

宇宙利用促進調整委託費

事後評価

研究開発課題名（研究機関名）：
 衛星データ利用のための技術開発プログラム
 (2) 偏波合成開口レーダデータを用いた大規模植林地のマイクロ波散乱メカニズムの解明とバイオマス推定手法の開発
 (国立大学法人京都大学)
 研究機関及び予算額：平成21年度～平成23年度（3年計画） 24,902千円

項目	要約
1. 研究開発の概要	<p>衛星レーダからのデータを利用して、熱帯雨林における広大な植林地の植生を、天候に左右されることなく定期的にモニタリングする手法を開発するとともに、森林バイオマス量推定手法を開発する。</p>
2. 総合評価	<p style="text-align: center;">A</p> <p>当初の計画は達成され、オープンソース化により成果の継続的活用は可能である。衛星データ利用のための技術開発プログラムにふさわしい成果をあげ、宇宙利用の促進に貢献している。マイクロ波による解析によって地表の霧や雲の影響が少なく植生を評価できるような手法を提示できたことは重要である。大規模植林地へ照射されたマイクロ波の散乱メカニズムを明らかにして植生の状況を推定する手法を開発する本研究によって、その可能性の糸口が開かれたと評価できる。</p> <p>一方、汎用性を訴えるまでの成果ではなく、国内のような山がちな地域においても使えるような手法に早く構築してもらいたい。あるいは、アマゾンやフィリピンなどの重要な酸素供給地域の植生を正確に定量評価できるような形でもよいと思うので、もうひと頑張りを期待する。また、衛星データの頻度が極端に少ないため、科学的信頼性が十分でないことが残念である。</p> <p>S) 優れた成果を挙げ、宇宙利用の促進に著しく貢献した。 A) 相応の成果を挙げ、宇宙利用の促進に貢献した。 B) 相応の成果を挙げ、宇宙利用の促進に貢献しているが、一部の成果は得られておらず、その合理的な理由が説明されていない。 C) 一部の成果を挙げているが、宇宙利用の明確な促進につながっていない。 D) 成果はほとんど得られていない。</p>
3. その他	<p>【研究開発成果について】</p> <p>マイクロ波の偏光を用いて散乱現象をモデル化し植生の状態を数値化できしており、今後の宇宙観測データからの地球の植生管理に重要な指針を与えたと考える。今後、マイクロ波の波長などを考慮した衛星開発と、解析手法を検討していくことができれば、世界全体で共有できる成果となると思われる。</p> <p>【その他特記事項について】</p> <p>GUIの整備後オープンソース化が望まれる。</p>

