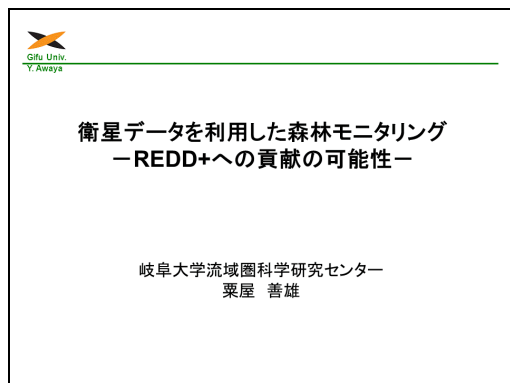


「衛星データを利用した森林モニタリング—REDD+への貢献の可能性—」

栗屋 善雄（岐阜大学 流通圏科学研究センター）



私は3年ほど前まで森林総合研究所で研究しており、主に衛星データの解析、モニタリングをずっと行ってきたが、熱帯林のモニタリングはさほど経験がない。今日はリモートセンシングのもっと基本的なところを説明して、たどるべき道筋をサゼスションするというスタンスで話をしたい。



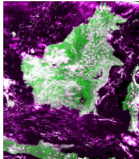
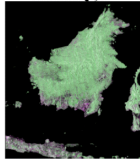
### 概要

1. 衛星リモートセンシング(RS)の概要  
光学センサと合成開口レーダ
2. RSによる森林モニタリングの問題点  
RSIに影響を及ぼす要因  
・・・ 天気・大気、地形、季節変化  
RSの解析精度を考える
3. モニタリングの事例 インドネシア中央カリマンタン州  
大規模な変化の判読  
変化の数値解析
4. RSIによる森林モニタリングを考える

本報告をまとめるにあたり、島田政信氏(JAXA)からは補正済みPALSARデータを、斎藤英樹氏、高橋興明氏(森林総研)からはPALSARデータの解析結果を提供していただきました。本報告の一部は環境省地球環境推進費(A0802)で実施したものです。ご協力いただいた関係者の皆様にお礼申し上げます。



### 光学センサと合成開口レーダ

| 光学センサ<br>例 Landsat/TM                                                                | 合成開口レーダ(SAR)<br>例 ALOS/PALSAR                                                         |
|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |
|  |  |
| MODIS 2007/5/23                                                                      | PALSAR 2007 ©METI/JAXA                                                                |

1. 雲があると地表の様子が分からない
2. 直下や斜め方向を観測できる
3. 山地では日向と日陰が生じる
4. データは人間の知覚に近い

1. 雲を通して地表の様子を観測できる
2. 斜めに観測する
3. 山地では地形によってデータが空む
4. データは人間の感覚になじみにくい

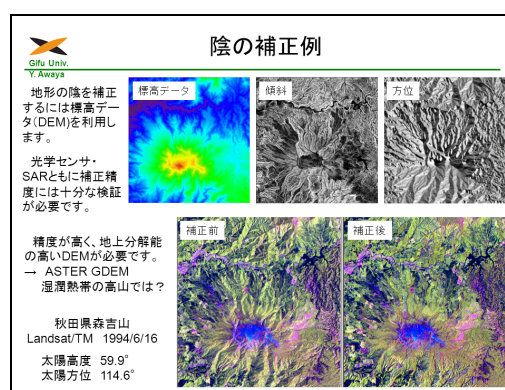
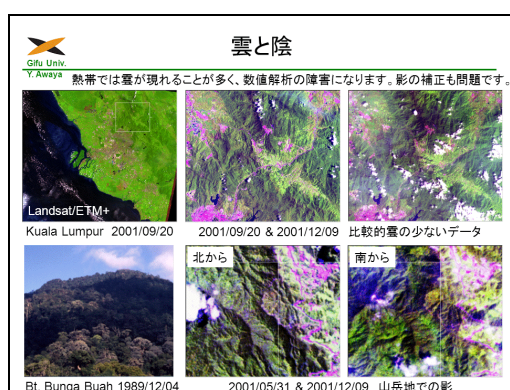
合成開口レーダという日本が打ち上げたALOSに積まれていたPALSAR<sup>90</sup>と、光学センサの解析を紹介する形で話を進める。リモートセンシングによるモニタリングの問題点、実際のモニタリングの事例を紹介して、どのような形で森林をモニタリングするのかという内容である。なお、この報告をまとめるに当たり、JAXA<sup>91</sup>の島田さん、森林総研の斎藤さん、高橋さんのご協力をいただいた。また、環境省の課題で実施した内容も一部含んでいる。

