

小型UAVを用いた新しいBRDF観測システムの構築
—森林の三次元構造のリモートセンシングを目指して—

酒井健吾・長谷川宏一・泉 岳樹・松山 洋
(首都大学東京・都市環境科学研究科)
受け入れ教員 本多嘉明先生・梶原康司先生

1. 研究の背景

- 地球上の二酸化炭素の動態は特に陸域において不明瞭な部分が多い。
➢ 森林の光合成量や呼吸量の役割が大きい。
- 気候変動の影響予測や原因の推定などに用いられる、全球気候モデルには、植生のパラメータが組み込まれている。



森林資源量・変化の把握は重要

- 全球の森林資源の把握には、地球観測衛星によるリモートセンシングが広く用いられている。

1. 研究の背景

地球観測衛星・・・**地表反射率を観測**して地球表面の状態を調べる

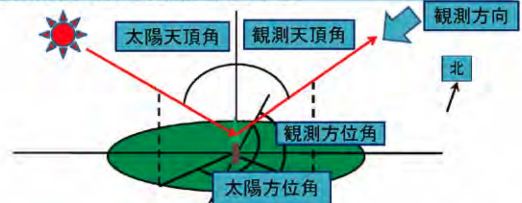
観測された反射率に含まれる影響(補正する必要がある)

太陽とセンサと対象物の位置関係 大気の状態 地形の状態

二方向性分光反射関数
(Bi-directional Reflectance Distribution Function, 以下BRDF)

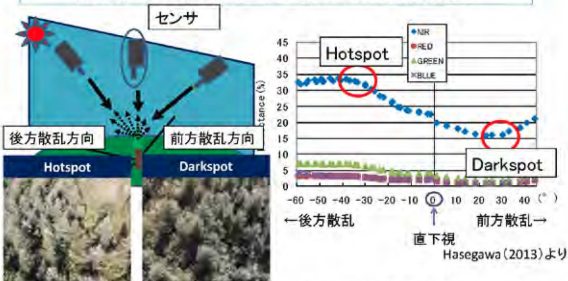
1. 研究の背景～BRDFとは～

BRDF(**B**idirectional **R**eflectance **D**istribution **F**unction)
観測天頂角・太陽天頂角・観測方位角・太陽方位角の条件による反射率の変化の様子を表したものの



衛星観測においても、太陽高度の季節変化・観測角度を変化させながら観測することによる反射率への影響がある。

植生における典型的なBRDF観測結果



- 後方散乱方向で最大反射率(Hotspot), 前方散乱方向で最小反射率(Darkspot)となる。
- BRDF(反射率の変化の仕方)は、観測対象の植生表面の凹凸(三次元構造)によって異なる。

これまでの森林のBRDF観測方法の例



Hasegawa (2013)による観測タワー
(高さ25m)からの観測

- 長所
 - 高い樹高の森林上部からの観測も可能
 - 電力の安定供給が可能で、安定した観測ができる
- 短所
 - 一地点での観測に限られる
 - タワー自身や、影の影響で観測できる時間が限られる

2. 研究の目的と意義

森林のBRDF観測は難しく、観測された例が少ない。
→ 簡便に観測する方法が求められてきた。

目的

- 小型のUAVを用いた簡便な森林のBRDF観測方法を新たに構築する。
- 実際に、異なる生長段階の2つの森林のBRDFを観測し、森林の三次元構造を推定する可能性を検討する。

意義

- 森林のBRDFを実測することで、衛星データセット作成に用いられているBRDFモデルの適用性の検証を行うことができる。
- BRDFを観測する(角度を変えながら反射率を観測すること)で、直下視の観測のみでは判別できない植生量の違いを推定できる可能性がある。