宇宙利用促進調整委託費 事後評価 調査票

<p>1. 研究開発課題名</p> <p>偏波合成開口レーダデータを用いた大規模植林地のマイクロ波散乱メカニズムの 解明とバイオマス推定手法の開発</p>														
<p>2. 該当プログラム名</p> <p>衛星データ利用のための技術開発プログラム</p>														
<p>3. 研究開発の実施者</p> <table border="0"> <tr> <td>機関名：京都大学生存圏研究所</td> <td>代表者氏名：大村 善治</td> <td>担当事業：課題代表・研究統括</td> </tr> <tr> <td>機関名：立命館アジア太平洋大学</td> <td>代表者氏名：小林 祥子</td> <td>担当事業：衛星データ解析・GIS 解析</td> </tr> <tr> <td>機関名：京都大学生存圏研究所</td> <td>代表者氏名：川井 秀一</td> <td>担当事業：地上観測データの収集・評価</td> </tr> <tr> <td>機関名：立命館アジア太平洋大学</td> <td>代表者氏名：SANGA-NGOIE Kazadi</td> <td>担当事業：気候環境・衛星データ解析</td> </tr> </table>			機関名：京都大学生存圏研究所	代表者氏名：大村 善治	担当事業：課題代表・研究統括	機関名：立命館アジア太平洋大学	代表者氏名：小林 祥子	担当事業：衛星データ解析・GIS 解析	機関名：京都大学生存圏研究所	代表者氏名：川井 秀一	担当事業：地上観測データの収集・評価	機関名：立命館アジア太平洋大学	代表者氏名：SANGA-NGOIE Kazadi	担当事業：気候環境・衛星データ解析
機関名：京都大学生存圏研究所	代表者氏名：大村 善治	担当事業：課題代表・研究統括												
機関名：立命館アジア太平洋大学	代表者氏名：小林 祥子	担当事業：衛星データ解析・GIS 解析												
機関名：京都大学生存圏研究所	代表者氏名：川井 秀一	担当事業：地上観測データの収集・評価												
機関名：立命館アジア太平洋大学	代表者氏名：SANGA-NGOIE Kazadi	担当事業：気候環境・衛星データ解析												
<p>4. 研究開発予算及び研究者数</p> <table border="0"> <thead> <tr> <th></th> <th>研究開発予算</th> <th>研究・技術者</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>平成 21 年度</td> <td>8,991,450 千円</td> <td>人 / 年</td> </tr> <tr> <td>平成 22 年度</td> <td>8,991,990 千円</td> <td>8 人 / 年</td> </tr> <tr> <td>平成 23 年度</td> <td>6,918,820 千円</td> <td>8 人 / 年</td> </tr> </tbody> </table>				研究開発予算	研究・技術者	平成 21 年度	8,991,450 千円	人 / 年	平成 22 年度	8,991,990 千円	8 人 / 年	平成 23 年度	6,918,820 千円	8 人 / 年
	研究開発予算	研究・技術者												
平成 21 年度	8,991,450 千円	人 / 年												
平成 22 年度	8,991,990 千円	8 人 / 年												
平成 23 年度	6,918,820 千円	8 人 / 年												
<p>5. 研究開発の背景、目的・目標</p> <p>近年、世界の熱帯域各地で“産業植林”が急速に拡大し、今後、更なる広がりが見込まれている。成長の速い早生樹 (fast-growing tree) 植林が大きな割合を占め、この背景には、紙原料の安定供給を求める製紙・出版業界、温室効果ガスの排出量取引を見越した電力業界等の植林事業参入が挙げられる。さらに、化石燃料の可採量が議論される中、多くの国々が石油代替エネルギーへの移行を重要課題として強く位置づけ、エネルギー安定供給に向けた体制確立を進めている。中でも森林バイオマスは、食糧と競合しないことから、主要なエネルギー資源として重要な役割を担うとの展望が示されている。</p> <p>衛星観測データを用いた森林バイオマス量の面的把握の必要性・有効性が指摘されているものの、実用レベルの推定手法が確立していないこと、また、研究と産業との緊密化が十分に図られていないことが、森林分野における積極的な宇宙利用の進んでいない要因と考えられる。</p> <p>本研究課題では、熱帯早生樹植林地を対象に、様々な森林構成要素 (林冠：キャノピー・葉・幹・枝・樹高・土壌) が電磁波の散乱・吸収に複雑に影響することに着目し、マイクロ波の散乱メカニズム解明を主体とする偏波合成開口レーダデータを応用した、森林バイオマス量推定手法の高度化・開発を行うことを目的とする。雲に覆われる熱帯域では、光学センサによる高頻度・高品質の観測は難しく、マイクロ波センサの利用が不可欠である。</p>														
<p>6. 研究開発の実施内容</p> <p>本研究では、インドネシア・スマトラ島に位置するアカシア・マンギウム大規模造成林地の熱帯早生樹を研究対象地としている。ALOS 衛星 (だいち) の偏波合成開口レーダ PALSAR センサを主データとし、光学センサ AVNIR2 データも用いながら、地上観測森林パラメータとの組み合わせによる統合的解析を行った。</p> <p>地上観測森林パラメータ (以下、森林パラメータ) は、計 32 の定点観測プロット：Permanent Sample Plot (PSP) で測定される胸高直径・樹高・成立本数を含み、これらデータから立木材積を算定している。また GIS (地理情報システム) 解析を行うため、森林パラメータに加えて林分領域の輪郭を示すポリゴンベクターデータを使用した。林分内の樹木は同時期に植林・伐採されるため、林分内の衛星データの平均値を代表値とし、衛星データとの組み合わせを行っている。また、3 年目よりオーストラリア・ケアンズの松植林地にも研究対象を広げた。</p> <p>本研究の実施過程は、以下の 2 段階に分けられる。</p>														

