

「だいち」による森林観測計画（京都炭素計画）および将来衛星計画

Forest Monitoring Project Using the Daichi and Future Satellite Plan

島田 政 信 (しまだ まさのぶ)

宇宙航空研究開発機構 地球観測研究センター

1. はじめに

「だいち」が打ち上げられてはや2年が過ぎた。搭載された3センサはすべて正常で、当初の目的どおり、地図作成、領域観測、災害監視、資源観測の分野への正常運用が始まった。L-band 合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar: SAR) は天候、昼夜の別なく動作し、地表を高分解能で観測できるセンサである。波長が23 cmと比較的長く、地表を覆う森林を一部透過し森林下部の情報、森林バイオマスの情報を取得する能力が高いことから、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) は Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar (PALSAR) を用いて世界的な規模で森林状況の監視とその環境との関わりを研究するプロジェクト (京都炭素プロジェクト) を推進してきた。森林の排出する二酸化炭素量と地球温暖化の関係は非常に深く、天候に無関係に森林情報を取得できる PALSAR の環境への応用には期待が強い。本稿では、PALSAR を用いた森林観測について報告する。

2. L-band SAR と森林観測

JERS-1 SAR は定常的に運用された世界初の L-band SAR であり、1992年2月11日から1998年10月12日までの6年半に約40万シーンの画像を収集した。1995年以降、L-band SAR が高い感度を有する森林観測と地殻変動観測に注力して運用を実施した。最初、L-band SAR の森林画像からなにが見えるかを示す。図-1は、南米アマゾン・ロンドニア地方を観測した JERS-1 SAR の一辺1000 km 四方の領域のモザイク画像である。単偏波の SAR 画像であり、画像が白黒濃淡なのはやむを得ないが、代表的な領域が3箇所みられる。1) 灰色の領域、2) 人工的なあるいは自然な形状を持つ暗い領域、3) 川に沿って時折見える白い領域である。SAR 画像は電波の散乱係数を表現し、その大きさは波長と散乱体の表面の粗さの関係、対象物の散乱係数、散乱の機構に依存する。アマゾンは広葉樹林に覆われ、森林の密度は高い。その間隙をぬって入射した電波が、地表あるいは樹木に当たって後方散乱する機構を整理すると、都合5種類が考えられる (図-2 参照)。信号の通過パスはそれぞれ命名され、1) 体積散乱、3) 表面散乱、2) 2回散乱等である。1) は入射した信号が、波長と同程度の散乱体 (ここでは樹木の葉など) で複数回散乱し (多重

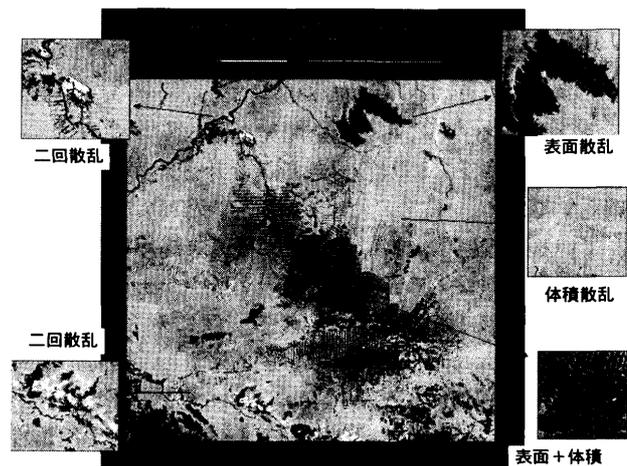


図-1 JERS-1 SAR によるアマゾン森林モザイク (ロンドニア地方)。人為的な黒い領域は森林伐採である。ロンドニア地方は1990年代より森林伐採が進み、黒いパターンが魚の骨上に見えることからフィッシュボーンディフォレストーションといわれる (C, JAXA, METI)。

