

宇宙からの森林火災の監視

竹内 渉^{*}

^{*} 東京大学生産技術研究所，東京都目黒区駒場 4 丁目 6 番 1 号
^{*} Institute of Industrial Science, University of Tokyo 6-1, Komaba 4-
 chome, Meguro, Tokyo 153-8505, Japan
^{*} E-mail: wataru@iis.u-tokyo.ac.jp

キーワード：炭素循環，生態系，熱赤外リモートセンシング
 JL 002/02/4202-0086 ©2008 SICPE

1. はじめに

1.1 森林火災監視の重要性

森林火災は，植生回復過程において土壌栄養の補給源として機能する働きがあるなど，生態系の中では基本的かつ自然な外乱要因のひとつである．近年，農耕に伴う野焼き，林野への放火など，人間活動が原因で起こる火災の数が急激に増加し，自然火災をしのぐ勢いであると報告されている¹⁾．森林の状態や動態を把握することは，地球の炭素循環や気候システムに対する知見を深める上で重要である．

森林火災による二酸化炭素の放出量は，年間で 60-150 億トンと見積もられており，地球全体での放出量のおよそ 25-50% に相当する²⁾．地球規模での炭素循環の解明には，貯留，発生源，吸収源の時空間的な正確な把握が必要であり，土地被覆，降雨量，積雪，日射量変化などの気候変化の範囲や度合を定量化する生態系プロセスモデルによって評価・予測が行われる³⁾．衛星リモートセンシングによる森林火災の監視は，葉面積指数 (LAI) や光合成有効放射 (PAR) などと並んで，生態系プロセスモデルに有効なデータを提供できる最も有望な計測応用分野の一つである．

1.2 リモートセンシングによる森林火災観測の概要

地球に存在する森林の面積は非常に広大であるため，効率性・安全性・即時性・費用対効果などの観点から，衛星リモートセンシングによる監視が極めて有効である．衛星による宇宙からの森林火災監視には，熱赤外のリモートセンシングが有効であり，空間分解能と時間分解能の観点から大きく二つに分けられる．

一つは，衛星観測が有する観測頻度および即時性を生かす方法で，空間分解能は 250m から 1km と比較的低いが，1日に2回同一地点を観測することができる米国の気象衛星 NOAA AVHRR, Aqua/Terra MODIS を用いるものである．1970年代以降30年以上の歴史を持ち，日本の GCOM, 米国の NPP, NPOESS といった類似センサによる，未来の観測ミッションへの継続性を確保する観点からも，MODIS を用いることは有効であると考えられる^(注1)．

もう一つは，10m から 30m 程度の比較的高い空間分解能を有する Landsat ETM, SPOT HRV, Terra ASTER などの環境観測センサを利用する方法である．これらのセ

ンサは，火災被害を空間的に詳細に把握するためには有効であるが，再帰日数が2週間程度と長く観測範囲が狭いため，大陸レベルを主眼とした広域観測には向いていない⁴⁾．また，データ量が膨大になることやデータの入手に多額の費用が必要となることも，観測の継続性の点で問題となる．

1.3 本稿の目的

以下では，森林火災検知の原理，現在世界中で最もよく用いられている MODIS による森林火災検知アルゴリズムの紹介，森林火災検知結果の公開，国際的な森林火災観測ネットワークの構築について順に述べる．

2. 森林火災情報の作成

2.1 森林火災検知の原理

森林火災検知には，3-15 μm 領域における熱赤外リモートセンシングが用いられる．宇宙からの観測では，大気中に含まれる水蒸気や二酸化炭素などの吸収帯域を避ける必要があるため，大気の窓と呼ばれる 4 μm と 10-12 μm 付近の波長帯がよく用いられる．

森林火災などの熱源からエネルギーが輻射されると，ウィーンの変位則により輻射のピーク波長が短波長側に移動し，中間赤外領域の 4 μm から放出されるエネルギーが増大する．これを熱異常値 (Thermal anomaly) として計測することで森林火災を検知することができる．