マイクロ波の散乱強度と光学センサを用いた基本的散乱メカニズムに関する研究

衛星データ：ALOS/PALSAR HH/HV/VV/VH (2007.05.20), ALOS/PALSAR HH/HV (2008.07.29), ALOS/AVNIR2 (2008.05.10) を使用した。森林パラメータとマイクロ波の後方散乱強度との関係性を調べ、次に、林齢と植生指数 (NDVI 値) 及び NDVI 値と偏波 (HH・HV) との相関解析を行った。

波長 23 cm のレーダでは、葉の影響は少ないと仮定していたが、光学衛星より算出した NDVI 値 (植生活性度) が最も高くなる 2 年生の林分において、マイクロ波の後方散乱が最も高くなることが分かった。その影響を大きく受け、森林パラメータとマイクロ波の関係式が、負の二次曲線を示した。したがって、対象地のアカシア林においては、散乱強度によるバイオマス量の推定が出来ないこと、原因として、葉 (林冠) によりマイクロ波が大きく影響を受けることがデータ解析より明らかとなった。

→ 研究結果は、*Journal of Applied Remote Sensing* に論文として発表

マイクロ波の位相情報を用いた電力分解による森林バイオマスの推定

の解析結果を受け、林冠の影響を除外するために、偏波の位相情報を利用した四成分散乱モデル分解 (Yamaguchi et. al, 2005, 2011) を適用した。衛星データは、ALOS/PALSAR センサのフル偏波モードデータ HH/HV/VV/VH を使用している。

- 1 放射量補正・幾何学補正

前処理として、アジマス方向 (衛星の進行方向) に 0.25:0.5:0.25 の重みづけをし、3 ルックのスペックルフィルタリングを行った。レンジ方向にはフィルタリングを適用せず、レンジ方向 30 m、アジマス方向 15 m の空間解像度とした。3 ルックの処理は、0.01 km² 以下の面積を持つ林分も存在している研究対象地の林分を考慮すると妥当であると言える。幾何学補正は、スラントレンジからグランドレンジへの変換、UTM 座標系への変換を行い、内挿処理には、Inverse Distance Weighted 手法を用いた。

- 2 Coherency 行列の回転を適用した電力分解手法

観測されたマイクロ波の偏波行列データを、各々の散乱メカニズム (表面散乱・キャノピー散乱・2 回反射散乱) から構築されたモデル行列 (散乱行列モデル) にフィットさせ、衛星観測された電力 (観測データ) を分解し、各散乱成分の電力寄与の度合いを評価する手法 (四成分散乱モデル分解) を適用した。

PALSAR センサで取得したデータの電力分解を行い、各散乱成分における電力を算出 (観測データ = 表面散乱 + キャノピー散乱 + 2 回反射散乱 + ヘリックス散乱) した。さらに、各ピクセルにおいて、算出した各散乱成分電力と総電力に対する比を算出、PSP の森林パラメータ (胸高直径・樹高・立木材積) との相関解析を行った。総電力に対する各散乱成分の寄与率を算出することで、地表面ターゲットの性質に対するマイクロ波散乱の特性を明らかにする。

図 1 は、立木材積 (幹体積) と電力分解した散乱成分の相関解析の結果を示している。地表面からの 1 回反射による「表面散乱」が高い負の相関 ($R = -0.76$)、林冠による「キャノピー散乱」が高い正の相関 ($R = 0.68$)、地面と幹の直角構造によって生じる「2 回反射散乱」は正の相関 ($R = 0.58$) を示した。

図 2 は、電力分解した散乱成分の合成画像 (RGB=2 回反射/キャノピー/表面散乱) であり、林分毎にまとまった色を示していることが分かる。特に青く見えている部分は、幼木の存在する林分で表面散乱が卓越している。

上記結果は、後方散乱の物理的メカニズムから理解ができる。木 (幹・林冠) の成長に伴い裸地が減少するため「表面散乱」は減少、一方、林冠は厚く広がりを持つようになる

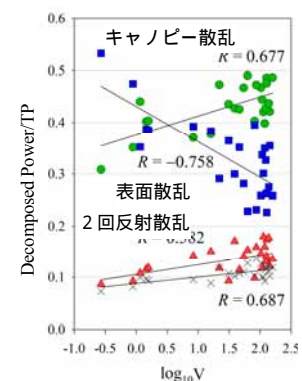


図 1 幹体積と電力分解したマイクロ波の相関関係

ため、「キャノピー散乱」は増加、さらに、幹が太くなり、樹高が高くなるにつれ、「2 回反射散乱」が起きやすくなり増加する。そして、これらの関係性をもとに、電力分解成分を用いた幹体積の推定を行った。