3. 調査対象地域

調査地は山梨県北杜市八ヶ岳南麓のカラマツ林とした。



3. 調査対象地域

植生量の異なる2つの林班でBRDF観測と、植生調査を行った。

壮齢林(平均樹高21m)の様子

若齢林(平均樹高6m)の様子



↑観測タワー(高さ25m)を千葉大学、本多先生・梶原先生に使用させて頂いた。

4. 観測システムおよび解析方法～UAV～

- 大きさは100×120×50(cm)
- 離陸後はGPS制御で自動ホバリングすることができる。
- PC上であらかじめ設定したポイントへ自動で移動することが可能
- 電源はバッテリーで、飛行時間は最大15分(条件により変わる)
- ジンバル(積載物を載せる台)の角度を約6度ごとに変化させられる。



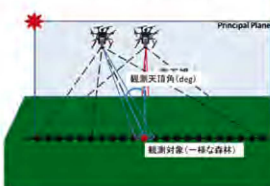
遠隔操作機(プロポ)

飛行経路設定用PC

UAV

4. 観測システムおよび解析方法～BRDF観測～

- 小型UAVに分光放射計(MS-720)を搭載して森林上空から森林の放射照度を観測角度を変えながら計測した。
- 分光放射計(MS-720)の視野角は45度とした。
- 観測はPrincipal Planeで行った。
- 観測対象物を確認するために、GoPRO hero3を搭載した。
- 同時に観測タワー上で標準白色板の放射照度を計測した。



□ 反射率

森林の放射照度 ($W/\mu m^2$)
標準白色板の放射照度 ($W/\mu m^2$)

□ NDVI: 植生の分布、活性度
※直下視における反射率を用いる

$$\frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}$$

(ρ_{NIR} : 近赤外域における反射率
 ρ_{RED} : 赤域における反射率)

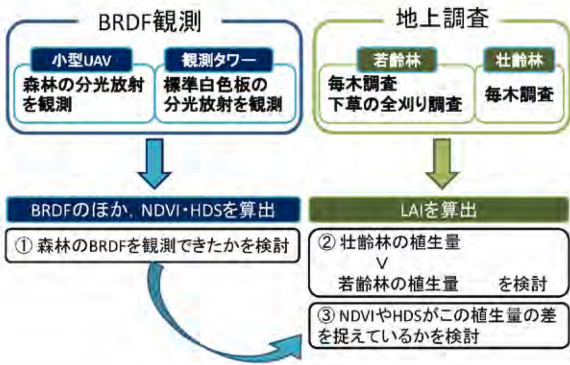
4. 観測システムおよび解析方法～地上調査～

- 若齢林と壮齢林それぞれで毎木調査を行った。調査項目は、樹高と胸高直径とした。
 - 毎木調査で計測した胸高直径を用いて、相対成長式より、葉面積指数(LAI)を算出した。
- 若齢林では、下層植生の全刈り調査も行った。
 - ※若齢林では、下層植生が繁茂していたため
 - 全刈りした下層植生の20%を持ち帰り、LAIを求めた。



