T-2	0.80	1.00	1.11
T-3a	0.88	1.01	1.13
T-3b	0.93	1.12	
T-4a	1.38	1.75	N.A.
T-4b	1.51	1.68	

Table 4 True Leaf Area Index estimated after the correction of shoot level clumping and woody effects.

Site ID	View Azimuth Direction	LAI (L_m)	LAI after correction of γ and α
T-1	340°	1.61	1.90~2.14
T-2	10°	1.00	1.18~1.33
T-3a	70°	1.01	1.19~1.34
T-3b	260°	1.12	1.32~1.49
T-4a	30°	1.75	2.06~2.33
T-4b	210°	1.68	1.98~2.23

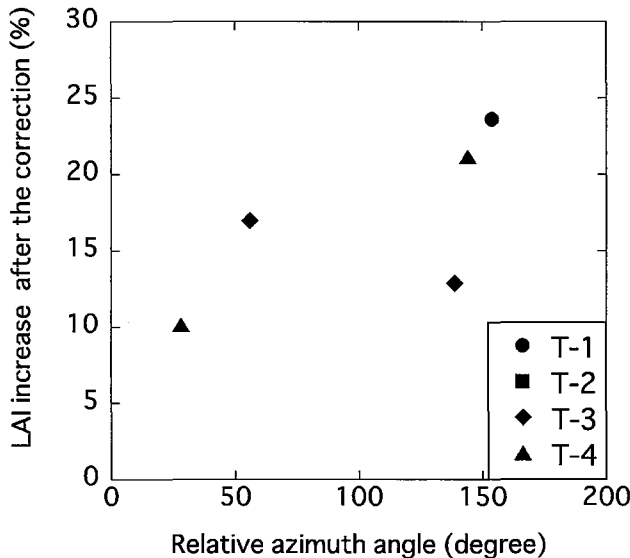


Fig. 2 The relationship between relative azimuth angle and the LAI increase (%) after the scattering correction.

けて LAI が減少に転じる原因は見当たらない。T-3 サイトでも継続的な森林調査は実施していないものの、2011 年～2016 年の間に、森林火災やその他の大規模擾乱は確認されていない。以上の結果を踏まえ、限られたデータ間での比較ではあるがトウヒ林のような疎林かつ葉群の密集度の高い林分においても、晴天時のギャップ確率データに対して散乱補正を行うことで、曇天時に近い品質のデータが得られることが示唆された。

3.2 枝、幹及びシュートクランピングの影響

今回の調査で得られた LAI (L_m) においてはシュートレベルのクランピング (γ) と非同化器官の割合 (α) の補正は行われていない。ここでは Chen et al. (1997)¹⁴⁾ のカナダのクロトウヒの観測値と Kobayashi et al., (2011)¹⁴⁾ のア

ラスカのクロトウヒ林のシュート観測値から推定した値を参考に $\gamma=1.4\sim1.58$, $\alpha=0.16$ として式 (1) で L を推定した結果を Table 4 に示した。式 (1) の $(1-\alpha)\gamma$ は 1.18~1.33 である。そのため、 γ と α の影響を補正した L は L_m よりも 18~33% 高くなる。非同化器官の割合 (α) については研究事例に限られており、その値の妥当性について今後更に検討する必要がある。温帯の広葉樹林では、ほとんどの幹や枝は葉に覆われるため、森林ギャップ確率に対する非同化器官の影響は相対的に小さいかもしれない。しかし、アラスカのトウヒは針葉が樹冠の上部の主幹周りに密集している個体が多く幹や枝の露出が大きいため、森林ギャップ確率に与える影響は、今回仮定した $\alpha=0.16$ よりも大きいことが予想される。 α が大きくなると L は小さくなるため、本調査で対象とした観測サイトの LAI 真値は L と L_m の間に存在する可能性が高い。

4. ま と め

本技術報告では、曇天時 (2011 年 9 月～10 月) と晴天時 (2016 年 8 月) に米国アラスカ州内陸部のトウヒ林 (計 4 サイト) で実施した光学的推定法による LAI の観測結果を比較した。初めにプラント・キャノピー・アナライザーで観測された、森林の透過率に含まれる葉面散乱効果を放射伝達モデルで補正して森林ギャップ確率を算出した。この森林ギャップ確率から見積もられた 4 サイトの LAI (L_m) は 1.0~1.75 であった。

また、文献値を参考に幹・枝、シュートクランピングの効果を補正した場合の LAI は 1.18~2.33 程度と見積もられた。幹・枝の影響については、アラスカの疎なトウヒ林での調査データは存在しない。そのため、LAI の正確な見積もりのためには、この値の妥当性をさらに検討する必要がある。