<sup>90</sup> Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar : 天候や昼夜に影響されない能動型のマイクロ波センサ

<sup>91</sup> Japan Aerospace Exploration Agency : 宇宙航空研究開発機構 (<http://www.jaxa.jp/>)

光学センサは基本的に下を見て観測するが、斜め方向も観測することができる。アメリカの衛星Terraに搭載されているMODISという光学センサは非常に広範囲を観測しており、3000km近い範囲を見ているが、観測幅が広いと、直下部分と両端で違うという問題が出てくる。また、光学センサだとどうしても雲を通して下を見ることができないため、MODISも雲の影響を受けている。さらに、山地では日なたと日陰の問題がある。光学センサは基本的には可視域を含む写真なので、人間の感覚にかなり近い。

それに対して合成開口レーダは斜めに向けて観測するもので、山地では地形によってデータがゆがむという問題がある。PALSARという合成開口レーダは、雲の影響はほとんど受けないが、バイオマスにかかわるような計測をしているため、人間の感覚にはなじみにくい。



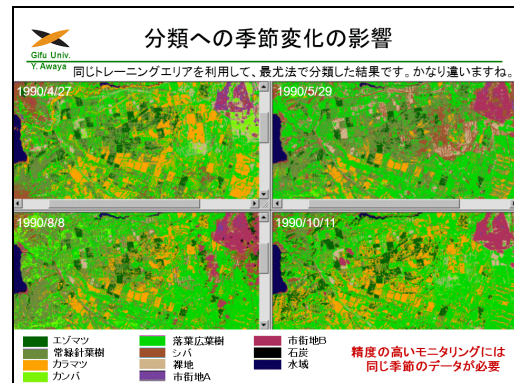
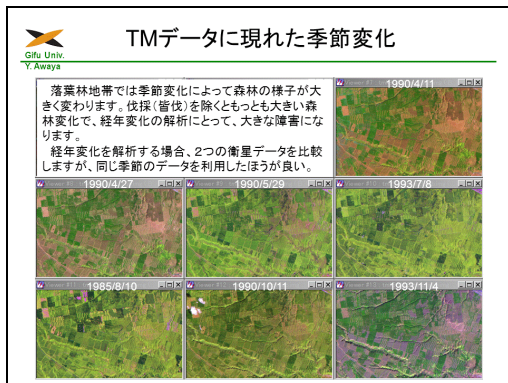
データが出て、まず雲で全く見えない部分と、薄い雲で下が見える部分を補正する必要があるが、結構難しい。また、熱帯の山岳地では、太陽が北から出ているか、南から出ているかによって、日本よりも極端な影の違いが出る。

まず、地形の影の問題だが、補正技術はある程度ならあり、PALSARについてはある程度出ている。ただ、森林タイプの分類やバイオマスの推定をPALSARで行うときに、それに堪えられるところまで行っているのか、十分な検証が必要である。また、検証の前に、そもそも標高データの精度が高くなければいけない。日本国内では国土地理院が作った標高データをはじめ、いろいろあるのだが、熱帯になると数が非常に少ない。例えば  $TM^{92}30m$  ぐらいのメッシュサイズに対応できるのは、日本のセンサである ASTER<sup>93</sup>の GDEM<sup>94</sup>であるが、