→ 上記研究結果は、Remote Sensing へ論文として投稿中

- 3 立木材積の推定・経年データの解析

マイクロ波衛星データの電力分解の散乱成分より経験式を導出し立木材積の推定を行った。2011 年度の植林会社との交渉により、新たな現場観測森林パラメータのデータを入手出来たため、2007 年に加え、2009・2010 年のフル偏波データを用いた解析を行った。

オーストラリア・松林における研究サイト立ち上げ

幹が細く広葉樹であるインドネシアのアカシア林とは特性が対照的な、幹が太く針葉樹である松植林地で研究を遂行するため、研究サイトの立ち上げを行った。

7. 研究開発成果

【1】宇宙利用の促進への寄与(本研究開発事業がどれだけ宇宙利用の促進に寄与したのか。)

・社会的な効果(公益性、実用性、インパクト等)の大きさ

以上のように、マイクロ波衛星データと森林パラメータの明確な関係性を示したことは、極めて有用な研究成果であり、森林バイオマス量・立木材積推定のモデルを示したと言える。本研究は、ALOS 衛星が有する情報の利用技術の高度化を担う先導的取り組みであり、ALOS 衛星データの利用促進に寄与するものである。

また、衛星データを用いた森林資源の定量的評価は、目的指向性が高く利用ニーズに立脚した研究である。中でも、天候に左右されないマイクロ波衛星データを用い、地上観測データとの組み合わせによる本研究結果は、社会的な実用性が極めて高いと言える。

・他機関、他地域への波及効果

本研究で構築した手法の汎用化が期待できることから、研究成果は、ユーカリ・オイルパームを含めた、産業植林地全体におけるバイオマス賦存量評価と森林資源の包括的把握・理解に寄与するものである。産業植林地の適正な管理が求められている現在、衛星データを用いた自然環境、植林地の適切な把握は不可欠である。

・研究開発成果の新規性・独創性

現在でも、植林された木ではなく、自然林(熱帯雨林)を違法伐採して紙パルプを輸出する企業も存在すること、そして単一植林を行うため生物多様性の劣化、土壌養分の収奪等が指摘されていることから、紙パルプ製造や産業植林は、タブー視されるセンシティブな側面を持ち合わせている(本研究対象地では、熱帯雨林の伐採による植林は行っていない)。そのため、とりわけ発展途上国の産業植林地において、“植林会社が保有する”地上観測データを用いた森林バイオマスの推定研究は着手が極めて困難である。

加えて、マイクロ波衛星による森林資源解析は歴史が浅く、また衛星観測のみで評価される森林バイオマス・CO₂ 吸収量は不確実性が高いことから、地上観測と衛星観測の突き合せによる適切な評価が求められている。本研究は、これまでに構築した植林会社との連携関係を最大の強みとして研究を推進し、実効性の高い手法の開発を目指す点で強い独自性を確保している。

・本委託事業終了後の継続性

委託終了後もインドネシア・オーストラリアの対象地で、研究を継続するため、外部研究資金への申請を行っている。

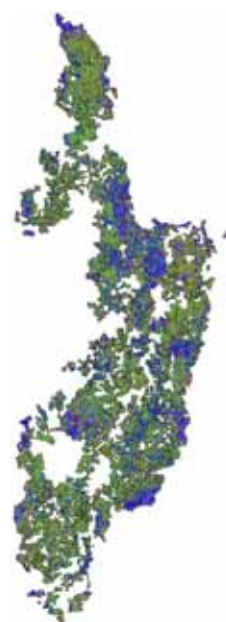


図2 電力分解散乱成分の合成画像(RGB=2 回反射/キャノピー/表面散乱)

【2】その他成果（もしあれば、参考のためお伺いします）

- マイクロ波データを用いた森林バイオマス推定の結果が見え始めてきたこと、また定期的な植林会社への訪問を通して、少しずつ植林会社からデータが公開されるようになった。
- 植林会社訪問の結果、現地での実質的な問題に関わる情報を得られた。

研究対象地では、自然遷移・森林火災に起因する二次林化が発生し、現に数年前、植林会社が、光学衛星による森林バイオマス量の推定を試みている。しかし、林冠の植生活性を捉える光学衛星では、成長した早生樹と二次林の判別がつかず、算定バイオマス量は過大評価された。