本研究では曇天時と快晴時に実施した光学的推定法による LAI の比較から、快晴条件におけるギャップ確率の補正手法の有効性について検討した。本研究の比較結果から、アラスカの遠隔地に広く分布するトウヒ林において、必ずしも曇天条件ではなくても曇天条件と同程度の精度の LAI データを取得できることを示唆する結果が得られた。ただし、今回の比較では用いたデータ数が限られるため今後さらにデータを増やし、より網羅的な検討を行う必要がある。

最後に本調査に利用された LAI 推定プログラム (R 言語) 及び観測データはすべて公開可能なデータである。必要な場合には著者へ連絡いただきたい。

謝 辞: 本研究は GCOM-C RA#6 (PI#111) 及び JAMSTEC-アラスカ大学フェアバンクス校国際北極圏研究センター共同研究の一環で行われた。

引用文献

- 1) R. V. Bekryaev, I. V. Polyakov, and V. A. Alexeev: Role of polar amplification in long-term surface air temperature variations and modern Arctic warming, *Journal of Climate*, 23, pp. 3888–3906, 2010.
- 2) T. Hajima: Evaluation of historical leaf area index change in the MIROC-ESM, *The Remote Sensing Society of Japan*, 35, pp. 24–30, 2015.
- 3) 小林秀樹: 衛星データから推定されたグローバル葉面積指数プロダクトの定義, 不確かさ, 検証方法, *日本リモートセンシング学会誌*, 28, pp. 1–16, 2008.
- 4) J. M. Welles and J. Norman: Instrument for indirect measurement of canopy architecture, *Agronomy journal*, 83, pp. 818–825, 1991.
- 5) H. Kobayashi, Y. Ryu, D. D. Baldocchi, J. M. Welles, and J. M. Norman: On the correct estimation of gap fraction: How to remove scattered radiation in gap fraction measurements?, *Agricultural and forest meteorology*, 174, pp. 170–183, 2013.
- 6) A. Kuusk: Specular reflection in the signal of LAI-2000 plant canopy analyzer, *Agricultural and Forest Meteorology*, 221, pp. 242–247, 2016.
- 7) G. D. Pearse, M. S. Watt, and J. Morgenroth: Comparison of optical LAI measurements under diffuse and clear skies after correcting for scattered radiation, *Agricultural and Forest Meteorology*, 221, pp. 61–70, 2016.
- 8) Y. Hwang, Y. Ryu, H. Kimm, C. Jiang, M. Lang, C. Macfarlane, and O. Sonnentag: Correction for light scattering combined with sub-pixel classification improves estimation of gap fraction from digital cover photography, *Agricultural and Forest Meteorology*, 222, pp. 32–44, 2016.
- 9) J. M. Chen: Optically-based methods for measuring seasonal variation of leaf area index in boreal conifer stands, *Agricultural and Forest Meteorology*, 80, pp. 135–163, 1996.
- 10) J. Miller: A formula for average foliage density, *Australian Journal of Botany*, 15, pp. 141–144, 1967.
- 11) J. M. Norman and G. S. Campbell: Canopy structure, in *Plant physiological ecology*, ed: Springer, pp. 301–325, 1989.
- 12) Y. Ryu, T. Nilson, H. Kobayashi, O. Sonnentag, B. E. Law, and D. D. Baldocchi: On the correct estimation of effective leaf area index: Does it reveal information on clumping effects?, *Agricultural and Forest Meteorology*, 150, pp. 463–472, 2010.
- 13) R. Suzuki, Y. Kim, and R. Ishii: Sensitivity of the backscatter intensity of ALOS/PALSAR to the above-ground biomass and other biophysical parameters of boreal forest in Alaska, *Polar Science*, 7, pp. 100–112, 2013.
- 14) J. M. Chen, P. M. Rich, T. S. Gower, J. M. Norman, and S. Plummer, Leaf area index of boreal forests: Theory, techniques, and measurements, *Journal of Geophysical Research*, 102 (D24), pp. 29429–29443, 1997.
- 15) R. Fernandes, S. Plummer, and J. Nightingale: Global Leaf Area Index Product Validation Good Practices, CEOS Land Product Validation Sub-Group, DOI: 10.5067/doc/ceoswgcv/lpv/lai.002, pp. 1–76, 2014.
- 16) H. Kobayashi, R. Suzuki, S. Nagai, T. Nakai, and Y. Kim: Spatial Scale and Landscape Heterogeneity Effects on FAPAR in an Open-Canopy Black Spruce Forest in Interior Alaska, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11 (2), pp. 564–568, 2011.