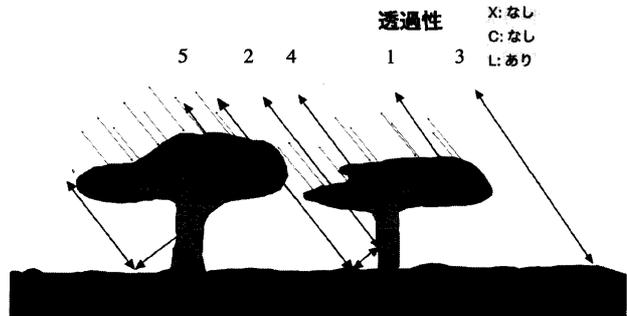


図-2 散乱の機構分類を示したもの。1) 体積散乱, 2) 2回散乱, 3) 表面散乱が支配的である。

散乱), 再度衛星に向けて発射する機構である。この過程で信号はランダムな一様散乱となる。3) は地面での散乱である。波長と地面のこぼこ状態とフレネルの反射係数で明るさが決まる。2) は樹木を透過した信号が、地面と幹に当たって衛星方向に散乱する成分である。散乱の回数が2回あることから2回散乱と呼ばれる。これら3種類の散乱機構の組み合わせで図-1の濃淡が説明できる。散乱強度順には、 $2 > 1 > 3$ の順である。高い周波数では散乱機構の数が減る。

次に、3種類の散乱機構の生じる原因を考える。

1) 体積散乱は入射電界がランダムに散乱するもの

で、その散乱係数は入射電力が半球上の単位立体角に散乱することを考えれば、周波数によらず散乱係数が $1/2\pi$ (-8.0 dB) となる。この値は、正確には湿気、森林を構成する葉のフレネル反射係数、さらには誘電率に依存して決まるが、 -8 dB といっても大きく違わない¹⁾。このような一様散乱体は、実は SAR の電気特性を評価する上で非常に重要である。特に、アンテナパターンの定量的に評価に不可欠であり、宇宙機関の SAR はその校正検証をアマゾン森林データにしている。

2) 2回散乱：アマゾンは雨期（10月から4月）と乾期（5月から9月）に分かれており、雨期の降水量がアマゾン川流域の水位の上昇と冠水域を増大させる。雨期と乾期で川幅は大きく変わり、世界最大の流量を誇るアマゾン川は本流およびその支流の流域面積を大きくかえる。アマゾンの森林は高く30~40 mに及ぶ。一方、雨期の冠水は水位10 m超に及び、乾期に雑木、二次林で覆われていた森林下部が、雨期には水面で覆われる。このような場合、電波は図-2の2の経路に沿って進み、2回散乱現象が発生し、SARに向かう強い散乱が発生する。明るい散乱領域から、冠水領域が特定できる。冠水が植物の死滅、ひいてはメタンガスの発生、更には、アマゾンを循環する水の総量推定に関連し、冠水域の特定は、森林内生息系情報の特定に非常に有効である。波長の短いCバンド、Xバンド等では、信号が樹冠部を透過できず、冠水域を知り得ない。

3) 表面散乱：電波の散乱は様々な方向に及ぶが、もしも観測対象物が滑らかな平面であれば全反射し、信号は帰ってこない。アマゾン地形は平坦なことから、上の平面の条件は満足する。しかし、滑らかかどうかは波長と地表の粗さの関係による。ベックマン等によると、対象物の粗さが波長の8分の1よりも小さいときには平面は滑らかで、信号が全反射するとある。森林伐採後の地面には様々な倒木、あるいは草、落葉、石ころ等で構成される。これを23 cmの信号は滑らかと見るかどうかである。すべてが上記の条件を満たさないが、それでも大部分は滑らかと思われる。仮に全反射しなくても、後方散乱する成分は非常に小さく、体積散乱との区別は容易である。実際、図-1の暗いところの散乱係数は -15 dB程度であり、体積散乱部のそれより、7 dB暗い。一方、高い周波数ではこうはならず、伐採領域は明確には特定できない。このような理由から、森林の観測には波長の長いLバンド、あるいは更に長いPバンドが向いている。