表1は，森林火災監視に使用される代表的なセンサの仕様を示した．MTSAT, MODIS, AVHRR のような気象衛星は，4 μm と 11 μm の両方にチャンネルがあるため，火災検知の原理が適用可能である．一方，陸域観測衛星である ASTER や ETM は 11.5 μm 領域に1つしかチャンネルを持っていないため，上記の原理を適用することができない．しかし，空間分解能が数十 m と高いため，1チャンネルの情報から火災源とそうでない領域を比較的容易に特定することができる．

表1 森林火災監視に利用される代表的なセンサの仕様．

センサ	空間分解能	時間分解能	観測幅
MTSAT	4km	30分	全球
MODIS	1km	0.5日	2300km
AVHRR	1.1km	0.5日	2800km
ASTER	90m	16日	60km
ETM	60m	16日	180km

(注1) NPOESS (<http://www.ipnoaa.gov/>)

留意する点は、1) ピーク波長が短波長側に移動すると昼間の観測において放射エネルギーの他に反射エネルギーも同時観測されること、2) $4\mu\text{m}$ 付近の大気窓領域は狭いため計測時の S/N 比を稼ぐことが難しいこと、3) センサ間で応答関数が微妙に異なるため同一の火災でも計測されるエネルギーが異なること、4) 火災の規模に比べてセンサの空間分解能が不十分な場合があること、などが挙げられる。

2.2 MODIS による森林火災検知アルゴリズム
現在、世界で最も広く用いられている森林火災検知アルゴリズムの例として、米国の気象衛星 Aqua と Terra に搭載されている MODIS を用いた例 (以下 MOD14 と呼ぶ) を式 (1), (2) に示した⁵⁾。この手法は、MODIS の前身に相当する NOAA AVHRR 用に開発した手法を MODIS 用にパラメタのチューニングを行ったものである⁶⁾。

MOD14 は、MODIS の $4\mu\text{m}$ と $11\mu\text{m}$ の熱赤外チャンネルから得られるデータを利用している。MODIS は、 $4\mu\text{m}$ 領域にスペクトル分解能の異なる 2 つのチャンネル 21 と 22 (ファイアーチャンネルと呼ばれる) を搭載している点が他のセンサにない特徴である。チャンネル 21 は観測感度が 500K で飽和するのに対し、チャンネル 22 は 331K までしか観測できない。しかし、チャンネル 22 の方がノイズの影響を受けにくいいため、飽和していない時にはチャンネル 22 のデータを T_{22} として使用する。チャンネル 22 データが飽和しているもしくは欠損している場合には、チャンネル 21 のデータを T_{22} の代替として使用する。 T_{31} はチャンネル 31 のデータから得られる。

$$\begin{cases} T_{22} > \overline{T_{22}} + 4\delta_{\overline{T_{22}}} & \text{or} & T_{22} > 320K & (315K \text{ at night}) \\ & \text{and} & & \\ T_{31} > 360K & & & (335K \text{ at night}) \end{cases} \quad (1)$$

or

$$\begin{cases} \Delta T_{23} > \overline{\Delta T_{23}} + 4\delta_{\overline{\Delta T_{23}}} & \text{or} & \Delta T_{23} > 20K & (10K \text{ at night}) \\ & \text{and} & & \\ T_{31} > 360K & & & (335K \text{ at night}) \end{cases} \quad (2)$$

where $\Delta T_{23} = T_{22} - T_{31}$

式 (1), (2) において T_{22} はチャンネル 22 の値を、 ΔT_{23} はチャンネル 22 からチャンネル 31 の差を、 $\overline{T_{22}}, \overline{\Delta T_{23}}$ は T_{22} と ΔT_{23} の近傍 4 画素の平均値を、 $\delta_{\overline{T_{22}}}, \delta_{\overline{\Delta T_{23}}}$ は T_{22} と ΔT_{23} 近傍 4 画素との偏差の平均値をそれぞれ表している。