→ 長期にわたって信頼関係を築くことで、新たな地上観測データの入手が可能となったこと、さらに現場で起きている実質的な問題に係わる情報を得られたことは、今後の研究の継続性と発展につながる重要な成果であると言える。

- 位相情報を含んだデータの読み出し、幾何・放射量補正、四成分分解すべての過程において、保守性・移植性の高いMATLABプログラミング言語のコードを作成、解析を行った。

→ 既存のソフトではなくソースコードを書いたことで、今後の拡張性が高まった。マイクロ波の多偏波行列の解析は歴史が浅く、今現在も様々な手法が構築されている最中である。本研究グループでも、さらなる高精度の解析を進めるためにアルゴリズム構築を進めていくことから、既存のソフトでは対応できない。したがって、ソースコードを書いたことで、今後の研究を進める足場を築いたと言える。

7. 研究開発成果の発表状況

- (1) 研究開発成果の製品化の状況
製品化は行っていない

- (2) 研究発表件数

査読付き論文：1件 + 1件投稿中

- S. Kobayashi, R. Widyorini, S. Kawai, Y. Omura, K. Sanga-Ngoie and B. Supriadi, “Backscattering characteristics of L-band polarimetric and optical satellite imagery over planted acacia forests in Sumatra, Indonesia”, *Journal of Applied Remote Sensing*, Vol. 6, 063525 (2012).
- S. Kobayashi, Y. Omura, K. Sanga-Ngoie, R. Widyorini, B. Supriadi, and S. Kawai, “The characteristics of decomposed scattering powers of L-band multi-polarimetric SAR as growth of tropical plantation forests”, *Remote Sensing*, (Submitted).

査読無し論文等：1件

- S. Kobayashi, Y. Omura, K. Sanga-Ngoie, R. Widyorini, S. Kawai and B. Supriadi, “The potential of polarimetric L-band SAR image decomposition in estimating tree volume over industrial plantation forests”, *Proceedings of the 51th Autumn Conference of the Remote Sensing Society of Japan* (2011).

口頭発表：2件（国内：1件、国際：1件）

- 小林祥子、大村善治、Sanga-Ngoie Kazadi、川井秀一、Ragil Widyorini, “偏波合成開口レーダを用いた大規模植林地における森林バイオマス推定手法の開発”, 第一回生存圏フラッグシップシンポジウム「環境を考慮したバイオマス資源の確保戦略」(2011.05).
- S. Kobayashi, “Ground and satellite remote sensing observations for retrieving forest stems volume in industrial plantation forests”, *2011 ENVOL International Round Table* (2012.01).

- (3) 知的財産権等出願件数(出願中含む)
0件（国内： 件、外国： 件）

- (4) 受賞等
0件（国内： 件、国際： 件）

8．今後の展望と課題

今後は、森林バイオマス推定手法の高度化を図るとともに、二次林化域判別手法を構築、森林バイオマスの動態評価を行っていく。具体的には、

森林バイオマス量（幹体積）とそれを物理的に反映する2回反射散乱（地面と幹の直角構造により生じる）との相関が実利用に至る十分な精度が得られていないことから、この点で研究手法の新たな展開を図っていくことが第一に着手する点である。

現場調査、データベースの掘り起し・洗い出し作業を実施し、二次林化が起きている地域、起こった地域について網羅的にサーベイし、二次林化がマイクロ波のどのパラメータに影響を及ぼすのかを明らかにし、その判別手法を構築する。

二次林化域を取り除いた上で、産業植林地における森林バイオマス量の動態解析を行う。伐採箇所における推定幹体積と植林会社から提供される実際の木材生産量との比較から、手法の有効性を検討・検証する。

9．その他特記事項

本研究は、多偏波レーダーという先端的衛星観測技術より得られる位相情報を、森林資源の把握に用いる融合的研究である。研究構成メンバーによって、当該学問分野が網羅的にカバーされ、研究を効率的に推進できたと言える。

主な実施体制としては、研究代表者（京大・大村）が電波工学の分野から研究を統括し、地上データ解析や植林会社との調整は、京大・川井が担当、衛星データ解析、GIS解析は、立命館 APU・サンガ・小林が行った。