<sup>92</sup> Thematic Mapper : 画像用放射計

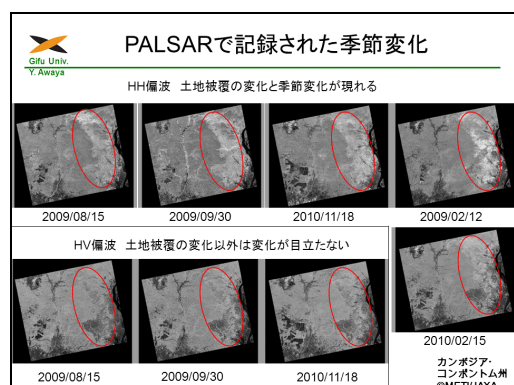
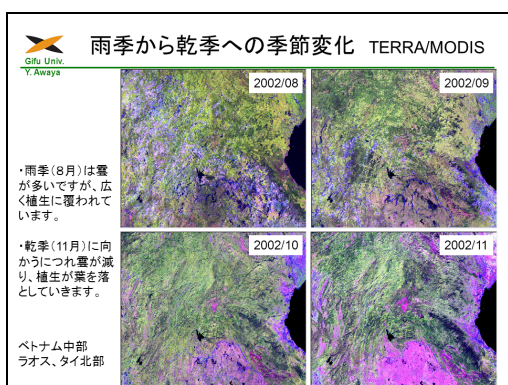
<sup>93</sup> Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer : 可視から熱赤外領域までに 14 バンドを有する高性能光学センサ

これも光学センサなので、雲の多い湿潤熱帯では使用が難しいという問題がある。



次に、季節変化である。私は熱帯の季節林を扱ったことがないので、北海道の苫小牧のデータを使っているが、落葉林が芽吹きだと全体が緑色になる。10月ぐらいに紅葉し、また落葉するという季節変化がある。熱帯の季節変化は、気温ではなく水分の変化、すなわち乾燥によって落葉が起こるので少し話が違いますが、要は、これらのデータを分類して同じ結果が出てくるのかどうか問題になる。

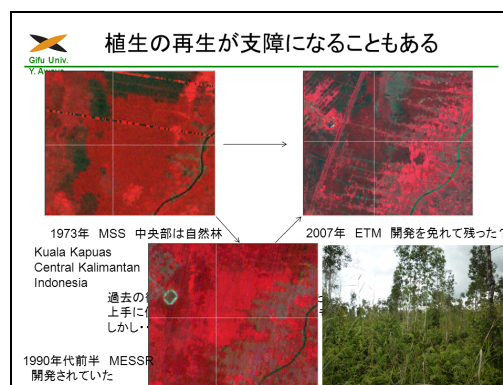
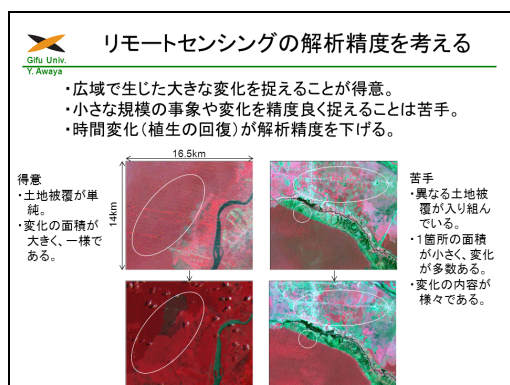
同じ場所でトレーニングエリアを取って分類した、1990年の4月、5月、8月、10月のデータを見ると、市街地B（工業団地）に植生が分類されているものと分類されていないものがある。カラマツの分類のされ方も違う。どれが正しいのかという精度検証はきちんと行っていないが、ざっと見ただけでも季節変化によって分類結果がかなり変わることが分かる。



MODIS のデータを、できるだけ雲がなくなるように 32 日分モザイクした。場所はベトナム

ム中部、タイの中央平原辺りだが、この地域の雨期のデータはほとんど使い物にならない。乾期に入って雲の被覆頻度が減ってくると、地面が見えるようになる。この地域の乾期の初めに当たる 11 月には、雲がほとんど出ないデータになっている。従って、乾期半ばのデータを使うとモニタリングできるのだが、乾期が 2～3 カ月のところだと、季節変化の影響が標高方向と緯度方向で出てしまう。その補正が非常に難しい。