上式に示された条件は、地球全体のあらゆる種類の森林火災に対して適用しようとするものであり、観測条件の違

いによって様々な問題が生じることが指摘されている。そこで、上式に示された条件に加えて、誤検知画素の除去をより効果的に行うために次のような補正を加えている⁵⁾。

1. MODIS に雲検知システムに準じて雲除去を行う
2. 空間分解能の劣化を防ぐため観測角が 45 度以上の画素を解析から除外する
3. 大気上端の見かけ上の輝度温度値 T_{22}, T_{31} に対して水蒸気による吸収の補正を行う
4. 衛星-対象画素-太陽の幾何学的関係から水面などでの照り返し (サングリント) の領域を除外する

2.3 森林火災検知結果例

MOD14 による森林火災検知結果例を下に示した。森林火災分布は主要な MODIS 火災プロダクトの 1 つであり、緯度経度情報とともに 1 画素に 6 クラスのいずれかのフラグが割り振られており、その内容は、水域、雲、晴れた陸域、低信頼度の火災 (0-30%)、中信頼度の火災 (30-70%)、高信頼度の火災 (70-100%) の 6 つである。

20050705.FIRE.txt					
LAT	LON	REF ₂	T ₂₂	T ₃₁	CONF
31.97	117.25	0.265	320.2	295.9	57
31.93	117.25	0.270	322.5	293.9	73
31.93	117.27	0.271	328.0	296.2	90
31.83	117.31	0.251	321.9	294.5	27
31.47	118.41	0.270	313.7	294.4	55
29.81	112.89	0.246	315.1	293.0	26
...					

データ容量を低減するための工夫として、解析範囲の中から火災であると検出された画素のみを抜き出し、メタデータとして、緯度 (LAT)、経度 (LON)、チャンネル 2 の反射率 (REF₂)、T₂₂ の温度値、T₃₁ の温度値、信頼度 (CONF) の 6 つの情報をテキスト形式で提供している。信頼度は 0 から 100% の範囲で火災検知結果の確からしさを示したものであり、その程度に応じて低信頼度の火災 (0-30%)、中信頼度の火災 (30-70%)、高信頼度の火災 (70-100%) の 3 つの段階に分類している。

3. 森林火災情報の利用

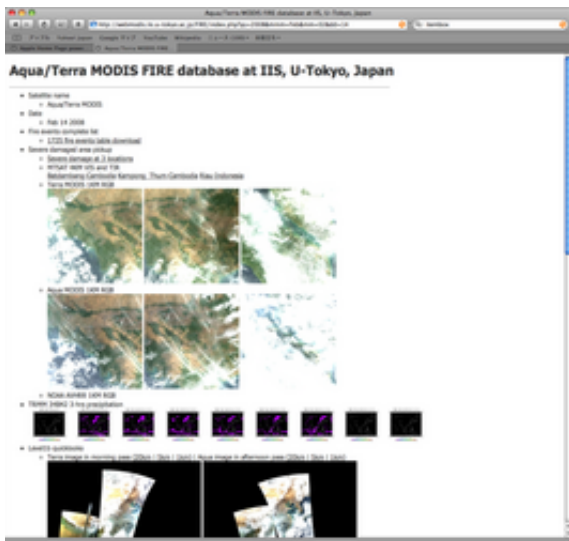
3.1 森林火災検知結果の公開

衛星を用いた森林火災検知結果は、Anonymous FTP によるダウンロード^(注2)もしくはウェブサイト上でのクイックルック閲覧システム^(注3)などによって一般に公開されているものが多い。図 1 は、東京大学生産技術研究所における森林火災検知結果地図情報の提供例であり、2008 年 2 月 14 日に起こった森林火災の検知結果を示している。