採択課題名 偏波合成開口レーダデータを用いた大規模植林地の マイクロ波散乱メカニズムの解明とバイオマス推定手法の開発

1. 研究開発の背景、目的・目標

近年、世界の熱帯域各地で“産業植林”が急速に拡大、成長の速い早生樹(fast-growing tree) 植林が大きな割合を占める。この背景には、紙原料を求める製紙・出版業界、温室効果ガスの排出量取引を見越した異業種の植林事業参入が挙げられる。さらに、多くの国々が、石油代替エネルギー導入に向けた体制確立を進めており、中でも森林バイオマスは、食糧と競合しないことから、再生可能エネルギー資源として注目を集めている。

したがって、人工衛星データを用いた森林資源（自然林・人工林）の把握、とくに、年中雲に覆われる熱帯域では、雲があっても観測可能なマイクロ波衛星による森林バイオマス推定の技術開発が必要とされている。

そこで本研究課題では、熱帯早生樹の大規模植林地を対象に、様々な森林構成要素が電磁波の散乱・吸収に複雑に影響することに着目し、マイクロ波の散乱メカニズムの解明を主体とする、森林バイオマス量推定手法の開発を行うことを目的とする。

2. 研究開発の実施内容

インドネシア・スマトラ島に位置するアカシア林：早生樹の大規模造成林地を対象地とし、ALOS衛星観測のマイクロ波（PALSAR）データを用いて、地上観測森林パラメータとのつき合わせによる統合的な解析を行った。

衛星観測のマイクロ波を、表面散乱＋キャノピー（林冠）散乱＋2回反射散乱＋ヘリックス散乱の4つの成分に電力分解（四成分散乱モデル分解）し、インドネシア植林地の現場観測による森林バイオマス量（厳密には立木体積）との相関解析を行った。

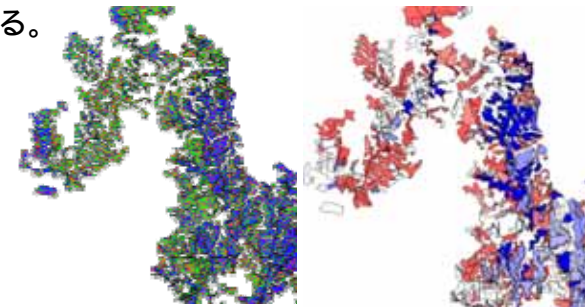
さらに、得られたマイクロ波の各散乱成分と地上観測森林パラメータの関係から、立木材積の推定を行った。

3. 研究開発成果

森林バイオマス量（立木材積）と電力分解した散乱成分の相関解析を行った結果、地表面からの1回反射による「表面散乱」が森林バイオマス量と高い負の相関（ $R = -0.76$ ）、林冠による「キャノピー散乱」が高い正の相関（ $R = 0.68$ ）、地面と幹の直角構造によって生じる「2回反射散乱」は正の相関（ $R = 0.58$ ）を示した。

上記結果は、後方散乱の物理的メカニズムから理解できる。木の成長に伴い裸地が減少するため「表面散乱」は減少、一方、林冠は厚く広がりを持つようになるため「キャノピー散乱」は増加、幹が太く高くなるにつれ「2回反射散乱」が増加する。これらの関係性をもとに、マイクロ波衛星データを用いた幹体積の推定を行った。以下の図は、マイクロ波の電力分解成分の合成画像（左）と林齢（右）を比べたものである。マイクロ波が、アカシア林の様子を的確に捉えていることが分かる。

このように、マイクロ波衛星データと森林パラメータの間の明確な関係性を示したことは、極めて有用な研究成果であり、ALOS衛星が有する情報の利用技術の高度化を担う先導的取り組みと言える。



マイクロ波衛星画像
電力分解成分の合成画像

地上観測による
アカシア林の林齢

4. 今後の宇宙利用促進に向けた展望と課題

今後さらに研究を進め、マイクロ波衛星データを用いた森林バイオマス量推定の実利用段階への移行を目指し、研究を展開する。

現在、早生樹植林地の面積は急増していることから、ALOS衛星データを用いた広範な植林地の面的な把握、そして、植林会社にとっての経営基盤となり得る情報の提供は、持続可能な森林資源管理に役立つものである。さらに、打ち上げ予定のALOS2衛星データの利用促進に寄与するものと期待できる。