3. L-band 信号はどれくらい森林を透過するか？

L-band 信号は樹木を透過することはよく知られているし、それを体験することもできる。カーナビである。森林の中でも、GPS受信機は動作し、自分の位置と軌跡をモニター画面上に表示してくれる。このことから、信号は森林を透過しているのだと感じる。では、どれくらい透過するだろうか？ この質問に答えるのは容易で

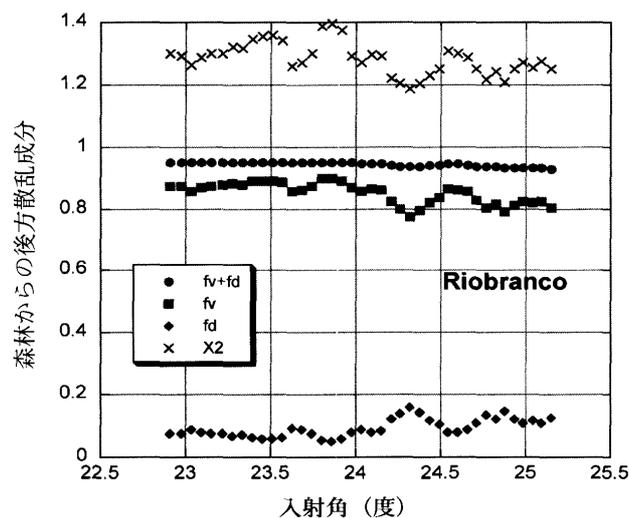


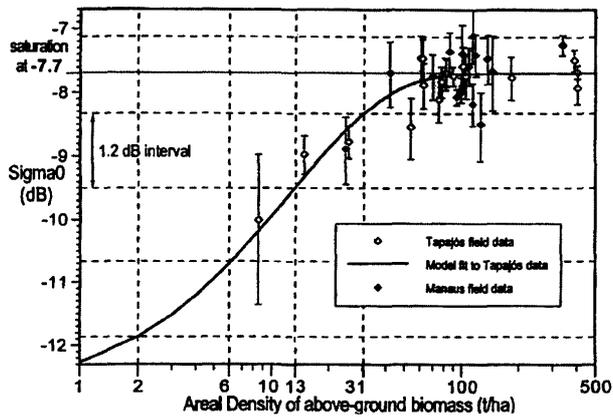
図-3 森林に対する散乱の特性について（透過性と偏波毎の散乱特性について）。特に、 fd/fv が透過電力である。

はない。地上に受信機を設置してその電力から推定することもできよう。しかし、衛星からの信号は非常に微弱で、精度よい測定は困難である。この疑問に答えるには理論モデルを用いるしかない。PALSARや航空機搭載 SAR (PI-SAR)にはポラリメトリモードがある。伝播する電波は電界の方向を表現するのに偏波面が用いられるが、送信に2偏波、受信に2偏波併せて4種類の信号の組み合わせができ、それをを用いて森林の構造を知ることができる。先ほど、L-bandは森林透過性に優れると言ったが、実は詳細を見ると偏波依存性がある。HH, VVは透過しやすく、HV, VHは透過し難い。ほぼ、樹冠部で散乱してくる。したがって、偏波の組み合わせから、偏波毎の透過率をモデル計算で推し量ることが可能になる。計算はややこしいので詳細は²⁾を参照していただくとして、結果を図-3に示す。横軸は、入射角、縦軸は2回散乱と体積散乱の和、比率である。fvは全散乱電力に対する体積散乱の比率、fdは2回散乱の比率、fv+fdはその和である。fv+fdが1より小さいのは、この表現がV偏波対したもので、H偏波分を1としたからである。H偏波は約5%大きい。X2は2回散乱のH偏波とV偏波の比率である。よって、H偏波の方が2回散乱は大きい。結局2回散乱は、全受信電力の約10~15%を占有することがわかる。

