

平成30年6月27日現在

機関番号：32639

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2017

課題番号：25740006

研究課題名(和文) マイクロ波合成開口レーダ偏波散乱解析による熱帯早生樹の森林バイオマス推定

研究課題名(英文) Forest biomass estimation of tropical plantation forests from microwave SAR polarimetric analysis

研究代表者

小林 祥子 (KOBAYASHI, Shoko)

玉川大学・農学部・准教授

研究者番号：10537103

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：熱帯域各地で産業植林が急速に拡大し、持続的利用の観点から植林地モニタリングは喫緊の課題である。森林の把握には、衛星リモートセンシングが有用だが、年中雲に覆われる熱帯域では、天候に影響されず観測可能なマイクロ波衛星データの利用が不可欠である。本研究では、Lバンドのマイクロ波合成開口レーダによる植林地モニタリングを行なった。現場調査データとの突き合わせ解析により、マイクロ波衛星データから林班スケールの森林劣化を特定することに成功した。さらに、マイクロ波衛星による森林構造の複雑性や下層植生量の定量的評価の可能性を示唆した。今後は、森林構造の把握を通じた生物多様性の空間的評価に繋げたい。

研究成果の概要(英文)：Industrial plantation rapidly expands in various tropical areas. Therefore, plantation monitoring is now an urgent issue. Satellite remote sensing is very useful for monitoring forest conditions. Especially microwave satellite remote sensing technique enables to observe the Earth's surface without being affected by cloud which covers tropical area throughout the year. In this study, we analyzed L-band microwave synthetic aperture radar (SAR) data for plantation monitoring. We identified forest degradation occurred within the part of forest compartment by means of comparing SAR data with on-site survey data. Furthermore, we show the possibility of the quantitative evaluation of forest structure complexity and quantity of understory vegetation using microwave satellite data. Based on the findings, our future work is to utilize microwave satellite data for spatial evaluation of biodiversity which strongly correlates with forest complexity.

研究分野：環境解析

キーワード：Lバンドマイクロ波衛星 ALOS/PALSAR 合成開口レーダ 熱帯域 植林地 森林構造

## 1. 研究開始当初の背景

<熱帯早生樹の産業植林>経済発展によるパルプ材の需要増加により成長の速い樹種が木材資源として注目を集め、熱帯域各地で「早生樹:Fast-growing Tree」の産業植林が急速に拡大し、日本企業による海外産業植林も1995~2005年に+573%と急増している。その持続的利用と熱帯林保護の観点から、植林地モニタリングは喫緊の課題である。

<植林地モニタリングの重要性>熱帯自然林の把握も重要であるが、同時に、植林地の持続的利用に向けた長期的なモニタリング、炭素循環の解明に向けた植林地における森林バイオマスの評価も重要課題として認識が高まっている。

<マイクロ波衛星データの利用>森林の把握には、衛星リモートセンシングが利用されるが、年中雲に覆われる熱帯域では、天候に影響されず観測可能なマイクロ波衛星データの利用が不可欠である (Fig. 1)。日本が打ち上げたALOS衛星は、PALSARセンサー:Lバンド合成開口レーダで、水平偏波:Hと垂直偏波:Vの送受信の切り替えることにより、HH/VV/HV/VHの4つの偏波を取得できる。地表面の各偏波に対する散乱特性は異なるため、多偏波データを解析することにより詳細な地表面解析が可能となる。

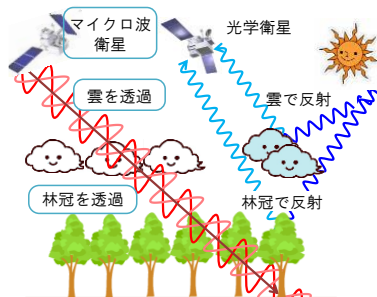


Fig. 1 マイクロ波衛星の特徴

## 2. 研究の目的

本研究は、インドネシアの大規模なアカシア産業植林地の幹体積・森林バイオマス推定手法の開発を目的とした。マイクロ波合成開口レーダによって取得される偏波情報を利用し、アカシア林の森林構造の違いによる散乱メカニズムの変化に着目した手法開発を目指している。

開発途上国における産業植林地の地上観測データとマイクロ波衛星データの突き合せによる森林資源の定量的評価は類例のない研究であり、熱帯林破壊が行われてきたアジア地域に拡大する産業植林地の持続的利用への議論に繋げていきたい。