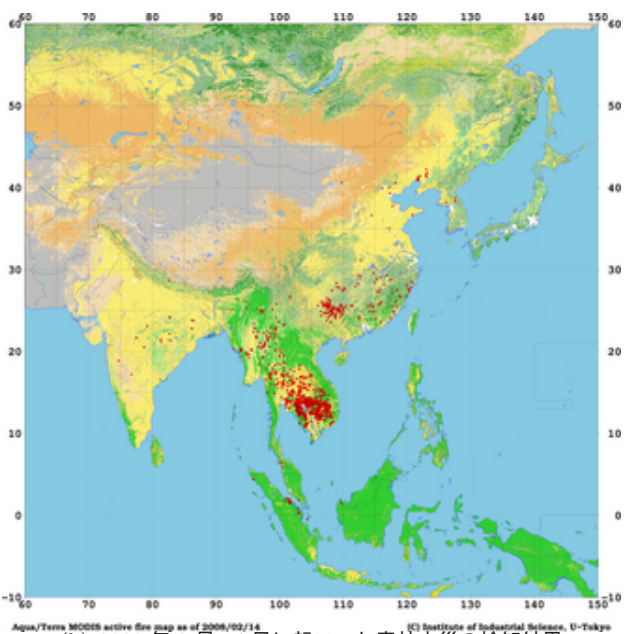
大規模な火災によって植生が消失した地域を自動的に抽出し、地理情報として取り出す仕組みも既に整えられている。一例として、2006 年 5 月 25 日に中国とロシアの国境付近 (北緯 51.5 度、東経 126.5 度) で起きた大規模火災の例を図 2 に示した。図

(注2) <ftp://webmodis.iis.u-tokyo.ac.jp/{AIT,IIS}/FIRE/>

(注3) <http://webmodis.iis.u-tokyo.ac.jp/FIRE/>



(a) 火災情報提供ウェブサイト

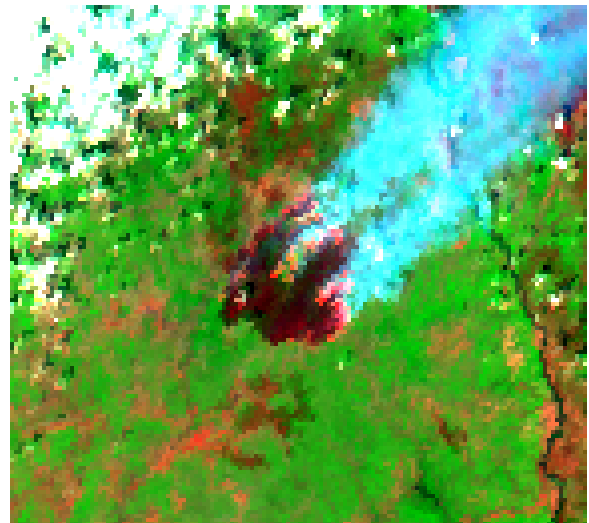


(b) 2008年2月14日に起こった森林火災の検知結果

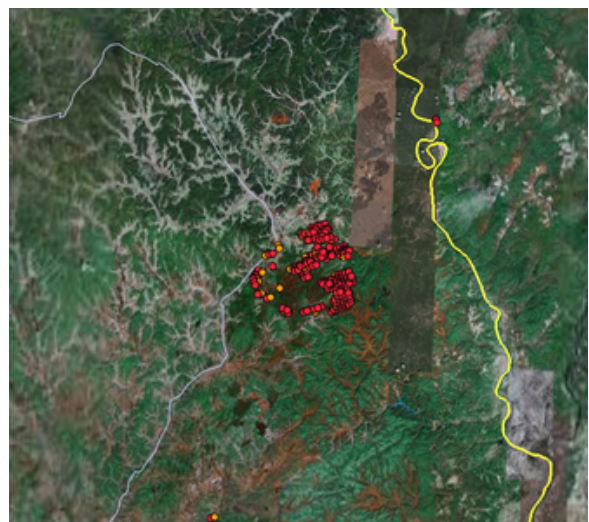
図1 ウェブによる森林火災検知結果地図情報の提供 (<http://webmodis.iis.u-tokyo.ac.jp/FIRE/>)