4. 森林バイオマスは測れるか？

バイオマス推定の可能性は高い。体積散乱の項で散乱係数はおおむね -8 dBといったが、正確には散乱係数は森林バイオマス量に関係する。この関係は、これまでに様々な研究者により実験的に計測されてきた。特に1995年代のJERS-1 SARに対して関係式を求めた、A. Luckmann³⁾やLe Toan⁴⁾は先駆者であり、図-4に示すように、森林バイオマスと後方散乱係数は約80 t/haまではほぼ線形に、それ以降は飽和している。 -8 dBはこの領域であり、ほぼ飽和した状態に対応している。

報 告



Quantised biomass density retrieval scheme
 σ^0 in L-HH.(after J. R. Baker [97]).

図-4 バイオマスと後方散乱係数の関係

なので、非飽和の状態であれば SAR の感度と安定度を頼りにすれば散乱係数からバイオマス量が推定できる。口絵写真-1 に示すように、フランスでは PALSAR を用いたバイオマス量マップの作成が試験的に始まっている。しかし、飽和に至るバイオマス量は周波数、偏波に依存し、実は、周波数が低いほど飽和に至る散乱係数が相対的に大きく有利である。アマゾンのバイオマス量が 500 t/ha、日本の代表的な森林が 200 t/ha と言われており、いずれにしてもこの方法ではこの値まで到達しない。次の方法は、バイオマスは森林樹高に関係する。高さは干渉処理で計測できる。偏波により電波の到達する位置が異なり、異なる偏波で計測した高さの差から、樹高を出し、それからバイオマスを計測するものである。現在この研究が進行中であるが、PALSAR を使用する場合には 46 日隔てた信号は、「森林を透過してきた信号は干渉するのか？」という根本の疑問にぶつかるが、さほど密度の高くない森林等では良好な成果がでている^{5,6)}。将来的には 46 日よりもはるかに時間間隔を短くした SAR 衛星が登場し、時間経過による干渉性を十分に補える衛星データが取得可能になる。このように、森林を透過する L-band 信号、森林伐採地を暗く、森林地を明るく映す L-band は森林の監視、森林変化の監視に非常に大きな感度を有する。

5. 森林と L-band SAR と実用プロジェクト

近年地球温暖化の傾向が急激であり、それに伴う環境の変化が取りざたされる。化石燃料の燃焼による二酸化炭素の空中排出以上に近年問題視されているのが開発途上国の森林伐採に伴う炭素量の排出である。卑近な例として、インドネシア一国の森林伐採や泥炭の分解、更には森林火災に伴う CO₂ 排出が、日本の化石燃料の排出量を上回り、米国、中国について世界第 3 位の温室効果ガス排出国に押し上げているとの報告もあり⁷⁾、森林伐採の監視、さらには陸域炭素量の広域にわたっての推定は極めて重要である。同時に、全世界に大きく広がる湿原は多くの生物の活動を支援し、生物活動を育む母体になっている。排出されるメタンガスは CO₂ 以上の温

室効果を持ち、地球温暖化の推進要因である。砂漠化の監視も重要である。特に、乾燥地域においては地下水資源の確保は重要であり、その意味でも、乾燥地に電波の透過する L-band SAR を用いての地下水脈の把握は重要な地球環境監視の項目である。

これらの目的に沿って PALSAR を用いた JAXA の観測計画、京都炭素観測計画⁸⁾ が始動したのが衛星打ち上げの数年前である。PALSAR は初期機能確認開始時期こそやや問題に直面したものの、それ以降の校正検証は非常に順調であり、その幾何学的校正、ラジオメトリック校正は非常に精度が高い⁹⁾。