## 3. 研究の方法

(1) マイクロ波衛星データと地上観測データの比較による森林の状況把握

① 対象地域 インドネシア・スマトラ島の南西部に位置するMusi Hutan Persada社(MHP社)が管理するアカシア植林地を対象地とした。

② 使用データ 地上観測データとして、地上観測プロット(PSP)で測定した胸高直径・樹高・幹体積を使用した。また植林会社による視覚調査データも画像判読の際に利用した。Lバンドマイクロ波センサ:PALSARを搭載したALOS衛星によって取得された4偏波(HH/HV/VV/VH)データの3時期のデータセット(2007年5月/2009年04月/2010年04月)を用いた。

③ 解析方法 ユニタリー変換によりCoherency行列内の独立偏波情報を減らし、電力分解の中で全ての偏波情報(行列成分)を考慮する四成分散乱モデル分解(Singh et al., 2013)を適用し、表面散乱(Ps)・キャノピー散乱(Pv)・2回反射散乱(Pd)・ヘリックス(Ph)散乱を算出した。全ての散乱電力は、全電力(TP)で正規化し、正規化したPvTP, PcTP, PdTP, PhTPを解析に用いた。

林班の植林は画一性があると仮定し、PSPの位置する林班内のピクセル値(電力成分)を平均化し、地上観測データとの付き合わせを行い、その経年変化解析を試みた。

(2) マイクロ波衛星データによる林層構造の推定への試み

前項の解析より、Lバンドデータにより森林の垂直構造(林冠下)が偏波解析により理解できる可能性が見えてきた。そのため、その次の段階として、森林域における階層構造データとの比較により、

① 対象地域 インドネシア・スマトラ島・リアウ州の自然泥炭湿地林・ゴム林・アカシア林を対象地とした。

② 使用データ 植生調査は、各調査ポイントに25m×25mのコドラートを設定し、森林の各階層(<1m, 1~10m, 10~20m, 20~30m, >30m)の被覆率(%)を記録した。マイクロ波衛星データは、2010年5月撮影のLバンドの合成開口レーダ(SAR)データ(ALOS/PALSAR)4偏波(HH/HV/VV/VH)データを用いた。

③ 解析方法 地上調査より得られた植生構造データとマイクロ波衛星画像との統計的解析(重回帰分析)により、Lバンドの後方散乱に対する植生構造の影響を明らかにした。ALOS/PALSARデータからは、後方散乱強度( $\sigma$ )を算出、四成分散乱モデル分解(Singh et al., 2013)を適用し、表面散乱(PsTP)・キャノピー散乱(PcTP)・2回反射散乱(PdTP)・ヘリックス(PhTP)散乱を算出した。さらに、散乱成分の物理的特性を考慮し、PvTP/(PsTP\*PdTP)を算出した。重回帰分析では、赤池情報量規準(AIC)によるステップワイズ法を用いて、変数選択を行なった。

#### 4. 研究成果

(1) マイクロ波衛星データによる植林地における森林状況把握

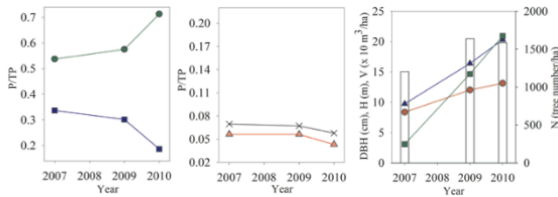
マイクロ波衛星のデータ解析結果が、地上観測の記録データ（森林計測データ、ならびに視覚的評価データ）と非常によく一致していた。Fig. 2に示すように、ダメージがない林班では、森林の成長に伴い、キャノピー散乱が増加し続ける傾向にあるが、ダメージが起こった林班では、二回反射散乱が顕著に増

加することが明らかとなった。これは、林冠部で起った森林のダメージにより、電波がより強く幹により反射されることによる。

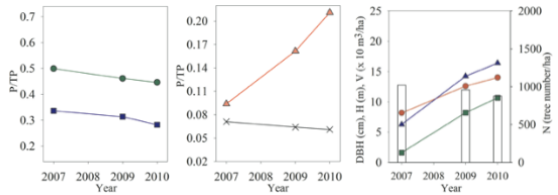
従って、ALOS データの解析より林冠へのダメージ、森林劣化の特定や下層植生の出現が林班レベルで可能であること (Fig. 3) を明示した。本解析結果により、ALOS 衛星取得のマイクロ波衛星データを用いた植林地モニタリングの可能性を明示した。