カンボジアのコンポントムの合成開口レーダのデータを見ると、二つのチャンネルで季節変化の見え方が違う。HH<sup>95</sup>というチャンネルだと、変化が大きい場所があることが分かる。それに対して、HV<sup>96</sup>だとこの変化があまり見えない。このような変化が見えにくいチャンネルを上手に使う必要がある。



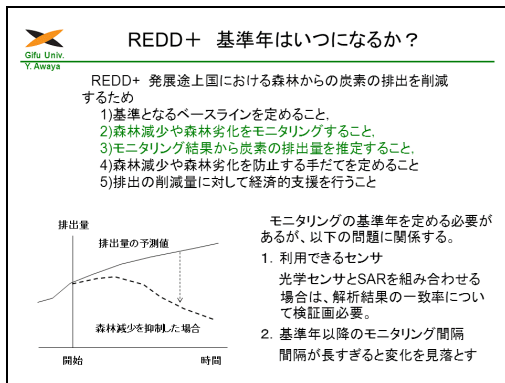
非常に大きな攪乱があった場合は、リモートセンシングでよく分かる。一方で、細かい変化が見えにくく、精度が下がる。リモートセンシングによる解析精度は、対象と変化の起こり方によって全く違ってくるのである。

また、どのようなタイムスパンでモニタリングするのが重要だ。1973 年と 2007 年を比べた場合に森林が残っているように見える部分も、その間のデータを見ると実は一回切られている。このように、スペクトル的には森林が残っているように見えるケースもある。

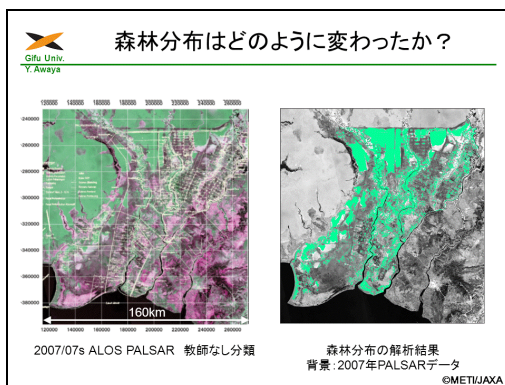
<sup>95</sup>送信・受信とも水平偏波

<sup>96</sup>送信が水平偏波、受信が垂直偏波





さらに、REDD の基準年がいつになるかで、使えるセンサのデータが違ってくる。それが解析方法を選択する幅を広げることにもつながるが、タイムスパンが長すぎると大きな問題になる。



メガライズプロジェクトのエリアだけ分類してあるが、80m 分解能で、MSS<sup>97</sup>のデータを目視で判読した結果、精度評価する適当な資料はないが、大体 95%の精度で森林面積が出ていると思われる。日本の MOS-1<sup>98</sup>/MESSR<sup>99</sup>の 50m 分解能のデータを目視で判読しても、90～95%の精度で判読できるだろう。

2000 年は、30m 分解能の Landsat のデータである。森林がどんどん減っているが、このデータだと分類精度が 90%を切っていると思われる。分解能が上がるにもかかわらず、解析精度は下がるのだ。

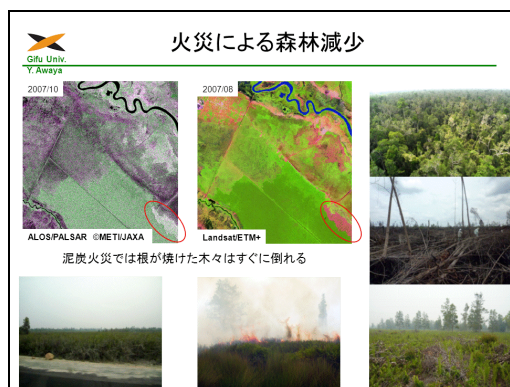
2007 年の PALSAR のデータを数値解析しても、やはり精度は 85～95%で、もしかすると 85%を切っているかもしれない。地上分解能が上がれば解析精度が上がるといほど単純ではない。要は、森林がまとまってあれば解析精度は上がり、分断化されていれば下がる