上空から下層植生が確認できる

4. 観測手法と解析方法～研究フロー～



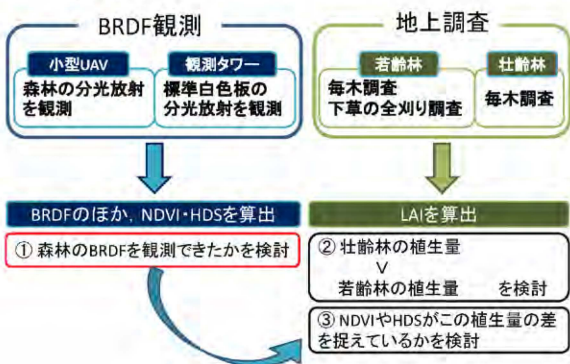
5. 結果と考察

下記の森林のBRDFデータを得た。

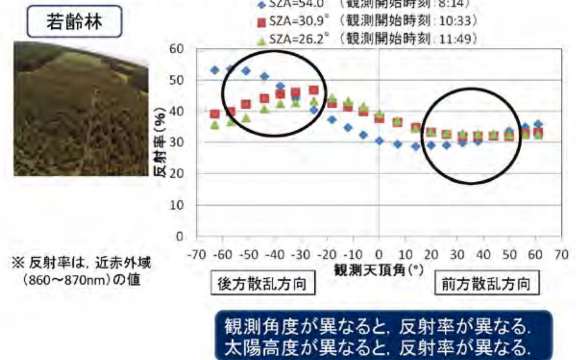
※天候条件が悪かったため解析に用いなかった

対象	日付	観測開始時刻	太陽天頂角 (°)	太陽方位角 (°)	UAV高度
壮齢林 樹高21m	8/27※	16:01	63.3	262.9	50m
	8/28	9:43	38.1	125.9	
		11:22	26.7	167.3	
若齢林 樹高6m	8/28	8:15	54.0	105.6	25m
		10:33	30.9	143.6	
		11:49	26.2	182.3	

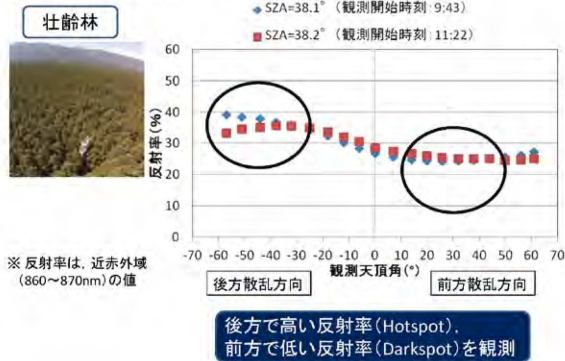
～研究フロー～



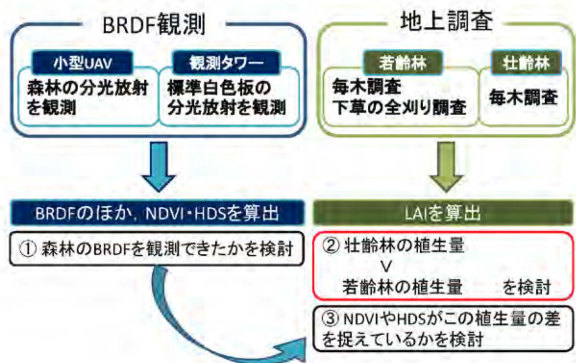
5. 結果と考察 ～① BRDFを観測できたか～



5. 結果と考察 ～① BRDFを観測できたか～



～研究フロー～



5. 結果と考察 ~② 植生量の差はどの程度か~

地上調査の結果

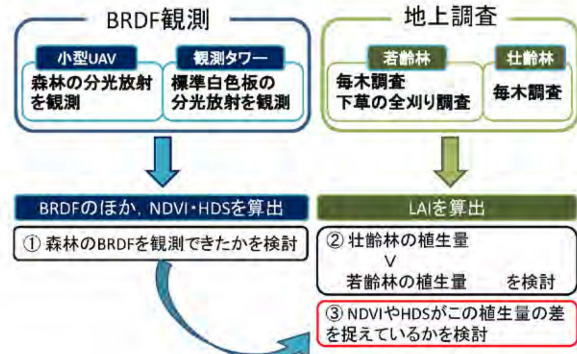
	壮齢林	若齢林
LAI	2.35	1.33※

※カラマツ林のLAI(0.75)と下層植生のLAI(0.58)の合計

壮齢林の方が、若齢林よりも植生量が多いことが定量的に示された。



~研究フロー~



5. 結果と考察 ~③ 植生量の差を捉えられたか~

地上調査の結果

	壮齢林	若齢林
LAI	2.35	1.33

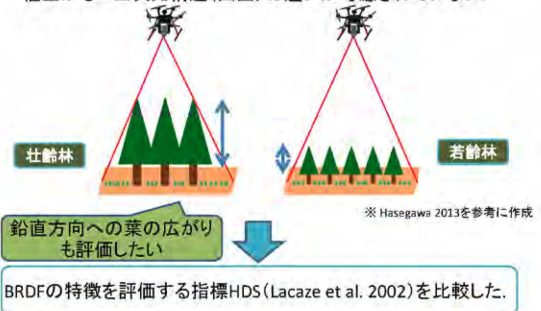
BRDF観測の結果

	壮齢林	若齢林
NDVI(植生の活性度)	0.89	0.87
HDS(BRDFの影響を評価)		