本研究結果は、Kobayashi et al. (2015) に原著論文としてまとめられている。

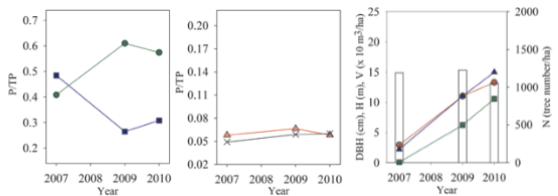
a) Plot 2, Planted in Nov. 2004; Undamaged till harvested.



b) Plot 4, Planted in Dec. 2004; Significantly damaged, but trunks were regularly distributed.



c) Plot 7, Planted in Jan. 2007; Undamaged till Jan. 2010, small damaged in July 2010.



d) Plot 8, Planted in Jan. 2007; Damaged between Jan. 2008 and July 2010.

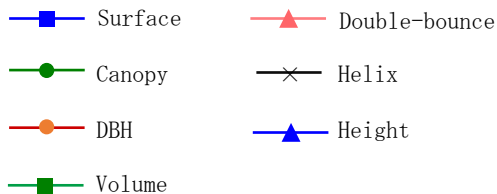
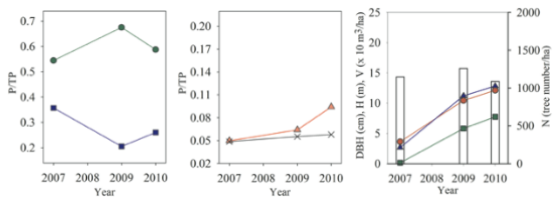
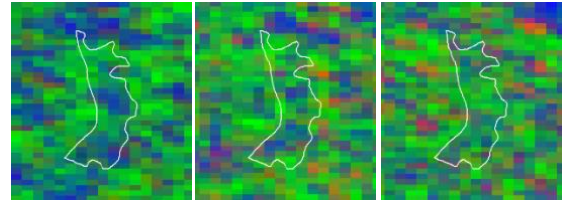


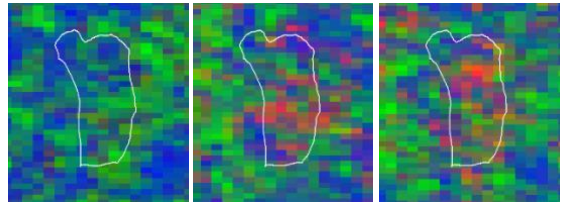
Fig. 2(a)-(d) 経年変化解析の結果 [左] 表面散乱とキャノピー散乱 [中] 二回反射散乱とヘリックス散乱. [右] (線グラフ) 現場調査より得られた胸高直径・樹高・体積、(棒グラフ) 成立本数

a) Plot 2



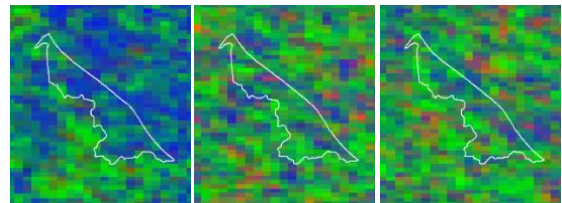
2.5 yrs. 4.4 yrs. 5.4 yrs. m  
100

b) Plot 4



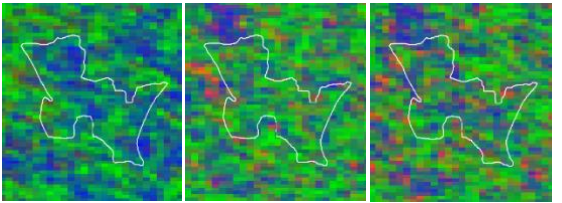
2.4 yrs. 4.3 yrs. 5.3 yrs. m  
100

c) Plot 7



0.5 yrs. 2.3 yrs. 3.3 yrs. m  
150

d) Plot 8



0.5 yrs. 2.3 yrs. 3.3 yrs. m  
150

Fig. 3(a)-(d) マイクロ波衛星の合成画像 (R: 表面散乱, G: キャノピー散乱, B: 二回反射散乱) を示し、白い線は PSP の存在している林班の境界線を示す。