<sup>97</sup> multispectral scanner：マルチスペクトルスキャナー

<sup>98</sup> Marine Observation Satellite-1：海洋観測衛星 1 号

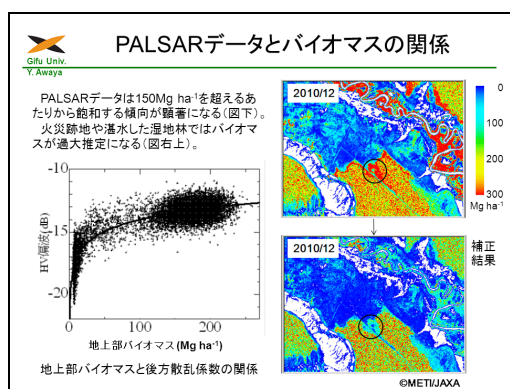
<sup>99</sup> Multi-spectral Electronic Self-scanning Radiometer：可視近赤外線放射計

という事例だが、大きなスケールでの変化だと森林の減少をとらえることができる。精度については検証を入れなければいけないが、恐らくある程度の利用に堪える程度の変化は出ている。



パランカラヤという町の近くで、2000 年 9 月ごろに森林火災があった。その後、火災と再生を繰り返すというプロセスをたどっていくのだが、泥炭火災の特徴は、根が燃えてしまうと木がすぐに倒れることだ。非常にダイナミックな森林変化が起きている。

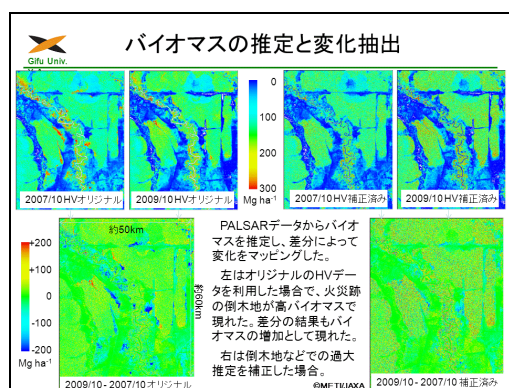
2009 年の Landsat の ETM+<sup>100</sup> と PALSAR のデータで解析した森林と火災の分布の細かいところを見ると、違っていることが分かる。きちんと比較すると、森林面積で恐らく 90% ぐらい一致すると思うのだが、細かいところで差が出る。使い物にならないのかというと、実は光学センサで解析しても、このぐらいの精度を出すのは大変なので、データの使い方を工夫することが重要と言える。



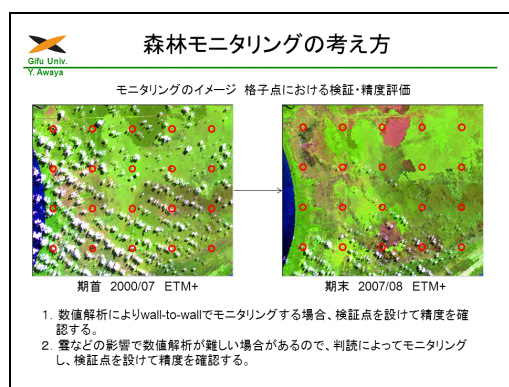
PALSAR はバイオマスを推定できると期待されている。ところが、バイオマスが増えてい

<sup>100</sup> Enhanced Thematic Mapper Plus : 固定された位置で直下観測するマルチスペクトル放射計

くと PALSAR のデータの明るさが飽和してしまうので、100t ぐらいまではある程度分かるが、そこから先は分からない。もう一つ、火災で木が倒れたにもかかわらず、バイオマスが大きく推定されてしまうという問題がある。しかし、バイオマスが過大に推定されている河畔林に補正をかけると、見た目にはそこそよくなる。