- 直下視のみの反射率データから求めたNDVIでは、壮齢林と若齢林との間に有意な差は認められなかった(Welchの検定)。
 - 実際の植生量の差を捉えられなかったと考えられる。

NDVIが植生量の差を捉えられなかった理由

- 上空から観測した時、地表面の植生の割合が同じになるため、植生がもつ三次元構造(凹凸)の違いが考慮されていない。



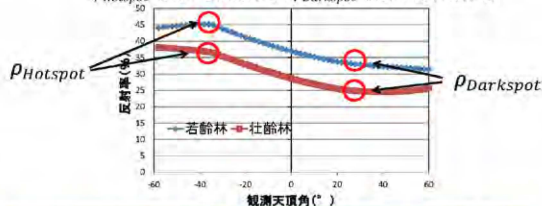
HDS(Hotspot-Darkspot Signature)

→BRDFの特徴の大きさを評価する指標

- HDSは、植生面の凹凸の明瞭さと深い関わりがある。
- HDSが大きい→陰影を作る、凹凸がはっきりしているということ

$$HDS = \frac{\rho_{Hotspot} - \rho_{Darkspot}}{\rho_{Darkspot}}$$

($\rho_{Hotspot}$: 後方の最大反射率, $\rho_{Darkspot}$: 前方の最小反射率)



Ross-山モデルによって太陽天頂角35°のときのBRDFを推定した結果よりHDSを算出し

5. 結果と考察 ~③ 植生量の差を捉えられたか~

地上調査の結果

	壮齢林	若齢林
LAI	2.35	1.33

BRDF観測の結果

	壮齢林	若齢林
NDVI(植生の活性度)	0.89	0.87
HDS(BRDFの影響を評価)	0.50	0.39

- BRDFから求めたHDSでは、壮齢林と若齢林とで測定誤差(±0.005)を超える違いが見られた。
 - 植生量の差を捉えた結果であると考えられる。

6. 結論

- 小型UAVを用いた新しいBRDF観測システムにより、高い樹高の森林のBRDF観測が簡便に行えるようになった。
- ハケ岳南麓の生長段階の異なる2つのカラマツ林でBRDF観測を行った結果、BRDFは後方で最大反射率、前方で最小反射率を捉えた。
 - 過去の研究と一致した(陳ほか 2006, 小野ほか 2010, Hasegawa 2013など)。
- BRDFからHDSを求めることにより、壮齡林と若齡林の植生量の差を捉えることができたと考えられる。
 - 直下視の反射率データから求めたNDVIのみでは捉えることができなかった。

7. 今後の課題

- 本研究で行ったBRDF観測の際、UAVの飛行が安定しないことがあった。
 - 現在UAVは改良が重ねられており、より安定したBRDF観測が行えるようになる。
- 本研究でBRDFの特徴を評価するために用いたHDSは、まだ不明瞭な部分が多い。
 - 凹凸の定量的な指標となり得るのか、指標の改良のためにも、より多くのBRDF観測が求められる。
- 既存のBRDFモデル適用性の検証のためには、より多くの実測BRDFが必要である。

半経験BRDFモデル(Ross-Li Kernel Model 1995)

$$\rho = f_{iso} + f_{geo}K_{geo} + f_{vol}K_{vol}$$

- MODIS/TERRAのBRDF/AlbedoプロダクトのアルゴリズムAmbralモデルにも使われている。
- 観測された反射率を用いて三つの散乱成分(f_{iso} , f_{geo} , f_{vol})を求める。
- K_{geo} , K_{vol} は、観測条件によって決まるパラメータ



観測条件が異なるときのBRDFを推定できる。

27