(2) マイクロ波衛星データによる森林構造の把握

階層ごとの植生被覆割合を説明変数、各偏波パラメータを目的変数として、重回帰分析を行った。回帰分析において、説明変数が1つに対して最低サンプル数が2つ必要である (Austin and Steyerberg, 2015) ことから、本解析におけるサンプル数8に対し、説明変数の数は4以下である必要があった。

そのため、variance inflation factor (VIF) 値を用いて多重共線性を確認した。VIF 値は、2.50 (< 1 m), 9.99 (1-5 m), 8.97 (5-10 m), 7.88 (10-20 m), 7.55 (20-30 m) となったため、強い多重共線性は確認されなかったが、説明変数を4以下にするために1-5 m の説明変数を回帰分析から除外することとした。

AIC による変数選択、ならびに重回帰分析の結果を Table 1 に示す。有意な結果 ( $p < 0.05$ ) が得られた偏波パラメータは、 $\sigma_{wv}^0$ 、PsTP、PdTP、PvTP/(PsTP\*PdTP) の4つであった (Table 2)。 $\sigma_{wv}^0$  は、20 m 以下のレイヤーによってよく説明されていること、表面散乱は、1 m 以下の林床植生を示すことが明らかとなった。

また、20-30 m の層がどの回帰モデルにおいても有意な説明変数として選択されておらず、20-30 m の層を持つ熱帯自然林の特性をLバンドによって、捉えられていないことも示された。

Table 1. 説明変数選択の結果と重回帰分析より得られた係数と  $p$  値 (括弧内)、調整済み決定係数 ( $R^2$ ) と  $p$  値 (括弧内)。ハイフンは、その説明変数が選択されなかったことを示す。

Response variable (y)	Estimates and $p$ -value (in parentheses) of selected explanatory variables (x)			
	<1 m	5-10 m	10-20 m	20-30 m
Polarimetric parameter				
$\sigma_{HH}^0$	-0.895 (0.208)	-4.941 (0.060)	-1.737 (0.121)	11.47 (0.199)
$\sigma_{HV}^0$	-1.229 (0.087)	-4.214 (0.064)	-2.262 (0.050)	6.607 (0.356)
$\sigma_{VW}^0$	-0.848 (0.055)	-3.497 (0.001)	-3.063 (0.002)	-
PsTP	0.044 (0.030)	-	-	-
PvTP	-	-	-0.060 (0.182)	-
PdTP	-	-	0.052 (0.020)	-
PcTP	-0.013 (0.055)	-0.011 (0.151)	-	-
PvTP/(PsTP*PdTP)	-	-	-17.86 (0.036)	-

Table 2. 重回帰分析の結果：調整済み決定係数 ( $R^2$ ) と  $p$  値 (括弧内)

Polarimetric parameter	Adj. $R^2$ ( $p$ -value)
$\sigma_{HH}^0$	0.609 (0.154)
$\sigma_{HV}^0$	0.756 (0.079)
$\sigma_{VW}^0$	0.917 (0.004*)
PsTP	0.498 (0.030*)
PvTP	0.155 (0.182)
PdTP	0.556 (0.020*)
PcTP	0.394 (0.123)
PvTP/(PsTP*PdTP)	0.473 (0.036*)

本結果は、以下の雑誌に投稿しており、現在査読中である (S. Kobayashi *et al.*, “Application of microwave L-band SAR data to the evaluation of tropical bird diversity through identifying forest structures”, *Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* (under reviewing) )。

(3) 今後の展望

研究対象地であるインドネシアの熱帯産業植林地では、ユーカリ植林への転換が行われ、生態系維持のために残されてきた植林地内の自然林では、地域住民の野焼きが原因となり森林火災が度々発生、植林地内の植生は大きく様変わりした。また、アカシア林でのサルによる樹皮剥ぎにより、樹種の転換に迫られたことも起因し、プランテーション内の自然林の果たす役割が見直され、生態系の保全と森林資源の持続的な利用に向けた取り組みが図られつつある。

森林構造の複雑性は、生態系を測る上で重要な要素となる。森林生態系の多様性に大きな影響を与える要素であることから、森林垂直構造の空間的な把握は重要な課題であると言える。

今回の解析により、Lバンドマイクロ波衛星データの解析により、森林の垂直構造 (階層構造) をある程度推定できることが明らかとなったことから、合成開口レーダデータにより、森林構造の把握により、そこに生息する生物多様性を推定できる可能性が見えてきた。今後は、インドネシアの熱帯自然林と産業植林を対象に、衛星搭載のマイクロ波合成開口レーダを用いた“森林の階層構造”と“林冠の葉群構造”の評価手法を確立し、森林構造を説明するマイクロ波偏波パラメータと森林構造に対応して生息する鳥類群集の連関を明らかにする。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計6件)