オリジナルのデータでバイオマスを推定した 2 シーンの差分と、明るさを補正してからバイオマスを推定した 2 シーンの差分を比較した。全体としては補正後の結果のほうが適切と思われる。しかし、補正後の結果では火災が分かりにくいことと、かえってノイズが載ってしまったことがあり、PALSAR のデータを扱うに当たっても、結構いろいろな難しい問題がある。そのようなものを森林総研では光学センサを中心にやっておられると思うが、リモートセンシングにおけるさまざまな問題を克服しながら、非常に広域をやっていかなければいけない。



モニタリングは、結局どのような方法でやっても 100% の精度では絶対に解析できない。従って、とにかくできるだけ統計的に精度がきちんと出せるような形で検証点を設ける必要がある。京都議定書で、日本国内の森林面積の変化をモニタリングしているが、空中写

真をグリッド単位で判読した後、地上で精度検証をしている。恐らくそのような形を取らないと、REDD でもリモートセンシングを使うことはまず無理だろう。



リモートセンシング利用上の注意点

1. 基準年によって、利用できるセンサが変わる。  
→森林モニタリングの方法が変わるかもしれない。
2. 精度を向上するために考慮すべき問題がある。
  - ・2時期のデータを比較する場合、同じ季節のデータを利用する。
  - ・2時期のデータの間隔が長すぎると、変化を把握できないことがある。
  - ・地形の影響(陰)を補正する必要がある。
  - ・斜め観測のデータは利用しないほうが良い。
3. 森林減少のスケールによって、モニタリングの精度が大きく変わると考えられる。
4. 解析結果を過信せず、現地調査に基づいて精度を評価し、森林減少面積と炭素収支を評価することが必要と考えられる。



最も重要なことは、解析結果を過信せずに、地上調査に基づいて精度を評価し、森林減少面積と炭素収支を評価することが必要だということに尽きる。

## 質疑応答

(Q1:山田) 先生は光学センサを用いて解析を進めようと言われたが、最後の方で PALSAR の話も少ししていただいた。そのデータを見ると、200t ぐらいでサチュレーションしてしまい、それ以上のものが判別しにくいということだったが、低地林の乾燥林では、1ha 当たり 300~400t ある地上部バイオマスはよくあると思う。そういうところの PALSAR によるバイオマス測定の見通しはどうなっているのか。

(栗屋) 少し誤解を招いたようだが、光学センサを使って行うのは森林総合研究所のスタンスで、私はできれば PALSAR を使った方がいいと考えている。湿潤熱帯では雲が多すぎて、光学センサだけではやはり無理だと思っているからだ。

ご質問のバイオマスの件については、アプローチが幾つかある。我々が行ったのは明るさ、後方散乱係数との関係で、これがサチュレーションすることは古くから知られている。この方法ではやはり難しいのだ。私たち環境総合のグループの中でディスカッションしているが、もし可能性があるとするれば、それは PALSAR で木の高さを計測することだろうと結論付けている。

しかし、一つ大きな問題がある。PALSAR に限らず SAR<sup>101</sup>で高さを推定するためには、二

<sup>101</sup> Synthetic Aperture Radar : 合成開口レーダ



つのデータが干渉しなければいけない。その干渉条件の中で不確定要素がいろいろあるようだが、観測された時間差が大きいと干渉しにくい傾向がある。風を含めたいろいろな要素で木が動き、形が変わってしまったものに対してはどうも干渉が非常に起きにくいらしく、今の PALSAR は回帰日数が長すぎるので難しい。例えば、SRTM<sup>102</sup>というスペースシャトルの SAR の場合は、機体の両側にアンテナを付けて、同時に干渉できるデータを取っている。この場合ならそこそこうまく標高データを出すことができているので、そのようなセンサーが日本の L-band で打ち上げられれば、恐らくバイオマス推定がかなりできるようになるだろう。ただ、山岳地の地形の問題があるので、当面は平地限定の話になると思う。

---

<sup>102</sup> Shuttle Radar Topography Mission