2-(a) 中央の黒い部分が 30km 四方にわたる火災跡であり、中央から右上部にかけて火災煙が見える。図 2-(b) の画像中央部に集積する点群が火災検知結果であり、Google Earth による背景画像と重ね合わせた。火災プロダクトは、KML(Keyhole Markup Language)^(注4)フォーマットに変換されたものも公開されており、Google Earth と直ちに重ね合わせて表示することができる。森林火災情報としては、火災の検知結果、火災の規模と種類の他に、毎時観測が可能な気象衛星ひまわりを用いた火災延焼時間の推定や⁷⁾、過去 30 年間の蓄積がある NOAA AVHRR を用いて 10 年以上の長期間にわたる植生の回復観測⁸⁾のような取り組みも進みつつある。

(注4) KML (<http://earth.google.com/kml/index.html>)



(a) MODIS 可視画像 (北緯 51.5 度, 東経 126.5 度)



(b) 火災検知結果 (Google Earth による背景画像)

図2 2006年5月25日に中国とロシアの国境付近(北緯51.5度, 東経126.5度)で起きた大規模森林火災。図(a)中央の黒い部分が30km四方にわたる火災跡である。

3.2 国際的な森林火災観測ネットワークの構築

図3は、東京大学生産技術研究所と海洋研究開発機構 地球環境フロンティア研究センターで開発された、衛星観測とモデルの統合によるアジアの環境災害評価システムを示している¹⁰⁾。衛星観測については、アジア地域を対象としてMODIS, AVHRR データ等の衛星データを受信、転送、蓄積、処理するネットワークシステムを構築した⁹⁾。対象となる森林火災の抽出(図3の「衛星データによる主題図作成」)は、東京(東京大学生産技術研究所)およびバンコク(アジア工科大学院)で受信されたMODIS データを利用して行い、受信後6時間程度で炭素循環モデルであるSym-cycleへの入力データとして利用される。このモデルの結果として、森林火災の延焼予測、二酸化炭素放出量の評価、植生回復過程の評価・予測を示すことができる。森林火災情報

を提供するシステムは森林総合研究所(日本)^(注5)、農務省(米国)^(注6)、NASAゴッダード研究センター(米国)^(注7)、メリーランド大学(米国)^(注8)など世界中に複数存在するが、衛星観測とモデルとの統合を行っている点が本システムの大きな特長である。

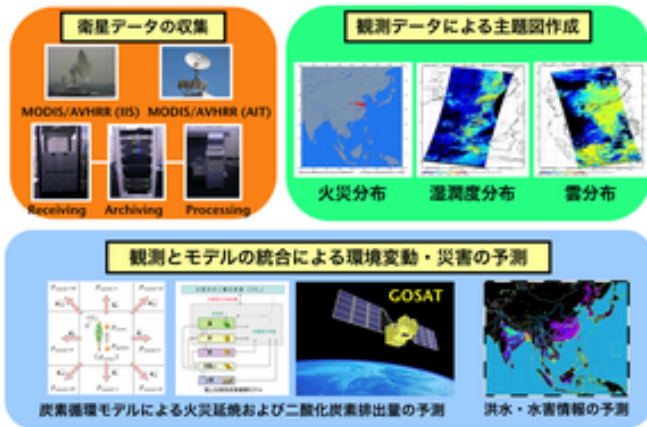


図3 衛星観測とモデルの統合によるアジアの環境災害評価システム

4. さいごに

本稿では、宇宙からの森林火災の監視について、森林火災監視の重要性と概要、森林火災検知の原理、代表的な森林火災検知アルゴリズムの紹介、森林火災検知結果の公開、国際的な森林火災観測ネットワークの構築について述べた。衛星を用いた森林火災検知結果は、ウェブサイト上で一般に公開されているものが多いが、最もよく利用されているMODISをはじめとして、衛星から得られる情報には次のような問題点がある。

1. 衛星の空間分解能を下回る小規模の火災や泥炭性湿地での林床火災の検知は難しい。
2. 衛星が通過する時間に実際に燃えている火災しか検知することができない。
3. 火災検知に用いているアルゴリズムの性能は、火災規模、火災温度、衛星観測角、生態系の種類、観測日時、火災煙の種類などに大きく左右される。
4. サングリント、活火山、大規模工業地帯などが森林火災とともに異常値として検知される。