- ① S. Kobayashi, “Sensitivity of ALOS/PALSAR image to vertical structures of natural and plantation forests in Sumatra, Indonesia”, Proceedings of the 63th Fall Conference of the Remote Sensing Society of Japan, pp. 129-130, 2017. (査読なし)
- ② S. Kobayashi, Y. Omura, K. Sanga-Ngoie, Y. Yamaguchi, R. Widyorini, M. S. Fujita, B. Supriadi and S. Kawai (2015) “Yearly Variation of Acacia Plantation Forests obtained by Polarimetric Analysis of ALOS PALSAR Data”, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 8 (11), 5294-5304. DOI: 10.1109/JSTARS.2015.2487503. (査読あり)
- ③ S. Kobayashi, Y. Omura, K. Sanga-Ngoie, Y. Yamaguchi R. Widyorini, B. Supriadi and S. Kawai, “Understanding of Forest Structural Conditions in Acacia Plantation using Yearly-variation of Scattering Powers of L-band SAR Data”, Proceedings of the 56th Spring Conference of the Remote Sensing Society of Japan, pp. 1-2, 2014. (査読なし)
- ④ S. Kobayashi, Y. Omura, K. Sanga-Ngoie, R. Widyorini, S. Kawai, B. Supriadi and Y. Yamaguchi, “Estimates of Standing Volume by Microwave SAR Data in Planted Acacia Forests in Sumatra, Indonesia”, Proceedings of the 34th Asian Conference on Remote Sensing, pp. (SC04) 564-569, 2013. (査読なし)
- ⑤ S. Kobayashi, Y. Omura, K. Sanga-Ngoie, R. Widyorini, S. Kawai, B. Supriadi and Y. Yamaguchi, “Comparing Polarimetric Decomposition and In-situ Data on Forest Growth of Industrial Plantation in Indonesia”, Proceedings of International Symposium on Remote Sensing 2013, pp. 87-88, 2013. (査読なし)
- ⑥ S. Kobayashi, Y. Omura, K. Sanga-Ngoie, Y. Yamaguchi R. Widyorini, B. Supriadi and S. Kawai, “Tracking analysis of four-component scattering power by polarimetric decomposition in tropical plantation forests in Indonesia”, Proceedings of the 55th Autumn Conference of the Remote Sensing Society of Japan, pp. 32-33, 2013. (査読なし)

[学会発表] (計4件)

- ① S. Kobayashi et al., (2018) “Feasibility study on monitoring of tropical bird diversity using full polarimetric L-band SAR data”, Joint PI

Meeting of Global Environment Observation Mission FY2017, 2018.

- ② S. Kobayashi, et al., “Yearly variation Analysis of Acacia Plantation Forests using ALOS PALSAR Polarimetric Data”, The 6th ForestSAT 2014, 2014.
- ③ S. Kobayashi, et al., “Forest Growth Monitoring of Tropical Acacia Plantation by Multi-Year ALOS/PALSAR Polarimetric Data”, The 31th Union of Radio Science General Assembly and Scientific Symposium, 2014.
- ④ S. Kobayashi, et al., “Forest Growth Assessment of Industrial Plantation using General Four-Component Scattering Power Decomposition Technique”, 2013 Asia-Pacific Radio Science Conference, 2013.

[その他] (計2件)

- ① S. Kobayashi, Y. Omura and M. S. Fujita, “Retrieval of vegetation structure in Indonesian plantation forests from microwave satellite remote sensing data”, The 2nd Asia Research Node Symposium on Humanosphere Science, Uji, Japan, July 19-21, 2017.
- ② M. S. Fujita, T. Yoshimura, Y. Omura, S. Kobayashi, Vegetation structure influences on bird diversity: linking remote sensing and biodiversity monitoring. The 2nd Asia Research Node Symposium on Humanosphere Science, Kyoto University. Uji, Japan, July 19-21, 2017.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林祥子 (KOBAYASHI, Shoko)  
玉川大学・農学部・准教授  
研究者番号: 10537103

(2) 研究協力者

大村善治 (OMURA, Yoshiharu)

藤田素子 (FUJITA, Motoko)