5.1 京都炭素計画の目的

JAXA は 2000 年頃に、JERS-1 SAR の熱帯雨林プロジェクトに継続するものとして、京都炭素計画を立ち上げた。目的は、以下の分野に炭素 (Carbon) に関連した情報を提供することにある。

- 1) CO₂, CH₄ の排出源、吸収源に関連した陸域炭素サイクル科学
- 2) 国際環境条約と宣言に関連して、京都議定書には (森林および土地被覆変化)、ラムサール条約 (湿原特性と変化)、国連ミレニアム & UNCCD (水資源管理と砂漠化)
- 3) 環境保全
であり、森林、湿原、更には砂漠化に関する情報を抽出するものである。

5.2 メンバー機関

国際定期研究チームであり、JAXA 以外に全部で 18 機関が参加している。

5.3 テーマ分類

1) 森林、2) 湿原、3) 砂漠と水資源、4) モザイク作成の合計 4 テーマで構成される。

1) 森林テーマでは、i) 全球観測計画を立てること、ii) 森林と土地被覆の年次変化の把握、iii) 陸域バイオマスあるいはその変化の抽出、iv) ブラジルにおける森林違法伐採監視を取扱う。対象とする領域は全世界であり、最低でも年 2 回 (1 回は FBD, 1 回は FBS, SCANSAR は特定領域を多数回) くまなく観測する。干渉 SAR 用に 2 年間で全球観測を行う。口絵写真-1 に観測領域と得られる成果物の代表例 (森林伐採図、バイオマス分布図、森林分類図) を示す。

2) 湿原テーマでは、湿原に対するラムサール条約や陸域炭素量サイクル研究に関する IGOS-P と協調を図りながら、i) ラムサールの指定する領域の時間的空間的な洪水パターンの把握、ii) 自然起源あるいは人為起源の湿原変化、iii) ラムサールの湿原カタログ作成、iv) メタンの人為起源あるいは自然起源の特定、を目標とする。観測領域は、湿原を多く含む領域であり (口絵写真-2 参照)、降交軌道から 46 日毎に SCANSAR で観測する。特に SCANSAR は観測幅が 350 km と STRIP モードよりも 5 倍広く観測の頻度は 5 倍高い。

3) 砂漠と水資源テーマでは、i) 砂漠地域の地下構造の検出と水資源の探査、ii) 短期砂漠化の監視を行う。

観測領域と観測事例を口絵写真—3に示す。観測領域はサハラ、カラハリ、ゴビ砂漠、オーストラリアである。SARの電波透過性を表す画像が口絵写真—3の右図であり、地下構造が浮き彫りになる。

4) モザイク作成テーマでは、i) 全球の2偏波(HH+HV) 50m オルソモザイクの作成、ii) 湿原のSCANSARの50m オルソモザイク、iii) 全球500m ブラウズモザイク、を作成する。作成機関は、JAXA(アジア、オーストラリア担当)、JRC(アフリカ、ユーラシア大陸、ヨーロッパ)、JPL(南北アメリカ)である。口絵写真—4に現時点作成した東南アジア森林モザイク、その一部拡大図を示す。

5.4 進捗状況

観測およびデータの取得は順調に進んでいるが、従来以上の大量のデータの取り扱い、その画像化、更にオルソ変換は32ビットOSの指定可能領域を凌駕し、数10GBの領域を必要とすることから、更には、PALSAR自身が繰り返し周波数を頻繁に変更することからパス全体の処理に手こずったが、ようやく高次データの配布が軌道に乗ってきた。また、利用者側でもデータの高次利用が進み、京都観測の当初の3年期間の最後の年(2008)に十分な成果が期待できそうである。