衛星リモートセンシングから得られる情報は、空間分解能と時間分解能はトレードオフの関係にあるため、実際には目的に応じてセンサを使い分ける必要がある。時間分解能の高いMODISなどのセンサで森林火災を検知し、詳細な状況把握は空間分解能の高いLandsatなどのセンサを併用して行う手法が、実用的に多く行われている。

今後は、時空間分解能の異なるセンサから得られた情報の組み合わせや、現場で取得された火災履歴情報などを用いてアルゴリズムの高精度化を継続していくことが求められる。そのためには、個々人の研究者による取り組みのみならず、宇宙航空

研究開発機構(JAXA)が主導しているセンチネルアジア^(注9)のような国際的なネットワークを通じて、情報共有と連携した研究開発体制づくりが必須である。

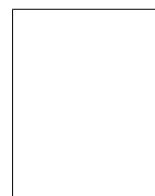
----- (2008年9月9日受付)

参考文献

- 1) UNDP, UNEP, World Bank and WRI, 2001. World Resources 2000-2001. Elsevier Science, 87-102.
- 2) Parry, Martin L. (eds.) IPCC, 2007. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- 3) Itoh, A., 2005. Modelling of carbon cycle and fire regime in an east Siberian larch forest. *Ecological Modelling*, 187, 121-139.
- 4) Garcia-Haro, F. J., Gilabert, M. A., and Melia, J., 2001. Monitoring fire-affected areas using Thematic Mapper data. *Int. J. Remote Sens.*, 22(4), 533-549.
- 5) Giglio, L. et al., 2003. An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS. *Remote Sens. Environ.*, 87, 273-282.
- 6) Kaufman, Y. J. et al., 1998. Potential global fire monitoring from EOS-MODIS. *J. Geophys. Res.*, 103: 32215-32238.
- 7) Yusuke Matsumura, Wataru Takeuchi and Yoshifumi Yasuoka, 2007. Evaluation of wildfire duration time over Asia using MTSAT imagery. In: *Proceed: 28th Asian conference on remote sensing 2007 (ACRS)*: Kuala Lumpur, Malaysia.
- 8) 竹内涉, 中野智子, 越智士郎, 安岡善文, 2007. サブピクセル土地被覆特性解析による西シベリア湿地性森林の火災地回復観測. *日本リモートセンシング学会誌*, 27(1), 13-23.
- 9) 竹内涉, 根本利弘, P. J. Baruah, 安岡善文, 2005. アジア環境災害観測のための衛星データオンライン配信システムの構築. *写真測量とリモートセンシング*, 44(2), 68-72.
- 10) 竹内涉, 安岡善文, 2006. Aqua/Terra MODIS データを利用したアジア森林火災の準実時間観測. *写真測量とリモートセンシング*, 45(5), 59-63.

[著者紹介]

竹内涉



1975年11月20日生。1999年東京大学工学部土木工学科卒業。2004年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了(社会基盤工学専攻, 博士(工学))。同年東京大学生産技術研究所入所, 特任研究員を経て, 2005年同特任助手, 2007年同講師。2007年アジア工科大学院(AIT, タイ王国)客員講師, JICA短期専門家(リモートセンシング, タイ王国)として派遣。専門は環境・災害リモートセンシング。2001年計測自動制御学会より論文奨励賞を, 2001年, 2002年日本写真測量学会より学術講演会論文賞を, 2005年日本写真測量学会より学会奨励賞をそれぞれ受賞。日本写真測量学会, 日本リモートセンシング学会, 米国写真測量学会, 米国物理学連合の各会員。

(注5)ANDES (<http://www.affrc.go.jp/ANDES/>)
 (注6)USDA (<http://activefiremaps.fs.fed.us/>)
 (注7)NASA/GSFC (<http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/firemaps/>)
 (注8)UMD (<http://maps.geog.umd.edu/>)

(注9)Sentinel Asia <http://dmss.tksc.jaxa.jp/sentinel/>