6. ALOSと将来衛星計画

「だいち」は2007年4月に観測データを中継衛星「こだま」における送信系が故障したものの、その後切り替え使用中の送信機は正常に機能しており、現時点は問題ない。残燃料は非常に多く、約10年の運用が期待できる。「だいち」に次ぐ衛星を望む声強いこと、また、災害観測・森林観測等で更なる機能を有する衛星計画の必要性をJAXA自身が強く感じていることから、2007年半ばより次期衛星の計画を推進している。「だいち」の持つ高分解能性能を伸ばし、更に観測能力を高めるものである。JERS-1とALOSは光学とSARを同一プラットフォーム上に設置したが、より高い能力の実現と運用性に幅を持たすために、センサの分化が必要になってきた。最終的には、光学専用衛星、SAR専用衛星に分化するが、天候に左右されず、広域の情報を早期に提供できるという特徴を備えたSAR衛星を最初に打ち上げることを想定して、現在検討を進めている。次期SAR衛星の特徴を一言でいうと、「差分変化抽出を容易にする」であり、

- 干渉機能の増強
- 軌道回帰数の縮小化(46日から14日程度への減少)
- 高分解能化(広帯域幅化(最高85MHz、最低28MHz)とアジマス方向の等価的アンテナサイズの縮小化)
- 多偏波化(HHのみならずHV、更にはポラリメト

りの使用)

- 最小感度の向上(等価雑音散乱係数の縮小化: -28dB程度)

が代表的な仕様である。

7. 最後 に

2006年1月から始まった「だいち」による地球観測は、着実に進み、そのうちの森林観測は社会問題化してきた地球温暖化を監視する一つの道具となった。1年間に約3周分の地球表面のPALSARデータを集めており、これらを細かく解析することで、高い精度の森林減少率、地表面変化等の情報を取得することができる。REDD(Reducing the emission from the deforestation and forest degradation)が京都議定書につぐ温暖化防止の方向として定まったこともあり、より高分解で高感度のSARが将来にわたっても必要な機器となってきた。JAXAとしては今後も社会的要求に応えられるSARの開発を実施して行きたい。

参 考 文 献

- 1) M. Shimada, "Long-term stability of L-band normalized radar cross section of Amazon rainforest using the JERS-1 SAR", *Can. J. Remote Sensing*, Vol. 31, No. 1, pp. 132~137, 2005.
- 2) M. Shimada et al., "Penetration property of the L-band SAR and its coherence", *Proceeding of the ALOS PI workshop*, Kyoto, Nov. 19-22, 2007.
- 3) A. Luckman et al., "Tropical Forest Biomass Density Estimation Using JERS-1 SAR: Seasonal Variation, Confidence Limits, and Application to Image Mosaics", *Remote sensing Env*, 63, 1998.
- 4) Thuy Le Toan, "SAR data for forestry and agriculture", *ESA Advanced Training Course on Land Remote Sensing*, September 5 2007, Lecture D3L3.
- 5) M. Shimada, "Coherence dependency of the PALSAR POLinSAR on forest in Japan and Amazon", *Proc. of IGARSS07*, Barcelona, July 23-28, 2007, pp. 2636~2639.
- 6) Parivash Lumsdon et al., "Estimation and Monitoring of Tropical Forest Biomass Using Polarimetric Interferometric SAR Data", *Proceeding of ALOS PI meeting at Kyoto*, Nov. 19-22, 2007.
- 7) <http://www.gef.or.jp/activity/economy/sustainable/peat.pdf>, "インドネシア泥炭地破壊で世界第3位のCO₂排出国に", シンポジウム「アジアに迫る温暖化と低炭素エネルギー開発~バイオ燃料, 水力発電CDM, 天然ガス開発の持続可能性を問う~」2007年2月8日開催.
- 8) A. Rosenqvist et al., "ALOS PALSAR: A Pathfinder Mission for Global-Scale Monitoring of Environment", *IEEE Geoscience and remote sensing*, Vol. 45, No. 11, November 2007, pp. 3307~3316.
- 9) M. Shimada et al., "PALSAR Radiometric and Geometric Calibration (in Japanese)", *Journal of the Remote Sensing Society of Japan*, Vol. 27, No. 4, pp. 308~328, 2007.

(原稿受理 2008.8.5)